

Jahresbericht 2004, 27. Dezember 2004

# Projekt

## Hochtemperatur-Supraleiter in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren

Autor und Koautoren	Reinhard Joho
beauftragte Institution	ALSTOM (Schweiz) AG
Adresse	Zentralstrasse 40, 5242 Birr
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 466 6284 <a href="mailto:reinhard.joho@power.alstom.com">reinhard.joho@power.alstom.com</a> <a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100 649 / 150 798
Dauer des Projekts (von – bis)	01.03.2004 – 28.02.2005

### ZUSAMMENFASSUNG

Im Projekt wird in Form einer Studie untersucht, wo die Vor- und Nachteile einer grossen elektrischen Maschine mit supraleitender Wicklung liegen. Im Zentrum stehen Synchrongeneratoren, insbesondere Turbogeneratoren im Bereich 50...>1000MW, mit einer Feldwicklung der Technologie Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL). Neben dem offensichtlichen Vorteil der Wirkungsgradsteigerung werden für einen ganzheitlichen Ansatz eine Reihe weiterer Aspekte untersucht. Dies sind: Zuverlässigkeit, Herstellkosten, Verhalten am Netz, Patentsituation und Marktakzeptanz.

Die einjährige Studie gliedert sich in die drei Phasen „Status“, „Benchmark“ und „Aktionsplan“.

Die Phase „Status“ ist abgeschlossen. Aktivitäten: Kontaktaufnahme zu Schweizer Partnern, Teilnahme an Konferenzen, Workshop mit HTSL-Drahtherstellern und Endkunden, Literaturrecherche, Patentrecherche, Analyse von laufenden Entwicklungsprojekten. Fazit: Zwei laufende Entwicklungsprojekte sind von Interesse, der 100MVA-Generator von General Electric (Tests in 2006) und der rotierende 8MVA-Phasenschieber von American Superconductors (Inbetriebsetzung war Mitte 2004). Diese Projekte brauchen den kommerziell erhältlichen HTSL-Leiter der ersten Generation vom Typ Bi-2223 in einer mechanisch verstärkten Spezialausführung. Das Leitermaterial ist noch zu teuer, doch wird für das Jahr 2010 mit einem Rückgang auf ¼ des heutigen Preises gerechnet. Die zwei erwähnten Projekte erhalten bezüglich Technologie starke nationale US-Förderung, bzw. militärische Quersubvention. Patentmässig ist die Technologie von den Entwicklungsführern und anderen stark verbaut worden. Es erscheint dringend nötig, die laufenden und kommende Maschinen-Projekte weiter zu verfolgen.

Die Phase „Benchmark“ hat intensive Diskussionen mit Kunden, Drahtlieferanten und dem Generatorhersteller beinhaltet. Die vorliegende Auswertung zeigt keine eindeutigen Marktanreize des HTSL-Generators. Konventionelle Generatoren können alle Normen und Kundenanforderungen erfüllen. Die über die Normen hinausgehenden Vorteile wiegen z. Zt. zu wenig stark. Voll optimierte HTSL-Generatoren bedürfen eines neuen Stators (Luftspaltwicklung) mit neuen, eigenen Risiken. Bezüglich Markteinführung bei Grossgeneratoren scheint der Austauschrotor (Absicht von General Electric) ein geeigneter Ansatz mit vertretbarem Risiko zu sein. Ein konkurrierender Ansatz „verbesserte konventionelle Generatoren“ könnte voraussichtlich den Vorteil des HTSL-Generators (Wirkungsgrad) schrumpfen lassen. Solche Untersuchungen sind bereits begonnen, die Ergebnisse werden gegenwärtig zusammengefasst. Hier sind technologische Fortschritte zu erwarten, deren Ausmass intensiver untersucht werden müsste, und welche insbesondere dem Standort Schweiz Vorteile eröffnen könnten.

