Hoch-Tc-Supraleiter in der Energietechnik

Autor(en): **Flükiger, René**

Objekttyp: **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): **85 (1994)**

Heft 11

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902569

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Grosse Fortschritte in der Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern lassen in den nächsten Jahren für diese Materialklasse den Sprung vom Laboratorium in die Praxis erwarten. Der gegenwärtige Stand auf dem Gebiet der Herstellung von langen supraleitenden Bändern mit hoher Stromtragfähigkeit in flüssigem Stickstoff wird beschrieben, mit Schwerpunkt auf den Verbindungen Bi(2223) und Bi(2212). Bei kleinen Magnetfeldern sind Prototyp-Entwicklungen bei 77 K jetzt schon möglich: Kabel, Strombegrenzer, Schalter, evtl. Transformatoren. Kleine Testmagnete zur Erzeugung hoher Felder wurden bei 4,2 K schon erfolgreich getestet. Als Folge der Anisotropie in diesen Systemen ist deren Einsatz in Energiespeichern gegenwärtig noch auf $T \approx 20$ K beschränkt; grosse Anstrengungen werden gegenwärtig weltweit, auch in der Schweiz, auf dem Materialsektor unternommen, um die Betriebstemperatur langfristig auf 77 K zu erhöhen.

Hoch-T_c-Supraleiter in der Energietechnik

■ René Flükiger

Beim Einsatz von Stromleitern im supraleitenden Zustand ist die Wahl des Kühlmittels durch die *kritische Temperatur* T_c des Supraleiters gegeben. Während der letzten 20 Jahre wurde eine grosse Zahl von supraleitenden Magneten für die verschiedensten Anwendungen gebaut. Dabei kamen vor allem zwei Materialien zum Einsatz: NbTi, mit $T_c = 9{,}8$ K, und Nb_3Sn, mit $T_c = 18$ K. Durch diese niedrigen kritischen Temperaturen war das Kühlmittel vorgegeben, nämlich flüssiges Helium, mit einer Betriebstemperatur von 4,2 K. Damit verbunden ist eine sehr grosse Kühlleistung, 1000 W pro 1 W Leistung im System: diese hat sich bisher als das grösste Hindernis auf dem Wege eines Einsatzes im grossen Massstab von supraleitenden Elementen in der Energietechnik erwiesen. Deshalb kommt bis heute die Supraleitungstechnologie nur dort zum Einsatz, wo die höhere Stromdichte gegenüber jener von Kupferleitern entscheidend ins Gewicht fällt: beim Magnetbau.

Die bisher erfolgreichste Anwendung der Supraleitung betrifft zwei Bereiche, die beide mit der Analyse von Kernresonanzphänomenen verknüpft sind: (a) die Kernspintomographie für die Diagnose in Spitälern, auf der Basis von NbTi (Magnetfelder bis zu 2 T), und (b) die Molekül-Analyse in der Chemie, Pharmazie und Biologie (Nb_3Sn, >17,5 T). Dazu kommen noch zahlreiche Labormagnete (bis zu 21,4 T) sowie einige sehr grosse Fusionsmagnet-Prototypen mit Durchmessern bis zu einigen Metern und Feldern bis zu 12 T. In Tabelle I sind die Daten einiger dieser Magnete zusammengefasst. Sehr viele andere Anwendungen wurden durchgerechnet und zum Teil als Prototyp auch gebaut, wie zum Beispiel Energiekabel, Generatoren oder Transformatoren, fanden aber trotz durchwegs erfolgreicher Tests keine weitere Verbreitung, vor allem wegen der anfangs erwähnten hohen Kühlleistung.

Die Entdeckung der supraleitenden metallischen Oxide, der sogenannten Hoch-T_c-Supraleiter, heute *HTC-Supraleiter* genannt, 1986 durch J. Bednorz und K. Müller [1] am IBM-Laboratorium in Zürich hat eine neue Situation geschaffen. Während der bisher höchste Wert von T_c in «klassischen» Supraleitern seit 1973 bei 23 K für die metallische Verbindung Nb_3Ge lag, wurde dieser Wert mittlerweile um einen Faktor 6 erhöht: für die 1993 von Schilling

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *René Flükiger*, Département de Physique de la Matière Condensée & Groupe Appliqué de Physique, Angewandte Supraleitung, Université de Genève, 1211 Genève.

Supraleiter	Magnetfeld	Betriebstemperatur	Dimensionen	Anwendungen
NbTi	<2 T	4,2 K	D = 0,5–0,8 m	Kernspin-Tomographie: Diagnostik (in Betrieb)
NbTi	<8 T	4,2 K	D = 100–200 m	Energiespeicher (Studien)
NbTi	<8 T	4,2 K	L > 5 km	Magnetschwebebahn (Prototyp erfolgreich getestet)
NbTi	<10 T	1,8 K	L = 9–17 m D = 3–5 cm	Dipole für Beschleuniger Hera (in Betrieb) LHC (geplant)
Nb_3Sn	<13 T	4,2 K	D = 7 m H = 13 m	Iter: Fusionsreaktoren Toroidalfeldspulen (Studie)
Nb_3Sn	14 T	4,2 K	D = 2 m H = 4 m	Iter: Fusionsreaktoren OH-Spulen (Studie)
Nb_3Sn	17,5 T	1,8 K	D = 5 cm	NMR-Spektroskopie (Chemie, Biologie, Medizin: in Betrieb)

Tabelle I Aktuelle Anwendungen und Studien für supraleitende Spulen bei ≤ 4,2 K

et al. [2] an der ETH in Zürich gefundene Verbindung $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$ [abgekürzt Hg(1223)] wurde ein Wert von T_c = 133 K gemessen. Die Entwicklung der T_c-Werte für HTC-Supraleiter im Laufe der letzten Jahre ist in Tabelle II dargestellt.

Durch die Entdeckung von Supraleitern mit T_c > 100 K wurde es im Prinzip möglich, flüssigen Stickstoff als Kühlmittel, mit einer Betriebstemperatur von 77 K, zu verwenden. Da bei dieser Temperatur die aufzubringende Kühlleistung vierzigmal kleiner ist als bei 4,2 K, rückten nun viele Projekte in den Vordergrund, die mit klassischen Supraleitern nicht ökonomisch gewesen wären. Diese Erwartung hat zu einem starken Anstieg des Interesses an Anwendungen der Supraleitung geführt, wobei die eingesetzten Mittel weltweit die 500-Mio.-Dollar-Grenze bei weitem überstiegen. Es zeigte sich sehr bald, dass die Materialprobleme bei der Herstellung von Drähten und Bändern aus HTC-Supraleitern eine bisher unbekannte Komplexität aufweisen, so dass ganz neue Lösungsansätze gefunden werden mussten. Es soll im folgenden versucht werden, den heutigen Stand der Technik kurz darzustellen und mit den Anforderungen an industrielle Systeme zu vergleichen. Vorher werden einige Begriffe kurz erörtert.

Supraleitende Materialien

Unterhalb einer gewissen Temperatur, der kritischen Temperatur T_c, verschwindet in supraleitenden Materialien der elektrische Widerstand. Dieses Phänomen ist mit der Bildung von Elektronen-Paaren verbunden, die im Falle der Supraleitung die neuen Ladungsträger darstellen und für den Stromtransport verantwortlich sind. Beide Elektronen eines solchen Cooper-Paars haben zueinander, als Folge der Wechselwirkung mit dem umgebenden Ionengitter, eine besondere Korrelation: innerhalb einer charakteristischen Distanz, Kohärenzlänge genannt, wirkt zwischen beiden Elektronen eine gewisse Anziehungskomponente. Die *Kohärenzlänge* ξ_o ist von Material zu Material verschieden und beträgt für klassische Supraleiter wie Nb_3Sn und NbTi 4,3 und 6,5 nm und ist damit wesentlich grösser als in den stark anisotropen HTC-Supraleitern, wo sie je nach Richtung 0,6–2 nm beträgt (siehe Tabelle II).

Dieser Unterschied in der Kohärenzlänge zwischen klassischen und HTC-Supraleitern hat einen grossen Einfluss auf die Stromtragfähigkeit in Drähten oder Bändern aus diesen Materialsystemen. Dieser Unterschied kann vereinfacht so dargestellt werden: Da jede Korngrenze einen Zusammenbruch der Periodizität des Kristallgitters darstellt, ist dieses am Kornrand innerhalb einer sehr dünnen Zone gestört, was zu sehr kleinen Verschiebungen der Atome aus ihrer Gleichgewichtslage führt. Diese wiederum können lokal zum Verschwinden der Supraleitung führen. Ist nun die gesamte gestörte Randzone zwischen zwei Nachbarkörnern breiter als die Kohärenzlänge, können sich keine Cooper-Paare mehr zwischen den Elektronen aus beiden Körnern bilden: im Extremfall wirkt diese normalleitende Zone als Barriere und kann den supraleitenden Transportstrom von einem Korn zum nächsten um mehrere Grössenordnungen erniedrigen. Es leuchtet ein, dass bei kleineren Kohärenzlängen dieser Effekt sehr viel stärker ins Gewicht fällt als bei grösseren: die sehr kleinen Kohärenzlängen von HTC-Supraleitern sind das Haupthindernis auf dem Wege zu einer industriellen Anwendung. Bei der Lösung dieses Problems wurden gerade im letzten Jahr grosse Fortschritte erzielt, wie später gezeigt wird.

