

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: 90 (1999)

Heft: 21

Artikel: Hochtemperatur-Supraleiter vor der Anwendung : neue Möglichkeiten für die Energietechnik

Autor: Schneider, Daniel / Köbel, Stefan / Gauckler, Ludwig J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902000>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

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

Hochtemperatur-Supraleiter vor der Anwendung

Neue Möglichkeiten für die Energietechnik

13 Jahre nach ihrer Entdeckung haben die oxidischen Supraleiter einen Stand erreicht, der interessante Anwendungen ermöglicht. Dank der stetigen Weiterentwicklung von Werkstoffen und Herstellungstechnologien ist es bereits gelungen, aus den spröden keramischen Supraleitern kilometerlange Bänder herzustellen. Die Markteinführung von Hochtemperatur-Supraleitern scheint nur eine Frage der Zeit zu sein.

Seit der Entdeckung der Supraleitung zu Beginn unseres Jahrhunderts bis Mitte der achtziger Jahre schien der Effekt der verlustfreien Stromleitung einigen Metallen und Metallegierungen vorbehalten zu sein. Diese klassischen Supraleiter haben den Nachteil, erst bei sehr tiefen Temperaturen von höchstens 20 K (-253°C) den elektrischen Widerstand zu verlieren. Da die Kühlung auf derartig niedrige Temperaturen aufwendig und teuer ist, erwies sich die grosstechnische Anwendung der Supraleitung als unpraktikabel. Die lange Zeit gültige theoretische Obergrenze von 30 K wurde erst 1986 durch die Entdeckung einer bereits bei 35 K supraleitenden Kupferoxid-Keramik durchbrochen. Damit gewann der Traum, elektrische Energie ohne Verluste über grosse Distanzen transportieren zu können, erneut an Aktualität. Fast nichts schien mehr unmöglich, viele Anwendungen der Elektrizität wurden neu überdacht. Und als ein Jahr später bereits Supraleitung bei Temperaturen von kostengünstigem flüssigem Stickstoff (77 K) gemessen wurde, schienen die Anwendungsmöglichkeiten grenzenlos. Vergessen wurde dabei sehr schnell die Erkenntnis aus der Geschichte der Werkstoffe, dass die Einführung einer neuen Werkstoffklasse in die breite Anwendung etwa 50 Jahren benötigt.

Adresse der Autoren

Dipl. Ing. Daniel Schneider, Dipl. Ing. Stefan Köbel, Prof. Dr. Ludwig J. Gauckler
ETH Zürich, Departement für Werkstoffe
Lehrstuhl für nichtmetallische anorganische
Werkstoffe, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich

Nach 1986 verlief die Entdeckung immer neuer Werkstoffe, die bei immer höheren Temperaturen supraleitend wurden, sehr spektakulär. Dagegen erfolgte die stetige Entwicklung dieser Werkstoffe zu verwertbaren Endprodukten ausserhalb der Schlagzeilen. Fast unbemerkt haben Prototypen die Machbarkeit zahlreicher Anwendungen bewiesen. Um kommerziell erfolgreich zu sein, sind sie heute aber allesamt noch zu teuer, sowohl in der Herstellung als auch im Betrieb. Was in den letzten 13 Jahren für die Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) erreicht wurde und was in den nächsten Jahren noch erreicht werden muss, um im Markt erfolgreich zu sein, soll im folgenden skizziert werden. Es werden die Eigenarten der supraleitenden Werkstoffe und deren Verarbeitung zu Produkten sowie einige erfolgversprechende Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

Charakterisierung der Werkstoffe

Die wichtigsten Tieftemperatur-Supraleiter sind Niob-Titan (NbTi) und Niob-Zinn (Nb_3Sn). Sie sind seit den sechziger Jahren bekannt, und durch die Entwicklung der entsprechenden Verarbeitungstechniken in den letzten dreissig Jahren konnten erstmals wirtschaftlich lohnende Anwendungen produziert werden. Ihr grosser Nachteil ist die aufwendige Kühlung mit flüssigem Helium, die notwendig ist, um Temperaturen von 4,2 K zu erreichen. Dies ist auch der Grund, weshalb wir heute die Tieftemperatur-Supraleiter nur in vereinzelten Nischen finden, zum Beispiel in Kernspinresonanz(NMR)-Tomographen oder Teilchenbeschleunigern.

