

Jahresbericht 2003, 15. Dezember 2003

IEA-Implementing Agreement „Assessing the Impact of High Temp. Superconductivity on the Electric Power Sector“ (EXCO Member)

Autor und Koautoren	René Flükiger
beauftragte Institution	Université de Genève, Dépt. Phys. Matière Condensée (DPMC)
Adresse	24, quai Ernest Ansermet, 1211 Genève 4
Telefon, E-mail, Internetadresse	Tel. 022 379 6240; rene.flukigephysics.unige.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	39 929/79 747
Dauer des Projekts (von – bis)	1.1.2001 – 31.12.2003

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des hier beschriebenen Projektes ist eine möglichst umfassende Information über die nationalen und internationalen Aktivitäten auf dem Gebiet der Hoch- T_c -Supraleitung. Von besonderem Interesse sind dabei nicht nur die Entwicklungen von Supraleiter-Materialien: von Interesse sind auch deren Einsatz in industriellen Anlagen sowie anfallende Kühlprobleme.

Im Jahr 2003 wurden zwei Informationstreffen im Rahmen des IEA – Projektes durchgeführt. Das erste Treffen fand in Mailand statt und war vor allem dem Thema der supraleitenden Kabeln gewidmet, auf der Basis von Bi,Pb(2223) – Leitern. Der mögliche künftige Einsatz von Y-123 – Leitern (zweite Generation, "coated conductors") wurde besprochen. Es wurde eine vollständige Darstellung über die wichtigsten, heute im Bau stehenden, Kabel gegeben, die alle 2004 oder 2005 im Testbetrieb ans Netz gehen werden (3 in USA, 2 in Japan, 1 in Südkorea, 1 in China). Der ausgezeichnet dokumentierte Kurs war an Ingenieure gerichtet und gab eine vollständige Uebersicht über den internationalen Stand auf dem Gebiet der supraleitenden Kabel. Technische Details wurden erörtert und die anfallenden Kosten wurden abgeschätzt. Die verschiedenen Kühlsysteme, also "warm dielectric" oder "cold dielectric" wurden miteinander verglichen. Vor- und Nachteile von supraleitenden Kabeln im Vergleich zu Kupferkabeln wurden im Detail besprochen. Als neue Einsatzmöglichkeiten für supraleitende Kabel wurde ein Schiffsmotor vorgestellt, der gegenwärtig in den USA gebaut wird (60% Gewichtsersparnis).

Das zweite IEA-Informationstreffen fand in Stockholm (Schweden) statt. An dieser Veranstaltung wurden Sicherheitsaspekte beim Einsatz supraleitender Kabel besprochen. Weiter wurde auf die politischen und sozialen Aspekte des Einsatzes von supraleitenden Kabeln im Detail eingegangen, sowie auf die anfallenden Kühl- und Vakuump Probleme. Die möglichen Vorteile eines Gleichstrombetriebs von supraleitenden Kabeln wurden aufgezeigt. Praktische Erfahrungen beim Einsatz der heute gebauten supraleitenden Kabel sind notwendig, als Basis für weitergehende Marktstudien.

Die Dokumentation zu diesen IEA-Treffen wurde an alle in der Schweiz in der Supraleitung tätigen Forschungsinstitute und Industrien weitergeleitet und im alljährlich stattfindenden Status-Seminar im November ausführlich kommentiert. Eine Weiterführung des IEA-Projektes um 2 Jahre wurde beschlossen.

Projektziele

Die Projektziele beinhalten eine umfassende Information über die neuesten Fortschritte und Anwendungen auf dem Gebiet der **Hoch-T_c-Supraleitung (HTSL) im Energiebereich**. Dazu zählen supraleitende Transformatoren, Kabel, Strombegrenzer, Generatoren, Motoren und Schwungräder, sowie magnetische Energiespeicher (SMES). Der Zugang zu dieser Dokumentation wird durch die Teilnahme der Schweiz an einem Programm sichergestellt, das unter der Leitung der International Energy Agency (IEA) steht: *"Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector"*.

Die Projektziele umfassen den Informationsaustausch über die bisher erreichten Fortschritte, über den gegenwärtigen technischen Stand und die zukünftig vorgesehenen Arbeiten. Das Programm ermöglicht den 12 Mitgliedstaaten, gegenseitig technische Berichte auszutauschen und Laboratorien und Testeinrichtungen, sowie industrielle Unternehmen zu besuchen. Ein besonderer Schwerpunkt dieser umfassenden Orientierung im IEA-Agreement ist das periodische Erscheinen von detaillierten, technisch hochstehenden Berichten, die ausser der Durchführbarkeit von neuen supraleitenden Lösungen auch Aspekte wie Umwelt und Sicherheit, aber auch die Durchdringung des Marktes durch HTSL - Produkte untersucht. Zusätzlich wird die **Anwendbarkeit** der hier entwickelten Konzepte auf den Schweizer Markt untersucht.

