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: 92 (2001)

Heft: 25

Artikel: Die internationale Zusammenarbeit bei der Hochtemperatur-Supraleitung im Energiebereich

Autor: Brüniger, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855800

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

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

Die internationale Zusammenarbeit bei der Hochtemperatur-Supraleitung im Energiebereich

Die Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) hat in den vergangenen 15 Jahren seit ihrer Entdeckung bedeutende Fortschritte erzielt. Die an sie gestellten Erwartungen – vor allem hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit – hat sie vor allem wegen der Komplexität der zu bearbeitenden Materialien jedoch noch nicht erfüllt. Neue Produktionsmethoden und verstärkte weitere Entwicklungsarbeit versprechen aber eine Verbesserung der Situation. Dabei ist der kontinuierliche Informationsaustausch über die weltweiten Aktivitäten für die Entwicklung von zentraler Bedeutung. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die internationale Zusammenarbeit im Energiebereich.

Roland Brüniger, René Flükiger

Die Entdeckung der HTSL im Jahr 1986 durch die beiden Forscher A. Müller und G. Bednorz löste weltweit grosse Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet aus. Verschiedene Forscherteams in anerkannten Labors und namhafte Institutionen formierten sich und arbeiteten in verschiedenen Bereichen und mit unterschiedlichen Schwerpunkten an diesem viel versprechenden Thema.

In den vergangenen 15 Jahren seit der Entdeckung der HTSL sind bedeutende Fortschritte in der Technologie und in der Leiterentwicklung erzielt worden: so ist es gelungen, diese Materialien in Form von Bandleitern herzustellen, als Basis für die Prototyp-Herstellung von supraleitenden Kabeln, Transformatoren, Strombegrenzer und Magneten. Die Testresultate der bekannten Prototypen waren alle erfolgreich. Trotzdem hat sich in der jüngeren Vergangenheit durch verschiedene Problemstellungen eine gewisse Ernüchterung breit gemacht. In der Tat ist – trotz diesen beachtenswerten Ergebnissen in Forschung und Entwicklung von HTSL-Bändern und -Leitern – die Marktreife bis heute noch nicht erreicht worden. Je nach Anwendungsgebiet stehen heute Drähte und Leiter mit hohen supraleitenden Stromdichten zur Verfügung, die technisch gesehen den Anforderungen durchaus genügen. Ein Vergleich mit der heute gängigen, klassischen Stromleitung zeigt aber, dass die Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen noch nicht erreicht wurde. Substanzielle Verbesserungen und Weiterentwicklungen sind noch notwendig: es ist zwar absehbar, dass dieses Ziel eines Tages erreicht wird, heute ist dies aber noch eine bedeutende technologische Herausforderung.

Erfolgreiche Entwicklungen in der Schweiz

Auch in der Schweiz wurde die Forschung im Bereich der HTSL über eine längere Zeit mit bedeutenden öffentlichen Mitteln gefördert: mit insgesamt etwa 60 Mio. Fr. in den letzten 12 Jahren. Gegenüber den in andern Ländern eingesetzten Mitteln (USA: über 2 Mia. $, Japan: über 2 Mia. $ und Deutschland: etwa 0,6 Mia. $) mag dies als sehr gering erscheinen. Die Resultate können sich aber sehen lassen. So wurden im Energiebereich in Zusammenarbeit mit der Firma ABB zwei Prototypen entwickelt, die beide weltweit zum ersten Mal zum Einsatz kamen und eine einjährige Testphase im schweizerischen Netz mit Erfolg bestanden haben. Es sind dies ein 660-kW-Dreiphasen-HTSL-Transformator[1], und ein Strombegrenzer[2].

