



Jahresbericht 20.11.2011

IEA Implementing Agreement: “Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity in the Electric Power Sector” (ExCo Member)

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

Université de Genève
Dépt. Phys. Matière Condensée (DPMC)
24, quai Ernest Ansermet
CH-1211 Genève 4

Autoren:

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

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer: [SI/500193-01](#)

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, mit Hauptinteresse auf den Entwicklungen im Energiesektor. Das Hauptaugenmerk ist auf den Einsatz von Hoch- T_c - Supraleitern in industriellen Anwendungen gerichtet, vor allem Strombegrenzer aber auch Hochstrom-Kabel, Schwungräder und Windkraftgeneratoren, unter Berücksichtigung der anfallenden Kühlprobleme. Die industrielle Entwicklung von Supraleitermaterialien (High- T_c und MgB_2) mit hohen Stromdichten und niedrigen Wechselstromverlusten wird besonders aufmerksam verfolgt. IEA hat der Fortführung dieses Implementing Agreements bis 2013 zugestimmt, mit möglicher Verlängerung um 2 Jahre.

Auch das Jahr 2011 hat bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet der HTS - Anwendungen gebracht: "Coated Conductors" oder 2G - Bänder werden von verschiedenen Herstellern in Längen über 1'000 Meter hergestellt, wobei das Hauptaugenmerk vermehrt auf die Reduktion des Herstellpreises liegt. Die Stromdichten für industrielle Längen von Bändern liegen jetzt vermehrt in der Gegend von 500 A/cm, bezogen auf eine Standardbreite von 10 mm. Diese 2G-Bänder sind nun die Basis der meisten sich im Bau befindlichen Anlagen, parallel zu den bis jetzt verwendeten Bi-2223 - Bändern. Mit den gestiegenen Produktionsmengen sind starke Verminderungen des Kaufpreises zu erwarten. Aus Kostengründen werden in den nächsten Jahren für bestimmte Anwendungen vermehrt auch MgB_2 -Drähte eingesetzt; dies vor allem beim „LINK“ – Projekt am CERN, das über 1'000 km Draht benötigen wird.

Die wichtigste Anwendung der HTS-Supraleiter sind die Strombegrenzer. Ein gutes Dutzend resistive Strombegrenzer sind in Betrieb oder im Bau, davon 5 mit über 100 kV in Japan, den USA, in China und Europa (2 Anlagen). Ein wachsendes Interesse finden supraleitende Generatoren für Windgeneratoren. Die Vorteile liegen dabei in der Gewichtsreduktion und der Reduzierung des CO_2 - Ausstosses, vor allem aber auch in der Möglichkeit, die Leistung von 10 MW auf 20 MW zu erhöhen.

Im Jahr 2011 fanden zwei Informationstreffen des Executive Committees (ExCo) der IEA statt, das erste Treffen im Mai in Santa Fe (USA), das zweite im November in Alzenau (D).

Projektziele

Die Projektziele beinhalten eine umfassende Information über die neusten 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 14 Partner. 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 dem Schweizer Markt untersucht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. ExCo Implementing Agreement: Fortführung des Agreements

Das gegenwärtige IEA - Agreement wurde bis Ende 2013 verlängert. Im November hat Prof. Guy Deutscher sein Amt als Chairman nach 10 Jahren seinem Nachfolger, Dr. Luciano Martini (ERSE, Italien, bisher Vice-chairman) übergeben. An dieser Stelle möchte ich Prof. Guy Deutscher für seinen unermüdlichen Einsatz und seinen Enthusiasmus für die HTS - Anwendungen danken. Für die Nachfolge von Dr. Luciano Martini als neuer Vice-Chairman hat sich Prof. Osami Tsukamoto (J) zur Verfügung gestellt als Spezialist für die technischen Anwendungen, während Prof. R. Flükiger weiterhin als Vice-chairman für die Materialprobleme zuständig ist.

Die Zusammensetzung des ExCo hat sich dieses Jahr geändert; der Schwerpunkt hat sich zugunsten der Industrie verschoben. Anstelle von Schweden, das ausgetreten ist, sind nun 3 Partner aus der Industrie hinzugekommen. Das ExCo besteht nun aus den folgenden 14 Partnern: USA, Japan, Deutschland, England, Norwegen, Finnland, Kanada, Korea, Israel, Italien, der Schweiz sowie den Firmen Bruker HTS (D), Nexans (F) und Columbus Superconductors (I).

2. Tätigkeiten des ExCo

In diesem Jahr fanden zwei ExCo – Informationstreffen statt. Das Treffen in **Santa Fe (USA)** vom 18.-20.5.2011 wurde von Debbie Haught (DOE) organisiert. Das zweite Treffen in **Alzenau (D)** vom 2.-4.11.2011 wurde von der Firma Bruker HTS (D) organisiert. Leider musste ich das zweite Treffen kurzfristig absagen, habe aber die Folien aller Vorträge erhalten und studiert, sodass auch diese Resultate im vorliegenden Bericht enthalten sind.

Zusätzlich habe ich am 24.10.2011 einen Workshop über Windgeneratoren in Rom besucht und dort einen Vortrag über die neusten Ergebnisse auf dem Gebiet der MgB_2 - Supraleiterdrähte gehalten; diese könnten in Windgeneratoren tatsächlich zum Einsatz kommen.

2.1. ExCo-Meetings in Santa Fe (USA), 18.-21.5.2011 und in Alzenau (D), 2.-4.11.2011

Im Folgenden werden die Resultate nach einzelnen Anwendungen dargestellt. Dabei stellen die Strombegrenzer die wichtigste Anwendung dar und werden deshalb besonders detailliert besprochen.

2.1.1. Strombegrenzer

Unser "operating agent", Dr. Alan Wolsky, hat einen Überblick über den Stand der Strombegrenzer gegeben. Fig. 1 zeigt verschiedene Typen von Strombegrenzern mit den für jeden Typ typischen Eigenschaften und Vorteilen.