Das Verhalten eines stromdurchflossenen technischen Supraleiters in einem äusseren Magnetfeld wird ausser durch T_c noch durch weitere kritische Parameter bestimmt: das *kritische Magnetfeld* B_{c2} und die *kritische Stromdichte* j_c. Für jeden technischen Supraleiter (zum Beispiel NbTi in Bild 1) kann eine kritische Fläche definiert werden, die den supraleitenden vom normalleitenden Zustand trennt. Aus dieser Fläche kann entnommen werden, dass ein stromtragender technischer Supraleiter bei einer wesentlich niedrigeren Betriebstemperatur als T_c betrieben werden muss, da T_c

Jahr	Verbindung	T_c (K)	$B_{c2}(0)$ (T)	ξ_o (nm)
<1960	NbTi	10	14	6,5
1953	Nb_3Sn	18,0	28	4,3
1970	$PbMo_6S_8$	15,0	60	2,7
1987	$YBa_2Cu_3O_7$	93	>100 (∥) > 35 (⊥)	2,2 0,6-0,8
1988	$Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$	92	>100 (∥) > 50 (⊥)	2,4 0,8
1988	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	>100 (∥)	0,5
1988	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	>100 (∥)	
1990	KC_{60}	43		2,3
1993	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$	133		

Tabelle II Entwicklung der T_c in klassischen und HTC-Supraleitern

T_c ist die kritische Temperatur, B_{c2} das obere kritische Magnetfeld und ξ_o die Kohärenzlänge. Die Symbole ∥ und ⊥ zeigen die Richtung des äusseren Magnetfeldes relativ zu den CuO_2-Ebenen.

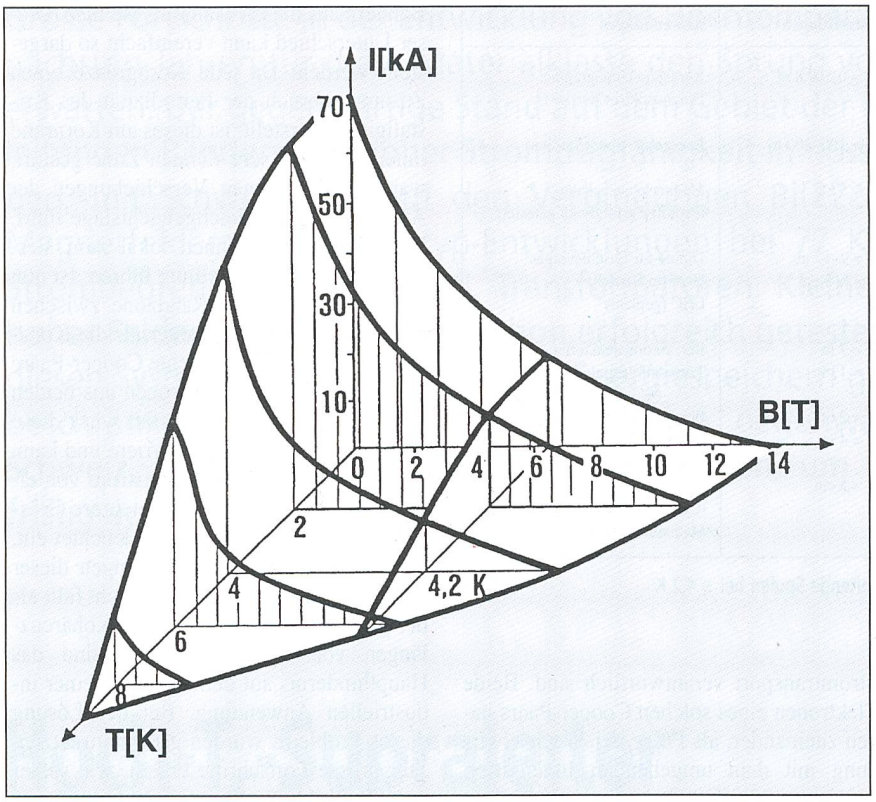


Bild 1 Kritische Fläche eines Supraleiters

Die numerischen Werte gelten für den Supraleiter NbTi.
I Transportstrom
T Temperatur
B Magnetfeld

sowohl durch das Magnetfeld *B* als auch durch den Transportstrom *I* herabgesetzt wird. Aus Analogie zur Darstellung in Bild 1 kann eine wichtige Folgerung für industrielle HTC-Supraleiter gezogen werden: soll die Betriebstemperatur 77 K betragen, so muss T_c wesentlich höher sein, um eine hohe Stromtragfähigkeit in einem äusseren Magnetfeld von einigen Tesla aufrechterhalten zu können. Leider konnten die kürzlich publizierten T_c-Werte in der Nähe von 300 K nicht bestätigt werden: auch im positiven Falle hätte jedoch die Betriebstemperatur eines solchen Supraleiters doch deutlich – 50 oder 100 K – unter dieser Temperatur liegen müssen!

Die Kristallstruktur der HTC-Supraleiter

Nicht alle in Tabelle II enthaltenen HTC-Supraleiter konnten bis heute in eine technisch verwertbare Konfiguration, das heisst in Draht- oder Bandform, gebracht werden. Die Herstellung langer Leiter mit hohen kritischen Stromdichten ist erst mit zwei HTC-Supraleitern gelungen: Bi(2212) mit $T_c = 92$ K und Bi(2223) mit $T_c = 110$ K. Die Kristallstrukturen dieser beiden Verbindungen sind in Bild 2 dargestellt: die Schichtstruktur ist deutlich sichtbar, mit 2 bzw. 3 CuO_2-Ebenen zwischen den BiO-Ebenen. Diese besondere Schichtstruktur ist die Ursache für die sehr starke Anisotropie aller physikalischen Eigenschaften in diesen Systemen: man spricht von einem zweidimensionalen oder 2D-Verhalten.

Die Phase Bi(2212) kann aus der Schmelze gebildet werden, während die Bildung der Bi(2223)-Phase sehr komplex ist und bis heute noch nicht ganz verstanden wird. Trotzdem haben sich weltweit sowohl in der Industrie als auch in den Forschungslaboratorien die meisten Anstrengungen auf letztere konzentriert, weil sie im Temperaturbereich zwischen 25 und 77 K als Folge des höheren T_c-Wertes das grössere Potential aufweist. Der Herstellung von Bi(2223)-Bändern und deren Einsatzmöglichkeiten gilt deshalb hier unser Hauptinteresse. Bei gewissen Anwendungen können andere Konfigurationen, eventuell auch die Phase Bi(2212), Vorteile aufweisen. Aus Platzgründen kann aber hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Die Konfiguration von HTC-Stromleitern

Um der starken *Anisotropie* der Stromdichte als Funktion der Magnetfeldrichtung in HTC-Supraleitern Rechnung zu tragen, muss auch die Konfiguration der Leiter eine deutliche 2D-Komponente aufweisen: anstatt eines runden Drahtes wie bei klassischen Supraleitern muss der Querschnitt so beschaffen sein, dass die Richtung des Magnetfeldes möglichst immer parallel zu den CuO_2-Ebenen verläuft: man spricht von einer *texturierten Struktur*. Bild 3 stellt die Situation in einem Solenoid dar: im mittleren Bereich ist die Feldkomponente parallel zu den CuO_2-Ebenen gleich Null. An beiden Enden des Solenoids ist dies nicht mehr der Fall, was durch spezielle, hier nicht weiter erörterte Massnahmen kompensiert werden muss. Es ist sofort ersichtlich, dass der Einsatz von 2D-Elementen aus HTC-Supraleitern gegenüber der klassischen Elektrotechnik neue technische Lösungen erfordert. Der Vergleich in Bild 4 zeigt auf, wie sehr sich ein Bi(2223)-Band von einem klassischen Nb_3Sn-Draht sowohl geometrisch als auch materialmässig unterscheidet. Das Hüllmaterial des

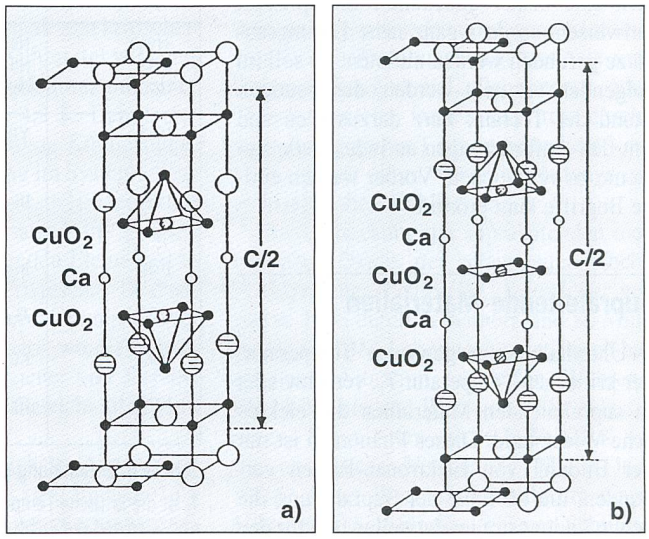


Bild 2 Kristallstrukturen von HTC-Supraleitern

a supraleitendes Oxyd $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ [kurz Bi(2212)] $n=2$
b supraleitendes Oxyd $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ [kurz Bi(2223)] $n=3$

Die Zahlen $n = 2$ und 3 stehen für die Anzahl CuO_2-Ebenen zwischen zwei BiO-Ebenen.