## Projektziele

Die einjährige Studie soll die Möglichkeiten für eine eigenständige Entwicklung eines Synchronerators mit einem Rotor auf Basis Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) aufzeigen. Als Benchmark soll eine Möglichkeit einer verbesserten konventionellen Technologie evaluiert werden. Die Studie besteht zum grössten Teil aus Beobachter-, Koordinations- und Planungsarbeit. Sie ist gegliedert in eine erste Phase „Statusaufnahme, weltweit“, eine zweite Phase „Benchmark“ und eine dritte Phase „Aktionsplan“.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In der **Phase „Status“** wurde eine Uebersicht über die Arbeiten an der Technologiefrent und an der Maschinenentwicklungsfrent geschaffen. Der Bericht konnte aus seiner Tätigkeit in internationalen Gremien wertvolle Informationen in das Projekt einbringen. Im Berichtszeitraum war der Bericht als Mitglied in der IEEE-PES am General Meeting 2004 in Denver, und konnte an der Panel-Session vom 8. Juni „Advances in Superconducting Machinery“ teilnehmen. Als Mitglied des CIGRE SC-A1 „Large Electrical Machines“ konnte der Bericht an der der 2004 Session in Paris Informationen austauschen. Ferner wurden im Berichtszeitraum intensive Kontakte mit ausgewählten Herstellern von HTSL-Material gepflegt. Im Zuge seiner Tätigkeit als Patentkoordinator im Generatoren-Business seiner Firma führte der Bericht eine Analyse der Patentsituation durch. Dankbar ist der Bericht auch für die öffentlich zugänglich gemachten Dokumente der informativen jährlichen Peer-Reviews vom US-DOE (eine Art Partnerorganisation des BFE) über die angewandte Supraleitungstechnik, natürlich hier insbesondere des Maschinenteils.

Ueber internationale Aktivitäten im Gebiet grosser elektrische Maschinen mit HTSL-Technologie konnte ein ziemlich vollständiges Bild hergestellt werden. Sehr viel Aktivität ist im maritimen Antriebsbereich, und hier speziell im Gebiet der nautischen Wehrtechnik. Infolge kleiner Drehzahl (100..250U/min) sind diese Arbeiten aber von sekundärer Bedeutung für das interessierende Gebiet der schnelllaufenden Turbogeneratoren. Eine Uebersicht zum Status der HTS-Technologie bei Maschinen wurden im ersten Zwischenbericht an das BFE vom 9. Juli 2004 gegeben [1]. Es seien deshalb hier lediglich die zwei wichtigsten fortgeschrittenen Referenzprojekte zu schnelllaufenden Generatoren charakterisiert.

### General Electric 100MVA HTSL-Rotor

Im Bereich Kraftwerksgeneratoren ist derzeit ein 26MioUSD- Projekt von General Electric im laufen, mit dem Ziel in 2006 ein 100MVA-Prototypgenerator (Turbogenerator, 3600U/min) auf dem Prüfstand zu testen. Der Hersteller macht neben den bekannten Vorteilen (Verlustsenkung um 40% und bessere Stabilität am Netz) auch die Freiheit von thermischen Zyklen im Rotor (bleibt konstant auf Kryotemperatur) als Kundenvorteil geltend. Der Hersteller konzentriert sich vorerst nur auf den neuen Rotor, dieser soll als „Alternativlösung“ in nur leicht angepasste Statoren eingebaut werden. Das Projekt weist eine beeindruckende R&D-Ressource auf: neben dem Research-Center in Niskayuna ist durch das DOE auch eine Beteiligung von den nationalen Laboratorien Oak Ridge und Los Alamos sichergestellt. Der Rotor besteht aus einem magnetischen Kern, um den ein Solenoid gewickelt ist (Fig.1) [2]. Das Solenoid ist mit einer einwindigen Kühlröhre versehen, welche mit Heliumgas von etwa 25K durchflossen ist. Um Spule und Kühlrohr schliesst sich ein Spulenkasten, welcher durch Zugbolzen im Rotorkern abgestützt ist. Die Wellen sind mit einer Ausnehmung für das Solenoid an den Rotorkern geflanscht (Fig.2) [3]. Die Herausforderung besteht aus:

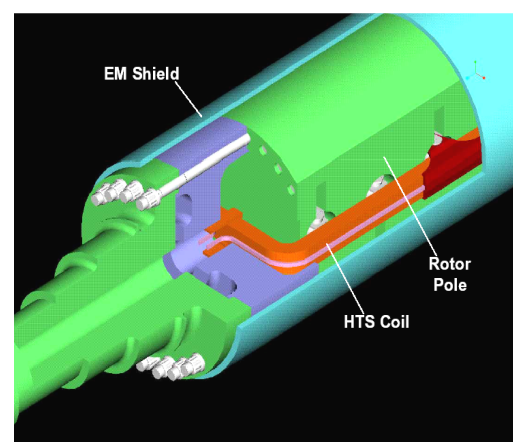


Fig.1 HTSL-Rotor zum 100MVA-Generator

- a) die Wicklung ohne mechanische Belastung im Spulenkasten abzustützen. Der verwendete Leiter vom Typ Bi-2223 mit vermutlich Stahldeckbändern von American Superconductor erträgt eine mechanische Dehnung von max. 0.35%, ein Ueberschreiten beeinträchtigt die Stromtragfähigkeit
- b) den Wärmeeinbruch über die Zugbolzen zu dämmen und trotzdem gute mechanische Stabilität zu gewährleisten
- c) den Raum um das Solenoid dauerhaft zu evakuieren um den Wärmetransfer klein zu halten. Ein übergestülpter Zylinder (EM-Shield) begrenzt nach aussen. Zylinder und Rotorkern sind ausserhalb des Kryo-Bereichs.
- d) die Kälteleistung ausfallfrei auf den Rotor zu übertragen.

Die erfolgreich abgeschlossenen Laufversuche an einem 1.5MW-Kleingenerator sind nach GE-Angaben positiv verlaufen, helfen aber nach unserem Wissen bestenfalls, um Berechnungstools zu eichen; sie sagen aber nur wenig aus über das Technologie-Restrisiko bei 100MVA.

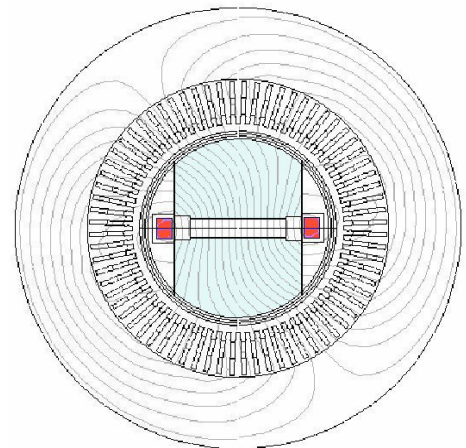


Fig.2 Magnetisches Feld im 100MVA-Generator

#### American Superconductor (AMSC) 8MVar-Phasenschieber

AMSC hat für Tennessee Valley Authority (TVA) in USA einen rotierenden 8MVar Blindleistungskompensator in Containerbauform entwickelt, (Fig.3) [4]. Der Maschinenbaupartner ist Ideal Electric. Nach anfänglichen Rückschlägen hat der Kompensator im zweiten Halbjahr 2004 erste Betriebsversuche gefahren. Wegen der relativ hohen Drehzahl von 1800U/min (4-poliger Rotor) ist das Projekt von Interesse. Der Rotordesign ist unterschiedlich von dem von GE: die Spulen sind pfannkuchenartig auf dem Rotorkern liegend. Der HTSL-Leiter vom Typ Bi-2223 ist natürlich aus dem eigenen Hause. Die Kühlung erfolgt mit flüssigem Neon bei 27K unter Verdampfung. Der Rotor wird mit einem Ponymotor angefahren. Bei grösserem Bedarf an Blindleistung werden mehrere Container parallel geschaltet. Folgebestellungen von TVA für fünf weitere Einheiten sind erfolgt. Das Projekt wird weiter beobachtet.