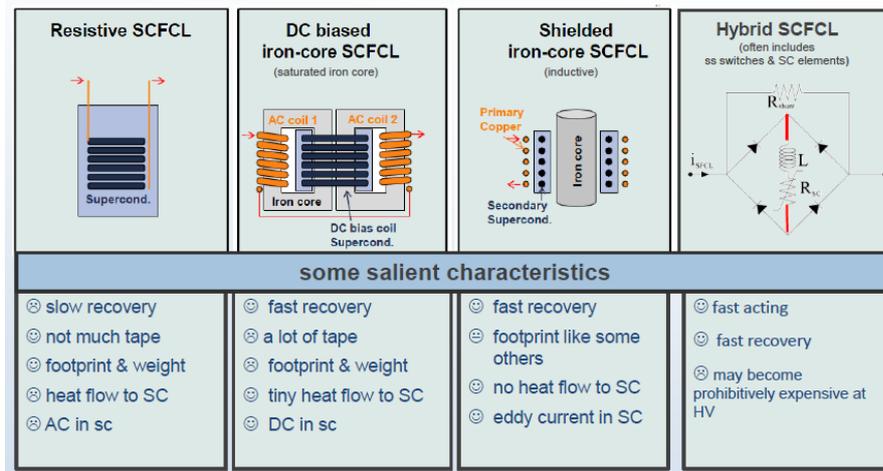


Fig.1: Verschiedene Typen von Strombegrenzern und ihre Eigenheiten.

Eine vollständige Liste der Strombegrenzer ist im Folgenden dargestellt, zuerst für die mittleren Spannungen (unterhalb 100 kV, Tab. I), dann für Hochspannungen (Tab. II).

Participants	Test Location and Dates	Type	Phase	Unfaulted Line Rating	Superconductor
CESI RICERCA (now RSE)	Italy / 2005	Resistive	3-ph.	3.2 kV, 0.22 kA 1.2 MVA	Bi 2223 tape LN2
RSE A2A	CESI PowerLab Milano, Italy Jan., 2011	Resistive	3-ph.	9.0 kV, 0.22 kA 3.9 MVA	Bi 2223 tape LN2
RSE A2A	San Dionigi Italy Q4 2011 Q3 2012	Resistive	1-ph. 3-ph.	9.0 kV, 1 kA 15.6 MVA	possibly Bi-2223 likely REBaCuO tape LN2
Toshiba Fujikura	factory in Japan 2008 project stopped	Resistive	3-ph.	6.6 kV, 0.6 kA 6.9 MVA	REBaCuO tape LN2
Chinese Academy of Sciences	Loudi, Hunnan Aug 2005- Dec2006	cold HTS coil with ss diodes & warm resistors	3-ph	10.0 kV, 1.5 kA 26 MVA	Bi 2223 tape LN2
Assets Supervision and Administration Commission of Baiyin City, Gansu province Chinese Academy of Sciences	Baiyin City ss Gansu Province, China 2011 Q2 start	cold HTS coil with ss diodes & warm resistors	3-ph	10.0 kV, 1.5 kA 26 MVA	Bi-2223 tape LN2
Gan-Shan Shanghai Shanghai Jiaotong Univ	Shanghai ss TBD 2012	Resistive	3-ph.	10 kV, 0.4 kA 7 MVA	REBaCuO tape LN2
U of Bologna Columbus IFN SPIN	No Field Test, instead paper study & preliminary measurements of components	Diode arms bridged by cold MgB2 coil that quenches during fault	3-ph.	20 kV, 1.5 kA 25 MVA	MgB2 wire 25 K conduction cooled

Tab. I: Fortsetzung siehe nächste Seite

Participants	Test Location Dates	Type	Phase	Unfaulted Line Rating	Superconductor
Nexans Superconductors RWE	Netphen ss Netphen, DE April 2004 - April 2005	Resistive	3-ph.	10 kV, 0.6 kA 10 MVA	Bi-2212 MeltCast bifilar coil, 66K, LN2
Nexans Superconductors Electricity Northwest ASL	BamberBridge ss Preston, UK Oct., 2009 – March 2010	Resistive	3-ph.	11 kV, 0.1 kA 1.9 MVA	Bi-2212 MeltCast 73K, LN2
Nexans Superconductors Scottish Power ASL	Liverpool UK Install Q2, 2011	Resistive	3-ph.	11 kV, ?? kA ?? MVA	Bi-2212 MeltCast bifilar coil, LN2
Nexans Superconductors Vattenfall Ag BTU	Boxberg Station Cottbus, DE	Resistive	3-ph.	11 kV, 0.8 kA 15 MVA	Bi-2212 MeltCast bifilar coil, 65K, LN2
Nexans Superconductors Vattenfall Ag KIT, BTU Univ of Dortmund	Boxberg Station Cottbus, DE Sept., 2009 – 31 Dec.2011	Resistive	3-ph.	11 kV, 0.8 kA 15 MVA	REBaCuO tape LN2
Nexans France(coordinator) 14 other participants all in ECCOFLOW	PowerLab test in Milano June 2012/ ENDESA's ss bus-tie on Majorca Spain & then an ss (LV power transformer) in Kosice, Slovakia Q3 2012 – Dec 2013	Resistive	3-ph	24 kV, 1.0 kA 41.6 MVA	REBaCuO tape LN2
Central Networks East Rolls-Royce HyperTech E.ON, ASL, ETI	Loughborough Leicestershire UK 2012-14	Resistive	3-ph	11 kV, 1.25 kA 24 MVA	MgB2 wire
Kurchatov Institute	Moscow, Russia 2009-2010	Resistive	1-ph	3.5 kV, 0.250 kA	REBaCuO

Tab. I: Strombegrenzer mit Spannungen ≤ 100 kV

Participants	Test Location Dates	Type	Phase	Unfaulted Line Rating	Superconductor
ENSYSTROB RWE Nexans (Hürth) KIT	Netphen ss Netphen, DE ??– Dec 2008	Resistive	1-ph.	110 kV, 1.85 kA	Bi 2212 Melt Cast Tubes Monofilar, LN2
Siemens-Nexans-AMSC	PowerTech BC, Canada Feb 2011 & Q2 2011	Resistive	1-ph.	115 kV, 1.2 kA	REBaCuO tape LN2
InnoPower	Shigezhuang ss Tianjin, China install Q4-2011	Saturated core spider	3-ph.	220 kV, 0.75 kA 280 MVA	Bi-2223 tape LN2 deliver, store, boil-off
Zenergy AEP	Tidd ss near Steubenville, Ohio, USA install 2012	Saturated core Compact	3-ph.	138 kV, 1.3 kA 310 MVA	Bi-2223 Conduction cooled 20–30K
KEPRI, KEPCO	TBD (RFP issued April 2011)	TBD	3-ph.	154 kV, TBD kA TBD MVA	TBD

Tab. II: Strombegrenzer mit Spannungen über 100 kV.

