

Weltrekord bei der Hochtemperatursupraleitung

W. H. Fietz, R. Heller, P. Komarek, R. Lietzow, G. R. Zahn, ITP

Einleitung

Mit der Entdeckung der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) im Jahre 1986 waren große Erwartungen geweckt worden, da diese Materialien bei vergleichsweise hohen Temperaturen einen elektrischen Strom ohne Verluste transportieren können. Insbesondere die damit mögliche Kühlung mittels flüssigen Stickstoffs bei etwa 80 K war viel versprechend, konnte aber aufgrund der schwierigen Herstellung geeigneter Leiter nicht umgesetzt werden. Mittlerweile sind industriell hergestellte HTSL verfügbar, die aber bislang eher bei kleinen Strömen eingesetzt wurden.

Entwicklung einer HTSL-Stromzuführung für ITER

Im Rahmen der Arbeiten zum Fusions-Forschungsreaktor ITER¹⁾, der in Südfrankreich gebaut werden soll, hat das Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Centre de Recherches en Physique des Plasmas der Eid-

genössischen Technischen Hochschule in Lausanne, Schweiz, nunmehr eine Stromzuführung auf Basis eines Hochtemperatursupraleiters entwickelt, die einen elektrischen Strom von 70.000 Ampere tragen und sowohl mit Heliumgas als auch mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden kann.

Da die Brenntemperatur des energieerzeugenden Plasmas in einem Fusionskraftwerk bei ca. 100 Millionen °C liegt, muss eine besonders wirkungsvolle thermische Isolierung für die Wand des Plasmagefäßes vorgesehen werden. Das aus Stahl hergestellte Gefäß darf eine Temperatur von einigen Hundert Grad Celsius nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden hohe Magnetfelder benötigt um das energieerzeugende heiße Plasma einzuschließen. Hierzu dienen große elektrische Spulen, die aber nur im supraleitenden Zustand wirtschaftlich betrieben werden können. Um den supraleitenden Zustand zu erreichen, müssen die Spulen mit Helium auf Temperaturen um 4,5 K abgekühlt werden.

Zum Betrieb dieser supraleitenden Spulen sind sogenannte Stromzuführungen nötig, die die stromtragende Verbindung zu der auf Raumtemperatur befindlichen Stromversorgung darstellen und für die ein Großteil der zur Verfügung stehenden Kälteleistung aufgewendet werden muss. Deshalb ist man bestrebt, diese Verluste zu minimieren. Durch die Entdeckung der HTSL gibt es nun die Möglichkeit, Stromzuführungen bei weit höheren Temperaturen, z. B. bei denen des flüssigen Stickstoffs, und infolgedessen mit weitaus höherem thermodynamischem Wirkungsgrad zu betreiben. Zusätzlich bedingt die sehr geringe thermische Leitfähigkeit des Supraleitermaterials eine weitere Reduzierung der Verluste um bis zu einem Faktor 10 bei der Betriebstemperatur der supraleitenden Spulen.

Die Hochtemperatursupraleiter-Stromzuführung wurde als Modell zum Einsatz für ITER konzipiert und besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, einem HTSL-Modul und einem herkömmlichen mit Heliumgas gekühlten Kupferwär-

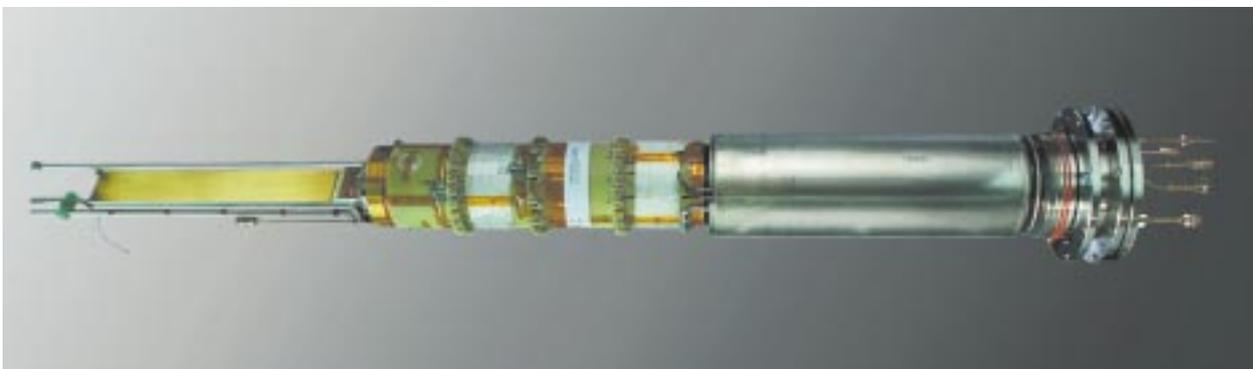


Abb. 1: Die am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Hochtemperatursupraleiter-Stromzuführung hat eine Länge von 2 m. Eine derartige Stromzuführung soll nun auch bei ITER eingesetzt werden.

¹⁾ International Thermonuclear Experimental Reactor



Abb. 2: Die HTSL-Stromzuführung vor dem Einbau in den Testkryostaten.

metauscher [1]. Das HTSL-Modul besteht aus über 1000 Wismut-Supraleiterbändern (jedes Band besteht aus $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -Filamenten in einer Silber-Gold-Matrix) und wurde in Zusammenarbeit mit der Firma American Superconductor gebaut. Der Wärmetauscher wurde im Forschungszentrum gefertigt und basiert auf dem in konventionellen Stromzuführungen bis 80.000 A bereits erfolgreich eingesetzten Prinzip. Abb. 1 zeigt die HTSL-Stromzuführung ohne Einbaustruktur, während in Abb. 2 die Stromzuführung kurz vor dem Einbau in den Testkryostaten dargestellt ist.