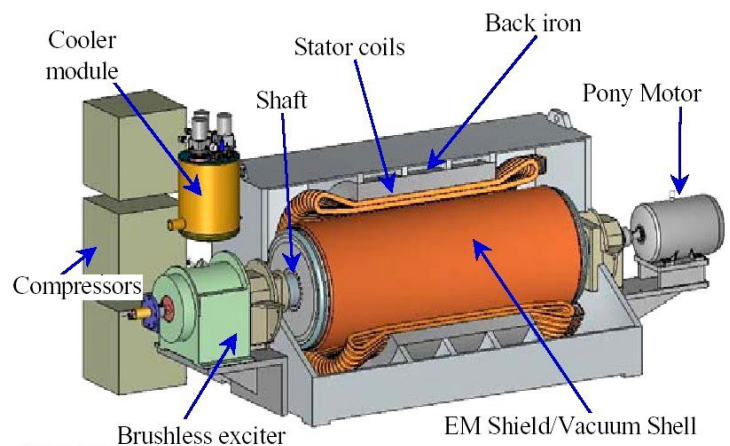


Fig.3 Rotierender 8MVar-Phasenschieber

#### Patentsituation

Auf die Patentsituation der HTSL-Drähte als solche wird nicht eingegangen, da dies nicht zur Aufgabenstellung der Studie gehört. Diese Patentsituation hat aber einen gewissen Einfluss auf die Berücksichtigung des Drahtlieferanten (der Drahtlieferant hat seinen IPR-Garten abgesteckt).

Die in laufende supraleitende Projekte eingebundenen Maschinenhersteller haben die anwendungsspezifischen Technologien fast lückenlos zum Patent angemeldet. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Erteilung sind dem Bericht von GE mehr als zwei Dutzend Anmeldungen bekannt, von American Superconductor sind es mehr als ein Dutzend. Für einen Einsteiger stellen sich folgende Fragen:

- ist eigenständige Technologie angestrebt? Dies kann zu einer Vergrößerung vom R&D-Aufwand führen, zu erhöhtem Technologie-Risiko, und eventuell sogar zum Projektabbruch ohne Partner

- Partnerschaftssuche mit dem Ziel eines Patentkonglomerats? Naheliegend ist dieses Vorgehen bei einem Zusammengehen innerhalb verschiedener Geschäftsbereiche eines Grosskonzerns (z.B. Motoren-Generatoren). Heikler wird das Zusammengehen mit einem fremden Partner, der im Markt als Konkurrent auftritt.

In der **Phase „Benchmark“** wird die Marktchance für den supraleitenden Generator untersucht. Es wird auch eine Gegenüberstellung der verschiedenen HTSL-Generatorprojekte mit konventioneller und zusätzlich verbesserter konventioneller Generatortechnologie durchgeführt.

#### Herstellkosten

Die Preise für den HTSL-Leiter vom Typ Bi-2223 liegen z.Zt. bei 120Euro/kAm. Bei einem Leiterstrom von ca. 100A (bei 77K) und einer totalen Leiterlänge von ca. 20km für einen 100MVA-Generator ergeben sich die nackten Leiterkosten zu 240'000Euro. Im Vergleich kostet heute der konventionelle Rotor als ganzes gerade soviel. Es steht deshalb ausser Zweifel, dass nur mit dem prognostizierten „Preiszerfall“ (auf ¼ in 2010) ein kommerzieller Erfolg in Aussicht ist.

#### Marktchancen

Die Diskussionen des Generatorherstellers mit Drahtlieferanten und Vertrauenskunden konnte in dieser Phase intensiv durchgeführt werden. Inhalt und Ergebnisse unterliegen einer Vertraulichkeitserklärung, sodass im folgenden nur summarisch berichtet wird.

