



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 3. Dezember 2009

IEA-IMPLEMENTING AGREEMENT "ASSESS- ING THE IMPACT OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY ON THE ELECTRIC POWER SECTOR (EXCO MEMBER)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Université de Genève, Dépt. Phys. Matière Condensée (DPMC)
24, quai Ernest Ansermet
CH-1211 Genève 4
www.unige.ch/index.html

Autoren:

René Flükiger
Université de Genève
Rene.flukiger@unige.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 39929 /79747

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Das hier beschriebene Projekt verfolgt das Ziel, eine möglichst umfassende Information über die wichtigsten nationalen und internationalen Aktivitäten auf dem Gebiet der Hoch- T_c - Supraleitung zu geben, wobei das Hauptinteresse auf den Entwicklungen auf dem Energiesektor konzentriert ist. Das Hauptaugenmerk ist auf den Einsatz von Hoch- T_c - Supraleitern in verschiedenen industriellen Anwendungen gerichtet, vor allem Strombegrenzer, aber auch Energiespeicher, Kabel und Schwungräder, unter Berücksichtigung der anfallenden Kühlprobleme. Die industriellen Entwicklungen von Supraleitermaterialien (High- T_c und MgB_2) mit hohen Stromdichten und niedrigen Wechselstromverlusten wird besonders aufmerksam verfolgt.

Das Jahr 2009 hat weitere bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet der HTS - Anwendungen gebracht: Y-123-Bänder (sog. Coated Conductors der 2. Generation) wurden in Längen über 1'500 Meter hergestellt, mit einer Stromdichte über die ganze Länge von $> 200 \text{ A/cm}$ (normiert für eine Bandbreite von 10 mm). Neu werden Y-123 Bänder in km-Längen nicht mehr nur bei Firmen SuperPower und American Superconductors (AMSC) (beide USA) hergestellt. Bruker HTS (D) und Sumitomo (Japan) und andere haben mit der industriellen Fertigung dieser Bänder begonnen. Diese Y-123 Bänder sind die Basis der allermeisten sich im Bau befindlichen Prototypen und Anlagen. Die Kosten für Y-123 Bänder sind noch zu hoch, wegen der noch beschränkten Produktionsmengen. Aus Kostengründen werden deshalb vereinzelt auch MgB_2 -Drähte eingesetzt.

Nach dem erfolgreichen Einsatz des 600 m - LIPA Kabels im Netz von Long Island (USA) befindet sich nun ein 1.7 km - Kabel im Bau (New Orleans), während ein 6 km - Kabel in Amsterdam geplant wird. Andere Hochstromkabel sind in Japan, China und Korea im Bau. Grosse Energiespeicher werden in Japan entwickelt. Nach einem 20 MJ - Speichermodell von 0.7 m Durchmesser wird für 2012 ein 2 GJ - Speicher mit 2.7 m Durchmesser gebaut (beide für den Betrieb bei 11T und 20K). Supraleitende 5 MW - Schwungräder auf der Basis von HTS - Supraleitern (Boeing, USA) gestatten die Uebertragung einer weitaus grösseren Energie pro Gewichtseinheit als herkömmliche Schwungräder. Grosses Interesse findet eine Studie von AMSC zur Gewichtsreduktion in Windgeneratoren durch Einsatz vom HTS anstatt Kupfer oder NdFeB – Permanentmagneten. Gesamthaft wird dem Einsatz von HTS - Supraleitung zur Reduzierung des CO_2 - Ausstosses eine wachsende Bedeutung beigemessen.

Im Jahre 2009 wurden zwei Informationstreffen des Executive Committees (ExCo) des IEA Implementing Agreements durchgeführt. Das erste Treffen fand im Mai in Tampere (Finnland) statt. Das zweite im November in Daejeon (Korea) und wurde von der Korea Electric Power Corporation (KEPCO) organisiert, das die Anlagen des 3-phasigen 22.9 kV, 1.2 KA supraleitenden Kabels vorführte.

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 vor allem supraleitende Strombegrenzer, Kabel, Motoren und Schwungräder, weiter Generatoren und Transformatoren 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 den zukünftig vorgesehenen Arbeiten. Das Programm ermöglicht den Mitgliedstaaten, gegenseitig technische Berichte auszutauschen und Laboratorien und Testeinrichtungen, sowie industrielle Unternehmen zu besuchen. Das IEA - Implementing Agreement „HTS – Supraleiter“ umfasst 12 Mitgliedstaaten. Russland und China haben Interesse gezeigt, haben aber noch nicht entschieden. 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.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ExCo Implementing Agreement: Fortführung des Agreements

Das laufende IEA – Agreements wird im 2010 zu Ende gehen. Es wurde beschlossen, nächstes Jahr ein neues Agreement bis 2013 zu beantragen (bis 2015 verlängerbar). Bestätigt wurde Prof. Guy Deutscher als Chairman und Dr. Luciano Martini (ERSE, Italien) sowie Prof. René Flükiger (Université de Genève) als Vice-Chairmen des Executive Committees (ExCo) des Implementing Agreements. Dr. Luciano Martini als Vertreter der Industrie (ERSE, Italien) ist vor allem für technische Anwendungen verantwortlich, während Prof. R. Flükiger als Vertreter der Universität für die Materialthemen zuständig ist.