Bi(2223)-Bandes besteht aus Silber oder Silberlegierungen: bei den hohen Reaktionstemperaturen ist Silber für Sauerstoff permeabel und reagiert ausserdem als einziges Element nicht mit dem supraleitenden Oxid.

Spezifikationen für ein supraleitendes HTC-Band

Die Bedingungen, die an supraleitende HTC-Bänderund insbesondere an Bi(2223)-Bänder gestellt werden, lassen sich folgendermassen formulieren:

- industrielle Herstellbarkeit von Bändern mit Längen >1 km
- genügend hohe kritische Stromdichte im Supraleiter bei Betriebsbedingungen: $j_c(T,B) > 5 \times 10^4$ A/cm^2
- thermische und elektrische Stabilität: analog zu den klassischen Supraleitern resultiert daraus die Bedingung einer multifilamentären Konfiguration, mit einer grossen Anzahl von Filamenten, deren Abmessungen <10 µm betragen sollten. Die thermische Stabilisation wird durch die Silberhülle erreicht.
- mechanische Stabilisierung: Die Silberhülle kann durch Zulegierung von Mg oder Mn und anschliessende innere Oxidation mechanisch verstärkt werden.
- niedrige Wechselstromverluste: Die Erhöhung des elektrischen Widerstands von Ag bei 77 K reduziert die Wechselstromverluste. Eine solche Erhöhung wird erreicht durch die Mg- oder Mn-Zulegierungen, aber auch durch neue Ag/Metalloxid-Komposite, die gegenwärtig entwickelt werden.
- vertretbare Kosten: Die Kosten für 1 kg Supraleiterband sollten bei Herstellung in grossen Mengen mit denen von Nb_3Sn-Drähten vergleichbar sein oder dürfen höchstens leicht darüber liegen.

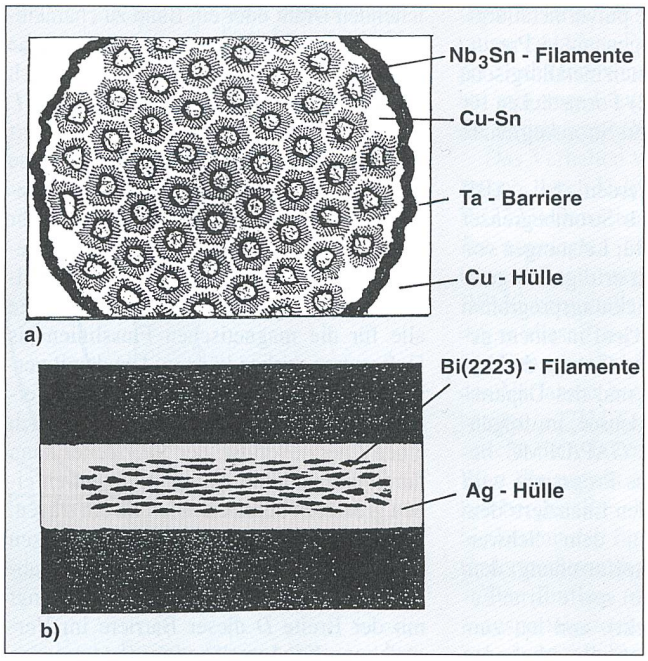


Bild 4 Verschiedene Konfigurationstypen für klassische und HTC-Multifilament-Supraleiter

a runder Nb_3Sn-Draht mit 1 mm Durchmesser

b Bi(2223)-Band mit Querschnitt von 3,0 x 0,2 mm^2

Die Herstellung von Bi(2223)-Bändern

Die Bi(2223)-Bänder werden heute allgemein nach der sogenannten «Powder in Tube»- oder PIT-Methode hergestellt. Pulvergemische aus Metalloxiden und -karbonaten mit der geeigneten Zusammensetzung werden gut durchmischt und bei 800°C an Luft kalziniert. Nach gründlichem Zermörsern bis zu Korngrössen von 1–3 µm werden diese Pulver dann in Ag-Rohre abgefüllt, die verschlossen und über verschiedene, sehr genau aufeinander abgestimmte mechanische Prozesse (Hämmern, Ziehen, Walzen) zu dünnen, etwa 100–150 µm dicken und 3–4 mm breiten Bändern verformt werden. Darauf erfolgt eine komplexe thermomechanische Behandlung, bei der Glühungen um 840 °C mit Walzschritten abwechseln. Die Schwierigkeit besteht vor allem darin, die Bildung der Bi(2223)-Phase so zu beeinflussen, dass diese auf der ganzen Länge des Bandes texturiert ist. Dies bedeutet, dass die CuO_2-Ebenen der Bi(2223)-Phase möglichst parallel zur Bandoberfläche liegen sollten. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, möglichst «saubere» Korngrenzen zu erhalten, da dies einen grossen Einfluss auf die Stromdichte haben kann. Es leuchtet ein, dass dieses komplexe Verfahren eine grosse Anzahl von Parametern enthält, die alle optimiert werden müssen, was zu langen Entwicklungszeiten führt.

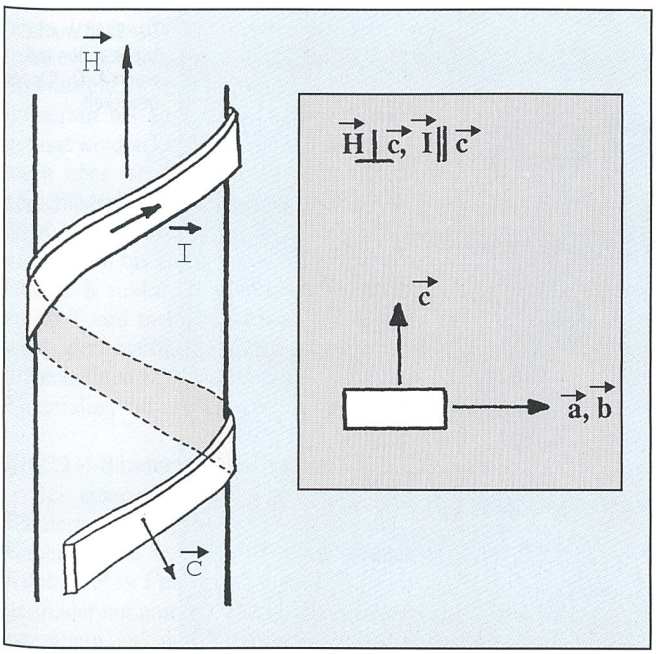


Bild 3 Spule mit HTC-Supraleitern

Schematische Darstellung eines Solenoides, das mittels eines Bi(2223)-Bandes gewickelt wurde. In der Mitte des Solenoides steht das Magnetfeld parallel zur Bandebene (oder senkrecht zur c-Achse).

Die industrielle Entwicklung von HTC-Supraleitern

Heute wird die industrielle Entwicklung von Bändern aus Bi(2223) und Bi(2212) vor allem in den *USA* (von den Herstellern American Superconductors und Intermagnetics) und in *Japan* (Sumitomo Heavy Industries, Kobe Steel, Hitachi Cable und Toshiba) mit grossem Einsatz verfolgt. In Europa ist vor allem in *Deutschland* eine stärkere industrielle Aktivität festzustellen: die Vacuumschmelze in Hanau hat sich auf die Herstellung von Bi(2212)-Drähten konzentriert, die zwar deutlich niedrigere Stromdichten aufweisen, aber bei 4,2 K den Einsatz von runden Drahtformen zulassen, was für gewisse Anwendungen von Vorteil sein kann. Die Firma Hoechst in

Frankfurt hat sich auf die pulvermetallurgische Herstellung der sogenannten Precursors sowie auf die schmelzmetallurgische Herstellung von Bi(2212)-Formstücken für Stromdurchführungen und Strombegrenzer spezialisiert.

In der *Schweiz* werden bei ABB Bi(2212)-Hohlzylinder für Strombegrenzer hergestellt: ein Prototyp für Leistungen von ≈100 kW wurde kürzlich erfolgreich getestet. Ein grösseres Entwicklungsprogramm wird an der Universität Genf in einem gemeinsamen Programm des Groupe de Physique Appliquée (GAP) und des Département de la Matière Condensée, im folgenden als Programm des GAP/DPMC bezeichnet, verfolgt. Dieses Programm wird von verschiedenen Quellen finanziert: dem Nationalfonds (PNR30), dem Schwerpunktsprogramm Werkstofforschung, dem Neff (Schweizer Projekte) sowie Brite/Euram (europäisches Projekt), und hat zum Ziel, verschiedene industrielle Methoden zur Herstellung von Bi(2223)-Bändern mit hohen kritischen Stromdichten zu entwickeln, wobei ausser dem üblichen Kaltwalzverfahren auch ein neuentwickeltes Verfahren, das Heisswalzen (mit Walztemperaturen bis zu 850°C), zum Einsatz kommt.