In diesem Jahr fanden zwei IEA-Informationstreffen statt, in Mailand (Italien) und Stockholm (Schweden). Die Ergebnisse dieser zwei Treffen wurden am 5. November am Status-Seminar **"HTSL in der Energietechnik"** in Bern vorgestellt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im **ersten IEA-Informationstreffen** (7.-9. April 2003, in Milano (Italien)), wurde als Hauptthema die Anwendung von supraleitenden Kabeln besprochen. Die Grundsätze von supraleitenden Kabeln wurden im Detail behandelt, wobei folgende wichtige Fragen im Vordergrund standen: a) Welches ist der aktuelle Stand weltweit?, b) Welche Schwierigkeiten müssen noch überwunden werden?, c) Wie stehen die Chancen für einen erfolgreichen Test eines supraleitenden Kabels?, und d) Welches wären die Konsequenzen im Erfolgsfall?

Es wurde aufgezeigt, dass durchaus ein Bedarf für **supraleitende Kabel** besteht, und zwar im Falle von bereits überbeanspruchtem Untergrund in Städten, in denen ein neuer Energiebedarf besteht. Die Möglichkeit, im selben Querschnitt bis zu 5 Mal mehr Strom zu führen, erscheint als vielversprechende Alternative. Als mögliche Einsatzorte können New York und Tokyo erwähnt werden, sowie eine Anzahl schnell wachsender asiatischer Gross-Städte, wie Shanghai, Kanton, Seoul, Singapur, usw. Die neuen Bedürfnisse in Asien auf dem Energiesektor könnten in den nächsten Jahren tatsächlich zu einer neuen Situation führen. Es gilt allerdings, mehrere Bedingungen für den erfolgreichen Einsatz von supraleitenden Kabeln zu erfüllen. Dabei sollten die Kosten des Supraleitermaterials, also in absehbarer Zeit Bi,Pb(2223), sowie des Kabelmantels gesenkt werden. Bei letzterem handelt es sich im Prinzip um einen langgestreckten Kryostaten, der unter allen Umständen vakuumdicht sein muss, und zwar während der ganzen Lebensdauer des Kabels.

Eine wesentliche Voraussetzung ist, dass die Kabel möglichst wenige Verluste aufweisen sollten, was eine besondere Konfiguration der Drähte und Bänder, sowie deren Anordnung voraussetzt. Ein Vorteil ist, dass supraleitende Kabel im Gegensatz zu Kupferkabeln bei wesentlich niedrigeren Spannungen betrieben werden können, somit eine geringere elektrische Isolierung notwendig ist. Weiter ist die Betriebssicherheit solcher Kabel ein Faktor, der noch bestätigt werden muss.

Neue Anwendungen für supraleitende Kabel wurden aufgezeigt, z.B. für supraleitende Schiffsmotoren, die eine Gewichtersparnis von mehr als 60% mit sich bringen. In den USA ist ein solcher Schiffsmotor für die Marine bereits im Bau, und 70 Mio. \$ wurden dafür bewilligt.

