

Entwicklung von supraleitenden Magneten für die Fusion

W. H. Fietz, S. Fink, R. Heller, A. Nyilas, P. Komarek, G. Zahn, ITP

Einleitung

Die Entwicklung und Erprobung supraleitender Magnete für Fusionsanlagen hat im Forschungszentrum Karlsruhe schon seit über 25 Jahren einen hohen Stellenwert. Die Entwicklungen begannen mit einer Beteiligung am „Large Coil Task“ (LCT) im Rahmen eines IEA-Vertrags (IEA = International Energy Agency) in Paris. Ziel war die erstmalige Erprobung von 6 großen supraleitenden Toroidalfeld-Spulen in einer ringförmigen Anordnung (Torus). Das Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte zusammen mit der deutschen Industrie eine von sechs Spulen, die zusammen mit denen der anderen Partner (Japan, Schweiz, USA) im Oak Ridge National Laboratory, USA, getestet werden sollte. Um die Spule vor der Lieferung in die USA prüfen zu können, wurde im Forschungszentrum Karlsruhe die Testanordnung „TOSKA“ (TOroidale Spulentestanlage Karlsruhe) aufgebaut, die so konzipiert war, dass sie für das absehbare weitere EURATOM-Entwicklungsprogramm für Fusionsspulen ausgebaut werden konnte. Die in TOSKA durchgeführten Tests der LCT-Spule zeigten, dass die Spule die in sie gesetzten Erwartungen problemlos erfüllen konnte [1,2]. Daher wurde die LCT-Spule im Jahr 1984 in die USA versandt und dort gemeinsam mit den anderen Spulen getestet. Nach dem sehr erfolgreichen Abschluss wurde die LCT-Spule zurückgeholt und mechanisch verstärkt, um für künftige Experimente bei noch höheren Strömen und Feldern vorbereitet zu sein. Die LCT-

Spule konnte anschließend bei einer Temperatur von 1,8 Kelvin in TOSKA betrieben werden, wobei demonstriert wurde, dass mit dem auf der NbTi-Technologie basierenden Stromleiter ein Magnetfeld von 11 Tesla erreicht werden kann.

Parallel begannen die Entwurfsarbeiten für das große ITER-Projekt der Partner EURATOM, Japan, Russland und USA, mit dem die prinzipielle Machbarkeit eines Fusionskraftwerkes demonstriert werden soll. Ein großes Entwick-

lungsprojekt war hierbei der Bau und Test einer Toroidalfeld-Modellspule (TFMC), deren Entwurf auch auf den Erfahrungen des LCT-Tests beruhte. Hierdurch sollte die Verfügbarkeit der Magnet-Technologie für den Bau von ITER demonstriert werden. Die Möglichkeiten der TOSKA und die Verfügbarkeit der LCT-Spule für die Erzeugung eines Hintergrundfeldes führten zu der Entscheidung, die TOSKA für den Test der ITER-TFMC auszuwählen. Es wurde eine Anordnung gemäß Abb. 1 gewählt, mit

