

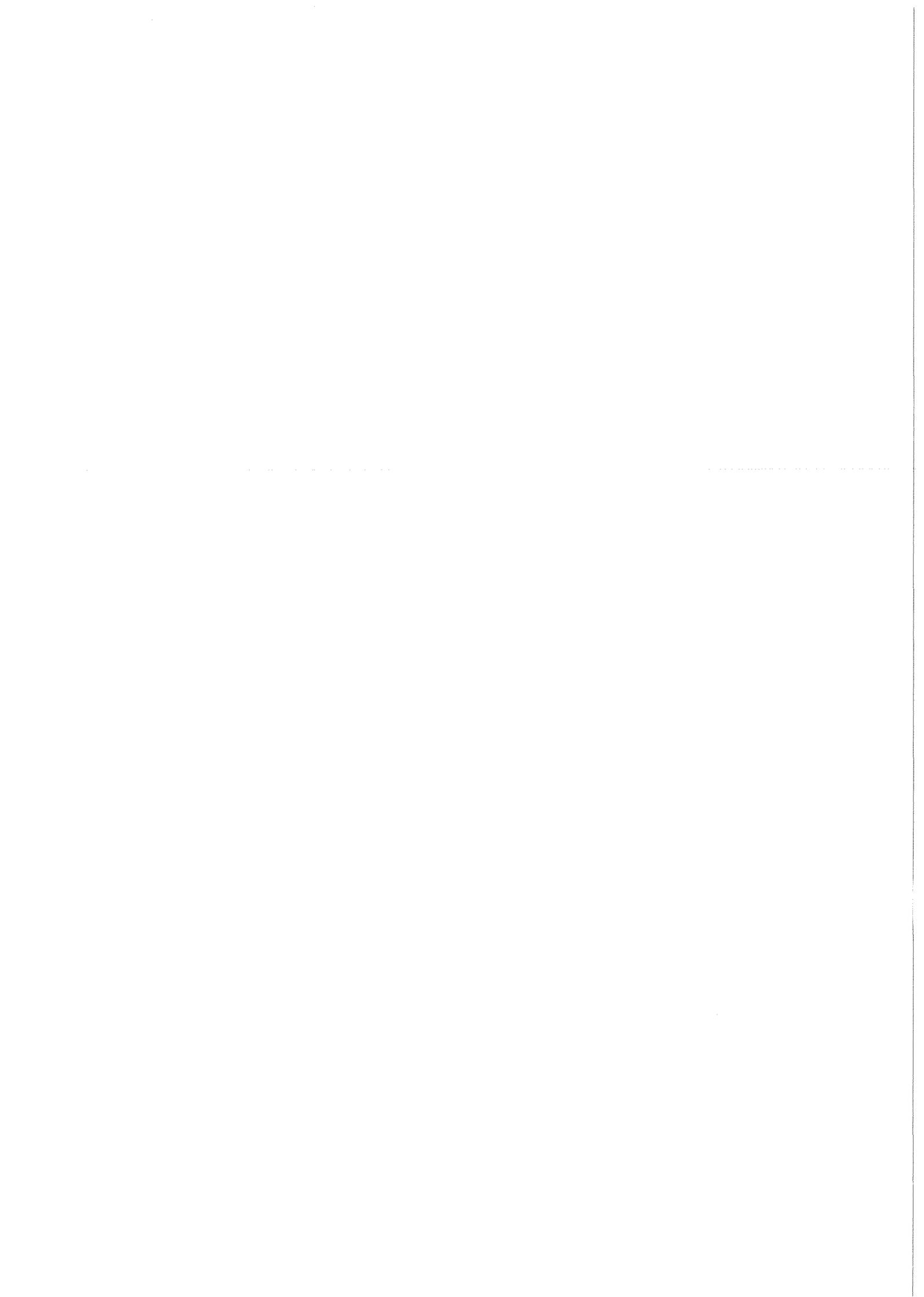
KfK 4277  
EUR 10536 d  
März 1987

# **Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1986**

**des Projekts Kernfusion**

**Jahresbericht der  
Assoziation KfK-Euratom**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Projekt Kernfusion - Projektleitung

KfK 4277  
EUR 10536 d

Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten  
des Projekts Kernfusion

Jahresbericht der Assoziation KfK-Euratom

zusammengestellt  
von  
G. Kast

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

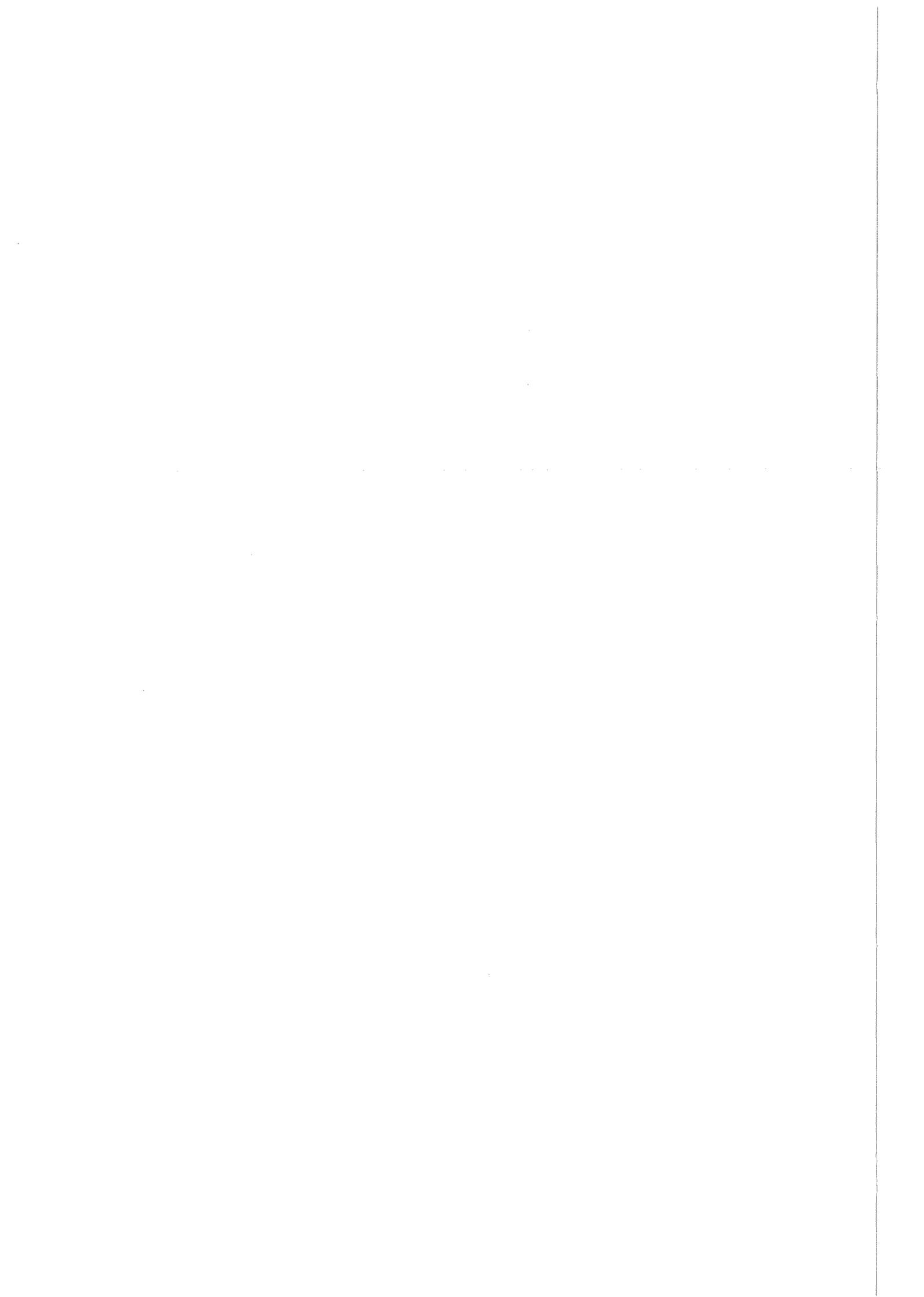
ISSN 0303-4003

## Vorwort

Das Kernforschungszentrum Karlsruhe und das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bilden die Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion. Die Partner arbeiten gemeinsam an dem Ziel, die physikalischen und technischen Voraussetzungen für die Nutzung der durch Kernfusion freigesetzten Energie zu schaffen und zukünftige Großexperimente zu planen und durchzuführen.

Die Arbeiten des Kernforschungszentrums Karlsruhe zur Fusion mit magnetischem Einschluß sind im Projekt Kernfusion zusammengefaßt und sind Teil des Europäischen Fusionstechnologieprogramms. Die Arbeiten werden über einen Assoziationsvertrag zwischen KfK und Euratom durch die Europäische Kommission gefördert. Mit ergänzenden KfK-Beiträgen, zumeist Studien, werden Verbindungen zwischen den Arbeitsgebieten geschaffen und neue Aufgaben vorbereitet. Dies geschieht im Hinblick auf die in den kommenden Jahren zu erwartende Erweiterung des Technologieprogramms und die Planungstätigkeiten für NET.

Die hier zusammengefaßten Berichte sind Beiträge der KfK-Institute im Jahr 1986. Im Anhang befindet sich eine Zusammenstellung der Aufgaben, die KfK aus dem Fusionstechnologieprogramm der Europäischen Gemeinschaft übernommen hat. Hinweise auf die Beteiligung der Institute mögen die Zuordnung zu den Textbeiträgen erleichtern.



# Arbeitsschwerpunkt 03 Projekt Kernfusion (PKF)

## Arbeitsthema 03.01 Entwurfsstudien zu Fusionsreaktoren

### Vorhaben 03.01.01 Studien für NET/INTOR

#### Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

##### Strukturmechanische Studien zur Umformung von Supraleiterkabeln

Für vereinfachte zwei- und dreischichtige Balkenmodelle für unsymmetrisch verstärkte Supraleiter wurden analytische Formeln für die Lage der neutralen Faser unter elastischer und plastischer Biegung angegeben. Mit ihnen ist es möglich, die Minimierung der Randfaserdehnungen der supraleitenden Schicht bei hinzutretender Zugbelastung, wie sie beim Wickeln von Spulen vorkommt, quantitativ aus der Asymmetrie der Armierung abzuleiten.

Mit dieser in Zusammenarbeit mit dem ITP durchgeführten Studie wurden die Beiträge des IMF IV zu strukturmechanischen Problemen von Supraleitern abgeschlossen.

##### Lebensdaueranalyse der Ersten Wand

Die NET-Studie "Stress and Lifetime Calculations" wurde abgeschlossen. Sie befaßte sich mit der Lebensdauervorhersage für die erste Wand eines Fusionsreaktors unter dem Gesichtspunkt des Ermüdungsrißwachstums aufgrund des periodischen Reaktorbetriebs. Ziel der Untersuchungen war es, die allgemeine Vorgehensweise zu demonstrieren und den Einfluß der Bestrahlungseffekte wie Schwellen und strahlungsinduziertes Kriechen aufzuzeigen.

Die Analyse umfaßt die folgenden Schritte:

- Ermittlung der zeitabhängigen Temperaturverteilung in der Wand mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) während eines Zyklus.
- Bestimmung der elastischen thermischen Spannungen mit der FEM. Diese Spannungen verursachen, da sie ebenfalls zyklisch auftreten, das Ermüdungsrißwachstum.
- Der Einfluß der Mittelspannung und deren zeitliche Entwicklung infolge Schwellen und strahlungsinduziertem Kriechen konnte semianalytisch erfaßt werden.
- Die Berechnung gewichtet gemittelter Spannungsintensitätsfaktoren erfolgte für halbelliptische Oberflächenrisse an verschiedenen kritischen Stellen der Struktur.
- Rißwachstumsrechnungen für verschiedene Anfangsrißgeometrien wurden unter Anwendung einer modifizierten Forman-Gleichung durchgeführt.

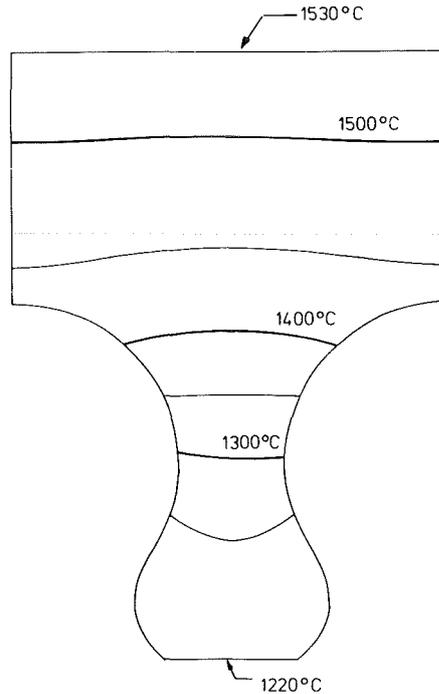


Abb. 16 Temperaturverteilung in einem Schutzstein für die Erste Wand

Erste Temperatur- und Spannungsberechnungen für Keramiksteine zum Schutz der ersten Wand wurden mit der FEM durchgeführt. Abb. 16 zeigt die stationäre Temperaturverteilung für eine Oberflächenbelastung von 40 W/cm<sup>2</sup> und eine mittlere innere Wärmeproduktion von ca. 10 W/cm<sup>3</sup> im Graphitstein.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
20464	03.01.01P47A	Dr. E. Diegele
22174	03.01.01P48A	Dr. T. Fett
22826		Prof. Dr. D. Munz
		Dr. H. Stamm
		Dr. H. Zehlein

## Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

Die im Rahmen eines NET-Vertrages durchgeführten Untersuchungen zum Evakuierungsverhalten der Plasmakammer wurden auf weitere Parameterkombinationen ausgedehnt. Die Ergebnisse zeigen, daß mit der bisher spezifizierten Kapazität der Vakuumpumpen und einer gut zugänglichen Pumpenanordnung die für den Start der Anlage spezifizierten Gasdrücke in allen Bereichen der Vakuumkammer in akzeptabler Zeit erreicht werden. Das offene und das geschlossene Blanketkonzept unterscheiden sich in ihrem Evakuierungsverhalten nicht wesentlich voneinander. Die verfügbare Datenbasis für Materialausgasraten deckt die komplexen Anforderungen einer Fusions-Vakuumkammer nur ungenügend ab. Die Ergebnisse müssen deshalb als erste Abschätzungen verstanden werden. Da die Einbauten (Blanketeinschübe usw.) die Gasströmung in der Vakuumkammer behindern, sind auch nach einer Evakuierungszeit von 4 Tagen noch Druckdifferenzen bis zu 2 Größenordnungen vorhanden.

Für weitergehende Untersuchungen zum Evakuierungsverhalten wurde ein zweiter NET-Vertrag abgeschlossen. Dieser Vertrag sieht u.a. die Simulation des Vakuumverhaltens während der "dwell-time" (Zeit zwischen zwei Brennvorgängen) unter Berücksichtigung einer Graphitauskleidung der Vakuumkammer und detailliertere Untersuchungen zur Leitfähigkeit des Exhaustkanals vor. Es gilt, eine optimale Geometrie für den Kanal zu finden, die sowohl den Anforderungen der Heliumabfuhr während der Brennzeit (untersucht im Culham-Laboratory, England) als auch den Anforderungen während der "dwell-time" gerecht wird. Für die effektive Heliumabfuhr ist eine Einschnürung des Eintrittsquerschnittes erforderlich, um die Wirkung des während der Brennzeit vorhandenen gerichteten Teilchenflusses zu nutzen. Diese Einschnürung behindert andererseits den Abfluß der Neutralteilchen während der "dwell-time". Die Abb. 8 zeigt diesen Einfluß.

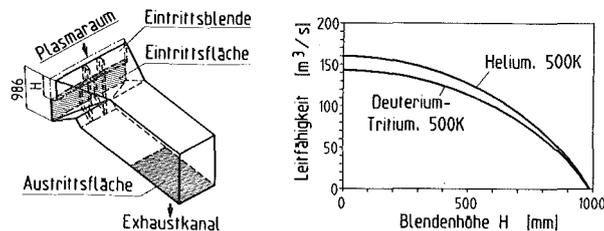


Abb. 8: Reduktion der Leitfähigkeit des Divertorkanals durch eine Eintrittsblende

Veröffent-  
lichungen:

V 23355

Primär-  
berichte:

03.01.01P33A

Beteiligte  
Mitarbeiter:

R.A. Müller  
F. Engelhardt

## Institut für Technische Physik (ITP)

Die Arbeiten dieses Vorhabens betreffen Studien für das NET-Team. Die jeweiligen Themen werden mit dem NET-Team abgesprochen. Im Berichtsjahr betrafen davon das ITP Entwurfsstudien für das Toroidalfeld-Spulensystem, Verfügbarkeitsanalysen von TESPE und LCT, Vorplanung der NET-Modellspulentests (TOSKA-Upgrade) und eine Kühllalternative mit HeII-Strömung für das INTOR-Spulensystem (22621). Die Arbeiten zu LCT, TESPE und TOSKA-Upgrade sind in das Vorhaben 03.03.02 integriert und dort beschrieben, die zur HeII-Strömung in 03.03.04.

Bei der Entwurfsstudie für das Toroidalfeld-Spulensystem wurden im Berichtszeitraum die mechanischen FEM-Spannungsanalysen an Supraleiter und zentraler Gewölbestruktur vervollständigt und abgeschlossen (20464). Die Berechnungsgrundlagen für die Wechselfeldverluste im Supraleiter wurden erarbeitet und die wesentlichen Verlustbeiträge identifiziert. Ein erster Entwurf einer Stromzuführung für 16 kA und 20 kV wurde erstellt.

Zur Analyse der hohen Belastung im Bereich der zentralen Gewölbestruktur wurden Berechnungen in 3 Schritten durchgeführt. Mit Hilfe eines FEM-Modells des Leiterquerschnitts wurden zunächst die elastischen Eigenschaften des Wicklungspakets ermittelt. Mit diesen Daten und einem FEM-Modell des zentralen Gewölbequerschnitts wurde eine globale Spannungsverteilung im Wicklungspaket bestimmt und dessen Geometrie optimiert. Mit den resultierenden maximalen globalen Spannungen, angewandt auf das FEM-Modell des Leiterquerschnitts, wurden die lokalen Spannungen berechnet, deren Kenntnis zur Beurteilung des Leiter- und Spulendesigns notwendig ist.

Die Optimierung des Spulenquerschnitts im Hinblick auf möglichst geringe toroidale Spannungsbelastung und geringe Scherspannungen führte zu einer Spulengeometrie mit höchstmöglicher radialer Dicke des Stahlgehäuses im Bereich des zentralen Gewölbes und mit maximaler Abmessung des Wicklungspakets in toroidaler Richtung. Dieser Entwurf vermeidet höhere Scherspannungen im Supraleiter als die zugelassenen 30 MPa (entsprechend 20 MPa globaler Scherspannung im Wicklungspaket). Die Untersuchung der statischen Reibungsfaktoren zwischen Wicklungspaket und Stahlgehäuse zeigte ein vermutlich unvermeidbares Gleiten im Bereich der toroidalen Wand bei Auferregung des Magneten. Während sich hierdurch die Scherspannungen im Wicklungspaket nicht verändern, erhöht sich die maximale toroidale Spannung um beträchtliche 14%.

Für die lokale Spannungsverteilung im Supraleiter sind drei wesentliche Bereiche zu unterscheiden: der supraleitende Kern, die Kupferprofile des Stabilisators und die Ecken der Stahlhülle. Im supraleitenden Kern tritt eine mittlere Dehnung von 0,16% auf, die tragbar erscheint, wenn auch die transversale Belastbarkeit von Nb<sub>3</sub>Sn erst noch experimentell ermittelt werden muß. Im Stabilisator-Kupfer wird lokal -250 MPa erreicht, die von dem durch den Roebel-Prozeß stark verformten Kupfer aufgenommen werden können.

Methoden und Formeln zur Berechnung der verschiedenen Wechselfeldverlustkomponenten wurden erarbeitet. Die Verluste im TF-Supraleiter werden deutlich von den induzierten Kopplungsströmen dominiert, die im supraleitenden Kern von einer Ader des Kabels zur anderen fließen. Der Parameter "effektiver Querwiderstand" bleibt jedoch der Rechnung unzugänglich, so daß für die Bestimmung der absoluten Größe der Verluste seine experimentelle Ermittlung nicht zu umgehen ist.

Für einen ersten Entwurf einer Stromzuführung für die TF-Spulen (16kA, 20 kV) wurde eine Optimierungsrechnung durchgeführt, um den günstigsten Querschnitt und das günstigste Material zu erhalten. Es wird Kupfer mit einem Restwiderstandsverhältnis von 4 und einem Querschnitt von 50 cm<sup>2</sup> vorgeschlagen. Der Entwurf ist noch hinsichtlich Hochspannungsfestigkeit, Vakuumtechnik und Kryotechnik zu ergänzen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
20464	03.01.01/46 A	B.Becker
22621	03.01.01/46/B	Dr.A. Hofmann
	03.01.01/46C	Dr. U. Jeske
		<u>Dr. K-P. Jüngst</u>
		DI W. Lehmann
		DI. J. Lühning
		Dr. W.Maurer
		A.Vogt

### Institut für Kernphysik (IK)

Der von diesem Institut vorgesehene Beitrag wurde im Berichtsjahr nicht bearbeitet.

### Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

Die Arbeiten zu diesem Vorhaben betreffen Studien zu den Themen Maintenance, Remote Handling und Anlagenplanung für das NET-Team in Garching, die als NET-Verträge bzw. im Rahmen des Delegationsvertrages eines Ingenieurs zum NET Team bearbeitet wurden.

Zu Beginn des Berichtszeitraums wurde der NET Statusreport, EU-FU/XII-80/86/51, veröffentlicht. Er enthält Richtlinien für die Vorentwurfsphase von NET. Das darin festgelegte Maintenancekonzept basiert auf Maintenanceuntersuchungen für eine Single Null und Double Null-Divertorkonfiguration.

Die Maintenanceaufgaben "Background Studies, Mechanical Components Assembly, Handling Equipment for In-Vessel Components and Devices for Inspection and Failure Detection" wurden als Technologieverträge an die assoziierten Laboratorien vergeben. Mit den Arbeiten wurde begonnen. In zwei Workshops zum Thema "Handling Equipment for In-Vessel Components" wurden die von den Laboratorien untersuchten Konzepte für eine In-Vessel Handling Unit (IVHU) diskutiert und 3 davon ausgewählt, die nun detaillierter untersucht werden; von Karlsruhe eine IVHU mit einem Gelenkarm als Trägersystem.

Maintenanceuntersuchungen und Anlagenplanung wurden auch im Rahmen von NET-Verträgen mit Laboratorien und Industriepartnern fortgeführt bzw. begonnen. Von KfK wurden Segmentierung und Kühlmittelversorgung verschiedener Blanketkonzepte auf ihre Durchführbarkeit untersucht. Zum Verbinden bzw. Trennen von Vakuumkomponenten durch Lippenschweißen und -trennen wurde eine Studie erstellt, in der vorhandene Systeme verglichen werden und ein eigenes KfK-Konzept vorgestellt wird. Der Abschlußbericht befindet sich in Vorbereitung. Die Studie "Pipe and Vacuum Duct Connection" wurde fertiggestellt, der Abschlußbericht veröffentlicht. Das Ergebnis der Studie ist Basis des Technologievertrages "Background Studies/Pipe Connections".

Als Verträge mit NET werden von CEA, GRADEL S.A. und dem Canadian Fusion Fuel Technology Project (CFFTP) Untersuchungen zum vertikalen Ein- und Ausbau von Blanketsegmenten, zum Austausch horizontal angeordneter Divertorkassetten und zur In-Vessel Handling Unit durchgeführt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		B. Haferkamp
		W. Link
		<u>A. Suppan</u>
		K. Trautwein

## Vorhaben 03.01.02 Alternative Konzepte

### Institut für Technische Physik (ITP)

Studien, die nicht unmittelbar NET-gebunden sind, sollen eine zusätzliche Bewertung der KfK-eigenen Entwicklungsarbeiten ermöglichen. Sie dienen auch der Vorplanung größerer Experimentiereinrichtungen für die Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion (IPP und KfK). So wird gegenwärtig mit dem IPP das Reaktorpotential des Stellaratoreinschlusses näher studiert. Auf den Ergebnissen aufbauend, werden nun Vorentwürfe zum geplanten IPP-Experiment W7X erstellt (Magnetsysteme mit Struktur, Zerlegbarkeit). Darüber hinaus wird das generell erforderliche Rüstzeug an Berechnungsverfahren und numerischer Methoden erweitert und verbessert.

#### 1. Reaktorpotential des modularen Stellarators

Im Rahmen der Entwicklungsgemeinschaft zwischen IPP Garching und KfK wurden Untersuchungen über die Reaktoreignung eines Stellarators mit modularem Spulenaufbau durchgeführt. Dritter Partner bei den Untersuchungen war Fusion Power Associates (FPA), Madison, USA.

Das IPP untersuchte allgemeine Fragen der Plasma- und Magnetkonfiguration, sowie zusammen mit FPA Fragen der Verunreinigungskontrolle. Nach Erarbeitung einer Referenzkonfiguration "ASRA6C", wurden an dieser spezielle Probleme untersucht.

Verschiedene Optionen für die Verunreinigungskontrolle wurden diskutiert: Divertor, Limiter (pumped oder vented), RF-Verunreinigungskontrolle. Vorgeschlagen wurde die "vented limiter" Version. KfK untersuchte dazu die Positionierung der Limiterplatten.

Untersucht wurden auch verschiedene Supraleiterkonzepte für die Spulen des Stellaratorreaktors. Die Besonderheit dieser Spulen besteht darin, daß der Leiter simultan in zwei Ebenen gebogen werden muß, so daß höchstzulässige Dehnungen in zwei Richtungen den Leiterquerschnitt beschränken. Der Querschnitt und damit der Betriebsstrom müssen relativ klein gewählt werden. Dies wiederum führt zu hohen Windungszahlen und Induktivitäten mit daraus resultierenden hohen Lade- und Entladespannungen. Nukleare Beschränkungen, d.h. Strahlenschädigung und Wärmeerzeugung, haben dieselben Konsequenzen wie in anderen Reaktorkonfigurationen. Vorgeschlagen für einen modularen Stellaratorreaktor wurde ein Bündelleiter, da dieser bezüglich der höchstzulässigen Dehnungen Vorteile gegenüber anderen Konzepten verspricht (V22841).

FPA bearbeitete schwerpunktmäßig die Auslegung des Blankets, des Reflektors und die Abschirmung der Magnete. Mehrere Blanketoptionen wurden miteinander verglichen. Zwei Blanketvarianten wurden detaillierter untersucht: ein dünnes Blanket (0.2 m Dicke), das nicht in toroidaler Richtung in der radialen Dicke variiert, und ein toroidal dickevariantes Blanket. Für das Konzept des dünnen Blankets konnte eine ausreichende Abschirmung für die Magnete gefunden werden,

insbesondere an unvermeidlichen Schwachstellen in der Abschirmung durch Öffnungen, z.B. Pumpstutzen oder Neutralteilcheninjektoren. KfK bearbeitete die ingenieurmäßige Gesamtauslegung des Reaktors, die Integration der benötigten Komponenten, sowie Handhabungs- und Wartungsfragen. Die spezielle Aufgabenstellung einer demontierbaren kalten Abstützung zwischen den Magneten an Trennstellen wurde konstruktiv gelöst. Die Gesamtauslegung des modularen Stellaratorreaktors ASRA6C ist damit abgeschlossen (V22842). Die Formulierung des Abschlußberichtes ist im Gange.

#### 2. Leiterentwürfe für W7X

Für das Nachfolgeexperiment von W7AS wurden verschiedene Supraleiterentwürfe zusammen mit IPP und der Industrie diskutiert. Aufgrund der Feldanforderungen ( $B_{\max} < 8$  T) ist ein NbTi-Leiter möglich. Die verschiedenen Konzepte sind: ein Leiter mit ähnlicher Kühlung wie beim Poloidalfeldspulenprojekt (Vorhaben 03.03.02), ein Bündelleiter, ein Innenrohrleiter und ein Al-umpreßter Leiter. Da die Frage der Pulsfeldbelastung noch nicht geklärt ist, war eine Entscheidung zugunsten eines weiter zu verfolgenden Referenzkonzeptes noch nicht möglich. Vergleichende Untersuchungen bzgl. Kraftbelastung, Stabilität, Kühlbarkeit und Wickeltechnik sind im Gange.

#### 3. Magnetberechnungsprogramme sowie Auslegungsrechnungen

Für die Nutzung von Magnetberechnungsprogrammen wurden folgende Erweiterungen vorgenommen:

- Nutzung des Programmes NETZ. Dieses Programm ist in Garching installiert und kann nun über das EARN Netz genutzt werden. Es ist anwendbar für gekoppelte, elektromagnetische Netzwerke. Beispiele für die Anwendung sind TESPE-S- POLO, LCT (Vorhaben 03.03.02).
- Erweiterung des Programmes SIMPLO zur Darstellung von Meßdaten in verschiedenen Diagrammen bzgl. Schrifttypen, Skalenbeschriftung.
- Entwicklung eines speziellen Interpolationsprogrammes für Temperaturmessungen.
- Weiterentwicklung von Plotprogrammen.
- Umstrukturierung von EFFI zur Feldberechnung von Spiralen; Fehlerverbesserungen.
- Erstellung eines interaktiven Grafikprogrammes zur Erstellung von Höhenlinien und Feldplots mit HEDO.

Wesentlicher Einsatz für die Programme waren begleitende Berechnungen zu den LCT-Experimenten (Vorhaben 03.03.02, Kap. 1) und zur Definition von TOSKA-Upgrade (Vorhaben 03.03.02, Kap. 4). Auslegungs- und Berechnungsarbeiten mit den verbesserten Programmen wurden darüber hinaus für die NET-Spulen (Vorhaben 03.01.01) und POLO (Vorhaben 03.03.02, Kap. 2), aber auch für kleinere Laborspulen durchgeführt.

Ferner wurde eine zweite Version des Magnetsystems für ein 150 GHz Gyrotron (Vorhaben 03.04.02) ausgelegt. Hierbei wurden die experimentellen Erfahrungen mit dem ersten Magnetsystem berücksichtigt.

### Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

#### Entwurfsstudien zum Reaktorpotential eines Stellerators mit modularen Spulen bis zum Stadium einer Referenzkonfiguration zusammen mit dem IPP Garching.

Mit der Konfiguration ASRA 6C steht ein Referenzentwurf zur Verfügung, nach dem die 1. Wand und das Blanket konkretisiert und die Zusatzaggregate, wie Vakuumschlüsse, Neutralteilchen-Injektoren, Limiter usw. entworfen werden können.

Alle beteiligten Institutionen, wie ITP, IPP-Garching und die University of Wisconsin, Madison, USA, erstellen zum Jahresende einen gemeinsamen Abschlußbericht, der im Frühjahr 1987 fertiggestellt sein wird.

Das Projekt wird mit der Erstellung des Abschlußberichtes abgeschlossen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V22841 V22842	03.01.02/17A	F. Becker <u>Dr. J. Erb</u> (bis 30.6.) DI K. Jentzsch DI W. Lehmann DI J. Lühning <u>Dr. W. Maurer</u> A. Vogt  H-IT: DI G. Böhme DI J. Hübner

### Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

Der von diesem Institut vorgesehene Beitrag wurde im Berichtsjahr nicht bearbeitet.

### Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

Zu diesem Vorhaben wurden im Berichtsjahr vom Institut keine Beiträge geleistet.

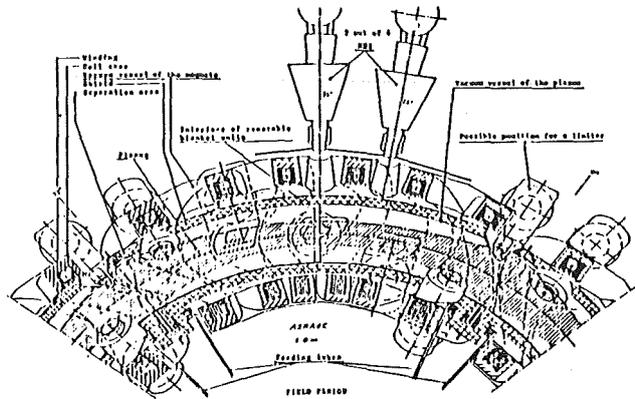


Abb. Field Period

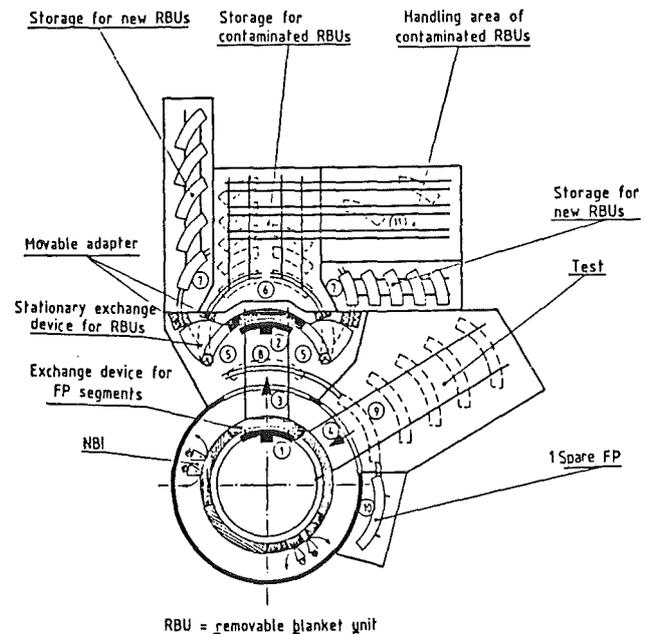


Abb. Exchange the Segments

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23747	03.01.02 P 15A 03.01.02 P 15B	J. Hübener

# Arbeitsthema

## 03.02 Materialentwicklung

### Vorhaben 03.02.01 Untersuchung nichtmetallischer Fusionsreaktorwerkstoffe

Institut für Material- und Festkörperforschung  
(IMF)

#### Eigenschaftsmessungen und Reaktorbestrahlungsversuche

Mit Materialproben aus den EG-Vorhaben MAT 6 (Keramische Werkstoffe zum Schutz der Ersten Wand, hier verschiedene SiC-Qualitäten) und MAT 13 (Keramische Werkstoffe für Isolatoren und Fenster, hier in erster Linie verschiedene Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Qualitäten, aber auch AlN) wurden 1986 Bestrahlungsversuche in den Reaktoren OSIRIS (Saclay) und HFR (Petten) begonnen- beide gemeinsam mit CEA- sowie auch an der Spallationsneutronenquelle LAMPF (Los Alamos) gemeinsam mit KFA Jülich. Weitere Versuche in den Reaktoren HFR und PHENIX (Marcoule) werden vorbereitet. Der gesamte eingesetzte bzw. bereitgestellte Probenbestand enthält etwa 1000 Einzelproben von KfK (Tabelle).

An allen Materialarten wurden thermischen Leitfähigkeit, E-Modul, Biegebruchfestigkeit und soweit möglich auch der Thermoschockwiderstand gemessen. Entsprechende Meßanordnungen für die Nachbestrahlungsuntersuchung in den Heißen Zellen wurden vorbereitet. Neu gelieferte Materialien wurden auch durch chemische Analysen charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, daß an polykristallinem Aluminiumoxid die Lösung von Verunreinigungen im Wirtsgitter zu niedrigeren Wärmeleitfähigkeitswerten führt, als wenn diese Verunreinigungen als zweite Phase vorliegen. Ferner wurde die Wärmeleitfähigkeit von Saphir senkrecht zur optischen Achse des Einkristalls gemessen. Es ergeben sich für die Beziehung

$$\lambda = (a + bT)^{-1}, \quad 300 < T < 900 \text{ K}$$

die nachstehenden Koeffizienten:

	a [W/cmK] <sup>-1</sup>	b [W/cm] <sup>-1</sup>	Verunreinigungen
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Degussit)	-0.162	0.0106	2. Phase
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Biokeramik)	0.268	0.0103	gelöst im Gitter
Einkristall	0.274	0.00981	

Die Thermoschockbeständigkeit von Tabletten aus SiC, AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Einkristall wurde im Aufheizversuch bestimmt. Die Tabletten wurden mit oder ohne stirnseitige Isolierung in ein Zinnbad vorgegebener Temperatur (maximal 975 °C) getaucht, und es wurde die Temperaturdifferenz bestimmt, bei der erstmals Risse auftraten (kritische Temperaturdifferenz). Die Ergebnisse sind in der Abb. 17 dargestellt, wobei die schraffierten Balken die Ergebnisse mit isolierten Proben

IMFI Participation in Irradiation Experiments on SiC and Ceramic Insulators

Facility	Start	Duration	Fast Neutron Fluence [10 <sup>22</sup> n cm <sup>-2</sup> ]	Quantity of Samples Bend Strength (B) Phys. Prop. (P) Dielectr. Prop. (E)	Partners
HFR Petten	1/86	1 month	0.02	11 P, 16 E	-
OSIRIS (Saclay)	4/86	1 year	1	16 B, 25 P	F
HFR (Petten)	7/86	1 year	1 (SiC: 1200 °C)	156 B, 108 P, 14 E	F, E, GB
LAMPF (Los Alamos)	7/86	some months (till end of 87 due to breaks)	~ 1 dpa	60 B, 53 P, 15 E	USA, D-KFA
PHENIX (Marcoule)	ca. 1/87	1/2 year	3	84 B, 103 P	F
HFR (Petten)	ca. 1V/87	1/3 year	0.3 (SiC: 1500 °C)	ca. 104 B, 90 P	F, D-KFA

wiedergeben. Als Material mit der höchsten Thermoschockbeständigkeit erwies sich das SiC, das unter den gegebenen Versuchsbedingungen in keinem Fall Rißbildung zeigte. Im Hinblick auf die voraussichtlich sehr hohen Betriebstemperaturen für SiC-Kacheln an der Ersten Wand (≥ 1500 °C) wurden auch Laboruntersuchungen über das Verdampfungsverhalten von SiC und seine chemische Verträglichkeit mit metallischen Trägermaterialien aufgenommen.

Die Messung des dielektrischen Verhaltens von Isolatormaterialien wurde auf drei Frequenzbereiche ausgerichtet. Der verwendete Probensatz wurde um weitere kommerziell erhältliche Qualitäten ergänzt. Für den Frequenzbereich von 10 - 1000 kHz wurde eine Meßkammer für temperaturabhängige

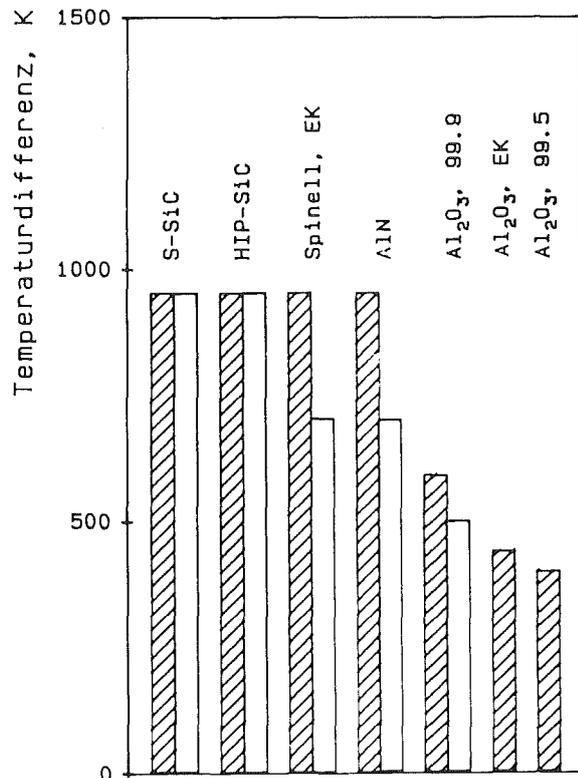


Abb. 17 Ergebnisse der Thermoschockversuche.

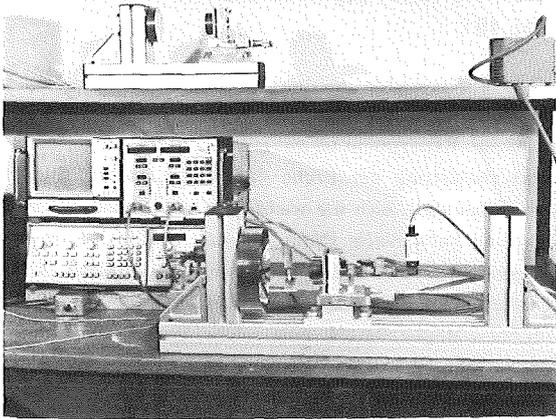


Abb. 18 Fabry-Perot Resonator zur Bestimmung der dielektrischen Materialdaten zwischen 30 und 40 GHz.