Die kritischen Stromdichten in HTC-Bändern

Der *kritische Strom* I_c ist der höchste Strom, der im supraleitenden Zustand transportiert werden kann. Um einen supraleitenden Draht oder ein Band zu charakterisieren, ist es zweckmässig, die kritische Stromdichte j_c zu definieren, die dadurch erhalten wird, dass der kritische Strom I_c durch den Supraleiterquerschnitt dividiert wird. Die kritische Stromdichte j_c ist keine intrinsisch definierte Grösse für einen bestimmten Supraleiter. Sie wird vielmehr bestimmt durch die Mikrostruktur des jeweiligen Materials: Dislokationen, Fehlstellen, Fremdphaseneinschlüsse usw., die alle für die magnetischen Flusslinien als Haftzentren wirken können. Die damit verbundene Verankerung der Flusslinien verhindert deren Bewegung und damit auch einen Energieverlust; der Supraleiter kann durch eine erhöhte Anzahl Haftzentren einen grösseren supraleitenden Strom tragen. Demgegenüber wirken die Korngrenzen meistens als Barrieren, die j_c sehr stark absenken können. Diese Absenkung hängt mit der Breite D dieser Barriere im Vergleich zur Kohärenzlänge ξ_o zusammen.

Die Granularität

Ist $D \ll \xi_o$, so wird keine wesentliche Absenkung von j_c erwartet. Dies ist der Fall bei den klassischen Supraleitern, wo die Korngrenzen wegen der damit verbundenen Haftzentren sogar zu einer Erhöhung der Stromdichte beitragen können. Bei den HTC-Supraleitern hingegen, die viel kleinere Kohärenzlängen aufweisen (siehe Tabelle II), ist die Situation wesentlich verschieden. Wenn keine besonderen Vorsichtsmassnahmen getroffen werden, so ist in polykristallinen HTC-Supraleitern im allgemeinen sogar $D \gg \xi_o$: die Korngrenzen wirken dann sozusagen als Barrieren, die die Stromdichte um mehrere Grössenordnungen erniedrigen können. Dazwischen liegt ein Grenzbereich, wo $D \approx \xi_o$: in diesem Fall kann im Nullfeld zwar ein gewisser supraleitender Strom I_c durch die Korngrenze fliessen, aber schon kleine Felder (<0,1 T) genügen, um einen Stromabfall um Faktoren 10–100 zu bewirken. Man spricht dann von einem *granularen Verhalten*.

Die Granularität ist heute das grösste Hindernis auf dem Wege zu einer industriellen Anwendung der HTC-Supraleiter in der Energietechnik. Somit führt der Fortschritt auf dem Gebiet der hohen Stromdichten in HTC-Supraleitern in die Richtung der Verbesserung der Korngrenzen, so dass die Breite der gestörten Zone wenn möglich unterhalb ξ_o zu liegen kommt. Eine solche Verbesserung wird erreicht, indem (a) Fremdphasenanteile verringert werden und/oder (b) die Orientierung zweier Nachbarkörner parallel ausgerichtet wird. Im Extremfall würde dies bedeuten, dass der ganze Stromleiter auf seiner ganzen Länge monokristallin ist. Das Bestreben nach Erhöhung der Stromdichte muss deshalb darin bestehen, dieser Situation möglichst nahe zu kommen. So gesehen ist es bemerkenswert, dass es bereits gelungen ist, Bi(2212)- und Bi(2223)-Bänder herzustellen, die unter gewissen Bedingungen, zum Beispiel bei äusseren Magnetfeldern parallel zur Bandfläche, ein nur schwaches granulares Verhalten aufweisen. Dies wirkt sich bereits in relativ hohen Stromdichten aus, und es bestehen berechtigte Hoffnun-

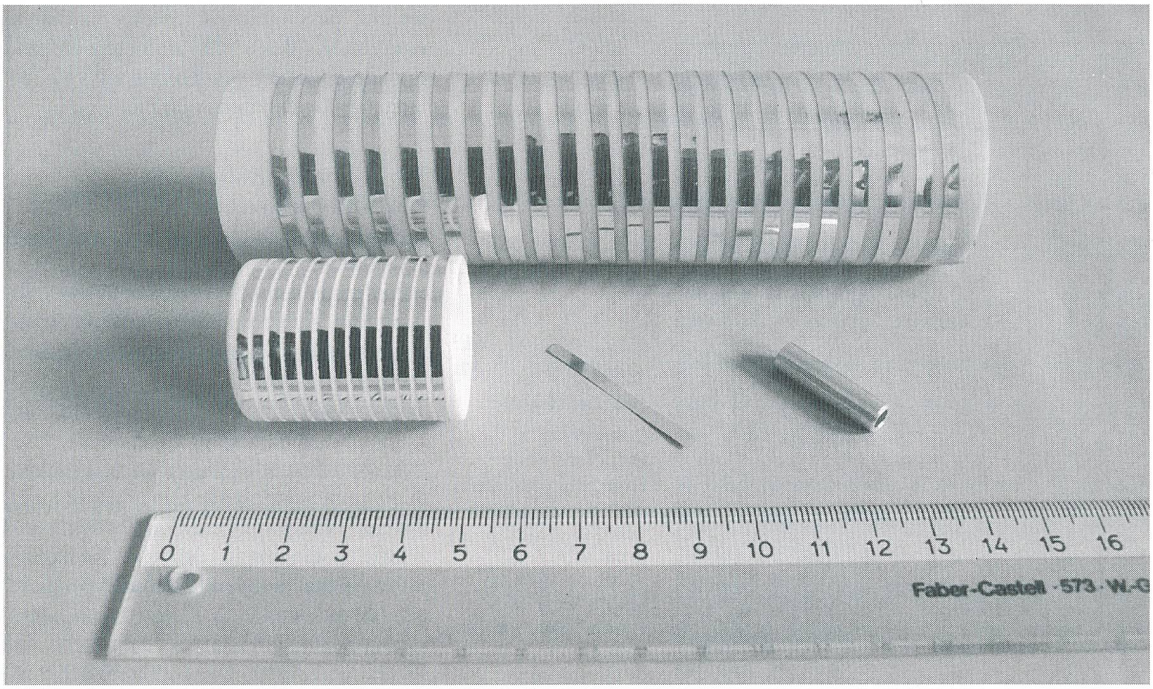


Bild 5 Bi(2223)-Band

Das Band wurde zur Reaktion auf einen Al_2O_3-Körper gewickelt.

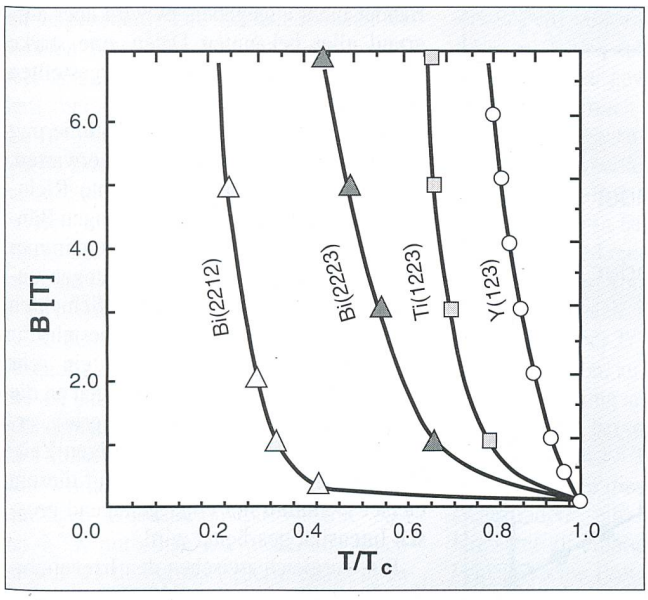


Bild 6 Irreversibilitätslinien für verschiedene HTC-Supraleiter

Die Kurven sind ein Mass für die maximal erlaubten Magnetfelder *B* als Funktion der Temperatur *T*

gen zu einer weiteren deutlichen Verbesserung von j_c in Bändern aus diesen beiden Materialien.

Beim System Y(123) wurde die Granularität in massiven Proben durch bestimmte Wachstumsbedingungen, Schmelztexturierung genannt, überwunden; sie ist aber für Ag-umhüllte Bänder nicht anwendbar. Da es noch nicht gelungen ist, in Bändern aus den drei vielversprechenden Materialien Tl(1223) und Hg(1223) einen hohen Grad von Textur herzustellen, können diese in der Energietechnik noch nicht angewendet werden. Es kann heute schon gesagt werden, dass der entscheidende Durchbruch von HTC-Anwendungen bei 77 K erst dann eintreten wird, wenn dieses Problem gelöst sein wird. Der Grund liegt darin, dass bei 77 K die Anwendungsmöglichkeiten beider heute zur Verfügung stehenden Materialien Bi(2212) und Bi(2223) infolge eines kleineren *Irreversibilitätsfeldes* (siehe Bild 6) relativ beschränkt sind: so ist Bi(2212) nur im Nullfeld anwendbar, während Bi(2223) immerhin bis zu Feldern <1 T ins Auge gefasst werden kann. Bei tieferen Temperaturen aber ist die Situation grundlegend verschieden: im Bereich zwischen 20 und 30 K ist der Einsatz von Bi(2223) bei Magnetfeldern bis zu 20 T und mehr möglich. Bei 4,2 K sind im Prinzip sogar Felder bis zu 30 T und mehr denkbar. Im folgenden wird der heutige Stand der kritischen Stromdichten in HTC-Bändern aus diesen Materialien kurz beschrieben.