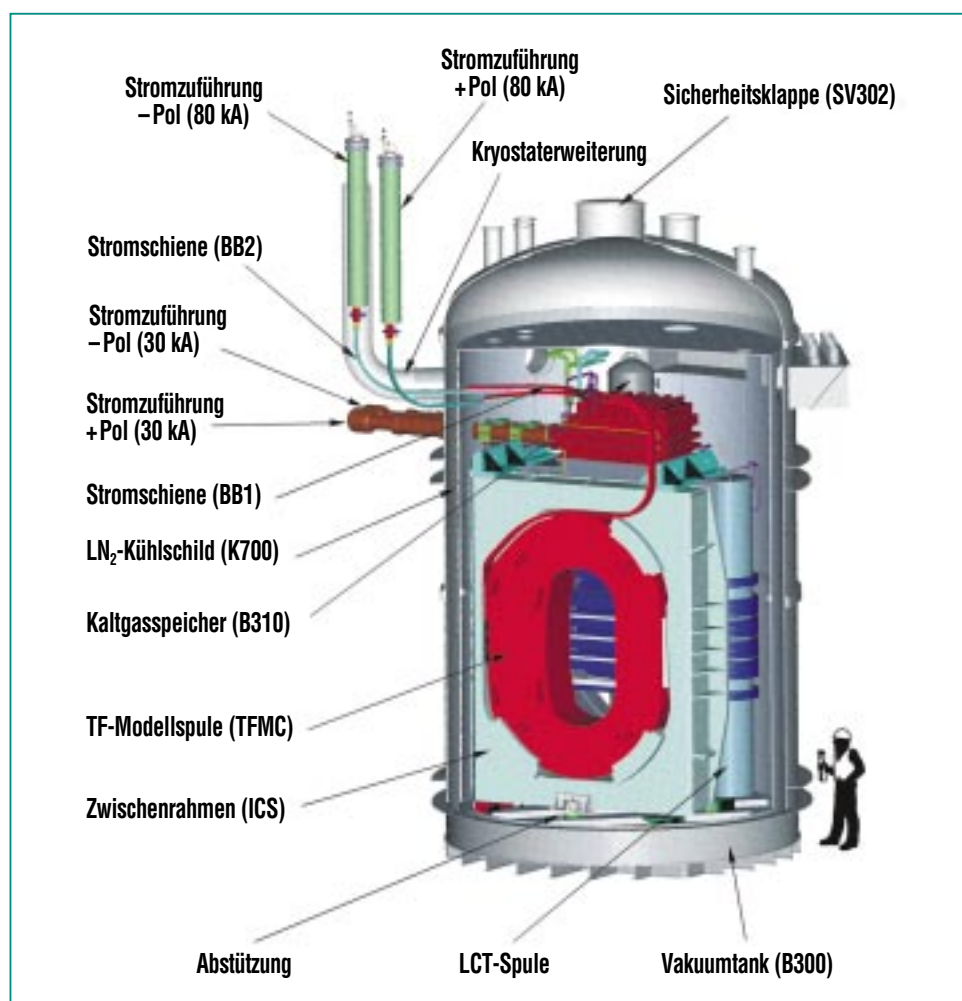


Abb. 1: Anordnung der beiden miteinander verbundenen Spulen TFMC und LCT im Vakuumtank der TOSKA-Anlage.

dem Ziel, eine ITER-typische Belastung der TFMC-Spule zu erzeugen. Die TFMC wurde in einen Zwischenrahmen eingesetzt, der in kraftschlüssiger Verbindung mit der LCT-Spule steht. Die LCT-Spule hatte hierbei die Aufgabe, während des Experiments das Feld einer Nachbarspule im Torusverband nachzubilden. Hierfür wurde die TOSKA-Anlage nochmals aufgerüstet. Eingesetzt wurde eine Grundversorgung mit He-Kälteleistung aus zwei Refrigeratoren (2 kW und 0,5 kW bei 4,4 K), kalte He-Pumpen für die Sekun-

därkreise zur Durchströmung der Spulen mit überkritischem Helium, Netzgeräte für 20 kA und 80 kA und Schnell-Entladungskreise mit Leistungsschaltern, um die in den Spulen gespeicherte Energie in externe Widerstände entladen zu können. Neu entwickelt werden mussten auch Stromzuführungen für den hohen Strom von 80 kA, die es ermöglichen, den Strom von Raumtemperatur nach 4.5 K zu führen, ohne eine zu hohe Wärmelast zu erzeugen, die die Kälteanlagen unzulässig belastet hätte.

Vor dem Einbau der TFMC konnte die TOSKA noch bei einem Test der supraleitenden Demospule für den Stellarator W7-X des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik ihre neue Funktionstüchtigkeit nachweisen. Dafür wurde bereits eine Testanordnung analog zu Abb. 1 verwendet, mit der W7-X-Spule anstatt der TFMC. Dieser Test diente gleichzeitig als Qualifizierung für die Freigabe der Serienfertigung der 50 nichtplanaren W7-X-Spulen [3].