Die HTSL-Stromzuführung wurde bis zu einem Maximalstrom von 80.000 A ohne Probleme betrieben. Dies ist der bisher höchste mit Hochtemperatursupraleitern transportierte elektrische Strom. Beim nominellen Betriebsstrom der Toroidalfeldspulen von ITER von 68.000 A und einer Heliumgaseintrittstemperatur von 50 K, was ei-

ner maximalen Betriebstemperatur des HTSL von 65 K entspricht, konnte der Wirkungsgrad um den Faktor 3,7 erhöht werden; für einen typischen Stromzyklus von ITER erhöht sich dieser Faktor auf 5. Nach einem simulierten Kühlmittelausfall beim vollen Betriebsstrom von 68.000 A konnte die Stromzuführung über 5 Minuten lang weiter betrieben werden, bevor sich der Supraleiter so weit erwärmt hatte, dass er in die Normalleitung überging und der Strom abgeschaltet werden musste [2].

Darüber hinaus war es möglich die Stromzuführung beim Nominalstrom von 68.000 A sogar mit 80 K Heliumgas stabil zu betreiben. Die Verwendung von 80 K warmen Heliumgases wäre vorteilhaft, weil bei ITER eine riesige Kälteleistung bei 80 K verfügbar ist um das Strahlungsschild zu kühlen. Allerdings ist bei einem solchen Betrieb kein großer Sicherheitsfaktor mehr vorhanden, was im Störfall eine sofortige Schnellabschal-

tung des Magnetsystems erforderlich macht [2].

Eine Alternative zur Heliumkühlung ist der Betrieb mit flüssigem Stickstoff. Für die Stromzuführungen hätte dies den Vorteil, dass die Kühlung unabhängig vom Heliumkühlkreislauf für die Spulen ist. In einem Test konnte auch dieser Betrieb mit der HTSL-Stromzuführung erfolgreich demonstriert werden. Der mit Stickstoffkühlung erreichte Wirkungsgrad war mit dem der 50 K Heliumkühlung vergleichbar, auch ein Kühlmittelausfall bei 68.000 A konnte erfolgreich beherrscht werden. Allerdings ist die Temperaturmarge für das mit flüssigem Stickstoff gekühlte HTSL-Modul ähnlich gering wie bei der 80 K Heliumkühlung [2].

Im derzeitigen ITER-Design ist der Einsatz von konventionellen Stromzuführungen aus Kupfer vorgesehen. Die erfolgreichen Ergebnisse dieses Entwicklungsprogramms haben jetzt zu dem Vorschlag geführt, die neuartigen Stromzu-

führungen einzusetzen. Dabei wird die 50 K Heliumkühlung favorisiert, weil sie eine größere Flexibilität verspricht und durch die größere Temperaturmarge eine geringere Menge an HTSL-Material benötigt wird. Durch den Einsatz der neuartigen HTSL-Stromzuführungen würden sich die Betriebskosten von ITER um jährlich 800.000 Euro verringern. Zusätzlich könnten die höheren Baukosten durch Einsparungen bei den Kosten für die Kälteanlage kompensiert werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Europäischen Fusionstechnologieprogramms hat das Forschungszentrum Karlsruhe zusammen mit dem CRPP, Schweiz, eine HTSL-Stromzuführung entwickelt, die einen elektrischen Strom von 70.000 Ampere trägt und sowohl mit Helium als auch mit

flüssigem Stickstoff gekühlt werden kann. Solche Stromzuführungen werden z. B. benötigt, um den Strom von Raumtemperatur auf die tiefe Temperatur der supraleitenden Spulen des Fusions-Forschungsreaktors ITER zu übertragen, die bei 4,5 Kelvin (das entspricht $-268,5$ Grad Celsius) betrieben werden. Durch die Verwendung der Hochtemperatursupraleiter kann die benötigte Kälteleistung massiv verringert werden, wodurch die Effizienz künftiger Anlagen deutlich gesteigert wird. Die neu entwickelte Stromzuführung trägt weltweit den höchsten Strom, der bisher mit solchen Stromzuführungen übertragen werden konnte. Mittlerweile gibt es Pläne, die neuartigen Stromzuführungen in ITER, der im südfranzösischen Cadarache aufgebaut wird, zu verwenden.

Literatur

- [1] R. Heller, S. Fink, G. Friesinger, A. Kienzler, A. Lingor, G. Schleinkofer, M. Süsser, A. Ulbricht, F. Wüchner, G. Zahn, „Development of forced flow cooled current leads for fusion magnets“, *Cryogenics*, 41, 2001, pp 201-11
- [2] R. Heller, W.H. Fietz, R. Lietzow, V.L. Tanna, A. Vostner, R. Wesche, G. Zahn, „70 kA High Temperature Superconductor Current Lead Operation at 80 K“, *Proceedings of the 19th Intern. Conf. on Mag. Techn. (MT-19)*, Sept. 18-23, 2005, Genova, Italy, to appear in *IEEE Trans. Appl. Supercond.*