Die hohe kritische Temperatur, die Temperatur, bei der das Material supraleitend wird, ist daher die wichtigste Eigenschaft der Hochtemperatur-Supraleiter. Für sie liegt diese Temperatur mit 92 bis 134 K weit höher als für die Metalle. Dies bedeutet, dass schon durch die Kühlung mit billigem, leicht erhältlichem und einfach handhabbarem flüssigem Stickstoff Supraleitung erhalten werden kann. Der grosse Nachteil dieser Materialien liegt in den schwierigen Herstellungsprozessen, die im folgenden Abschnitt etwas näher behandelt werden.

Neben der vielbeachteten kritischen Temperatur gibt es weitere Parameter, die den supraleitenden Zustand charakterisieren. Ein Supraleiter kann nur eine bestimmte Menge Strom tragen. Wird eine kritische Stromdichte überschritten, so verwandelt er sich in einen Normalleiter. Auch bricht die Supraleitung zusammen, wenn ein von aussen angelegtes Magnetfeld einen kritischen Wert überschreitet. Kritische Temperatur, kritisches Magnetfeld und kritische Stromdichte sind voneinander abhängig und bilden eine für jedes Material charakteristische Grenze zwischen supra- und normalleitendem Zustand. Für Anwendungen in der Energietechnik ist es wichtig, dass der Supraleiter einen möglichst grossen Strom tragen und in einem hohen äusseren Magnetfeld und bei möglichst hohen Temperaturen betrieben werden kann. Die Werkstoffforschung versucht daher, Zusammensetzungen und Herstellungstechnologien zu finden, die hohe kritische Stromdichten, hohe kritische Magnetfelder und hohe kritische Temperaturen erlauben.

Bei oxidischen Hochtemperatur-Supraleitern liegen die kritischen Temperaturen besonders hoch. Das Besondere an diesen Werkstoffen ist, dass es sich nicht um Metalle, sondern um Metalloxide handelt. Dabei sind ihre chemischen Zusammensetzungen meist eine relativ komplexe Kombination von drei, vier oder sogar noch mehr Oxiden.

Die atomaren Bausteine in solch komplexen Oxidverbindungen ordnen sich nun nicht willkürlich an, sondern es bilden sich ähnlich den Tonmineralien Kristallstrukturen mit ausgeprägter Schichtabfolge aus. Dies äussert sich auch in der

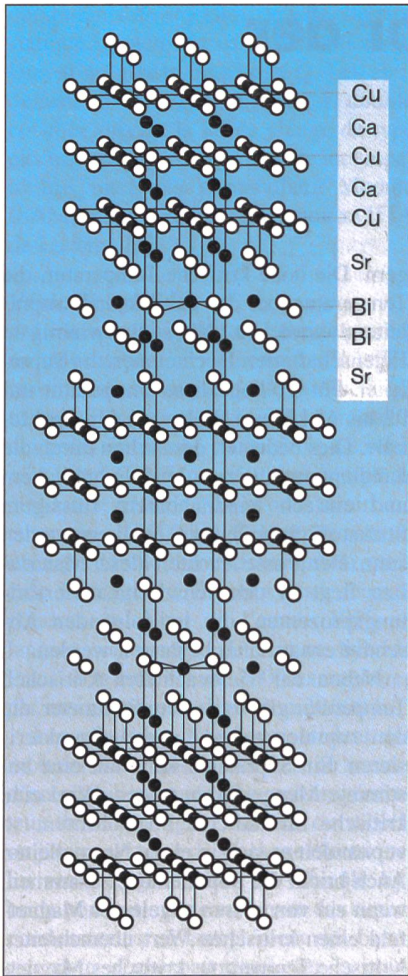


Bild 1 Die Schichtstruktur eines Hochtemperatur-Supraleiters am Beispiel von $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$

äusseren Form der Werkstoffkörner dieser Verbindungen, die meist ein plättchenförmiges Aussehen zeigen. Charakteristisch für die Hochtemperatur-Supraleiter ist also ihre ausgeprägte Schichtstruktur. Im Kristallgitter wechseln sich dabei Kupferoxidschichten, die den Suprastrom tragen, mit ausgeprägten Isolationsschichten ab. (Bild 1) Diese Eigenheit der kristallographischen Struktur hat eine starke Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften zur Folge. Die Stromdichte zum Beispiel ist in Richtung der Kupferoxidschichten rund 100- bis 1000mal grösser als senkrecht dazu. Auch trägt das kritische Magnetfeld parallel zu den Schichten ein Mehrfaches von demjenigen senkrecht zu den Schichten.