Messungen aufgebaut. Für 70 MHz wurde ein modifiziertes Q-Meter erprobt und in Auftrag gegeben. An einem Mikrowellenresonator für 30-40 GHz (Abb.18) wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe Meßserien an dem gesamten Probensatz durchgeführt. Für  $Al_2O_3$  ist eine eindeutige Aufschlüsselung der Materialunterschiede bei Werte des Verlust-Tangens unterhalb von  $10^{-3}$  noch nicht möglich. AlN-Sorten zweier Hersteller unterschieden sich um einen Faktor 3.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23050	03.02.01P43A 03.02.01P43B	Dr. Ch. Adelhelm M. Blumhofer Ing. J. Burbach <u>Prof. Dr. W. Dienst</u> G. Gausmann G. Haase Dr. R. Heidinger Dr. B. Schulz Dr. H. Zimmermann

Keramische Schichten und mehrphasige Materialien für die Erste Wand

Es wurde eine Literaturrecherche über Untersuchungen zu keramischen Schichten auf metallischen Substraten als Schutz für die Erste Wand durchgeführt. Auf Stählen und hochschmelzenden Metallen wurden einphasige TiC, TiN und  $TiB_2$  sowie TiC/ $TiB_2$ -Simultanschichten mit einer Schichtdicke bis 100  $\mu m$  abgeschieden und geprüft. Mit zunehmender Schichtdicke zeigte sich ein Vorteil der Simultanschichten. Eine mögliche Herstellungsmethode hochbelastbarer Schutzziegel aus TiC/ $TiB_2$  für den Bereich der Ersten Wand in Fusionsreaktoren wurde geprüft. Sie besteht aus den Schritten: Pulvervorbereitung  $\rightarrow$  isostatisches Kaltpressen  $\rightarrow$  Vorsintern  $\rightarrow$  Formgebung  $\rightarrow$  Fertigsintern  $\rightarrow$  Nachbearbeitung.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23579	03.02.01P42A	K. Biemüller Prof. Dr. H. Holleck H. Janzer Dr. H. Leiste G. Schlickeiser <u>Dr. A. Skokan</u>

Vorhaben  
**03.02.02 Untersuchung metallischer Fusionsreaktorwerkstoffe**

**Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)**

Entwicklung und Qualifizierung des martensitischen Stahls 1.4914 als Erste-Wand-Material

Nach der Anlieferung der NET-Charge wurden Halbzeuge verschiedener Abmessungen gefertigt und an verschiedene EG-Labors für diverse Experimente ausgeliefert. Bei der Halbzeugherstellung stellte sich heraus, daß unterschiedliche Warmverformungsschritte einen erheblichen Einfluß auf das Gefüge und die Bildung von  $\delta$ -Ferrit besitzen. In umfangreichen Untersuchungen wurde festgestellt, daß man eine homogene,  $\delta$ -ferritfreie und voll martensitische Legierung bekommt, wenn man der abschließenden Austenitisierungsglühung und Anlaßwärmebehandlung eine Glühung bei 950-980°C vorschaltet. Es wurde deshalb für die Experimentatoren im EG-Rahmen die folgende Wärmebehandlung von 950-980°C/2h + 1075°C/30min + 750°C/2h als vorläufige Referenzbehandlung für die NET-Charge des 1.4914 vorge-schlagen.

Im Berichtszeitraum wurden anhand eigener Ergebnisse und einer umfangreichen Literaturrecherche vorläufige Ausle-gungsformeln für relevante physikalische, mechanische und Korrosionseigenschaften für den Werkstoff 1.4914 im Rahmen eines NET-Studienauftrages formuliert.

Veröffent-lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23084	03.02.02P41A 03.02.02P41B	B. Dafferner DI. C. Wassilew <u>Dr. K. Ehrlich</u>

Überlegungen zur Entwicklung niedrig aktivierbarer Legie-rungsmodifikationen am Martensit 1.4914

Nach Abstimmung mit JEN/Madrid und dem bereits angelaufenen UK-Programm wurden zunächst folgende

Arbeitsrichtungen beim martensitischen Chromstahl, Typ 1.4914, aufgenommen:

- a) Untersuchung des Einflusses von Ce, Ta und Hf-Zusätzen auf die Kerbschlag- und Kriecheigenschaften
- b) Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher  $\delta$ -Ferrit-Gehalte auf die mechanischen Eigenschaften

Nach Abschätzung der ferritisierenden Wirkung von Ta und Hf wurden 9 Legierungen definiert und zur Lieferung (durch Saarstahl, Völklingen) in Auftrag gegeben.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. K. Anderko Ing. M. Schirra

Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Erste-Wand-Materialien

1.) Isothermische Ermüdungsversuche

Aufgrund der verspäteten Anlieferung des martensitischen Werkstoffes 1.4914 mußte der Beginn der isothermischen Ermüdungsversuche zunächst verschoben werden. In der Zwischenzeit wurden am Werkstoff 316 L (ISPRA-Charge) LCF-Versuche durchgeführt, um zu untersuchen, welchen Einfluß die Belastungsart (Dehn-, Stauch- bzw. Dehn/Stauchbeanspruchung) auf die Lebensdauer hat. Es zeigt sich in Übereinstimmung mit früher am AISI 304 durchgeführten Versuchen, daß kein Einfluß der Mitteldehnung festzustellen ist. Für eine Dehnungsamplitude von 0,5% bei 650°C ergibt sich unabhängig davon, ob die Mitteldehnung negativ, positiv oder null ist, immer eine Bruchlastwechselzahl von etwa 3750.

Für die Herstellung der Proben aus dem Werkstoff 1.4914 wäre es sehr vorteilhaft, die erforderliche Vergütung (Austenitisierungsglühung bei 1075°C und Anlassen bei 750°C) nach erfolgter Probenfertigung durchzuführen, damit a) keine Kaltverformung in der Probe zurückbleibt und b) das Material sich gut bearbeiten läßt. Es gibt jedoch Anzeichen dafür, daß durch die Wärmebehandlung die Maßhaltigkeit der Probe negativ beeinflusst wird. Deshalb wurde zwischenzeitlich ein Programm gestartet, um den Fertigungsprozeß hinsichtlich Wärmebehandlung und Maßgenauigkeit zu optimieren. Das Programm soll auch die Frage beantworten, ob die Probenfertigung oder die hohe Zugspannung bei Versuchsbeginn verbunden mit einer nachfolgenden Entfestigung bis zum

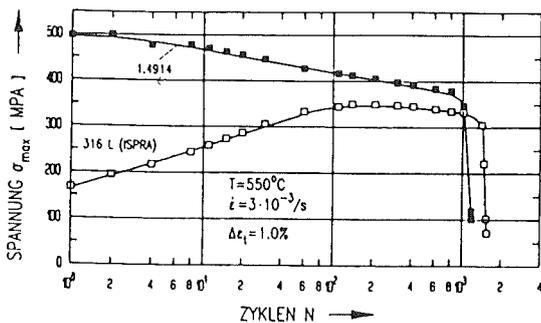


Abb. 19 Verfestigungsverhalten der Werkstoffe 1.4914 und AISI 316 L

Probenbruch - die Ursache für die niedrigere Bruchlastwechselzahl des 1.4914 gegenüber dem 316 L bei 550°C ist (siehe Abb. 19).

2.) Thermische Ermüdung

Im Dual-Beam-Experiment ist mit einer azimutal variierenden Temperaturbelastung der Probe durch die Bestrahlung zu rechnen. Dabei stellt sich die wichtige Frage, inwieweit eine dafür speziell entwickelte Probe, die sog. GRIM-Hohlprobe, stabil gegen Ausknicken ist und welchen Einfluß diese Temperaturlast auf die Bruchlastwechselzahl haben kann. Die methodischen Möglichkeiten, eine solche, dem Bestrahlungsexperiment ähnliche Temperaturbelastung der Probe zu simulieren, wurden erarbeitet, die entsprechenden Experimente werden 1987 begonnen.

In Zusammenarbeit mit IT/E wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, in dem eine GRIM-Hohlprobe mit konduktiver Beheizung den vom NET-Team geforderten Temperaturen (250-550°C) und Temperaturänderungen (15-30 K/s) in Form von Temperaturzyklen ohne Haltezeiten ausgesetzt werden kann. Zur Konzeptionierung von Temperaturzyklieranlagen wurden 3 Vorversuchsserien bis 20 000 Zyklen durchgeführt.

Die Beschaffung von 10 Temperaturzyklieranlagen mit Meßdatenerfassung ist angelaufen. Berechnungen über die Widerstandsänderung in der Probe und die Abschätzung des Temperatur- und Spannungsverlaufes wurden vorgenommen. Die Deutung der experimentellen Ergebnisse in Hinblick auf Rißinitiierung und Rißausbreitung werden in enger Zusammenarbeit mit IMF IV durchgeführt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.02.02P41A	W. Baumgärtner Prof. M. Bocek DI. C. Petersen Ing. D. Rodrian Dr. W. Scheibe DI. R. Schmitt Ing. H. Schneider W. Schweiger

Bestrahlungsexperimente mit Ionen an Fusionsreaktorwerkstoffen

Neben weiteren Aufbauarbeiten an der Dual-Beam-Anlage bildete der Übergang von Testbestrahlungen zu einem regelmäßigen Strahlbetrieb verbunden mit der Heliumimplantation von Flachzugproben den Schwerpunkt des diesjährigen Programmes. Die Auslegungsstromstärke des Alpha-Teilchenstrahls wurde mit 10 µA erstmals erreicht.

Die Aufbau- und Optimierungsarbeiten umfaßten im wesentlichen die Installation und die Inbetriebnahme des für zukünftige In-beam-LCF-Experimente ausgelegten Helium-Kühlkreislaufs, die Weiterentwicklung von Diagnose- und Bestrahlungskomponenten im Hinblick auf hohe Ausfallsicherheit auch bei Hochstrombestrahlungen und schließlich die Inbetriebnahme eines UHV-Hochtemperaturofens für eine Werk-

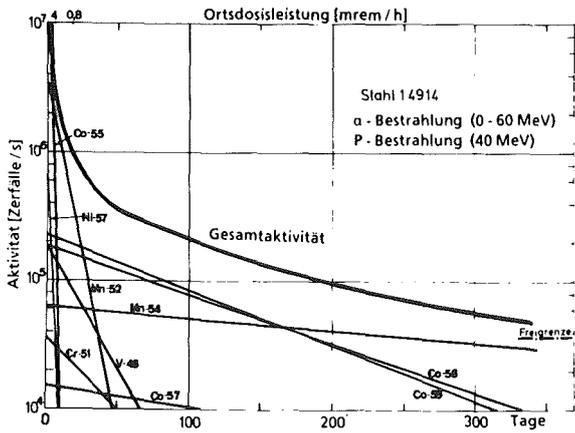


Abb. 20  $\gamma$ -Aktivität vom martensitischen Cr-Stahl 1.4914 im Verlauf eines Jahres nach Bestrahlung mit Protonen ( $20 \cdot 10^{16}/\text{cm}^2$ ) und Alphateilchen ( $2 \cdot 10^{16}/\text{cm}^2$ )

stoffprüfmaschine, welche der Nachuntersuchung von vorbestrahlten Proben dient. Parallel dazu laufende Entwicklungsarbeiten beinhalteten die Erarbeitung von Kriterien für die Beschaffung einer LCF-Werkstoffprüfmaschine für In-beam-Versuche, Entwicklung und Erstellung von Software-Paketen für Versuchsdatenerfassung- und Auswertung, sowie die Neuentwicklung eines prozessorgesteuerten Moderator-systems zur homogenen Implantation von Teilchenströmen. Dieses System reduziert u.a. die bisherigen Bestrahlungszeiten auf ein Drittel.

Nach typischen Dual-Beam-Bestrahlungen, wie sie im europäischen Rahmen abgestimmt worden sind, wurden am Martensit 1.4914 Beta- und Gammaaktivitätsanalysen durchgeführt und nach einzelnen Nukliden aufgeschlüsselt (Abb.20). Neben einer sicheren Vorhersage von Ortsdosisleistungen und Abklingzeiten ergaben sich zusammen mit begleitenden Berechnungen Kriterien für den Einsatz von Dosimeterisotopen. Das Nuklid Co-56 erweist sich hierbei zur unabhängigen Bestimmung der Bestrahlungsdosis als besonders geeignet.

Zur Frage der Heliumhochtemperaturversprödung wurden Flachzugproben aus dem Martensit 1.4914 und dem Austenit 316 L bei Temperaturen bis  $700^\circ\text{C}$  homogen mit Helium bis zu einer Dosis von 250 appm implantiert. Diese Proben werden derzeit mechanisch und elektronenmikroskopisch nachuntersucht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V22676	03.02.02P35A 03.02.02P35B	G. Bürkle S. Heger Dr. Kaletta <u>Dr. Möslang</u> Dr. Preininger Ing. G. Przykutka A. Will

### Bestrahlungsexperimente mit Neutronen an Fusionsreaktorwerkstoffen

Für das gemeinsame IRC-ECN-KfK-Bestrahlungsexperiment SIENA, in welchem der Einfluß der Bestrahlung auf die Kerbschlagzähigkeit und Spröbruchübergangstemperatur sowie das Verfestigungsverhalten studiert wird, sind Kerbschlag- und Zerreißproben mit unterschiedlichen Vorbehandlungszuständen vorbereitet worden. Die Bestrahlung wurde inzwischen begonnen.

Für das In-pile-Zykliererexperiment in der KNK II wurden im Berichtszeitraum die Versuchsparameter festgelegt und nach Vorexperimenten in Zusammenarbeit mit IMF III die Druckzyklieranlage in Auftrag gegeben. Mit der Herstellung von Rohrprüflingen wurde begonnen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23060 23214		B. Dafferner <u>Dr. K. Ehrlich</u> DI. C. Wassilew

### Chemische Wechselwirkung des Strukturmaterials mit Flüssigmetallen

Ein vergleichender Lithiumkorrosionsversuch an den Vanadinlegierungen V 3Ti 1Si und V 15Cr 5Ti ergab, daß die vom KfK entwickelte Legierung V 3Ti 1Si auch hinsichtlich des Korrosionsverhaltens Vorteile aufweist. Nach über 9000 h Versuchsdauer im PbLi-Kreislauf bei  $400-420^\circ\text{C}$  wurde festgestellt, daß die austenitischen Werkstoffe bis zu dieser Temperatur ausreichend beständig gegen Pb-17Li sind. Der Kreislauf wurde für die bei hohen Temperaturen vorgesehenen Versuche am martensitischen Stahl 1.4914 und an Vanadinlegierungen umgebaut (siehe Abb.21). Der Werkstoff 1.4914

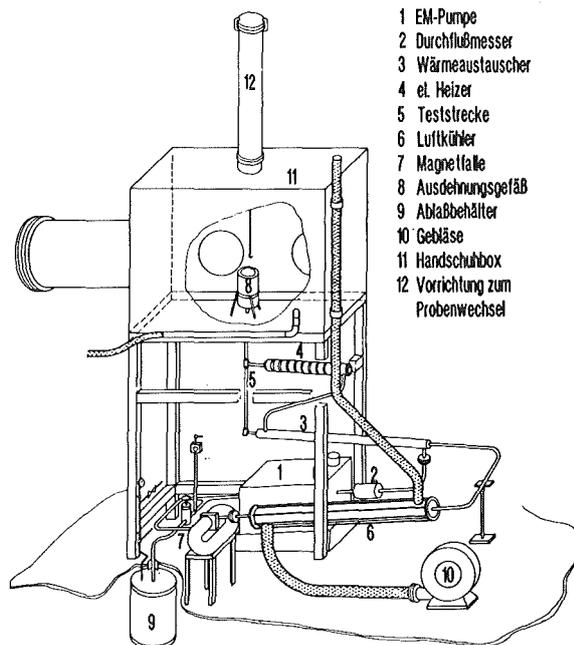


Abb. 21 Isometrisches Schema des Pb17Li-Kreislaufs II

zeigte sich in Zugversuchen bei 250-300°C unempfindlich gegen Flüssigmetallversprödung.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22007	03.02.02P34A	<u>Dr. H.U. Borgstedt</u>
22637	03.02.02P34B	Ing. G. Drechsler DI. G. Frees DI. M. Grundmann (Doktor.) Z. Perić

Analytische Untersuchungen zum Flüssigmetallblanket

Zur Sauerstoffbestimmung im Pb-17Li wurde mit der Vakuumheißextraktion eine Nachweisgrenze von 2 µg/g erreicht. Auch die metallischen Verunreinigungen Fe, Cr und Ni sowie Li wurden nach verschiedenen Versuchen bestimmt. Nachuntersuchungen an Korrosionsproben aus V 3Ti 1Si und X5 CrNi 18 9 mit der GDOS-Methode ergaben, daß die Oberflächen der Werkstoffe hinsichtlich der Zusammensetzung nicht verändert wurden. Bei Proben, die bei 550°C exponiert waren, wurde eine Abscheidung von Eisen, Chrom und Nickel auf den Oberflächen als Folge von Massetransport beobachtet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<u>Dr. Ch. Adelhelm</u> E. Nold G. Streib S. Winkler

Thermophysikalische Eigenschaften im System Li-Pb

Der Abschlußbericht über das thermophysikalische Verhalten im System Li-Pb wurde erstellt (23422). Zusätzlich zu experimentellen Ergebnissen für die Legierung Li(17)Pb(83) und die intermetallische Verbindung LiPb wurden physikalische Eigenschaften (Volumenausdehnungskoeffizient, thermische und elektrische Leitfähigkeit, spezifische Wärme) für die lithiumreicheren intermetallischen Verbindungen an der jeweiligen Solidustemperatur berechnet (Tabelle).

Physikalische Eigenschaften von Li-reichen intermetallischen Verbindungen

Verbindung	$\gamma_{th}$ [ $10^{-6} K^{-1}$ ]	$c_p$ [J/gK] 300 K	$\rho$ [ $\mu\Omega cm$ ]	$\lambda$ [W/cmK]
LiPb	90; 135	0.224	85	0.22
Li <sub>8</sub> Pb <sub>3</sub>	110	0.52	217	0.11
Li <sub>3</sub> Pb	130	0.57	230	0.10
Li <sub>7</sub> Pb <sub>2</sub>	86	0.63	260	0.10
Li <sub>22</sub> Pb <sub>5</sub>	16	0.73	320	0.073

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23422	03.02.02P32A 03.02.02P32B 03.02.02P32C	G. Haase DWI, U. Jauch V. Karcher <u>Dr. B. Schulz</u>

Rißbildung und Rißausbreitung unter thermozyklischer Beanspruchung

Die Versuchsanlage (siehe Abb. 22) zur experimentellen Untersuchung von Rißinitiation und Rißausbreitung durch thermozyklische Beanspruchung im austenitischen Stahl 1.4436 wurde fertiggestellt. Es werden Rohrproben mit den Abmessungen 60 x 3,6 mm untersucht.

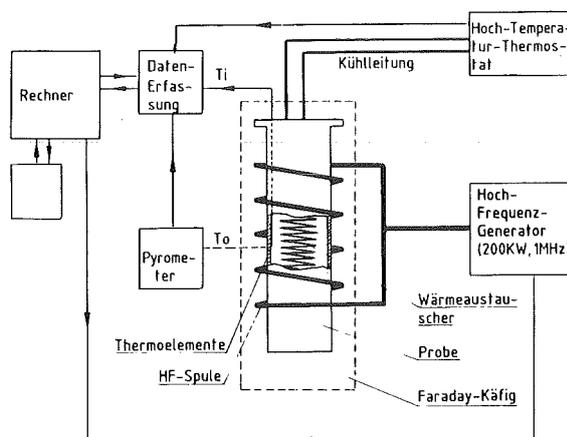


Abb. 22 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

Die zyklische thermische Belastung erfolgt durch induktives Aufheizen der äußeren Probenoberfläche von 300 °C auf 600 °C in etwa 4 s, wobei die Rohrwand durch Kühlung auf 300 °C gehalten wird. Es konnte gezeigt werden, daß nach ca. 10<sup>5</sup> Temperaturzyklen durchgehende axiale Längsrisse in der Rohrwand entstehen.

Vor der Zerstörung der Probe werden die Risse bereits mit Hilfe eines Abdruckverfahrens für die Probenoberfläche beobachtet und in ihrer Entwicklung verfolgt. Nach dem Probenversagen erfolgt eine Untersuchung der Bruchfläche mit fraktographischen Verfahren.

Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen wurden analytische Berechnungen zur Temperaturverteilung in der Rohrwand durchgeführt. Diese sind wesentlich für die Beschreibung des inelastischen Verhaltens mittels viskoplastischer Stoffmodelle, wofür eine spezielles Computerprogramm entwickelt wurde.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<u>DI. J. Neumann</u> Ing. E. Wiens

**Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)**

Der von diesem Institut vorgesehene Beitrag wurde im Berichtsjahr nicht bearbeitet.

Vorhaben  
**03.02.03 Bestrahlungen und Nachuntersuchungen**

**Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)**

Herstellung und Modelltheorie

Im Rahmen der Aktivitäten zur modelltheoretischen Beschreibung von Bestrahlungsexperimenten mit Brutkeramik wurde im Berichtszeitraum die im Rechenprogramm SATURN-FS1 vorhandene Materialdatenbasis aktualisiert.

Die Arbeiten zur Herstellung von Silikatkeramiken durch Isostatisches Heißpressen resultierten in der Herstellung von Lithiummeta- und -orthosilikaten mit nahezu theoretischer Dichte. Die bei der Herstellung angewandten Prozeßparameter führten zu Produkten mit teilweise unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich ihrer Gitterkonstanten, Kornstruktur und Härte.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		F. Bauer M. Heck <u>Dr. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl</u> Dr. P. Weimar

Bestrahlungseinrichtungen für Erutstofftests

Im europäischen Rahmen der sogenannten B15-Experimente sind bisher zwei Bestrahlungen (DELICE 01 und 02) im OSIRIS-Reaktor mit insgesamt 65 Probensäulen aus Lithiummetasilikat bzw. -orthosilikat über jeweils ca. 25 Tage gelaufen. Zwei weitere Experimente sind bestellt. Für eine erste Bestrahlung ELIMA 1 im schnellen Fluß des KNK II-Reaktors stehen zwei Trägerkapseln mit je 12 Probenstäben für unterschiedliche Temperaturbereiche fertig montiert bereit. Eine zweite KNK II-Bestrahlung ELIMA 2 ist mit 2x18 Probensäulen als Vergleichsbestrahlung zu DELICE 03 in Vorbereitung. Mit dieser Vergleichsbestrahlung sollen ab 1987 die Einflüsse der unterschiedlichen Neutronenspektren auf das Materialverhalten verschiedener Brutkeramiken untersucht werden. Eine Reihe europäischer Partner ist an diesem Experiment beteiligt.

Die B16-Reihe ist mit der zweiten deutschen Bestrahlung LISA 2 im SILOE-Reaktor Grenoble erfolgreich weitergeführt worden. Zwei weitere dieser Experimente mit kontinuierlicher Messung der Tritiumfreisetzung aus sechs Probensäulen sind für 1987/88 beschlossen worden. Die Nachuntersuchung der Proben aus der LISA 1-Bestrahlung hat in den Heißen Zellen des KfK im November 1986 begonnen.

KNK-Experimente an Lithiumkeramik mit Tritium-Extraktion, ELITE

Die Möglichkeit der Bestrahlung von Lithiumkeramik in einer instrumentierten Einrichtung im KNK II-Reaktor wurde im Rahmen einer Studie untersucht. Als Bestrahlungsposition kommt die Reflektorposition 511 infrage. Im Testeinsatz lassen sich bis zu neun Probenkapseln unterbringen mit einem maximal möglichen Durchmesser von 44 mm. Die Proben Temperaturen können zwischen 400 und 800 °C exakt geregelt werden. Jede Kapsel besitzt separate Spülgasleitungen, mit denen das freigesetzte Tritium zu einer Meßstation in unmittelbarer Nähe des Reaktordeckels geführt werden kann. Aus verschiedenen Gründen wurden die Arbeiten an diesem Vorhaben vorerst eingestellt.

Bestrahlung von metallischen Werkstoffen

In der Druckrohrtesteinrichtung auf der Zentralposition sollen temperaturgeregelt Rohrproben unter zyklischen Innendruckbelastungen getestet werden. Die Experimente dienen zur Materialentwicklung für die Erste Wand des Fusionsreaktors (NET). Auf Grund von Vorversuchen wurde ein Konzeptvorschlag für die erforderliche Drucktransientenanlage erarbeitet. Die Belastungen liegen zwischen 10 und 450 bar bei Druckanstiegszeiten von ca. 10 s und -abfallzeiten von ca. 30 s. Nach umfangreichen Vorgesprächen mit verschiedenen Industriefirmen konnte die Drucktransientenanlage Ende 1986 in Auftrag gegeben werden. Zur Probenherstellung ist eine Reihe von Vorversuchen angelaufen. Hier geht es insbesondere um die Entwicklung einer druckfesten und gasdichten Verbindungstechnik zwischen dem martensitischen Probenwerkstoff und dem austenitischen Mantelmaterial der Meß- und Versorgungsleitungen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23801 V23988		<u>DI.(FH) H.E. Häfner</u> DI.(FH) K. Heckert DI.(FH) K. Müller DI. P. Norajitra Ing.grad. K. Philipp DI. G. Reimann <u>DI. L. Schmidt</u>

## Arbeitsthema

### 03.03 Supraleitungsmagnete

#### Vorhaben

#### 03.03.02 Tokamak-Magnete

##### Institut für Technische Physik (ITP)

Die Arbeiten konzentrieren sich darauf, die Supraleitertechnologie für die nächste Generation an Tokamak-Experimenten (NET/INTOR) verfügbar zu machen. Hierzu dienen die Projekte LCT, POLO, TESPE-S und der geplante Ausbau der Spulentestanlage TOSKA. Die Mitwirkung am internationalen Projekt "Large Coil Task" (LCT) im ORNL durch Entwicklung und Bereitstellung einer Spule für den Test im Torusverband, der "Large Coil Test Facility" (LCTF) dient zur Demonstration der Fertigbarkeit und des sicheren Betriebes von Torusspulen mit einer Größe, die eine zuverlässige Extrapolation auf zukünftige Tokamak-Experimente zuläßt. Der durch das Projekt installierte Rahmen internationaler Zusammenarbeit hat sich als sehr nützlich und wegweisend für die Zukunft erwiesen (V23488). Das Projekt POLO dient der Entwicklung von Poloidalfeldspulen für NET. Wesentlicher Schritt dazu sind Entwicklung und Einsatz einer solchen Spule bei einem derzeit im Bau befindlichen Tokamak, nämlich Tore-Supra. Am Laborexperiment TESPE-S werden Magnetsicherheitsexperimente durchgeführt, die Aufschluß über das vom Magnetsystem eventuell ausgehende Gefährdungspotential in einem Tokamak geben sollen. Für den Test von Modellwicklungen der NET-Spulen wird eine Erweiterung der Spulentestanlage TOSKA geplant. An dem Kältebedarf dieses Teststandes und der langfristigen Kälteversorgung des ITP orientiert sich die Planung einer neuen Kälteanlage.

#### 1. Das große Spulenprojekt LCT (Large Coil Task)

Mit dem Beginn der erfolgreichen Abkühlung am 18. Januar 86 der 400 to schweren Testanlage IFSMTF (International Fusion Superconducting Magnet Test Facility) in Oak Ridge ist das große Spulenprojekt in seine entscheidende experimentelle Phase eingetreten. Die vom "Executive Committee" im "Baseline Program" im Herbst 1985 genehmigte Testserie:

- Abkühlung,
- Einzelspulentests,
- Dreispulentests,
- Test in toroidaler Konfiguration bei 8 T ohne (Standard I) und
- mit Pulsfeld (Standard II) und
- erweiterte Tests (extended Tests)

konnte in diesem Jahr bis zum Standard II Test der EURATOM-Spule mit anschließendem Verfahren des Pulsspulensystems in die nächste Testspule (Schweizer Spule) sehr erfolgreich abgewickelt werden.

#### 1.1 Übersicht über den bisherigen Testverlauf

Tests der Spulen haben gezeigt, daß alle 6 Spulen funktionstüchtig sind und in einer toroidalen Anordnung bis zu 8 T betriebeben werden können. Hierbei haben sich die forciert gekühlten Spulen durch ihre Ergebnisse klar als die zukünftige Technologie favorisiert. Die mechanische Steifigkeit von Wicklung und Leiter, verbunden mit der Kühltechnik haben dazu geführt, daß die Spulen bis einige zehntel Grad Kelvin unter ihrer oberen Temperaturgrenze ("current sharing temperature") elektrisch und thermo-hydraulisch stabil betrieben werden können. Die Spulen arbeiten dabei weit außerhalb der für die kryogene Stabilität gültigen Kriterien. Für die KfK/EURATOM-Spule konnte der erforderliche Kühlmittelstrom z.B. um ca. einen Faktor 10 gegenüber dem Nennwert reduziert werden, ohne daß eine negative Wirkung auf die Stabilität der Spule, auch im externen Pulsfeld, sichtbar geworden ist. Ferner hat sich auch gezeigt, daß die Nb<sub>3</sub>Sn-Leitertechnologie (Westinghouse-Spule) noch gewisse Risiken in sich birgt, die Degradationen verursachen können.

Die gesamte Testeinrichtung hat nach Erlernen der Handhabung und Beseitigung mehrerer technischer Mängel eine so gute Verfügbarkeit erreicht, daß die Testzeit in den Monaten Oktober bis Dezember nur durch die Auslastungsgrenze des zur Verfügung stehenden Testpersonals gegeben war. Eine Einschränkung für den Experimentierbetrieb mußte in Kauf genommen werden, als sich bei dem Dreispulentest herausstellte, daß sich mit dem vorhandenen Quenchedetektionssystem keine selektive Schnellabschaltung realisieren läßt. Sobald eine Spule durch Übergang zur Normalleitung schnell abgeschaltet werden muß, so muß immer der gesamte Torus abgeschaltet werden. Dies führt zu einem Verlust von (300 - 400 kg) Helium mit entsprechenden Wartezeiten für Rückkühlung und Ergänzung des Inventars, d.h. eine sorgfältigere Planung des Experimentes und des Betriebes waren nötig, um Schnellabschaltungen möglichst zu vermeiden. Es traten bisher insgesamt 3 solcher Schnellabschaltungen bei hohem gespeicherten Energieinhalt auf. Der Personaleinsatz des ITP vor Ort betrug im Berichtsjahr rund 3.4 Mannjahre.

Die "Project Officers" (PO) und das "Executive Committee" (EC) haben sich im Herbst 86 auf die Durchführung einer gemeinsamen Auswertung geeinigt, die vom amtierenden Vorsitzenden des EC koordiniert wird. Das erweiterte Testprogramm ("Extended Tests") wurde ebenfalls von diesen Gremien auf der Basis der ursprünglich geplanten Tests und der bereits vorhandenen Testergebnisse spezifiziert. Die projektleitenden Gremien waren sich auch einig, den Experimentierbetrieb möglichst bis Ende 1987 erfolgreich zu beenden. Die erzielten Resultate bilden eine sehr gute Grundlage für die zukünftige Auslegung von Fusionsmagnetsystemen.



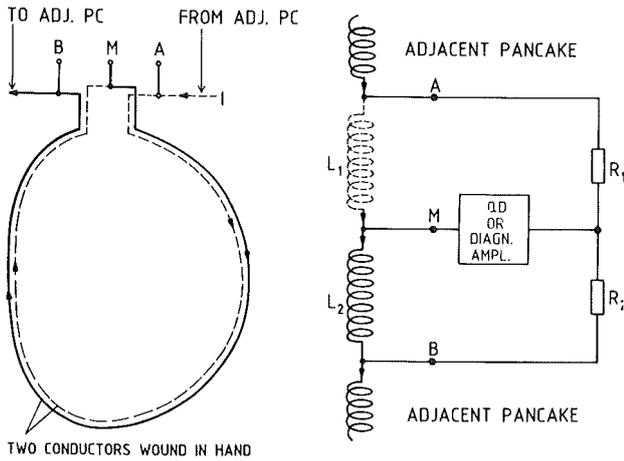


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schaltung, die zur Kompensation des induktiven Spannungsanteils für Quenchedetektion und Diagnostik benutzt wurde.

Zwei Methoden zur Kompensation des induktiven Spannungsanteils für Quenchedetektion und Diagnostik konnten an der EURATOM-Spule getestet und verglichen werden. Das im Torus bei den anderen Spulen ausschließlich verwendete ORNL-Kompensationssystem leitet den zu kompensierenden induktiven Spannungsanteil von einer Hilfswicklung ab. Die Hilfswicklung ist auf dem Gehäuse der LCT-Spule montiert. Über ein abgleichbares Isolationsverstärkersystem kann der induktive Spannungsanteil in der Spulenspannung damit kompensiert werden. Aufgrund der speziellen Wicklungsart der EURATOM-Spule (zwei Leiter parallel, die elektrisch in Serie geschaltet werden) (Abb. 2) kann hier eine Brückenschaltung zur Kompensation des induktiven Spannungsanteils angewendet werden. Die beim

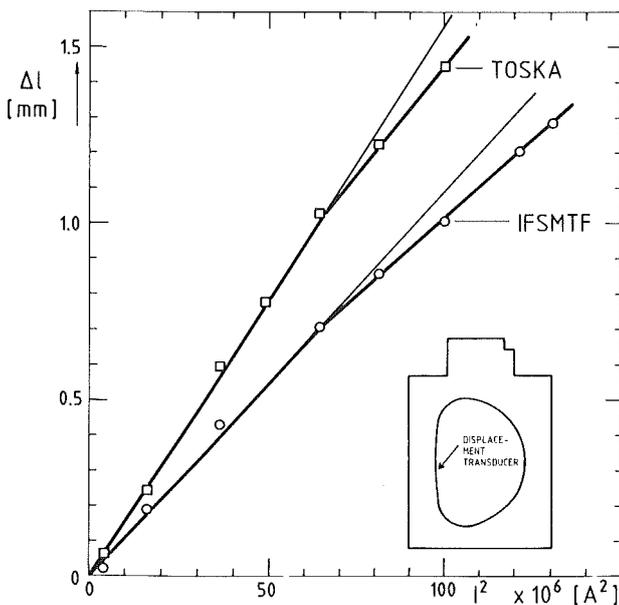


Abb. 3: Spalt zwischen Wicklung und Gehäuse in der Mittelebene des geraden Stücks des D für die Tests in TOSKA und IFSMTF

Auferregen beobachteten Restspannungen waren beim EURATOM-System kleiner als einige 100  $\mu$ V. Das ORNL-Kompensationssystem zeigte zahlreiche Spannungsspitzen besonders bei der ersten Auferregung. Die Höhen der Signale waren um einen Faktor 100 größer als die im EURATOM-Kompensationssystem, sofern sie dort überhaupt nachweisbar waren.

Da das ORNL-System besonders auf Flußverteilungsänderungen durch Lageänderungen der Wicklung im Gehäuse reagiert, kann daraus auf eine Verlagerung der Wicklung im Gehäuse geschlossen werden. Diese Tatsache wird für die Beurteilung von Finite - Element - Rechnungen im Vergleich mit Messungen von Bedeutung sein.

Die mechanische Fixierung der Spule an dem zentralen Stützpfeiler führt zu einer erheblichen Reduzierung der mechanischen Spannungen am Gehäuse. Einen Vergleich mit den Ergebnissen des TOSKA-Tests zeigt der Spalt zwischen Gehäuse und Wicklung (Abb. 3) sowie die Vergleichsspannungen an den Meßpunkten (Abb.4).

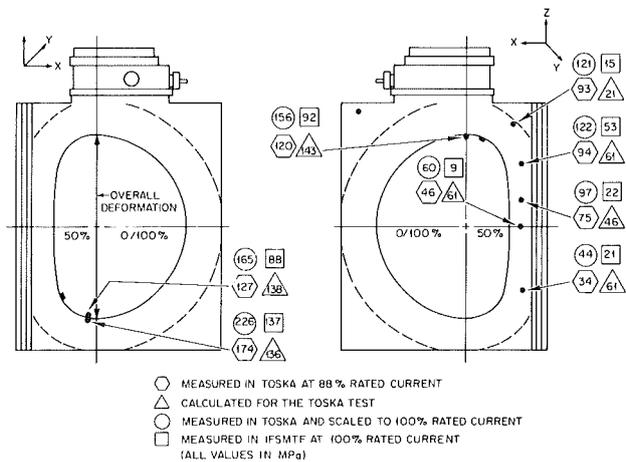


Abb. 4: Gemessene und berechnete Vergleichsspannungen für den Einzelspulentest in TOSKA und der IFSMTF (V23413)

In der Fortsetzung des besseren Verständnisses des TOSKA Tests (21433) wurden weitere mögliche Verbesserungen im Finite-Element-Modell der EURATOM-Spule eingeführt. Die durchgeführten Änderungen führten nur teilweise zu einer Annäherung von gemessenen und berechneten Ergebnissen (V23042). Eine mögliche Erklärung können Änderungen in Kraftübertragung zwischen Wicklung und Gehäuse sein, die als Nichtlinearität im Finite -Element-Modell nicht beschrieben werden. Das Auftreten solcher Änderungen wird durch die oben beschriebenen Flußänderungen angedeutet.

#### 1.2.2.2 Test der Eigenschaften bei Schnellentladung (Sicherheitsentladung) der Spule

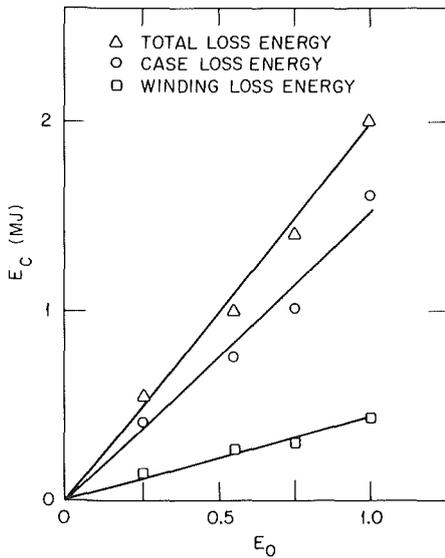
Die Spule wurde während der Testserie insgesamt 7 mal schnell abgeschaltet. Die Auslösung erfolgte sowohl manuell als auch automatisch. Zweimal löste ein Quench, der bei der Ermittlung der Betriebsgrenzen erzeugt wurde, die

**Tabelle 3:** Einige Schlüsseldaten der Schnellentladung

- Spannung	252 kV
- Zeitkonstante	6,79 sec
- Gespeicherte Energie	103 MJ
- Erholzeit	~ 80 Minuten
- Max. Gehäusetemperatur	17,5 K
- Max. Wicklungstemperatur	6,4 K
- Zustand der Wicklung während der Schnellabschaltung	supraleitend

Schnellentladung aus. Einige gemessene Schlüsseldaten der Schnellentladung sind in Tabelle 3 erfasst.

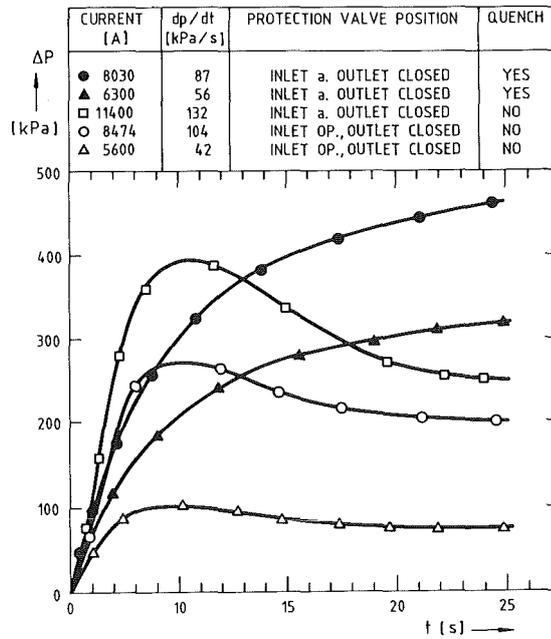
Die gemessene Verlustenergie ist sowohl in der Wicklung als auch im Gehäuse proportional zur gespeicherten Energie (Abb. 5).



**Abb. 5:** Gemessene Verlustenergie in Wicklung und Gehäuse als Funktion der gespeicherten Energie

Unter den verschiedenen Randbedingungen erfolgte die Untersuchung des Druckanstiegsverhaltens der Spule während der Schnellabschaltung (Abb. 6).