Bi(2223)-Bänder: Verhalten bei 77K

Bei einer Anwendung von Bi(2223)-Bändern für den Energietransport durch Kabel kommt nur flüssiger Stickstoff als Kühlmittel in Frage. Dabei spielen die Eigenfelder nur eine geringe Rolle, so dass es vor allem auf den Wert von j_c(77K,0T) ankommt. Berechnungen haben ergeben, dass ökonomische Lösungen Stromdichten j_c(77 K,0T) > 30 000 A/cm² und Längen ≫1 km voraussetzen. Dieses Ziel gilt nach dem jetzigen Kenntnisstand als realistisch erreichbar. Diese Anwendung wird vor allem in Japan und in den USA angestrebt, wo es technisch machbar erscheint, in den bereits vorhandenen Leitungen LN_2-gekühlte Kabel einzusetzen. Obwohl in Europa die technischen Rahmenbedingungen als weniger günstig eingeschätzt werden, wird zurzeit von den grossen Kabelfirmen Siemens, BICC, Pirelli und Alcatel-Alsthom eine grössere Kabelstudie durchgeführt. Im Rahmen einer intensiven Kooperation zwischen Pirelli und American Superconductors wird zurzeit ein solches Kabel mit einer Länge von mehreren Metern für Ströme von >2000 A entwickelt.

Das Verhalten von j_c bei 77 K in einem langen, durch Kaltwalzen hergestellten Ag/Bi(2223)-Band ist in Bild 7 als Funktion des angelegten Magnetfeldes dargestellt. Dieses Band wurde kürzlich am GAP/DPMC hergestellt [4], mit einer Länge von 0,5 m (diese Länge wird nur durch den zur Verfügung stehenden Ofen und nicht durch das Verfahren begrenzt). Die Stromdichte beträgt j_c(77K,0T) = 22 000 A/cm² und entspricht dem höchsten bisher publizierten Wert für mittels industrieller Walztechniken hergestellte «lange» Bi(2223)-Bänder. Sie kommt den für Kabelanwendungen geforderten Stromdichten schon sehr nahe.

Der Einfluss der Anisotropie auf die Transporteigenschaften ist deutlich zu sehen, wenn man die zwei Orientierungen des Magnetfeldes, parallel und senkrecht zur Bandoberfläche, vergleicht. Für das Parallelfeld nimmt die Stromdichte von 0 bis 1 T um einen Faktor 4 ab, während sie für das Vertikalfeld viel schneller abnimmt und oberhalb 0,6 T verschwindet. Dieses anisotrope Verhalten der Stromdichte erklärt, warum für HTC-Supraleiter die Bandform gewählt werden muss: die Bandoberfläche steht nämlich parallel zu den CuO_2-Ebenen, also senkrecht zur kristallographischen c-Richtung in Bild 2. Der starke Abfall der Stromdichte für Vertikalfelder zeigt für alle bisher gemessenen Bänder prak-

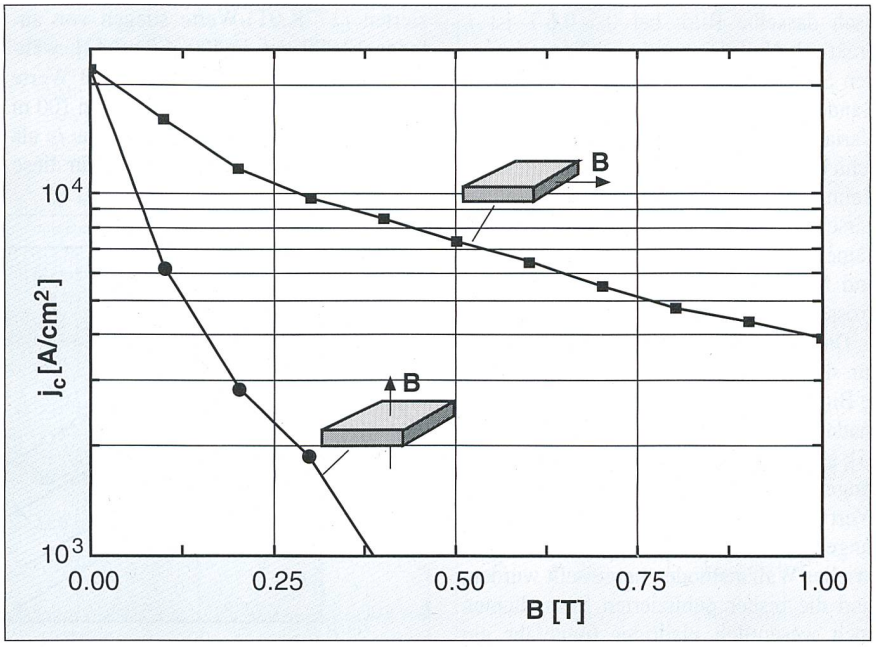


Bild 7 Kritische Stromdichte eines langen, gewalzten Bi(2223)-Bandes

Die kritische Stromdichte j_c ist aufgetragen für ein Bi(2223)-Band mit j_c(77K,0T) = 22 000 A/cm$_2$ als Funktion des äusseren Magnetfeldes *B* bei 77 K, für parallele und senkrechte Orientierung von *B* relativ zur Bandebene (G. Grasso et al. [4]).

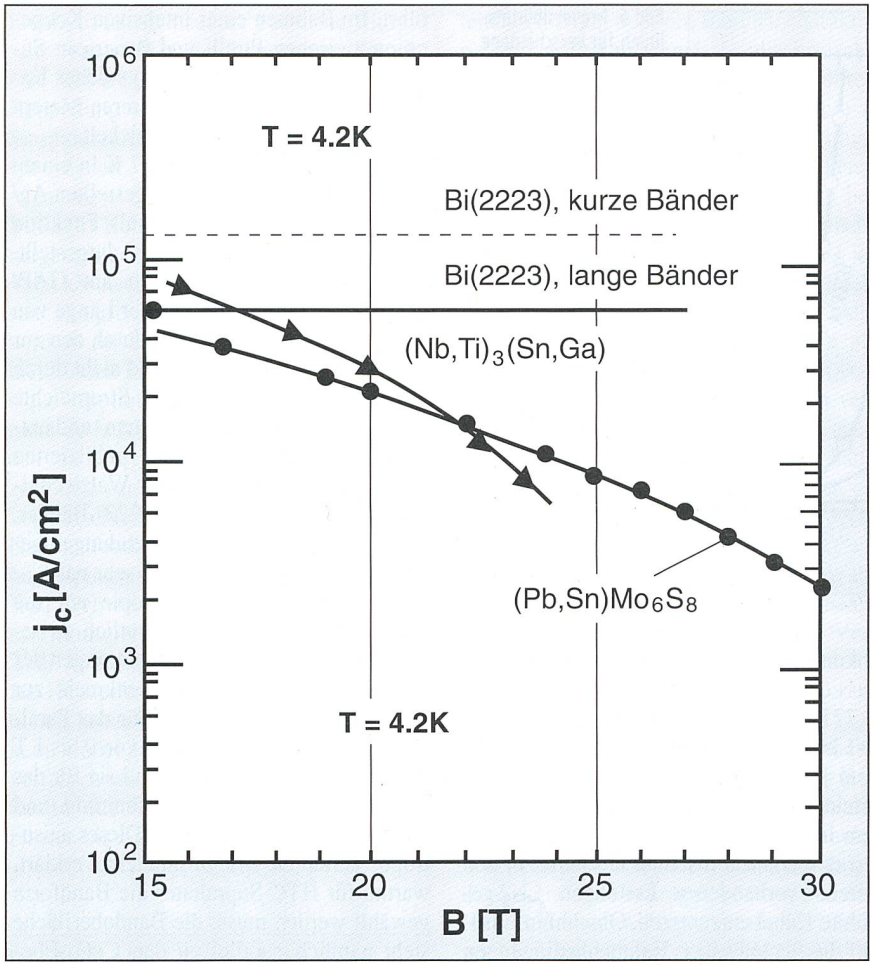


Bild 8 Kritische Stromdichten verschiedener Supraleiter

Vergleich zwischen den kritischen Stromdichten j_c (bezogen auf die supraleitende Schicht der Leiter) von Nb_3Sn- und $PbMo_6S_8$-Drähten und denjenigen von langen, gewalzten Bi(2223)-Bändern [4] als Funktion des Magnetfeldes *B* bei 4,2 K. Der Wert von j_c für kurze, gepresste Bänder zeigt die Entwicklungsmöglichkeiten dieses Materials.

tisch dasselbe Bild: bei 0,5–0,6 T ist j_c praktisch Null. Dies steht im Gegensatz zu den Stromdichten bei Feldern parallel zur Bandoberfäche: hier werden sehr grosse Variationen als Folge der Herstellungsgeschichte des Bi(2223)-Bandes festgestellt. Beim Vergleich zwischen den Bändern aus verschiedenen Laboratorien wird heute allgemein die kritische Stromdichte bei 77 K und Nullfeld, j_c(77K,0T), als Vergleichsgrösse herbeigezogen.