Abb. 2: Die TFMC in ihrem Zwischenrahmen. Auf der rechten Seite ist gerade noch ein Teil der LCT Spule zu sehen.

Die TFMC

Die TFMC wurde im Rahmen einer EURATOM Task von dem europäischen Firmenkonsortium AGAN (ACCEL Instruments GmbH, Alstom Energie S.A., Ansaldo Superconduttori S.p.a., Babcock Noell Nuclear GmbH) gefertigt. Um die bei den geplanten hohen Strömen auftretenden enormen Kräfte aufzufangen, wurde bei dieser Spule der Leiter in Nuten von Stahlplatten elektrisch isoliert eingelegt. Fünf solcher Radialplatten wurden aufeinander gestapelt und die Supraleiter wurden seriell miteinander verbunden, so dass man ein Wicklungspaket erhielt. Das Wicklungspaket wurde in ein massives Stahlgehäuse eingefügt und stellt die eigentliche TFMC dar. Diese ovale Spule wurde dann in den Zwischenrahmen eingebaut, so dass sie mit der LCT Spule verbunden werden konnte (Abb. 2).

Da bei einem Supraleiter bei konstantem Strom kein elektrischer Widerstand auftritt, erwartet man bei supraleitenden Spulen keine

elektrische Spannung. Im Fehlerfall oder aber bei einer bewusst herbeigeführten Sicherheitsentladung muss aber die im Magnetfeld gespeicherte Energie schnell ausgekoppelt werden, um eine Überhitzung des Supraleiters zu vermeiden. Hierbei können Spannungen im Bereich einiger Kilovolt auftreten, die sicher beherrscht werden müssen. Für die TOSKA bedeutete dies, dass entsprechende Schaltanlagen aufgebaut werden mussten, um die Energien sicher aus den Spulen auskoppeln zu können (z.B. 86,4 MJ bei 80 kA in der TFMC). Für die TFMC waren zahlreiche aufwendige Maßnahmen zur elektrischen Isolation die Folge. Die Situation wird weiter dadurch kompliziert, dass bei schnellen Abschaltvorgängen nichtlineare Spannungsverteilungen auftreten

können, so dass die Verträglichkeit von geplanten Abschaltprozessen oder auch von Hochspannungsprüfungen durch Berechnung des transienten elektrischen Verhaltens der Spule abgeschätzt werden mussten. Aus diesem Grund werden im ITP umfangreiche Arbeiten zur Hochspannungstechnik durchgeführt.

Der Test der TFMC

Für den Test der TFMC waren zwei Testphasen vorgesehen. In Phase 1 wurde die Spule allein, d.h. ohne die LCT-Spule in den Kryostaten der TOSKA eingebaut und in sorgfältigen Experimenten geprüft. In Phase II wurde dann der Test der TFMC im Hintergrundfeld der LCT-Spule durchgeführt. Aufgrund der Platzbeschränkung geben wir in diesem

Artikel nur Details aus der kritischeren Testphase II wieder. Abb. 3 zeigt eine komprimierte Darstellung der zahlreichen Tests, die an dieser Spule in der Phase II durchgeführt wurden. Nach einer zweiwöchigen Abkühlphase wurden zunächst Lecktests und Hochspannungstests durchgeführt. Bei den Hochspannungstests zeigte sich wie bereits in Phase I eine deutlich niedrigere Spannungsfestigkeit gegenüber der Spezifikation. Eine Schwachstelle konnte lokalisiert werden, und zur Zeit wird mit AGAN geprüft, wie bei künftigen Spulen solche Schwachstellen sicher vermieden werden können. Da der Spannungszusammenbruch bei Vakuumumgebung erst ab 4 kV erfolgte, war der Hochstrombetrieb bis 80 kA sicher beherrschbar. Lediglich für

