Transporteigenschaften von hochtemperatursupraleitenden Bändern

Autor(en): **Brechna, Habibo / Favre-Perrod, Patrick**

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): **93 (2002)**

Heft 15

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855433

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

Transporteigenschaften von hochtemperatursupraleitenden Bändern

Eigenschaften bei 77 K und wechselnder mechanischer Beanspruchung

Die erfolgreiche Anwendung der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) in der Energietechnik hängt von ihrer Dauerhaftigkeit bezüglich mechanischen Beanspruchungen ab. Der vorliegende Beitrag beschreibt die an der Fachgruppe für Hochspannungstechnologie der ETH Zürich durchgeführten Untersuchungen bezüglich des Effekts der axialen Zugbeanspruchung bei 77 K[1]. Vergleiche mit Angaben aus der Literatur zeigten, dass die kritischen Stromdichten in Abhängigkeit der Zugbeanspruchung schneller abnahmen als bei Biegebeanspruchung[2]. Der Grund dafür liegt in Rissen, welche den Stromtransport durch die spröden keramischen Filamente des HTSL verhindern.

Der betrachtete HTSL besteht primär aus einzelnen spröden keramischen Filamenten aus Bi(2,2,2,3)[3], die in einer relativ weichen Silbermatrix eingebettet sind (Bild 1). Die Haftung zwischen den beiden Komponenten Bi(2,2,2,3) und Ag

Habibo Brechna, Patrick Favre-Perrod

hat direkten Einfluss auf den kritischen Leiterstrom I_c.

Wird der Leiter Zug- oder Biegebeanspruchungen unterhalb T_c ausgesetzt, so nimmt I_c im Supraleiter bzw. die Stromdichte J_e im Leiter ab. Die Abnahme des Stromes I_c hängt primär von der Rissbildung der keramischen Filamente (Bilder 2 und 3) ab.

Mittels einer bei uns entwickelten Testapparatur konnten Zug, Dehnung und kritischer Strom bei verschiedenen Magnetfeldern[4] und bei 77 K gleichzeitig gemessen werden.

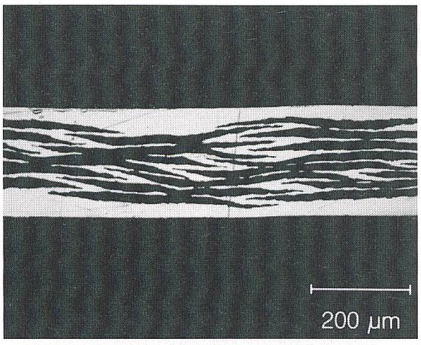

Bild 1 Mittlerer Teil des Querschnitts eines Multifilament-Supraleiters (Bi(2,2,2,3))

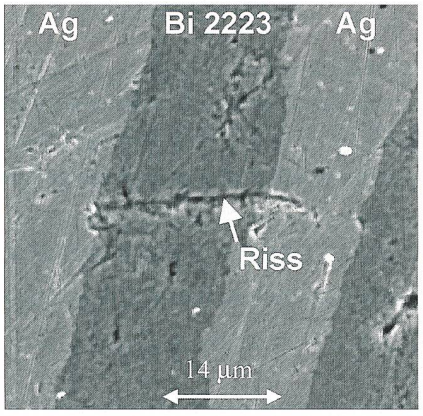

Bild 2 Aufnahme des Bandleiters im Sekundärelektronen-Mikroskop nach dem Zugversuch

Riss durch ein Bi(2,2,2,3)-Filament. Die Silbermatrix verhindert eine Ausbreitung des Risses. Die Zugspannung wird bei 77 K und parallel zur Leiterachse angelegt.

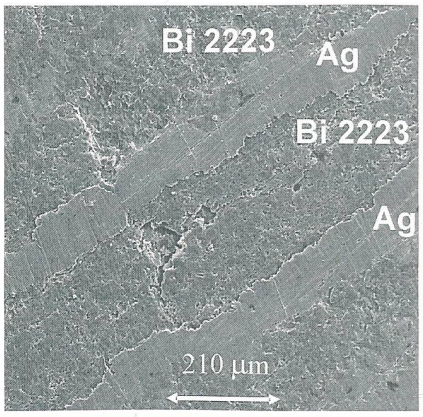

Bild 3 Aufnahme des Bandleiters im Sekundärelektronen-Mikroskop nach dem Zugversuch

Der Riss hat sich über mehrere Filamente ausgebreitet. Die Zugspannung wird bei 77 K und parallel zur Leiterachse angelegt.

Anwendungsgebiete der Bänder bei 77-K-Betrieb

Die hohe kritische Temperatur des Bi(2,2,2,3) von 110 K erlaubt den zuverlässigen und ökonomischen Einsatz von Bändern[5] in elektrischen Synchron und Asynchron-Maschinen, in Transformatoren und für den Energietransport in Kabeln. Kurzproben-Messungen bei 77 K zeigten, dass kritische Stromdichten im Eigenfeld (self field) bis zu 40 kA/cm² im Supraleiter und 8 kA/cm² über das Band erreicht werden konnten.