Diese Aufstellung demonstriert, dass weltweit ein grosses Interesse für Strombegrenzer besteht: Es besteht kein Zweifel, dass Strombegrenzer die erste Anwendung im grossen Stil der HTS – Supraleitung sein werden. Dabei sind sowohl resistive als auch induktive Strombegrenzer bekannt (siehe Tab. I + II).

Das Prinzip des „saturated core“ wurde mehrfach angewandt. Gleichstrom fliesst in den HTS - Spulen und sättigt die 6 Eisenkerne.

Hier ein Modell von Innost (China) mit der Spider - Anordnung der ac – Magnete.

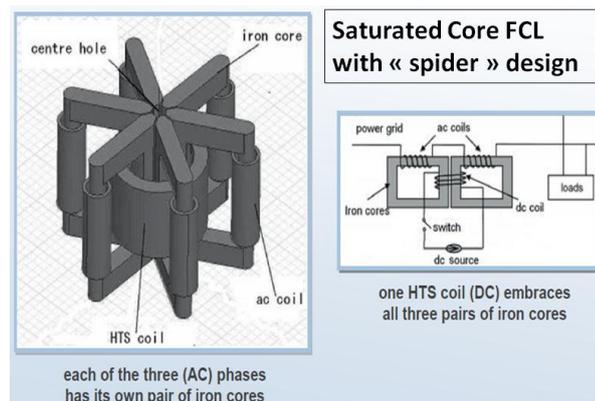


Fig. 2: Supraleitender Strombegrenzer mit «saturated core» und Spinnenanordnung der Magnete (Innost, China).

Aus Preisgründen wurde Bi-2223 gewählt anstatt REBaCuO. Die 220 kV - Anlage ist im Bau in Shigezhuang (130 km SE von Beijing) und wird gerade fertiggestellt. Technische Daten: 3 Phasen, 0.75 kA (280 MVA), gekühlt mit LN2. Erholungszeit: 0.6 s.

Zenergy hat eine neue Anlage entwickelt, die bedeutend weniger Platz braucht, was für die industrielle Anwendung Vorteile bietet. Die Strategie, die zu einem kompakten Design geführt hat, ist in Fig. 3 skizziert.

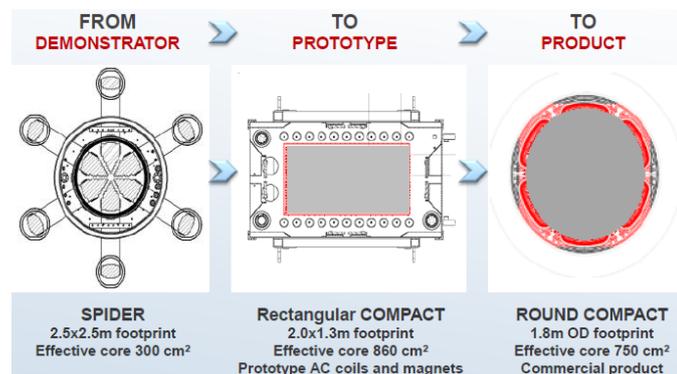


Fig. 3: Compact design von Zenergy; bedeutende Raumersparnis gegenüber dem „Spider Modell“.

Diese Anlage ist nicht nur bedeutend kleiner als mit der Spider – Anordnung, sie ist auch wesentlich leichter. Als Supraleiter wurde Bi-2223 verwendet. Betriebstemperatur: 20 - 30 K, single stage GM cryocooler. Kleinere „mutual inductance“ zwischen den AC - Spulen bei 300K und den HTS – Spulen bei 20-30K. CE Electric (UK) hat einen Strombegrenzer Zenergy Compact FCL im 2011 installiert mit 11 kV, 1.25 kA; eine Erweiterung auf 33kV ist für 2012 geplant. Weitere Pläne von Zenergy Compact FCL: 138 kV, 1.3 kA, bei Steubenville Ohio, US (2012). Eine weitere Anlage ist im Bau in Scunthorpe (GB) (Fig. 3).

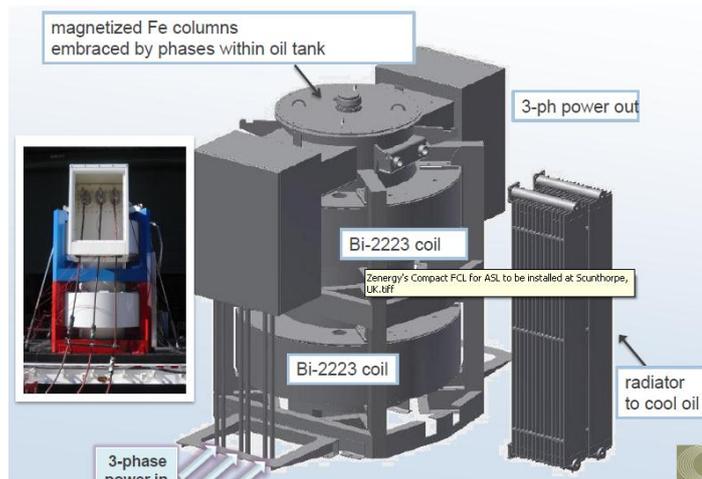


Fig. 4: FCL von Applied Superconductors Ltd, in Scunthorpe (GB) (im Bau)

Geschätzte Kosten eines “saturated core” Strombegrenzers (nach Appl. Supercond. Ltd)

- 2'000 Windungen pro Spule und pro 100 A
- Spulenradius 0.75 m
- 2 Spulen x 2000 Windungen x $2\pi \times 0.75 \text{ m} = 19 \text{ km}$
- **Kosten:**

REBaCuO:	200 - 300 \$/kAm
Bi-2223:	120 \$/kAm
MgB ₂ :	< 3 \$/kAm

Vorläufig ist REBaCuO zu teuer. Vorschlag: Operationstemperatur auf 20 K absenken und Bi-2223 in Betracht ziehen. MgB₂ - Spulen sind nicht ausgeschlossen.