Ob ein Supraleiter hohe kritische Eigenschaften erreicht, wird durch zwei wichtige Verhaltensweisen bestimmt. Zum einen braucht es eine gute Verankerung der sogenannten Flussschläuche und zum anderen eine gute Kopplung von einem Korn zum nächsten. Um ersteres zu verstehen, muss das Verhalten eines

Supraleiters in einem Magnetfeld betrachtet werden. Neben dem widerstandsfreien Stromtransport zeichnen sich Supraleiter noch dadurch aus, dass sie Magnetfelder aus ihrem Innern verdrängen. Dies gilt allerdings nur für sehr kleine Felder. Sobald eine erste kritische Grenze überschritten ist, beginnt das Magnetfeld in den Supraleiter in Form von Schläuchen portionenweise einzudringen. Diese Flussschläuche (Bild 2) tragen jeweils eine konstante Menge magnetischen Flusses von $h/2e$. Fliesst nun Strom durch den Supraleiter, wollen sich diese Flussschläuche auf Grund der Lorentz-Kraft bewegen. Diese Bewegung der Flussschläuche würde aber zu Energieverlusten führen, was gleichbedeutend mit einem elektrischen Widerstand wäre. Die Flussschläuche müssen also festgehalten werden. Als Verankerungen für die Flussschläuche kommen Korngrenzen (Grenzflächen zwischen benachbarten Kristalliten), Ausscheidungen oder andere Störungen im Kristallgitter in Frage.

Die zweite wichtige Verhaltensweise ist ein guter Übergang des Suprastromes von Korn zu Korn. Das Gefüge der Supraleiter besteht aus vielen einzelnen Körnern, die durch Korngrenzen voneinander getrennt werden. Wenn die Korngrenzen als Hindernis für den Suprastrom wirken, und dies gilt für praktisch alle Werkstoffe, so spricht man von einer schwachen Kopplung (Weak Links) der Körner. (Bild 3) Die Anzahl und Verteilung der Korngrenzen sowie ihre Durchlässigkeit für den Suprastrom wird im wesentlichen durch die Herstellung und manchmal durch die Zusammensetzung bestimmt.

Die wichtigsten supraleitenden Werkstoffe, die sich für die technische Anwendung eignen, sind in Tabelle I dargestellt. Inzwischen sind mehrere hundert verschiedene supraleitende Verbindungen bekannt.

Die $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Supraleiter zeichnen sich durch gutes Haftverhalten der Flussschläuche aus, weshalb sie sich für den Einsatz in hohen äusseren Magnetfeldern eignen. Sie zeigen allerdings auch schlechte Kopplung (Weak Links), was zu niedrigen kritischen Stromdichten führt und somit zu niedriger Stromtragfähigkeit, sobald der Strom über die Distanz einiger Korngrössen (einige Millimeter) geführt werden muss. Mit speziellen Herstellungsverfahren versucht man grossflächige, einkristalline Oxidschichten zu entwickeln, um diesem Nachteil beizukommen.

Die Supraleiter der Bismuth-Familie sind die einzigen, die sehr gute Kopplung zeigen. Es ist also möglich, grosse Bauteile und lange Drähte herzustellen, ohne dass die Stromdichte zu stark reduziert wird. Die beiden wichtigsten Verbindungen, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ und $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, zeigen allerdings beide schlechtes Haftverhalten der Flussschläuche, weshalb die maximal erreichbaren Stromdichten wiederum begrenzt sind.

Neben diesen drei wichtigsten Hochtemperatur-Supraleitern sind noch zwei weitere Werkstoffe von Bedeutung. Die Verbindung $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ zeigt eine hohe kritische Temperatur und ähnlich gutes Haftverhalten wie $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Allerdings ergeben sich grosse Probleme bei der Herstellung, da Thallium leicht verdampft und hochgiftig ist. $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ ist die Verbindung mit der höchsten gemessenen kritischen Temperatur (134 K). Niedrige kritische Magnetfeldstärken und Stromdichten verhindern allerdings die Anwendung dieses Supraleiters.

Herstellung

Die Verfahren zur Herstellung von supraleitenden Bauteilen lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen. Bei der Produk-