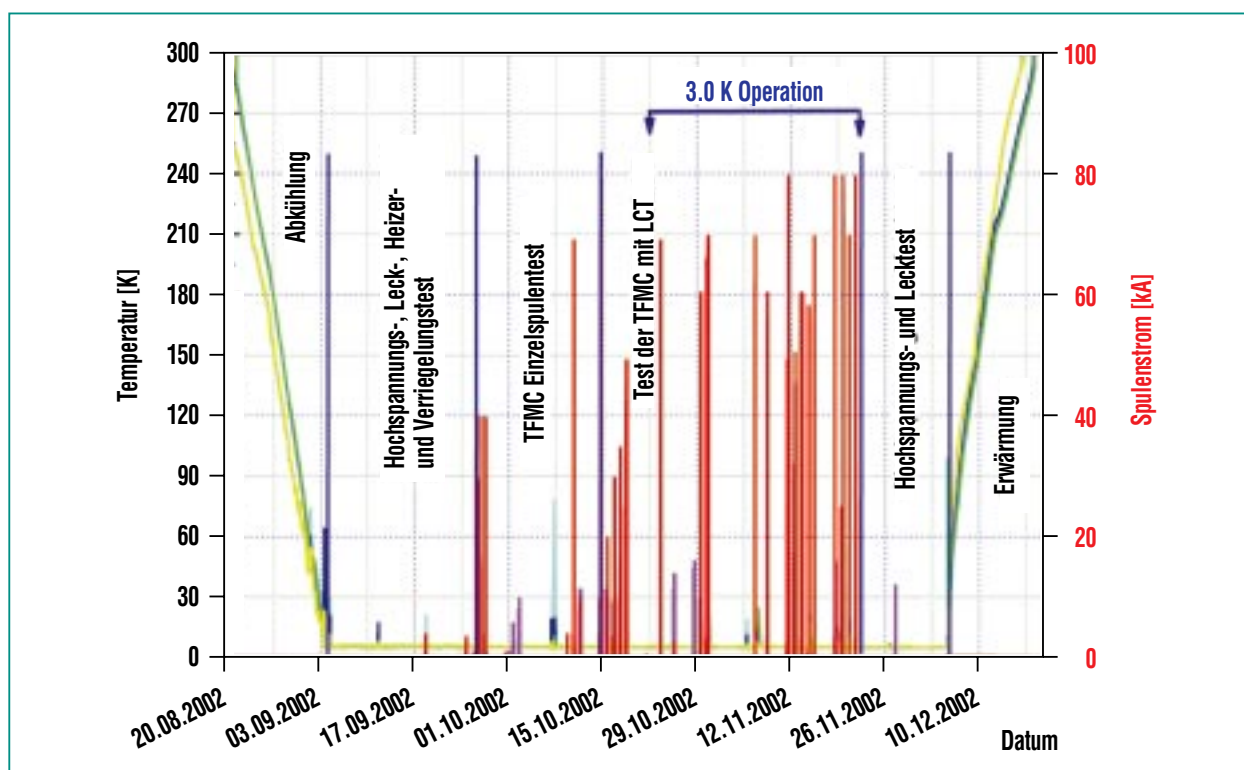


Abb. 3: Übersicht der Experimente an der TFMC in Phase II.

einen Test mit einer sog. Hochspannungsentladung war eine Reduzierung der Testparameter notwendig.

Der Betriebsstrom beider Spulen wurde in einzelnen Stufen schrittweise angehoben und bei jedem Schritt wurde in einer Sicherheitsentladung demonstriert, dass die Energie aus dem Spulenpaar innerhalb von wenigen Sekunden in den Entladewiderstand ausgekoppelt werden konnte.