Die Magnete könnten im “conduction cooled mode“ bei 20 K arbeiten.

Alternative: Strombegrenzer mit abgeschirmten Kern (Areva) auf der Basis von REBaCuO-Bändern von 40 mm Breite (1 – 1.4 kA).

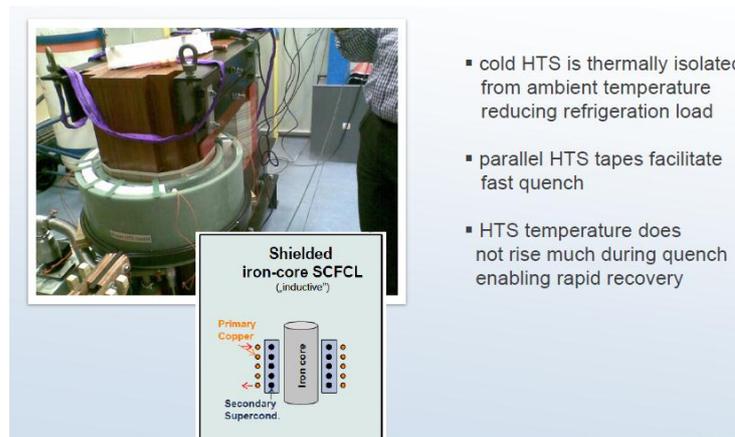
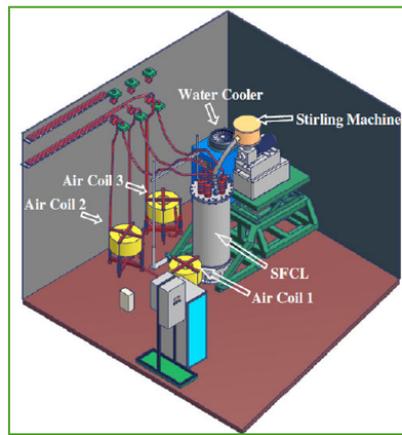


Fig. 5: Strombegrenzer mit abgeschirmten Kern (Areva).

Ein weiteres Strombegrenzer-Projekt wird in Italien ausgeführt: Dionigi substation, für Verteilungsnetzwerke mit mittlerer Spannung.



Parameter	Value
Rated voltage	$V_{nom} = 9 \text{ kV}_{rms} \pm 10\%$
Rated current	$I_{nom} = 220 \text{ A}_{rms}$
Prospective short-circuit current	$I_{SC} = 30 \text{ kA}_p$
Prospective short-circuit power factor	$\cos\phi_{SC} = 0.1$
Fault duration	$t_{fault} = 400 \text{ ms}$
Limitation Factor	$1.7 < LF < 2$

Fig. 6: Strombegrenzer für mittlere Spannungen (Dionigi, Italien).

In Bologna (Italien) ist ein Strombegrenzer im Bau, der MgB_2 - Spulen enthält. Dies war bereits vor 3 Jahren von Rolls Royce erfolgreich durchgeführt worden.

Das iSFCL Joint Research Project sieht den Bau eines Strombegrenzers für die Stadtwerke von Augsburg vor, zwischen der Verteilungsstation und der lokalen Station MTU Onsite Energy. MTU Onsite Energy produziert thermische Kraftwerke.

Teilnehmende Firmen: Schneider Electric, Kraftwerke Augsburg, Bruker.

Spezifikationen:

Betriebsspannung: 12 kV, 3 Phasen

Leistung: 15 MVA

Strom: 0.817 kA eff.

Strombegrenzung:

- Kurzschlussstrom: 25 kA
- Zeit: $\approx 1 \text{ ms}$
- Dauer der Störung: max. 500 ms

Siemens entwickelte einen Strombegrenzer für Spannungsübertragung (Transmission voltage) mittels REBaCuO - Bändern von American Superconductors, in Zusammenarbeit mit DOE, Nexans, Edison (California), Los Alamos und der Universität Houston.

Superconducting Fault Current Limiter for Transmission Voltage SIEMENS

Specifications

Nominal Voltage	115 kV _{rms}
Insulation Class	138 kV
Nominal Current	900 A _{rms}
Maximum Site Unlimited Fault Current	63 kA _{rms}
Required Site Limited Current	40 kA _{rms}
Trip Current	1.6 × nominal current

Shunted Limiter Concept
moderate limitation of fault current
→ reduced voltage at the FCL

System Design

33
L. Martini – IEA-HTS ExCo Meeting
3/11/2011, Hanau (DE)

Fig. 7: Strombegrenzer für Spannungsübertragung (Siemens)

Die Anordnung der REBaCuO-Bänder von American Superconductors ist in Fig. 8 dargestellt.

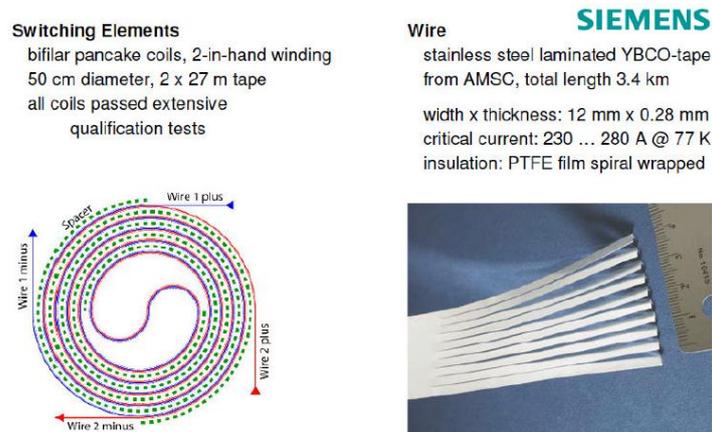


Fig. 8: Anordnung der REBaCuO-Bänder im Siemens Strombegrenzer (total: 3.4 km).