Das ExCo besteht aus folgenden 12 Mitgliedern: USA, Japan, Deutschland, England, Norwegen, Schweden, Finnland, Kanada, Korea, Israel, Italien und der Schweiz. Russland und China haben Interesse an einer Teilnahme gezeigt, eine Teilnahme konnte bisher aber noch nicht abgeschlossen werden.

Tätigkeiten des ExCo

In diesem Jahr fanden zwei ExCo-Informationstreffen statt, in Tampere (Finnland) und in Daejeon (Korea). Als ExCo Vice-Chairman habe ich zusätzlich die Aufgabe zugeteilt erhalten, die Supraleitung bei den IEA - Treffen mit Teilnehmern anderer Implementing Agreements zu vertreten. Es geht darum, den Anwendungen mit der Supraleitung in der IEA mehr Gewicht zu geben, was anhand der grossen Fortschritte mehr als gerechtfertigt ist. In dieser Funktion habe ich 2009 an zwei IEA - Meetings teilgenommen und habe über die Aktivitäten in den entsprechenden Fachgebieten berichtet:

- 3.2.2009: „Electric Grids“ Paris (F)
- 30.9./2.10.2009: „Energy Storage“ Bad Tölz (D)

Die Ergebnisse der zwei ExCo - Treffen sowie der zwei IEA - Treffen werden am 9. Dezember 2009 am Status-Seminar **"HTSL in der Energietechnik"** in Bern vorgestellt und diskutiert. Der Inhalt dieser Treffen wird später in diesem Bericht erwähnt.

1. ExCo Meeting in Tampere (Finnland), 17./20.5.2009

Im Folgenden werden nur die wichtigsten Informationen kommentiert.

A. Entwicklung der Y-123-Bänder (Coated Conductors)

Die Entwicklung von langen Bändern wird von SuperPower und American Superconductors, AMSC, (beide USA) vorangetrieben. Bruker HTS (D) und Sumitomo (Japan) können mittlerweile auch Y-123 – Bänder in km-Länge und Strömen von >150 A/cm (für 10 mm Breite) herstellen. Die Firma Zenergy ist noch auf einem tieferen Niveau (57 A/cm), aber deutliche Fortschritte werden erwartet.

2009: A new record wire

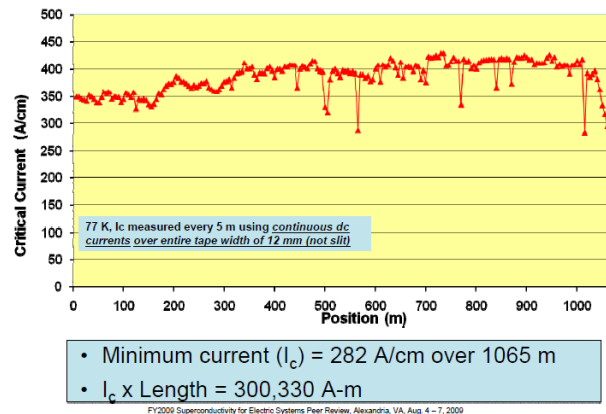


Fig. 1. Bisherige Höchstwerte von I_c in Y-123-Bändern von Superpower. Längen über 1 km wurden erreicht, aber mit niedrigeren I_c -Werten (etwa/cm).

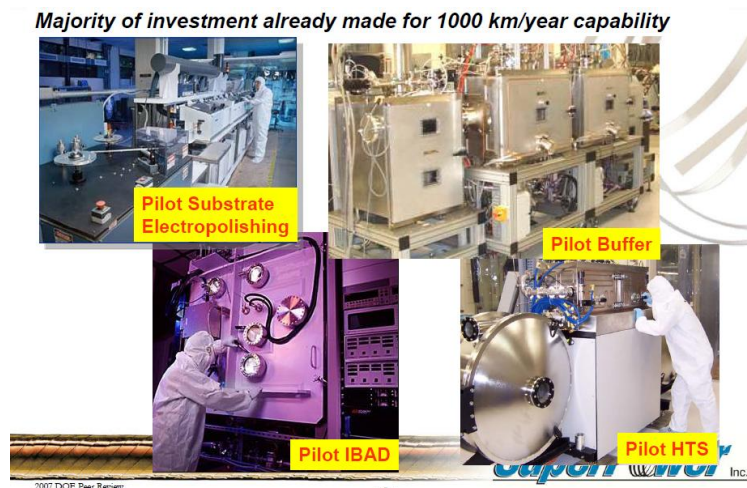


Fig. 2. Pilotanlage für Y-123 – Bänder-Herstellung bei Superpower (USA)



Fig. 3. Detail der Y-123 Band-Herstellung bei Superpower (USA)

Die Kosten für Coated Conductors sinken, aber die Abnahme hängt sehr stark vom Markt ab. Sumitomo: 100 €/kAm, mit 170 A/cm (auf 10 mm Breite gerechnet). Fujikura: 200 \$ für 1 m, 4 mm Breite.

B. Künftige HTS Transformer

Im Folgenden sind die Hauptpunkte erwähnt, die in der "road map" für künftige HTS - Transformer von A. Wolsky vorgeschlagen wurden.

- IEA erwartet, dass die Leistungsfähigkeit des elektrischen Netzes in manchen Ländern stark erhöht wird, was erhebliche Investitionen in den elektrischen Anlagen verursachen wird. Jedes zusätzliche MW an Leistung erfordert eine Transformerleistung zwischen 1 und 3 MW. Diese könnte teilweise durch HTS - Transformer erbracht werden.