Der Höhepunkt des Spulentestes war dann der gleichzeitige Betrieb der TFMC bei 80 kA und der Betrieb der LCT Spule bei 16 kA. Ein Strom von 80 kA in einer supraleitenden Magnetspule ist Weltrekord und in Phase II wurde dieser Strom sogar im Hintergrundfeld der LCT-Spule erreicht. Wie herausragend dieses Ergebnis ist, ist aus Abb. 4 ersichtlich. In diesem Bild findet man bei 68 kA und einem Feld von knapp 12 Tesla den geplanten Betriebspunkt für die ITER-TF-Spulen. Ein solch hohes Feld war im TFMC-

Test nicht möglich, weil die LCT-Spule nicht so weit belastet werden konnte. Auf der anderen Seite konnten durch den höheren Strom von 80 kA bei der Krafterwirkung auf den Leiter dieselben Bedingungen erreicht werden, wie sie später bei den ITER-TF-Spulen vorliegen werden. Damit

erschließt die TFMC weltweit einen neuen Horizont in der Technologie supraleitender Magnete.

Nachdem die Spule somit die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen konnte, wurde in weiteren detaillierten Untersuchungen die Eigenschaften in Hinblick auf Su-

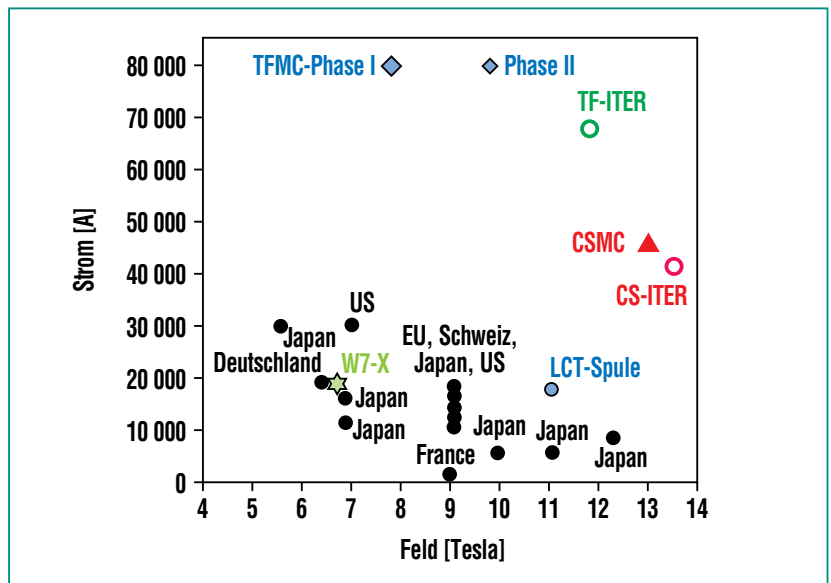


Abb. 4: Strom-Feld-Diagramm supraleitender Fusionsspulen. Neben der TFMC und der TF-ITER-Spule ist auch die Central-Solenoid-(CS)-ITER-Spule und die CS-Model-Coil (CSMC) gezeigt.