Dieser Strombegrenzer hat sämtliche Tests im Hinblick auf einen Betrieb bei 138 kV erfolgreich bestanden. Einige dieser Tests waren sogar strenger als die US Standards.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Interesse an supraleitenden Strombegrenzern nach wie vor sehr gross ist. Für mittlere Spannungen (10 – 20 kV) ist die Technologie weit fortgeschritten und hat ein enormes Markt-Potential. Die Erfahrungen mit Hochspannungs-Strombegrenzern (> 100 kV) sind soweit positiv, aber mehr R&D ist notwendig. Das Haupthindernis für eine grosse Marktdurchdringung besteht im noch ungünstigen Verhältnis zwischen Kosten und Leistung. Fortschritte im Kühlsystem sind noch notwendig.

Was das Supraleitermaterial betrifft, so wird momentan meistens dem Bi-2223 der Vorzug gegeben, einzig und allein aus Kostengründen. In einem Fall besteht die Alternative aus Bi-2212 – Röhren, die aus der Schmelze gezogen werden.

Sobald die Herstellungskosten von REBaCuO - Bändern es gestatten, werden solche vermehrt eingesetzt. Die Hauptargumente für MgB₂ - Drähte sind einmal die Kosten, dann die Möglichkeit, runde Drähte herzustellen, die für gewisse Anwendungen weitere Vorteile bieten.

2.1.2 Windgeneratoren

Am 24.10.2011 fand in Rom ein Meeting statt (SOWIT) über die Möglichkeiten von HTS - Supraleitern in Windgeneratoren. Dem Thema der Windgeneratoren wird heute nach dem in einigen Ländern beschlossenen Ausstieg aus der Atomenergie eine wachsende Bedeutung beigemessen.

Die allgemeine Stossrichtung in Europa wird aus folgender Graphik ersichtlich (aus „EU-funded activities: Research in Wind and Ocean Energies“).

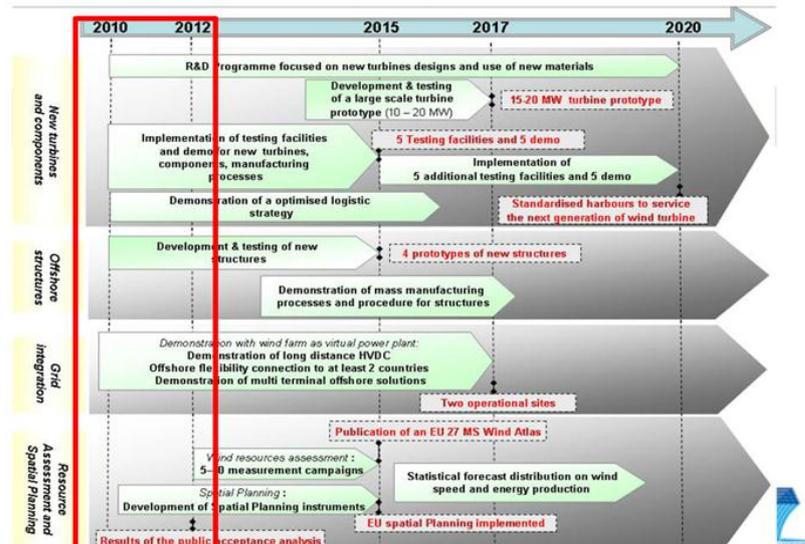


Fig. 9: EU-funded activities: Research in Wind and Ocean Energies

Man sieht, dass ab etwa 2014 Generatoren der Klasse 10 MW, ab 2017 sogar 15 – 20 MW geplant sind. Bei diesen Leistungen werden supraleitende Generatoren als besonders gewinnbringend erwartet. Schätzungen zeigen, dass die Masse eines supraleitenden Windgenerators nur etwa halb so gross sind wie für herkömmliche Generatoren.

Philippe J. Masson, von Advanced Magnet Lab, Palm Bay, FL (USA) hat einen vollständigen Bericht über Supraleitung in Windgeneratoren gegeben. Hier die wichtigsten Punkte:

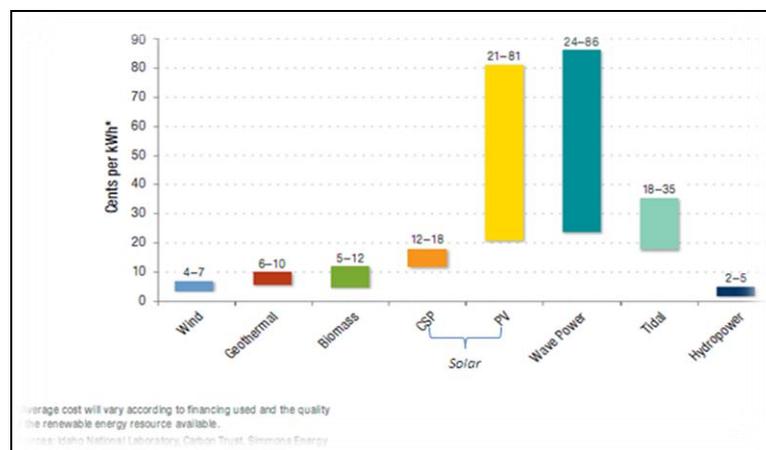


Fig. 10: Kostenvergleich zwischen verschiedenen, wiederverwertbaren Energiearten (Masson).

- Windenergie ist unter den wiederverwendbaren Energien die billigste (Fig. 9).
- Die Installationskosten sind sehr hoch. Die Folge ist:
 - Reduktion der Anzahl Turbinen
 - Erhöhung der Leistung jeder einzelnen Turbine
- Die Masse der Turbine müssen so klein wie möglich sein. Dies beeinflusst:
 - die Kosten der Basisanlage
 - die Kosten der ganzen Installation.
- Die Unterhaltskosten sind sehr hoch. Daraus folgt:
 - die Turbinen müssen sehr zuverlässig sein
 - die Kosten des Unterhalts und der Wartung müssen so klein wie möglich sein.