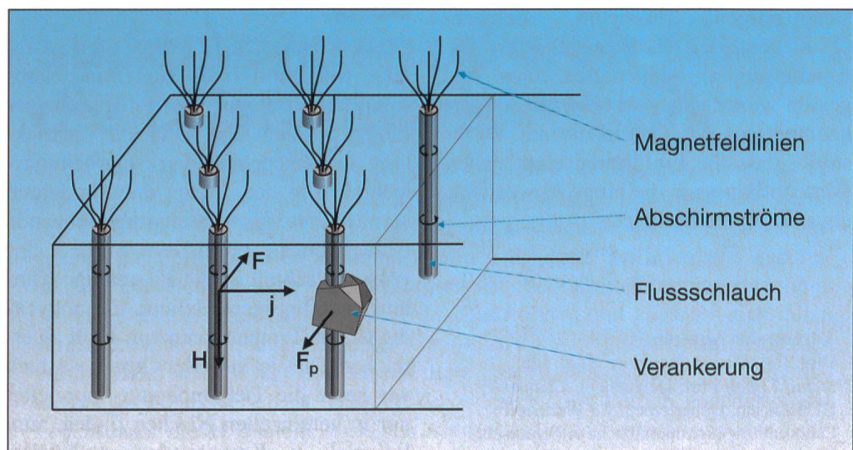


Bild 2 - Verhalten eines Supraleiters im Magnetfeld

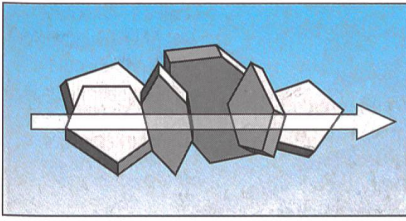


Bild 3 Stromfluss durch ein polykristallines Gefüge

tion von Dickfilmen ($>10\mu\text{m}$), Drähten/Bändern und Massivteilen werden oxidische Pulver durch Schmelzen verdichtet. Dünnschichten werden über Aufdampfverfahren hergestellt; dabei werden als Ausgangsstoffe die reinen Elemente eingesetzt. Die beabsichtigte Anwendung bestimmt, welche supraleitende Verbindung zu welchem Endprodukt verarbeitet wird.

Wie für jeden guten Leiter steht natürlich auch für den Supraleiter die Verarbeitung zu einem möglichst langen Draht im Vordergrund. Aus Drähten können dann Magnetspulen gewickelt und Übertragungskabel hergestellt werden. Dünne Filme kommen zur Hauptsache als Magnetfeldsensoren, Hochfrequenzfilter und Abschirmungen zur Anwendung. Mit massiven Bauteilen wird zumeist die magnetische Levitation ausgenutzt. Sie dienen dann als reibungsfreie Lager oder ebenfalls als Abschirmung.

Oxidische Werkstoffe wie die Hochtemperatur-Supraleiter antworten schon auf kleinste Deformationen mit einem Spröbruch. Sie lassen sich also nicht so leicht mechanisch verarbeiten wie die duktilen Metalle. Für die Hochtemperatur-Supraleiter mussten daher spezielle Verfahren entwickelt werden, die es erlauben, aus spröden, keramischen Werkstoffen flexible und homogene Endprodukte zu erzeugen.

Während für massive Bauteile herkömmliche keramische Formgebungsverfahren wie Schlickergiessen und Pressen von Pulvern mit anschließender Wärmebehandlung (Sinterung) oder Schmelzen verwendet werden, wurden für Drähte und Dünnschichten neue Verfahren entwickelt. Das Opit-Verfahren (Oxide Powder in Tube) erlaubt die Herstellung von kilometerlangen Drähten aus

Bismuth-Supraleitern. Für die Produktion von Dünnschichten aus Yttrium-Supraleitern werden das Ibad-Verfahren (Ion Beam Assisted Deposition) und das Rabbits-Verfahren (Rolling-assisted Biaxially-textured Substrate) angewendet. Allen drei Verfahren ist gemein, dass sie im Gefüge des Supraleiters eine Textur erzeugen. Bei guter Textur sind die einzelnen Körner des Gefüges alle gleich ausgerichtet. Die einzelnen Körner liegen somit optimal zueinander, so dass der Suprastrom ohne grosse Probleme von Korn zu Korn fließen kann. Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Weak Links werden so vermieden oder zumindest reduziert.

Im Opit-Prozess wird das vorkalzierte Supraleiterpulver, in diesem Fall in der Regel $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, in feine Silberhörnchen abgefüllt und zugeschweisst. Dieses Röhren inklusive Supraleiter wird anschliessend zu einem Draht gezogen. Mehrere dieser Drähte werden dann möglichst dicht zu einem Bündel zusammengefügt, das nun wiederum zu einem Multifilamentdraht gezogen wird. Dieses Drahtbündel wird seinerseits wieder gewalzt und einer Wärmebehandlung unterzogen, dem sogenannten Reaktionsglühen. (Bild 4) Diese Drähte oder Bänder erreichen technische Stromdichten* von rund 8000 A/cm^2 über Längen von 1250 m . Im Vergleich dazu erreichen Standard-Kupferdrähte recht bescheidene 1000 A/cm^2 .