Trotz diversen vorläufigen Nachteilen wie niedrige kritische Magnetfelder (etwa 1 T) bei 77 K, die Notwendigkeit der Leiterarmierung und die hohen Wechselstromverluste bei Industriefrequenz, werden die Bi-Bänder vor allem im Kabelbau [1] und in einem Verteiltransformator erfolgreich eingesetzt [2]. Die industrielle Optimierung der Bi-Bänder ist jedoch bei weitem nicht abgeschlossen. So konnte z.B. für Bi(2,2,2,3) in flüssigem Neon (T_k = 27 K) bei B = 10 T (B parallel zur Achse c, Bild 4) eine kritische Stromdichte von 60 kA/cm² gemessen werden, entsprechend einer Leiterstromdichte von J_e = 15 kA/cm² [3, 4][6].

Ein derartiger HTSL ist bei weitem besser als ein Cu-Leiter, der bei 77 K eine wirtschaftliche Stromdichte von 2 kA/cm² hat.

Aus einer Reihe von Anwendungen der HTSL seien nur folgende Beispiele zitiert:

- *Rotierende Maschinen:* Ein Synchronmotor mit einer HTSL-Erregung erreichte eine Leistung von 150 kW im Dauerbetrieb. Wegen des sehr hohen Streufelds wurde das Bi(2,2,2,3) mit He-Gas bis 30 K gekühlt. Nach dem Erfolg dieses Projekts wurde ein 3750-kW-Motor mit Bi(2,2,2,3)-Spulen gebaut und im Jahr 2001 in Betrieb genommen. Auch

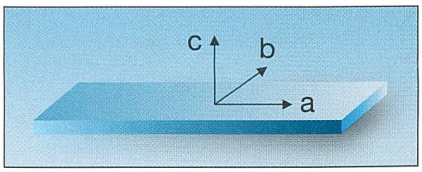

Bild 4 Achsensystem bezogen auf das Supraleiterband

in diesem Fall wurden die Bi-Bänder mit Stahl verstärkt und auf 30 K heruntergekühlt[1)] [5].

• *Transformatoren*: Von den verschiedenen bereits gebauten oder sich im Projektzustand befindlichen Transformatoren[7)] soll hier nur ein 1-MVA-Einphasentransformator von Siemens (50 Hz, 25/1,4 kV) erwähnt werden, der eigentlich ein Demonstrationsmodell ist [6]. Obwohl sich die Sättigungsinduktion des Eisens bei tiefen Temperaturen (65 K) gegenüber Raumtemperatur 300 K nicht merklich ändert, wurde der Kern gekühlt. Die verdrillten Bi(2,2,2,3)/Ag/AgMn waren transponiert und auf 65 K gekühlt (Stromdichte Leiter: 3 kA/cm^2; Leiterlänge: 6,8 km).

• *Synchrongeneratoren:* Generatoren hoher Leistung haben einen Wirkungsgrad von 98–99%. Der Ersatz von Kupfer in der Rotorwicklung durch Bi(2,2,2,3) könnte den Wirkungsgrad um 0,3% erhöhen. Da der Rotor auf 25–30 K gekühlt werden muss, haben die Generatorbauer nach Bau einiger Prototypen keinen Supraleiter-Generator hergestellt [7].

• *Energietransportkabel:* Wegen der tiefen Magnetfelder wird das Stromkabel als die bestmögliche Anwendung der HTSL angesehen. Die bereits erreichten grossen Bi(2,2,2,3)-Bandlängen ermöglichten ambitiöse Projekte: In Japan, Europa und den USA arbeiten verschiedene Firmen[8)] an diversen Kabellängen bis 200 m, wobei Ströme bis 3300 A erreicht werden konnten. Vorläufig werden wegen den niedrigen Magnetfeldern die Kabel mit Flüssig-N_2 gekühlt, was die Betriebskosten niedrig hält [8].

• *Strombegrenzer:* Es existieren zwei unterschiedliche Varianten von Strombegrenzer. Der *induktive* Strombegrenzer wurde 1996 von ABB in einem Wasserkraftwerk installiert und für einen Dauertest von einem Jahr in Betrieb genommen [9]. Der mit Flüssig-N_2 gekühlte und aus Bi(2,2,1,2)-Ringen aufgebaute Strombegrenzer mit einer Leistung von 1,2 MVA hat keine galvanische Verbindung mit dem Netz. Der *resistive* Strombegrenzer ist direkt an das Netz geschaltet (Leistung: 1,6 MVA; Bi(2,2,1,2) [10].

• Weitere Studien mit HTSL sind magnetische *Energiespeicher* kleiner und grosser Energie [11].