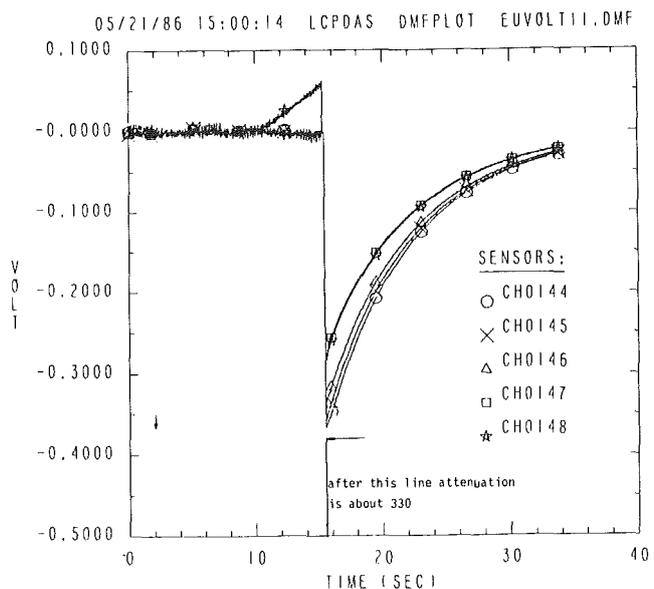
Hierbei konnte die Spule vom Kryosystem durch Schnellschlußventile abgetrennt werden. Beim Überschreiten einer gewissen Druck- oder Druckanstiegsschwelle wurde die Spule zur Atmosphäre durch Öffnen von gesteuerten Ventilen dann entlastet. Bei abgeschlossenem Heliumvolumen war die Druckschwelle für das Öffnen der Sicherheitsventile nach 43 sec erreicht. Bei einseitig offenem Heliumvolumen war das Rohrleitungssystem des Refrigerators ein ausreichendes Puffervolumen, um den Druckanstieg ohne Ansprechen der Entlastungsventile beherrschen zu können. Die gemessenen



**Abb. 6:** Druckanstiegsverhalten bei Schnellentladungen mit geschlossenem sowie einseitig offenem Heliumvolumen der Spule

Druckanstiegsraten und Drücke erlauben eine Schnellabschaltung beim Vorhandensein eines kalten Gasspeichers, praktisch ohne Verluste von Heliumgas, wie dies auch im TOSKA-Test gezeigt werden konnte.

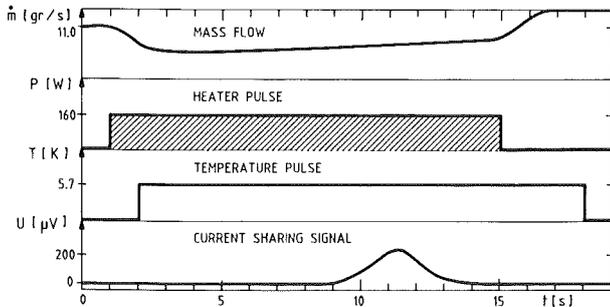
Die Spule zeigt eine um nur 10 % höhere Druckanstiegsrate, wenn die Schnellentladung durch einen Quench ausgelöst wurde (Abb. 7). Bei dieser Gelegenheit konnte das Quenchdetektionssystem der Spule erfolgreich getestet werden.



**Abb. 7:** Entstehung einer resistiven Spannung mit Auslösung der Schnellabschaltung an der Quenchdetektionsschwelle

### 1.2.2.3 Die Bestimmung der Betriebsgrenzen

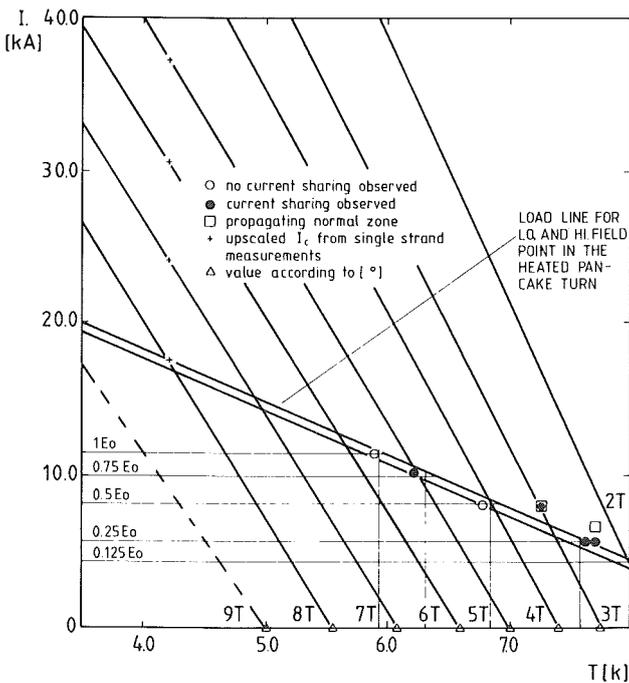
Wie schon im TOSKA-Test demonstriert wurde, ist der Pegel der internen Störenergie so niedrig, daß die Spule nahe ihrer oberen kritischen Temperaturgrenze, der "current sharing"-Temperatur, betrieben werden kann. Durch die Injektion von auf "current-sharing-Temperatur aufgeheizten Heliumgaspfropfen, konnten resistive Spannungen von einigen 100  $\mu\text{V}$  beobachtet werden (Abb. 8). Dies ist ein Zeichen, daß der Strom vom Supraleiter in das Kupfer verdrängt wird. Die



**Abb. 8:** Zeitliche Korrelation zwischen aufgeheiztem Gaspfropfen und der beobachteten resistiven Spannung

erhaltenen Ergebnisse waren in guter Übereinstimmung mit den gemessenen kritischen Strömen (Abb. 9). Ein Überschreiten des Stromes bei konstanter Temperatur oder Überschreiten der Temperatur bei konstantem Strom führte jedesmal zu einer sich ausbreitenden normalleitenden Zone.

Damit konnte eine Meßmethode erarbeitet werden, mit der die Betriebsgrenzen der forciert gekühlten Spule ermittelt werden können.



**Abb. 9:** Die kritische Lastlinie für den geheizten Kühlpfad im  $I_c$ - $T_c$  Diagramm, welches von den Kurzprobenmessungen abgeleitet wurde

### 1.2.3 Der Dreispulentest

Das Ziel, die Quenchdetektionssysteme der einzelnen Spulen des Torus so abzugleichen, daß bei einer Schnellabschaltung die in Nachbarspulen induzierten Spannungen die Quenchdetektionsschwelle nicht überschreiten, ließ sich nicht realisieren. Die kleinsten induzierten Spannungsanteile von (100 - 160)mV bei der Schnellabschaltung einer Nachbarspule zeigte das Kompensationsschema der Euratom-Spule (Abb. 2). Untersuchungen ergaben, daß sich keine Verbesserung des Abgleiches mit dem vorhandenen System mehr erzielen läßt. Der Dreispulentest mußte deshalb aufgegeben werden.

### 1.2.4 Der Sechsspulentest der KfK/EURATOM-Spule (Standard I)

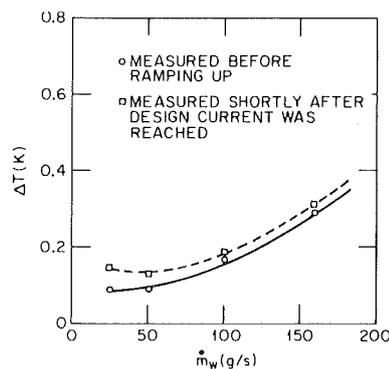
Dieser Test konnte in der Zeit vom 14. - 18. Oktober abgewickelt werden.

Ziel war es, die Betriebssicherheit und die Stabilitätsgrenze der Spule bis zu einer Feldstärke von 8 T zu demonstrieren. Die gewählten Abstufungen des Massenstromes zeigt Tabelle 4.

**Tabelle 4.:** Heliummassenströme für Wicklung und Gehäuse, die für die Testläufe des Standard I-Tests benutzt wurden

Gehäuse m [g/s]	Wicklung m [g/s]	Wärmeübergangszahl h [mWcm <sup>2</sup> K]
54	161	60
76	101	41
48	55	25
32	33	17

Bei allen Massenströmen konnte die Spule stabil im Torus betrieben werden. Wie erwartet nimmt die Temperaturdifferenz mit kleiner werdendem Heliummassenstrom ab. Dies ist eine Folge des positiven Joule-Thomson-Koeffizienten für die gefahrenen Betriebsparameter. Beim Vorhandensein von Verlusten ergibt sich ein optimaler Massenstrom für den die Temperaturdifferenz ein Minimum wird. (Abb. 10).



**Abb. 10:** Kleiner werdende Temperaturdifferenz über die Wicklung mit kleiner werdendem Massenstrom als Folge des positiven Joule-Thomson-Koeffizienten in diesem Bereich.

Durch die unterschiedlichen Amperewindungszahlen mußte die Stromaufteilung im Torus gegenüber der ursprünglich vorgesehenen geändert werden (V23053). Die dadurch auftretenden zeitlichen Kräfte variierten während der Standard I-Tests von 0,5 MN bis 10 MN für die EURATOM-Spule. Die größte Schiefkraft wurde beim Standard I-Test der Westinghouse-Spule erreicht. Bei diesem Test herrschte in allen Spulen die Feldstärke von 8 T (feldsymmetrischer Torus). Die Schiefkraft von 10 MN sind für die EURATOM-Spule bereits 35 % der Schiefkraft, die maximal für den Ausfall einer Nachbarspule in der Konstruktion berücksichtigt wurde. Einige im Standard I-Test der EURATOM-Spule erreichten Testdaten sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

**Tabelle 5:** Einige charakterische Daten der EURATOM-Spule für den Standard I-Test

- Spulenstrom	11,7 kA	
- Feld am Referenzpunkt in der Mittelebene (gemessen)	8,0 T	
- Maximales Feld in der kleinsten Krümmung	8,2 T	
- Zentralkraft auf den zentralen Stützpfosten	- 40 MN	
- Seitliche Schiefkraft	- 6.1 MN	
		TORUS EINZEL- SPULE
- Statische Verluste Wicklung	~ 25 W	18 W
- Statische Verluste Gehäuse	~ 90 W	80 W
- Spalt Gehäuse Wicklung in der Mittelebene (Abb. 3)	2,22 mm	1,28 mm
- Größte gemessene Vergleichsspannung	131 N/mm <sup>2</sup>	137 N/mm <sup>2</sup>

Die gemessenen Vergleichsspannungen sind im Torus-Test alle kleiner als in den Einzelspulentests. Die Vergrößerung des Spaltes zwischen Wicklung und Gehäuse entspricht den Erwartungen.

Der Anstieg der Verluste im Torus-Test kann mit dem höheren Anpreßdruck am Stützfeiler erklärt werden. Durch Nachweis eines Temperaturabfalles am zentralen Stützfeiler konnte nachgewiesen werden, daß von hier Wärme in die Spule einströmte.

Nach der ersten Hochfahrt im Standard I-Test wurde der gesamte Torus bei Nennstrom in der KfK-EURATOM-Spule durch einen Quench in einer Nachbarspule schnell abgeschaltet. Eine Zusammenstellung der Energien und Entladeleistungen sowie eine Energiebilanz für den gesamten Torus erfaßt Tabelle 6.

Skaliert man die Verluste der Schnellabschaltungen aus dem Einzelspulentest, so kommt man auf eine Verlustenergie von 24 MJ, was innerhalb der Meßgenauigkeit in guter Übereinstimmung mit den Messungen ist.

**Tabelle 6:** Entladeleistungen und Energiebilanz einer Schnellabschaltung des Torus

Spule	Max. Entladeleistung (MW)	Dissipierte Energie im Entladewiderstand (MJ)
EU	28,2	122,0
WH	7,2	46,5
GE	4,2	95,2
GD	1,8	106,0
JA	8,2	91,1
CH	16,5	64,5
	Gesamt	525,3
Gespeicherte Energie im Torus vor dem Quench: 554 MJ		
Im Entladewiderstand dissipierte Energie 525 MJ		
Verlustenergie bei 4,2 K 29 MJ		

Die gemessenen maximalen Temperaturen in Wicklung (6,1 K) und Gehäuse (15,8 K) liegen etwas niedriger als im Einzelspulentest (Tab. 3). Das gleiche gilt für die gemessenen Verluste mit 1,5 MJ. Aufgrund der gemittelten Feldparameter für die Verlustberechnungen, sind die Verluste für Einzelspulen- und Torus-Schnellabschaltung annähernd gleich. Dies wird auch durch die Messung bestätigt.

Zu Beginn des Standard I-Tests trat noch ein kritisches Isolationsproblem an den gasgekühlten Stromzuführungen für die KfK/EURATOM-Spule auf. Da diese Stelle bereits vorher als sehr kritisch erkannt und an einem Modell untersucht worden war, ließ sich der Schaden lokalisieren und beheben (V23052).

#### 1.2.5 Der Sechsspulentest der KfK/EURATOM-Spule mit externem Pulsfeld (Standard II)

Nachdem alle 6 Spulen den Standard I-Test mit Erfolg absolviert hatten, wurde das Pulsspulensystem in Betrieb genommen. Die Pulsspule war bereits vor dem Schließen des Vakuumtanks in der EURATOM-Spule positioniert und verriegelt worden, da die EURATOM-Spule in dieser Serie als erste Testspule vorgesehen worden war. Nach einigen Schwierigkeiten mit der LN<sub>2</sub>-Versorgung (die Pulsspulen sind zwei Flüssig-Stickstoff gekühlte Kupferspulen) und der Stromversorgung konnten die Tests durchgeführt werden. Wegen der etwas kritischen Kühlung mußte die Länge des Pulsdaches von 30 s auf 15 s reduziert werden. Aufgrund von Messungen zeigte sich, daß die Verluste unabhängig von der Länge des Pulsdaches sind.

Für die EURATOM-Spule wurden die Verluste als Funktion des Spulenstromes und für verschiedene Heliummassenströme gemessen. Die Messungen erfolgten zunächst an der

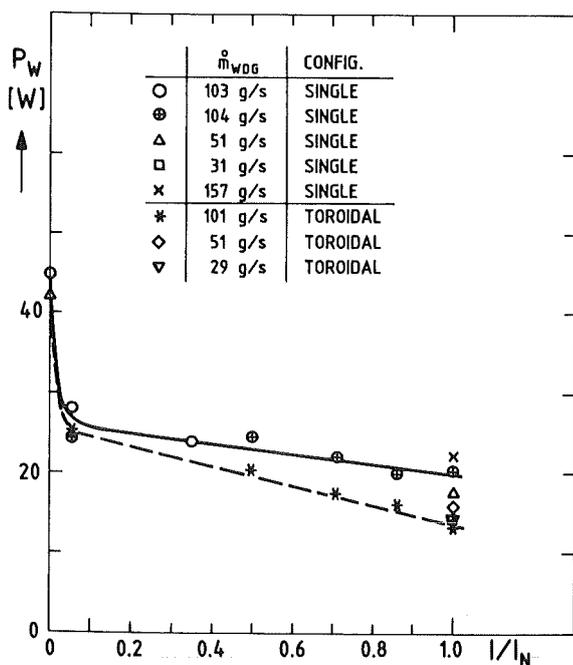


Abb. 11: Gemessene Verluste im Standard II-Test der EURATOM-Spule

Einzelspule und dann im Torus analog dem Standard I-Test. Für jeden Meßpunkt mußte die Spule mit ca. 15 - 20 Pulsen beaufschlagt werden bis stationäre Bedingungen herrschten. Das Ergebnis (Abb. 11) läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Verluste fallen im unteren Strombereich (< 500 A) stark ab und ändern sich dann nur noch schwach mit dem Strom.
- Die Verluste der Einzelspulen liegen etwas höher als die Verluste im Torus.
- Die gemessenen Verluste liegen zwischen 14 W und 22 W und sind in sehr guter Übereinstimmung mit der Abschätzung von 18 W.
- Die gemessenen Gehäuseverluste von 6 - 11 W sind in guter Übereinstimmung mit der Abschätzung von 8 W.
- Die Spule konnte unter Pulslast bis zu dem kleinen Massenstrom von 30 g/s und erhöhter Temperatur in einem Kühlpfad betrieben werden, ohne Anzeichen thermohydraulischer oder elektrischer Instabilitäten.

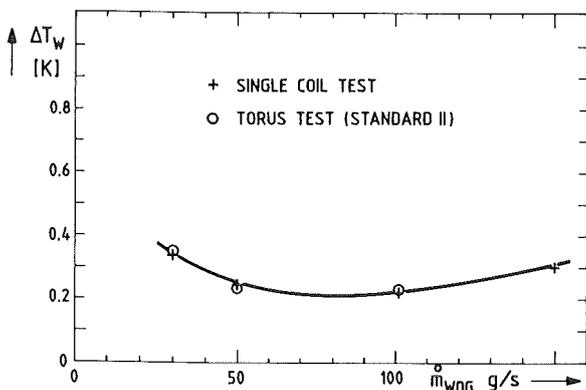


Abb. 12: Temperaturdifferenz über die Wicklung als Funktion des Massenstromes

- Die Kompensation des Euratom-Quenchedetectionssystem wurde nur geringfügig durch den Pulsspulenbetrieb gestört (~einige mV, Ansprechschwelle 50 mV). Das ORNL-Kompensationssystem mußte während des Pulsspulenbetriebes auf eine Ansprechschwelle von ca. 1 V gestellt werden, um eine Schnellabschaltung zu umgehen.
- Das Temperaturminimum für einen optimierten Massenstrom ließ sich nachweisen (Abb. 12).

Während des gesamten Meßbetriebes wurde die Spule mit 328 Pulsen beaufschlagt.

### 1.3 Zusammenfassung

- Die KFK/EURATOM - Spule konnte im Berichtsjahr 5 Stufen des vorgesehenen sechsstufigen Meßprogramms erfolgreich absolvieren.
- Die Spule zeigte in allen Tests eine hervorragende mechanische, thermische und elektrische Stabilität.
- Die sehr gute Handhabbarkeit der Spule ergibt sich auch aus den geringen erforderlichen Experimentierzeiten für die Abwicklung des Testprogramms:  
Einzelspulentests: 4 Tage, Standard I: 5 Tage, Standard II: 6 Tage.

Gründe hierfür sind vor allem die kurzen Hochfahrzeiten und die geringen Verluste im Falle einer Schnellabschaltung.

- Als große Erleichterung für die Spulentechnologie mit forcierter Kühlung erwies sich die Demonstration des Betriebes mit kleinen Massenströmen. Dadurch kann das Kryosystem kostengünstiger gestaltet werden.
- Es konnte demonstriert werden, daß die Technologie der EURATOM-Spule die Reife für größere Magnetsysteme besitzt.

## 2. Entwicklung supraleitender Poloidalfeldspulen

Die Arbeiten zielen spezifisch auf die Entwicklung der supraleitenden Poloidalfeldspulen (PF-Spulen) von NET ab. Wesentlicher Schritt dazu ist der Bau und Einsatz einer solchen Spule im Tokamakexperiment Tore Supra in 1990 (Euratomvorhaben M 8). Als Zwischenschritt werden Leitertechnologie und Konstruktionsprinzipien an einer Modellspule mit 2 MJ Energieinhalt unter Nachbildung der Tore Supra Betriebsbelastungen im KfK/TOSKA getestet (20465).

Die Schwerpunkte der Arbeiten im Berichtsjahr (21244) betrafen

- die Entwicklung der Supraleiterkabel (Modell- und Tore Supra Spule mit Extrapolation auf die NET-Spulen) mit der Industrie;
- die Absicherung des Leiter- und Wicklungskonzeptes durch
  - elektrische und mechanische Messungen,
  - Zweiphasenströmungsexperimente mit HeI;

- die Konstruktion der Modellspule und Vergabe an die Industrie;
- Vorbereitung der fertigungsbegleitenden Hochspannungsuntersuchung an den Modellspulenkomponenten;
- Planung der Modellspulentests in TOSKA;
- Entwurfsarbeiten für die Tore Supra Spule.

## 2.1 Entwicklung der Supraleiterkabel und ihrer Stahlhülle

### 2.1.1 Kabelentwicklung

Im Vorlauf zum industriellen Entwicklungsprogramm waren im Labor Kabelproben mit nicht isolierten Subkabeln (nur CuNi-Umbändelung) gefertigt und gemessen worden (V22840). Die Messungen des Kontaktwiderstandes der verschiedenen Proben in Abhängigkeit vom Kompaktierungsgrad zeigten, daß dieser hoch genug ist, um auch diesen Kabeltyp unter Tore Supra Bedingungen einsetzen zu können. Die Kabelentwicklung wurde daraufhin auf zwei Typen konzentriert:

- Ein Kabel mit Subkabeln, isoliert mit vorgetränktem dreilagigen Kunststoffband, entweder Epoxidharz/Nomex/Kapton/Nomex/Epoxidharz ("NKN") oder Epoxidharz/Glasfaser/Kapton/Glasfaser/Epoxidharz ("GKG"). Dieser bereits seit längerem verfolgte Leitertyp ist nach dem Verwickeln aushärtbar und erhält damit eine hohe Scherfestigkeit an den Kontaktstellen zwischen Drähten und Isolation. Dieser Vorteil ergänzt den ursprünglichen Plan der geringen Wechselfeldverluste.
- Ein Kabel gleichen Aufbaues der Adern, aber nur Umbändelung der Subkabel mit einer CuNi-Folie (einfacher und robuster in der Handhabung). Ein solches Kabel muß wegen der zunächst geringeren mechanischen Stabilität stärker kompaktiert werden. Um den damit verbundenen Verlust an Heliumvolumen auszugleichen, kann das Innenrohr perforiert werden. Für die NET-Spulenbelastungen würde es darüber hinaus voraussichtlich genügen, dieses Kabel nur mit einem überkritischen Heliumstrom zu kühlen. Abb. 13 zeigt eine vorläufige Auslegung für NET.

Seitens der industriellen Entwicklungspartner (Cablerie Dour, VAC) wurden Probelängen (~ 6 m) einer Reihe von Varianten

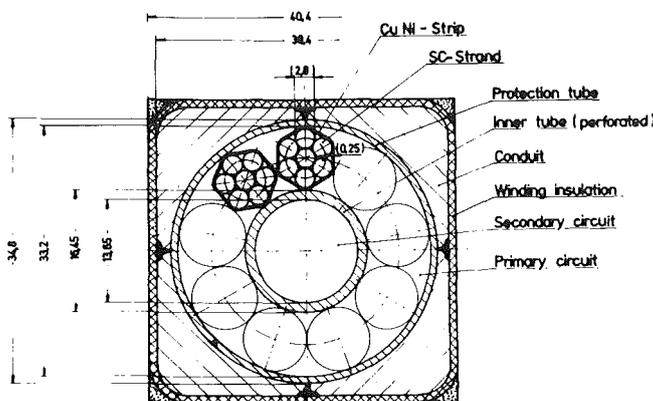


Abb. 13: Entwurf eines supraleitenden Poloidalfeldleiters für NET (40 kA, 6 T)

beider Grundtypen gefertigt. Erste Biegeversuche an Leitern mit Kunststoffbandisolation der Subkabel ergaben Biegeradien von nur 240 mm, ohne daß Kurzschlüsse zwischen Subkabeln auftraten. Diese, noch weiter abzusichernden Ergebnisse, zusammen mit einem Vergleich der Herstellungsprobleme und dem mechanischen Verhalten, sind die Entscheidungskriterien für die 1987 endgültig zur Fertigung gelangenden Variante.

### 2.1.2 Stahlhülle des Leiterkabels

Kritisches Element der Hüllenfertigung ist der Schweißvorgang. Hier wurde aus zwei Gründen die Entwicklung eines Laserschweißverfahrens gewählt und vor der industriellen Anwendung zunächst am Institut erprobt:

- Das Vorhandensein nichtmetallischer Werkstoffe dicht unterhalb der Schweißnaht erfordert ein Verfahren mit exakt einstellbarer Schweißtiefe.
- Der erforderliche geringe Verzug des Leiters nach der Schweißung erfordert ein Verfahren mit geringer Wärmeintragung in die Umgebung.

Die nun bei den industriellen Entwicklungspartnern durchgeführten Schweißversuche ergaben, daß die Laserschweißung einer 1,5 mm dicken Stumpfnahht trotz Nahtunebenheiten durchführbar ist. Bei Toleranzen von ~ 0,1 mm Lücken und ~ 0,4 mm Kantenversatz konnte noch eine erfolgreiche Schweißung durchgeführt werden. Abb. 14 zeigt einen Versuch mit einem untergelegten Schutzblech (Schweißnahtdicke ~ 1,0 mm).

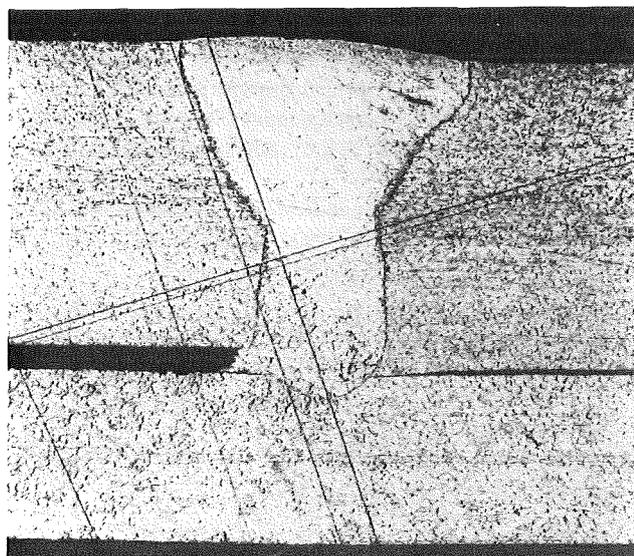


Abb. 14: Laserschweißnaht  
Schweißgutdicke 1,0 mm mit untergelegtem Schutzblech

Die Temperaturmessung kurz nach der Schweißung dicht unterhalb und oberhalb der Schweißnaht ergab Temperaturen von ~ 400° C. Die ersten mit zwei parallel arbeitenden Laserschweißstrahlen durchgeführten Horizontaldoppelschweißungen von zwei U-Profilen zeigten ebenfalls ermutigende Ergebnisse. Die U-Profile, die die Form der späteren

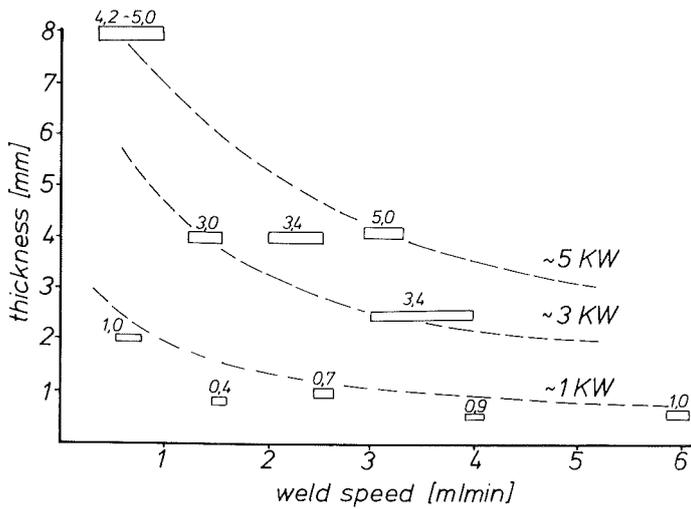


Abb. 15: Schweißnahtdicke für Leiterhüllenschweißung in Abhängigkeit von Schweißgeschwindigkeit und Laserleistung

Leiterhüllen besaßen, umschlossen dabei 1 : 1 Prototyp-Rundkabel und waren ~ 6000 mm lang. Sie wurden mit Hilfe einer Linearführungseinheit, die unabhängig vom Lasersteuerungssystem arbeitet, parallel geschweißt. Die zugrundeliegenden Parameter hinsichtlich der Eindringtiefe, Schweißgeschwindigkeit und Strahlleistung wurden durch die mit verschiedenen Lasergeräten im Institut gemachten Untersuchungen (Abb. 15) abgedeckt.

2.2 Absicherung des Leiterkonzeptes durch elektrische und mechanische Messungen

Bei den elektrischen Messungen standen Stabilitäts- und Wechselfelduntersuchungen an den Einzeldrähten (NbTi/Cu-CuNi-Multifilamentdraht) verschiedener Hersteller und an Subkabeln im Vordergrund (21435). Bei den Einzeldrähten

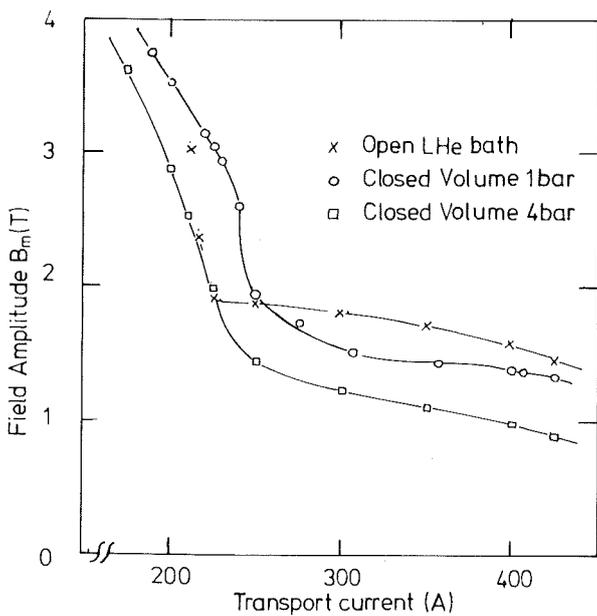


Abb. 16: Maximal zulässiger Feldpuls in Abhängigkeit vom Transportstrom des Drahtes für verschiedene Kühlbedingungen

wurden die Kühlbedingungen von flüssigem Helium, über flüssiges Helium in abgeschlossenem Volumen (Druck als Parameter), bis hin zum überkritischen Helium variiert. (Abb. 16 und 17). Die Ergebnisse können mit Hilfe der früher gemessenen Daten des transienten Wärmeüberganges gut erklärt werden.

Die Eigenschaften gelöteter Subkabelverbindungen im starken Wechselfeld, unter Transportstrom wurden ebenfalls untersucht, Abb. 17.

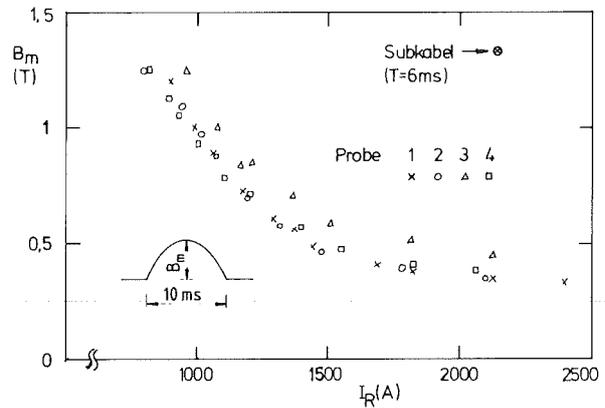


Abb. 17: Maximal zulässiger Feldpuls in Abhängigkeit vom Transportstrom des Subkabels für verschiedene Verbindungsarten (Proben 1-4)

Abb. 18 zeigt noch den Übergangswiderstand. Ferner wurde die Abschirmwirkung eines Cu-Zylinders um die Verbindung gemessen. Die Messungen zeigten, daß die Spezifikationen für maximale Verluste des Leiters auch an den Verbindungen erfüllt werden können

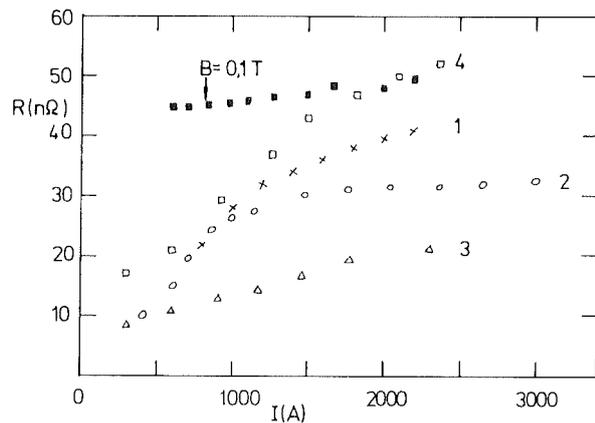


Abb. 18: Übergangswiderstand der Lötverbindungen 1 - 4 von Abb. 17, in Abhängigkeit vom Transportstrom. Probe 4 wurde zusätzlich in einem externen Magnetfeld von 0,1 T gemessen.

Bei den mechanischen Untersuchungen standen die Subkabelisolationssysteme NKN und GKG im Vordergrund. Die bei RT und 77 K durchgeführten Untersuchungen ergaben folgende Resultate: Die Schwachstelle des NKN-Systems ist das Nomex, das im Schermode im Inneren versagt. Dagegen ist

die Schwachstelle bei GKG die Klebeverbindung Glas/Kapton. Scherspannungen  $> 25$  MPa bei 77 K konnten für GKG mit einfach überlappten Verbindungen nachgewiesen werden. Die Klebung hierbei war  $\sim 10$   $\mu\text{m}$  dick und bestand aus einer Polyester/Epoxy-Harz-Mischung. Diese Klebung hatte jedoch bei RT im Vergleich zu 77 K eine um ca. den Faktor 3 geringere Scherfestigkeit. Reine Epoxy-Klebung zeigen dagegen niedrigere Scherfestigkeiten.

2.3 Absicherung des Leiter- und Spulenkonzeptes durch kryotechnische Untersuchungen

Die 1985 begonnenen Untersuchungen zur Zwei-phasenströmung mit flüssigem Helium wurden mit 2 Experimenten an einer Teststrecke in der TOSKA-Anlage fortgesetzt. Im ersten Test wurde die stationäre Heliumströmung bei adiabatischen und nicht adiabatischen Bedingungen untersucht. Mit Hilfe der speziell hierfür erstellten Auswerteprogramme konnte nachgewiesen werden, daß sich die Meßergebnisse ausreichend genau mit dem homogenen Modell korrelieren lassen (V22555, V22762). Beim 2. Test wurde vor allem untersucht, wie sich Heizpulse auf den Betrieb der Strecke auswirken.

Es zeigte sich, daß bei den im Tore Supra zu erwartenden Pulslasten mit relativ hohem Massenstrom gefahren werden muß, d.h. Austrittsdampfgehalte  $< 50$  %. Andernfalls ist nicht gewährleistet, daß im Kanal immer ausreichend Flüssigkeit vorhanden ist. Dies erfordert deshalb für Tore Supra den Einsatz einer Pumpe mit der Helium zirkuliert werden kann. Beim 2. Testlauf wurde auch erstmals die zusammen mit der Universität Bochum gebaute x-Meßzelle erfolgreich getestet.

Damit ist nun eine direkte Messung des Volumendampfgehalts in der Strömung möglich. Zwei weitere Meßgeräte, eine Temperaturmeßstrecke zur Messung der Wandtemperatur an 4 Stellen am Umfang und 2 Sichtmeßstrecken zur direkten Beobachtung der Strömung wurden zusätzlich eingebaut und werden bei weiteren Testläufen benutzt. Diese beiden Geräte wurden durch die französischen Partner CEN Grenoble bzw. Saclay bereitgestellt.

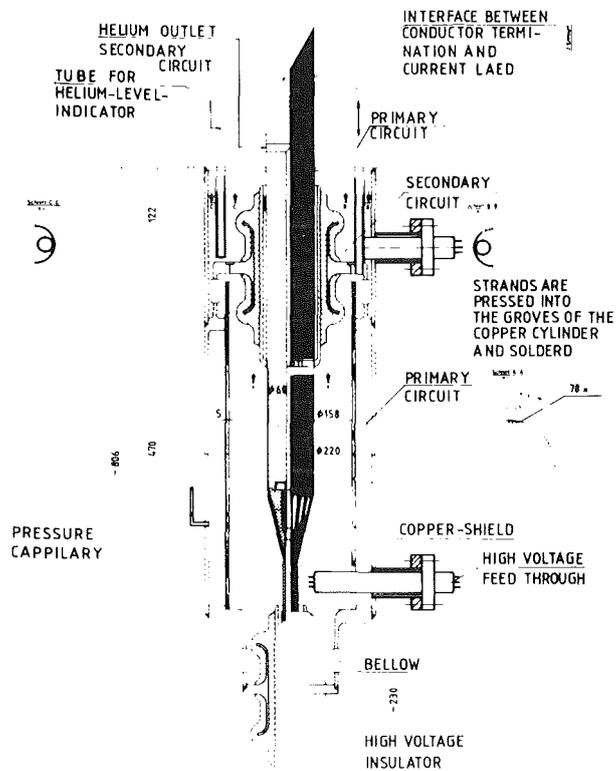


Abb. 19: Leiterendverschluß mit zylindrischen Potentialtrennern

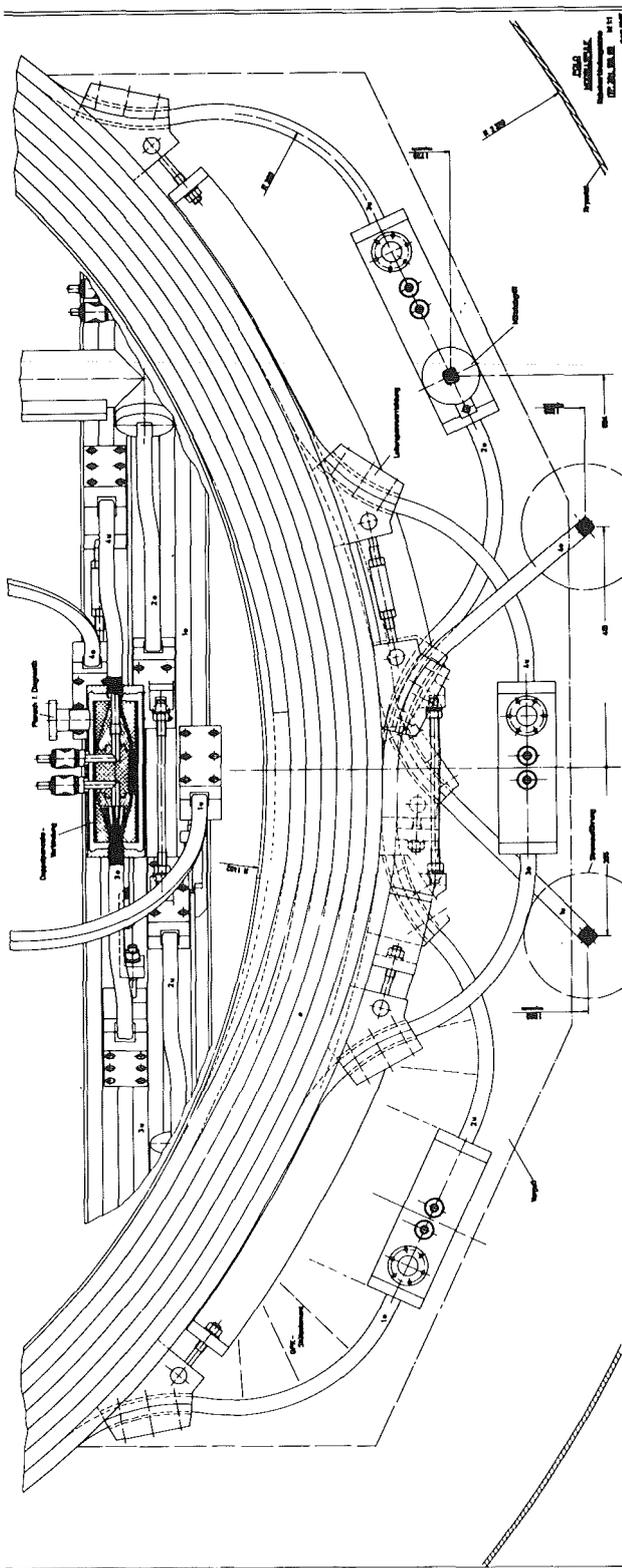


Abb. 20: Verbindungszone der Modellspeule

## 2.4 Konstruktion der Modellspule (V23047)

Für alle Komponenten der Modellspule wurden Konstruktionsentwürfe erarbeitet. Besonderes Augenmerk wurde auf kritische Komponenten, wie Leiterendverschluß mit Potentialtrenner (Abb. 19) und Leiterverbindungszone (Abb. 20) gelegt.

Die Konstruktionsentwürfe dienten als Basis für ausführliche Diskussionen mit der europäischen Industrie, danach für Erstellung der Spezifikationen für Ausschreibung und letztlich für Vergabe von Detailkonstruktion und Fertigung.

## 2.5 Hochspannungsmäßige Konstruktionsabsicherung

Die Betriebsspannung der Modellspule (und der Tore Supra Spule) von 23 kV erfordert entsprechende Untersuchungen der Isolationssysteme und der Hochspannungskomponenten auf Teilentladungsfreiheit.

Zur Durchführung solcher Messungen im Tieftemperatur-Hochspannungslabor wurden deshalb Verbesserungen an Filtern und der Wechsellspannungsversorgung vorgenommen. Teilentladungsmessungen können jetzt auch für schmale Bandbreiten einwandfrei durchgeführt werden. Für die Untersuchungen bei tiefen Temperaturen wurde ein neuer Verdampferkryostat entwickelt.