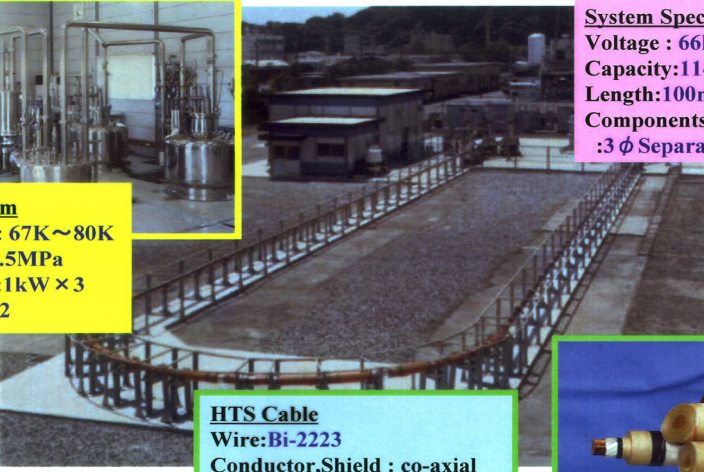
Trotz aller Schwierigkeiten sind heute mindestens 7 **grosse Kabelprojekte** bekannt, was deutlich zeigt, dass dieser Technologie ein wachsendes Interesse entgegengebracht wird. Diese Kabel sind alle dreiphasig, auf der Basis von Bi,Pb(2223). 3 Projekte sind in den USA, IGC Superpower (Niagara-Mohawk, 35 kV / 1 kA), Ultera (Bixby, Ohio, 13.5 kV / 3 kA), dazu noch 1 Projekt von AmericanSuperconductors (mit LIPA und Nexans). Weitere 2 Projekte entstehen in Japan, Kepco (23 kV, 1.2 kA) und SuperAce (66 kV, 5 kA). Von Interesse ist weiter der Bau von supraleitenden Kabeln in Südkorea (KERI, 22 kV / 1.2 kA) und in China (Innopower, Puji, 35 kV / 2 kA). Die Längen aller dieser Prototypkabel schwanken je nach Projekt zwischen 30 und 100 Metern, wobei das japanische Projekt SuperAce mit 500 Metern heraussticht. Es fällt auf, dass in Europa kein neues Kabelprojekt vorgesehen ist. Dafür ist die europäische Industrie aber mit den Grundmaterialien (Bi,Pb-2223 Precursors) überall beteiligt, ausser in Japan.

Bei einigen dieser Kabelprojekte sind in einer zweiten Phase Zusatzlängen von 30 Metern mit "Coated Conductors" auf der Basis von Y-123-Bändern vorgesehen.

Das **zweite IEA-Informationstreffen** (8. – 10. September 2003), fand in Stockholm (Schweden) statt. Als Hauptthema dieser Veranstaltung wurden wieder supraleitende Kabel gewählt. Dabei wurden vor allem Sicherheitsaspekte besprochen. Weiter wurde auf die politischen und sozialen Aspekte des Einsatzes von supraleitenden Kabeln im Detail eingegangen. Die Kühlprobleme sowie die Vakuump Probleme wurden besprochen.

Field Test of Commercial Model HTS Cable System (TEPCO, CRIEPI, SEI)

2001/6~2002/6 at Yokosuka Laboratory of CRIEPI



Cooling System
 Temperature: 67K~80K
 Pressure: ~0.5MPa
 Refrigerator : 1kW × 3
 Cryo-pump : 2

System Specifications
 Voltage : 66kV
 Capacity: 114MVA
 Length: 100m
 Components
 : 3 φ Separator, Termination

HTS Cable
 Wire: Bi-2223
 Conductor, Shield : co-axial
 Dielectric : PPLP in LN2 (CD)
 Diameter : 136mm

SUMITOMO ELECTRIC

Supraleitendes Kabel von 100 Metern Länge samt Test-Anlage in Japan.

Ein interessanter Aspekt betrifft den Einsatz von Unterseekabeln. Diese werden im Allgemeinen mit Gleichstrom betrieben, was den Einsatz von AC/DC Konvertern notwendig macht. Somit wäre der Einsatz von supraleitenden DC – Kabeln erleichtert, und deren Vorteile würden voll ausgenutzt: niedrigere Spannung, kleineres Gewicht. Eine Frage steht noch offen, nämlich diejenige des Abstandes zwischen 2 Kühlstationen, was bei Unterseekabeln von primärer Bedeutung ist. Es erweist sich, dass sich möglicherweise der **Gleichstrombetrieb für supraleitende Kabel** allgemein als die bessere Variante durchsetzen könnte.

Schliesslich wurden noch mögliche Fehlerquellen beim Betrieb von supraleitenden Kabeln aufgezeigt. Der Entscheid, supraleitende Kabel einzusetzen, führt eine ganze Reihe von weitreichenden Konsequenzen mit sich. Die Studien über deren Vorteile benötigen noch eine Reihe von Langzeit-Versuchen, die über den industriellen Einsatz entschieden werden.

Dieser Bericht wurde an alle an der Supraleitung interessierten Vertreter von Hochschulen und Industrie in der Schweiz verteilt.