Bedeutende Industrien in Japan, Korea und in den USA haben grosse Anstrengungen in diese Richtung unternommen

- Im Gegensatz zu herkömmlichen Transformatoren haben HTS-Transformatoren wichtige Vorteile: geringeres Gewicht, kleinere Abmessungen. Sie sind umweltfreundlich und können kein Dioxin produzieren. Dies ist wichtig in dicht bevölkerten Gebieten, wo Transformatoren z.B. innerhalb von Gebäuden oder unterirdisch gelagert werden müssen.
- HTS-Transformatoren können ohne Schaden längere Zeit überlastet werden, sofern die Kühlung entsprechend ausgelegt wurde.
- Der wirtschaftliche Betrieb von HTS-Transformatoren erfordert weitere R&D-Anstrengungen. Die Ziele sind: billigere HTS-Leiter, kleinere AC-Verluste, kompakte Kühlaggregate.

C. Windgeneratoren (Analyse von ASCM)

Ein wichtiger Vorteil von HTS-Windgeneratoren ist die Reduzierung des Gewichts gegenüber herkömmlichen Kupfersystemen. Die AMSC – Studie zeigt, dass Multipolare Rotorsysteme anstatt der mechanischen Übertragung („Gearbox“) erhebliche Vorteile aufweisen:

- Grosse Gewichtsreduktion durch Einsatz von HTS – Supraleitern.
Kupfer: 320 Tonnen, gegen HTS: 120 Tonnen. Die Folge ist:
- Höhere Leistung der Windturbine
- Niedrigere Kosten des Turmes, der die Turbine tragen muss.



Fig. 4. Hohe Türme (hier *off shore*-Türme) müssen die Belastung durch den Wind-Generators aushalten, was hohe Kosten verursacht.

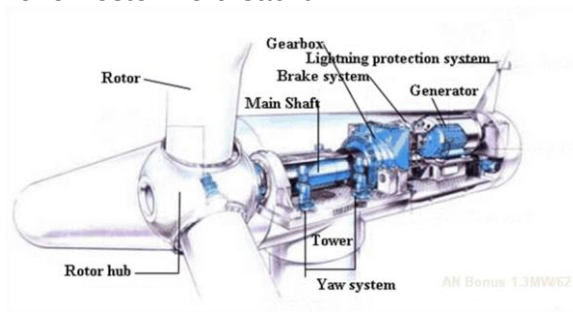


Fig. 5. „Gearbox“ in Windturbinen, die durch multipolare Rotorsystem ersetzt wird

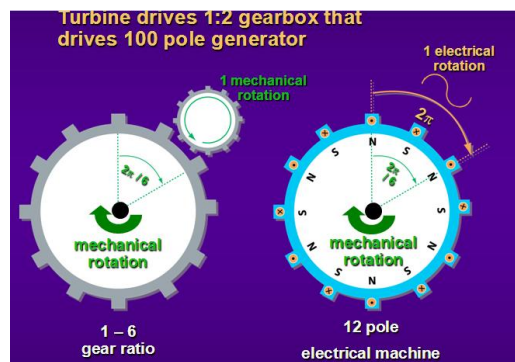


Fig. 6. Ersatz der mechanischen durch elektrische Übertragung in Windturbinen.

AMSC hat 2007 begonnen, mit *TECO-Westinghouse Motor Co.* (Taiwan) HTS Multipolare Generatoren zu entwickeln. Die Firma hat 2009 3.7 Mio. \$ vom *National Institute of Science and Technology* (Advanced Technology Program) erhalten. Gegenwärtig ist eine Kosten-Studie für eine 8 MW-Turbine im Gange (sog. direct drive generator). Diese umfasst die Kosten für alle Teile, also Propellerblätter, Turm, Steuerungen, Leistungselektronik. Diese Studie wird durch das *National Wind Technology Center* ausgewertet, mit dem Ziel, ein „full-scale prototype“ zu entwickeln.

A.M. Campbell (Oxford Instruments, GB) hat berichtet, dass das *ConverTeam* (früher *Alstom*) auch den Einsatz von HTS in Windgeneratoren erwägt. Ein 0.5 MW Windgenerator (25 Tonnen, 30 rpm) mit HTS-Rotor und konventionellem Stator ist im Bau und wird 2010 getestet werden.

Windgeneratoren werden gegenwärtig vor allem in Japan auch bei Zenergy (USA/D) entwickelt.

D. Supraleitende Strombegrenzer

Es ist heute weitgehend anerkannt, dass supraleitende Strombegrenzer ganz entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Sicherungsmechanismen aufweisen. Insbesondere die extrem kurze Erholungszeit, ohne jeden Ersatz von elektrischen Bauteilen, verspricht massive Einsparungen im Falle von Kurzschlüssen. Eine grosse Anzahl von supraleitenden Strombegrenzern ist bereits mit Erfolg getestet worden, und Prototypen mit immer grösseren Leistungen sind im Bau.

- Das sehr umfangreiche japanische Programm auf dem Gebiet der Strombegrenzer ist bereits im Bericht 2008 enthalten.
- In Korea wird ein 3-phasiger Strombegrenzer (22.9kV, 630A) getestet, das von *KEPRI* und *Sumitomo* gebaut wurde.