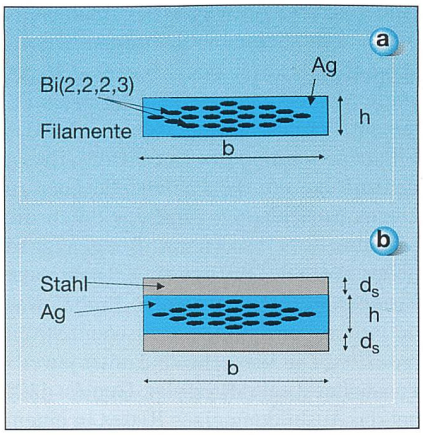

Bild 5 Aufbau eines Bi(2,2,2,3)-Multifilament-Bandleiters

Aufbau der heutigen HTSL-Bänder

Bi(2,2,2,3)-Leiterbänder werden nach dem so genannten «Powder in tube»-Verfahren hergestellt. Ausgangspunkt ist dabei ein Pulvergemisch aus BiO_2, PbO, $SrCO_3$, $CaCO_3$ und CuO. Die Pulver werden ein erstes Mal gesintert und zu kleinen Kugeln gepresst und in ein Silberröhrchen gefüllt, das anschliessend gezogen wird. Das Silber dient als mechanische Stütze, als chemischer Stabilisator der reaktiven Oxyde während der Bandherstellung sowie als elektrischer «Bypass». Die daraus erhaltenen Filamente werden dann in sehr genau kontrollierten thermischen Zyklen behandelt und gerollt. Solche Filamente werden zu einem Multifilamentleiter zusammen gebündelt und in ein zweites Silberrohr gelegt. Dieses wird zu einem flachen Bandleiter gerollt. Bild 5 zeigt eine schematische Darstellung des Bandleiters.

Die Güte des Bandleiters hängt weit gehend von der inneren Struktur der Bi(2,2,2,3)-Keramik in den Filamenten ab. Verunreinigungen wie etwa Kohlenstoff-Residuen und Sekundärphasen wie Bi(2,2,1,2) beeinträchtigen den kritischen Strom. Andererseits ist eine hohe kritische Stromdichte durch eine Ausrichtung der einzelnen Bi(2,2,2,3)-Körner parallel zur Leiterachse (Achse a) erreichbar. Der Druck auf den Leiter während des Rollens muss deshalb möglichst hoch sein, was aber wiederum eine Variation des Leiterquerschnitts in Längsrichtung[9)] bewirkt.

Einfluss der Leiterauslegung auf seine mechanischen Eigenschaften

Der Bi(2,2,2,3)-Bandleiter ist ein Komposit aus verschiedenen Materialien: die spröde Keramik, ummantelt von weichem Silber, sowie eventuell das durch Kleben oder Löten aufgebrachte Stahlband zur mechanischen Stabilisierung. Die Leiter können entweder aus einem einzelnen oder einem Bündel mehrerer Leiter bestehen. Heutige Leiter weisen bis über 100 Filamente auf. Vorteilhaft beim Multifilamentleiter sind die bessere Ausrichtung der Bi(2,2,2,3)-Körner auf Grund des kleineren Filamentdurchmessers. Vom mechanischen Standpunkt her hat die dadurch erreichte bessere Kornausrichtung eine erhöhte Zugfestigkeit zur Folge [12]. Es wurde auch gezeigt, dass ein zu kurzer Sinterprozess die mechanische Festigkeit verschlechtert [13].

Die rein mechanisch erreichbare Verfestigung des Leiters[10)] ist für die erwähnten Anwendungen ungenügend. Zur Erhöhung der Zugspannungsfestigkeit der Leiter werden Silberlegierungen als Matrix Material verwendet. Die Silberlegierungen[11)] zeigen jedoch zwei wichtige Nachteile: Das Legierungsmaterial kann mit der Bi-Schmelze reagieren, und das legierte Silber ist gegenüber Sauerstoff weniger durchlässig als reines Silber, was die Entstehung von Bi(2,2,2,3) verhindern kann [14]. Um eine Reaktion der Schmelze mit dem Legierungsmaterial zu verhindern, werden die inneren Umhüllungen aus reinem Silber und das äussere Rohr, das zum Bündeln aller einzelnen Filamente dient, aus einer geeigneten Legierung hergestellt. Da der Sauerstoff durch das legierte Silber weniger gut diffundiert, wurde die Leiter nach dem «Two Powders»-Verfahren[12)] hergestellt [15]. Durch Verwenden von Silberlegierungen als Matrixmaterial wird der Widerstand der Matrix erhöht, was bei AC-Anwendungen eine Reduzierung der Wechselstromverluste mit sich bringt [16]. Ferner wurde festgestellt, dass bei Multifilamentleiter in einem Silberlegierung-Substrat die einzelnen Filamente über dem Querschnitt eine homogenere Verteilung von J_c aufweisen als in reinem Silber [14]. Beim Flachrollen der Bänder ist nämlich die Matrix an den Rändern des Leiters viel dicker als im Zentrum (Bild 5). Besteht die Matrix aus weichem Silber, so werden die Filamente am Rande des Leiters weniger gut gepresst, was eine Abnahme der lokalen kritischen Stromdichte zur Folge hat. Auch konnte beobachtet werden, dass die Variation des Filamentdurchmessers in Längsrichtung[9)] bei einer legierten Matrix kleiner ist [15].