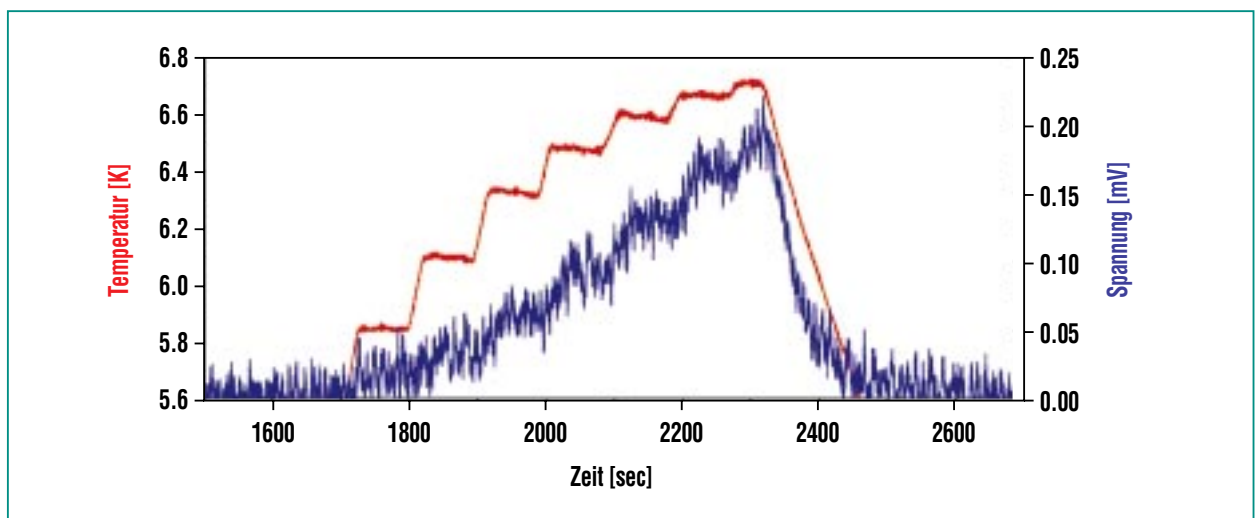


Abb. 5: Temperatur und Spannung während eines Heiz-Experiments an der TFMC-Spule bei einem Strom von 80 kA.

praleitung, Thermohydraulik, Mechanik und Hochspannung überprüft, so dass die experimentellen Befunde nunmehr mit den zuvor berechneten Werten verglichen werden können. Dieser Vergleich dient zur Validierung der Rechen-Modelle, mit deren Hilfe die noch größeren ITER-TF-Spulen geplant werden.

Besonders erwähnenswert bei diesen Experimenten ist die Überprüfung der tatsächlichen Leistungsgrenzen des verwendeten Supraleiters. Mittels eines der oben erwähnten Modelle wurde vorhergesagt, wie weit man den Supraleiter erwärmen kann, bis er seine Supraleitung bei einem vorgegebenen Strom verliert und elektrische Spannungen am Supraleiter auftreten. In Abb. 5 sieht man das Auftreten einer solchen elektrischen Spannung, während ein Strom von 80 kA durch den Supraleiter fließt. Ab einer Temperatur von etwa 5,7 K geht der Supraleiter allmählich in die Normalleitung über. Aus solchen Experimenten kann man Temperatur-Spannungscharakteristiken gewinnen, die eine eindeutige Aussage über die Qualität und Leistungsfähigkeit des Supraleiters geben. Diese Daten werden sodann mit den aus den Modellen erwarteten Werten verglichen.

In weiteren Tests wurden unter anderem die mechanischen Verformungen ermittelt, um die so gewonnenen Daten mit den berechneten Werten zu vergleichen. Obwohl noch nicht alle Daten ausgewertet sind, lässt sich schon heute sagen, dass die TFMC die in sie gesetzten Erwartungen mehr als erfüllt hat [4]. Durch dieses Experiment ist zu

erwarten, dass die ITER-TF-Spulen nach dem hier verwendeten Konstruktionsprinzip sicher zu bauen und zu betreiben sind.

Weitere Entwicklungen

Im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Betrieb künftiger Fusionskraftwerke ist die Reduktion von Verlusten besonders wichtig. Ein großes Einsparpotential ist hierbei bei den Stromzuführungen zu finden, mittels derer der Strom für die supraleitenden Spulen von Raumtemperatur zu tiefer Temperatur geführt wird. Unter Verwendung der mittlerweile kommerziell verfügbaren Hochtemperatursupraleiter (HTSL) kann man den Temperaturbereich von etwa 70 bis 4 K ohne Ohmsche Verluste überbrücken und somit einen Einsparfaktor von 4 bei der Kälteleistung erreichen. Das bedeutet, dass man bereits für das ITER-TF-Spulensystem eine elektrische Anschlussleistung von etwa 2,6 MW einsparen könnte. Im ITP wird daher zur Zeit eine 70-kA-HTSL-Stromdurchführung gebaut, die im ersten Halbjahr 2004 in TOSKA getestet werden wird.