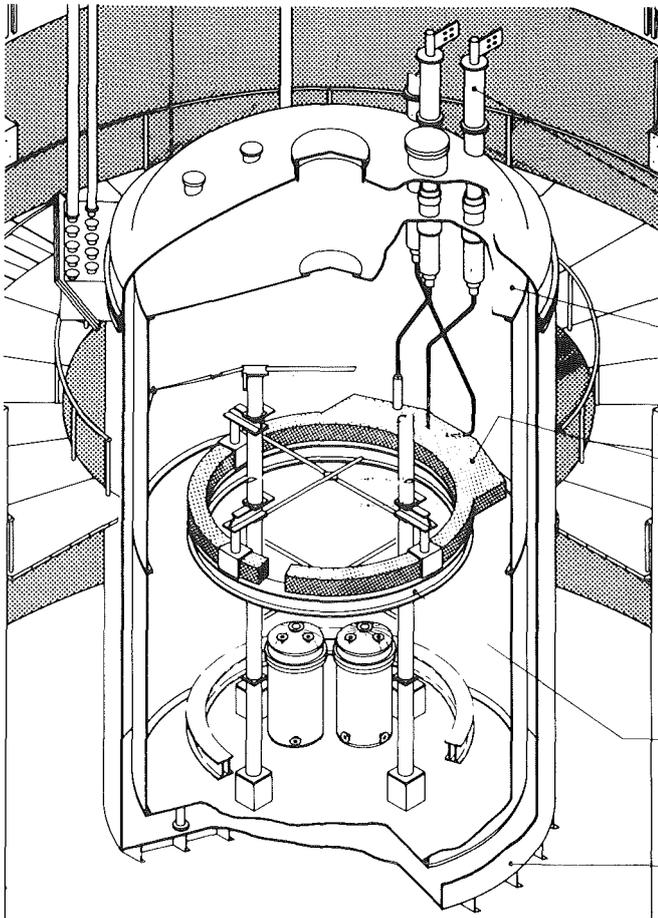


Abb 21: Anordnung der POLO-Modellspule in TOSKA

## 2.6 Planung der Modellspulentests in TOSKA

Für die Einbringung und Aufhängung der Modellspule in die TOSKA-Anlage wurden Konstruktionsentwürfe erstellt (Abb. 21). Dabei wurde die Anordnung eines elektrisch leitenden Kurzschlußringes, parallel zur Modellspule, mit vorgesehen.

Durch die induktive Ankopplung werden beim Schaltvorgang im Kurzschlußring Ströme angeworfen, die mechanische Kräfte zwischen Ring und Modellspulenwicklung verursachen. Aufgrund der Spulenaufhängung an nur 3 Punkten kommt es zu einer Durchbiegung der Wicklung mit Scherkräften zwischen den Windungen. Die induktive Kopplung, bzw. die resultierenden Ströme und Kräfte werden nun so eingestellt, daß die bei Tore Supra zu erwartenden Scherspannungen auftreten und so ein realistischer Test der mechanischen Wicklungskräfte erfolgt.

Für den kryotechnischen Betrieb wurde ein detailliertes Schema mit allen verfahrens- und meßtechnischen Einzelheiten erarbeitet. Eine moderne programmierbare Steuerung für die Meß- und Regeltechnik wurde ausgewählt und beschafft. Damit lassen sich zukünftig die wechselnden Anforderungen beim Experimentierbetrieb wesentlich einfacher beherrschen. Die Entwicklung einer 30 kA, 22 kV Stromzuführung wurde begonnen.

Zusammen mit der Abt. HDI wurden Vorarbeiten für die zukünftige meßtechnische Ausstattung der Modellspule insbesondere die Hochspannungsmessmodule und die Umstellung des Datenerfassungssystems auf den VAX-Rechner begonnen.

## 2.7 Entwurfsarbeiten für die Tore Supra Spule

Alle Konstruktionselemente der Modellspule sind so erarbeitet und mit dem Partner CEA diskutiert worden, daß sie unmittelbar für die Tore Supra Spule angewandt werden können. Die Vorentwurfsarbeiten konzentrierten sich deshalb auf 2 Entwürfe für das Vakuumgehäuse und die Aufhängung der ES-Spule in TORE-SUPRA. Ausgewählt wurde schließlich der Entwurf mit 6 Stützen am Umfang. Dieser Entwurf wird nun detailliert untersucht.

Für die Stromzuführung an der ES-Spule wird von CEA (Grenoble) eine Stromzuführung für 15 kA entwickelt, die 1987 im ITP getestet werden soll.

## 3. Das Experiment TESPE-S zum Sicherheitsverhalten von Magnetsystemen

Beim Betrieb von supraleitenden Magnetsystemen kann es zu Störungen kommen, deren letzte Folge die Zerstörung eines Magneten sein kann. Die hierbei in einem Lichtbogen freigesetzte Energie kann zu einer Schädigung der Magnet-Umgebung führen. Ursachen und Ablauf der Störungen, ihre Detektion und Identifikation sowie die möglicherweise zerstörerischen Folgen sollen in TESPE-S untersucht werden. Über Code-Entwicklungen und -Verifizierungen am TESPE-S-Experiment wird versucht, die Ergebnisse auf andere, größere Magnetsysteme zu übertragen. Hierzu werden zunächst die

Fehler in getrennten Experimenten gezielt simuliert bzw. eingebaut und nicht-zerstörende Tests durchgeführt. Die Arbeiten reichen vom Zusammenbruch des Isoliervakuaums über Stromleiterkurzschlüsse und Kühlmittelverlust bis hin zur Erzeugung von Lichtbögen. Der experimentelle Abschluß am TESPE-S-Experiment besteht in dem Versuch, an einer Spule die Beherrschbarkeit eines zerstörenden Lichtbogens zu zeigen.

Die Arbeiten im Berichtszeitraum umfaßten den Abschluß der Buckling-Untersuchungen (V23714), ein Experiment zum Vakuumzusammenbruch mit Heliumgas bis  $10^4$  Pa, die Simulation des vollständigen Ausfalls einer Spule, den Kurzschluß einer Spule (V22766) sowie erste Versuche zum Ausfall der He-Kühlmittelversorgung.

### 3.1 Magnetoelastisches "Buckling"

Die Buckling-Untersuchungen wurden experimentell und theoretisch erfolgreich abgeschlossen. Nachdem an einer speziellen, vereinfachten Modellspule mit TESPE-Spulen als Hintergrund die bisherige Theorie bestätigt und neue experimentelle Methoden erprobt worden waren, wurde es bei dem technologisch relevanten TESPE-S-Torus notwendig, einen verbesserten theoretischen Ansatz zu entwickeln, der die leicht verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Spulen berücksichtigt und auch gleichphasige Schwingungen nicht vernachlässigt. (Abb. 22, durchgezogene Kurve). Die beobachteten Eigenschwingungen des Torus und seiner Spulen ( $x$ ) folgten bei niedrigem Strom der theoretischen Voraussage, nahmen dann aber mit wachsendem Systemstrom erheblich zu. Da die Richtigkeit der Theorie zuvor nachgewiesen worden war, bleibt als Erklärung hierfür nur eine Versteifung der Spulenfixierung unter Magnetfeldeinfluß. Wie auch aus anderen Beobachtungen hervorgeht, versteift sich die zentrale Stützstruktur unter Einfluß der hohen, auf das Zentrum des Torus gerichteten Kräfte. Der Buckling-Strom verschiebt sich hierdurch von ursprünglich etwa 10 kA auf über 20 kA, so daß der Buckling-Effekt für TESPE-S keine Gefahr darstellt.

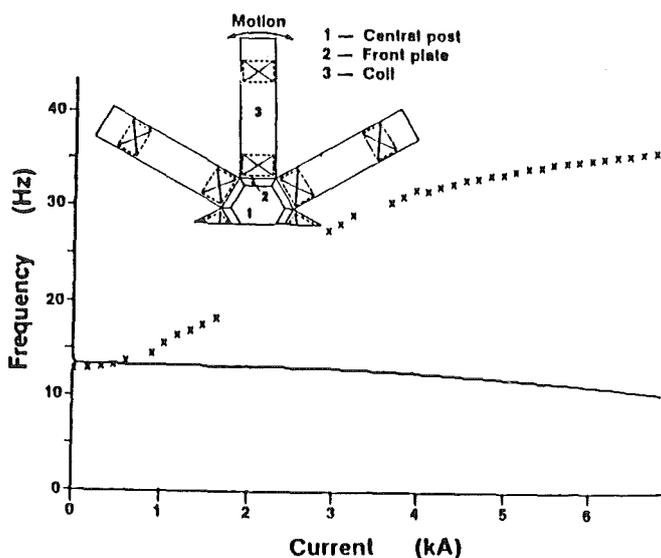


Abb. 22: Theoretische (-) und experimentelle Werte (x) der Eigenschwingungen als Funktion des Systemstroms und Aufsichtsskizze der Anordnung

Die Übertragung der Ergebnisse auf reaktorrelevante Systeme ergibt, daß das magnetoelastische Buckling bei der Auslegung zu berücksichtigen, andererseits jedoch ohne größeren Aufwand beherrschbar ist. Ein weiteres wesentliches Resultat ist, daß diese Methode der Eigenschwingungsmessung für die Detektion von mechanischen Fehlern im Torusbetrieb eingesetzt werden kann.

### 3.2 Vakuumzusammenbruch

Ein Vakuumzusammenbruch kann als Folge eines zerstörenden Lichtbogens auftreten. Er muß daher zunächst separat untersucht werden. Vor der Flutung des Vakuumraumes mit Heliumgas wird die Kälteanlage vom Torus abgetrennt, der dann an die Abgasleitung angeschlossen wird. Aufgrund der Erfahrungen bei den ersten Versuchen wurde die He-Abgasleitung im Querschnitt erheblich vergrößert.

Mit verschiedenen Druckanstiegsraten wurden bis zu  $10^4$  Pa Heliumdruck im Vakuumraum erzeugt. Die minimale Belüftungszeit betrug 2 min. Bei diesem Druck ist der Wärmetransport zwischen warmen und kalten Teilen des Systems bereits voll ausgebildet. Höhere Drücke im Vakuumraum bis hin zum Normaldruck wurden daher zunächst zurückgestellt, insbesondere weil hierbei Konvektion zu erwarten ist, die jedoch prinzipiell durch konstruktive Maßnahmen klein gehalten werden kann. Der beobachtete Druckanstieg im Heliumraum aufgrund der Verdampfung liegt - nicht zuletzt aufgrund des großen Abgasleitungsquerschnitts - bei nur wenigen  $10^4$  Pa und stellt damit keinerlei Gefährdung für das auf mehr als 0,5 MPa ausgelegte System dar.

### 3.3 Ausfall einer Spule

Der vollständige Ausfall einer Spule wurde dadurch simuliert, daß nur fünf Spulen betrieben wurden. Gemessen wurden asymmetrische Kräfte und korrespondierende Bewegungen der Spulen. Die auf den äußeren Stützringen beobachteten Kräfte sind zusammen mit den Bewegungen der Spulen in Abb. 23 dargestellt. Bei ca. 1000 A sind

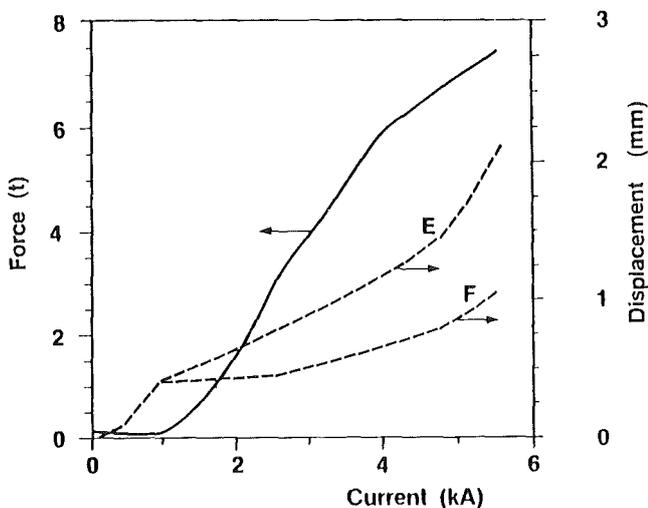


Abb. 23: Kraft zwischen den Nachbarspulen (E, F) der kurzgeschlossenen Spule A und azimuthale Bewegungen

die Spalte im Stützring geschlossen und der Kraftaufnehmer zwischen Nachbarspulen der ausgefallenen Spule registriert eine quadratisch mit dem Strom anwachsende Kraft. Die bei höheren Strömen registrierte Reduktion des Anstiegs wird auf eine zunehmende Übernahme des Drehmoments durch Spulhalterung und zentrale Stützstruktur zurückgeführt. Dieser Effekt wird, im Einklang mit den Beobachtungen bei den Buckling-Untersuchungen, durch die zentrierenden Toruskraften verursacht.

### 3.4 Kurzschluß über einer Spule

Zur Untersuchung der Folgen eines Kurzschlusses über einer Spule wurde eine Spule mit einem Widerstand von ca.  $0,7 \mu\Omega$  kurzgeschlossen. Dieser im Vakuumraum angeordnete Widerstand wurde mit einem Heliumkühlkreis ausgerüstet, damit die bei Betriebsstrom von 7 kA auftretende Leistung von 34 W nicht zu Temperaturerhöhungen im supraleitenden Anschluß führen kann. Das Diagramm von Abb. 24 zeigt den Operationsbereich dieser Anordnung. Aufgetragen ist der Strom in der kurzgeschlossenen Spule A über dem Systemstrom. Begrenzt wird der Bereich durch die maximal

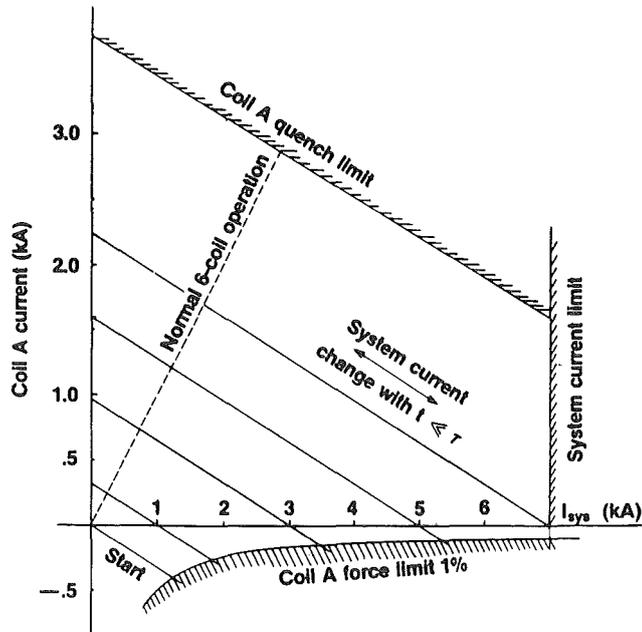


Abb. 24: Betriebsdiagramm von TESPE-S mit einer kurzgeschlossenen Spule A. Strom in Spule A als Funktion des Systemstroms.

zulassene Temperatur in der Spule A, durch den maximalen Betriebsstrom und durch die maximal zulässige, radial nach außen gerichtete Kraft auf Spule A. Diese Kraft entsteht beim Hochfahren des Systems, wobei in Spule A ein negativer Strom induziert wird. Gemessen wurden Induktivitäten und Stromverteilungen. Messungen und Rechnungen stimmten gut überein.

### 3.5 Kühlmittelausfall

Bei ersten Experimenten zum Kühlmittelausfall wurde eine ausgewählte Spule auf erhöhte Temperaturen zwischen 5,8 K und 8,0 K gebracht und anschließend das System bis zum

Quench dieser Spule hochgefahren. Vorläufige Auswertungen zeigten, daß sich die Spule auch bei erhöhter Temperatur gegenüber möglichen Störungen beim Auferregen stabil verhielt. Damit kann durch geeignete Auslegung der Spulen eine genügend große Zeitmarge für das Abschalten im Störfall gewährleistet werden.

### 4. Planung einer TOSKA-Anlagenerweiterung für NET-Magnetwicklungstests ("TOSKA-Upgrade")

Die Überlegungen und Abschätzungen betreffs einer relevanten, aber kostenmäßig vertretbaren Anordnung für den Test von Modellwicklungen der NET-Spulen wurden fortgesetzt. Dabei sollen die in der NET-Planung vorgesehenen Prototypplängen der Leiter (je  $1,5 + 2$  km, als Ergebnis der industriellen Leiterentwicklung) eingesetzt werden und der Einbau in den TOSKA-Kryostaten erfolgen. Zwei Konfigurationen wurden näher untersucht (Abb. 25):

- "Cluster-Anordnung" mit 2 LCT-Spulen zur Erzeugung des Hintergrundfeldes und dazwischen die Testwicklungen aus TF-Spulen, bzw. OH-Spulenleiter. Mit ausführlichen Feldberechnungen konnte eine Konfiguration gefunden werden, die unter den gegebenen geometrischen Randbedingungen und den elektrischen Maximalwerten der LCT-Spulen die geforderten 11 T am Leiter der Testwicklungen ergibt.
- "Solenoid-Anordnung", bestehend aus drei zusammengesetzten Solenoid-Wicklungen der zu untersuchenden TF- und OH-Spulenleiter, mit ca. 3 m Durchmesser und einem Maximalfeld von 12 T.

Für beide Konfigurationen wurden Kraft- und Spannungsberechnungen durchgeführt, um sowohl Grenzen als auch die simulierbaren Werte festzustellen. Ferner wurde mit dem IT die Einbaumöglichkeit in den TOSKA-Kryostaten geprüft. Dabei zeigte sich z.B., daß bei der Cluster-Anordnung für die Installation der Testwicklungen die Behälterwand und die  $LN_2$ -Schildwand ausgebaut werden muß und wegen der begrenzten Platzverhältnisse für Installation und Vortests mit

Cluster-Configuration

Solenoid-Configuration

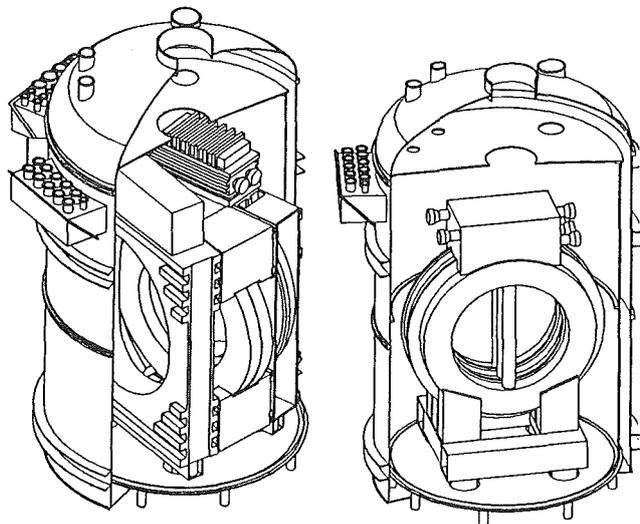


Abb. 25:

erheblichem Zeitaufwand zu rechnen ist. Es wurden erste Verfahrensentwürfe zur Kühlung der Spulen und Stromzuführungen erstellt und Abschätzungen zum optimalen Helium-Massenstrom sowie zur notwendigen Kälteleistung vorgenommen.

Die Clusteranordnung erfordert - bedingt durch die LCT-Spulen - einen höheren He-Massenstrom mit 3,5 K Eintrittstemperatur gegenüber 4,2 K bei den Solenoiden aus Nb<sub>3</sub>Sn. Für die Kühlung der Stromzuführungen ist der Kältebedarf der Solenoidlösung höher, so daß für beide eine 4,5 K äquivalente Kälteleistung von ca. 2,7 kW benötigt wird. Die abzukühlende Masse der Clusteranordnung ist 130 x 10<sup>3</sup> kg, die der Solenoidkonfiguration ca. 80 x 10<sup>3</sup> kg.

Für die weitere Detaillierung der beiden Konfigurationen mit Vergleich der Testmöglichkeiten, der Kosten- und Terminpläne, liegt ein NET-Studienauftrag vor, der gemeinsam mit dem am Experiment interessierten EURATOM-Labors ECN, ENEA Frascati, SIN bearbeitet wird.

#### 5. Neue Kälteanlage

Zur langfristigen Kälteversorgung für die Supraleitungsexperimente des ITP und auch als Ersatz für eine der vorhandenen 300 W-Anlagen, die bereits über 15 Jahre alt sind, soll eine leistungsstarke, vielseitig einsetzbare He-Kälteanlage erstellt werden. Bei der Planung dieser neuen Anlage wird in erster Linie von der Spulenanordnung für NET-Leiter-Testeinsätze in der Magnetversuchsanlage TOSKA-Upgrade ausgegangen. Auf dieser Basis, mit einem Refrigeratorbedarf bei 3,3 K und 4,4 K, sowie einem hohen Verflüssigungsanteil wurde das Konzept einer flexiblen He-Tiefertemperaturanlage mit einer 4,4 K-äquivalenten Kälteleistung von 3 kW erstellt, die sowohl als Refrigerator als auch als He-Verflüssiger und im Misch-Betrieb eingesetzt werden kann.

Nach der Erstellung eines Grobkonzepts wurde die im ITP begonnene Vorplanung durch Zusammenarbeit mit einschlägigen europäischen Industriefirmen fortgesetzt. Als Basis dient vorrangig die Cluster-Spulenordnung für NET-Leiter-Testeinsätze. Hierbei wird bei Vollast, also bei Strombetrieb der Spulen, von einer erforderlichen Kälteleistung von 1 kW bei 3,3 K und von 1,5 kW bei 4,4 K ausgegangen, wobei die Stromzuführungen mit 8 g/s flüssigem Helium aus einem Speichertank versorgt werden sollen, der im Standby-Betrieb (Spulen ohne Strom) wieder aufgefüllt wird. Diese Kälteanlage muß auch in der Lage sein, Magnete mit einem Gesamtgewicht von 160 t in rd. 200 h kaltzufahren und sie soll zudem leicht an neue Experimente anpaßbar sein. Die Vorplanung mit den Herstellern beinhaltet die eigentliche He-Kälteanlage, die Versorgungsanlagen, das Prozeßautomatisierungssystem und eventuelle Gebäude.

Inzwischen liegen erste Ergebnisse zur Verfahrensauswahl, zu den Hauptkomponenten und zur Kostenschätzung vor. Ein Gebäudeentwurf zeigt den erforderlichen Platzbedarf und die architektonische Einfügung in die Umgebung auf. Die Vorplanungen werden im kommenden Frühjahr inkl. detaillierten Kostenschätzungen abgeschlossen. Die Ergebnisse dienen dann als Grundlage für die Entscheidung über den Bau der Anlage.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
19957	03.03.02/24A	H. Bayer
20175	03.03.02/24B	M. Beckenbach
20465	03.03.02/25A	F. Becker
20727	03.03.02/25B	P. Duelli
21244	03.03.02/26A	Dr. J. Erb (30.6.86)
21327	03.03.02/27A	DI. S. Förster
21433	03.03.02/28A	DI. G. Friesinger
21435	03.03.02/28B	Y. Han
	03.03.02/28C	DI. R. Heil
V 22555	03.03.02/28D	DI. W. Herz
V 22600	03.03.02/29A	Dr. A. Hofmann
V 22762	03.03.02/29B	DI. L. Hütten
V 22766	03.03.02/29C	<u>Dr. U. Jeske</u> (für 2.)
V 22840	03.03.02/29D	<u>Dr. K.P. Jüngst</u> (für 3.)
V 23039	03.03.02/29E	A. Kayser (1.6. - 30.9.86)
V 23041	03.03.02/29F	DI. H. Katheder
V 23042	03.03.02/29G	H. Kiesel
V 23047	03.03.02/29H	DI. W. Lehmann
V 23051	03.03.02/29I	Dr. G. Leppelmeier
V 23052	03.03.02/29J	DI J. Lühning
V 23053		Dr. W. Maurer
V 23413		DI. G. Nöther
V 23488		Dr. A. Nyilas
V 23714		G. Obermaier
		H. Raber
		L. Schappals
		Dr. G. Schenk
		Dr. C. Schmidt
		K. Schweikert
		DI. L. Siewerdt
		<u>DI. F. Spath</u> (für 5.)
		E. Specht
		H.J. Spiegel
		E. Süß
		DI. M. Süßer
		<u>Dr. A. Ulbricht</u> (für 1.)
		A. Vogt
		R. Wagner
		D. Weigert
		DI. F. Wüchner
		Ch. Yi
		<u>DI. G. Zahn</u> (für 4.)
		<u>H-IT:</u>
		DI. A. Grünhagen
		DI. E. Lotz
		<u>HDI:</u>
		DI. K. Rietzschel
		DI. W. Heep
		<u>IDT:</u>
		DP. W. Geiger
		<u>IRE:</u>
		DI. H. Schnauder
		<u>KTB:</u>
		M. Oehmann
		J. Seibert

**Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)**

Rechnereinsatz an der Versuchsanordnung TESPE

Lenkt in einem toroidalen Magnetsystem eine Spule seitlich aus, dann wirkt auf diese Spule eine magnetische Kraft, die sie weiter auslenken will und die proportional zur Auslenkung und zum Quadrat des Stroms ist. Diese Kraft kann durch eine negative magnetische Steifigkeit beschrieben werden, die sich der positiven elastischen Steifigkeit der mechanischen Stützstruktur überlagert. Wenn der Strom in den Spulen einen kritischen Wert überschreitet, dann wird die Gesamtsteifigkeit negativ und damit die Magnetanordnung mechanisch instabil. Dieser Effekt wird magnetoelastisches Buckling genannt und ist insbesondere für die mechanische Stabilität des toroidalen Magnetsystems in großen Tokamak-Fusionsanlagen von Bedeutung.

Das supraleitende toroidale Magnetsystem TESPE bot zum erstenmal die Möglichkeit, experimentelle Untersuchungen des Bucklings an einem in Aufbau und Größe technologisch relevanten Torussystem vorzunehmen. Im Jahr 1986 wurden die 1985 durchgeführten Messungen an TESPE ausgewertet und Modellrechnungen zum Buckling-Verhalten durchgeführt. Die Modellrechnungen zeigten, daß es zu einem beträchtlichen Fehler bei der Berechnung des Buckling-Stroms führen kann, wenn man wie in den bisherigen Untersuchungen vereinfachend annimmt, daß die magnetischen Kräfte zwischen den Spulen nur von den Differenzen der Spulenauslenkungen abhängen. Daher wurde eine verallgemeinerte magnetische Steifigkeitsmatrix abgeleitet und bei den numerischen Rechnungen verwendet. Die Auswertung der Messungen an TESPE ergab, daß es unter der Wirkung der hohen Zentralkräfte auf die Spulen zu Veränderungen in der zentralen Stützstruktur und als Folge davon zu einer Stromabhängigkeit der elastischen Steifigkeiten kommen kann. Die Bestimmung des Buckling-Stroms aus den gemessenen elastischen Steifigkeiten beim Strom Null ist deshalb mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet. Zur Kontrolle der mechanischen Stabilität und strukturellen Integrität im Betrieb wird eine Überwachung der Eigenfrequenzen der seitlichen Eigenschwingungen vorgeschlagen. Die Überwachung der Eigenfrequenzen im Betrieb hat sich bei den Messungen an TESPE als ein geeignetes Mittel erwiesen, um Änderungen in der Gesamtsteifigkeit feststellen zu können.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
21327	03.03.02P24A	Dipl.-Phys. W. Geiger
V23714	03.03.02P24B	
V22766		

**Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)**

Berechnung des TESPE-Systems mit Finitelementen

Die festigkeitstheoretische Berechnung des unsymmetrischen Lastfalles, der durch den Ausfall einer Spule gekennzeichnet ist, wurde zum Abschluß gebracht. Der Einfluß verschiedener Modelle zur Kopplung von Spule und Gehäuse mit der äußeren Stützkonstruktion auf die Kraftübertragung wurde untersucht. Von besonderem Interesse waren die zu erwartenden Dehnungen und Verschiebungen als Folge unterschiedlicher Kopplungskonzepte.

Die Rechnungen wurden mit dem neuen FEM-System PERMAS ausgeführt. Verifikationsstudien waren nötig, um den Anschluß an das alte FEM-System herzustellen. Mit der Implementierung des Systems PROLOG wurde begonnen. Mit ihm wird das Pre- und Postprozessing der eigentlichen FEM-Rechnungen wesentlich erleichtert.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter:
21327	03.03.02 P 22A	A. Grünhagen

Vorhaben  
**03.03.03 Hochfeldmagnete und Magnet-  
 technik**

**Institut für Technische Physik (ITP)**

Zweck dieses Vorhabens ist es, Technologien für den Bau von supraleitenden Hoch- und Höchstfeldmagneten zu erarbeiten, wie solche in der Fusion für spezielle Spulen gefordert werden. Die zentrale Einrichtung für die Entwicklungsarbeiten und die Untersuchungen von Leitern in Probewicklungen ist die Hochfeld-Magnet-Einrichtung HOMER. In dieser coaxialen Anordnung von Solenoidspulen werden neue Leiter ausgetestet. Dabei konnte im Berichtsjahr ein Maximalfeld von 19,3 T erreicht werden.

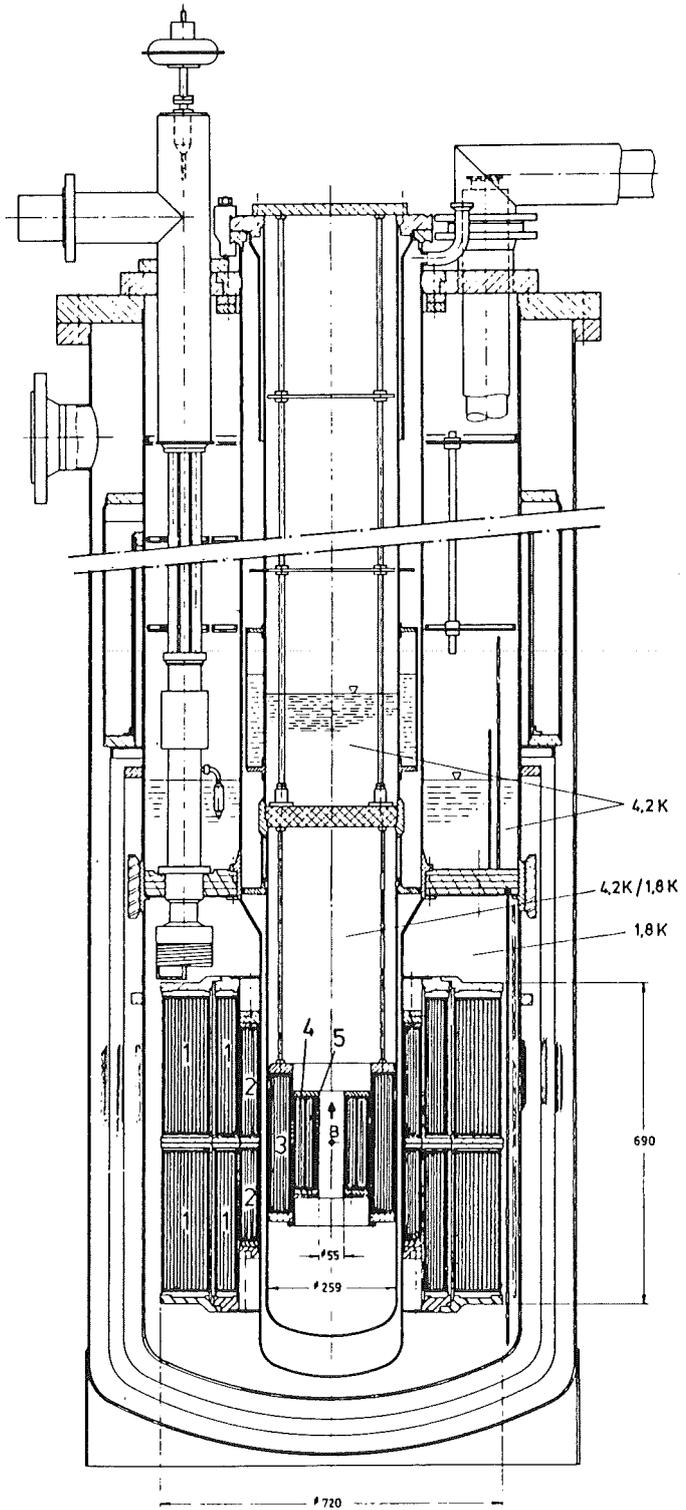
**1. HOMER Höchstfeldausbau**

Der Ausbau der HOMER Magnettestanordnung zu höchsten Magnetfeldern mit Einsatzspulen aus fortgeschrittenen Nb<sub>3</sub>Sn-Multifilamentleitern war seit längerer Zeit in Vorbereitung. Da bei diesen Leitern der eigentliche Supraleiter Nb<sub>3</sub>Sn erst durch eine Wärmebehandlung bei ca. 700 °C über einen Feststoffdiffusionsprozeß entsteht und bekannt spröde ist, gibt es für den Spulenbau mit Nb<sub>3</sub>Sn-Leitern zwei Techniken: die Spule erst wickeln und dann als Gesamtheit der Reaktionsglühung unterwerfen ("wind and react") oder zunächst den Leiter reagieren und dann wickeln ("react and wind"). Beide Techniken sind mit Problemen behaftet. Im ersten Fall ist es die Beständigkeit der Leiterisolation gegenüber den hohen Reaktionstemperaturen und im zweiten Fall die Brüchigkeit und begrenzte Biegsamkeit des Nb<sub>3</sub>Sn-Leiters. In den Nb<sub>3</sub>Sn-Ausbaustufen von HOMER sind beide Techniken entsprechend den Bedürfnissen der Betriebssicherheit und den geometrischen Möglichkeiten eingesetzt worden.

Eine 14,5-T-Spule mit einer Länge von 30 cm und einem Innendurchmesser von 168 mm wurde aus einem reagierten Nb<sub>3</sub>Sn-Leiter gewickelt, um diese Spule mit Kühlkanälen LHe-transparent aufzubauen und damit ein Maximum an Betriebssicherheit durch kryogene Stabilität des Supraleiters zu garantieren. Über die Entwicklung eines geeigneten Leiters mit ausreichender elektrischer Stabilisierung durch ein angelötetes Cu-kaschiertes Aluminiumband war im vorangegangenen Jahr berichtet worden. Begleitende Messungen an den Verbundleitern in ein- und mehrlagigen Testspulen haben bewiesen, daß er sich unter Einhaltung von mechanischen Grenzwerten auch nach der Reaktionsglühung, ohne Degradation des kritischen Stromes, verarbeiten läßt. Nach Fertigung der Gesamtlänge (1000 m) beim Industriepartner (VAC) konnte die 14,5-T-Spule gewickelt werden. Sie erreichte in den Messungen dann problemlos die Nenndaten.

Die beiden Höchstfeldeinsatzspulen aus einem (NbTa)<sub>3</sub>Sn-Leiter (VAC) bzw. einem (NbTi)<sub>3</sub>Sn-Leiter (Showa El.) wurden in der "wind and react"-Technik fertiggestellt, nachdem die Leiter in Abnahmemessungen ihre Spezifikationen erfüllt hatten. Zur Verbesserung der Wicklungsisolation wurde eine besondere Verfahrenstechnik entwickelt und in diesen Spulen eingesetzt.

Im gesamten Magnetsystem (s. Abb. 26) wurde nun mit einer Spule von 55 mm Innendurchmesser und dem (NbTa)<sub>3</sub>Sn-Leiter



**HOMER – Magnetsystem**

SL		B [T]	T [K]	freie Bohrung Ø [mm]
1	Nb Ti	10	1,8	390
2	Nb Ti Hf	12	1,8	290
3	Nb <sub>3</sub> Sn	15/-16	4,2/1,8	160
4/5	(Nb Ta) <sub>3</sub> Sn (Nb Ti) <sub>3</sub> Sn	~18/~19	4,2/1,8	55

**Abb. 26:** Querschnitt durch die HOMER-Testanlage mit eingebauten Höchstfeldeinsatzspulen.

bei 1,8 K ein Feld von 18,7 T und mit der Einsatzspule aus  $(\text{NbTi})_3\text{Sn}$  ein Feld von 19,3 T in einer Bohrung von 22 mm erzeugt. Diese Feldwerte wurden ohne Training erreicht und entsprechen gegenwärtig den höchsten erreichten Magnetfeldern in reinen Supraleitungs-Magneten.

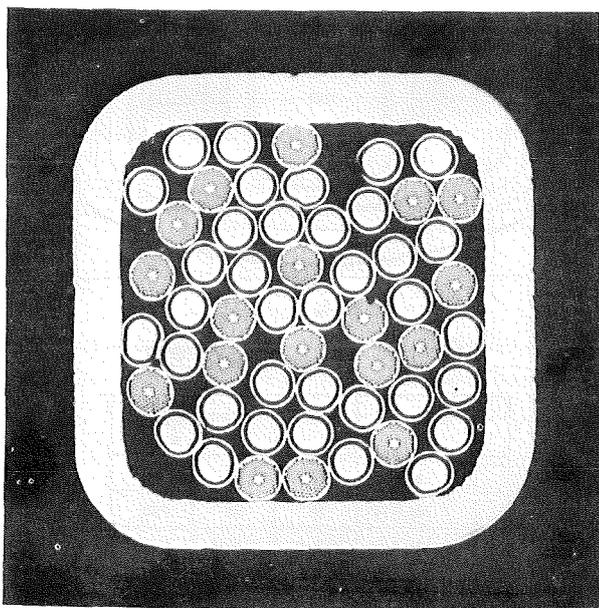
Essentiell für diese hohen Felder ist auch der Betrieb des gesamten HOMER-Systems bei 1,8 K. Das Kryostatsystem mit einem separaten Teil für die inneren Höchstfeldmagnete war zusammen mit dem CEN-Saclay erstellt worden. Am Innenteil waren im Berichtsjahr noch Verbesserungen kryoverfahrenstechnischer Art (Regelung, He-Transfer) vorzunehmen. Das gesamte System, gespeist vom Linde-Refrigerator, arbeitet inzwischen einwandfrei und liefert wertvolle Erfahrungen für diese Technik.

Bei beiden Einsatzspulen waren die kritischen Stromwerte im hohen Feldbereich und bei der Betriebstemperatur von 1,8 K unbekannt, so daß zunächst zur Auslegung nur extrapolierte Werte zur Verfügung standen, die als Maximalwerte nicht überschritten werden sollten. Als weiteres Kriterium wurde eine maximale Kraftbelastung festgelegt. Mit 150 MPa im 14,5-T-Einsatz und mit 160 MPa in der Höchstfeldteilspule (17 T) liegen die Zugspannungen in den Supraleitern auf einem ingenieurmäßig noch vertretbaren Wert.

Es steht nun ein Magnetsystem zur Verfügung, mit dem wichtige Kenndaten von technischen Supraleitern für Anwendungsbereiche bis über 19 T untersucht werden können.

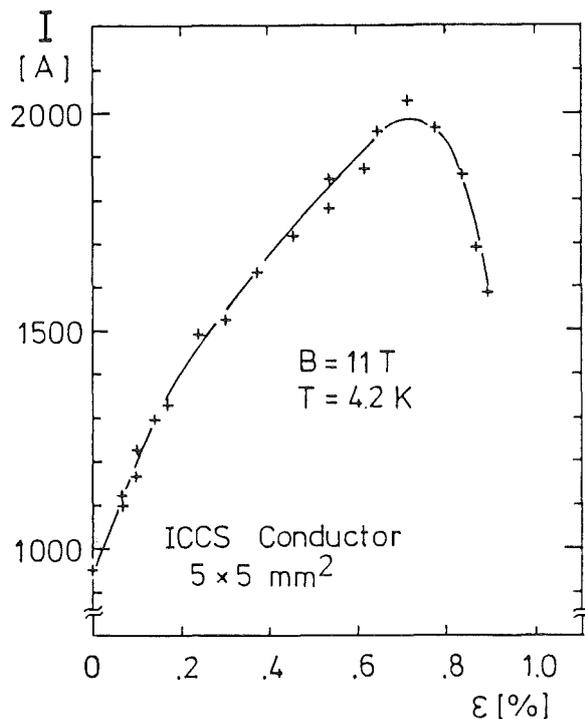
## 2. Magneto-mechanische Belastungsuntersuchungen

Für mechanische Belastungsuntersuchungen an einlagigen Spulen in einem äußeren Magnetfeld wurde eine spezielle Testapparatur in Betrieb genommen, die es erlaubte, neben den natürlichen Lorentzkraften auch noch zusätzliche mechanische Kräfte aufzuprägen (KfK 3899). Verschiedene, reaktionsgeglühte Leiterschleifen aus intern gekühlten Leitern, wie sie in



**Abb. 27:** Querschnitt durch einen Bündelleiter in einer Stahlhülle  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  mit 18 supraleitenden und 36 normalleitenden (Kupfer-)Strands.

vielen Fusionsmagnetsystemen - vor allem in USA - vorgesehen sind (Abb. 27), wurden untersucht. Ein erstes Resultat war eine starke Reduktion des kritischen Stromes durch den Kompressionseffekt der Stahlhülle auf das  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Kabel infolge des unterschiedlichen thermischen Kontraktionskoeffizienten (Abb. 28). Dies war aufgrund früherer grundlegender Untersuchungen am  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  auch erwartet worden. Die Möglichkeit, die Testschleifen gleichzeitig unter Magnetfeld, Strom und mechanischen Kräften zu betreiben, offenbarte zwischen den beiden untersuchten Leitertypen Unterschiede im Hinblick auf vorzeitig ausgelöste Normalleitung bei zunehmender Dehnung am Leiter. Das Kabel, in dem der Supraleiter  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ /Bronze und das Stabilisierungskupfer in separaten und sich nur berührenden Strands untergebracht war, zeigte eine Reihe von vorzeitigen Normalübergängen während des Anstiegs der mechanischen Kraft. Die Kabelprobe, bei der das Stabilisierungskupfer gleich im  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ /Bronze-Supraleiter integriert war, zeigte unter gleichen Versuchsbedingungen keine vorzeitigen Normalübergänge. Eine Abhängigkeit der Quenrhäufigkeit vom He-Gasdruck im Leiter kann nicht eindeutig nachgewiesen werden, da der Quench ein spontaner Vorgang ist und die Anzahl der Experimente noch keine ausreichende Statistik zuließ.