Aus allen diesen Punkten folgt, dass Supraleitung eine vorteilhafte Lösung ist (Fig. 11).

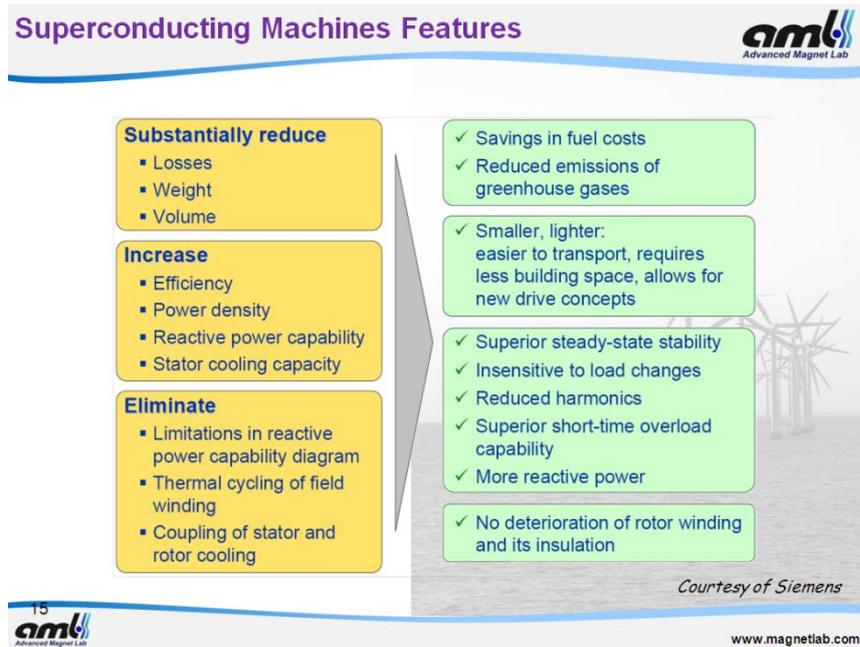


Fig. 11: Vorteile der Supraleitung bei Motoren (inkl. Windgeneratoren).

Masson hat eine vergleichende Analyse zwischen den Supraleitern geführt. Kriterien:

- Der Supraleiter bestimmt die Betriebstemperatur des Systems. Parameter:
- Kritische Stromdichte (engineering value)
- Filament-Durchmesser
- Supraleiter/Nichtsupraleiter
- Minimale Quench-Energie
- Ausbreitungsgeschwindigkeit der Normalzone
- Minimaler Biegedurchmesser des Leiters
- Kosten

Das Resultat dieser Analyse lässt sich im folgenden Schema wiedergeben (Fig. 12):

Superconductors	Price	Bending radius	"SC" Splice	Small Filaments	Quench Detection	Isotropic Field Dependence	Critical Temp (T _c)	Operating Temp
1G (BSCCO)	✗	✗	✗	✗	✓	✗	110K	~30K
2G (YBCO)	✗	✓	✗	✗	✗	✗	92K	50-77K
MgB ₂	✓	✗	✓	✓	✓	✓	39K	15-20K

Fig. 12: Vergleiche zwischen verschiedenen Supraleitern für Windgeneratoren

Wenn man den Kostenfaktor weglässt, so ergibt sich der Schluss, dass 2G – Bänder die beste Lösung darstellen. Zieht man die Kosten in Betracht, so kommt man zu einem andern Schluss (Fig. 13):

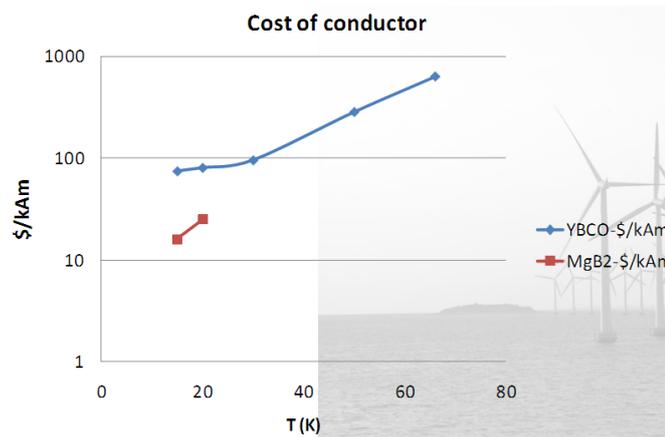


Fig. 13: Kostenvergleich zwischen YBCO und MgB₂ (nach Masson).

Das Verhältnis der Kosten pro Leiterlänge zwischen YBCO- und MgB₂- Leitern bei 4.2 K ist etwa 100:1. Für eine Betriebstemperatur von 20K, die mit MgB₂ durchaus möglich ist, ergibt sich ein Verhältnis (in \$/kAm) von etwa 4:1. Bei Leiterlängen von einigen Dutzend km pro Turbine ist dies ein wesentlicher Faktor.

Sofort erhebt sich die Frage, wie es mit den Kühlkosten bei 20K steht. Die Kühlung mittels verschiedenen Systemen von Kryokühlern wurde eingehend studiert.

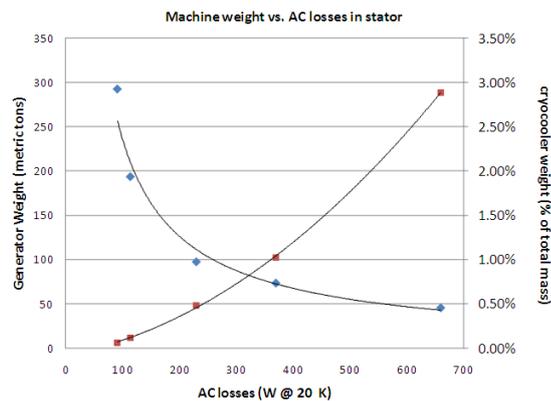


Fig. 14: Abhängigkeit zwischen Generator-Masse und ac – Verlusten (Masson).

Nach Masson können die ac-Verluste reduziert werden, wenn die Generator-Masse abnimmt (Fig. 14). Die Masse des Kryokühlers sind im Vergleich dazu sehr klein.