Neue supraleitende Materialien

HTSL-Leiter unterscheiden sich von herkömmlichen Kupferleitern dadurch, dass sie in Bändern anstatt in Drähten hergestellt werden: dies hat seinen Grund in der anisotropen kristallinen Struktur, die anisotrope Stromleitungseigenschaften zur Folge hat. Die heutigen Entwicklungen auf dem Gebiet der industriellen HTSL für Energieanwendungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Verbindung $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$, oder in abgekürzter Schreibweise Bi,Pb (2223). Diese Verbindung hat eine supraleitende Sprungtemperatur T_c von 110 K (unterhalb dieser Temperatur verschwindet der elektrische Widerstand) und ist bei 77 K bis zu magnetischen Induktionsfeldern von 0,2 T einsetzbar. Damit ist sie für Kabel und Transformatoren geeignet. Die durch eine Silberhülle stabilisierten Ag/Bi,Pb(2223)-Bänder mit Abmessungen von etwa 4×0,3 mm können heute industriell bis zu Längen von einigen Kilometern hergestellt werden. Die industrielle Herstellung umfasst aber eine sehr aufwändige Verformung, mit einer hohen Anzahl von Verformungsschritten bis die Endabmessungen von 4×0,3 mm erreicht werden, gefolgt von einer sehr anspruchsvollen Reihenfolge von mechanischer Deformation (Walzen) und thermischer Reaktion, die zusammen als «Thermomechanische Glühbehandlung» bezeichnet werden. Dabei muss die Glühtemperatur (bei etwa 825 °C in einer Atmosphäre aus einem Argon-7% Sauerstoffgemisch) sehr genau eingestellt werden: die Schwankung darf nicht mehr als 1 °C betragen.

Ein weiterer Faktor, der sich ungünstig auf die Kosten auswirkt, ist der bis heute fehlende Ersatz für das für die Schutzhülle verwendete Silber: dies führt dazu, dass die Ag/Bi,Pb(2223)-Bänder immer noch zu mehr als 60% aus Silber bestehen. Es ist daher verständlich, dass die Kosten für solche Bänder noch wesentlich über den Kosten für konventionelle Stromleiter liegen.

Es wird erwartet, dass die Herstellungskosten – auf Grund der Produktion grösserer Mengen – in den nächsten Jahren stark sinken werden. Weitere beträchtliche Einsparungen werden durch eine Erhöhung der supraleitenden Stromdichten j_c dieser Bänder erwartet (die Grösse j_c erhält man durch Division des elektrischen Stroms I_c, bei dem das Band normalleitend wird, durch den Querschnitt des Ag/Bi,Pb(2223)-Bandes). Gegenwärtig sind bei führenden Laboratorien grosse Anstrengungen im Gange, um neue Reaktionswege zu finden, die eine bessere Qualität der einzelnen Filamente und somit eine wesentliche Erhöhung der supraleitenden Stromdichte j_c mit sich bringen. Es besteht die berechtigte Hoffnung, Stromdichtewerte von $j_c > 50$ kA/cm^2 bei einer Temperatur von 77 K und im Nullfeld zu erreichen (gegenwärtig werden etwa 30 kA/cm^2 erreicht). Durch ein Zusammenwirken all dieser Faktoren hofft man, die Gesamtkosten von Ag/Bi,Pb(2223)-Bänder näher an den Grenzwert von 10 bis 30 $/kAm zu bringen, der für eine weitere Verbreitung dieser Technologie erforderlich ist.