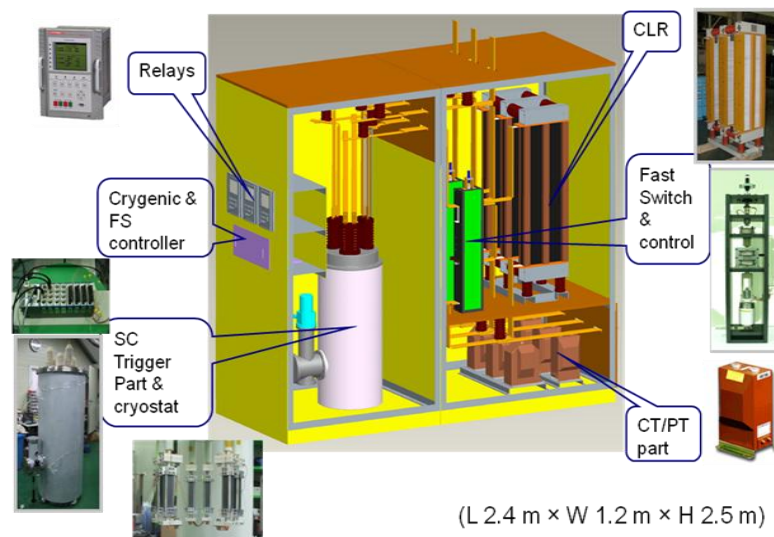


Fig. 7. Resistiver 22.9kV, 630A Strombegrenzer in Korea.

- In Italien wird ein 3-phasiger resistiver Strombegrenzer (9 kV, 250A, 4 MVA) mit 1G-Bändern wird in San Dionigi, nahe Mailand, installiert. Bei der zweiten Phase wird der Strom auf 1 kA, 15 MVA angehoben. Dieses Projekt hat 2008 begonnen und wird 2011 seinen Abschluss finden. Bei späteren Strombegrenzern werden 2G-Bänder zum Einsatz kommen, die 2008 noch nicht verfügbar waren.
- Nexans hat zwei 12kV Strombegrenzer verkauft, für das Stromverteilungssystem.

- Siemens arbeitet weiter an einer Entwicklung eines bifilaren resistiven Strombegrenzers, auf der Basis von AMSC-Bändern. Der Test ist für 2010 programmiert.
- *Nexans* und *Scottish Power* arbeiten an einem gemeinsamen Projekt eines supraleitenden Strombegrenzers, das in Lancashire eingerichtet wird. Geplant ist der Bau von 3 12kV Strombegrenzern, die in 3 verschiedenen Netzen in UK verteilt werden. Bei erfolgreichen Tests sind Strombegrenzer mit höheren Spannungen geplant.
- In Kanada (*IREQ*) wurde ein 15 kV Strombegrenzer modelliert.

2. ExCo Meeting in Daejeon (Korea), 18./21.11.2009

Hier einige wichtigen Punkte zu diesem Meeting:

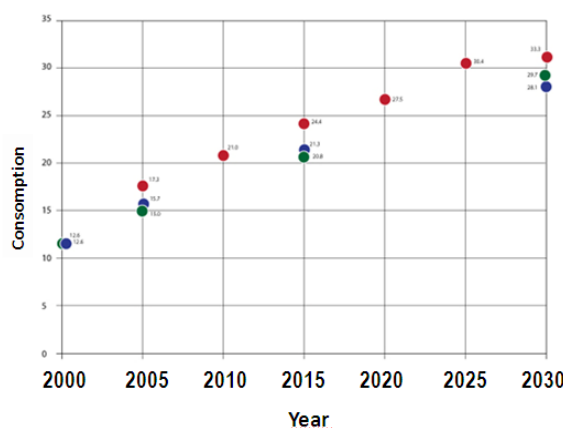
A. Besuch der Installationen in Daejeon:

Korea zeichnet sich aus durch eine sehr intensive Förderung der Supraleitung im Elektrizitätsnetz.

- Motor: 5MW, mit Y-123 Bändern.
- Transformer: 22.9 kV
Im Bau: 154 kV, 100 MVA HTS. Erste Tests: 2011.
- SMES: 800kW, mit Bi-2223-Bändern.
Im Bau: 2.5 MW SMES bei 6.2 T, bis 2013
- Schwungrad: 5kWh, 15'000 rpm
Im Bau: 100 kWh, bis 2012, wird eingesetzt in Smart Grid
Einsatz von 10 kWh für Windgeneratoren vorgesehen.
- Bau von neuen „Underground transmission lines“: KEPCO grid.
Bisher sind in Korea nur 10% unterirdisch, in Seoul 40%.

B. Der Energiebedarf weltweit

Der Elektrizitätsbedarf weltweit wird bis 2030 um einen Faktor 2 zunehmen.



“About half the increase in global demand [for fuel] goes to power generation and one fifth goes to meeting transport needs...” WEO 2007 p.43

Fig. 8. Anstieg des Energiebedarfs bis 2030

Der Anstieg des Energiebedarfs wird vor allem in China und Indien sehr stark sein (in TWh):

	2006	2015	2030	2006-2030
China	2 358	4 554	6 958	4.6%
India	506	893	1 935	5.7%

IEA schätzt, dass die Hälfte der Investitionen bis 2030 die elektrische Energie betreffen.