Neben der Vorbereitung dieses Experimentes werden im ITP zahlreiche andere Aktivitäten durchgeführt, um die Entwicklung supraleitender Fusionsmagnete voran zu treiben. So wird die industrielle ITER-Leiter- und Strukturkomponentenfertigung durch Messungen bei tiefen Temperaturen unterstützt, indem an repräsentativen Probestücken und an Schweißnähten massiver Strukturwerkstoffe Untersuchungen durchgeführt werden. Somit können für den Bau von großen

supraleitenden Magneten mechanische Kenngrößen der Strukturmaterialien bereitgestellt werden, wie z.B. Daten zur mechanischen Festigkeit, Bruchzähigkeit, Rissausbreitung und Materialermüdung. Die hierfür entwickelten, äußerst präzisen Apparaturen werden während des Baus von ITER weiter genutzt werden, um das verwendete Material zu qualifizieren. In ähnlichen Apparaturen werden die zur Zeit von der europäischen Industrie neu entwickelten Supraleiter charakterisiert.

Die mittlerweile allgemein als sicher geltende positive Entscheidung über den Bau des ITER steht zwar noch aus, trotzdem werden im ITP zur Zeit zahlreiche EURATOM Tasks durchgeführt bzw. vorbereitet, um den Bau von ITER in den nächsten Jahren zu unterstützen. So werden die Hochspannungsbelastungen für die ITER-TF-Spulen berechnet, um damit Testprozeduren für diese Spulen vorzugeben. Gleichzeitig wird das ITP zusammen mit anderen europäischen Labors die Randbedingungen für einen Funktionstest des ITER-Spulensystems vor dem Einbau untersuchen und eine Optimierung des TF-Spulendesigns erarbeiten.

Eine nächste große Aufgabe für die TOSKA-Anlage könnte der Aufbau von Prototypen der ITER-Versorgungsleitungen für Strom und Helium sein, da sich aufgrund der vorhandenen Anlagen (80 kA Netzgerät und Kälteanlagen mit 2,5 kW Kälteleistung) ein Testaufbau im ITP anbietet. Über ein solch umfangreiches Experiment kann aber erst nach dem

Beschluss des Baus von ITER entschieden werden.

Generell gilt, dass die Erfahrungen und die Testeinrichtungen des Forschungszentrums für die europäische Industrie für die Übernahme von Fertigungsaufträgen für die ITER-Spulen unverzichtbar sind, da sie bei den Firmen nicht vorhanden sind.

Die jahrelange Expertise des ITP in Design, Bau, Test und Betrieb von supraleitenden Spulen wird

auch in Zukunft verwendet werden, um wertvolle Beiträge in diesem Bereich zu leisten. Hierdurch wird zunächst der Bau von ITER unterstützt werden. Eine langfristige Vision für die Fusionsmagnetetechnologie nach ITER ergibt sich aber aus den im ITP durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung von HTSL. Die Verbindung beider Forschungsbereiche wird langfristig zur Bereitstellung von HTSL-Fusionsmagneten und Stromzuführungen führen, die im

ITP gebaut und getestet werden können. Aufgrund der Energieeinsparung durch solche HTSL-Komponenten werden künftige Fusionskraftwerke effizienter, was die kommerzielle Markteinführung wesentlich erleichtern wird.

Literatur

- [1] W. Maurer,
Technik für die Kernfusion,
Kernforschungszentrum Karlsruhe,
S. 13, März 1985
- [2] D.S. Beard et al.,
„The IEA Large Coil Task“,
Fus. Eng. A. Design Volume 7,
Sept. 1988
- [3] R. Heller et al.,
„Abschlussbericht zum Test der
Wendelstein 7-X (W 7-X)
Demonstrationsspule in TOSKA“,
FZKA 6486, Juli 2000
- [4] A. Ulbricht et al.,
„Test results of the ITER toroidal
model coil experiment in the TOSKA
facility of the Forschungszentrum
Karlsruhe“, *Proc. 22nd SOFT,*
Helsinki, Finland, Sept. 9-13, 2002,
Fusion Engineering und Design. Des.
in print.