Heute kommen vor allem Ag-Mn- und Ag-Cu-Legierungen zur Anwendung (Tabelle I). Alternativ wird gelegentlich zur Verstärkung auch ein Edelstahlband[13)] (Bild 5b) an jeder Bandseite angelötet

Matrix Legierung	Bandleiter: Flussgrenze σ_{yield} [MPa]	Kritische Dehnung ε_{crit} [%]	Kritische Zugspannung σ_{crit} [MPa]	Kritische Stromdichte J_c [kA/cm^2]	Matrixmaterial Eigenschaften: Spezifischer Widerstand (77 K) ρ [µΩ/cm]	Flussgrenze σ_{yield} [MPa]
Ag (rein)	?	0,05	60	25	0,26…0,33	120
AgMn (0,062)	64	0,22	80	?	?	?
AgMn (0,25)	122	0,12	80	20	?	?
AgMn (0,4)	129	0,12	60	22	0,871	211
AgCu (0,6)	?	?	?	?	1,05	200

Tabelle I Mechanische und elektrische Eigenschaften des HTSL-Bandes, bzw. der Ag-Matrix

Die kritische Dehnung ε_{crit} entspricht einer Abnahme des kritischen Stromes von 10%. Alle Bandleiter stammen aus [20] und können miteinander verglichen werden. Zusätzlich werden noch die Eigenschaften der Matrix angegeben, falls vorhanden [20, 21, 22, 23].

oder mit Epoxydharz aufgeklebt [17]. Es konnten damit Leiter mit $\varepsilon_{crit} \approx 0{,}5\%$ und $\sigma_{crit} \approx 300$ MPa hergestellt werden.

Aufbau der Testapparatur für Kurzproben

Um den Einfluss der Zugspannung auf den Transportstrom bei 77 K eines Bi(2,2,2,3)-Bandleiters im Labor messen zu können, wurde eine möglichst einfache, vielseitig anwendbare Messapparatur entwickelt, die die Einstellung eines Magnetfeldes parallel zur c-Achse des Bandes, das Ausüben einer konstanten Zugkraft parallel zur a-Achse, sowie eine Dehnungsmessung ermöglicht (Bild 4).

Die Messapparatur ist in Bild 6 dargestellt. Der Supraleiter liegt auf einer Hartpapier-Platte auf. Er ist an einem Ende mit dem festen Rahmen, am anderen Ende mit dem beweglichen Teil verbunden (aufgepresst) und elektrisch kontaktiert. Um eine Degradierung des Supraleiters zu vermeiden wurde ein Niedertemperatur-Lot[14)] mit einer Schmelztemperatur von etwa 75 °C verwendet. Der mobile Teil ist über das Zugseil mit einem variablen Gegengewicht verbunden.

Über dem Supraleiter ist ein Hartpapierrohr zur Führung eines Permanentmagnetstapels angeordnet. Mit Hilfe von Profilplättchen konnte der Abstand zwischen dem Magneten und dem Supraleiter und somit ein Feld zwischen 0 und 0,4 T parallel zur c-Achse des Leiters (Bild 4) eingestellt werden. Die Dehnung des Supraleiters entspricht der Bewegung des mobilen Teiles und wird mittels einer Dehnmessuhr erfasst.

Tabelle II Mechanische Eigenschaften des HTSL-Bandes

Daten aus [16, 19, 20, 21]

Material	Dichte ρ [g/cm^3]	E-Modul E [GPa]	Bruchfestigkeit $\sigma_{tensile}$ [GPa]	Flussgrenze σ_{yield} [GPa]
Ag kaltgewalzt	10,61	76	0,27	0,12
Fe-304-Band	7,8	210	1,75	1,47
Bi(2,2,2,3)	6,4	82	0,145	–

Messung des kritischen Stromes unter Zugsbeanspruchung im Transversalfeld

In den Versuchen wurde ein kommerziell erhältlicher Bi(2,2,2,3)-Bandleiter[1)] verwendet (Tabelle II). Alle Messungen wurden in siedendem Stickstoff bei 77 K durchgeführt. Der kritische Strom wurde mit dem Spannungskriterium $E = 1\ \mu$V/cm über eine Länge von 3–4 cm mit dem Voltmeter[15)] bestimmt.

In der ersten Versuchsreihe wurden die Proben schrittweise einer zunehmenden Zugspannung ausgesetzt und die entsprechende Dehnung gemessen. Für jeden Schritt sind in Bild 7 der kritische Strom (unter axialer Zugspannung) bei verschiedenen Magnetfeldern sowie die Zugspannung-Dehnungskurve gezeigt.

Auffallend ist die starke und plötzliche Abnahme des kritischen Stromes bei einem Wert von $\sigma = 122$ MPa (entsprechend $\varepsilon = 0{,}235\%$). Der Zusammenbruch des kritischen Stromes in Abhängigkeit der Dehnung scheint vom externen Magnetfeld unabhängig zu sein und ist irreversibel. Die Messung wurde mit verschiedenen Proben desselben Leiters durchgeführt und es stellte sich heraus, dass der J_c-Zusammenbruch immer für $\sigma = 120 \ldots 130$ MPa (entsprechend $\varepsilon = 0{,}23 \ldots 0{,}3\%$) stattfand. Diese Beobachtungen sind auch durch frühere Publikationen bestätigt [12].