Der zu erwartende CO₂-Ausstoss wird mit wachsender Priorität drastisch zu reduzieren sein und ist eindeutig die Haupt-Stossrichtungen der IEA. Dies wird nur durch eine Menge von Massnahmen zu erreichen sein, die zum Teil sehr einschneidend sein werden. Dabei wird ein besonders hoher Anstieg vor allem in China und Indien erwartet.

IEA PROJECTS NEW INVESTMENT IN ELECTRICAL EQUIPMENT WILL EXCEED NEW INVESTMENT IN OIL, GAS, or COAL !

	Coal	Oil	Gas	Power	Total
OECD	146	1 377	1 774	4 661	8 082
North America	78	1 023	1 291	2 246	4 669
Europe	35	247	315	1 728	2 417
Pacific	33	107	168	687	997
Transition economies	40	769	657	681	2 148
Russia	27	568	492	292	1 379
Developing countries	369	2 968	1 716	6 220	11 338
China	251	547	168	2 764	3 740
India	57	169	63	956	1 249
Other Asia	33	251	303	846	1 441
Middle East	0	1 074	430	406	1 911
Africa	19	494	460	484	1 461
Latin America	10	432	292	762	1 536
Inter-regional transport	41	246	82	0	369
World	597	5 360	4 229	11 562	21 936

Note: Regional totals include biofuels. Coal includes mining, processing, international ports and shipping.

Tabelle I. Der erwartete elektrische Energiebedarf bis 2030 (TWh) wird denjenigen der andern Energiearten übertreffen (Quelle: IEA).

Der Ernst der Situation wird durch den Anstieg des CO₂ – Gehalts im letzten Jahrhundert verdeutlicht, der sich nach übereinstimmenden Urteilen auf die Temperaturerhöhung auswirkt (siehe Fig. 9).

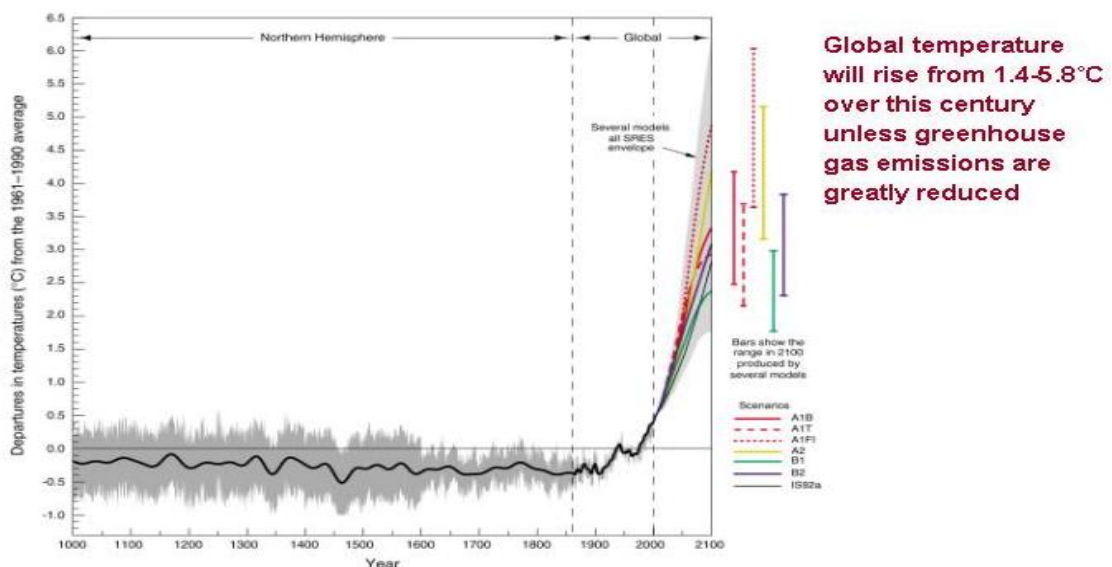


Fig.9. Erwartete globale Temperaturerhöhung bei gleichbleibendem CO₂ – Ausstoss (Quelle: IEA).

Der erwartete jährliche Anstieg um 5 GW pro Jahr wird ohne einschneidende Sondermassnahmen oder der Entwicklung neuer Technologien nicht zu schaffen sein.

Verbreitete Anwendung der Supraleitung wird für die Erniedrigung des CO₂ - Ausstosses sicher nicht entscheidend sein, könnte aber einen wichtigen positiven Beitrag liefern. Neue Vorschläge wurden gemacht, die noch als futuristisch angesehen werden.

Ein Beispiel ist die Kombination von Stromtransport und Einsatz von flüssigem Wasserstoff. In diesem Falle würde ein solches supraleitende Untergrundkabel durch LH2 gekühlt.

C. Neue Aktivitäten In England

Rolls Royce hat aus eigenen Mitteln einen resistiven Strombegrenzer auf der Basis von MgB₂ gebaut. Die Tests verliefen erfolgreich. Weitere Entwicklungen hängen von der Nachfrage ab. Ein wichtiger Faktor für die Weiterführung des Projekts sind die Kühlkosten. Die Senkung der Kosten für die Kühlaggregate ist - nicht nur für Rolls Royce - eine wichtige Voraussetzung für die weitere Verbreitung von supraleitenden Anwendungen.