**Abb. 28:** Der kritische Strom  $I_c$  des Bündelleiters in Abhängigkeit von der Dehnung  $\epsilon$ , gemessen in einer Leiterschleife von 250 mm Durchmesser.

## 3. Messungen an fortgeschrittenen, industriellen $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Leitern

Es wurden vergleichende Messungen von kritischen Strömen an  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Leitern verschiedener Hersteller gemacht.

Ein Ergebnis war, daß sich die Leiter in ihrem resistiven Verhalten im Übergangsbereich zur Normalleitung ("n-Faktor")

deutlich von einander unterscheiden. Damit sind die einzelnen Nb<sub>3</sub>Sn-Leitertypen nicht für alle Anwendungen gleichwertig einsetzbar.

Weitere Messungen bezogen sich auf die Differenz des kritischen Feldes B<sub>c2</sub> zwischen 4,2 K und 1,8 K. Die Messungen zeigten, daß im hohen Feldbereich um 18 T die Temperaturabsenkung von 4,2 K auf 2,2 K bzw. 1,8 K bei ternären Nb<sub>3</sub>Sn-Legierungen (zunächst bei Ti-Zulegerungen gefunden) zu einer Erhöhung des kritischen Feldes von mehr als 2 T führt. Ausgedehnte Vergleichsmessungen zwischen (NbTa)<sub>3</sub>Sn- und (NbTi)<sub>3</sub>Sn-Leitern sind in Vorbereitung.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23681	---	DI W. Barth
21624		M. Beckenbach
V22536		R. Berggötz
		DI N. Brünner
		P. Duelli
		DI U. Fath
		DI S. Förster
		F. Gauland
		E. Gorenflo
		DI W. Lehmann
		B. Lott
		DI G. Nöther
		Dr. A. Nyilas
		H. Orschulko
		H. Raber
		Dr. T. Schneider
		S. Stumpf
		<u>Dr. P. Turowski</u>

## Vorhaben 03.03.04 Komponenten und Technologie

### Institut für Technische Physik (ITP)

Bei der Entwicklung großer Fusionsmagnete stehen unabhängig von Typ und Geometrie verschiedene technologische Entwicklungen im Vordergrund. Dies vor allem auf dem Gebiete der Materialien, speziell dem Supraleiter und den Tieftemperaturstrukturmaterialien, als auch bei der Kryotechnik, wie den Kühlverfahren mit HeI und HeII und verbesserten Komponenten und Bauteilen. Ein wesentlicher Teil der Arbeiten ist Bestandteil von EURATOM-Programmvorhaben für die Entwicklung der NET-Spulen.

#### 1. Hochfeldleiterentwicklung

Die verschiedenen Aufgabenstellungen haben dazu geführt, daß die klassische Bronze-Technik zur Herstellung von Nb<sub>3</sub>Sn-Vielkernleitern durch neue Methoden ergänzt wurde. Um die Erfolgchancen zu erhöhen, wurde das Arbeitsprogramm auf neue Supraleitermaterialien wie Nb<sub>3</sub>Al und PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> (Chevrel-Phasen) erweitert.

Ergänzend zu diesen Untersuchungen an einzelnen Drähten wurden auch verschiedene Modelleiter für die NET-TF-Spulen im reduzierten Maßstab hergestellt und getestet.

Die fertigungstechnische Entwicklung des Prototypleiters für die NET-TF-Spulen wurde begonnen.

#### 1.1 Labortechnische Voraussetzungen

Die Zugapparatur für den Betrieb bei 100 kN und 10 kA am Hochfeldleiterteststand wurde in Betrieb genommen. Sie erwies sich einschließlich Stromzuführungen als funktionsfähig. Die 100 kN-Spannköpfe müssen noch verbessert werden, da ab 50 kN Gleitbewegungen an den Kontaktstellen beobachtet werden. Im Hinblick auf Tests von Leitern mit ≤ 200 mm<sup>2</sup> Querschnitt (KfK-NET-Leiter, SULTAN-Leiter) wird die Anlage gegenwärtig auf Meßströme bis 10 kA erweitert.

Um für die Messung von I<sub>c</sub> vs.ε bei den sich in Entwicklung befindlichen Höchstfeldleitern bereit zu sein, wurde eine kleine Zugapparatur für den Betrieb bis 26 T gebaut und kürzlich im Hochfeldlabor in Grenoble erfolgreich getestet.

Das hochauflösende Augerspektrometer (im Gemeinschaftslabor mit dem IMF) wurde weiter ausgebaut. Es wurde ein Duoplasmatron für Ar<sup>+</sup>, O<sup>+</sup> und N<sup>+</sup>-Ionen eingebaut. Dazu wurde auch ein Quadrupol-Massenspektrometer zur Restgasanalyse im Bereich zwischen 10<sup>-4</sup> und 10<sup>-9</sup> Pa angeschlossen. Zur kontaminationsfreien Einführung von Proben unter Schutzgasatmosphäre wurde eine UHV-Probenschleuse gebaut. Zahlreiche, bei den ITP-Vorhaben anfallende Probleme wurden behandelt (Sn-Profiluntersuchungen an Nb<sub>3</sub>Sn-Schichten, quantitative Untersuchungen an Karbonfasern mit W- und Nb(C,N)-Beschichtung, qualitative Untersuchungen an pulvermetallurgisch hergestellten Nb/Ta-Proben).

## 1.2 Optimierung von $I_c$ in supraleitenden Drähten

Die Entwicklung von supraleitenden Drähten konzentriert sich auf mittlere Felder (10 - 12 Tesla) und höchste Felder ( $B > 18$  Tesla).

### 1.2.1 Leiter für den mittleren Feldbereich (10 - 12 T, NET-Anwendungsfall)

Es ist eine neue Methode zur Herstellung von  $(NbX)_3Sn$ -Leitern entwickelt worden, mit dem Ziel, höchste Stromdichtewerte zu erreichen. Bei dieser Methode, auf der Basis des Bronzeverfahrens, werden die Nb-Kerne durch einen Verbund aus Nb + Ta-Pulvern ersetzt, die sich beim Drahtziehen zu Filamenten verformen. Die Nb und Ta Pulverpartikel ( $< 120 \mu m$ ) und deren relativer Anteil (15 Gew. % Ta) wurden so gewählt, daß bei Erreichen der Enddurchmesser der Abstand zwischen benachbarten Ta-Filamenten kleiner als die typische A15-Korngröße wird:  $< 100$  nm. Während der Glühreaktion reagieren die Nb-Filamente zu  $Nb_3Sn$ , während die nur teilweise reagierten Ta-Filamente als "Wände" übrig bleiben und somit das Wachstum der A15-Körner normal zur Drahtachse behindern. Dies führt zu erhöhter Pinningkraft und damit Stromdichte. Die erzielten Resultate haben die Erwartungen bestätigt. Dabei zeigte sich, daß die Glühtemperatur einen wesentlichen Einfluß auf die Löslichkeit von Ta in  $Nb_3Sn$  und damit auf die Stromtragfähigkeit der Drähte ausübt. Dies ist in Abb. 29 für 19-Kern-Drähte gezeigt.

Nach Reaktion bei  $675^\circ C$  verhalten sich die  $I_c$  vs. B-Kurven wie diejenigen von binären  $Nb_3Sn$ -Drähten (nahezu keine Reaktion

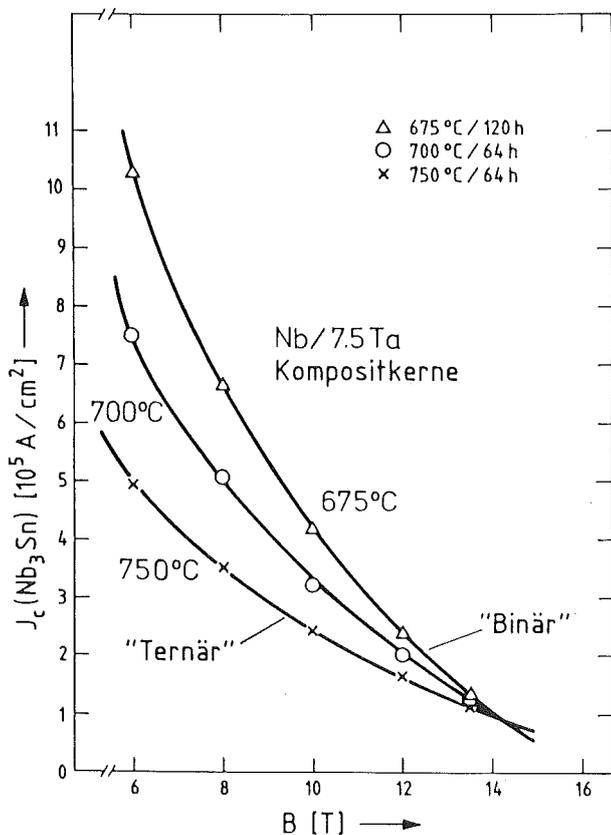


Abb. 29:  $I_c$  von 19-Kern- $Nb_3Sn$  Drähten mit Nb/Ta-Verbundkernen.

mit Ta), während nach  $750^\circ C$  beim selben Ausgangsdraht das typische Verhalten eines Drahtes mit schmelzmetallurgisch hergestellten Nb-Ta-Filamenten erhalten wird. Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß die im Bereich 10 - 12 T erzielte Verbesserung gegenüber den besten bisher bekannten  $I_c$ -Werten  $\sim 50$  % beträgt, womit Werte erreicht werden, die auch die Spezifikationen für andere Anwendungen, wie z. B. dem CERN-LHC-Projekt, erfüllen. Es wird zur Zeit versucht, Drähte größerer Länge herzustellen, um die neue Methode auf ihre technische Anwendbarkeit hin zu testen.

### 1.2.2 Leiter für den Höchstfeldbereich ( $B > 18$ T)

Die Entwicklung läuft sowohl in Richtung der Optimierung von  $Nb_3Sn$ -Drähten, als auch in Richtung der Entwicklung von Chevrelphasendrähten.

#### a) $Nb_3Sn$ -Drähte

Bereits im vergangenen Berichtsjahr war gefunden worden, daß größere Filamentabstände ( $D_F > 1 \mu m$ ) zu höheren Stromdichten im Höchstfeldbereich führen. Jetzt wurde der Beweis erbracht, daß dieser für industrielle Supraleiterdrähte wichtige Effekt auf einer Änderung des plastischen Verhaltens der Bronze beruht. Durch Messung von  $I_c$  als Funktion der Dehnung  $\epsilon$  bei verschiedenen Filamentabständen  $D_F$  konnte gezeigt werden, daß der Wert  $\epsilon_m$  für den "Prestress" bei  $S_F \leq 0.5 \mu m$  bis zu 0.6 % ansteigt, also wesentlich höher ist als bei  $D_F \geq 1 \mu m$ , wo  $\epsilon_m \sim 0.3$  % beträgt. Der Verlauf von  $\epsilon_m$  vs.  $S_F$  (Abb. 30) kann im verallgemeinerten Sinne als "Dispersionshärtung" bezeichnet werden. Somit ist die Verbesserung von  $I_c$

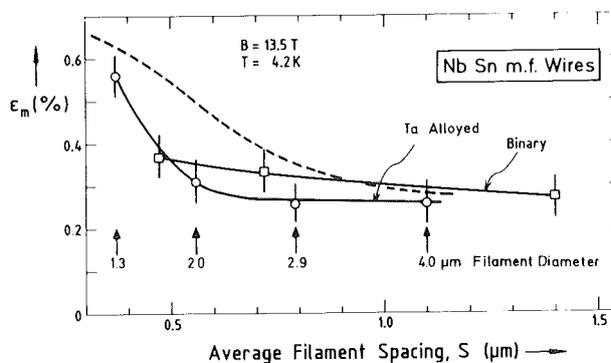


Abb. 30: Dehnung  $\epsilon_m$  für  $I_c$  (max) als Funktion des Filamentabstandes  $S_F$ .

bei  $> 18$  T für  $D_F > 1 \mu m$  durch größere Plastizität der Bronze und des damit verbundenen kleineren Kompressionsdruckes auf die Filamente erklärt.

#### b) Chevrel-Phasen-Drähte

Für die Fertigung supraleitender Drähte aus  $PbMo_6S_8$  (Chevrel-Phasen) in technischem Maßstab werden Materialmengen von mehreren Kilogramm benötigt, die mit herkömmlichen Verfahren nicht ökonomisch hergestellt werden können. Durch den Einsatz der HIP-Technik (Hot Isostatic Pressing) wurde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem solch große Mengen an  $PbMo_6S_8$  synthetisiert werden konnten. Die so erhaltenen

Blöcke haben eine nahezu 100 %ige Dichte und sind mechanisch bearbeitbar. Sie können nach Einsetzen in eine Matrix über Extrusionsverformung und Ziehen zu Supraleiterdrähten verarbeitet werden. Ein wichtiger Faktor bezüglich der Anpassung von Matrix und  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ -Filamenten stellt der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  dar. Deshalb wurde  $\alpha$  im Temperaturbereich  $10 \leq T \leq 1200 \text{ K}$  mittels Röntgendiffraktometrie gemessen. Wie in Abb. 31 gezeigt, weist dieses Material eine stark anisotrope thermische Ausdehnung auf:  $\alpha$  variiert, während  $c$  praktisch unverändert bleibt.

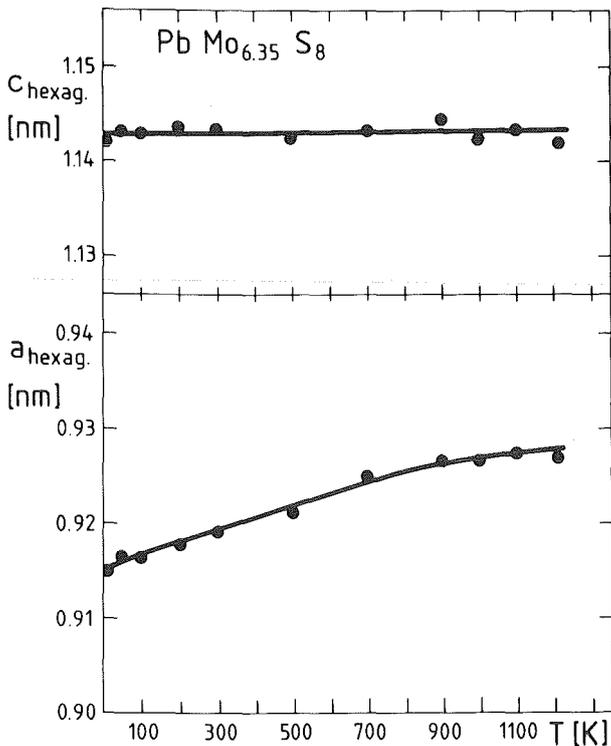


Abb. 31: Anisotrope thermische Ausdehnung der Chevrel-Phase  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ .

Über den ganzen Kristall gemittelt, erreicht  $\alpha$  den Wert  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Aufgrund der anisotropen Kontraktion werden im polykristallinen  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  Eigenspannungen erwartet, die das Transformationsverhalten bei tiefen Temperaturen beeinflussen dürften. Dies umso mehr, als Chevrelphasendrähte nach der Verformung eine Erholungsglühung im Bereich  $800 - 900^\circ\text{C}$  benötigen. Ein wichtiges Problem bei der Drahtherstellung stellt deshalb die Barriere zwischen  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  und der stabilisierenden Kupferhülle dar. Da Kupfer sehr stark mit  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  reagiert, (wobei  $T_c$  dramatisch abgesenkt wird) sind Risse im Barrierenmaterial unter allen Umständen zu vermeiden. Untersuchungen zur Auffindung des besten Barrieren-Materials haben begonnen.

### 1.3 Fertigung von NET-TF-Spulenleitern

Es wurde mit der industriellen Fertigung von NET-Modellleitern begonnen (VAC). Vier Modelleiter mit verschiedenen Stabilisierungselementen, aber mit demselben  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ - Innenseil (Abmessungen  $2 \times 12.5 \text{ mm}^2$ ) werden gegenwärtig hergestellt. Die Verseilung der Leiter auf einen keramisch beschichteten Stahlkern ist abgeschlossen.

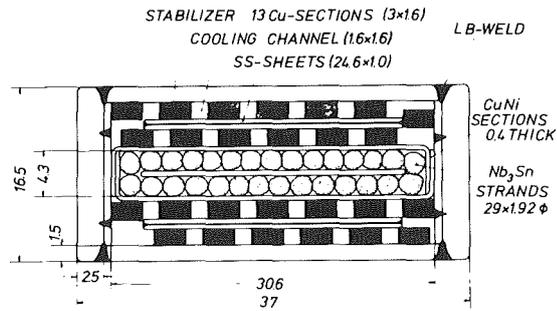


Abb. 32: Der KfK-NET-TF-Spulenleiter.

Parallel dazu wird an der Fertigung eines modularen 1:1 NET-Leitermodells gearbeitet. Die Roebelung der Kupferprofile in kurzen Musterlängen ist abgeschlossen. Der Entwurf des NET-Leiters (Abb. 32) ist unter besonderer Berücksichtigung von AC-Verlusten, Stabilisierungskriterien und Fertigungsrelevanz erstellt. Erste Ergebnisse von Laserschweißungen industriell hergestellter U-Profile mit 2.5 bzw. 4,0 mm Wandstärke waren vielversprechend.

### 2. Charakterisierung von Strukturmaterialien

Die Charakterisierung der für NET-TF-Spulingehäuse benötigten Strukturmaterialien umfaßt drei verschiedene austenitische Werkstoffe, die speziell für Tieftemperaturanwendungen geeignet sind: 1.4429, 1.4435 und 1.4306. Außerdem sind im VAMAS-Rahmen Vergleichsmessungen von mechanischen Größen ("Round Robin Tests") wie z. B. Bruchzähigkeit und Streckgrenze bei 4.2 K in einem Austauschprogramm zwischen dem NBS (Boulder) und KfK vereinbart worden. Die bestehende mechanische Testeinrichtung (200 kN-Anlage) wird gegenwärtig durch den Einsatz eines Verdampferkryostaten erweitert.

Austenitische Fe-Mn-Cr-Stähle mit hohem Mn-Gehalt (25 - 40 At. %) zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeit bei tiefen Temperaturen aus. Von besonderem technischen Interesse ist der im Vergleich zu herkömmlichem Fe-Cr-Ni-Stahl drastisch erniedrigte thermische Ausdehnungskoeffizient, der vergleichbar ist mit dem supraleitenden Materialien ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$  und  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ ).

Durch Zugversuche zwischen  $T = 10 \text{ K}$  und  $300 \text{ K}$  wurden aus einer Reihe von Stählen verschiedener Zusammensetzung die Stähle mit 34 % Mn, 14 % Cr und 39 % Mn, 8,9 % Cr ausgewählt. An diesen wurde im Temperaturbereich  $10 \leq T \leq 1300 \text{ K}$  der Ausdehnungskoeffizient mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt und die Phasenstabilität des Austenits untersucht. Der unterhalb Raumtemperatur ermittelte  $\alpha$ -Wert ist mit  $5,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , wie erwartet, sehr niedrig. Mit höheren Temperaturen jedoch wächst  $\alpha$  stark an bis zu  $16 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Für  $T > 900 \text{ K}$  wurden für beide Proben irreversible Transformationen der  $\gamma$ -Phasen in die  $\alpha$ - und  $\epsilon$ -Phasen beobachtet. Diese begrenzte Austenitstabilität und der doch beträchtliche Anstieg der thermischen Ausdehnung bei höheren Temperaturen begrenzen den Einsatz solcher Stähle auf kryogene Temperaturen.

Das mechanische Verhalten von Faserverbundwerkstücken wurde untersucht. Ein industriell gefertigter Kohlefaser-Epoxydverbund (CFK)-Bauteil wurde segmentweise in bezug auf Elastizitätsmodul, Biege- und Interlaminar-Scherfestigkeit bei 77 K untersucht.

### 3. Helium-II-Kühltechnik für Magnetwicklungen

Die Arbeiten zur Magnetkühlung mit superfluidem Helium (HeII) wurden mit zwei Zielsetzungen fortgesetzt, nämlich (a), zu untersuchen, ob diese Technik bei großen Supraleiterspulen Vorteile verspricht, und (b), die zur Auslegung derartiger Systeme erforderlichen thermodynamischen Grundlagen beizustellen.

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen eröffnet das am ITP entwickelte Verfahren der Kühlung mit erzwungener Strömung von superfluidem Helium, die in spezieller Weise durch sogenannte thermomechanische Pumpen (fountain effect pumps) angeregt wird, eine interessante Variante für den Bau

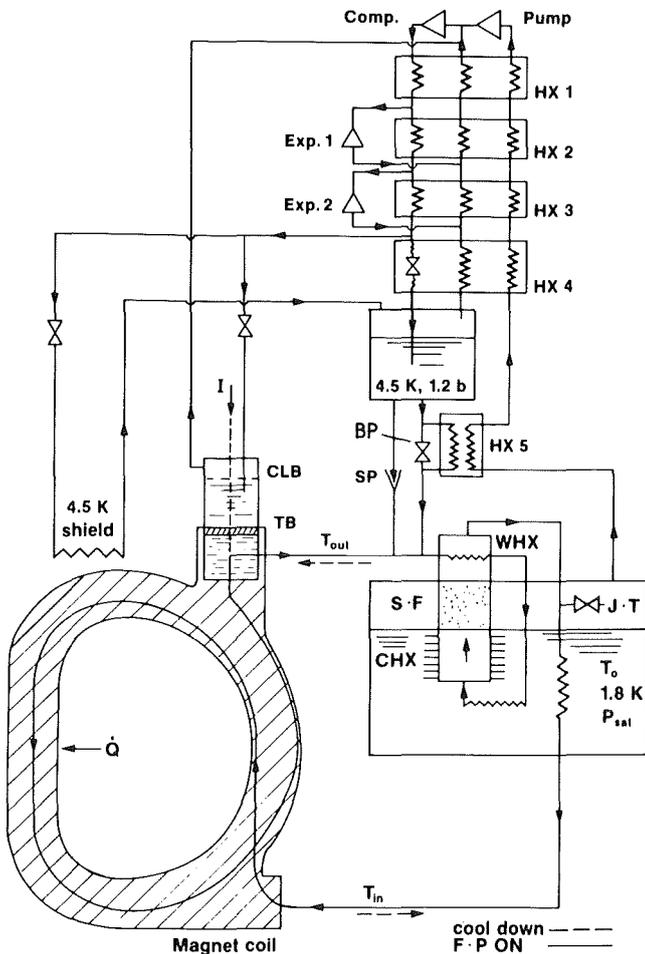


Abb. 33: Schema einer 1,8 K-Kälteanlage mit einer thermomechanischen Pumpe zur Umwälzung von unterkühltem HeliumII in einer Magnetspule (HX = Wärmeaustauscher, CLB = Stromzuführungsbad, SF = Superfilter, CHX = Kaltendwärmeaustauscher, WHX = Warmendwärmeaustauscher, SP = Quench-Entlastungsventil, TB = thermische Barriere).

großer Magnete. Insbesondere wird die Möglichkeit aufgezeigt, die bei der EURATOM/LCT-Spule bewährte Technik mit innengekühltem NbTi-Leiter, auch auf Spulen mit den derzeitigen NET/INTOR-Spezifikationen von etwa 11 T Maximalfeld am Leiter zu übertragen.

Das hierfür vorgeschlagene Kühlkonzept ist in Abb. 33 skizziert. Eine zentrale Einheit dieses Systems ist die "selbsterregte thermomechanische Pumpe", bestehend aus Superfilter (SF), Kaltendwärmeaustauscher (CHX) in thermischem Kontakt mit einem gesättigten HeII-Bad und Warmendwärmeaustauscher (WHX), der die in der Spule aufgenommene Belastung (Q) an das aus dem Superfilter austretende Helium überträgt. Die so am Superfilter aufgeprägte Temperaturdifferenz bewirkt eine Druckdifferenz, mit der eine HeII-Strömung durch die Spule getrieben wird. Bei geeigneter Auslegung der Kühlkanalgeometrie in der Spule kann die dort anfallende Wärme auf hinreichend niedriger Temperatur abgeführt werden.

Auf die Toroidalfeldspule von NET übertragen, kann beispielsweise gezeigt werden, daß mit einem dem EURATOM/LCT-Konzept sehr ähnlichen 16 kA/11 T-NbTi-Leiter die erwartete Belastung von 0.03 W pro Meter des Leiters über eine Kühlkanallänge von mehr als 400 m abgeführt werden kann. Dies ermöglicht einen der LCT-Spule analogen Aufbau mit etwa 40 parallelen Kühlkanälen bei 11 km Leiterlänge in einer Spule.

Die prinzipielle Funktionsweise eines solchen Kühlkreises ist experimentell und rechnerisch untersucht worden. Das Schema dieses Kreislaufs ist in Abb. 34 dargestellt. Es ist in die bereits seit 2 Jahren betriebene Versuchseinrichtung HE2PPF inte-

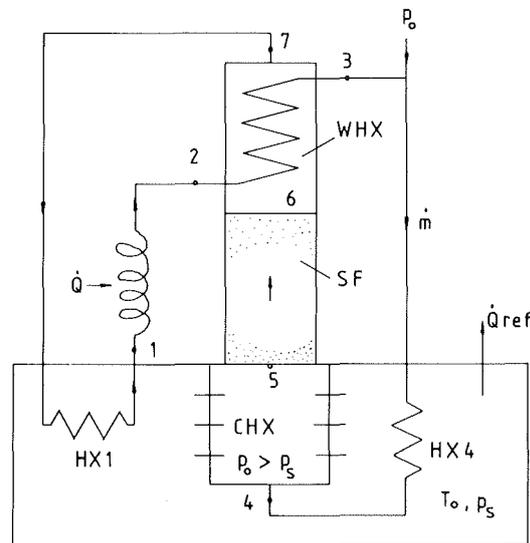
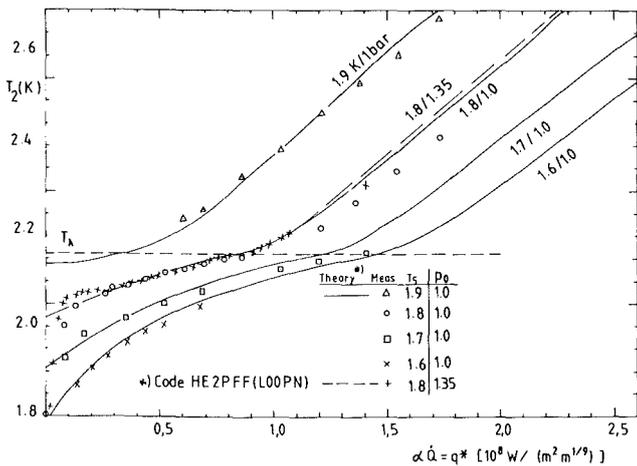


Abb. 34: Schema des HeII-Kreislaufes mit selbsterregter thermomechanischer Pumpe.

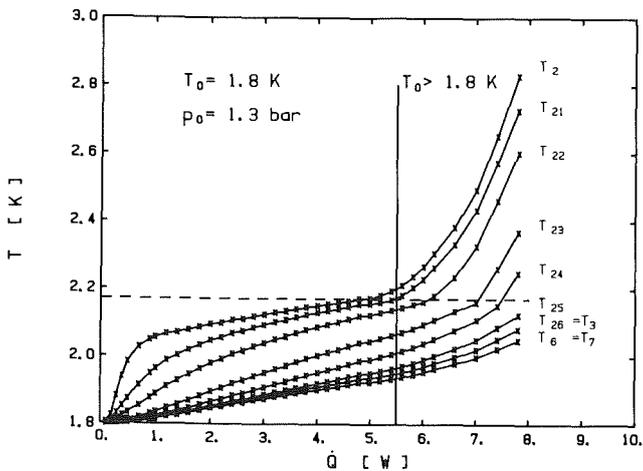
riert. Die wesentliche derzeitige Modifikation besteht aus einer größeren Pumpe mit einem Superfilter von 34 mm Ø und 85 mm Länge und mit einem Warmendwärmeaustauscher (WHX), der eine Belastung von 8 W übertragen kann. Der gesamte Kühlkanal hat vom Punkt 7 bis zum Punkt 4 eine Länge von etwa 7 m bei einer mittleren Kanalweite von 3 mm.



**Abb. 35:** Gemessene und berechnete Kühlcharakteristik (Austrittstemperatur  $T_2$  als Funktion der skalierten Belastung  $\alpha Q$ ) bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen, ( $\alpha = L^{5/9}/(AD^{2/3})$  mit der Länge  $L$ , Querschnitt  $A$  und hydraulischem Durchmesser  $D$  des Kühlkanals).

Die gemessene Kühlcharakteristik, wie beispielsweise in Abb. 35 dargestellt als "Spulenaustrittstemperatur"  $T_2$  über der skalierten Belastung  $\alpha Q$ , liegt sehr nahe an dem mit dem Computercode HE2PFF(LOOPN) berechneten theoretischen Optimum. Hierbei ist  $Q$  die eingespeiste thermische Belastung und  $\alpha$  ist ein reiner Geometriefaktor aus Länge  $L$  sowie hydraulischem Querschnitt  $A$  und Durchmesser  $D$  des Kühlkanals. Das Rechenmodell ist bei verschiedenen Betriebszuständen am Filtereintritt ( $p_0, T_5$ ) experimentell überprüft worden.

Im Hinblick auf Skalierungen für größere Systeme sind detailliertere Untersuchungen zur Ermittlung der Belastungsgrenzen der Komponenten im Gange. Als ein Ergebnis solcher Untersuchungen ist in Abb. 36 die Temperaturverteilung im Wärmeaustauscher WHX dargestellt. Hierbei bezeichnen die



**Abb. 36:** Temperaturen an verschiedenen Positionen des Warmendwärmehaustauschers als Funktion der thermischen Belastung des Kreislaufes. (Abstände der Temperaturfühler vom Eintritt:  $T_2/0, T_{21}/5, T_{22}/14, T_{23}/34, T_{24}/54, T_{25}/84, T_{26}/124\text{mm}$ ).

Größen  $T_2$  bis  $T_{26}$  Temperaturen im Innern der Rohrspirale und  $T_6$  die Temperatur am Ausgang des Filters, die innerhalb der Meßgenauigkeit gleich  $T_7$  ist. Die sehr kleine Temperaturdifferenz  $T_3 - T_7$  zwischen beiden Austritten dokumentiert die günstige Auslegung. Ein Rechenmodell zur Beschreibung der Temperaturverteilung ist in Arbeit.

#### 4. Kryokomponentenentwicklung

##### 4.1 Superisolationstechniken

Zur Verbesserung großtechnisch einsetzbarer Superisolationen wurden am 1985 in Betrieb genommenen Isolationstestkryostaten "TESSI" Untersuchungen durchgeführt.

An 19 verschiedenen, ebenen Isolations-Modellmatten (unterschiedliche Reflektor- und Austauschelemente zwischen Raumtemperatur und 80 K) wurden Tests durchgeführt. Die erzielten Wärmeisolationenwerte konnten gegenüber den unbefriedigenden Ergebnissen mit früher verwendeten Materialien wesentlich verbessert werden. Unter anderem bewährte sich dabei ein Kohlepapier aus China, welches als restgasadsorbierendes Spacermaterial verwendet wurde. Die bisherigen Bestwerte der Isolationsqualität bei 40 Lagen aus "unbehandeltem", beidseitig Al-bedampften Reflektormaterial und Glasseidengewebe als Spacermaterial, liegen beispielsweise bei  $0,52 \text{ W/m}^2$ .

Der Testeinatz des TESSI-Kryostaten wurde umgebaut, um die Testplatten mit  $2,7 \text{ m}^2$  Testfläche schneller auswechseln zu können (mit paralleler Vorbereitung eines neuen Moduls) und durch unterschiedliche Befestigungsart und Ausführung der Mattenenden diese Einflüsse zu untersuchen.

##### 4.2 Tieftemperatur-Meßtechnik

Für Druckmessungen wurden diverse kalte Drucksensortypen in Laborkryostaten getestet. Für Massenstrommessungen bei tiefer Temperatur wurde ein symmetrisch ausgeführtes Venturirohr gebaut und im TOSKA-Zweiphasenströmungsexperiment eingesetzt. Zum Vergleich wird ein Coriolis-Massenstrommeßgerät eingesetzt.

Die Modernisierung der Kalibriereinrichtung für Tieftemperaturfühler wurde zusammen mit dem HDI fortgesetzt (Datenerfassung, Meß- und Regeltechnik).

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
21428	03.03.04/16A	DI W. Barth
21429	03.03.04/17A	R. Berghöfer
21430	03.03.04/17B	Dr. R. Flükiger (für 1.)
21431	03.03.04/17C	DPS. Gauss
22663	03.03.04/17D	Dr. W. Goldacker
21795	03.03.04/17E	Dr. Hariharan (ab 3.2.86)
23272	03.03.04/17F	Dr. A. Hofmann (für 3.)
21436	03.03.04/18A	M. Karb
22823	03.03.04/18B	Dr. A. Khalil (bis 31.8.86)
21337	03.03.04/18C	A. Kling
V22539	03.03.04/19A	DP H.P. Krämer
V22601	03.03.04/19B	DI W. Lehmann (für 4.)

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V22763	03.03.04/19C	Dr. S. Miraglia (bis 15.7.86)
V22966	03.03.04/19D	Dr. A. Nyilas (für 2.)
V23132	03.03.04/19E	H. Orschulko
V22554		J. Pytlik
V22763		H. Raber
V22825		Dr. E. Seibt
V23046		W. Specking
V22535		B. Vogeley
V23273		Dr. F. Weiss
V22824		Dr. T. Wolf
V23271		Dr. J. Xu
V23598		J.D. Ye
V23599		

## Kryotechnische Arbeiten

### Institut für Technische Physik (ITP)

Die kryotechnischen Arbeiten betrafen Erweiterung und Betrieb vorhandener sowie Planung und Erstellung neuer Tieftemperaturexperimentierplätze und Tieftemperaturanlagen/-Einrichtungen für die Forschungsvorhaben. Daneben wurden grundlegende Untersuchungen auf den Gebieten der Kältetechnik, thermischen Isolation und Kryoverfahrenstechnik fortgesetzt. Die vorhandenen Helium-Kälteanlagen und Peripherieanlagen wurden durch Ergänzungen den aktuellen und zukünftigen Anforderungen angepaßt.

Die Planungsarbeiten für die Erweiterung der TOSKA-Anlage auf eine Magnetttestanlage mit NET-Relevanz ("TOSKA-UP") und für eine leistungsstarke Helium-Kälteanlage im kW-Bereich wurden intensiviert.

Innerhalb des LCT-Projektes wurde im ORNL bei der Vorbereitung der Testanlage, beim Kaltfahren des Spulen-Torus' und bei vakuumtechnischen, kryotechnischen Tests sowie bei LCT-EU-Spulentests mitgearbeitet.

#### 1. Kryotechnische Entwicklungsarbeiten

Sie betrafen praktisch alle Vorhaben und sind im Detail dort jeweils beschrieben. Zusammenfassend und ergänzend können die folgenden Ergebnisse herausgestellt werden.

Die bei der KfK-LCT-Spule angewandte Zwangskühlung mit überkritischem He I hat sich auch unter den Testbedingungen innerhalb des IFSMTF-Verbandes im ORNL bestens bewährt. Aufgrund der guten elektromagnetischen Stabilität der Spule genügte dabei ein geringerer Helium-Massenstrom und somit eine geringere Umwälzleistung als ursprünglich angenommen (vgl. Vorhaben 03.03.02, Kap. 1).

Definition eines Anwendungsbereiches für die Zwangskühlung mit zweiphasigem He I als Ergebnis von Zweiphasenströmungsexperimenten in TOSKA. Die Experimente erfolg-

ten speziell unter den Bedingungen für die TORE SUPRA Poloidalfeldspule und zeigten auch die Notwendigkeit eines Antriebes der Strömung mit einer He-Pumpe auf (vgl. Vorhaben 03.03.02., Kap. 2).

- Die He II-Zwangskühlung mit Fountainpumpenantrieb erscheint aufgrund der Messungen und Berechnungen für Magnetsysteme mit NbTi-Leitern attraktiv zu sein (vgl. Vorhaben 03.03.04., Kap. 3)
- Die Badkühlung mit "atmosphärischem", unterkühltem He II beim HOMER-Kryostaten hat sich bewährt und mit zur Erreichung des Rekordwertes von 19,3 T beigetragen (vgl. Vorhaben 03.03.03.).
- Die Auslegungsarbeiten für Einbau und Betrieb der Poloidmodellspule in TOSKA (Konstruktion, Verfahrenstechnik, Meßtechnik) konnten vorgebracht werden (Vorhaben 03.03.02., Kap. 2).
- Bei den Überlegungen und Abschätzungen für eine geeignete Testkonfiguration für den Test von NET-Modellspulenwicklungen in TOSKA wurden zwei Konfigurationen detailliert untersucht (Cluster mit 2 LCT-Spulen, Solenoidanordnung) und werden nun vergleichend bewertet (vgl. Vorhaben 03.03.02., Kap. 4).
- Zur langfristigen Kälteversorgung des ITP wurde die Planung einer neuen Kälteanlage konkretisiert. Aufgrund der TOSKA-Upgrade-Randbedingungen wurde das Grobkonzept einer Anlage mit einer 4,4 K-äquivalenten Kälteleistung von 3 kW erstellt, die sowohl als Refrigerator als auch als Verflüssiger und im Mischbetrieb eingesetzt werden kann. Die Vorplanung wird nun mit der Industrie fortgesetzt (vgl. Vorhaben 03.03.02., Kap. 5).
- Messungen im Isolationstestkryostaten TESSI an 19 verschiedenen Superisolation-Modellmatten führten zu wesentlichen Erkenntnissen für die Verbesserung großflächiger Superisolationstechniken. Werte von 0,5 W/m<sup>2</sup> konnten nun erreicht werden. Bewährt hat sich unter anderem auch ein Restgas adsorbierendes Kohlepapier. Für weitere Untersuchungen im TESSI-Kryostaten wurden verbesserte Testmodulanordnungen vorbereitet (Befestigungsart, Randzonen-effektuntersuchung, vgl. Vorhaben 03.03.04., Kap. 4.1).
- Verbesserungen auf dem Gebiet der Meßtechnik betrafen vor allem:
  - Massenstrommessungen mit Venturirohren am Zweiphasenströmungsexperiment.
  - Modernisierung der Kalibriereinrichtung für Tieftemperaturfühler, zusammen mit dem HDI. Darüber hinaus begannen Gespräche mit der PTB Braunschweig über die Anerkennung als "bestätigte Kalibrierstelle" im Rahmen des deutschen Kalibrierdienstes.
  - Tests kalter Drucksensoren.
- Verbesserung der Datentechnik durch Maßnahmen, wie:
  - Anschluß an das DATEX-B-System. Dadurch wurde eine direkte Verbindung zum LCT-System im ORNL geschaffen.

- Kopplung von PC und Datensichtgeräten mit dem ITP-VAX-Rechner und den KfK-Großrechnern.
- Beschaffung eines CAD-Systems für Konstruktion, Stromlaufpläne und verfahrenstechnische Anlagenpläne. Nach KfK-interner Diskussion wurde eine "Workstation" für das System "Applican Bravo" beschafft.

## 2. Kryotechnische Arbeiten für Projekte außerhalb KfK

Durch Delegation eines Kryoingenieurs nach ORNL wurde beim LCT-Projekt maßgebliche Hilfestellung in vakuumtechnischer und kryotechnischer Hinsicht gegeben. Diese bezog sich sowohl auf die Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit dem Kältebetrieb und Test der von KfK verantworteten LCT-EU-Spule als auch auf die Gesamtanlage IFSMTF zum Test des 6-Spulen-Torus-Verbandes.

Nach Mithilfe bei der Ertüchtigung der IFSMTF-Anlage im Vorjahr und vor dem Start zum Kaltfahren wurde 1986 die Planung und Durchführung der vakuum- und lecksuchtechnischen Tests an den Torusspulen und allen anderen He-führenden Einbauten übernommen. Es wurde insbesondere das Leckverhalten der mit 13 bar überkritischem Helium betriebenen zwangsgekühlten Spulen und der badgekühlten Spulen während des Kaltfahrens und des stationären Betriebs überprüft. Der korrekten Vakuummessung im Testkryostaten und dem Einfluß des Isolationsvakuums auf den Wärmeeinfall der kalten Einbauten wurden besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Unterbrechungen im Betrieb der Spulen wurden für kryotechnische Untersuchungen in den zwangsgekühlten Spulen wie thermische Verlustmessungen bei verschiedenen kryogenen Betriebsbedingungen genutzt (Variation der Kühlmittelströme in Wicklung und Gehäuse und des Isolationsvakuums). Gemeinsam mit dem Anlagenbetreiber wurden Verlustmessungen an den abgasgekühlten Stromzuführungen, den badgekühlten Spulen und dem "Bucking Post" durchgeführt.