Der beobachtete Zusammenbruch von J_c kann durch Risse in einzelnen Bi(2,2,2,3)-Filamenten erklärt werden. In Bild 2 ist eine Aufnahme des Bandleiters durch ein Sekundärelektronen-Mikroskop (SEM) nach dem Zugversuch gezeigt. Man erkennt den Riss durch ein Filament, der den Stromtransport durch das Filament verhindert. Der Strom fliesst demzufolge um die Fehlerstelle oder zu einem benachbarten Filament durch die umhüllende Silber-Matrix. Bei genügend hoher Anzahl von Rissen entsteht eine Spannungserhöhung an der Probe, was definitionsgemäss den kritischen Strom reduziert. Die Versuche sind unter jeweils konstanter Zugkraft erfolgt. Gemäss [12] hat die Ausbildung eines Risses in einem Filament eine höhere Zugbeanspruchung des umgebenden Silbers zur Folge. Die

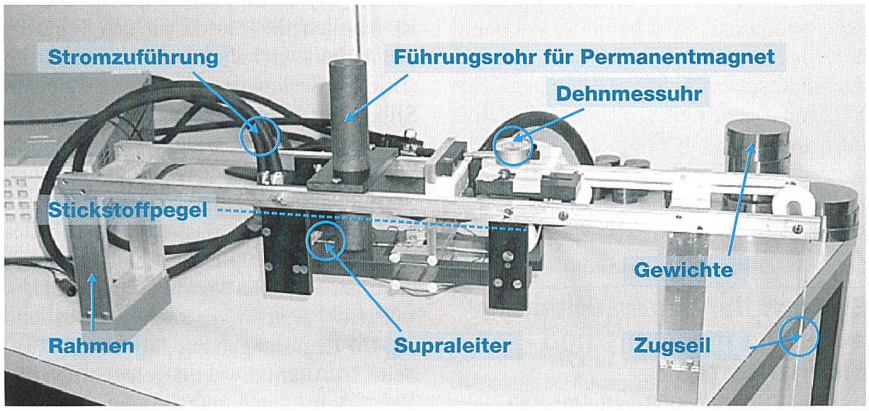

Bild 6 Messapparatur

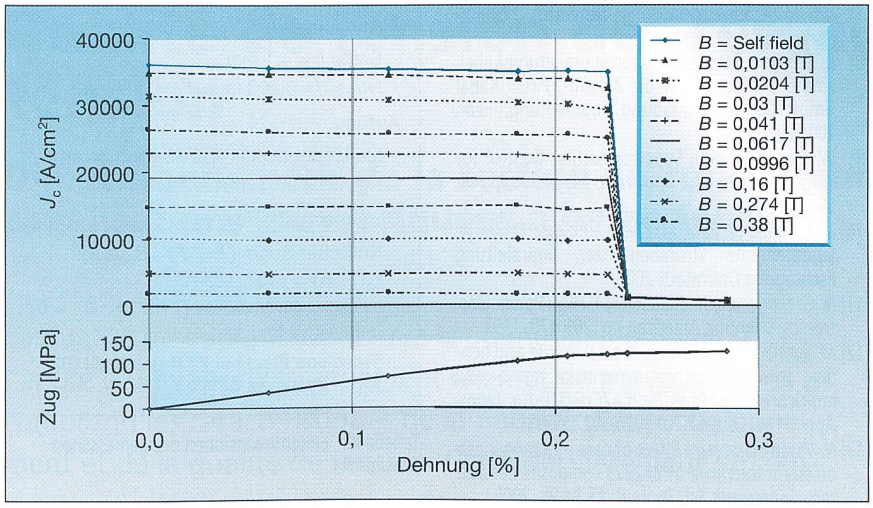

Bild 7 Messung der axialen Dehnungsabhängigkeit der kritischen Stromdichte

Mit B_{ext} senkrecht zur Leiteroberfläche und 77 K bei der verwendeten nicht verstärkten ASC-Probe[1]; die Zugspannung wird bei 77 K und parallel zur Leiterachse angelegt [19].