Folgende Projekte sind in Entwicklung:

- Synchron-Generator, 8MW, 12 rpm, 100 t.
- Windgenerator, 500 kW, 30 rpm, 25 t
- „Bulk“ Y-123 – Teile, für die Entwicklung von Schwungrädern, in Zusammenarbeit mit Boeing (USA).

D. Neue Aktivitäten in Deutschland

- Siemens: Entwicklung von Bändern aus Ni-W als Substrate für Y-123 Coated Conductors.
- Bruker HTS: Entwicklung von langen Längen von Coated Conductors mit > 100 A/cm.
- Siemens: Entwicklung von Roebel-Kabeln aus Coated Conductors, in Zusammenarbeit mit neuseeländischen Firmen: Industrial Res. Ltd (IRL) und General Cable Superconductors (GCS).

E. Kühlaggregate

Die wachsende Anzahl von Anwendungen auf der Basis von HTS Supraleitern zieht auch eine verstärkte Aktivität auf dem Gebiet der Kühlaggregate mit sich. Figur 10 zeigt einen Vergleich zwischen der Leistungsfähigkeit eines Kühlaggregats für HTS Supraleiter in einer Hochleistungsanwendung und konventionellen Kühlaggregaten.

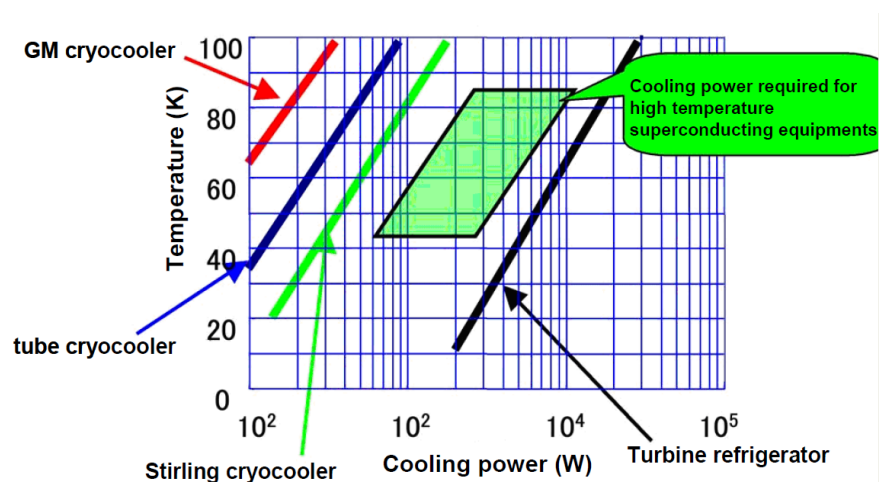


Fig. 10. Kühlleistung von Cryocoolern bei Einsatz von HTS-Systemen.

Fig. 10 zeigt, dass HTS-Systeme im Temperaturbereich zwischen 40 und 80K arbeiten, und dass für 80 K eine Kühlleistung zwischen 2 kW und 10 kW notwendig ist. Die Kühlleistung von kompakten marktüblichen Cryocoolern bei 80 K ist etwa 1 kW (oder weniger). Dazu muss bemerkt werden, dass im Normalfall Unterhaltsarbeiten nach etwa 1 Jahr anstehen.

Expansionsturbinen werden für grosse Kühlaggregate verwendet, die sowohl eine He - Reinigung (Separation der Luft) sowie einen He-Verflüssiger enthalten: diese haben sich bewährt, was Kühlleistung und Lebensdauer betrifft. Die Kühlleistung der letzteren ist jedoch für die meisten HTS-Anwendungen zu gross, sodass eine bessere Dimensionierung durch andere Lösungen angestrebt wird. Deshalb wurde als Prototyp ein Turbinen-Refrigerator im Expansionsmodus entwickelt, mit Neon als Kühlmittel, der mit einem Neon-Durchfluss von 1'200 Nm³/h und einem Druck von 2MPa/1MPa eine Kühlleistung von 2 kW (bei 70K) erreichte. Dieser Prototyp ist mit einer Expansions-Turbine ausgestattet. Da aber ein Kompressor mit Reibungs-Teilen verwendet wurde, erfüllt dieser Prototyp die Bedingungen bezüglich des Unterhalts und der Wirtschaftlichkeit eines supraleitenden Systems noch nicht. Der Schritt in Richtung eines unterhaltsfreien und wirtschaftlichen Kühlaggregats müsste eine Kombination aus einer Expansions-Turbine und einem kompakten Turbo-Kompressor beinhalten, die beide keine Reibungsteile enthalten. Zusätzlich kann durch den kompakten Turbo-Kompressor eine Volumeneinsparung erzielt werden. Die Leistungsfähigkeit und auch Wirtschaftlichkeit eines Cryocoolers wird durch den „Coefficient of Performance“, oder COP, bewertet: $COP = \text{Kühlleistung} / \text{Leistungsverbrauch}$. Der COP des Prototyps ist noch niedrig (0.05), aber Werte um 1 werden angestrebt, durch Kombination aus einer Expansions-Turbine und einem kompakten Turbo-Kompressor in einem Niederdruck-System (1MPa/0.5MPa).