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$-Bänder als Alternative

Als mögliche Alternative zu den Bändern aus Bi,Pb(2223) werden heute Bänder der Verbindung $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (T_c = 92 K) ernsthaft in Betracht gezogen, und es werden gegenwärtig entsprechend beträchtliche Mittel weltweit eingesetzt, um diese Entwicklungen zu verfolgen. Es wird erwartet, dass die Herstellung solcher Bänder kostengünstiger sein könnte als diejenige von Ag/Bi,Pb(2223)-Bändern. Ein $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$-Band besteht aus einem Ni-Band, das zuerst mit einem Isolator – z.B. CeO_2 – und dann mit dem Supraleiter beschichtet wird. Dabei besteht die wesentliche Bedingung für hohe Stromdichtewerte darin, auf der ganzen Länge des Bandes eine biaxiale Texturierung[3] in der Supraleiterschicht zu erzielen. Diese Bänder (so genannte «Coated Conductors») werden im Gegensatz zu Ag/Bi,Pb(2223)-Bändern nicht durch Pulvermethoden, sondern durch komplexe Beschichtungsverfahren hergestellt. Die Entwicklung dieser Verfahren ist heute im vollen Gange, wobei im Gegensatz zu Ag/Bi,Pb(2223)-Bändern die Schwierigkeit darin besteht, hohe Stromdichten auf der ganzen Länge des Bandes zu erreichen. Diese Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen: die heute erzielte Länge solcher Leiter ist auf Längen unterhalb von 10 m begrenzt. Es steht ausser Zweifel, dass in absehbarer Zeit Längen von über 100 m erzielt werden können: die Erfüllung dieser Bedingung – zusammen mit einer gleichzeitigen Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit – wird die Produktionskosten unter die oben genannte Grenze drücken und somit in absehbarer Zeit zu einem Marktdurchbruch führen.

Supraleitung für Überraschungen gut

Unabhängig von den heute laufenden Entwicklungsarbeiten ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass es auf dem Gebiete der Supraleitung noch heute zu positiven Überraschungen kommen kann. So wurde im Januar 2001 beispielsweise ein neues supraleitendes Material entdeckt: MgB_2, mit T_c = 39 K. Mittlerweile wurde herausgefunden, dass durch Pulvermetallurgie und mit einer Hülle aus Eisen oder Nickel auf einfache Art sehr kostengünstige Leiter hergestellt werden können, die bei 4,2 K Stromdichten von über 10^6 A/cm^2 tragen, also dieselbe Grössenordnung wie bei Nb_3Sn-Drähten. Leider beträgt das bis heute für MgB_2 gemessene obere kritische Magnetfeld, B_{c2}(4,2 K), nur etwa 14 bis 15 T, also etwa die Hälfte des für Nb_3Sn gemessenen Wertes; dieser Nachteil wird aber teilweise dadurch wettgemacht, dass Anwendungen von MgB_2-Drähten bei höheren Temperaturen, etwa zwischen 20 und 25 K möglich sind (Beispiel: magnetische Separation bei der Gewinnung von Erzen). Auf Grund der kürzlich an dünnen Filmen erhaltenen Resultate ist es nicht ausgeschlossen, dass diese neue Verbindung bei weiterer Entwicklung die bisherigen Supraleiter auf einigen Gebieten verdrängen könnten.

Internationale Aktivitäten

Die Technologie der HTSL findet in mehreren Bereichen Verwendung, wobei im vorliegenden Beitrag der Energiebereich im Vordergrund steht. Transformatoren, Strombegrenzer und -schalter, Kabel, rotierende Maschinen (Generatoren und Motoren) und supraleitende magnetische Energiespeicher (Smes) sind alles Komponenten, die dank der HTSL-Technologie neue Möglichkeiten erschliessen oder deren Realisierung durch HTSL-Technologie überhaupt erst ermöglicht wird (wie etwa der Strombegrenzer).

Um einen kontinuierlichen Überblick über die internationalen Aktivitäten im Bereich der HTSL behalten zu können, und um über die jeweiligen weltweiten Fortschritte stets auf dem Laufenden zu sein, beteiligt sich die Schweiz seit über 10 Jahren am «Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector». Dieses international ausgerichtete Programm steht unter der Leitung der internationalen Energieagentur (IEA).

Das Implementing Agreement ist breit abgestützt. Folgende Länder nehmen neben der Schweiz am Programm teil: Kanada, Dänemark, Finnland, Deutschland, Israel, Italien, Japan, Korea, Holland, Norwegen, Schweden, Türkei, UK und die USA. Es wurde 1990 gestartet, und erst kürzlich wurde eine erneute Verlängerung für weitere drei Jahre bis 2003 vorgenommen. Im nun laufenden Programm wird dem Informationsaustausch über Methoden von Testen und Standardisieren im HTSL-Bereich sowie auch der Entwicklung von HTSL-Prototypen verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt.