Die sehr umfangreichen kryotechnischen und vakuumtechnischen Arbeiten bei der Vorbereitung und Durchführung der Tests des komplexen Systems (Spulentestkryostat mit 960 m<sup>3</sup> Volumen und 500 m<sup>2</sup> Kaltfläche auf 4 K) zählten sich in zweifacher Hinsicht aus: Sie waren eine Grundvoraussetzung zu dem erfolgreichen Ablauf der 1986 durchgeführten Einzelspulen- und Torus-Spulensystem-Tests, bei welchen z.B. ein Kaltleck ungeheuerere Verzögerungen und Unkosten hätte verursachen können. Die sehr aufwendige Vorprüfung aller heliumführenden Einbauten hat sich gelohnt.

Zum anderen bilden die in der IFSMTF mit dem LCT-Torus gewonnenen Installations- und Betriebserfahrungen eine ausgezeichnete Basis bei der Auslegung und Realisierung aktueller und zukünftiger Kryo- und Supraleiter-Magnetsysteme.

## 3. Verbesserung und Erweiterung der Helium-Anlagen und -Systeme

An der zur Vereinfachung der Überwachung der Linde-Kälteanlage im Vorjahr in Betrieb genommenen Datenerfassungs- und Datenverarbeitungsanlage wurde das Personal für den Umgang mit der Hardware und Software eingeschult. Nach

kleineren Verbesserungen/Ergänzungen und der Einarbeitung in die Erstellung von Tabellen für Meßwerte mit Graphikeditoren und von Fließbildern werden jetzt die Vorteile der schnellen Datenerfassung und der übersichtlichen Darstellung der jeweiligen Betriebszustände zeitsparend genutzt.

Das im Dezember 1985 erstmals in Betrieb genommene neue Quenchgasrückgewinnungssystem mit 200 m<sup>3</sup> Speicherballon, 4 m<sup>3</sup> Schüttgut-Regenerator und einem 80 m langen Leitungssystem wurde in technischen Details verbessert und ergänzt (verbesserte Ballon-Führung und -Entleerung, zusätzliches motorgetriebenes Ventil und Filter) und hat danach seine volle Funktionstüchtigkeit bewiesen. Zusätzlich an das System angeschlossen wurden inzwischen der große Kryostat der 10-t Tieftemperaturmaterialprüfmaschine und der TESPE-Kryostat. Zur besseren Detektion der Quenchgasbedingungen wurden zusätzliche Druck- und Temperatursonden installiert.

Im Rahmen der Vereinbarung zwischen IRB und ITP betreffs LHe-Lieferung und gHe-Rücknahme durch ITP wurde in Zusammenarbeit die Heliumgasrücknahme von IRB/Bau 276 über eine erdverlegte Leitung nach ITP/Bau 406 geplant und vorbereitet. Die Installationen an der ITP-Speicheranlage wurden durch eine Fremdfirma ausgeführt, die Verbindungsleitung zwischen den Instituten wird Anfang 1987 verlegt werden.

Zwecks einer Verbesserung der Heliumgasanalyse innerhalb des ITP-Anlagensystems erfolgten Beschaffung, Installation und Tests eines Teledyne-Luftspuren-Meßgerätes (Messer Griesheim-Reinigungsanlage) und eines Sauerstoff-Spurenanalytators "Delta F" (Kälteanlagenbereich) sowie die Bestellung eines Stickstoff-Analysengerätes vom Typ eines optischen Emissionsspektrometers bei Fa. Sulzer.

Nach Bewährung der neuartigen LHe-Abfüllstation mit E-motorgetriebenem Heber und Schleusentechnik am 2000-l-LHe-Speichertank wurde mit der Planung und Ausführung einer gleichartigen Anlage am 5000-l-LHe-Speichertank der Linde-Kälteanlage begonnen.

## 4. Servicearbeiten und Betrieb der Kälteanlagen

Innerhalb des Vakuumservice lag 1986 das Schwergewicht der Wartungsarbeiten bei den Vakuumeinrichtungen der LHe- und LN<sub>2</sub>-Transferleitungssysteme in der alten und neuen Experimentierhalle. Die Lecksucharbeiten bezogen sich insbesondere auf Testeinrichtungen für das Vorhaben "Poloidalfeldspulentwicklung", auf neu gefertigte Komponenten aus der mechanischen Werkstatt des Instituts und auf Testobjekte im Rahmen allgemeiner kryotechnischer Entwicklungen. Für verschiedene Anwender des ITP, IK I, IK II, IT wurden insgesamt 8 Vakuumpumpstände aufgebaut und bereitgestellt. Für Überwachung und Betrieb von Diffusions- und Turbomolekularpumpständen wurde eine pinkompatible, freiprogrammierbare Steuerung entwickelt und erfolgreich getestet.

Die wesentlichsten Daten des Kältemittelservice waren 1986: Verflüssigung und Bereitstellung von 203.000 l He, davon ca. 35 % für ITP-Labors in Gebäude 401, ca. 48 % für die ITP-Experimentierplätze in den Hallen 406 und 411 und ca. 17 % für die KfK-Institute IKVT, INFP, IMF IV.

LN<sub>2</sub>-Verbrauch im Anlagenbereich 401 zur Vorkühlung von Kryostaten an ca. 20 Experimentierplätzen ca. 150.000 l.  
 LN<sub>2</sub>-Verbrauch im Anlagenbereich 406 und 411 zur Vorkühlung und He-Reinigung ca. 620.000 l.  
 Der LHe-Verbrauch/LN<sub>2</sub>-Verbrauch hat damit im Berichtszeitraum gegenüber dem Vorjahr um ca. 25 %/50 % zugenommen.

**Betriebsdaten der 300-W-He-Anlagen**

**Linde-Anlage:**

ca. 3.500 Betriebsstunden als He I-Refrigerator mit HOMER, dem früheren "D2a"-Kryostaten und der TOSKA-Anlage, als Verflüssiger mit Bereitstellung von 179.000 l LHe und in kombinierter Betriebsweise (58 %).

**Messer Griesheim-Anlage:**

ca. 2.800 Betriebsstunden als He I-Refrigerator mit TESPE und der TOSKA-Anlage und als Verflüssiger mit Bereitstellung von 24.000 l LHe.

Die Betriebszeiten beider Anlagen sind gegenüber dem Vorjahr um fast 50 % angestiegen.

Neben den Routine-Arbeiten wie Inspektionen, Wartung, Ersatzteilehaltung an den Heliumanlagen und zugehörigen Hilfsanlagen wurden eine Reihe Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt. Diese betrafen 1986 insbesondere:

- die Heliumkompressoren der beiden Kälteanlagen und der Reinigungs- und Rückverdichteranlage sowie die Instrumentenluftkompressoren. Arbeiten im Zusammenhang mit Lecks und Schäden an Gas- und Ölkühlern (He-Kompressoren) und Störungen bzw. Schäden an den Arbeitsventilen der Kompressoren standen im Vordergrund.
- die Kolbenexpansionsmaschine der Messer Griesheim-Kälteanlage (Störungen an Nockenwelle und Ventiltrieb); Revision bzw. Instandsetzung der Steuerung und des kalten Teils der Maschine.
- die meß-, steuer- und regeltechnische Ausstattung des Anlagenkomplexes (insbesondere Regelgeräte, Schreiber, Ventile und Gas-Analysengeräte).
- die Rückkühlwasseranlage, Wasseraufbereitungsanlage (Entkarbonisierung) und das "Chemie I-Wasser"-System.
- Schäden (Ablagerungen bzw. Korrosion) in Kühlwasserräumen, z.B. der Gaskühler des Linde- bzw. Messer Griesheim-Heliumkompressors, des Turbinenölabscheiders der Linde-Anlage und im Kühlturbereich.

Durch frühzeitige Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten konnte auch 1986 ein weitgehend ungestörter Kältebetrieb beider Anlagen mit jetzt insgesamt ca. 50.000 (Linde) und 35.000 (MG) Kompressorbetriebsstunden gewährleistet werden.

**Veröffentlichungen**

21796  
 V23040  
 20465  
 20727  
 V22555  
 V22762  
 V23039  
 21795  
 22823  
 V23599

**Primärberichte**

03.03.02P25A  
 03.03.02P25B  
 03.03.02P26A  
 03.03.02P27A  
 03.03.04P19A  
 03.03.04P19B  
 03.03.04P19C  
 03.03.04P19D  
 03.03.04P19E

**Beteiligte Mitarbeiter**

DI. W. Lehmann  
Kryoentwicklungen  
 DI W. Barth  
 H. Bayer  
 R. Berggötz  
 E. Gorenflo  
 Ing. grad. F. Graf  
 DI R. Heil  
 DI W. Herz\*  
 DI L. Hütten  
 DI H. Katheder  
 L. Schappals  
 DI M. Süßer  
 DI F. Spath  
 H.J. Spiegel  
 D. Weigert  
 DI G. Zahn  
 J.D. Ye (bis Oktober 1986)  
TT-Meß- und Regeltechnik, Sicherheitstechnik:  
 G. Aupelt  
 H.J. Spiegel  
 DI M. Süßer  
 DI G. Zahn  
Betrieb + Ergänzung der Kälteanlagen  
 300-W-Anlagen, Bau 406:  
 K. Arbogast  
 A. Baumgärtner  
 R. Gutheil  
 B., König  
 DI R. Heil  
 J. Ohlenroth  
 H. Rapp  
 H. Sautner  
DI F. Spath  
 A. Speier  
 A. Straub  
 F. Süß  
 E. Ternig  
He-Anlagen, Bau 401, Kältemittelservice:  
 R. Berggötz  
 H. Heckfuß  
Vakuum:  
 H. Becker  
 DI W. Herz\*  
 DI L. Hütten  
 H.P. Schittenhelm

\* delegiert zu ORNL bis August 1986

## Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Dieser Beitrag zum FuE-Vorhaben wurde zusätzlich zum FuE-Programm bearbeitet.

### Thermische und mechanische Tieftemperaturuntersuchungen an Faserverbunden

#### 1. Materialeigenschaften

Die interlaminae Scherfestigkeit von Faserverbunden mit zwei verschiedenen Polyimid-Matrizen zeigte sehr hohe Werte, was auf einen guten Faser/Matrix-Bond schließen läßt. Polyimid wird wegen seiner relativ hohen Resistenz gegen radioaktive Bestrahlung für verschiedene Anwendungen in der Fusionstechnologie in Erwägung gezogen.

#### 2. Bauteiluntersuchungen

Ein Stück eines dickwandigen Spulengehäuses für poloidale Fusionsmagnete aus Kohlefaser/Epoxy-Verbunden (Fa. Sigri) wurde nach folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- a) Homogenität der mechanischen Eigenschaften innerhalb der dickwandigen Faserstruktur.
- b) Vergleich der Materialdaten dieses technischen Materials mit den von ideal hergestellten Laborproben.
- c) Degradation der Eigenschaften bei zyklischer mechanischer und thermischer Belastung.

Die verschiedenen Ergebnisse sind im Bericht 13.02.03P04B dargelegt. Wenngleich die statischen mechanischen Materialdaten von Laborproben merklich höher liegen, so zeigte doch das Ermüdungsverhalten bei dynamischer Belastung nur geringe Unterschiede zwischen technischem und ideal hergestelltem Material.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	13.02.03P04B	DI. K. Ahlborn <u>Dr. G. Hartwig</u> DI.(FH) S. Knaak

# Arbeitsthema

## 03.04 Heizsysteme

Vorhaben  
03.04.02 Hochfrequenzsysteme

Institut für Datenverarbeitung in der Technik  
(IDT)

### Gyrotron Modellierung

Im Rahmen der theoretischen Unterstützung der Gyrotron-Entwicklung bei 140-150 GHz wurden sowohl Parameterstudien und Entwurfsrechnungen als auch Verbesserung der Programme, die die physikalischen Phänomene im Gyrotron-Resonator simulieren, unternommen.

Ein Programm zur Berechnung der Wandverluste in getaperten Resonatoren wurde geschrieben. Dabei wurden die elektromagnetischen Felder mit bereits vorhandenen Programmen berechnet und hierfür als Eingabe benutzt. Außerdem wurden die Gesamtwandverluste, sowie  $dP_{\text{loss}}/dA$  als Funktion von  $z$  und die Ohm'sche Güte ermittelt. Die Wandverluste müssen bei allen Entwurfsrechnungen berücksichtigt werden.

Ein Programmpaket zum Berechnen der Eigenfrequenz, Güte und Feldprofil in einem schwach getaperten Resonator unter Berücksichtigung der Strahlrückwirkung (selbstkonsistente Lösung) wurde fertiggestellt. Das benutzte Modell (A.W. Fliflet et al. Int. J. Electronics 53, 505 (1982)) wurde mit einem selbstkonsistenten Modell aus Gorki (UdSSR) verglichen und deren Äquivalenz bewiesen. Das Modell von Fliflet et al. ist lediglich etwas genauer.

Ein Programm aus dem Paket wurde vektorisiert und ist auf der CYBER 205 lauffähig. Bei einer grösseren Anzahl von Simulationselektronen bringt dies einen merklichen Gewinn an Rechenzeit. Mit der IBM-Version des Programms ist es möglich, die Ergebnisse interaktiv auf dem Bildschirm grafisch darzustellen, was eine wesentliche Erleichterung bei der Benutzung des Programm-Pakets bedeutet.

Für den Testresonator, der jetzt beim Experiment (betrieben im TE031 Mode) eingesetzt wird, zeigt Abb. 1 den Effekt auf die Ausgangsleistung  $P_{\text{out}}$  als Funktion des Stroms  $I$  bei festem Magnetfeld  $B=5.82$  T. Die durchgezogene Kurve zeigt das Ergebnis der selbstkonsistenten Rechnung und die gestrichelte

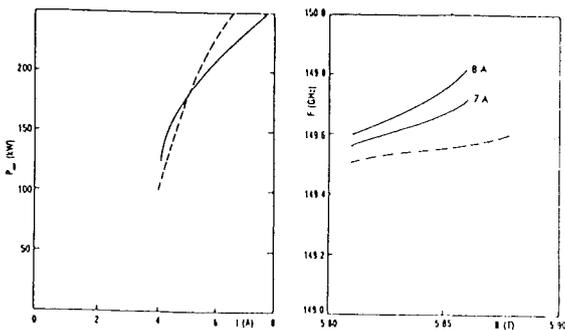


Fig.: 1

Fig.: 2

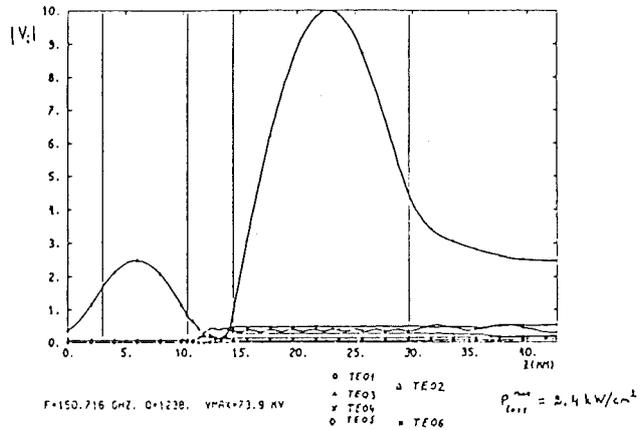


Fig.: 3

Kurve das Ergebnis einer Rechnung mit festem Feldprofil ohne Berücksichtigung der Strahlrückwirkung (Näherung für die kalte Kavität). Abb. 2 zeigt den Effekt auf die Eigenfrequenz. Diese hängt nicht nur von der Resonator-Geometrie, sondern auch vom Strom  $I$  und Magnetfeld  $B$  ab.

Der entwickelte Code wurde eingesetzt, um einen Entwurf für den nächsten Test-Resonator, der im TE061 Mode betrieben werden soll, vorzubereiten.

Zusammen mit dem IK-II wurden Studien zur Startup und Mode-Competition unternommen.

Ein Programm zur Berechnung der Eigenfrequenz, Güte, Feldprofile und Modeninhalte eines Resonators mit gekoppelten Kavitäten wurde entwickelt. Das Programm benutzt ein Galerkin-Verfahren, um ein System gekoppelter Differentialgleichungen mit Strahlungsrandbedingungen an den Resonatortenden zu lösen.

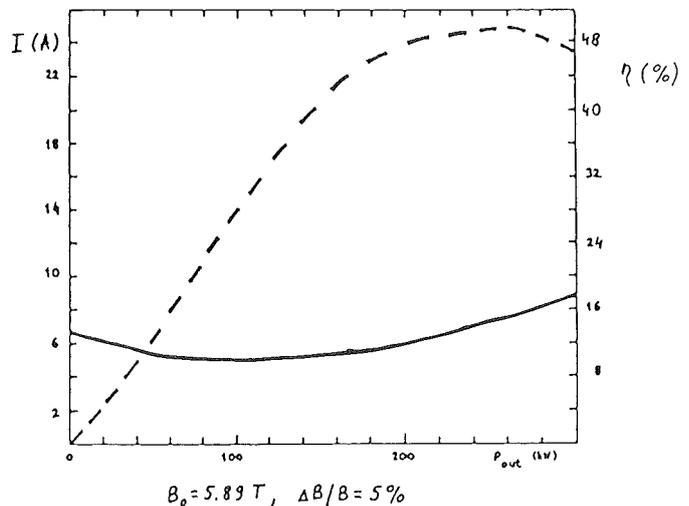


Fig.: 4

Vorläufige Parameterstudien zeigen, daß es möglich ist, für eine Anordnung mit der Modekonversion TE<sub>02</sub>/TE<sub>06</sub>, Geometrien und Betriebsparameter zu finden, die einen hohen Wirkungsgrad  $\eta$  mit vernünftig kleinen Wandverlusten haben. Ein solches Beispiel wird in Abb. 3,4 dargestellt. Abb. 3 zeigt die Feldprofile für die verschiedenen Moden und Abb. 4 den Wirkungsgrad  $\eta$  und Betriebsstrom I als Funktion der Ausgangsleistung für das Magnetfeld  $B = 5.89 \text{ T}$ ,  $\Delta B/B = 5\%$ .

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23093	O3.04.02P07A	<u>Dr. E. Borie</u>
22623	O3.04.02P07B	Dr. O. Dumbrajis (Fa. ABAS)
V 22628	O3.04.02P07C	Dr. H. Wenzelburger
V 23466	O3.04.02P07D	
V 23467	O3.04.02P07F	

### Institut für Kernphysik (IK)

Der Aufbau des Gyrotronexperimentes für den zunächst vorgesehenen Kurzpulsbetrieb ( $\sim 10 \mu\text{s}$ ) wurde abgeschlossen. Mit der Fertigstellung der He-Rückgewinnungsanlage und nach mehrfachem Nachbessern des industriell hergestellten supraleitenden 6T-Magnetsystems ist dieses nur bedingt einsatzfähig. Trotz diesen erschwerten Arbeitsbedingungen konnten die Experimente erfolgreich gestartet werden.

Tabelle 1:

Mode:	berechnete Frequenz:	gemessene Frequenz:
TE <sub>231</sub>	146.57 GHz	146.11 GHz
TE <sub>031</sub>	149.56 "	148.89 "
TE <sub>521</sub>	154.64 "	153.98 "

Seit Oktober wurde Mikrowellenstrahlung bis zu 70 kW Pulsleistung im angestrebten Frequenzbereich um 150 GHz und in den erwarteten Schwingungsformen (Moden) beobachtet (Tabelle 1). Die Moden wurden anhand der gemessenen Frequenzen und direkt über Schwärzungsmuster auf Thermopapier identifiziert. Die Experimente werden unter Einsatz weiterer Diagnostikmethoden mit zu erwartender Leistungssteigerung systematisch fortgesetzt.

Anfängliche Instabilitäten der Strahlparameter, die zu schwer interpretierbaren Ergebnissen führten, wurden durch den Einsatz der neuen Hochspannungsquelle mit Serienmodulator wesentlich verbessert. An der Inbetriebnahme des Gunmodulators wird noch gearbeitet. Mikrowellenmeßsysteme zur Bestimmung der Leistung, der Frequenz und der Moden sowie des Übertragungsverhaltens wurden eigens für diese Experimente entwickelt und teilweise im Meßeinsatz erprobt. Zur Echtzeituntersuchung der Spektren gepulster Mikrowellensignale wurde ein Vielkanalanalysator aufgebaut. Die

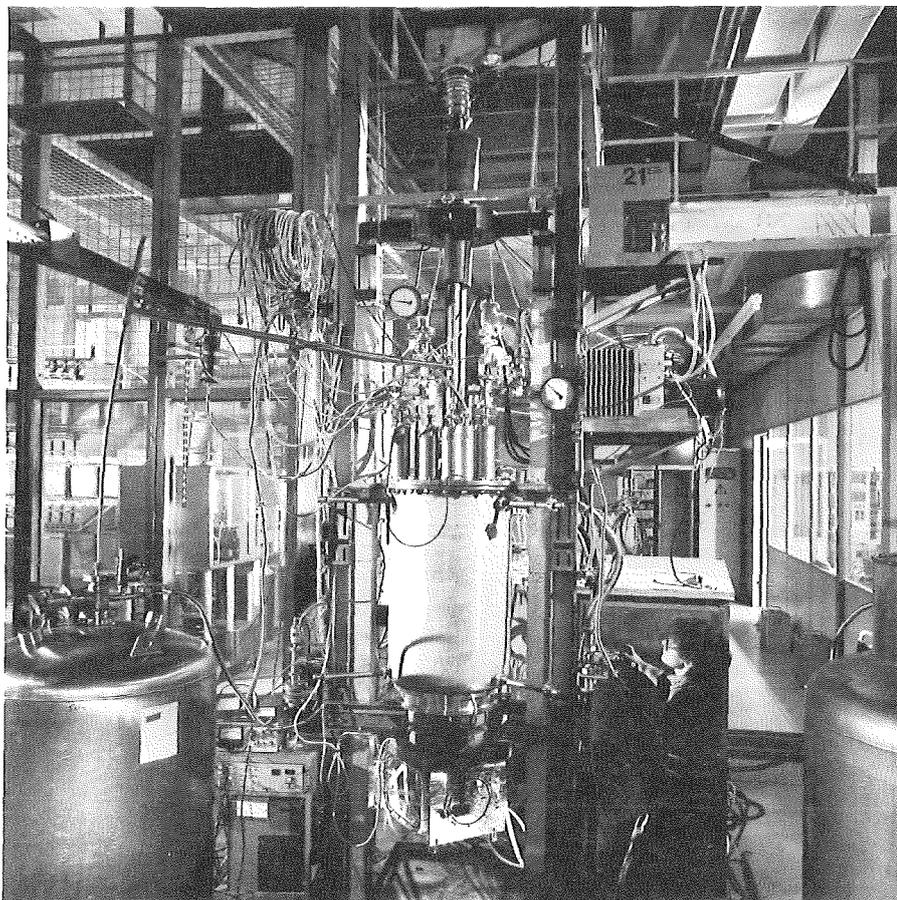


Abb.14 : Gyrotron-Teststand in Betrieb

Leistungsmessung erfolgt kalorimetrisch mit einem Flüssigkeitsabsorber mit Volumenabsorption. Zur Beschreibung des skalaren Übertragungsverhaltens beliebiger Elemente dient ein Netzwerkanalysesystem mit einem leistungsfähigen (0.5 W) Carcinatron als wobbeltbare Mikrowellenquelle. Der Fernfeldanalysator steht zum experimentellen Einsatz bereit.

Die Rechenprogramme zur Resonatorauslegung wurden weiterentwickelt zur Berechnung von Feldverteilung, Eigenfrequenzen und Güten für einfache und komplexe Resonatoren, die radial sprungfrei aus zylindrischen und konischen Segmenten (mit Winkeln  $0^\circ$  bis  $80^\circ$ ) bestehen.

Ein Programmpaket zum selbstkonsistenten Berechnen von Eigenfrequenz, Güte und Feldprofil in einem schwach getaperten Resonator unter Berücksichtigung der Strahlrückwirkung wurde fertiggestellt. Die Wechselwirkung eines Elektronenstrahls mit zwei Moden gleichzeitig wurde berechnet. Dabei wurde die Stabilität eines Modes gegenüber Störung durch einen anderen Mode sowie das Anschwingen des Gyrotrons untersucht.

Mit den entwickelten Programmen wurden systematische Parameterstudien für höhere Moden durchgeführt. Für den Arbeitsmode  $TE_{061}$  und die hierzu konkurrierenden Mode  $TE_{261}$  ergab sich eine Auswahl von Resonatorgeometrien, deren Eigenschaften experimentell untersucht werden. Neben der Optimierung des Strahlwirkungsgrades durch Resonatorgeometrie, Magnetfeld und Magnetfeldrampe wurden Wandverluste, Anschwingungsverhalten, Steuerbarkeit, breiter Leistungsbereich mit hohem Wirkungsgrad und Modenkompetition berücksichtigt. Als vorläufiges Optimum wurde eine 6 bis  $7 \lambda$  lange, leicht konische Resonatorgeometrie gefunden, die einen Wirkungsgrad bis zu 45% mit Wandverlusten kleiner als  $2.4 \text{ kW/cm}^2$  bei einer Ausgangsleistung von 200 kW erwarten läßt.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
V 23258	03.04.02 P06A	W. Baumgärtner
	03.04.02 P06B	Dr. E. Borie
	03.04.02 P06C	H. Budig
		Dr. G. Dammertz
		Ing. F. Graf (ITP)
		P. Grundel
		G. Haubrich
		DI R. Hietschold
		<u>Dr. G. Hochschild</u>
		Ing. A. Hornung (Uni)
		DP B. Jödicke
		Dr. M. Kuntze
		R. Lehm
		DI A. Möbius
		N. Münch
		H. Oppermann
		Dr. B. Piosczyk
		G. Redemann
		DI H. Stickel
		R. Vincon

# Arbeitsthema

## 03.05 Nukleare Technologien

Vorhaben

### 03.05.01 Blanketentwicklung

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

#### Herstellung und Charakterisierung von keramischen Brutmaterialien

Im Jahre 1986 wurde wiederum eine große Anzahl von Brutstofftabletten aus den Monosilikaten  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  und  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  für die gekapselten Bestrahlungsexperimente ELIMA 1, ELIMA 2 (KNK II), DELICE 03 (OSIRIS) und die gespülten Bestrahlungsexperimente VOM-23H (JRR-2), BEATRIX (EBR II), LISA 2 (SILOE) und TRIDEX 1 (DIDO) vorbereitet. Daneben wurden diverse Materialproben in Form gesinterter Tabletten, gesinterter Granulatfraktionen und kalzinierter Monosilikatpulver für physikalisch-chemische Materialuntersuchungen hergestellt. In geringerem Umfange konnte erstmals auch annähernd kugelförmiges Material mit Durchmessern von 0,5 bis 1 mm, wie für das KfK-Blanketkonzept vorgesehen, nach einem neuartigen Verfahren angefertigt und für erste Bestrahlungsversuche (BEATRIX, ELIMA 2, DELICE 03, LISA 2) zur Verfügung gestellt werden.

Die für das Bestrahlungsexperiment VOM-23H hergestellten Proben waren Lithiumorthosilikat-Kügelchen mit 4 mm Durchmesser. Die Dichte dieser Kügelchen lag bei 90 % th.D.. Gegenüber den hochdichten Orthosilikatproben des DELICE 02-Experiments war der Anteil der offenen Porosität an der Gesamtporosität mit rund 48 % mehr als doppelt so hoch. Die effektiven Kanaldurchmesser überstrichen einen Bereich von 0,05 bis 1,0  $\mu\text{m}$ . Der Mittelwert der Durchmesser von Schnittflächen durch Körner betrug rund 14  $\mu\text{m}$ .

Das zweite gekapselte Bestrahlungsexperiment im OSIRIS-Reaktor von Saclay, DELICE 02, war mit insgesamt 20 Lithiummetasilikat- und Lithiumorthosilikatproben verschiedener Dichte ausgestattet. Während bei den niederdichten ( $\approx 60\%$  th.D.) und hochdichten ( $\approx 92\%$  th.D.) Metasilikatproben und den mitteldichten Orthosilikatproben ( $\approx 81\%$  th.D.) die Porosität zu rund 100 % als offene Porosität vorlag, betrug bei den hochdichten Orthosilikatproben ( $\approx 92\%$  th.D.) der Anteil der offenen Porosität an der Gesamtporosität nur rund 20 %. Die effektiven Kanaldurchmesser der offenen Porosität waren bei diesen Proben kleiner als 0,04  $\mu\text{m}$ . Bei den mitteldichten Orthosilikatproben lagen sie im wesentlichen zwischen 0,6 und 3,0  $\mu\text{m}$ , bei den niederdichten bzw. hochdichten Metasilikatproben zwischen 0,07 und 3,0 bzw. 0,07 und 0,8  $\mu\text{m}$ . Die Permeationskoeffizienten zeigten den unterschiedlichen Dichten und Porenstrukturen entsprechend deutliche Unterschiede. Als mittlerer Durchmesser der Schnittflächen durch Körner konnte bei den hochdichten Metasilikatproben ein Wert von rund 18  $\mu\text{m}$ , bei den hochdichten Orthosilikatproben ein Wert von rund 16  $\mu\text{m}$  bestimmt werden.

Für das Bestrahlungsexperiment BEATRIX waren mit dem Isotop  $^6\text{Li}$  hochangereicherte Silikatproben hergestellt worden. Da als Ausgangsmaterial nur Lithiumkarbonat zur Verfügung stand, wurde eine Herstellungsvariante ausgearbeitet, nach der zunächst das Karbonat in Lithiumnitrat umgewandelt wurde. Entsprechend dem Suspensionsverfahren wurde ein feindisperses Lithiumnitrat/Silikat-Pulvergemisch erzeugt, das während des Kalzinierens bei 550 bis 600  $^{\circ}\text{C}$  zu reinem Meta- bzw. Orthosilikat umgesetzt wurde.

Die Untersuchungen zur Pulvergewinnung aus alkoholischen Suspensionen wurden mit dem Ziel weiterverfolgt, ein hochsinterfähiges Pulver zu erzeugen, mit dem auch bei der Herstellung größerer Mengen hochdichter Orthosilikatproben ein Aufmahlen nach dem Kalzinieren der sprühtrockneten Pulver vermieden werden kann.

Die bisher an verschiedenen Brutmaterialvarianten bestimmten Gaspermeationskoeffizienten konnten mit einer Beziehung relativ gut beschrieben werden, die eine Verallgemeinerung des Hagen-Poiseuille'schen Gesetzes darstellt. Deutliche Abweichungen wurden für solches Probenmaterial festgestellt, das, bedingt durch das spezielle Herstellungsverfahren, eine extreme Porenstruktur aufwies. In der Abb. 23 sind als Beispiel Meßergebnisse zum sogenannten "Slip-Permeationskoeffizienten" dargestellt, die an verschiedenen Materialproben im IMF III sowie in Labors von Casaccia (I) und Springfield (E) gefunden wurden.

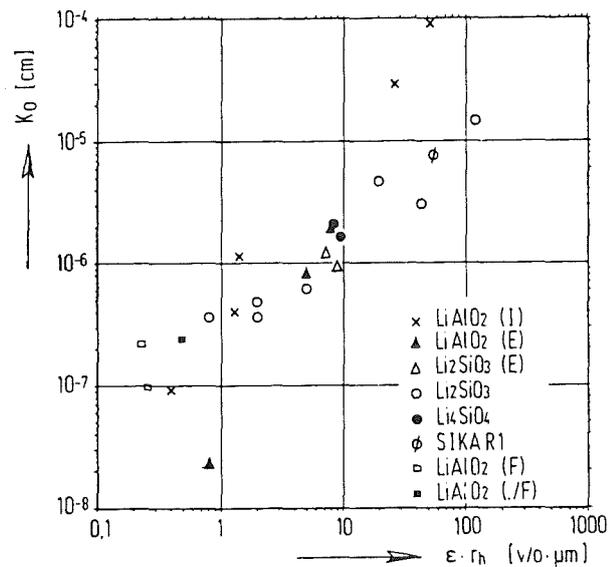


Abb. 23 Slip-Permeationskoeffizient  $K_0$  (in cm) als Funktion des Produktes: Offene Porosität  $\epsilon$  (in v/o)  $\times$  Hydraulischer Radius (in  $\mu\text{m}$ )

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 22690	03.05.01.P54A	B. Dörzapf
23026	03.05.01.P54B	<u>DP. H. Elbel</u>
V 23285		DI. E. Günther
V 23295		R. Hanselmann
		J. Heger
		E. Kaiser
		W. Laub
		H. Nagel
		R. Scherwinsky
		<u>Dr. D. Vollath</u>
		<u>Dr. H. Wedemeyer</u>
		M. Wittmann

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		DP. H. Elbel
		DI. H.E. Häfner

Auslegung von Bestrahlungsexperimenten

Nach dem mit Erfolg durchgeführten ersten gespülten Bestrahlungsexperiment LISA 1 im SILOE-Reaktor von Grenoble wurde mit der Vorbereitung des nächsten Experiments LISA 2 begonnen. Während im ersten Experiment neben 4 Lithiummetasilikatproben eine Lithiumorthosilikatprobe und eine Lithiumaluminatprobe (Referenzmaterial aus französischer Fertigung) in Tablettenform mit unterschiedlicher Geometrie und Dichte getestet wurden, werden in dem zweiten Experiment Lithiumorthosilikatproben hoher Dichte untersucht. Als Referenzmaterial dient wieder Lithiumaluminat aus französischer Fertigung. Die insgesamt 5 Orthosilikatproben bestehen aus 3 Probensäulen mit Kügelchen von rund 0,5 bzw. 1,2 mm Durchmesser (gefertigt von der Firma Schott), 1 Probensäule mit Granulat von rund 0,5 mm Durchmesser und 1 Probensäule mit Tabletten von 8 mm Durchmesser (gefertigt vom IMF III). Die Proben sind wieder auf 2 Bestrahlungsebenen mit unterschiedlicher Temperatur (Referenzwerte 500 bzw. 600 °C) verteilt. Das Experiment begann Ende November 1986.

Ein den LISA-Experimenten vergleichbares Experiment mit dem Namen TRIDEX wird bei der KFA Jülich vorbereitet. Dieses Experiment zeichnet sich durch eine größere Flexibilität aus, die durch den modularen Aufbau, die größere Zahl von Bestrahlungspositionen und entsprechende Instrumentierung erreicht wird. Für das erste im Jahr 1987 geplante Experiment wurde die Probenspezifikation erstellt. Sie entspricht bis auf das Maß des Innendurchmessers der für die Lithiumorthosilikat-Tabletten des LISA 2-Experiments vorgegebenen Spezifikation.

Mit einer Vergleichsbestrahlung in der KNK II (ELIMA 2) und im OSIRIS-Reaktor (DELICE 03) soll festgestellt werden, ob bei gleicher Gesamtschädigungsrate ein Unterschied in der Schädigung durch schnelle Neutronen und durch die  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ -Reaktion auftritt. An diesem Experiment nehmen das CEA/Saclay mit  $\text{LiAlO}_2$ -Proben, UKAEA/Springfields mit  $\text{Li}_2\text{O}$ - und  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ -Proben, CEN/Mol mit  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ -Proben, ENEA/Casaccia mit  $\text{LiAlO}_2$ -Proben und KfK/Karlsruhe mit  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ - und  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ -Proben teil. Die Dimensionen der Bestrahlungsproben und die Bestrahlungstemperaturen (400 - 450 °C, 650 - 700 °C) entsprechen denen der Experimente ELIMA 1 bzw. DELICE 02. Die 1986 bei KfK durchgeführte Planung und Auslegung umfaßt insgesamt 72 Materialproben.

Blanketkonzeptstudien

Im Zusammenwirken mit dem INR wurde weiter am Konzept eines Outboard-Brutblankets mit keramischem Brutstoff und Heliumkühlung gearbeitet. Dieses Konzept ist gekennzeichnet durch nahezu rechteckförmige Kanister, die den Brutstoff in Form einer  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ -Kugelschüttung und Berylliumplatten enthalten. Das Kühlmittel wird innerhalb von Rohren geführt, die an den Kanisterwänden und innerhalb der Keramikschüttung verlaufen.

Zur Optimierung der Kanistereinbauten und des Kühlsystems wurden zweidimensionale Rechnungen zur Temperaturverteilung im höchstbelasteten Kanister begonnen, wobei zunächst die der Ersten Wand zugekehrten Zonen bis 150 mm Tiefe untersucht wurden. Abbildung 24 zeigt als Beispiel die Temperaturen in dem kritischen Eckbereich zwischen Kanister-Vorder- und Seitenwand. Nach einigen Modifikationen konnte eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung mit Maximalwerten von ca. 690 °C in der Keramik und ca. 510 °C im Beryllium erreicht werden. In den Wänden liegt das Temperaturniveau bei etwa 450 °C mit maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenwandoberfläche von maximal 50 K.

Die Möglichkeit von weiteren Änderungen der Kanisterkonstruktion in Richtung auf eine einfache und sichere Ausföhrung wird gegenwärtig untersucht. Erste Schritte zur Herstellung und Erprobung der Verbindung zwischen Kühlrohren und Kanisterwand wurden eingeleitet.

Neben den Arbeiten zum Brutblanket wurde mit Auslegung und Entwurf von Abschirmblanket-Elementen begonnen. Die-

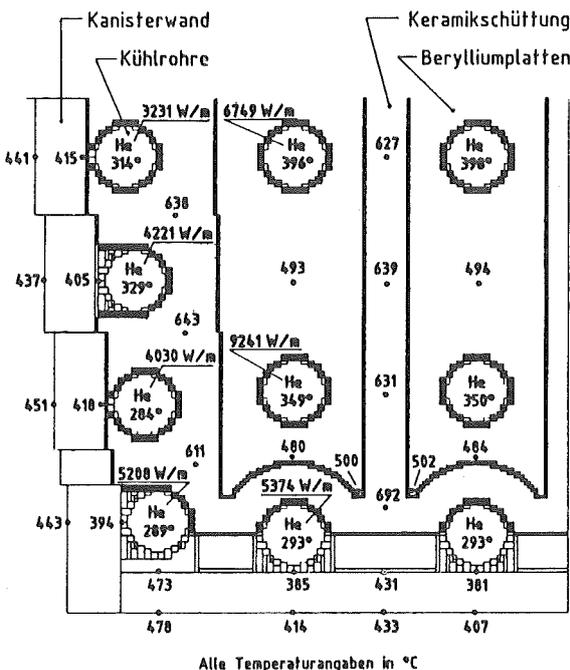


Abb. 24 Temperaturverteilung im Eckbereich des Brutstoffkanisters

se möglichst robusten und einfach ausgeführten Elemente sollen während der ersten NET-Betriebsphase die Brutblankets ersetzen. Verfolgt werden zwei Versionen mit Wasser als Kühl- und Abschirmmedium und ein Konzept mit heliumgekühlten Stahlplatten.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		DI. E. Bojarsky DI. P. Norajitra DI. G. Reimann DI. H. Reiser

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23706	03.05.01P51A	Dr. V. Schauer G. Schlickeiser <u>Dr. A. Skokan</u> H. Strömann

Konstitution und Thermodynamik von oxidischen Brutstoffen

Das Phasendiagramm des Systems  $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  wurde durch experimentelle Untersuchungen im Teilsystem  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Li}_4\text{SiO}_4$  revidiert. Die wesentlichen Ergebnisse sind: Anstelle eines früher vermuteten Peritektikums bei  $1255^\circ\text{C}$  wurde ein Eutektikum bei  $990^\circ\text{C}$  nahe der Zusammensetzung  $\text{Li}_8\text{SiO}_6$  gefunden.  $\text{Li}_8\text{SiO}_6$  zerfällt bei  $830^\circ\text{C}$  in  $\text{Li}_2\text{O}$  und  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ . Das revidierte Phasendiagramm ist in Abb. 25 dargestellt.

Die thermische Ausdehnung von  $\text{Li}_8\text{SiO}_6$  wurde im Temperaturbereich von  $25$  bis  $800^\circ\text{C}$  durch Hochtemperatur-Röntgenbeugung ermittelt. Sie ist grob vergleichbar mit derjenigen von  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ; eine Phasenumwandlung wurde nicht beobachtet.

Die Arbeiten zur Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe wurden an  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  und  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  mit Proben hoher Dichte ( $92\%$  TD) bei  $10^{-4}$  bar  $\text{H}_2\text{O}$  fortgeführt. Bei  $500^\circ\text{C}$  wurden in Langzeitversuchen (3 Monate) geringfügige Gewichtsverluste ( $0,02 - 0,05$  Gew.-%) beobachtet. In transienten Aufheizversuchen ergaben sich für  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  oberhalb  $\sim 700^\circ\text{C}$  Abdampfverluste in der Größenordnung von  $0,2$  Gew.-% in Verbindung mit Brutstoff/Wasser-Reaktionen, auf die man aus einer signifikanten Abnahme des  $\text{H}_2\text{O}$ -Partialdrucks im Reaktionsgefäß schließen kann.