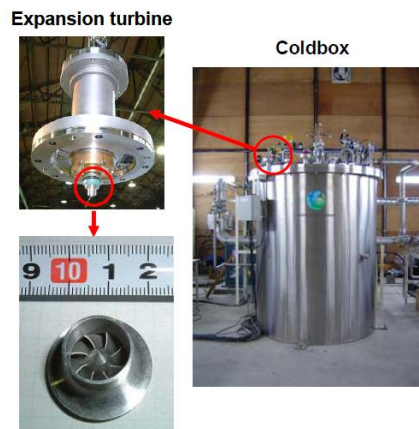


Fig. 11. Prototyp eines Neon-Cryocoolers mit Expansions-Turbine

Nationale Zusammenarbeit

Auf dem Gebiet der Strombegrenzer besteht eine aktive Zusammenarbeit zwischen der Firma ABB und der Universität Genf auf dem Gebiet der Strombegrenzer.

Die Firma *Bruker BioSpin* (Fällanden) arbeitet auf dem Gebiet der angewandten Supraleiter. Sie baut supraleitende Hochfeldmagnete für NMR-Anwendungen. Bisher war die Einsatztemperatur 4.2K, aber die Operation bei 20K und darüber ist vorgesehen. Die einzige HTS-Anwendung waren bisher die Stromzuleitungen, aber für den Bau von Magneten mit Feldern > 25T werden gegenwärtig Studien mit Y-123 - Bändern durchgeführt.

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, mit dem Paul Scherrer Institut, der ETH Zürich, der EPF Lausanne (CRPP) und der Universität Genf.

Der dritte 4-Jahreszyklus des Projekts "Materials with Novel Electronic Properties" (Kurzname: MANEP), finanziert vom schweizerischen Nationalfonds innerhalb des "National Center of Competence in Research"-Programms hat im Juli 2009 begonnen und wird im 2013 enden. Es umfasst jetzt insgesamt 19 Institute und 6 Industrien und befasst sich mit dem Studium der Grundlagen sowie der Entwicklung von neuen 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 Magnet- und dem Energiesektor tätig.

- * Prof. Ø. Fischer arbeitet an Strombegrenzern (mit ABB) in Zusammenarbeit mit Prof. M. Hasler und Dr. Dutoit (EPFL Lausanne).
- * Prof. R. Flükiger (Universität Genf) arbeitet an der Charakterisierung von HTS- und LTS-Supraleitern bei Feldern bis 21 T mit der Firma Bruker BioSpin. Nb₃Sn-Leiter werden entwickelt, um NMR-Magnete bei Feldern von > 23 T bauen zu bauen.
Ein neuer Vertrag mit CERN wurde soeben abgeschlossen, im Hinblick auf 15 T- Dipole, die nach LHC in Einsatz kommen werden, im Projekt „LHC Upgrade“.
- * Dr. P.L. Bruzzone (PSI Villigen): Im Rahmen der ITER - Programmes ist eine sehr intensive Aktivität am PSI in Villigen im Gange: die Gruppe von Dr. P. Bruzzone ist vor allem mit der Charakterisierung von Fusionsleitern in der 12 T - SULTAN - Spule beschäftigt. Diese Gruppe hat ein 12.5 Tesla Dipol entwickelt, um die Fusionsleiter-Kabel für ITER zu charakterisieren. Diese Test - Anlage ist weltweit die Einzige. Dazu werden in dieser Gruppe sehr ausgedehnte Berechnungen und Simulationen im Hinblick auf den Betrieb von ITER durchgeführt.

Zusätzlich werden in Genf neuartige MgB₂-Drähte und -Bänder entwickelt, mit dem Ziel, 200 MHz- Spulen für NMR - Anwendungen bei 20 K zu entwickeln. Das Hauptziel ist es, bei 20K Stromdichten $J_c = 1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ bis zu Magnetfeldern um 3 T zu erhalten. Dieselben Drähte können auch für Strombegrenzer bei 20K eingesetzt werden. Der Sprungpunkt von MgB₂ liegt zwar nur bei 39 K, dafür aber sind die Kosten mit 3 - 5 €/kAm um eine Grössenordnung niedriger als diejenigen von Y-123 Coated Conductors.

Die nationale Zusammenarbeit wurde dank MANEP und einer ganzen Anzahl von KTI-Projekten gestärkt, die alle zum Ziele haben, die Zusammenarbeit zwischen Universität und Industrie zu verstärken.

Internationale Zusammenarbeit

Ausser dem hier zusammengefassten IEA-Programm bestehen weitere internationale Zusammenarbeiten.

- * Als internationale Zusammenarbeit kann das Messprogramm an der Universität Genf gezählt werden, mit Messungen an Drähten und Bändern aus den USA.
Y-123: American Superconductors (USA), Bruker HTS (D).
Nb₃Sn: Bruker BioSpin (CH), Oxford Instruments (USA), High Field Magnet Laboratory, Tallahassee (USA)
- * Eine sehr wichtige internationale Zusammenarbeit ist im Rahmen der ITER - Programmes in Villigen im Gange, wo die Gruppe von Dr. P. Bruzzone mit der Charakterisierung

von Fusions-Leitern in der 12 T - SULTAN - Spule beschäftigt ist. Wie schon erwähnt, entwickelt diese Gruppe gegenwärtig ein 12.5 Tesla Dipol, um die Fusionsleiter-Kabel für ITER zu charakterisieren. Es ist zu bemerken, dass dies weltweit die einzige Anlage sein wird, wo diese Tests durchgeführt werden können.