Die Entwicklung der beiden wichtigsten Beschichtungsverfahren für dünne einkristalline Filme werden bisher nur im Labor angewendet. Beim Ibad-Verfahren wird ein Blech aus einer Nickelbasis-Legierung als mechanisch stabile Unterlage für den Supraleiter verwendet. Darauf wird eine Zirkonoxidschicht (YSZ) abgeschieden, die durch einen zusätzlichen zweiten Ionenstrahl in eine zum Substrat parallele Richtung ausgerichtet wird. Dieser Vorgang ist der eigentliche Ibad-Verfahrensschritt, mit dem eine perfekt texturierte YSZ-Schicht erhalten wird. Eine zweite Oxidschicht aus Ceroxid (CeO_2) übernimmt die Orientierung der ersten Oxidschicht und bildet zusammen mit dieser einen ausreichenden che-

mischen Schutz zwischen Supraleiter und Nickelbasis-Legierung. Auf das CeO_2 wird schliesslich mittels einer herkömmlichen Laserabscheidung der Supraleiter aufgetragen. (Bild 5) So entsteht ein mehrschichtiger Verbundwerkstoff, dessen supraleitender Querschnitt allerdings nur den hundertsten Teil des Gesamtquerschnitts ausmacht. Dieser texturierte, fast einkristalline Supraleiter-Dünnschicht zeigt nun keine Probleme mehr in bezug auf die Korngrenzen, das Auftreten von schwachen Kopplungsstellen kann also auf diese Weise vermieden werden, was zu hervorragenden Eigenschaften bezüglich der kritischen Stromdichte und des kritischen Magnetfeldes führt. Die technische Stromdichte liegt mit 10000 A/cm^2 in der Grössenordnung der Opit-Drähte, allerdings nur für Filme von einem Meter Länge. Verbesserungsmöglichkeiten liegen hier in der Verwendung dünnerer Nickelsubstrate und der Erhöhung der Gleichmässigkeit der Supraleiterschicht.

Im Gegensatz zum Ibad-Verfahren wird beim Rabbits-Verfahren eine kristalline Textur durch spezielle Walztechniken bereits in das sehr dünne Substratblech eingebracht. Diese Textur wird den auf dem Substrat abzuschneidenden CeO_2 - und YSZ-Schutzschichten übergeben, die sie dann ihrerseits an die abschliessende Supraleiterschicht weitergeben. Bei Schichtdicken von $0,5$ bis $2\mu\text{m}$ (Bild 6) werden in kleineren Bauteilen technische Stromdichten von 100000 A/cm^2 erreicht.

Anwendungen

Supraleiter sind in verschiedensten Gebieten von Technik und Naturwissenschaft einsetzbar. Sie ermöglichen durch ihre Eigenschaften neuartige Geräte wie Strombegrenzer, Energiespeicher und Hochfeldmagnete oder machen bestehende Geräte (Transformatoren, Kabel und Motoren) effizienter. Durch die hohen Herstellungs-, Material- und Kühlkosten konnten sie sich bis jetzt jedoch nur in einigen wenigen Anwendungen kommerziell durchsetzen. Heliumgekühlte Tieftemperatur-Supraleiter werden in Teilchenbeschleunigern, NMR-Tomographen oder supraleitenden Quanteninterferometern (Squid) zur Messung kleinster Magnetfelder eingesetzt. Oxidische Hochtemperatur-Supraleiter sind bis heute einzig als Stromzuführungen vom

* Die technische Stromdichte bezieht sich auf den gesamten Leiterquerschnitt, das heisst Supraleiter und Silbermatrix. Um grössere technische Stromdichten zu erreichen, wird daher versucht, den Anteil (heute maximal 30%) des Supraleiters im Leiter zu erhöhen.

| Werkstoff | T_c | Charakteristik | Einsatzform |
|---|-------|----------------------------|-------------------|
| NbTi | 10 | billig verarbeitbar | Draht |
| Nb ₃ Sn | 18 | hohe Magnetfelder | Draht |
| YBa ₂ Cu ₃ O ₇ | 92 | hohe Magnetfelder | Dünnschicht, Bulk |
| Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ | 95 | keine Weak Links | Dickfilm, Bulk |
| Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₃ O ₁₀ | 110 | hohes T_c , verarbeitbar | Draht |
| TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉ | 123 | giftig, hohes T_c | Dünnschicht |
| HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉ | 134 | giftig, höchstes T_c | – |

Tabelle 1 Vergleich der wichtigsten supraleitenden Werkstoffe

| Sensoren | Hochfrequenz | Schaltkreise | Magnete | Energietechnik |
|--------------------------------|--|-----------------------------|---|---|
| Squid MRI-Sensor- spulen | Mikrowellenfilter Resonatoren Transistoren Oszillatoren | Wandler Speicherelemente | Beschleuniger Hochfeldmagnete MRI/NMR Stromzuführungen Lager/Levitation | Kabel Strombegrenzer Transformatoren Motoren Generatoren Energiespeicher |