Der Grundgedanke dieses IEA-Programms ist und bleibt aber unverändert das Austauschen von Informationen über die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet der HTSL in der Energietechnik. Verschiedenste Anstrengungen auf den vier Kontinenten Asien, Australien, Europa und Nordamerika werden unternommen, um keramische Supraleiter für zukünftige Einsatzgebiete im Energiebereich zu entwickeln. Einige dieser Aktivitäten sind privatwirtschaftlich finanziert, wodurch deren Ergebnisse nur beschränkt der Öffentlichkeit zugänglich sind. Andere Arbeiten jedoch sind mit öffentlichen Mitteln finanziert, was dazu führt, dass die Ergebnisse grösstenteils auch öffentlich verfügbar sind.

Auf Grund dieser Situation sind die Mitgliedstaaten interessiert, dass ein kontinuierlicher Informationsaustausch über den Fortschritt, den Status und die vorgesehenen Arbeiten auf diesem Gebiete stattfindet. Zudem sind die Teilnehmer des Exekutivkomitees überzeugt, dass der ökonomischste Weg für die Informationsverteilung über ein IEA Implementing Agreement erfolgt. Damit können konzentriert die Informationen gesammelt, aufbereitet und den Mitgliedstaaten in zusammenfassenden Reports zur Verfügung gestellt werden.

Das Programm ermöglicht es den Mitgliedstaaten einerseits, auf Berichte zuzugreifen, und andererseits, fremde Laboratorien, Testeinrichtungen sowie industrielle Unternehmen zu besuchen und dort einen offenen Informations- und Gedankenaustausch durchzuführen.

In den vergangenen zehn Jahren wurden bereits viele Berichte verfasst (siehe Literaturverzeichnis). Es würde den Rahmen der vorliegenden Ausführungen sprengen, auf all diese Informationen und Schlussberichte einzugehen. Es sei an

Die Schweizer Vertretung im IEA-HTSL-Implementing-Agreement wird durch Herrn Prof. Dr. René Flükiger wahrgenommen. Für das Forschungsprogramm «Elektrizität» des Bundesamts für Energie ist Herr Roland Brüniger verantwortlich. (siehe «Adressen der Autoren»)

dieser Stelle lediglich erwähnt, dass in den letzten beiden Jahren die Schwerpunkte auf Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekte gelegt wurden. Zudem wurde auch der Bereich Systemverfügbarkeit und Zukunftsaussichten der HTSL untersucht und dabei ebenfalls auch die Thematik der Wechselstromverluste (AC-Verluste) in Hochtemperatursupraleitern betrachtet. Fortschritte im Schwung-Radbereich bzw. bei den magnetischen Lagern wurden dazu in einem separaten Bericht festgehalten.

Nationale Aktivitäten

Analog zum internationalen IEA-Programm wird auch auf nationaler Ebene ein institutionalisierter Informationsaustausch zwischen den interessierten Industrie- und Forschungsstätten gepflegt. Dazu wurde durch die Programmleitung des Forschungsprogramms «Elektrizität» des Bundesamts für Energie ein jährlich stattfindendes HTSL-Statusseminar etabliert. Dort werden die jeweiligen Fortschrittte der Forschungsinstitute präsentiert, und es wird auch genügend Zeit für Diskussionen eingeräumt.

Es ist zu hoffen, dass die Schweiz ihre Spitzenposition auf dem Gebiet der HTSL erhalten kann – im gegenwärtigen wirtschaftlichen Umfeld sicher kein leichtes Unterfangen, da die heutige Anstrengungen wirtschaftlich gesehen wohl erst in mittlerer Zukunft Früchte tragen dürften. Der im IEA-Programm gepflegte Gedanken- und Informationsaustausch soll aber weiterhin dazu beitragen, dass das Fachwissen in der Schweiz erhalten bleibt.