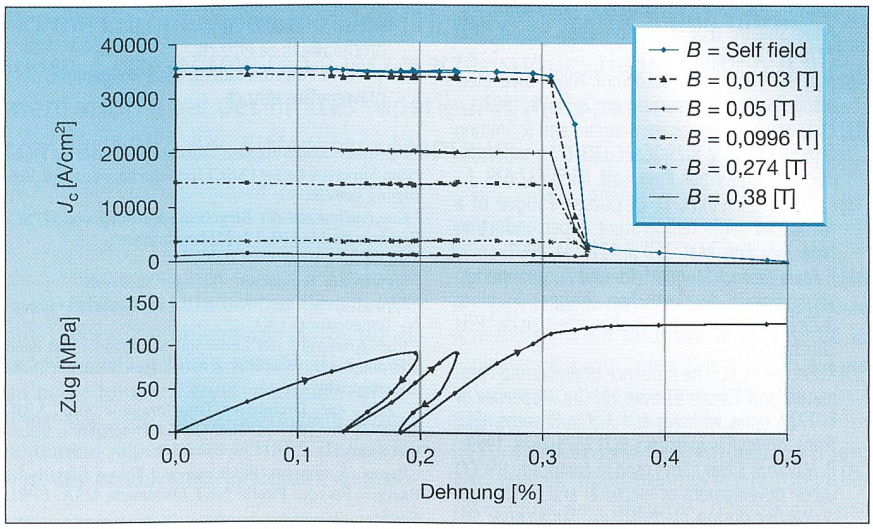

Bild 8 Kritische Stromdichte J_c in Funktion der Dehnung

Dehnung mit σ-ε-Zyklen; B_{ext} ist senkrecht zur Leiteroberfläche; 77 K bei der verwendeten nicht verstärkten ASC-Probe[1]; die Zugspannung wird bei 77 K und parallel zur Leiterachse angelegt [19].

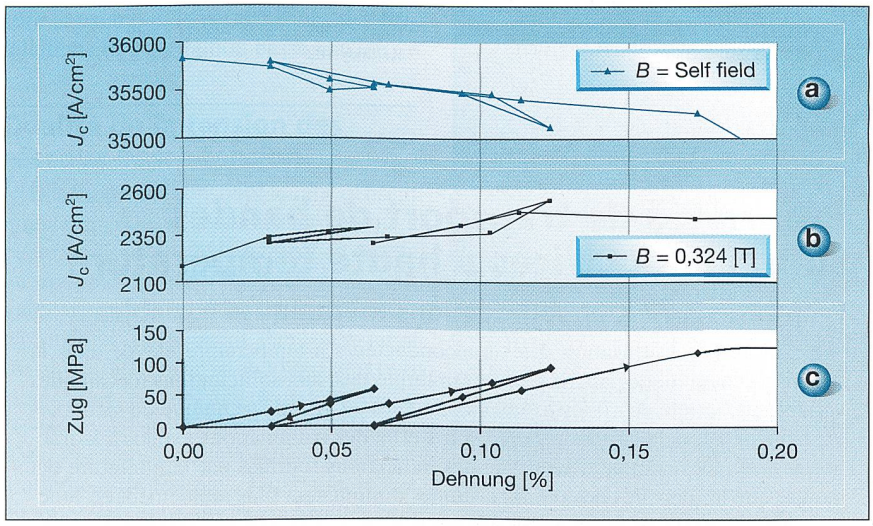

Bild 9 Detailansicht der Dehnungsabhängigkeit der kritischen Stromdichte

a: ohne externes Magnetfeld; b: mit externem Magnetfeld B = 0,32 [T]; senkrecht zur Leiteroberfläche und 77 K bei der verwendeten nicht verstärkten ASC-Probe[1]; c: die Zugspannung wird bei 77 K und parallel zur Leiterachse angelegt [19]; J_c: kritische Stromdichte bei 77 K.

Matrix dehnt sich daher weiter aus, was weitere Risse verursachen könnte und zum katastrophalen Zusammenbruch des kritischen Stromes führen kann. Bild 2 zeigt, wie sich ein Riss von Filament zu Filament ausbreiten kann.

Für Dehnungswerte < 0,2% ist in Bild 7 auch eine kleine Änderung des kritischen Stromes feststellbar. Um diese besser zu verstehen, wurde eine zweite – nachfolgend beschriebene – Messreihe durchgeführt, in der die Proben gezogen und vor dem Zusammenbruch von J_c entlastet werden sollten.

Effekte der mechanischen Zyklierung des Leiters

Mit derselben Testapparatur konnten zwei Proben einer Wechselbeanspruchung ausgesetzt werden. Bild 8 zeigt die Ergebnisse einer dieser Messungen. Der Einfluss kleiner Dehnungen ist in Bild 9a und Bild 9b für zwei Werte des externen Magnetfeldes dargestellt. Ohne externes Magnetfeld (Bild 9a) – also nur unter dem Einfluss des Eigenfeldes – nimmt J_c mit zunehmender Dehnung ab und steigt beim Entlasten wieder an. Mit B_{ext} = 0,38 T (Bild 9b) nimmt J_c bei Erhöhung der Zugspannungsbeanspruchung zu und geht beim Entlasten wieder leicht zurück. In beiden Fällen scheint das Verhalten von J_c in Funktion der Dehnung zumindest teilweise reversibel zu sein. Weitere Versuche bestätigten diese Tendenz. In den durchgeführten Versuchen verhält sich der Leiter für B_{ext} < 0,2 T analog zum Fall B_{ext} = 0 (Bild 9a) und für B_{ext} > 0,25 T analog zum Fall B_{ext} = 0,38 T (Bild 9b).