Nationale Zusammenarbeit

In der Schweiz ist eine aktive Beteiligung an HTSL-Projekten im Hinblick auf Energieanwendungen vor allem bei *ABB* und den *Kabelwerken Brugg* im Gange. Zwei weitere Firmen arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung, aber nur für den Einsatz bei tiefen Temperaturen (4.2K: *Bruker BioSpin* (Hochfeldmagnete für NMR) und *Swissmetal Dornach* (supraleitende Nb₃Sn-Drähte)). Hinzu kommt noch die Firma *IBM* in Rüschlikon, die vor allem Entwicklungen von elektronischen "devices" verfolgt. Alle diese Firmen haben Zusammenarbeitsprogramme auf dem Gebiete der Supraleitung mit den schweizerischen Hochschulen, vor allem mit dem Paul Scherrer Institut, der ETH Zürich, der EPF Lausanne und der Universität Genf.

Wir sind nun im dritten Jahr des "*National Center of Competence in Research*" - Programms des schweizerischen Nationalfonds. Unser **Projekt "Materials with Novel Electronic Properties" (MANEP)**, umfasst insgesamt 17 Institute und Industrien und befasst sich mit dem Studium und der Entwicklung von Materialien. Davon befassen sich 8 theoretisch oder experimentell mit HTSL-Supraleitern. Innerhalb von MANEP sind zwei Gruppen an der Universität Genf mit Entwicklungen auf dem Energiesektor beschäftigt: *Prof. Ø. Fischer* arbeitet an Strombegrenzern (mit *ABB*), während *Prof. R. Flükiger* (*Universität Genf*) zusammen mit *Prof. M. Hasler* (*EPFL Lausanne*) an der Limitierung von AC-Verlusten in Bi,Pb(2223)-Bändern arbeiten, im Hinblick auf deren Anwendung in Hochstrom-Kabeln.

Die nationale Zusammenarbeit wurde dank des MANEP – Projekts gestärkt. Dabei sollten vor allem die gemeinsamen Untersuchungen von EPFL/Universität Genf auf dem Material-Gebiet erwähnt werden (TEM–Untersuchungen, Auger–Spektroskopie, usw.). Weiter wurde die nationale Zusammenarbeit durch 2 Projekte innerhalb der Programme "*TOPNANO 21*" und des *KTI* gefördert.

Internationale Zusammenarbeit

Ausser dem hier zusammengefassten IEA-Programm bestehen weitere internationale Zusammenarbeiten. Im Rahmen des **5. EU-Rahmenprogramms** waren zwei Gruppen, *Prof. R. Flükiger* (*Universität Genf*) und *Dr. B. Dutoit* (*EPFL Lausanne*) tätig, am **Growth** - Projekt BIG POWA (GRD1-1999-10461, OFES No. 99.0209-1), das 2003 erfolgreich fertig gestellt wurde. Beide Gruppen bearbeiten das Problem der AC-Verluste: die erste Gruppe entwickelt runde Bi,Pb(2223)-Supraleiter mit besonders niedrigen AC-Verlusten, während die zweite Gruppe 2D und 3D Modellberechnungen für Leiter und Drähte durchführt. Ziel dieses Projekts war es, einen kleinen Transformator und eine Modellspule bei 77K mit *runden* Bi,Pb(2223) – Drähten (und sehr niedrigen AC-

Verlusten) zu bauen. Im Rahmen dieses Projekts wurde am DPMC für runde, isotrope Bi,Pb(2223) – Drähte eine neue Bestmarke aufgestellt, mit einer Stromdichte von $17'000 \text{ A/cm}^2$ bei 77 K im Eigenfeld [1]. Insgesamt 200 m dieser Drähte wurden hergestellt, als Grundlage einer Transformator-Testspule, die von Skoda (Tschechien) fertig gestellt wird. Dieses Kabel ist in Fig. 2 dargestellt.



Fig. 2: Erstes Bi,Pb(2223) Kabel mit isotroper Stromdichte (I_c vs. B), mit $I_c = 200 \text{ A}$ bei 77 K, bestehend aus 20 einzelnen, viereckigen Bi,Pb(2223) – Drähten (Hergestellt an der Uni Genf im Rahmen des BIG POWA Projekts (5th European Frame Program)).

Das neue Programm des **Superconducting European Network, SCENET II** (GTC1-2001-43047) hat im Juli 2002 begonnen und wird 4 Jahre dauern, mit insgesamt 3 Mio CHF. SCENET umfasst nun Dank der neu zugekommenen osteuropäischen Staaten mehr als 80 verschiedene europäische Gruppen (Nodes) aus den Hochschulen und der Industrie, die sich alle mit Supraleitung befassen. SCENET hat sich zur Aufgabe gemacht, den Informationsfluss innerhalb Europa zu optimieren, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Forschung zu verbessern. Pro Jahr wird eine Sommerschule durchgeführt, um Studenten in das Gebiet der Supraleitung einzuführen. Ausserdem sind insgesamt 24 Mannmonate für kurze Besuchsaufenthalte von jungen Wissenschaftlern vorgesehen. Die Schweiz ist mit 2 Nodes vertreten (*Uni Genf* und *ETHZ*), und *Prof. R. Flückiger* (Uni Genf) ist Mitglied des SCENET Steering Committee.