Tabelle II Übersicht über Anwendungen der Supraleitung
MRI: Magnetic Resonance Imaging; NMR: Nuclear Magnetic Resonance

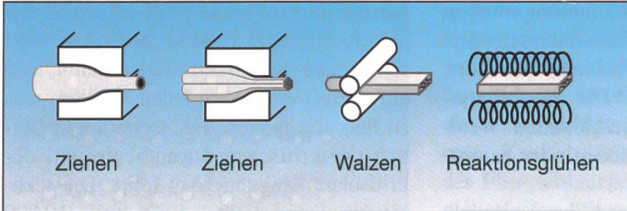


Bild 4 Das Opit-Verfahren (Oxide Powder in Tube)

Normalleiter zum Tieftemperatur-Supraleiter von kommerziellem Nutzen. Eine Übersicht über Anwendungen der Supraleitung zeigt Tabelle II. Ihre technologische Machbarkeit wurde grösstenteils bereits demonstriert, viele Anwendungen wurden auch schon als Prototypen eingesetzt, sie sind aber allesamt noch zu teuer für die kommerzielle Nutzung.

Für die Energietechnik werden eine grosse Anzahl von Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern entwickelt. Diesen Anwendungen ist gemein, dass sie im Vergleich zu ihren konventionellen Konkurrenten mit zunehmender Leistung kostengünstiger werden. Die relativen Kühl- und Herstellungskosten nehmen ab, die Einsparungen durch reduzierte elektrische Verluste aber stark zu. Für jede Anwendung gibt es deshalb eine Break-even-Leistung, ab der reelle Chancen bestehen, kommerziell erfolgreich zu sein. Die Weiterentwicklung der bestehenden Prototypen läuft deshalb darauf hinaus, die erreichbare Leistung ständig zu erhöhen.

Supraleitende Übertragungskabel können auf den Querschnitt gerechnet dreibis fünfmal mehr Strom leiten als herkömmliche Kupfer- oder Aluminiumleiter. Zusätzlich sind die Energieverluste geringer, sie beschränken sich auf kleinste resistive Verluste und auf die benötigte Energie für die Kühlung mit flüssigem Stickstoff. Heute wird der Bandleiter so aufgewickelt, dass die Wechselstromverluste möglichst gering ausfallen. (Bild 7) Hin- und Rückleiter, bestehend aus aufgewickelten Opit-Bändern, sind koaxial mit dazwischen liegender elektrischer Isolation angeordnet. Die Leiter werden sowohl von innen als auch von aussen mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Wirtschaftlich sinnvoll ist der Einsatz von supraleitenden Kabeln zuallererst in Grossstädten, wo akuter Mangel

an Kabelschächten herrscht, und überall dort, wo Überlandleitungen aus ästhetischen und Umweltschutzgründen nicht mehr uneingeschränkt akzeptiert werden. Die gegenwärtig geplanten Kabelprototypen (Pirelli, Siemens, Sumitomo, Furukawa) sind auf eine Betriebsspannung von rund 100 kV und eine Leistung von etwa 500 MVA ausgelegt.

In konventionellen Motoren und Generatoren werden die Magnetfelder mit grossen Kupfer- oder Aluminiumspulen erzeugt. Da die Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)-Drähte mehr Strom tragen können, werden die Systeme kleiner und leistungsstärker. Ein HTS-Motor mit 1000 PS wird bei gleicher Leistung des-

halb gegenüber einem konventionellen Motor nur noch halb so gross. Mit HTS-Motoren und Generatoren können zudem Wirkungsgrade von über 98% und 99,5% erzielt werden, während die Werte für konventionelle Motoren und Generatoren bei 90–96% und 97–98% liegen.

Ähnliches gilt für Transformatoren, deren Grösse bei gleicher Leistung ebenfalls halbiert werden kann. Des weiteren kann ein supraleitender Transformator für einige Stunden das Doppelte seiner ausgelegten Leistung erbringen, ohne Schaden zu nehmen, was die bei konventionellen Transformatoren übliche zweifache Überdimensionierung unnötig macht. Durch den Einsatz von Supraleitern werden zudem die Verluste durch elektrischen Widerstand reduziert, und die Kühlung mit brennbarem Kühlöl wird durch sicheren, sauberen Stickstoff ersetzt. Dies ermöglicht auch den sicheren Betrieb von Transformatoren innerhalb von Gebäuden. Ein 630-kW-Prototyp wurde von ABB bereits während eines Jahres erfolgreich unter normalen Be-