Bei kleinem externem Magnetfeld $B_{ext} < B_g$ (Bild 9a, Tabelle III) haften die Magnet-Flussschläuche bekanntlich im Inneren der Bi(2,2,2,3)-Körner [18]. Die Abnahme von J_c kann nicht alleine durch Risse verursacht werden, da sie teilweise reversibel ist. Ein möglicher Einfluss der Dehnung auf den Stromtransport liegt in den Kopplungen zwischen den einzelnen Bi(2,2,2,3)-Körnern: Die Dehnung vergrössert den Abstand – und reduziert somit die Kopplung – zwischen den Körnern; ein typisches Weak-link-Phänomen zwischen zwei Korngrenzen findet statt: Der kritische Strom nimmt ab.

Bei Steigerung des externen Magnetfeldes (hier bei B_{ext} > 0,2 T) nimmt die Zahl der Flussschläuche im Korn zu. Diese werden durch den Transportstrom (durch die Lorentzkraft) zu den Korngrenzen getrieben. Die Flussschläuche bleiben an den Pinning-Zentren (Haftzentren) der Korngrenzen haften. Die durch die mechanische Zugspannung erhöhte Dehnung führt zu einer weiteren Defor-

Das Projekt wurde mit Unterstützung der Firma ASC durchgeführt. Die Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich hat Materialproben zur Verfügung gestellt und die Messapparatur aufgebaut. Die Mikroskopaufnahmen schliesslich wurden vom Institut für Metallforschung und Metallurgie und vom Institut für Nichtmetallische Werkstoffe (beide ETH Zürich) erstellt.

mation der Korngrenzen und damit zu einer Erhöhung der Pinning-Kräfte. Die Flusschläuche bleiben an den Haftzentren hängen. Die im oberen Fall (Bild 9a) beschriebene Abnahme des kritischen Stromes auf Grund der durch die Dehnung geschwächten Kopplung wird im Fall (Bild 9b) durch das grössere Haftvermögen der Korngrenze überkompensiert. Die Zu- und Abnahme der Stromdichte (in der Grössenordnung von 5–10%) ist allerdings nur bei höheren Werten von B_{ext} und z.B. in elektronischen Apparaten von Bedeutung. In energietechnischen Anwendungen dürften die schwachen Stromschwankungen kaum ins Gewicht fallen.

Zusammenfassung

Die im Labor durchgeführten Versuche ermöglichten eine realistische Nachbildung der Beanspruchung des Supraleiters im Betrieb. Supraleiter vom Typ II (LTC) wie etwa Nb_3Sn waren im Magnetbau für Dehnungen unter 0,2% (bei etwa 200 MPa) ausgelegt [15]. Mit geeigneten Massnahmen können Bi(2,2,2,3)-Bänder realisiert werden, die einer kritischen Dehnung von 0,4% angesetzt werden können. Der Einsatz von HTSL in einigen Tieftemperatursupraleiter-Anwendungsbereichen ist aus dieser Sicht somit denkbar.

Referenzen

[1] DOE/Philadelphia Electric Compagny, DC Distribution System Study, 1988, erhältlich beim DOE.

[2] *M. Lakner*: Supraleitender Transformator. Collection ETG, 10, 2000.

[3] *J. Schwartz, U. P. Trocienwik, H. J. N. van Eck, D.C. van der Laan. et al.*: Strain effects and AC losses in bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductors. National High Magnetic Field Laboratory & Center for Advanced Power Systems, Florida State University.

[4] *J. Kellers, L. Masur*: Reliable Commercial HTS Wire for Power Applications. Eucas 2001.

[5] *P. M. Grant*: Superconductivity and Electric Power. IEEE Trans. Appl. Supercond., 7(2) 1997, p. 126.

[6] *W. Knorr, R. Schlosser*: Supraleitende Transformatoren und ihre Einsatzgebiete: Tagungsbeilagen Supraleitung: Eine Komponente zukünftiger Energieversorgung. VWEW, 2001.

[7] 300 MVA Superconducting Generator. EPRI-Report, 1982.

[8] *R. Schroth*: Hochtemperatur Supraleitungskabel: eine neue Technik für die Zukunft. Pirelli Kabel GmbH Berlin, Fachtagung Supraleitung, Febr. 2001 Darmstadt.

[9] *W. Paul, M. Chen*: Superconducting Control for surge currents. IEEE Spectrum, May 1998, p. 49-55.

[10] *M. Lackner, W. Paul, M. Chen, J. Rhyner, D. Braun*: Supraleitende Strombegrenzer, Supraleitung Fachtagung Darmstadt 2001.

[11] *N. G. Hingorani, K. E. Stahlkopf*: High Power Electronics, Scientific American no. 269 p78, 1993.

[12] *M. Suenaga et al*: Effects of axial tensile and bending strains on critical currents of mono- and multicored (Pi, Pb)Bi2Sr2Ca2Cu3O10-Ag tapes. Appl. Phys. Lett. 67(20) 3025-3027, 1995.

[13] *N. Vasanthamohan*: Effect of core inhomogeneity on strain tolerance of Bi-2223 composite conductors. Supercond. Sci. Technol. 15 94-98, 2002.