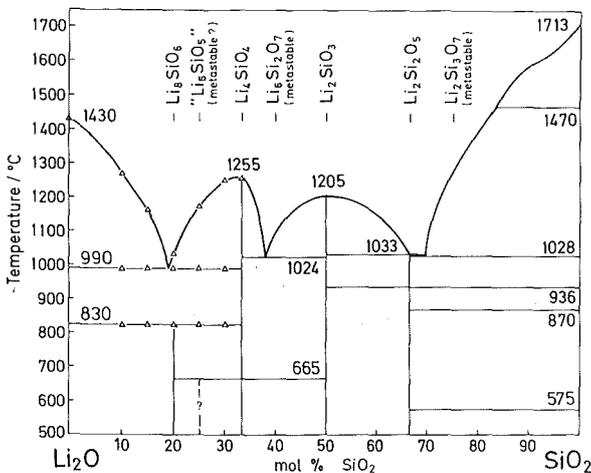


Abb. 25 Revidiertes Phasendiagramm des Systems  $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  mit neuen Ergebnissen im Bereich  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Li}_4\text{SiO}_4$ .

Eigenschaften von oxidischen Brutstoffen

Im Rahmen des Vorhabens B13 im European Fusion Technology Programme (Physikalische, mechanische und chemische Eigenschaften) wurde im IMF des KfK ein "International Exchange Meeting" veranstaltet. Der Informationsaustausch bei diesem Treffen legte eine erste tragfähige Basis für zusammenfassende und vergleichende Betrachtungen der untersuchten Brutstoffe.

Die spezifische Wärme von drei Brutstoffen wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart gemessen:

$$C_p = A + BT + C/T^2, \text{ für } 300 < T < 900 \text{ K.}$$

A, B, C sind in der folgenden Tabelle angegeben:

	A J/gK	B J/g	C J·K/g
$\gamma\text{-LiAlO}_2$	1.374	$2.278 \cdot 10^{-4}$	-39405
$\text{Li}_2\text{SiO}_3$	1.505	$2.803 \cdot 10^{-4}$	-44700
$\text{Li}_4\text{SiO}_4$	0.775	$16.31 \cdot 10^{-4}$	+9000

An  $\gamma\text{-LiAlO}_2$  unterschiedlicher Herkunft (KfK (23027), CEA, ENEA) wurde die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bestimmt. Es zeigte sich, daß sie, unabhängig vom Herstellungsprozeß, durch folgende Gleichung beschrieben werden kann:

$$\lambda = (2.457 + 0.0252 T)^{-1} \text{ W/cmK } 300 < T < 900 \text{ K}$$

Oberhalb von  $900 \text{ K}$  tritt neben der Phononenleitung der Transportmechanismus über innere Strahlung auf (23027). Das gleiche ist der Fall für  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  heißgepreßt ( $94 - 95\%$  TD). Seine Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  zwischen  $300$  und  $900 \text{ K}$  folgt der Gleichung

$$\alpha = + 6.335 \cdot 10^{-2} - 1.844 \cdot 10^{-4} T + 2.016 \cdot 10^{-7} T^2 - 7.405 \cdot 10^{-11} T^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

Die Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ -Tabletten aus IMF III-Produktion sind weitgehend abgeschlossen. Der E-Modul ergibt sich zu  $E = 110 (1-P)^3$  [GPa] (P Porosität). Er ist praktisch unabhängig von Gefügeparametern. Die Druckfestigkeit feinkörnigen Materials läßt sich beschreiben durch  $\sigma_D = 500 (1 - 1,5 P)$  [MPa]. Grobkörniges Material hat eine deutlich niedrigere Druckfestigkeit (Abb.26).

Die Thermoschockbeständigkeit des  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ , ermittelt im Aufheizversuch, ist relativ gut. Die kritische Temperaturdifferenz liegt bei  $700 \text{ K}$ . Vergleichsmessungen an  $\text{LiAlO}_2$  ergaben Werte um  $450 \text{ K}$ . Druckfestigkeit und E-Modul des  $\text{LiAlO}_2$  waren etwas höher als bei  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ . Die gemessenen Kriechgeschwindigkeiten (mit der Aktivierungsenergie von  $470 \text{ kJ/mol}$ ) lassen erkennen, daß das  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  selbst bei Porositäten von  $20\%$  bei

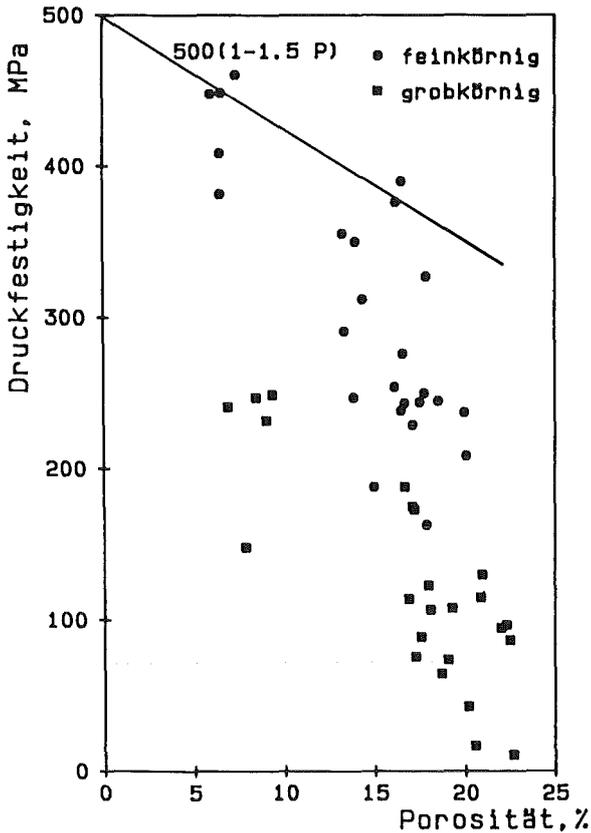


Abb. 26 Druckfestigkeit von  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  in Abhängigkeit von der Porosität.

den technisch relevanten Temperaturen bis zu 800 °C als starr betrachtet werden kann. Das gleiche gilt für das  $\text{LiAlO}_2$ . Die Glühversuche zur Untersuchung der chemischen Verträglichkeit von Brutstoffen in Cr-Ni-Stahlkapseln mit Zusätzen von NiO (zur Simulation der Oxidationswirkung von Wasserdampf) wurden bei 800 - 1000 °C fortgesetzt. Für  $\text{Li}_2\text{O}$  und  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  entsprachen die Ergebnisse der Extrapolation von tieferen Temperaturen. Der Angriff von  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  auf den Stahl 316 war etwas stärker als durch  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ , aber der Unterschied war beträchtlich geringer als bei tieferen Temperaturen. Daher ist nicht auszuschließen, daß sich hinsichtlich der chemischen Verträglichkeit keine spezielle Einengung des Einsatztemperaturbereiches für  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ergibt. Chemische Analysen des Reaktionsprodukts mit  $\text{Li}_2\text{O}$  zeigten als Hauptbestandteile Li, Cr und O.

Vorläufige Ergebnisse ähnlicher Versuche mit Kapseln aus den Ni-Legierungen Hastelloy X und Inconel 625 zeigen deutlich geringeren Angriff als mit Cr-Ni-Stählen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22807 23027 V23761	03.05.01P53A	M. Blumhofer Prof. Dr. W. Dienst G. Haase Dr. P. Hofmann V. Karcher K.H. Kurz H. Metzger <u>Dr. B. Schulz</u> <u>Dr. H. Zimmermann</u>

Chemisch-analytische Arbeiten

Metallische und nichtmetallische Verunreinigungen sowie das Li/Si-Verhältnis wurden in Brutkeramik (Li-Silikaten) ermittelt. Die Charakterisierung von Fenstermaterialien wurde in das analytische Programm aufgenommen. Zum Lösen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wurden neue Aufschlußtechniken getestet und verbessert.

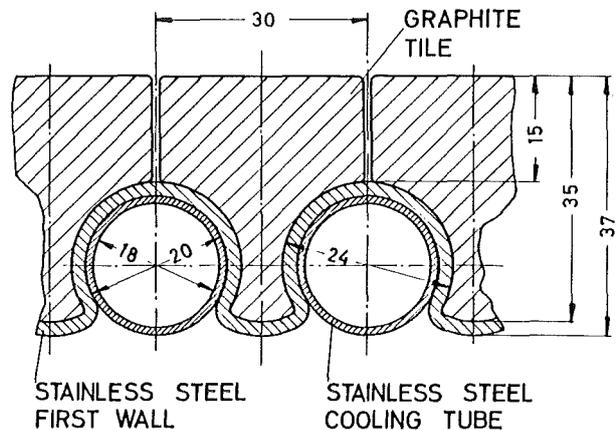
Zu den Verträglichkeitsuntersuchungen von  $\text{H}_2\text{O}$ -dotiertem  $\text{Li}_2\text{O}$  mit Stahl wurden die Reaktionszonen mit der Auger-Mikrosonde nachuntersucht. Mit dem fokussierbaren Ionenstrahl ( $\varnothing$  5  $\mu\text{m}$ ) des SIMS konnten in der keramischen Phase eindeutig Li und Li-Cr-O-Fragmente nachgewiesen werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<u>Dr. Ch. Adelhelm</u> Ch. Gosgnach D. Kempf E. Nold S. Winkler

**Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)**

Die Arbeiten des INR im Bereich Blanketentwicklung haben drei Schwerpunkte: 1. Entwicklung eines Blankets mit festem Brutstoff und Heliumkühlung einschließlich zugehöriger Experimente und spezifischer Materialentwicklung dazu; 2. Messung der Tritiumdiffusion aus festem Brutstoff in situ und an bestrahlten Proben, 3. Verbesserung der neutronenphysikalischen Daten und Rechenmethoden einschließlich eines Experiments zu ihrer Überprüfung.

Nachdem die Konzeptstudien für das Blanket zu einer Lösung geführt haben, die prinzipiell machbar erscheint, konzentrierten sich die Arbeiten 1986 auf die besonders

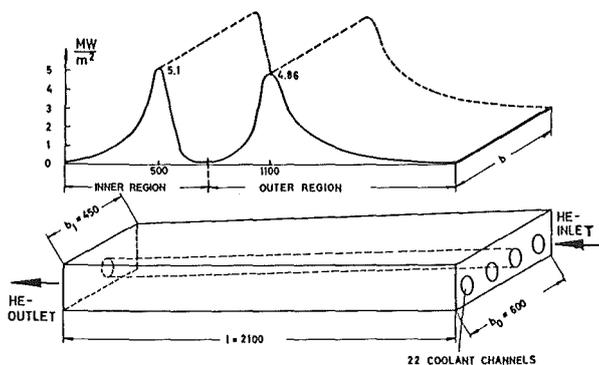


Erste Wand mit Graphitziegeln und Heliumkühlung

kritischen Komponenten Erste Wand und Divertor. Dabei waren neue erschwerende Anforderungen seitens der Plasmaphysik zu berücksichtigen. Für die Erste Wand sind dies eine Graphitschicht von 15 mm und Wärmestromdichten bis zu  $60 \text{ W/cm}^2$ . Die Abbildung zeigt die gewählte konstruktive Lösung.

Auf eine Ebene aus parallelen Kühlrohren für Helium ist eine Wellblechstruktur aus Stahl von 2 mm Wandstärke aufgelötet. Graphitziegel mit quadratischem Querschnitt werden mit ihrem Fuß in die Vertiefungen der Wellblechstruktur eingeschoben. Die maximal abführbare Wärmestromdichte beträgt  $20 \text{ W/cm}^2$  und ist auch bei Wasserkühlung nicht höher.

Der Divertor muß hohe aber lokal sehr begrenzte Wärmeströme aufnehmen, wie es in der Abbildung angedeutet ist.



Wärmestromverteilung auf dem Divertor (oben)  
Konstruktionsprinzip des heliumgekühlten Divertors (unten)

Als Konstruktionsprinzip wird ein Molybdänblock mit Längsbohrungen vorgeschlagen. Eine Aufteilung des Blockes in Streifen und Innenrippen aus Kupfer in den Bohrungen verbessern die Eigenschaften des Konzeptes.

Für beide Komponenten wurden detaillierte thermo-hydraulische Rechnungen unter Berücksichtigung der Wärmestrahlung durch den Plasmabereich sowie Spannungsanalysen durchgeführt.

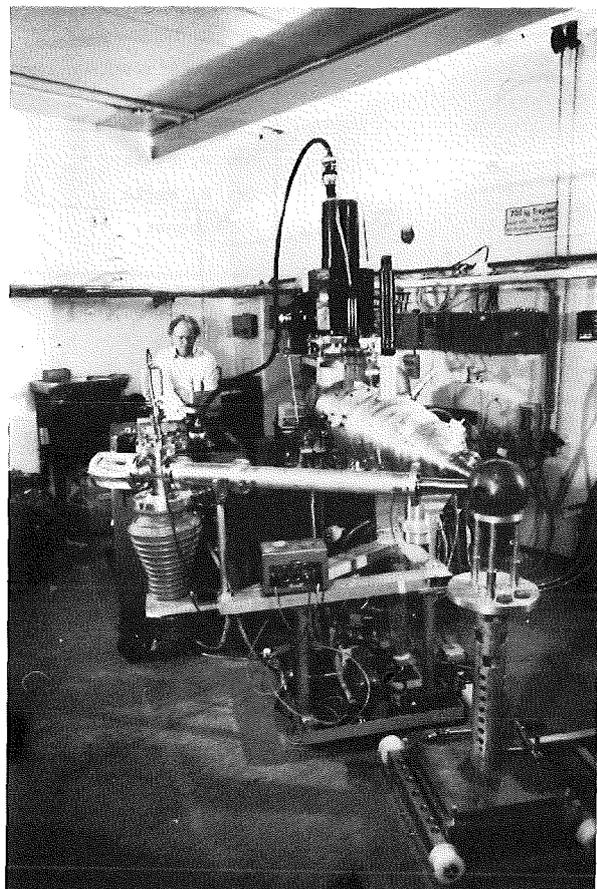
Das Verhalten der für das Blanket vorgesehenen Lithiumsilikat-Kügelchen unter thermo-mechanischer Beanspruchung, wie sie beim gepulsten Betrieb von NET vorliegt, wurde in Simulationsversuchen getestet. Die aus der Schmelze hergestellten Kügelchen zeigten eine Bruchfraktion von 11%. Durch Tempern konnte diese auf 2% reduziert werden. Durch langsames Abkühlen bei der Herstellung wird eine weitere Reduktion erwartet. Die Reinheit und Struktur des keramischen Materials wurde untersucht.

Die im Ergebnisbericht 1985 beschriebene Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Kugelschüttung wurde durchgeführt. Die Werte waren etwas niedriger als zunächst vermutet. Mit einer geringen Modifikation des Konzeptes ergeben sich daraus aber keine Nachteile.

Im SILOE-Reaktor in Grenoble wurden weitere Tritium-Freisetzungsmessungen durchgeführt. Dabei wurde die schnelle Freisetzung aus  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  auch für die aus der Schmelze hergestellten Kügelchen bestätigt. Selbst bei der niedrigsten im Blanket vorkommenden Temperatur scheint die Freisetzung gut genug zu sein, um ein kleines Tritiuminventar (ca. 600 g) zu gewährleisten. Im Detail bleiben noch viele Unklarheiten, die bei der großen Zahl von Parametern und dem komplizierten Vorgehen auch nicht so schnell aufgeklärt werden können.

Im Bereich der Überprüfung und Neuauswertung von Wirkungsquerschnitten wurden die in der internationalen Literatur vorliegenden Kerndaten von  $^7\text{Li}$  und  $^9\text{Be}$  erneut kritisch durchgesehen: Für  $^7\text{Li}$  wurde daraufhin die inelastische Streuung zum ersten angeregten Niveau verbessert. Zum höheren Energiebereich wurden die Daten für  $^{56}\text{Fe}$  neu ausgewertet, sowie für Kupfer die inelastische Streuung im Pre-Equilibriumbereich neu berechnet. Arbeiten zur Erstellung einer Photonenbibliothek wurden begonnen.

Bei der Verbesserung der Rechenmethoden wurde eine neue Methode zur Bestimmung doppelt differentieller Wirkungsquerschnitte erstellt. Mit dem Monte Carlo Verfahren MCNP, sowie mit  $S_N$ -Verfahren konnte erstmals eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Experimenten



Neutronengenerator mit Bleikugel und Vorrichtung zur Quellstärkeeichung

ten von Takahashi an einer Bleianordnung erzielt werden. Das  $S_N$ -Programm GANTRAS für Platten- und Kugelgeometrie unter Verwendung doppelt differentieller Wirkungsquerschnitte wurde fertiggestellt und angewendet; die Ausweitung auf eindimensionale Zylindergeometrie und auf zwei Dimensionen ist in Arbeit.

Beim Experiment zur Bestimmung der Neutronenmultiplikation in Beryllium und Blei (KANT) wurden der Neutronengenerator (siehe Abbildung), der Flugkanal, die Spektrometer und die Vorrichtung zur Quellstärkeeichung fertiggestellt. Das Genehmigungsverfahren wurde abgewickelt.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
V22690	03.05.01P43A	DP. L. Boccaccini
22929	03.05.01P43B	Dr. I. Broeders
22930	03.05.01P44A	Prof. Dr. M. Dalle Donne
23165	03.05.01P44B	Dr. S. Dorner
23174	03.05.01P46A	Dr. W. Eyrich
V23232	03.05.01P46B	DP. U. Fischer
V23414	03.05.01P47A	H. Fries
23634		Dr. F.H. Fröhner
V23788		Dr. F. Kappler
V23800		B. Krieg
V23801		<u>DP. M. Kühle</u>
V23802		Dr. H. Küsters
		Dr. U.v. Möllendorff
		Dr. G. Schumacher
		DM. A. Schwenk-Ferrero
		DP. G. Sordon (EURATOM-Stipendiat)
		DP. E. Stein
		Dr. H. Werle
		E. Wiegner

## Institut für Reaktorbauelemente (IRB)

### Blanketkonzept mit Flüssigmetallkühlung

Die 1984 begonnene Entwicklung eines Blanketkonzeptes für NET, bei dem eine Lithium-Blei-Legierung sowohl als Brutstoff als auch als Kühlmittel dient, wurde fortgesetzt. Dieses Konzept zeichnet sich durch einen im Vergleich zu anderen Blanketkonzepten wesentlich einfacheren mechanischen Aufbau und eine höhere Tritiumbrutrate aus. Eine wesentliche Verbesserung des Konzeptes wurde erreicht durch die Anordnung von Berylliumblöcken unmittelbar hinter der ersten Wand, welche sowohl als Neutronenvervielfacher dienen als auch zu einer Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung im Kühlmittel und dem Strukturmaterial führen. Diese Blöcke sind in der Abb. 7 ersichtlich, in der ein horizontaler Querschnitt durch ein Blanketsegment und - in größeren Maßstab - ein Querschnitt durch die toroidal verlaufenden Kühlkanäle im Bereich der ersten Wand dargestellt sind.

Diese Abbildung zeigt auch den Schutz der ersten Wand durch "Steine" aus Graphit, von denen die Wärme durch

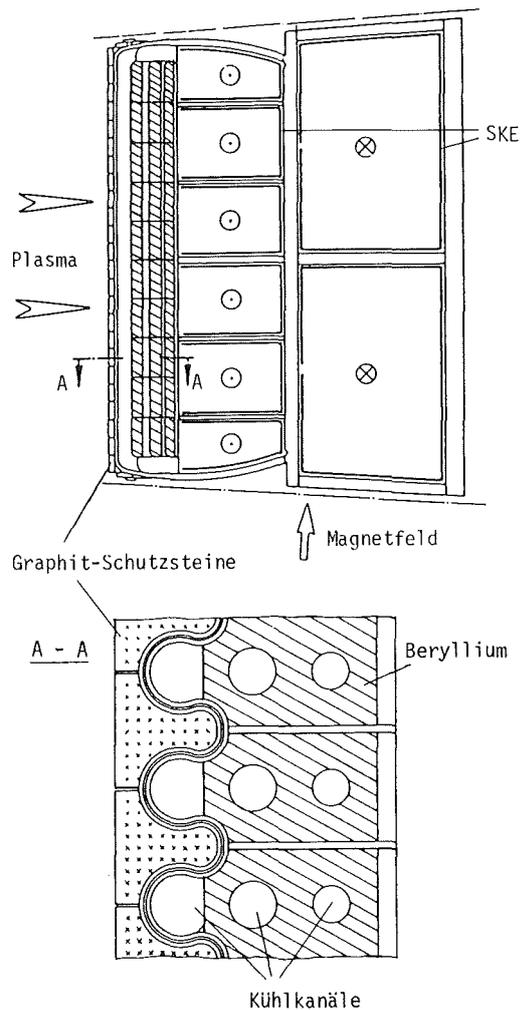


Abb. 7: Querschnitt durch ein flüssigmetallgekühltes Blanketsegment

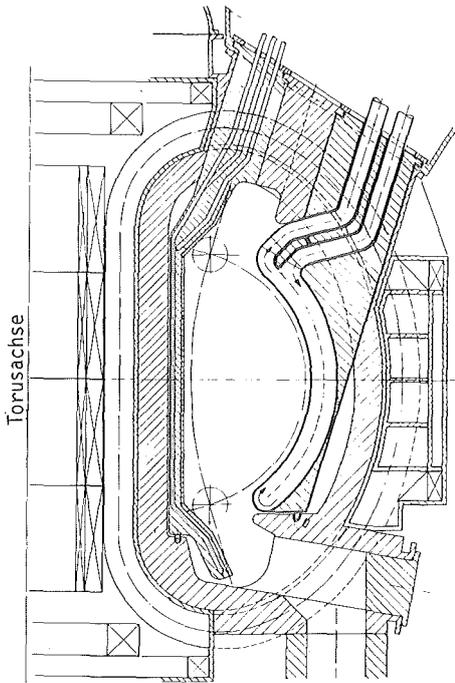


Abb. 8: Anordnung eines flüssigmetallgekühlten Blankets für NET

Strahlung auf die wellblechförmige Wand übertragen wird. Die in den Berylliumblöcken angeordneten Kühlkanäle werden parallel von dem Flüssigmetall durchströmt. Ihre Querschnittsfläche kann so bestimmt werden, daß sich eine Geschwindigkeitsverteilung entsprechend der örtlichen Leistungsdichte einstellt und sich hierdurch nahezu gleiche Austrittstemperaturen ergeben. Mit neutronenphysikalischen Rechnungen wurde festgestellt, daß der gezeichnete Anteil des Flüssigmetalls im Bereich der Berylliumblöcke von etwa 25 % für das Tritiumbrüten optimal ist. Durch die Neutronenvervielfachung im Beryllium wird die Tritiumbrutrate so effektiv erhöht, daß auf die Anordnung von Brutblankets im inneren Torusbereich verzichtet werden kann und trotzdem eine mindestens gleich hohe Brutrate wie bei wasser- oder gasgekühlten Blankets erreicht wird. Die Anordnung von flüssigmetallgekühlten Blankets im äußeren und von gasgekühlten Reflektorelementen im inneren Torusbereich ist in der Abb. 8 dargestellt.

Abhängig vom Reflektormaterial (Stahl, Graphit, Beryllium) wurden für diese Anordnung Tritiumbrutraten zwischen 1,1 und 1,4 bestimmt.

Das größte Problem bei der Konstruktion eines flüssigmetallgekühlten Blankets ist der Einfluß des starken Magnetfeldes auf die Flüssigmetallströmung. Zur Reduzierung der MHD-Druckverluste werden in allen poloidalen Kanälen sogenannte Strömungskanäleinsätze (SKE) angeordnet (Abb. 7). Diese längsgeschlitzten Einsätze werden aus einer lamellierten Wand, bestehend aus einem Doppelblech mit einer Keramikzwischen-

hergestellt, wobei alle Kanten zum Schutz der Keramik vor dem Flüssigmetall verschweißt werden.

Als optimale Keramik zur Beschichtung des Stahlbleches wurde eine Mischung aus plasmagespritztem  $Al_2O_3$  und  $TiO_2$  ermittelt (beste Biegefestigkeit des beschichteten Bleches). Die Keramikschicht wird anschließend durch Plasmaspritzen mit einem Cermet mit veränderlicher Keramik-Metall-Zusammensetzung beschichtet. Auf dieses Cermet wird das Deckblech mit einem Ni-Basislot aufgelötet. Zur Zeit werden Cermet-Aufbau und Lötten optimiert.

Im Berichtszeitraum wurde in Zusammenarbeit mit MBB an der Entwicklung von SKE-Fertigungsverfahren und an der Planung und dem Bau eines Thermochockprüfstandes gearbeitet.

In dem Prüfstand sollen 1987 SKE's auf ihre Thermochockbeständigkeit untersucht werden. Die Anlage erlaubt es, typische Thermozyklen zu simulieren.

Studie zum Design der ersten Wand (Fusionsblanket)

Die Innenseite (erste Wand) der das Plasma umgebenden Struktur muß trotz bestimmter Anforderungen und Belastungen von der Plasmaseite ausreichende Standzeiten versprechen. Graphit ist ein Werkstoff mit niedriger Ordnungszahl, der als Auskleidungsmaterial für die erste Wand einem stabilen Brennen des Plasmas förderlich zu sein scheint; er läßt zwar hohe Betriebstemperaturen zu, erodiert aber bei den hohen thermischen Belastungen während gelegentlicher Plasmazusammenbrüche relativ stark. Die Schichtdicke einer Graphitauskleidung wird daher mindestens 15 mm betragen müssen. Die von der Plasmaseite eingetragenen Wärmestromdichten von 20-40  $W/cm^2$  müssen zuverlässig und gleichmäßig auf die hinter dem Graphit liegende gekühlte Stahlwand übertragen werden, ohne unzulässig große Wärmespannungen in Graphit oder Stahl zu erzeugen. Die in Abb. 9

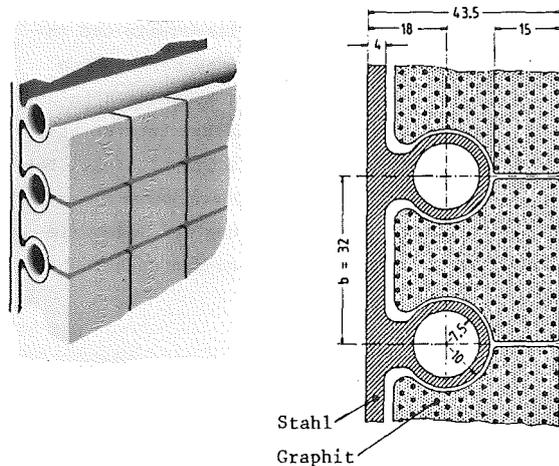
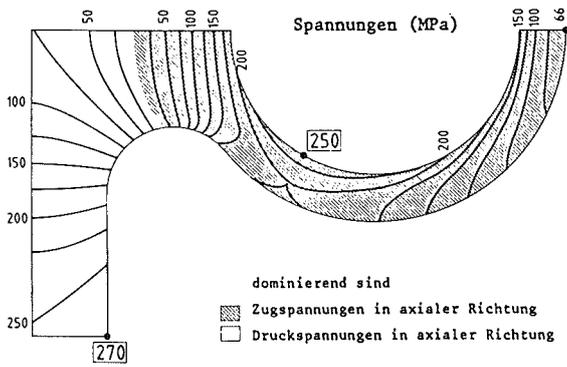
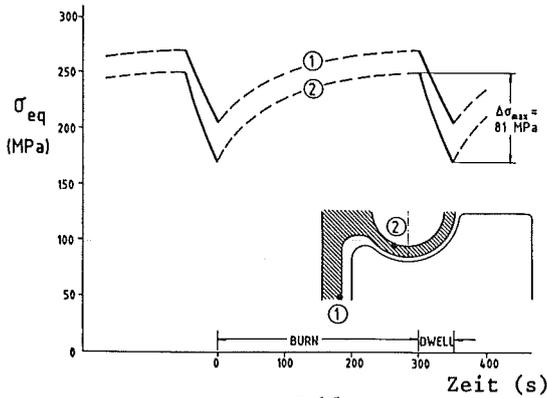


Abb. 9: Gasgekühlte erste Wand mit lose eingehängten Schutzziegeln aus Graphit



a. stationär



b. Brenn-Zyklus

Abb. 10: Vergleichsspannungen (von Mises) in der Stahlstruktur der ersten Wand (Verbiegung der Rohrachse unterdrückt)

dargestellten kleinen Graphitziegel sind lose in die gekühlte Stahlstruktur eingehängt; über den dabei entstehenden Spalt wird die Wärme mit Hilfe von Strahlung übertragen; die Wärmedehnung der Teile wird nicht behindert und die Ziegel sind leicht fernbedient austauschbar. Diese Vorteile werden mit relativ hohen Graphit-Temperaturen erkauft. Mit Hilfe des Rechen-codes ADINA wurde überprüft, ob diese Temperaturen und die in der gekühlten Stahlwand sich ergebenden Spannungen in zulässigen Grenzen bleiben. Ausgehend von der in Abb. 9 dargestellten Geometrie, einer Wärmestromdichte von  $20 \text{ W/cm}^2$  von der Plasmaseite und zusätzlichen inneren Wärmequellen in den Werkstoffen wurden die in Abb. 10 dargestellten Spannungen in der Stahlwand im stationären und zyklischen Betrieb berechnet; die maximale Temperatur im Graphitziegel betrug in diesem Fall  $1420 \text{ }^\circ\text{C}$ . Für höhere Wärmestromdichten muß durch weitere Optimierung der Geometrie dafür gesorgt werden, daß die Spannungen nicht höher werden.

Alternative Verfahren für Tritiumabtrennung aus flüssigem Pb17Li

Zur Tritium-Abtrennung aus einem Pb17Li gekühlten Blanket mit NaK-Sekundärkreislauf bietet sich die Abscheidung mittels einer Kaltfalle im NaK-Kreis an.

Diese Technik wird im Bereich der Schnellbrüter-Technologie zur Abtrennung von Wasserstoff und anderen Verunreinigungen eingesetzt. Eine für ein Fusionsreaktorblanket optimierte Kaltfalle ist so auszulegen, daß Tritium sowohl effektiv abgetrennt als auch wieder gewonnen werden kann, um das Tritiuminventar klein zu halten.

Abb. 11 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Kaltfalle: Das mit Tritium beladene NaK strömt in einem Ringraum nach oben und wird dabei im Gegenstrom durch ein Kühlmittel (evt. ebenfalls NaK) soweit abgekühlt, daß die Tritium-Sättigungskonzentration überschritten wird. Tritium kristallisiert als Tritid an der Oberfläche des Packungsmaterials (Drahtgewebe) aus, wobei angestrebt wird, eine gleichmäßige Abscheidung auf der gesamten Packungsoberfläche zu erreichen. Das Fluid wird im oberen Bereich der Kaltfalle umgelenkt und strömt im Innenrohr bei Erwärmung nach unten. Zur Wiedergewinnung des Tritiums wird die Kaltfalle vom Bypass-Strom abgeschiebert, vom NaK entleert und elektrisch und/oder durch NaK von der heißen Kühlmittelleitung durch den äußeren Wärmetauscher aufgeheizt. Die in der Abbildung dargestellten Filter sollen den Austrag von abgebrochenen Kristallen in die Entleerungsleitung verhindern. Durch Abpumpen bei niedrigem Druck wird Tritium gasförmig freigesetzt und kann direkt dem Brennstoffkreislauf zugeführt oder mit Hilfe geeigneter Gettermaterialien (z. B. Uran) zwischengelagert werden.

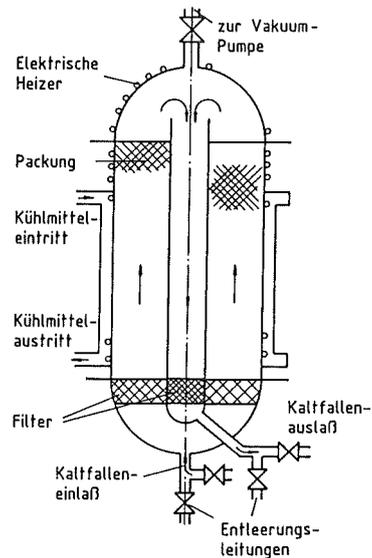


Abb. 11: Schematischer Aufbau einer Kaltfalle zur Tritium - Abtrennung und -Wiedergewinnung

Um für einen NET-Reaktor das erbrütete Tritium ( $\approx 50 \text{ g/d}$ ) abzutrennen, sind bei grober Abschätzung vier Kaltfallen mit je einem Volumen von  $\approx 1 \text{ m}^3$  erforderlich und ein gesamter NaK-Durchsatz von  $\approx 10 \text{ kg/s}$ . Diese Werte entsprechen dem für den SNR 300

vorgesehenen Reinigungssystem. Eine Studie über den Stand der Kaltfallentechnologie zeigte, daß das bisherige Wissen über die Abscheidungs- und Wiedergewinnungsvorgänge jedoch nicht zur Auslegung einer fusions-spezifischen Kaltfalle ausreicht.

Es wurde deshalb mit dem Vorhaben zur Wasserstoff-Abtrennung und -Wiedergewinnung mittels Kaltfallen (WAWIK) begonnen; entsprechende Versuchseinrichtungen wurden geplant und wesentliche Komponenten bestellt. Zur Beschreibung der Kinetik der Hydridabscheidung soll in vereinfachten Kaltfallen der Ort und die Form der Abscheidungen untersucht werden als Funktion von NaK-Durchsatz, Temperatur, Temperaturgradient und geometrischen Daten. Nach Analyse der Hydridkristalle wird der Kaltfalleneinsatz weiter verwendet zur Untersuchung der Wasserstoff-Freisetzung durch Aufheizen und Abpumpen unter Vakuum.

Voruntersuchungen zur Wasserstoff-Freisetzung sind im Gange; dabei wird in einem Metalltiegel befindliches NaH-Pulver in einem Glasrohr induktiv beheizt, um die Freisetzungsmechanismen beobachten zu können.

Ein alternatives Verfahren zur Tritium-Abtrennung aus wassergekühlten Pb17Li Blankets ist die Permeation durch ein Strukturmaterial hoher Permeabilität und anschließende katalytische Oxidation in einem Gasstrom. Im Rahmen eines NET Kontraktes wurde eine Studie durchgeführt (Abschlußbericht wird in Kürze fertiggestellt), um die offenen Probleme aufzuzeigen und entsprechende erforderliche Experimente zu definieren. Ein Problem, das die Machbarkeit in Frage stellt, ist die Bildung permeationshemmender Schichten auf dem Strukturmaterial durch Verunreinigungen im Pb17Li. Ein entsprechender Versuch sollte daher möglichst bald durchgeführt werden.

#### MHD-Untersuchungen an Flüssigmetall

Im Rahmen der Entwicklung eines selbstgekühlten Flüssigmetallblankets für NET kommt dem Problem des Druckverlustes und der Strömungsverteilung des umgepumpten Flüssigmetalles in den hohen Magnetfeldern einer Fusionsmaschine eine überragende Bedeutung zu. Der Nachweis, daß diese Druckverluste durch geeignete Strömungsführung unterhalb vorgegebener Grenzen gehalten werden können, wird über die Machbarkeit dieses Konzeptes entscheiden. Um den Mangel an belastbaren experimentellen Daten zu beheben, wurde 1985 das Programm MEKKA (Magneto-Hydrodynamik Experiment in Natrium-Kalium Karlsruhe) gestartet. Hierzu wurde ein MHD-Labor aufgebaut, in dem in einer ersten Stufe vornehmlich Experimente an Geradrohren mit kreisförmigem und rechteckigem Querschnitt mit und ohne Strömungskanaleinsatz, an Erweiterungen und Verengungen sowie an

Krümmern durchgeführt werden. Für diese Experimente wird ein normalleitender Dipolmagnet vom Typ MA (Leihgabe von DESY-Hamburg) verwendet, der eine Feldstärke von 2 Tesla und ein Testvolumen von 0,17 m x 0,5 m x 1,3 m besitzt. Der Magnet ist bereits aufgebaut, die 400 KW Gleichstromversorgung und die entsprechende Kühlwasserversorgung sind installiert. Der im IRB konzipierte und gebaute Natrium-Kalium Flüssigmetallkreislauf ist bis auf die elektrische Steuerung und Überwachung fertiggestellt. Er verfügt über einige Komponenten, die in dieser Anwendung im KfK zum ersten Mal eingesetzt werden: Eine Spaltrohrpumpe zur Umwälzung des Flüssigmetalls, einen ölgekühlten Doppelrohrwärmetauscher, eine ölgekühlte Kaltfalle sowie einen gyrostaten Durchflußmesser mit hoher Meßgenauigkeit. Abb. 12 zeigt ein Foto der 1. Ausbaustufe von MEKKA mit dem auf Schienen beweglichen Flüssigmetallkreislauf (Vordergrund), dem normalleitenden Dipolmagneten sowie der Stromversorgung (links im Hintergrund), Stand Ende Dezember. Er wird Anfang 1987 in Betrieb genommen. Ein Datenerfassungssystem mit 60 Kanälen in der 1. Ausbaustufe einschließlich Rechner und erforderliche Software ist bereitgestellt. Eine Positioniereinrichtung mit Schrittschaltmotoren wurde bereits beschafft und installiert. Mit ihr werden vor Beginn der eigentlichen MHD-Experimente das Magnetfeld des MA-Magneten 3-dimensional ausgemessen und die Werte mit Hilfe der Datenerfassungsanlage gespeichert. Der Entwurf einer Geradrohrmeßstrecke mit kreisförmigen Querschnitt ist fertiggestellt, mit der Fertigung wurde begonnen.

Der für die zweite Stufe des MEKKA-Programmes vorgesehene supraleitende Solenoidmagnet (CELLO-Magnet) mit 3,5 Tesla Feldstärke wurde ebenfalls im MHD-Labor aufgebaut. Die zugehörige Gleichstromversorgung sowie die zur Kryoversorgung erforderlichen Dewar-Kannen sind geliefert. Die Helium-Rückgasleitung zur Heliumverflüssigungsanlage einschließlich der entsprechenden Überwachungsarmaturen sind innerhalb der Gebäude bereits verlegt.

Es wurde eine Literaturübersicht erstellt sowie damit begonnen, MHD-Strömungen in einfachen Geometrien numerisch zu simulieren. Die ersten Rechnungen brachten befriedigende Ergebnisse, zeigten jedoch auch die Grenzen der verwendeten einfachen Verfahren vor allem im Hinblick auf die erforderliche räumliche Auflösung bei großen Magnetfeldstärken.

Im Rahmen eines Kooperationsabkommens über MHD in Flüssigmetallen zwischen ANL und KfK wird ein gemeinsames Experiment zum Thema Strömungsbeeinflussung durch Magnetfelder (MHD Flow Tailoring) durchgeführt. Mit diesem Experiment soll die Frage beantwortet werden, ob es möglich ist, den Strömungskanal eines selbstgekühlten Flüssigmetallblankets so zu gestalten,

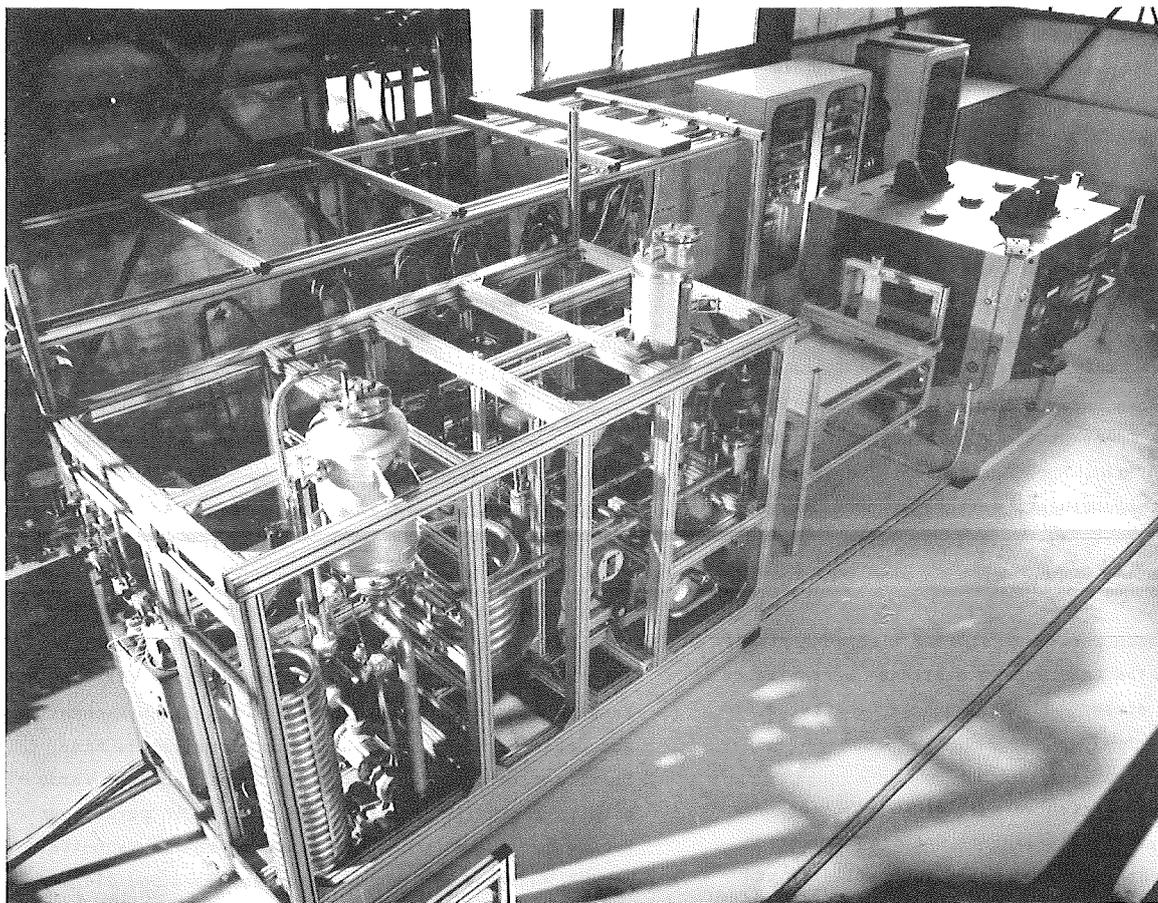


Abb. 12: MHD-Prüfstand MEKKA

daß durch die MHD-Kräfte die Geschwindigkeit und damit die Wärmeabfuhr von der 1. Wand soweit erhöht wird, daß auf eine zusätzliche Kühlung mit Hilfe toroidal verlaufender Kanäle verzichtet werden kann, ohne daß der Druckverlust im gleichen Maße zunimmt.