Der Wirkungsgradgewinn von 0.3..0.5% (je nach Generatortyp) ist unbestritten. Die zusätzliche Leistung für das Kälteaggregat ist vernachlässigbar. Mit 0.04 Fr/kWh Bonus und basierend auf einer 100MW Einheit mit 0.4% Gewinn im Wirkungsgrad und 4000 Vollaststunden pro Jahr resultieren gerade mal Einsparungen von 64'000 Fr pro Jahr: ein zu kleiner Anreiz in Anbetracht des sicher nicht kleinen Zusatzrisikos mit der neuen Technologie.

Im übrigen wird der Generator an den bestehenden Normen und Grid Codes der Kunden gemessen. Darüber hinausgehende Parameter tun sich in der finanziellen Bewertung schwer. Dies gilt für den erweiterten Blindleistungsbereich (Leistungsfaktor) als auch für das erhöhte Leerlaufkurzschlussverhältnis. Beides sind zwar wertvolle Bringer für die Stabilität, werden aber - wenn oberhalb der Standardanforderungen - dem Kraftwerkkunden kaum Mehreinnahmen bringen.

Die Markteinführung ist kritisch. Ein Einstieg in den Markt kann, wie durch General Electric vorgesehen, über ein Austausch-Rotoren Geschäft erfolgen. Zu einem Standardgenerator, wie er in Gasturbinen und Kombikraftwerken üblich ist, wird in bestehenden Kraftwerken der Rotor des Generators durch einen HTSL-Rotor derselben Abmessungen ersetzt (vorteilhafterweise bleibt der konventionelle Rotor als „Ersatzteil“ im Kraftwerk). Eine Erweiterung im Betriebsregime ist dann sofort möglich, mit Massnahmen am Stator auch eine Erhöhung der Wirkleistung, was im Zuge des Upgrading-Geschäfts der Turbinen immer wünschenswert ist.

Ein Gewinn an Baugrösse (für eine gegebene Leistung) ist nur mit radikaler Aenderung im Stator möglich. Bei Ausschöpfung des vollen Potentials an erhöhtem magnetischen Fluss würde es bei normalem Stator zu Ueberhitzung der Statorblech-Zähne kommen. Die Zähne werden also weggelassen und sogenannte Luftspaltwicklungen werden eingeführt. Ein innovatives Element, welches vom Bericht dazu entwickelt wurde, ist der gepresste Litzen-Roebelstab (Fig.4), welcher eine Exponierung der Statorwicklung im Luftspaltfeld ermöglicht. Die Einführung dieser gesamtoptimierten Maschine ist natürlich mit über den neuen Rotor hinausgehenden Risiken verbunden.