Literatur zu den IEA Implementing Agreements

Seit 1988 wurden bisher insgesamt 30 Berichte veröffentlicht. Nachfolgend sind die seit 1996 publizierten Berichte aufgeführt:

R. F. Giese: The Status of Progress Toward High-Temperature Superconducting Bulk High-Amperage Conductors. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, Januar 1996.

R. F. Giese: Published Assessments Bearing on the Future Use of Ceramic Superconductors by the Electric Power Sector. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, Oktober 1996.

A. M. Wolsky: High-Temperature Superconductivity for the Electric Power Sector: Advances Toward Power Sector Applications. Brochure prepared on behalf of the signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector. Januar 1997.

A. M. Wolsky: The Status of Progress Toward High-Amperage Conductors Incorporating High-Temperature Superconductors. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, März1997.

R. F. Giese: Directory of Superconducting Device Projects Bearing Upon the Electric Power Sector. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, November 1997.

R. F. Giese: Progress Toward High-Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems, A Second Look. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, September 1998.

D. P. Peterson: Presentations at Workshop on Potential Future Impact of Superconductivity on System and Customer Reliability. Under the auspices of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector and sponsored by US DOE and hosted by Los Alamos & Argonne National Laboratories, Santa Fe, New Mexico, USA, 5./6. Oktober 1999.

A. M. Wolsky: The Likely Future Impacts On Environment, Safety, And Health From The Power Sector's Future, Widespread Use Of Superconducting Equipment. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, Dezember 1999.

A. M. Wolsky: The Status of Progress Toward Flywheel Energy Systems. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, in Vorbereitung , 2000.

G. E. Marsh, A. M. Wolsky: AC Losses in High-Temperature Superconductors. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, Mai 2000.

A. M. Wolsky: Status of Progress on Superconducting Magnetic Separators. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, in Vorbereitung, 2000.

A. M. Wolsky: Today's Explorations Bearing upon the Private Sector's Future Use of Magnets Incorporating High Temperature Superconductors. For signatories of the IEA Implementing Agreement for a Co-Operative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, 12. April 2001.

Links

www.electricity-research.ch
www.iea.org.com

Adressen der Autoren

Roland Brüniger, Dipl. El.-Ing. ETH, R. Brüniger AG, 8913 Ottenbach, Tel. 01 760 00 66, roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

René Flükiger, Prof. Dr., Universität Genf, 1211 Genève 4, Tel. 022 702 62 40, rene.flukiger@physics.unige.ch

[1] Der supraleitende 660-kW-Dreiphasen-Transformator, bestehend aus Bi,Pb(2223)-Bändern, wurde ein Jahr lang ans Netz der Genfer Stadtwerke angeschlossen und erfolgreich betrieben.

[2] Der von ABB entwickelte induktive Strombegrenzer auf Bi(2212)-Basis mit einer Nennleistung von 100 kW wurde ein Jahr lang ohne Probleme ans Netz angeschlossen.

[3] Man bezeichnet eine Texturierung als *biaxial*, wenn nicht nur die kristallographischen *c*-Achsen der einzelnen Körner senkrecht zur Film-Ebene, sondern auch die *a*- und *b*-Achsen in der Film-Ebene selbst ausgerichtet sind.

La collaboration internationale dans la supraconduction à haute température dans le domaine de l'énergie

Depuis la découverte de la supraconductivité à haute température il y a 15 ans, de remarquables progrès ont été atteints. Ces matériaux n'ont pas encore atteint le but espéré d'une grande pénétration dans le marché, surtout à cause des grandes difficultés rencontrées lors de la fabrication de longs conducteurs. Toutefois, on peut s'attendre à moyen terme à ce que de nouvelles méthodes de fabrication et des efforts combinés entrepris dans plusieurs pays portent leurs fruits et que la situation soit améliorée. L'échange continu d'informations concernant les activités dans ce domaine au niveau mondial est d'une importance capitale pour les développements futurs. Le présent article illustre la collaboration internationale dans le domaine de l'énergie.