Die höchsten Stromdichten j_c(77K,0T) für «kurze», durch Presstechnik hergestellte Bi(2223)-Bänder wurden bisher von Yamada (Toshiba) mit 66 000 A/cm² erreicht [5]; allerdings kann diese Technik nicht für längere Bänder angewandt werden; dieser Wert dient somit nur als Richtwert. Bei langen Bi(2223)-Bändern, die mittels industrieller Walzmethoden hergestellt wurden, sind die bisher publizierten Stromdichten noch wesentlich niedriger (ungefähr ein Drittel der Stromdichten für kurze Bänder). Grosse Fortschritte werden aber seit etwa einem Jahr bei der Herstellung langer, gewalzter Bi(2223)-Bänder erzielt: die publizierten j_c(77K,0T)-Werte stiegen von anfangs 12 000 auf 18 500 A/cm² [3], während Sumitomo (Japan) Ende 1993 Werte um 20 500 A/cm² für eine Länge von 100 m ankündigte [6]. Die Änderung von j_c als Funktion des Magnetfeldes wurde für diese Bänder nicht angegeben, es wird aber aufgrund aller bekannten Daten eine starke Analogie zu den in Bild 7 dargestellten Kurven erwartet.

Mit der fortschreitenden Optimierung der Herstellungsverfahren ist zu erwarten, dass der für Kurzproben erreichte Richtwert von 66 000 A/cm² auch in langen Bändern erreicht wird. Da dieser Wert immer noch eine bis zwei Grössenordnungen unterhalb der für dünne Bi(2223)-Schichten publizierten Stromdichten liegt, besteht für zukünftige Entwicklungen noch ein sehr grosser Spielraum. Die Erwartungen an die Materialforscher sind hier recht gross, erscheinen aber in einem vernünftigen Zeitrahmen als berechtigt, insofern auf diesem Gebiet weiterhin mit einer genügend grossen Intensität gearbeitet wird.

Ein Vergleich zwischen den Irreversibilitätslinien (Bild 6) von Bi(2223) und den Stromdichten (Bild 7) bei 77 K gestattet eine Abschätzung des höchsten Magnetfeldes, das von einer mittels Bi(2223)-Bändern gebauten Spule bei Stickstofftemperaturen erzeugt werden kann. Diese obere Grenze beträgt dabei wenig mehr als 1 T, was für viele Anwendungen wie Motoren, Elektromagneten und Energiespeicher ungenügend ist. Deshalb werden gegenwärtig alle diese Anwendungen versuchsweise für niedrigere Betriebstemperaturen entwikkelt, bis weitere Entwicklungen in HTC-Materialien das Erreichen des erklärten Fernziels, des Betriebs bei 77 K, gestatten.

Bi(2223)-Bänder: Verhalten bei 4,2 K

Der Vergleich der kritischen Stromdichten bei 4,2 K von Bi(2223)-Bändern und von klassischen Hochfeld-Supraleitern wie Nb_3Sn oder $PbMo_6S_8$ in Bild 8 zeigt, dass erstere oberhalb von 17 T deutlich höhere Werte zeigen [in Bild 8 sind die optimierten Verbindungen $(Nb,Ti)_3(Sn,Ga)$ und $(Pb,Sn)Mo_6S_8$ mit den maximalen j_c-Wer-

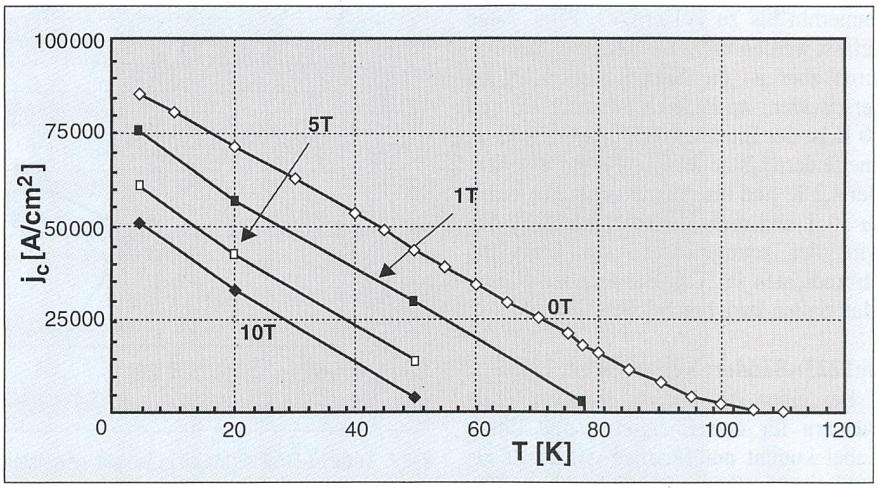


Bild 9 Kritische Stromdichte j_c von Bi(2223)-Bändern als Funktion der Temperatur für verschiedene Magnetfelder *B* für die Orientierung von *B* senkrecht zu c (G. Grasso et al. [4])

ten angegeben]. Die höchsten bisher erreichten Werte von kurzen, gepressten [5] und langen, gewalzten [4] Bi(2223)-Bändern bei 20 T betragen 14 x 10^4, bzw. 6 x 10^4 A/cm^2, was eine Erhöhung um einen Faktor 7 bzw. 3 gegenüber den klassischen Supraleitern darstellt. Bei höheren Feldern erhöht sich der Unterschied drastisch: bei 25 T beträgt der Faktor bereits fast eine Grössenordnung.

Der Anisotropie-Effekt auf j_c ist bei 4,2 K deutlich geringer als bei 77 K: bei Magnetfeldern senkrecht zur Bandoberfläche ist nur ein Abfall von etwa 40% zu beobachten. Es besteht somit kein Zweifel, dass diese Materialklasse weitaus die besten Voraussetzungen für den Einsatz in künftigen Höchstfeldmagneten mit 20 T bei 4,2 K mitbringt. Die praktische Machbarkeit wurde bereits experimentell in Japan bestätigt, wo eine Bi(2223)-Pancake-Spule bei einem Aussenfeld von 23 T ein Feld von 0,13 T erzeugte. In verschiedenen Industrielaboratorien sind heute Bi(2223)-Magnete, bestehend aus aufeinandergestapelten, sogenannten Pancake-Spulen, gebaut worden, die bei 4,2 K Magnetfelder zwischen 0,5 und 2,5 T aufrechterhalten konnten. Diese im Vergleich zu Magneten aus Nb_3Sn-Drähten noch bescheidenen Felder erklären sich aus der Tatsache, dass die Gesamtlängen der bis heute produzierten Bi(2223)-Bänder noch vergleichsweise gering sind, was die Anzahl Windungen und damit das erzeugte Feld stark reduziert. Im allgemeinen ist die Rede von 100 m bis zu einigen hundert Metern Länge; nur Sumitomo (Japan) berichtete bisher von Bändern mit >1 km Länge. Dazu ist beim gegenwärtigen Stand der Technologie die Homogenität über der Gesamtlänge noch unbefriedigend: bei Sumitomo (Japan) nahm die Stromdichte (über der ganzen Länge gemessen) von 20 500 A/cm^2 bei 100 m auf 12 000 bei 500 m und auf nur noch 4500 A/cm^2 bei über 1 km [6] ab. Grosse Verbesserungen sind hier zu erwarten durch weitere Fortschritte in der pulvermetallurgischen Behandlung von heterogenen Pulvergemischen sowie durch wissenschaftlich fundiertere Deformationsschritte, die zu einem homogeneren Querschnitt sowie zu einem höheren Grad der Texturierung und damit zur Erhöhung von j_c führen. Weiter gilt es, die oft auftretenden Mikrorisse zu vermeiden, was wiederum genauere Kenntnis über die Reaktionsprozesse, insbesondere des Kornwachstums, voraussetzt.

Bi(2223)-Bänder: Verhalten bei 20–30 K

Wie bereits erwähnt, ist bei einer Betriebstemperatur von 20–30 K die aufzuwendende Kühlleistung etwa fünfmal kleiner als bei 4,2 K. Da die kritischen Stromdichten zurzeit einen Betrieb bei 77 K unter einem Feld von einigen Tesla noch nicht zulassen, lag es nahe, in Erwartung weiterer Fortschritte gewisse Anwendungen im Temperaturbereich von 20–30 K schon heute ins Auge zu fassen. Aus dem Vergleich der Stromdichten in langen, gewalzten Bi(2223)-Bändern bei verschiedenen Temperaturen in Bild 9 ist ersichtlich, dass bereits heute Magnetfelder >10 T bei 20 K erzeugt werden könnten.

Es ergibt sich sogar die Möglichkeit, diese Felder bei 27 K, der Temperatur von flüssigem Neon, zu erzeugen. Mit den heute zur Verfügung stehenden Bi(2223)-Bändern können bei dieser Temperatur Magnetfelder von >5 T als realistisch angesehen werden. In diesem Falle wäre aus Kostengründen ein geschlossener Neon-Kreislauf zu empfehlen. Somit können im Prinzip kleine Prototypmodelle von supraleitenden Motoren, Transformatoren oder Energiespeichern bereits heute gebaut werden, als Vorstufe zu späteren Anwendungen bei 77 K.

Bi(2212)-Bänder und -Drähte

Durch die wesentlich niedrigere Irreversibilitätslinie (Bild 6) ist der Anwendungsbereich dieser Verbindung in Gegenwart von Magnetfeldern auf den Temperaturbereich T < 20 K beschränkt. Bei 4,2 K sind die Stromdichten von Bi(2212)-Bändern mit denen von Bi(2223)-Bändern in Bild 8 vergleichbar und werden hier deshalb nicht weiter beschrieben. Es sei aber der Vollständigkeit halber erwähnt, dass in Japan auch mit Bi(2212) schon 2-T-Magnete bei 4,2 K hergestellt worden sind. Ab T > 20 K sind Bi(2223)-Bänder den Bi(2212)-Bändern aber bei allen Magnetfeldern überlegen.