- * Im Rahmen des 7.Europäischen Rahmenprogramms (7.FP) wurde ein Projekt bewilligt, das mit dem CERN als Leading House den Bau von Hochfeldmagneten für Beschleuniger zum Ziele hat. Die Universität Genf nimmt als Partner daran teil mit 2 Gruppen (Prof. A. Blondel und Prof. R. Flükiger).
- * Informationsaustausch: dies geschieht über die ESAS (European Society for Applied Superconductivity). Im geringeren Masse, aber gezielt auf 12 Teilnehmerländer, wirkt das "IEA Implementing Agreement for HTS Conductors" als Medium für einen fundierten Informationsaustausch.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Im Jahr 2009 ist die Forschungs-Aktivität auf dem Gebiet der Supraleitung in der Schweiz weitergeführt worden, nicht nur auf dem Materialsektor, sondern auch in der Messtechnik (Beispiel: CRPP).

- * Mit dem MANEP - Programm (Leading House: Universität Genf) sind sowohl experimentell wie auch theoretisch neue, positive Akzente gesetzt worden. Die internationale Untersuchungs-Kommission hat das Programm sehr positiv beurteilt, und bescheinigte ein sehr gutes Niveau auf internationaler Ebene. Nach MANEP II, das am 30.6.2009 zu Ende geht, wird dieses Programm noch in einer dritten Phase weitergeführt (MANEP III: 2009 – 2013). Die entsprechenden Verhandlungen verlaufen positiv.
- * ABB verfolgt gegenwärtig ein HTSL-Projekt (Strombegrenzer), als wichtigste Schweizer Aktivität im Energiebereich. Die Supraleitung hat technisch auf den verschiedensten Gebieten überzeugt: mit der Verfügbarkeit von Y-123 – Bändern von > 1 km Länge ist HTS dabei, den Durchbruch auf dem Markt zu schaffen. Die jüngsten Fortschritte auf dem Gebiet der Coated Conductor - Bänder, vor allem was die Länge aber auch die Stromdichte betrifft, stimmen sehr optimistisch in Bezug auf die zukünftige Entwicklung.
- * Aufgrund des besseren Verhaltens in Gegenwart von Magnetfeldern ist gegenwärtig eine Trendwende im Gange, von den Bi-2223 - Bändern (1. Generation) zu den Leitern der 2. Generation (Y-123 oder RE-123 Coated Conductors). SuperPower hat eine Produktion von > 100 m pro Stunde angekündigt, und 1000 km/Jahr sind erwartet.
- * Ein guter Kontakt zur Weltspitze konnte auch dank dem Hochfeldlabor in Genf mit Feldern bis 21 T gewahrt werden. Da einige der mechanischen Hochfeld-Eigenschaften bis zu 21 T nur hier gemessen werden können, werden hier die weltbesten Drähte zur Charakterisierung eingeschickt, was einen sehr guten Ueberblick und auch einen Qualitätsvergleich erlaubt.
- * Die Hauptziele in 2010 werden ausser der weiteren Charakterisierung von HTS - Bändern weiterhin die Verbesserung der Stromdichte MgB₂-Drähten sein. Es gilt, die internationalen Beziehungen zu intensivieren, um aktive Zusammenarbeiten zu ermöglichen, die im Endeffekt der schweizerischen Industrie zugute kommen werden.
- * Die aktive Zusammenarbeit mit CERN bei der Entwicklung von supraleitenden Nb₃Sn - Drähten für Dipol-Magnete für das Nachfolgeprojekt „LHC Upgrade“ mit Feldern im Bereich zwischen 12 und 18 T wurde durch eine Partnerschaft im Rahmen des 7. Europäischen Rahmenprogramms festgelegt.

Referenzen

- [1] F. Cau and P. Bruzzone, **Inter-strand resistance measurements in the termination of the in the termination of the ITER SULTAN samples**, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009)045012
- [2] P. Bruzzone, B. Stepanov and R. Wesche, **Qualification tests for ITER TF conductors in SULTAN**, *Fusion Engineering and Design*, 84 (2009)205
- [3] F. Cau, P. Bruzzone and F. Stähli, **AC loss measurements on Cable in Conduit Conductor with random-changing magnetic fields**, *Fusion Engineering and Design*, 84 (2009)569
- [4] P. Bruzzone, R. Wesche, B. Stepanov, F. Cau, M. Bagnasco, M. Calvi, R. Herzog and M. Vogel, **Qualification tests and facilities for the ITER superconductors**, *Nucl. Fusion* 49(2009)065034
- [5] Senatore and R. Flükiger, **Upper critical fields well above 100 T for the superconductor $\text{SmFeAsO}_{0.85}\text{F}_{0.15}$ with $T_c=46$ K**, *Phys. Rev. B* **78**, 054514 (2008)
- [6] C. Senatore and R. Flükiger, **Correlation between superconducting transition and relaxation rates in various industrial Y123-coated conductors**, *Supercond. Sci. Technol.* **22**(2009)095016
- [7] M. S. A. Hossain, C. Senatore, R. Flükiger, M. A. Rindfleisch, M. J. Tomsic, J. H. Kim and S. X. Dou, **The enhanced J_c and B_{irr} of *in situ* MgB_2 wires and tapes alloyed with $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$ (malic acid) after cold high pressure densification**, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 095004
- [8] R. Flükiger, M. S. A. Hossain and C. Senatore, **Strong enhancement of J_c and B_{irr} in binary *in situ* MgB_2 wires after cold high pressure densification**, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 085002