Die aktuellen Projekte sind in Fig. 15 dargestellt.

- Converteam/Zenergy
 - 8 MW
 - 12 RPM
 - Partially superconducting 2G
- American Superconductor/TECO Westinghouse
 - 10 MW
 - 10 RPM
 - Partially superconducting 2G
- AML Energy
 - 10 MW
 - 10 RPM
 - Fully superconducting MgB₂
- Others

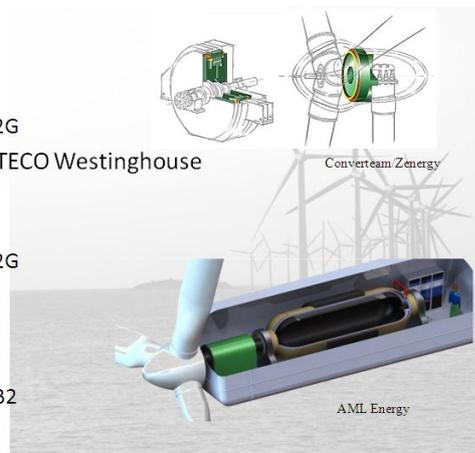


Fig. 15: Aktuelle, supraleitende Projekte für Windgeneratoren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einsatz von Supraleitern in Windgeneratoren durchaus Vorteile bringen könnte. Die sich in Bau befindenden Systeme belegen das grosse Interesse an diesen Systemen.

Der Vorteil der Supraleitung wirkt sich vor allem bei grösseren Leistungen aus. Der Durchmesser des Rotors bei 5MW ist etwa 100 m (Fig. 16), was nur bei Offshore – Anlagen vertretbar ist. In der Schweiz sind solch grosse Anlagen aus verschiedenen Gründen unmöglich. Eine Studie sollte darüber Auskunft geben, ob sich der Einsatz von Supraleitung bei kleineren Systemen lohnen würde, beispielsweise 1.5 MW mit Rotordurchmesser von etwa 80m.

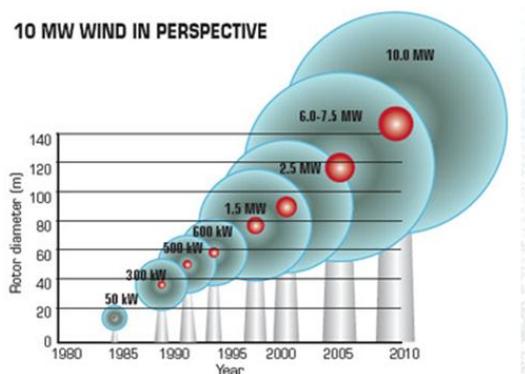


Fig. 16: Rotordurchmesser für verschiedene Leistungen

2.1.2. Andere supraleitende Systeme

Im Jahresbericht 2010 waren die einzelnen Supraleiterbänder im Detail beschrieben sowie einige Anlagen, die 2011 fertiggestellt wurden. Diese werden hier deshalb nicht erwähnt.

Es wird immer wahrscheinlicher, dass die Supraleitung künftig eine grössere Rolle in der Anwendung spielen wird; die Grenzen sind vor allem durch die Herstellungskosten, durch die Kapazität der Firmen sowie Verfügbarkeit der einzelnen Elemente und Bauteile gegeben.

Die folgende Tabelle (von Superpower zusammengestellt) gibt ein gutes Bild über die Menge von benötigten Supraleitern in verschiedenen Anwendungen. Aus dieser Tabelle lässt sich auch abschätzen, dass schon eine relativ kleine Anzahl von industriellen Anwendungen im Masstab 1:1 die Kapazität der heute operationellen Hersteller von HTS – Bändern übertreffen würde. Neue, grössere Fabrikations - Anlagen müssten dann gebaut werden.

Application	Operating Field (Tesla)	Operating Temperature (K)	Additional requirement	Wire needed per device (kA-m)
Cables	0.01 - 0.1 (ac) 0.1 - 1 (dc)	70 - 77	Low ac losses	40,000 - 2,500,000
Wind/Off-shore oil platform generators	1 - 3	30 - 65	In-field Ic	2,000 - 10,000
Transformers	0.1	65 - 77	Low ac losses	2,000 - 3,000
Fault current limiters	0.1	65 - 77	Thermal recovery	500 - 10,000
SMES	20 - 30	4.2 - 10	In-field Ic	36,000 - 500,000
Automotive motors	2 - 5	30 - 65	Low ac losses	500 - 1,000
Aerospace	2 - 5	30 - 50	Light weight	1,000 - 2,000
Magnets/coils	5 - 30	4.2 - 40	Long lengths, persist joints	200 - 2,000

Fig. 17: Menge der benötigten Supraleiter in verschiedenen Anwendungen.

In Fig. 17 müssten noch drei grosse Projekte hinzugefügt werden, die bereits beschlossen wurden: 1) LINK – Projekt im CERN (10'000 km MgB₂ – Draht) und 2) Ignitor – Fusion in Russland mit italienischer Beteiligung (Menge von MgB₂ – Draht noch unbekannt).

Das dritte Projekt ist dieses Jahr in Japan beschlossen worden: Die Central Japan Railway Company (JR Central) hat mit dem Bau eines auf der supraleitenden Levitationsbasis betriebenen Hochgeschwindigkeitszuges zwischen Tokyo und Osaka begonnen. Dieser Zug soll mit Geschwindigkeiten über 500 km/h die beiden Städte verbinden. Dabei wird eine erste Phase bis 2025 und eine zweite bis 2042 realisiert. Als Supraleiter ist in einer ersten Phase Bi-2223 vorgesehen, der Einsatz von REBaCuO ist später möglich, sofern die Herstellungskosten deutlich gesenkt werden können. Hier geht es um 100'000 km Supraleiter-Band, die Kosten wurden mit 44.7 Milliarden veranschlagt (ca 1.5 Mia/Jahr).

3. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Arbeiten an der Universität Genf auf dem Gebiet der angewandten Supraleitung wurden weitergeführt, wobei das Hauptgewicht auf 2 Gebieten lag:

- 1: Messung der Transporteigenschaften von Nb_3Sn – Drähten unter mechanischer Belastung, wie sie durch die Lorentzkraft erzeugt wird.
- 2: Weiterentwicklung der MgB_2 – Drähte durch die an der Universität Genf entwickelte Verdichtungsmethode.

Hier soll nur kurz die letzte Entwicklung auf dem Gebiet der Verdichtung von langen Drähten erwähnt werden. Dabei wurde die Methode weiterentwickelt; in Zusammenarbeit mit der Firma HEFTEC (Oberurnen, CH) wurde eine Maschine entwickelt, mit der etwa 300 m Draht am Tag mit einem Druck bis zu 1.5 GPa verdichtet werden kann. Es ist die erste Maschine, die solche Drucke in industriellem Massstab ausüben kann. Sie ist in Fig. 18 dargestellt.

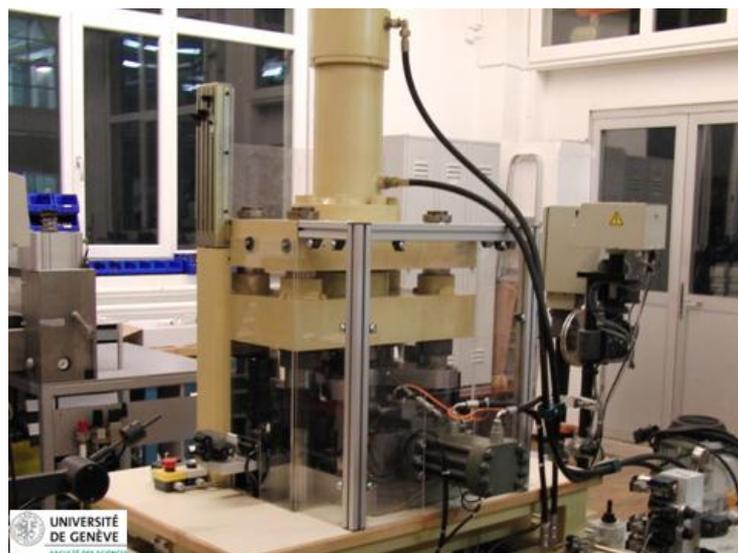


Fig. 18: An der Uni Genf entwickelte Verdichtungsanlage für MgB_2 - Drähte in industriellen Längen.

Diese Maschine besteht aus einer vertikalen 40t – Presse und einer horizontalen 16t – Presse, die den Draht durch eine kontrollierte und zeitlich abgestimmte Druck/Entspannung/Vorwärtsbewegung verdichtet, wobei ein viereckiger Querschnitt erzielt wird. In einer nächsten Phase sollen verdichtete, runde Drähte hergestellt werden. Mittels dieser Maschine war es möglich, die Stromdichten von *in situ* MgB_2 – Drähten deutlich zu erhöhen: Bei 4.2K um einen Faktor 2.3 und bei 20K um einen Faktor 5. Dies wirkt sich dann wesentlich auf den Herstellungspreis dieser Drähte aus.

4. Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit der Firma Bruker BioSpin in Fällanden (ZH) muss ganz besonders erwähnt werden. Zusammen mit dieser Firma gehen Ende 2011 zwei Projekte zu Ende, die massgeblich zur erfreulichen Entwicklung der MgB₂ – Drähte geführt haben:

- 1: KTI Projekt (Fr. 267'000, 2 Jahre)
- 2: NCCR – Projekt vom Nationalfonds (Fr. 340'000, 2.5 Jahre).

5. Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit hat sich vor allem im Austausch von Informationen beschränkt. Diese erfolgten sowohl in direkten Treffen wie auch an Konferenzen.

Die Teilnahme an den ExCo – Treffen hat zu ausserordentlich guten Beziehungen mit einigen ausländischen Firmen und Labors geführt, die sehr nützlich waren. Vor allem wurde von verschiedener Seite ein grosses Interesse an der oben erwähnten Verdichtungs-
maschine bekundet.

6. Bewertung 2011 und Ausblick 2012

Alle Projekte haben sich dieses Jahr positiv entwickelt und es waren keine Rückschläge zu verzeichnen. Positiv muss die oben erwähnte Entwicklung auf dem Gebiet der MgB₂ – Drähte erwähnt werden; unsere verdichteten Drähte haben die weltweit höchste Stromdichte erreicht.

Ausblick: Die hier erwähnten Gebiete werden im 2012 weitergeführt und vertieft.

7. Referenzen

- [1] R. Flükiger, M.S. Hossain, C. Senatore, M. Rindfleisch, **A new generation of in situ MgB₂ wires with improved J_c and B_{irr} values obtained by Cold Densification (CHPD)**, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 21(2011)2649;
- [2] C. Senatore, M.S.A. Hossain, R. Flükiger, **Enhanced Connectivity and Percolation in Binary and Doped in situ MgB₂ Wires after Cold High Pressure Densification**, Trans. Appl. Superconductivity, 21(2011)2680
- [3] R. Flükiger, H. Kamakura, **The MgB₂ Conductor Story” in 100 years of Superconductivity** (eds H. Rogalla & P. Kes) (Taylor and Francis) 2011, pp. 75 - 84.
- [4] G. Mondonico, B. Seeber, C. Senatore, R. Flükiger, V. Corato, G. De Marzi, L. Muzzi, **Improvement of electromechanical properties of an ITER internal tin Nb₃Sn Wire**, J. Appl. Phys. 108(2010)09396
- [5] R. Flükiger, M.S.A. Hossain, M. Kulich, C. Senatore, **Technical Aspects of Cold High Pressure densification (CHPD) on long lengths of in situ MgB₂ wires with enhanced J_c values**, Physica C 471 (2011) pp. 1119-1123
- [5] C. Senatore, G. Mondonico, F. Buta, B. Seeber, R. Flükiger, B. Bordini, P. Alknes, L. Bottura, **Phase formation, composition and T_c distribution of binary and Ta-alloyed Nb₃Sn wires produced by various techniques**, presented at the MT 22 in Marseille, 12.-16.9.2011, to be published in IEEE Trans. Appl. Supercond.