Da die Verbindung Bi(2212) aus der Schmelze gebildet werden kann, ergibt sich eine interessante Variante. Aus dieser Verbindung hat die Vacuumschmelze (D) nämlich *runde Drähte* mit ansprechenden Stromdichten bei 4,2 K hergestellt. Die runde Konfiguration ist bei NMR-Anwendungen aus Homogenitätsgründen einer Bandkonfiguration vorzuziehen. Durch den geringen Grad der Texturierung hat ein runder Draht aber a priori eine niedrigere Stromdichte als ein texturiertes Band, was diese Technologie natürlich begrenzt. Trotzdem weisen auch runde, in industriellen Längen gefertigte Bi(2212)-Drähte mit 0,8 mm Durchmesser von Vacuumschmelze (D) mit 20 000 A/cm^2 bei 4,2K,20T schon höhere Werte auf als klassische Supraleiter. Ein Vorteil der bei Bi(2212) angewandten Schmelztechnologie könnte in der einfacheren Verbindungstechnik liegen. Weitere Entwicklungen werden mit Interesse erwartet.

Durch die Möglichkeit, die Bi(2212)-Phase aus der Schmelze zu gewinnen, ergeben sich noch weitere Vorteile: Im Gegensatz zu Bi(2223) können Massivproben aus Bi(2212) mit Stromdichten j_c(77K,0T) > 4000 A/cm^2 durch Schleuderguss herge-

Anwendung	Grösse (mm)	Felder, Ströme	T (K)	Kühlmittel	Bereich
1) Magnetspulen					
* Spintomographie	600	<2 T	4,2	He	Diagnostik
* NMR (persistent mode)	70	>17,5 T	4,2	He	Chemie, Pharmazie, Biologie
* Höchstfelder	>50	>25 T	4,2	He	Labor
* Höchstfelder	>50	>20 T	4,2–28	He, Ne	Labor
2) Kabel für Energietransport	>1 km	>2 kA	77	N_2	Energieübertragung
3) Magnetische Separation	Dipole		25 (77)	He (N_2)	Erzgewinnung
4) Energiespeicher (Smes)	>5000	<5 T	25 (77)	He (N_2)	Energiewirtschaft
5) Transformatoren	<1000	<3 T	25 (77)	He (N_2)	Elektrotechnik
6) Statorspulen für Generatoren	<1000	<3 T	25 (77)	He (N_2)	Elektrotechnik
7) Strombegrenzer	>400	>10 kA/cm^2	77	N_2	Elektrotechnik
8) Schalter		>10 kA/cm^2	77	N_2	Elektrotechnik
9) Stromdurchführungen mit geringer thermischer Kopplung	100-1000	>10 kA/cm^2	4,2–77	He, N_2	Labor, Industrie

Tabelle III Absehbare Anwendungen von HTC-Supraleitern
Zahlen in Klammern: erst nach weiteren Entwicklungen möglich

stellt werden. Hoechst (D) stellt heute Proben mit den verschiedensten Konfigurationen her, zum Beispiel Stäbe, Platten oder Hohlzylinder. Der Anwendungsbereich bei 77 K schliesst dabei Strombegrenzer sowie Hochstromverbindungen für Magnetzuleitungen mit geringer Wärmeleitung (von 77 K bis 4,2 K) ein. Hohlzylinder aus Bi(2212) werden auch von ABB für Strombegrenzer hergestellt: kürzlich wurde ein solcher Strombegrenzer mit einer Leistung von ≈100 kW erfolgreich betrieben.

Y(123)- und Tl(1223)-Bänder

Die Irreversibilitätslinie (Bild 6) zeigt, dass für Anwendungen bei 77 K in Gegenwart von Magnetfeldern >1 T nur diese beiden Materialien in Frage kommen. Bei Y(123) wurden in Massivmaterial schon Stromdichten bis 38 000 A/cm² bei 5 T erreicht: dieses Material wird heute durch die sogenannte Schmelztexturierung in vielen Labors weltweit hergestellt, mit dem Ziel, sowohl hohe Magnetfeldabschirmungen als auch Materialien für Magnetlager zu erreichen. Leider gelang es bisher nicht, Y(123)-Bänder mit hohen kritischen Stromdichten herzustellen; im Gegensatz zu den Bi-Systemen war es beim System Y(123) bis heute noch nicht möglich, einen hohen Grad der Texturierung zu erreichen und die Granularität zu überwinden. Solche Bänder, mit Stromdichten von nur 3000 A/cm², können nicht angewendet werden, da schon Felder von 0,1 T einen Abfall um einen Faktor 50 verursachen.

Das System Tl(1223) scheint in bezug auf die Stromdichte aussichtsreicher zu sein als Y(123), wurden doch in Ag-umhüllten Tl(1223)-Bändern bei 77 K im Nullfeld schon Stromdichten über 15 000 A/cm² erzeugt. Leider zeigte es sich wie bei Y(123) auch in diesem System, dass die Textur nicht wie bei den Bi-haltigen Systemen verbessert werden kann: der Granularitätseffekt ist auch hier dominant, mit dem Unterschied allerdings, dass bei 77 K von ca. 1 bis 7 T ein Plateau von j_c bei Werten um 1000 A/cm² beobachtet wurde. Das Problem, Bänder aus Tl(1223) mit hoher Textur und damit mit hohen Stromdichten herzustellen, muss anders gelöst werden: erste Ansätze dazu sind vorhanden. Dieses Problem ist zwar ausserordentlich schwierig, es bestehen aber prinzipiell keine Gründe, die eine Lösung als unmöglich erscheinen lassen. Eine intensive Entwicklungstätigkeit wird hier in absehbarer Zeit den gewünschten Fortschritt bringen.

Zukünftige Anwendungen von HTC-Supraleitern

In dieser Arbeit wurde versucht, den gegenwärtigen Stand der Entwicklungen auf dem Gebiet der Anwendungen von HTC-Supraleitern in der Energietechnik zu beschreiben. Alle konventionellen Systeme der elektrischen Energietechnik brauchen Leitermaterial in der Form von Drähten oder Bändern. Auch die neuen HTC-Supraleiter müssen in dieser Form hergestellt werden, wenn man sie für rotierende Maschinen, Transformatoren, Energiekabel, magnetische Energiespeicher u. a. verwenden will. Es ist offensichtlich, dass das Potential ausserordentlich hoch ist, dass aber der Durchbruch davon abhängt, ob die gewünschten Leistungen hinsichtlich Strom und Magnetfeld bei 77 K, der Temperatur von flüssigem Stickstoff, erbracht werden können.

Technisch sind in vielen Fällen die absehbaren Anwendungen jetzt schon, aber bei deutlich niedrigeren Temperaturen – etwa 20 bis 25 K – möglich (siehe Tabelle III). Bei dieser Temperatur ist aber die für die Kühlung notwendige Leistung derart hoch, dass ein ökonomischer Betrieb noch nicht in Betracht gezogen werden kann. Bei der sehr intensiven Entwicklungstätigkeit auf dem Materialsektor, die weltweit im Gange ist, ist es vor allem eine Frage der Zeit, bis die geforderten Spezifikationen in allen Fällen bei 77 K erbracht werden können. An diesem Entwicklungswettlauf nimmt auch die Schweiz über die Forschungsgruppe an der Universität Genf teil.

Ein zusätzliches Problem wird darin bestehen, die HTC-Bänder auch in sehr grossen Längen – mehrere Kilometer – mit den erforderlichen Stromtragfähigkeiten herzustellen. Diese müssen überdies eine genügend hohe mechanische Festigkeit aufweisen, um den Anforderungen beim Bau und beim Betrieb (Lorentzkräfte) des jeweiligen Systems zu genügen.

Von besonderem Interesse sind Systeme wie Kurzschluss-Strombegrenzer und Energieschalter, weil sie mit heute realisierbaren HTC-Werkstoffen auskommen, die nur geringe Stromtragfähigkeiten haben. Hier sind erste Prototypmodelle von ABB bereits gebaut und getestet worden. Zum Schluss sei noch festgestellt, dass bei allen vorgesehenen Anwendungen der technische Vorteil der supraleitenden Variante gegenüber der konventionellen Lösung mit Kupfer oder Aluminium auch mit einem wirtschaftlichen Vorteil verbunden sein muss. Diese Frage wird langfristig über den Erfolg von supraleitenden Systemen entscheiden.

Supraconducteurs à haute température dans les techniques de l'énergie

Les grands progrès réalisés dans le développement de supraconducteurs à haute température laissent présumer ces prochaines années, pour cette classe de matériaux, le passage du laboratoire à la pratique. On décrit l'état actuel dans le domaine de la fabrication de longs rubans supraconducteurs à forte densité de courant critique à la température de l'azote liquide, avec l'accent sur les composés Bi(2223) et Bi(2212). Pour de faibles champs magnétiques, des prototypes fonctionnant à 77 K peuvent déjà être envisagés: câbles, limiteurs de courant, interrupteurs, éventuellement même des transformateurs. De petits aimants produisant de très forts champs magnétiques à 4,2 K ont déjà été testés avec succès. En raison de l'anisotropie de ces systèmes, leur utilisation dans des systèmes de stockage d'énergie est actuellement limitée à T≈20 K; les importants efforts entrepris à l'échelle mondiale, mais aussi en Suisse, dans cette classe de matériaux permettent d'entrevoir à long terme des applications industrielles à 77 K.