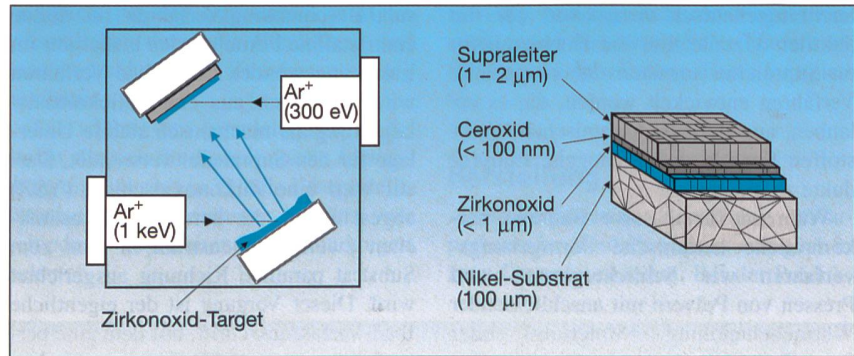


Bild 5 Das Ibad-Verfahren (Ion Beam Assisted Deposition)

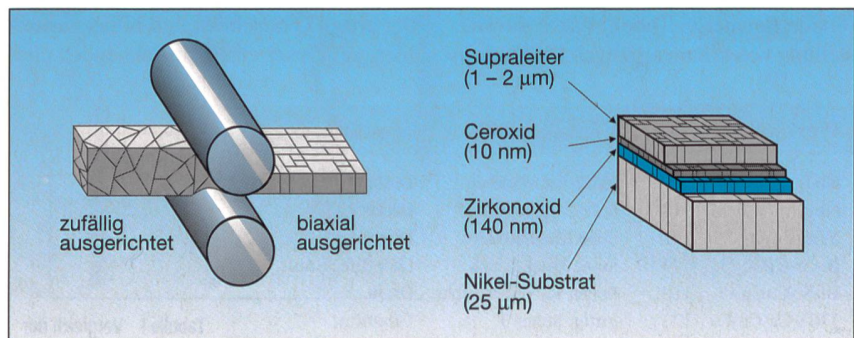


Bild 6 Das Rabits-Verfahren (Rolling-assisted Biaxially-textured Substrate)

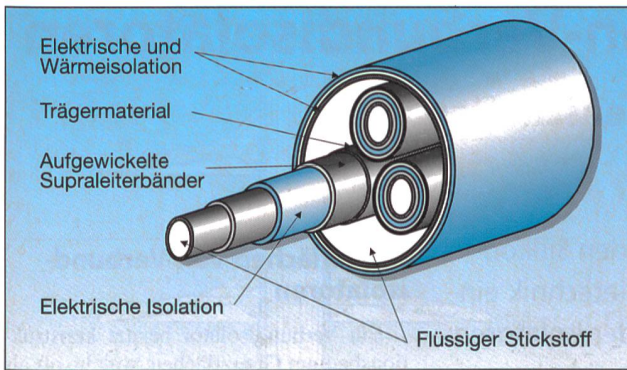


Bild 7 Koaxiales Design eines Übertragungskabels mit Hin- und Rückleiter aus Hochtemperatur-Supraleiter

triebsbedingungen getestet. Zurzeit werden Transformatoren mit einer Leistung von 10 MW entwickelt (ABB, Waukesha Electric).

Mit Hilfe von Strombegrenzern mit Hochtemperatur-Supraleitern kann das Stromnetz besser vor Stromspitzen geschützt werden. Sie reagieren schneller als herkömmliche Schalter und begrenzen den Strom nur so weit, dass das Netz nicht unterbrochen wird. Dieser Schutz ermöglicht die Erhöhung der Lasten im Netz, oder, umgekehrt ausgedrückt, die Geräte im Netz können kleiner dimensioniert werden. Das Konzept sieht vor, einen Supraleiter in Serie mit der zu schützenden Leitung zu schalten. Steigt der Strom kurzfristig an, beispielsweise durch einen Kurzschluss, so wird die kritische Stromdichte des Supraleiters überschritten, und der Supraleiter wird zu einem Normalleiter, der die überschüssige Energie in Wärme umwandelt. Um möglichst viel Energie absorbieren zu können, wird der Supraleiter mäanderförmig auf das Substrat aufgebracht und zu einem Stapel (Stack) geschichtet. (Bild 8) Ein 1-MW-Strombegrenzer, der allerdings auf einem anderen Schaltprinzip

basierte (abrupte Änderung der magnetischen Induktivität einer Spule mit supraleitendem Kern, sobald das kritische Magnetfeld im Spuleninnern überschritten wird), wurde während eines Jahres unter Normalbedingungen erfolgreich getestet (ABB). Im nächsten Schritt sollen rund 10 MW erreicht werden. Dies wird neue Konzepte oder neue supraleitende Werkstoffe erfordern (ABB, Siemens, Lockheed Martin).