[14] *A. Hütten et al.*: Powder-in-tube-processe Multifilamentary Bi-(2223) Tapes with Silver-Alloy Sheaths. IEEE Trans. on Magn. 33(5) 3448-3450, 1997.

[15] *P. X. Zhang*: Fabrication and Properties of High Jc Multifilamentary (Bi, Pb)-2223 Tapes with Ag-Alloy Sheath. IEEE Trans. on appl. Superc. 9(2) 2770-2773, 1999.

[16] *N. G. Hingorani, K. E. Stahlkopf*: High Power Electronics, Scientific American no. 269 p78, 1993.

[17] *Q. Li et al.*: Vortex phase diagram and Jc limiting factor in high Tc Bi2Sr2Ca2Cu3O10/Ag superconducting tapes. Appl. Phys. Lett. 66(5) 637-639, 1

[18] *L. Holtz, S. Fleshler, D. U. Gubser*: Fatigue of a reinforced high temperature superconducting tape. Adv. Eng. Mat. 3(3) p. 131–134, 2001.

[19] *P. Favre-Perrod*: Magnetfeld- und Zugspannungsabhängigkeit des kritischen Stromes in einer Bi2Sr2Ca2Cu3Ox Probe. Studienarbeit an der ETH Zürich, 2002.

[20] *K. Fischer et al.*: The influence of Processing Parameters and Tensile Stresses on the Properties of Bi-2223 Tapes with Ag and AgMn Sheaths. IEEE Trans. on appl. supercond. 9(2) 2625-2628, 1999.

[21] *R. Navarro*: Silver alloys used in composite BSCCO tapes: development of electrical and mechanical properties during manufacture. Supercond. Sci. Technol. 13 147-170, 2000.

[22] *K. C. Goretta et al.*: Strength and Flexibility of Bulk High-Tc Superconducors. IEEE Trans. on appl. supercond. 7(2) 1307-1310, 1997.

[23] *Z. Han et al.*: The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag composites. Supercond. Sci. Technol. 10 371-387, 1997.

Abmessungen	
Breite b = 4,1 mm	
Höhe h = 0,203 mm	
Aufbau	
Multifilamentleiter aus 55 Filamenten	
Ag-Anteil am Leiterquerschnitt 60%	
Gemessene Daten	
Kritischer Strom (T= 77 K, B_{ext} = 0):	
I_{c0}(77 K) = 110…123 A	
Kritische Stromdichte (T = 77 K, B_{ext} = 0):	
J_{c0}(77 K) = 33…36 kA/cm^2	
Transition Field bei 77 K gemäss [19]:	
B_g(77 K) = 0,25 T	

Tabelle III Leiterdimensionen des gemessenen Bandleiters

Adressen der Autoren

Prof. Dr. *Habibo Brechna, Patrick Favre-Perrod*, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, Physikstrasse 3, CH-8092 Zürich, brechna@eeh.ee.ethz.ch.

Patrick Favre-Perrod, Student, 1659 Rougemont, pfavrepe@ee.ethz.ch

[1] Die untersuchten Bänder wurden von der Firma American Superconductor (ASC) freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

[2] Untersuchungen der Biegebeanspruchung von HTSL-Bändern sind in [10, 12, 23] beschrieben.

[3] Bi(2,2,2,3): $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

[4] Verwendete Temperatur: flüssiger Stickstoff

[5] Typisch etwa 5 mm breit und 0,4 mm dick, bei Flüssig-N_2-Temperatur (77 K)

[6] Eine Armierung der Leiter mit Stahlbändern ist dann allerdings nötig, was aber dem heutigen Stand der Technik entspricht.

[7] Z.B. der Dreiphasen-Transformator von ABB, 630kVA, der 1997 in einer Genfer Unterstation installiert wurde.

[8] Japan: Sumitomo, Furakawa und Tokyo Elektrische Energie; Europa: Pirelli, NKT Dänemark; USA: EPRI, Pirelli

[9] Englisch: «Sausaging»

[10] Beispielsweise Gesenkdrücken, Rollen oder Querschnittsreduktion per Durchgang

[11] Z.B. AgMn, AgCu oder AgMg

[12] Ausgangspulvergemisch aus Bi(2,2,1,2) und $CaCuO_2$

[13] Dicke d_s etwa 50 µm,

[14] Bi(45.5)Cd(9.1)Pb(24.5)Sn(11.8)In(9.1)

[15] Keithley 182

Propriétés de transport de bandes supraconductrices à haute température

Propriétés à 77 K et sollicitations mécaniques variables

Le succès de l'utilisation des supraconducteurs à température élevée dans la technique énergétique dépend de leur durabilité face aux sollicitations mécaniques variables. L'article décrit les examens effectués au groupe technique de technologie haute tension de l'EPF de Zurich sur l'effet des sollicitations axiales à la traction à 77 K. Des comparaisons avec des indications fournies par la littérature ont montré que les densités de courant critiques diminuaient plus rapidement en fonction des sollicitations par traction que pour les sollicitations par flexion. Ceci est dû à des fissures empêchant le transport de courant à travers les filaments céramiques cassants des supraconducteurs.