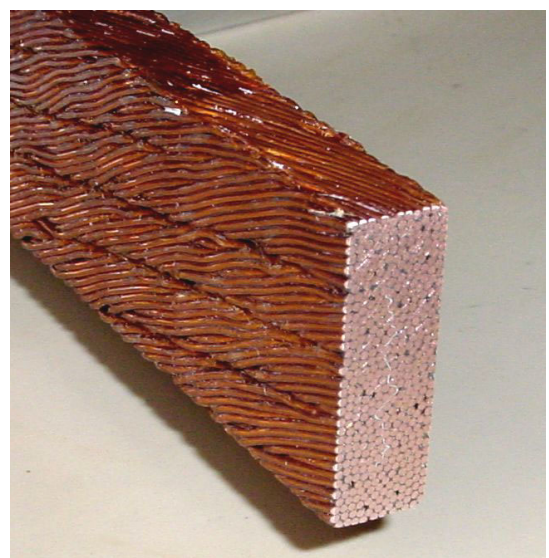


Fig.4 Muster eines Litzen-Roebelstabs

### Zur „verbesserten konventionellen Generatortechnologie“

Unter verbesserter konventioneller Technologie wird verstanden, zumindest grössenordnungsmässig die Forschungsgelder für eine fundamentale Weiterentwicklung der bestehenden konventionellen Generatortechnologie zu investieren. Zwischenzeitlich hat es hier noch nicht publizierte Fortschritte konventioneller Art gegeben, die die Betrachtung der HTSL-Technologie relativieren werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt im kalkulierbaren Zusatzrisiko. Dieser Weg scheint heute vom Markt ermöglicht und akzeptiert zu werden. Eine Vielzahl von gezielten Innovationen in Technologie, aber auch im Design, kann zu einer beträchtlichen Performance-Steigerung, insbesondere im Wirkungsgrad, führen. Detaillierte Ausarbeitungen müssen noch im Konzept zusammengestellt werden. Als Beispiel für eine Anwendung zur Verlustsenkung und Ausnutzungssteigerung auch in konventioneller Anwendung kann der Litzen-Roebelstab aus Fig.4 stehen. Für eine korrekte Gegenüberstellung „HTSL“ mit „konventionell-verbessert“ sind aber zusätzliche Mittel nötig, in Anbetracht der Wichtigkeit der Entscheidung, erscheinen sie aber angebracht. Es drängt sich deshalb auf, eine Gegenüberstellung einer vertieften HTSL-Studie mit dem Potential der verbesserten, konventionellen Maschine durchzuführen. Insbesondere die zeitliche Einführung der Optionen könnte hier genauer vertieft werden, um Investitionen in Entwicklungsbemühungen optimal zu lenken.

## **Nationale Zusammenarbeit**

Folgende Kontakte wurden im Zuge des Projekts auf nationaler Ebene erstellt:

- Universität Genf, Prof R. Flükiger, Dept. Phys. Matière Condensée
- ABB Sécheron Meyrin, H. Zueger
- ABB Forschung Dättwil, Dr. M. Lakner
- Vorstellung der Studie und Diskussion am BFE-HTSL-Statusseminar vom 24.11.2004

## **Internationale Zusammenarbeit**

Es wurden keine weiteren geförderten nationale oder multinationale Projekte kontaktiert. Hingegen fand während der zwei Projektphasen eine über Europa hinausgehende, internationale Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern auf Ebene Drahtlieferant, Endkunden und auch Konkurrenz, statt. Diese Kontakte sind mit einer Vertraulichkeit belastet.

## **Bewertung 2004 und Ausblick 2005**

Erfolge während dem Berichtszeitraum waren:

- weltweite Kontakte aufgenommen, Partner für künftige Arbeiten evaluiert
- gesicherte Information über laufende Projekte weltweit ermittelt
- Informationen über HTSL-Technologietrend der kommenden Jahre analysiert
- technische Hauptproblemstellungen ermittelt
- Marktchancen und Risiken mit kompetenten Partnern erarbeitet



### Misserfolge, Bedrohungen:

- Patentsituation erfordert zusätzliche Investitionen

- Benchmark HTSL mit zwischenzeitlich verbesserter konventioneller Technologie muss in 2005 vertieft werden

### Ausblick 2005

Es ist wichtig, sich bewusst zu sein dass die Basis, auf die man sich bezieht, sich als „Moving Target“ verhält. Die Kenntnis über Lokalisierung und Richtung dieser Basis ist wichtig um die Erfolgchancen abzuklären. Dies gilt für Technologie und Markt (Produkte, Märkte: z.B. Nuclear Revival in China).

## Referenzen

- [1] R. Joho: **HTSL-Supraleiter in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren**, erster Zwischenbericht über Phase 1 „Status“ vom 9. Juli 2004 an das BFE.
- [2] J.M. Fogarty: **Development of a 100MVA High Temperature Superconducting Generator**, IEEE-PES General Meeting, Denver USA, 6.-10. Juni 2004.
- [3] J. Bray: **Design and Development of a 100MVA Generator for Commercial Entry**, DOE Peer Review, Washington, DC, USA, 24. Juli 2003.
- [4] D.T. Bradshaw **“Super“ Reactive Power for the Power System through SuperVAR™ High temperature Superconductor Dynamic Synchronous Condensers**, IEEE-PES General Meeting, Denver USA, 6.-10. Juni 2004.