Literatur

[1] *J. Bednorz* und *K. Müller*: Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. Z. Phys. B64 (1986) 189.

[2] *A. Schilling, M. Cantoni, J.D. Guo* und *H.R. Ott*: Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O System. Nature, 363 (1993) 56.

[3] *R. Flükiger, B. Hensel, A. Jeremie, M. Decroux, H. Küpfer, Y. Yamada* und *J.Q. Xu*: High Critical Current Densities in Bi(2223)/Ag Tapes. Supercond. Sci. Technol. 5 (1992) 61.

[4] *G. Grasso, A. Perin, B. Hensel* und *R. Flükiger*: Pressed and Cold-rolled Ag-sheathed Bi(2223) Tapes: A Comparison. Physica C217 (1993) 335.

[5] *Y. Yamada, M. Satou* and *S. Murase*: Microstructure and Superconducting Properties of Ag Sheathed Bi(2223)/Ag Tapes. Proc. 5th Intl. Symp. Superconductivity, Eds. Y. Bando and H. Yameuchi, 1993, p.717.

[6] *K. Sato* et al. Vorgetragen an der MRS Tagung in Boston, Dez. 1993.

8810 Horgen **NGI** Tel. 01/726 05 00

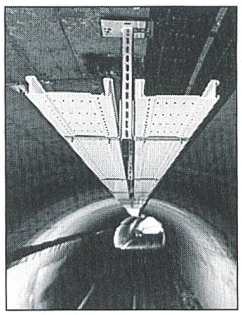
NORMA GOERZ INSTRUMENTS VERTRIEBS AG

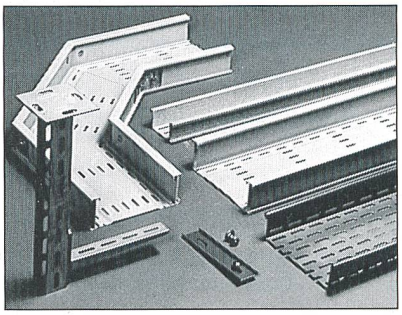
25 Jahre Erfahrung in alternativer Heiztechnik.

SAURER
THERMOTECHNIK

Wärmepumpen (Wärme aus Erde, Wasser oder Luft), Kleinwärmepumpen, Stromsparboiler, Heizregelsysteme TURBOSAR®, Blockheizkraftwerke TOTEM® und BIBLOC (1/3 Strom,2/3 Wärme)

SAURER THERMOTECHNIK AG,
Postfach 196, 9320 Arbon, 071/46 92 12





LANZ Kabelbahnen aus Polyester und aus rostfreiem Stahl

Das innen **und** aussen einsetzbare Schweizer Kabelträgersystem für grosse Kabellasten und maximale Wetter-, UV- und Korrosionsbeständigkeit. Brandkennziffer 5.3. Halogenfrei. Für chemische Industrie, unterirdische Bauten, Bahn- und Strassentunnel, Brücken, Aussenanlagen etc. etc.

- Bahnen von 6 m Länge erlauben **grosse Abhängedistanzen** und rasche Montage
- Statisch gut ausgebildete Stützen und Konsolen ermöglichen platzsparende, vibrationsresistente Trassenführung an Wänden, Decken, Steigzonen
- Eigenproduktion sichert sofortige Lieferung, auch bei Sondermassen. Rufen Sie uns an.

lanz oensingen 062/78 21 21 Fax 062/76 31 79

☐ **Die LANZ Kabelbahnen aus Polyester und aus rostfreiem Stahl** interessieren mich! Bitte Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name/Adresse/Tel.: _____

12

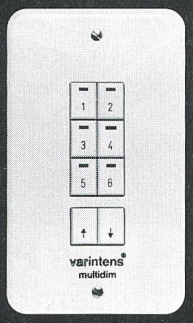
lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 78 21 21

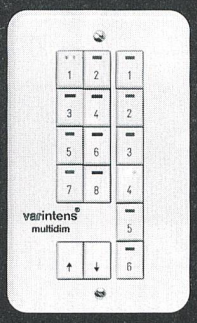
ES WERDE LICHT

mit

varintens® multidim

Die programmierbare Lichthelligkeitssteuerung für flexible Lichtarchitektur in Hotels, Museen, Foyers, Versammlungsstätten, Ausstellungshallen, Galerien etc.





varintens® multidim bietet programmierbare Lichtsteuerungen und eine Vielzahl von Raumkonfigurationen bei maximaler Flexibilität und wirtschaftlichem Einsatz der Leuchtmittel. **Sie sparen Strom** und erzielen eine **längere Lebensdauer** der Leuchtmittel dank der erprobten varintens®-Elektronik.
Verlangen Sie unsere Dokumentation.

Praxiserprobte Konzepte und Anlagen für professionelle Anwender

starkstrom-elektronik ag

se
starkstrom-elektronik

Güterstrasse 11,
CH-8957 Spreitenbach
Telefon: 056/72 76 11,
Telefax: 056/71 49 86

Raychem

Certified Quality System
SQS
Raychem
Reg. No. 10927-01
ISO 9002/EN 29002

PolyGarde

Metalloxid Überspannungs-Ableiter mit Kunststoffgehäuse 3 kV–36 kV

Nach mehrjähriger intensiver Forschungsarbeit ist es Raychem gelungen, das Herstellungsverfahren von Metalloxidscheiben grundlegend neu zu gestalten und damit die Eigenschaften dieser Elemente entscheidend zu verbessern.
Mehr als zwei Jahrzehnte Erfahrung in der Technologie strahlungsvernetzter Kunststoffe und Anwendung dieser Materialien bei Kabelgarnituren in Mittel- und Hochspannungstechnik ermöglichen Raychem die Entwicklung eines Kunststoffgehäuses aus langjährig bewährtem kriechstomfesten, UV-beständigem Hochspannungsisolationsmaterial.

Basierend auf diesen Entwicklungen konnte Raychem ein Programm von Überspannungsableitern für den Bereich 3 kV bis 36 kV für Innenraum- und Freiluftanwendungen auf den Markt bringen, das neue Maßstäbe setzt.

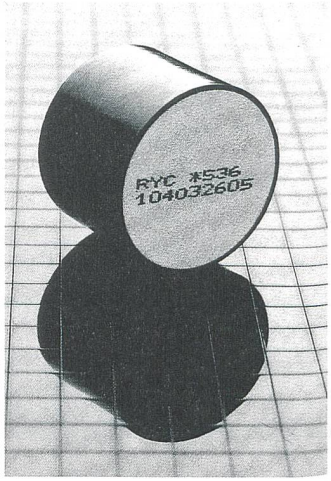
Nach Absolvieren eines umfangreichen Testprogramms (IEC 99, ANSI-C 62.11-87, CSA C233.1-87) sind heute bereits einige tausend Ableiter europaweit im Einsatz.

Hohes Energieaufnahmevermögen
Das neue Fertigungsverfahren der Metalloxidscheiben führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Homogenität. Somit ist es möglich, bei geringem Scheibendurchmesser große Energiemengen während der Überspannung zu absorbieren und gleichzeitig die Leckströme im Normalbetrieb auf ein Minimum zu reduzieren.

Raychem PolyGarde Metalloxid-Varistoren zeichnen sich durch hohe Homogenität und Stabilität aus.

Keine Dichtungsprobleme
Das Paket aus Metalloxidscheiben und faserverstärktem Kunstharzgehäuse wird nach außen durch ein aufgeschrumpftes Formteil rundum dicht abgeschlossen – die Abdichtung der Grenzschichten übernimmt jeweils eine Dichtungsmasse. Der gesamte Ableiter ist ein kompaktes Bauteil ohne Luftspalt, d.h. Feuchtigkeit kann nicht eindringen und den Überspannungsableiter zerstören.

Erheblich reduziertes Gefahrenpotential im Fehlerfalle
Trotz der hohen Belastbarkeit des Ableiters muß man sich auch bei dieser Konstruktion mit den Folgen eines Versagens auseinandersetzen.



Leichte Handhabung – geringe Bruchgefahr
Gegenüber Ableitern mit Porzellangehäusen haben PolyGarde-Überspannungsableiter ein um ca. 35% reduziertes Gewicht. Die Montage am Mast erfordert nur ein Loch zur Aufnahme des M12 Bolzens.
PolyGarde-Überspannungsableiter wurden nach verschiedenen Vorschriften geprüft. Hierbei kam es zur Prüfung von Fehlerströmen von 500 A für 120 Perioden bis 20 kA für 12 Perioden. Alle Prüfungen zeigen, daß auch bei Druckentlastungsprüfungen des Metalloxid Überspannungs-Ableiters die Auswirkungen der Zerstörung des Kunststoffgehäuses auf die Umgebung im Vergleich zu Konstruktionen mit Porzellangehäusen deutlich geringer sind.

Für Fälle, in denen Ableiter anderer Fabrikate gegen PolyGarde-Überspannungsableiter ausgetauscht werden sollen, stehen zahlreiche Adapter zur Verfügung. Das Kunststoffgehäuse bietet zusätzlich den Vorteil einer erheblich reduzierten Bruchgefahr während des Transports und beim Einbau.

Raychem AG,
Oberneuhofstr. 8, 6341 Baar,
042/31 81 31,
Fax 042/31 77 00