Die Vorarbeiten zum **6. EU-Rahmenprogramms** hatten im Sommer 2002 begonnen. Schweizer können erst ab dem 1. Januar 2004 die Koordinatorfunktion übernehmen. Insgesamt hatten sich schweizerische Institute an mehreren sog. "Declarations of Interest (DoI)" angeschlossen, die im Sommer 2002 eingeschickt wurden. Bei einem eingereichten Projekt wurde die Schwelle von 21 Punkten mit 23.8 deutlich überschritten. Der Entscheid über eine Vergabe des Projektes wird im Januar 2004 fallen.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Im Jahr 2003 ist die Forschungs-Aktivität auf dem Gebiet der Supraleitung in der Schweiz mit Energie weitergeführt worden. Mit dem MANEP - Programm sind sowohl experimentell wie auch theoretisch neue, positive Akzente gesetzt worden. Die internationale Untersuchungskommission

hat das Programm äusserst positiv beurteilt, und bescheinigte ein sehr gutes Niveau auf internationaler Ebene. Es bestehen gute Chancen für eine Weiterführung des Projekts für weitere 4 Jahre.

ABB verfolgt gegenwärtig ein HTSL-Projekt (Strombegrenzer), als einzige Aktivität im Energiebereich. Die Supraleitung hat technisch auf den verschiedensten Gebieten überzeugt, hat aber vor allem aus ökonomischen Gründen den Durchbruch auf dem Markt noch nicht geschafft.

Weitere Fortschritte wurden in der Angewandten HTSL-Supraleitung erzielt, vor allem mittels der Bi,Pb(2223)-Leiter ("erste Generation"), wobei die Entwicklung der Leiter der 2. Generation (Yttrium based Coated Conductors) weitergeht. Es ist zu hoffen, dass die Produktionskosten in absehbarer Zeit deutlich sinken werden: dies könnte auch in der Schweiz zu einer deutlichen Zunahme von Pilot-Projekten führen.

Es ist sehr wichtig, dass der Kontakt zur Weltspitze auch weiterhin behalten wird. Dies wird am Beispiel des im Januar 2001 entdeckten Supraleiters MgB_2 deutlich. Dessen T_c -Wert ist mit 39 K leider noch zu niedrig, die Produktionskosten sind aber viel niedriger als für vergleichbare SL-Drähte. Die Stromdichten der in der Schweiz hergestellten Fe/MgB₂ – Drähte erreichen international Spitzenwerte. Es besteht die berechtigte Aussicht, dieses Material für Spulen bis zu 10 – 12 T bei 4.2 K einzusetzen. Anwendungsgebiete: Ersatz von Nb₃Sn-Zwischenspulen in Hochfeldmagneten für NMR – Anwendungen.

Die Hauptziele in 2004 werden vor allem die Verbesserung der Stromdichte in Bi,Pb(2223)-Bändern und in MgB_2 -Drähten sein. Es gilt, die internationalen Beziehungen zu vertiefen, um aktive Zusammenarbeiten zu ermöglichen, die im Endeffekt der schweizerischen Industrie zugute kommen werden. Als Beispiele dienen die Zusammenarbeit im Rahmen des 6th Frame Program, sowie die Schaffung eines Hochfeldlabors an der Universität Genf: im Januar wird ein zweiter supraleitender Magnet (21.5 T) eingerichtet, zusätzlich zum bereits vorhandenen (17T). Eine aktive Zusammenarbeit mit CERN und ITER bei der Entwicklung von supraleitenden Nb₃Sn – Drähten für Dipole und Tokamak – Magnete im Bereich zwischen 12 und 18 T wird angestrebt.

Referenzen

2 Plenarvorträge an internationalen Konferenzen zum hier behandelten Thema:

- 1: René Flükiger, "Large Scale HTC Systems: State of the Art in Materials and Engineering", M2S Conference, 26.-30. Mai, Rio de Janeiro (Br).
- 2: René Flükiger, "Application of low and High T_c superconductors: state of the art and new trends", 11th Workshop on rf – Superconductivity, 8.-12. September, Lübeck (D)
- 3: Xiao-Dong Su and René Flükiger: "Final report", BIG POWA (5th Frame Program):