Hochtemperatur-Supraleiter können auch eingesetzt werden, um Energie kurzzeitig zu speichern. Da die kontinuierliche Produktion von Elektrizität am billigsten ist, sie aber nie kontinuierlich verbraucht wird, ist eine Zwischenspeicherung der Energie sehr attraktiv. Ebenso können kurzfristige Schwankungen in der Stromproduktion korrigiert werden, was die Produktion von regenerierbarer Energie erlaubt und empfindliche Anlagen schützt. Grosse supraleitende Spulen beruhen auf der Speicherung der Energie in Form eines hohen Magnetfeldes (Superconducting Magne-

tic EnergyStorage, SMES). Mit einem solchen wartungsarmen System kann eine Energieeffizienz von über 90% erreicht werden. Diese Vorzüge gegenüber Batterien sind die Triebfeder für die Entwicklung solcher Speicherringe. Das Schwungrad-Konzept (Flywheels) beruht auf Scheiben, die reibungsfrei auf supraleitenden Lagern rotieren und so die elektrische Energie in Form von Bewegungsenergie speichern können.

Schlussbemerkungen

Der alte Traum vom widerstandsfreien Transport des elektrischen Stromes hat durch die neue Werkstoffklasse der Hochtemperatur-Supraleiter wieder neue Hoffnung erhalten. 13 Jahre nach ihrer Entdeckung zeichnet sich ab, dass von den zahlreichen potentiellen Anwendungen einige wenige kommerziell einsetzbar sein werden. Das Beispiel dieser neuen Werkstoffklasse zeigt erneut, dass mehrere Jahrzehnte Entwicklungsarbeit notwendig sind, um von der Entdeckung zur breiten industriellen Anwendung einer neuen Technologie zu gelangen. Dies steht im Kontrast zu der heute schon fast gesellschaftlich akzeptierten kurzfristigen Optimierung des in die Technik eingesetzten Kapitals. Der technische Fortschritt, dem wir heute in der industriellen Welt unseren Wohlstand verdanken, kann jedoch nur aufrechterhalten werden, wenn wir weitsichtig in Ausbildung, Forschung und Entwicklung investieren und damit Forschungsergebnisse in neue Produkte und Dienstleistungen für die nächste Generation umsetzen.

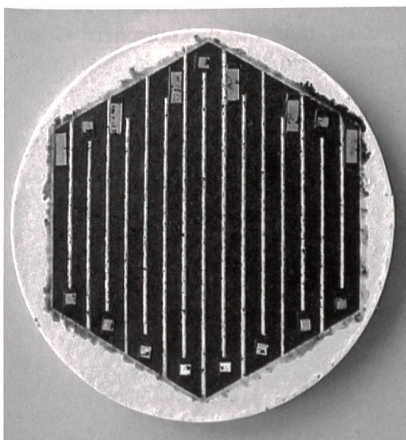


Bild 8 Mäanderförmiger Bismuth-Supraleiter, prozessiert auf einem dicht gesinterten Magnesiumoxid-Substrat (hergestellt an der ETH Zürich). Mehrere dieser Platten zu einem Stapel angeordnet und verbunden ergeben einen resistiven Strombegrenzer.

Supraconducteurs à haute température dans les techniques de l'énergie

La découverte, il y a 13 ans, des supraconducteurs oxydes à haute température a déclenché l'euphorie générale, car ces nouveaux matériaux pouvaient déjà être employés aux températures de l'avantageux azote liquide ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il apparut rapidement toutefois que la nature cassante des matériaux céramiques rendait difficile la production de câbles supraconducteurs à haute température. Mais grâce aux techniques de fabrication raffinées mises au point ces dernières années et continuellement perfectionnées, on a réussi à produire déjà des rubans de plusieurs kilomètres. La mise en œuvre de plusieurs prototypes a permis de démontrer ce qui est réalisable dans différents secteurs. Néanmoins, le coût élevé des matériaux et de la production n'a autorisé jusqu'ici que peu d'applications rentables. Dans le domaine de l'énergie, la rentabilité des supraconducteurs est en continuel progrès grâce à l'accroissement de leurs performances, si bien que l'utilisation des premiers appareils basés sur des supraconducteurs à haute température ne semble être qu'une question de temps.