Die Teststrecke wird im KfK gebaut; die Messungen werden in der ALEX-Anlage durchgeführt.

#### Entwicklung einer Geschwindigkeitsmeßsonde

Für die Untersuchung von Flüssigmetallströmungen in starken Magnetfeldern werden Meßverfahren zur Ermittlung der Geschwindigkeitsfelder benötigt. Im IRB wird ein Verfahren entwickelt, welches die Temperatur-Puls-Laufzeit-Methode (TPL-Methode) benutzt. Die Strömung wird am Meßort mit einem explosionsartig freigesetzten Temperaturpuls markiert. Die zeitabhängige Ausbreitung des Pulses im Flüssigmetall um den Ort der Energiefreisetzung hängt dann von den Stoffeigenschaften des Fluids und seiner Bewegung ab. Bei explosionsartiger Wärmezufuhr längs einer Strecke im Fluid läßt sich die zeitliche zweidimensionale Ausbreitung des Pulses analytisch leicht berechnen. Umgekehrt kann also aus Laufzeitmessungen des Temperaturpulses über eine definierte Strecke die Bewegung des Fluids ermittelt werden.

Die Laufzeit ( $t_L$ ) bis zur Detektion eines Temperaturmaximums über eine Strecke  $r_0$  hängt ab von den Stoffeigenschaften des Mediums und von dem Betrag seiner Strömungsgeschwindigkeit, dagegen wird  $t_L$  nicht von der Strömungsrichtung und von der eingespeisten Energiemenge beeinflusst.

Das diskutierte Meßsystem besteht aus einem Heizsystem zur Erzeugung explosionsartiger Beheizung von Pulsgebern, dem eigentlichen Meßkopf (Abb. 13a) bestehend aus dem Pulsgeber (Miniaturheizstab von 0,5 - 0,6 mm Durchmesser), um den in geringen Abständen von 2 bzw. 4 mm Pulsdetektoren angeordnet sind (Mantelthermoelemente von 0,25 mm Durchmesser), aus einer rauscharmen Meßelektronik mit einem Verstärkungsfaktor von  $10^5$  sowie aus einem Meßwerterfassungssystem. Ergebnisse von Laufzeitmessungen in bewegtem Quecksilber sind in Abb. 13b dargestellt. Sie zeigt in der oberen Hälfte die Laufzeit bis zur Detektion eines Temperaturmaximums an 2 Detektoren (angeordnet im Abstand von  $r_{1/2} = 2/4$  mm vom Pulsgeber) in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung  $\alpha$  des Quecksilbers ( $\alpha = 0$  Bewegungsrichtung vom Pulsgeber zum Pulsdetektor). In der unteren Hälfte der Abbildung ist die Höhe des Temperaturmaximums dargestellt. Die Messungen wurden in diesem Falle mit einer Geschwindigkeit des Quecksilbers von 38,8 mm/sec durchgeführt. Man erkennt:

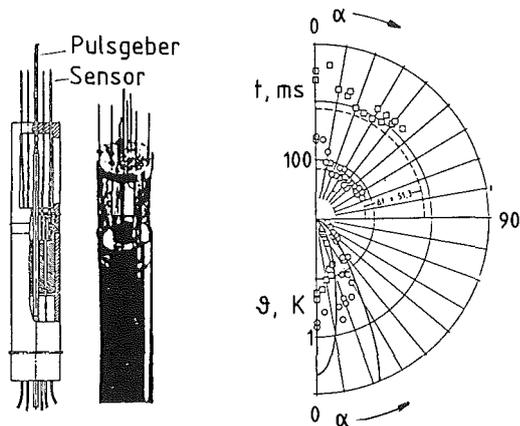


Abb. 13a: Meßkopf Abb. 13b: Laufzeit und Höhe des Temperaturmaximums in Hg als Funktion der Strömungsrichtung

- In Übereinstimmung mit dem analytischen Modell ist die Laufzeit  $t_L$  unabhängig von der Bewegungsrichtung  $\alpha$  ; lediglich für Winkel  $\alpha < 15^\circ$  treten Abweichungen auf. Die Laufzeitdifferenz zwischen 2 Sensoren ändert sich auch in diesem Falle nicht, solange die beiden Detektoren die gleiche Winkelposition aufweisen.
- Die Höhe der gemessenen Temperaturmaxima weicht dagegen stark von den Rechenwerten ab.

Beide Abweichungen beeinträchtigen die Brauchbarkeit des Meßverfahrens nicht. Sie werden verursacht, durch eine große Verzögerungszeit von  $\tau = 70$  msec des verwendeten Pulsgebers. Diese Verzögerungszeit bewirkt eine zeitlich verschmierte Energieabgabe an das Fluid, obwohl die Energieerzeugung im Innern des Pulsgebers nahezu explosionsartig erfolgt.

Ein Vergleich des gemessenen Verhaltens des Meßsystems mit den theoretischen Voraussagen zeigen die prinzipielle Brauchbarkeit der Meßmethode für die Ermittlung örtlicher Geschwindigkeiten. Es wird nun zu einem möglichst universell verwendbaren Meßverfahren weiter entwickelt.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter
23211	03.05.01P41A	DI K. Arheidt
23212	03.05.01P42A	G. Arnold
23213		<u>Dr. L. Barleon</u>
23214		DI S. Barth
V23414		<u>DI V. Casal</u>
V23415		G. Eisele
23416		Dr. Cl. Günther
V23614		W. Hartmann
V23463		DI K. Hitzig
		<u>DI G. Hofmann</u>
		G. Huy
		DI W. Just
		R. Kirchner
		H. Kreuzinger
		H. Kußmaul
		K.-J. Mack
		<u>DI S. Malang</u>
		A. Megerle
		DP I. Michael
		Prof. Dr. M. Modest
		<u>Dr. J. Reimann</u>
		DI K. Rust
		DP A. Sterl
		K. Thomauske

### Institut für Radiochemie (IRCH)

Im Hinblick auf das Tritiuminventar im Brutblanket eines Fusionsreaktors ist die Wasserstoff- bzw. Tritiumlöslichkeit ein elementarer Parameter. Die zur Messung dieses Parameters aufgebaute, gasvolumetrisch arbeitende, ultrahochvakuumdichte und druckfeste Ganzmetallapparatur, die für den aktiven Betrieb in einer Handschuhbox installiert ist, wurde durch Bestimmung der Wasserstofflöslichkeit in Nickel bei 500 °C getestet. Die Extrapolation von Literaturdaten zeigte im Rahmen der Fehlergrenzen gute Übereinstimmung mit den gewonnenen Ergebnissen. Die Dauerstandfestigkeit eines mit Aluminiumoxid beschichteten Aluminiumprobenbehälters war nicht zufriedenstellend; inzwischen liegen mit einem Behälter aus porenfreiem Aluminiumoxid, der direkt an einen Edelstahlflansch angelötet ist, sehr gute Erfahrungen vor. Der Behälter ist auch bei hoher Temperatur wasserstoffdicht und verhält sich indifferent gegenüber dem Probenmaterial. Die experimentell ermittelte Nachweisgrenze für die Löslichkeit liegt bei der derzeitigen Anordnung bei  $10^{-6}$

Die bisher bei Temperaturen von 450 °C und 500 °C an Lithiummetasilikat bei einem Wasserstoffdruck von ca. 500 mbar durchgeführten Messungen zeigen eine Löslichkeit von ca.  $1 \cdot 10^{-5}$  (450 °C) und  $2 \cdot 10^{-5}$  (500 °C). Diese

Werte müssen weiter präzisiert werden. Insbesondere ist durch Messungen bei weiteren Temperaturen die Aktivierungsenergie der Löslichkeit zu bestimmen. Die früher unter vergleichbaren Bedingungen sowohl gasvolumetrisch als auch NMR-spektroskopisch gefundenen Löslichkeiten der Größenordnung  $\leq 10^{-3}$  konnten an dem jetzt verwendeten Probenmaterial nicht reproduziert werden und sind vermutlich auf unzureichende Probenvorbereitung (Trocknung) und Verunreinigungen zurückzuführen.

Parallel und zur Unterstützung der volumetrisch gewonnenen Daten wurde mit einem Tracerexperiment begonnen, bei dem durch Beladung von Lithiummetasilikat mit einem Wasserstoff/Tritium-Gemisch nach folgendem Auflösen und Vermessung im Flüssigszintillator die Löslichkeit ermittelt wurde. Dabei sollen insbesondere auch weitere Aufschlüsse über die Druckabhängigkeit der Löslichkeit gewonnen werden.

Mit der Methode der Massenspektrometrie mit Knudsen-Zelle sind Verdampfungs- und Gas-/Festkörperuntersuchungen an Lithiumsilikaten vorgenommen worden. Die Empfindlichkeitseichung des Massenspektrometers und die Eichung von Temperaturen in der Knudsen-Zelle erfolgten durch Verdampfen einer festgelegten Menge an Au oder Ag. In ersten Verdampfungsexperimenten an festem und flüssigem Lithiummetasilikat konnten die Ionen  $\text{Li}^+$ ,  $\text{LiO}^+$ ,  $\text{Li}_2\text{O}^+$ ,  $\text{Li}_3\text{O}^+$  sowie das Mutterion  $\text{Li}_2\text{SiO}_3^+$  nachgewiesen werden. Die beobachteten relativen Ionisierungspotentiale (IP) sind in der Tabelle aufgeführt. Wegen der inkongruenten Verdampfung von  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  sind die Intensitäten nicht zeitkonstant. Die Bestimmung der Phasenzusammensetzung geschieht durch Röntgenbeugungsuntersuchungen vor und nach der Verdampfung. Anhand einer ersten quantitativen Versuchsreihe an  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  (l) werden gegenwärtig aus den bestimmten Partialdrücken nach der Methode des zweiten und des dritten Hauptsatzes Reaktionsenthalpien der Verdampfungsreaktionen berechnet.

**Tabelle** Hochtemperatur-Massenspektrometrie von  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  in einer Pt-Knudsen-Zelle

Ion	$I_1^+$ (mV)	Kollektor	IP (eV)	T (°C)
$\text{Li}^+$	350,00	Faraday	8,4	1545
$\text{LiO}^+$	1,27	Faraday	12,0	1508
$\text{Li}_2\text{O}^+$	< 0,50	Faraday	9,4	1508
$\text{SiO}^+$	0,58	Faraday	14,0	1508
$\text{Li}_2\text{SiO}_3^+$	1,40	Faraday	11,3	1490
$\text{Li}_2\text{SiO}_3^+$	2,58	S.E.V.	11,3	1490

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. M. Ghigla Dr. H. Ihle Dr. R.-D. Penzhorn P. Schuster K.-H. Simon

## Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

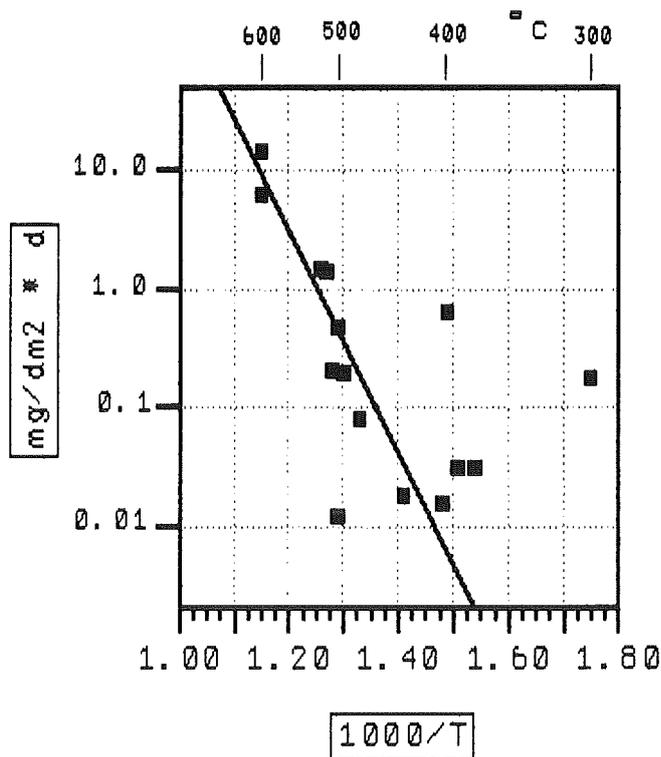
### Extraktion von Tritium aus flüssigem Pb-17Li mit Hilfe von festen Getterstoffen

Eine Grundvoraussetzung für die Abtrennung von Tritium aus flüssigem Pb-17Li mit Hilfe von festen Getterstoffen ist die Verträglichkeit der Gettermaterialien mit dem flüssigen Metall. In Laborversuchen wurde in statischem Pb-17Li das Verhalten von Zirkonium untersucht.

Die Versuche wurden in einer Argon-Atmosphäre (weniger als 1 ppm  $\text{O}_2$ ) in Edelstahlbehältern durchgeführt. Das verwendete Pb-17Li wurde vorher durch mehrfaches Umschmelzen in einer Schutzgasbox von anhaftenden Oxiden gereinigt. Das Zirkonium tauchte in Molybdäntiegeln in das flüssige Metall. Molybdäntiegel und Zirkonium wurden vorher zur Erzeugung reproduzierbarer Oberflächen bei 1000°C im Vakuum ausgeheizt.

Untersucht wurde der Temperaturbereich zwischen 300 und 600°C; die Versuchsdauer betrug bis 1000 Stunden. Nach einem Versuch wurde das gesamte Pb-17Li, zwischen 50 und 70 g, in Salpetersäure aufgelöst. Zirkonium wurde mit einem ICP-Analysengerät bestimmt. Für das Auflösen großer Mengen an Pb-17Li wurde eine spezielle Extraktionstechnik entwickelt.

Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Versuche.



Parallel zu den Laborversuchen wurde der Kreislauf TRITEX gebaut.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. H. Feuerstein Dr. H. Gräbner J. Oschinski

Vorhaben  
03.05.02 Tritiumtechnologie

Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)

Tritiumkreislauf-Modellierung

Im Rahmen einer Zusammenarbeit von Los Alamos National Laboratory (LANL), USA, und KfK wurde ein rechnergestütztes Planungsinstrument aufgebaut, das jedoch in erster Linie für das Karlsruher Tritium Labor (TLK) eingesetzt werden soll /V23222/. Das Instrument ermöglicht eine Abschätzung der Entdeckung von Leckagen, wobei der Einfluss mehrere Kenngrößen (z. B. die Meßunsicherheit und Anordnung von Instrumenten) untersucht werden kann. Unterschiedliche Gesichtspunkte, wie etwa die Lokalisierung einer Leckage sind berücksichtigt worden. Das Planungsinstrument wurde bei LANL (Tritium Systems Test Assembly) implementiert.

Mit dem Rechenmodell KATRIM-S sind Parameterstudien durchgeführt worden /23178,V22625/. Hierzu wurden insbesondere anomale Betriebszustände des Brennstoff-Kreislaufs untersucht. Neben dem zeitabhängigen Verhalten der Inventare von Kreislauf-Systemen konnten beispielsweise die in den Abb. 1 und 2 vorgestellten Zusammenhänge berechnet werden. Abb. 1 zeigt, die Abhängigkeit des Tritiumvorrats im Speicher von der Anlagenverfügbarkeit; als Parameter dient die Häufigkeit von Unterbrechungen des Plasmabrennens. Der erforderliche Tritiumvorrat nimmt mit der Verfügbarkeit und mit der Unterbrechungshäufigkeit deutlich zu. Abb. 2 zeigt den entsprechenden Zusammenhang, nun aber für das sogenannte "Bruterfordernis"; letzteres nimmt ab, wenn die Verfügbarkeit zunimmt.

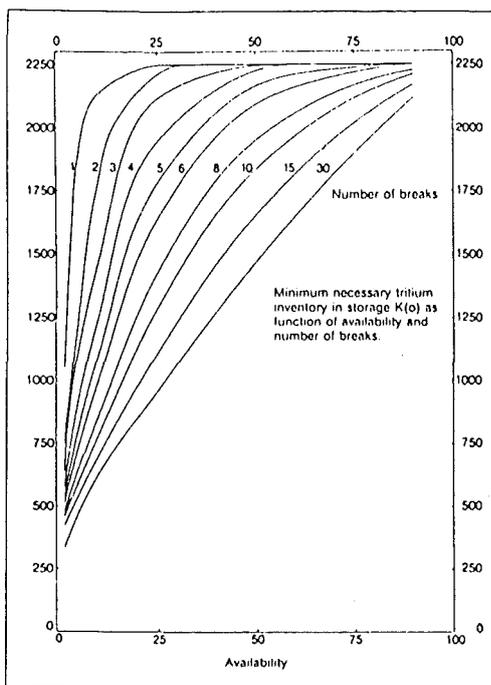


Abb.: 1 Minimales Startinventar an Tritium als Funktion der Verfügbarkeit und der Anzahl der Prozeßunterbrechungen.

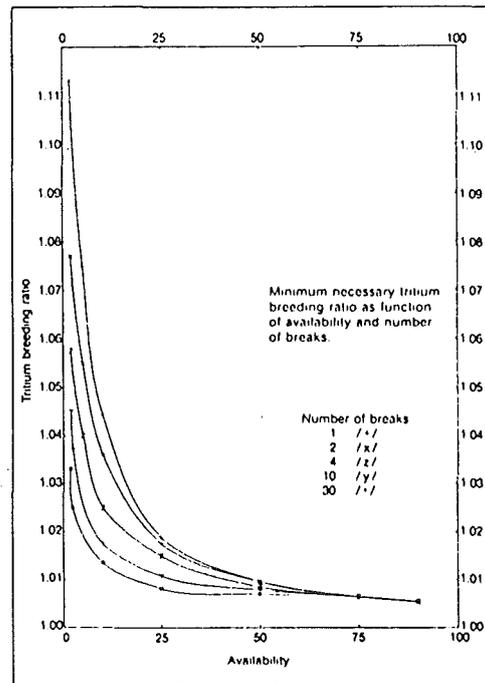


Abb.: 2 Minimales Bruterfordernis als Funktion der Verfügbarkeit und der Anzahl der Unterbrechungen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23178	03.05.04P19A	Dr. E. Gabowitsch <u>Dr. G. Spannigel</u> (M. Blumhofer, HDI) (B. Hertel, HDI) (Dr. S. Taczanowski Krakau)
V 23222	03.05.04P19B	
V 22625		

Institut für Radiochemie (IRCH)

Tritiumreinigung mit Gettern

Der Einsatz von heißen Metallgettern zur Reinigung des Primärgases von Fusionsanlagen ist eine alternative Methode zum vielfach angewandten bzw. vorgesehenen cryogenen Verfahren, bei welchem das Tritium durch fraktionierte Destillation von seinen Verunreinigungen (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O etc.) getrennt wird.

Die bisherigen Kenntnisse über die Eignung von Metallgettern für den angestrebten Zweck beschränken sich auf die kommerziellen Getter der Fa. SAES und auf einen bzgl. der Fusionsanlagen JET und NET unrealistischen Druckbereich von 10<sup>-3</sup> und 10<sup>-6</sup> mbar. Im IRCH wird daher ein Versuchsprogramm vorbereitet mit dem Ziel,

- a) die Gettereigenschaften verschiedener Metalle und Legierungen bei Drücken von 10<sup>-2</sup> bis 1 bar zunächst mit Wasserstoff zu untersuchen, und

b) die technisch relevanten Ergebnisse dann auch mit Tritium zu verifizieren.

Außerdem sollen die Ergebnisse in ein Gesamtkonzept zur Abgasreinigung einfließen, welches unter Berücksichtigung alternativer Verfahrensschritte schließlich für NET zu optimieren ist.

Die 1986 durchgeführten Vorarbeiten für die geplanten Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

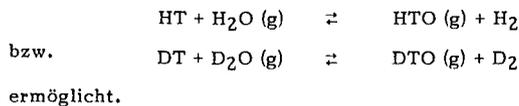
1. Spezifikation und Konstruktion eines Tritium-kompatiblen Versuchsstandes, der in seiner 1. Ausbaustufe mit Wasserstoff und in der 2. Ausbaustufe mit Tritium zu betreiben ist;
2. Erstellung einer Anlagenbeschreibung und einer vorläufigen Sicherheitsbetrachtung;
3. Einleitung der Baumaßnahmen für die Installation der erforderlichen Boxenabluft, der Raumabluft und der Strahlenschutzvorrichtungen;
4. Vergabe der wichtigsten Werkstattaufträge und aller Beschaffungsaufträge für die Ausbaustufe I.

Die weitere Planung sieht vor, im Februar 1987 mit dem Aufbau des Versuchsstandes und im Frühjahr mit ersten Funktionstests der Anlage zu beginnen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.05.02 P 23A	Dr. H. Albrecht Th. Kastner

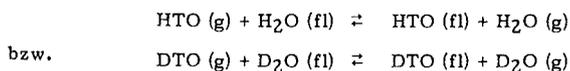
#### Tritiumanreicherung von Prozeßwässern

Wie bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen werden auch bei Kernfusionsexperimenten und bei der Kernfusion selbst größere Mengen von tritiiertem Wasser frei, die entsorgt oder in den Prozeß zurückgeführt werden müssen. Zur Abtrennung von Tritium bietet sich das CECE-Verfahren an. Für dieses Verfahren ist ein Katalysator erforderlich, der die Austauschreaktion



Dieser Katalysator muß wasserabstoßend sein, damit der Wasserstoff nicht durch eine Schicht flüssigen Wassers von den aktiven Zentren (Platin) ferngehalten wird. Diese Reaktion findet in der Gasphase statt.

Daneben läuft in der Austauschkolonne eine zweite Reaktion ab, die einer Rektifikation eines isotopen Wassergemisches entspricht:



Diese Reaktion wird durch große hydrophile Oberflächen begünstigt. Somit müssen in einer CECE-Kolonne konträre Forderungen in Einklang gebracht werden.

Ein vielversprechender Ansatz, dieses Problem zu lösen und somit die Wirksamkeit der Kolonne entscheidend zu verbessern, ist die räumliche Trennung der Reaktionen. Im Labormaßstab wurde eine Stufe einer auf diese Weise verbesserten CECE-Austauschkolonne aufgebaut und betrieben. Dabei zeigte es sich, daß die Austauschraten - bei sonst unveränderten Bedingungen - im Vergleich zur bisher angewandten Betriebsweise unabhängig vom Katalysatortyp um 50 - 60 % höher waren.

Zudem ergaben sich noch weitere Vorteile: Der Katalysator bleibt trocken; er wird nicht mechanisch durch herabfließendes Wasser beansprucht, so daß auch weiche, sonst nicht geeignete Katalysatoren gute Ergebnisse lieferten. Die Standzeit des Katalysators wird entscheidend verbessert, da der Effektivitätsverlust im wesentlichen durch den mechanischen Abtrag bedingt ist. Als Nachteil ist lediglich die aufwendigere Verfahrensführung zu vermerken.

Mit dieser weiterentwickelten CECE-Kolonne wird eine kleine Laboranlage aufgebaut. Die Komponenten (Festelektrolytelektrolyseur, Meßgeräte etc.) wurden 1986 bestellt. Sie wurden größtenteils bereits ausgeliefert, so daß mit dem Aufbau der Anlage 1987 begonnen werden kann.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
Bericht in Vorbereitung	04.02.01 P 46A	Dr. F. Rückert

#### Tritiumspeicherung in Metallen

Während des Betriebes einer Fusionsmaschine fallen Gasströme der schweren Wasserstoffisotope D und T an, die in reversiblen chemischen Verbindungen wie den Metallhydriden an verschiedenen Stellen gespeichert werden müssen. Zu den infrage kommenden Hydridbildnern zählen pyrophores U und Ti sowie gewisse Metallegierungen. Da in der Literatur nur wenig quantitative Ergebnisse über den Einfluß von Verunreinigungen auf die Hydridbildung vorliegen, soll dieser Frage experimentell nachgegangen werden.

Zur Erprobung der erstellten Versuchsanordnung und der eingesetzten Meßmethoden wurden zunächst Wasserstoffabsorptionsisothermen an Ti mit ihren typischen Druckplateaus, die durch Gleichgewichtsumwandlung von zwei definierten Me/H-Phasen zustande kommen, im Temperaturbereich 427 - 679 °C nachvollzogen. In einem nächsten Schritt wurden Gas-/Feststoffreaktionen an den o.a. Gettermaterialien unter Verwendung von fusionsrelevanten

Verunreinigungen (N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO usw.) examiniert. Mehrere Versuchsreihen galten der Kinetik der Reaktion von N<sub>2</sub> mit U, Ti und Ni unterschiedlicher Beschaffenheit (Blech, Schwamm, Pulver). Bei der Charakterisierung der an der Oberfläche sich ausbildenden Produkte erwies sich die Kombination Röntgendiffraktometrie / Augerelektro-nenspektroskopie als besonders aussagekräftig. Bei der Auswertung der kinetischen Messungen wurde für Metallblech die geometrische Oberfläche und für Metallschwamm bzw. -pulver die BET-Oberfläche zugrunde gelegt. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß im Hinblick auf die Reaktionskinetik die BET-Messung viel zu hohe Werte liefert (vgl. Abb.).

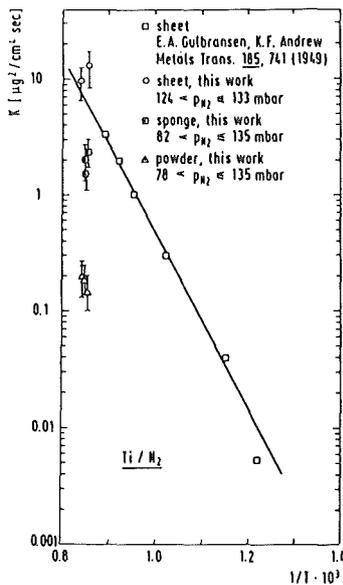


Abb.: Geschwindigkeitskonstante in Abhängigkeit von der Temperatur der Reaktion von N<sub>2</sub> mit Ti-Blech, -Schwamm und -Pulver

Ammoniak wird an Ti bei 625 °C in die Elemente zersetzt. Gleichzeitig bildet sich an der metallischen Oberfläche eine die Beladungskinetik behindernde Oberflächenschicht aus. Bei gleicher Temperatur zeigt N<sub>2</sub> weder eine die H<sub>2</sub>-Absorption vergiftende noch eine die Absorption verzögernde Wirkung. Die Geschwindigkeit der NH<sub>3</sub>-Cracking-Reaktion an Ti wird durch den Ausdruck

$$-dNH_3 / dt = K ([NH_3]^2 / [H_2]^3)^\delta$$

beschrieben, wobei  $\delta = 0,25$  ist.

Die Reaktion von NH<sub>3</sub> mit U ist bei 370 °C extrem langsam. Erst bei 590 °C setzt eine rasche Reaktion ein, die zur Bildung von H<sub>2</sub> in einem überstöchiometrischen Verhältnis zu N<sub>2</sub> führt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ein Teil des Stickstoffs am Uran als Nitrid gebunden wird. (Für eine quantitative Stickstoffgetterung aus NH<sub>3</sub> sind somit deutlich höhere Temperaturen erforderlich!) An Ni findet bei 590 °C eine quantitativ ablaufende NH<sub>3</sub>-Cracking-Reaktion (2 NH<sub>3</sub> → N<sub>2</sub> + 3 H<sub>2</sub>) statt.

Methan, ein reaktionsträgeres Gas als Ammoniak, reagiert an Ti unter Bildung von Oberflächencarbid erst bei 900 °C. Die TiC-Oberflächenschicht führt zu keiner nennenswerten Passivierung des Speichermaterials.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. R.-D. Penzhorn
		M. Sirch
		Dr. E. Willin

Tritiumprozeßtechnik

Ein auf Cracking-Reaktionen basierendes Plasma-Exhaust Reinigungsverfahren

Nach einer Zündung sind im Plasma-Exhaust eines Fusionsreaktors neben He, der "Asche" der Fusionsreaktion, noch weitere Verunreinigungen zu finden, die vornehmlich durch Plasma-/Wand-Wechselwirkungen gebildet werden. Dazu zählen CQ<sub>4</sub> (Q = H,D,T), höhere aliphatische und olefinische Kohlenwasserstoffe sowie NQ<sub>3</sub>, CO und CO<sub>2</sub>. Diese Verunreinigungen müssen vor der Rezyklierung des Brennstoffs entfernt werden, um das Plasma zündfähig zu erhalten.

Im IRCH ist ein Verfahrenskonzept für die Entfernung von Verunreinigungen aus dem Plasma-Exhaustgas entwickelt worden, das auch die Rückführung der an den Verunreinigungen gebundenen Wasserstoffisotope in den Brennstoffkreislauf vorsieht. Das Konzept, das im wesentlichen auf Ergebnissen experimenteller Arbeiten basiert, die im Hause durchgeführt worden sind, ist in der Abbildung schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt wird Q<sub>2</sub> durch Permeation bei 350 °C mittels eines Pd/Ag-Rohrbündel-Permeators abgetrennt. An den Pd/Ag-Rohren wird gleich-

PLASMA EXHAUST PURIFICATION SYSTEM

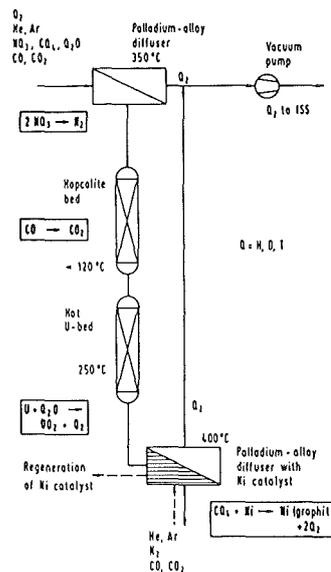


Abb: Fließschema eines Verfahrens zur Rückgewinnung von Tritium aus tritiumhaltigen Verunreinigungen im Plasma-Exhaust und Rückführung derselben in den Brennstoffkreislauf

zeitig  $\text{NQ}_3$  katalytisch in die Elemente überführt. Da  $\text{Q}_2$  als Produkt der Cracking-Reaktion zusammen mit dem Hauptwasserstoffstrom abgetrennt wird, verlagert sich das Gleichgewicht der Reaktion in Richtung der Zersetzungsprodukte mit der Folge, daß die Reaktion quantitativ abläuft. Unter Nutzung der Infrastruktur bei TSTA/Los Alamos ist in jüngster Zeit die im Permeator stattfindende Cracking-Reaktion unter heißen Bedingungen mit  $\text{N H}_{1,5} \text{T}_{1,5}$  demonstriert worden. Die Halbwertszeit der Selbststradiolyse von  $\text{N H}_{1,5} \text{T}_{1,5}$  wurde bei den gewählten Bedingungen zu 550 h bestimmt.

Für den Fall, daß die  $\text{CO}$ -Konzentration im Abgas des ersten Permeators 1 Vol % übersteigt, wird zum Schutze des zweiten Permeators vor einer  $\text{CO}$ -Vergiftung  $\text{CO}$  selektiv an Hopcalit oxidiert. Bei Temperaturen unter  $120^\circ\text{C}$  durchlaufen  $\text{CQ}_4$ ,  $\text{NQ}_3$  und  $\text{Q}_2$  das Hopcalitbett unverändert.

An Wasser gebundener Wasserstoff kann durch Reaktion mit  $\text{U}$  bei  $v \geq 250^\circ\text{C}$  freigesetzt werden. Bei dieser Temperatur reagieren  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CQ}_4$  mit Uran nicht.

Methan sowie andere KWS können an einem Ni-Katalysator quantitativ in die Elemente überführt werden, wenn das Produkt  $\text{Q}_2$  durch Permeation kontinuierlich abgeführt wird. Auch diese Reaktion konnte mit  $\text{CH}_2\text{T}_2$  unter heißen Bedingungen ( $2 \cdot 10^{12} \text{Bq}$ ) in Los Alamos nachvollzogen werden. Die Halbwertszeit der  $\text{CH}_2\text{T}_2$ -Selbststradiolyse wurde hier zu 250 h bestimmt. Der sich auf dem Katalysator im Laufe der Zeit niederschlagende Kohlenstoff reagiert bei  $450^\circ\text{C}$  quantitativ mit  $\text{D}_2$  zu  $\text{CD}_4$ , ohne daß dabei ein Verlust an Reaktivität des Katalysators zu verzeichnen wäre. Somit ist durch Regenerierung des Katalysators eine Minimierung des festen radioaktiven Abfalls möglich.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23110 V23440		Dr. M. Glugla K. Günther K. Nolte <u>Dr. R.-D. Penzhorn</u>

## Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

### Plasmaabgasreinigung und Wasserstoff-Isotopentrennung

An der vorgesehenen Planung eines Komponententeststandes für die Plasmaabgasreinigungsverfahren in NET-relevantem Maßstab wurde nicht gearbeitet. Der angestrebte NET-Studienkontrakt hierüber kam nicht zustande, da das NET-Team zuerst die Verfahrensauswahl treffen will.

Auch der vorgesehene Entwurf für eine Versuchsanlage zur kryogenen Wasserstoff-Isotopentrennung wurde nicht erstellt, da die Meinung vorherrscht, daß keine Verfahrenserprobung- und -verbesserung erforderlich sei, da bereits mehrere Anlagen dieser Art weltweit errichtet und betrieben wurden.

Das eingeplante Personal wurde für die Arbeiten zum Tritium-Labor Karlsruhe (TLK) eingesetzt.

### Arbeiten für das Tritium-Labor

Der Versuchsstand VERDI, mit dem das Tritium-Reinigungsverfahren für das TLK erprobt werden soll, wurde im IT-Kontrollbereich in einer Handschuhbox aufgebaut. Die Versuchsapparate, je ein Uran-Getterbehälter für Betriebstemperatur  $500^\circ\text{C}$  und  $900^\circ\text{C}$  sowie ein Molekularsieb-Adsorptionsbehälter, wurden konstruiert und gefertigt.

Bei der Entwicklung des Keramikbehälters für das  $900^\circ\text{C}$ -Getter wurde eine Keramik-Metall-Lötung gefunden, die es erlaubt, im kälteren Behälterbereich auf Edelstahl zuzugehen, wodurch Dichtungsprobleme konventionell gelöst werden können. Erste Prüfungen zur Anwendbarkeit auch unter Temperaturwechselbeanspruchung waren erfolgreich.

In einer Glasapparatur wurden mit 10 g-Mengen an metallischem Uran Versuche zur Pulverisierung des Urans durch Hydrier- und Dehydrierzyklen durchgeführt. Danach ist es möglich, Uran im Anlieferungszustand ohne vorheriges Beizen zu hydrieren, d.h. die Montage und das Einbringen des Urans in stückiger Form in den Getterapparat kann an Luft geschehen. Weiter wurden Versuche zum Oxidieren des pyrophoren Uranpulvers durchgeführt, als Vorarbeiten zum Entsorgungsvorgang.

Begleitende Arbeiten zur Tätigkeit des Generalingenieurs für das TLK bestanden in der Prüfung und Beurteilung der bisher erstellten Planungsunterlagen zur Tritium-Versorgung, d.h. Transferstation und Wasserstoff-Isotopentrennung. Zu dem letztgenannten Gewerke wurden Studien der Firma Sulzer, Schweiz, und CFFTP, Canada, geprüft und an Versuchen zur Verfahrensdemonstration teilgenommen.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V23350	03.05.02P18A	J. Hanauer E. Hölzchen <u>E. Hutter</u> G. Neffe P. Schira U. Tamm J. Weinhold

Entwicklung von großen Anlagenkomponenten für Tritiumbetrieb

1. Industriestudien

Die vorläufigen Ergebnisse der Durchführbarkeitsstudie über die für NET spezifizierten Turbomolekularpumpen zeigen, daß die vakuumtechnischen Anforderungen erreichbar sind. Weitere Untersuchungen an der magnetischen Lagerung sowie bei den Störfällen werden noch durchgeführt.

Die Ausschreibung für eine Studie über einen Ganzmetallschieber (ND 1500 mm) wurde abgeschlossen.

Die technische Spezifikation für die Vorpumpe wurde aufgrund der neuen Daten aus der Turbomolekularpumpen-Studie ergänzt.

2. Experimentelle Arbeiten zur Kryosorption

Die experimentellen Arbeiten zur Kryosorption haben das Ziel, geeignete Sorbens/Binder/Kaltfläche-Materialkombinationen für das Pumpen von Plasmaabgas zu finden und für die Anwendung in einem Fusionsreaktor zu optimieren.

Eine Testmatrix für die Durchführung von experimentellen Untersuchungen wurde erstellt. Die Arbeiten zur Entwicklung von Kryosorptionsflächen werden in mehreren Schritten durchgeführt:

- Temperaturzyklierung (78K - 150 bis 300 °C) von 50 mmØ Proben (Anlage TARZAN)
- Vergleichsmessungen der Sorptionskapazität für Helium bei 4,2 K von 50 mmØ Proben (Anlage HELENE)
- Kryopumpen von Plasmaabgas unter Betriebsbedingungen eines Fusionsreaktors mit Sorptionspanelen von 400 mmØ (Anlage TITAN)
- Dauertests mit Sorptionspanelen von 400 mmØ (Anlage TITAN)

Es wurden bereits über 200 Proben in 50 mm Maßstab hergestellt. Die Anlage TARZAN ist im Probetrieb. Die Planungsarbeiten und die Beschaffung von Komponenten für die Anlage HELENE sind abgeschlossen. Die Anlage TITAN wurde spezifiziert und bestellt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V22764	03.05.02P17A	J. Hanauer W. Höhn B. Kammerer U. Kirchhof H. Lukitsch A. Mack J. Markova <u>D. Perinic</u>

Vorhaben  
**03.05.03 Handhabungstechniken**

**Institut für Reaktorentwicklung (IRE)**

Die Entwicklung von Handhabungstechniken im IRE orientierte sich überwiegend am absehbaren Bedarf künftiger Fusionsanlagen und ähnlich gelagerter anspruchsvoller Anwendungen der Industrierobotertechnologie. Unter fachlichen Aspekten stehen Arbeiten auf folgenden Gebieten im Vordergrund: CAD-Techniken für Bahnplanung und Kollisionsvermeidung, Mensch-Maschine-Schnittstelle für Programmierung und Betrieb von Handhabungsgeräten sowie Robotersteuerung über Bildverarbeitungssysteme und andere Sensoren.

(a) Handhabungstechnik für NET und JET

Für Arbeiten im Inneren des Vakuumbehälters von NET wurde das Konzept zur rechnergestützten Fernhandhabung (CAT = computer aided-telemanipulation) weiterentwickelt und in Prototypen erprobt. Ziel dieser Arbeiten ist eine Integration von rein manueller Arbeit, rechnerunterstützter manueller Arbeit und automatisch ablaufenden Teilarbeiten, die lediglich zu überwachen sind. Die Schwerpunkte der Implementierungen waren die synthetische Darstellung der Arbeitsszene mit Hilfe der Computer-Graphik unter Benutzung der Gelenksensordaten der Handhabungsgeräte und die Kollisionskontrolle mit Hilfe dieser Signale und eines Umgebungsmodells. Weiterhin wurden geeignete Sensoren und Vermessungssysteme untersucht und entwickelt. Hierbei stellen die Umgebungsbedingungen bei NET (150 °C und über 10<sup>6</sup> rad/h Energiedosisleistung) besondere Anforderungen.

Zur Übertragung der kinematischen und geometrischen Daten von einem CAD-System auf die Graphiksysteme wurde ein geeignetes Datenformat definiert und erprobt, das sich an das CAD\*I-Format anlehnt. Mit der Entwicklung eines Systems zur Generierung dieser Daten auf dem APPLICON-CAD-System wurde begonnen. Auf diese Weise können CAD-Modelle wie das in Abb. 9 gezeigte Modell von NET mit einem Manipulatorarm in Arbeitsposition in die Steuerung von Handhabungseinrichtungen einbezogen werden.

Die Entwicklung des Prototypensystems zur Unterstützung der Slave-Positionierung und Kamera-Steuerung in einer Manipulator-Arbeitszelle wurde abgeschlossen. Es enthält Modulen zur dreidimensionalen hierarchischen Umgebungsmodellierung, zur Modellierung von verzweigten kinematischen Ketten, zur Kollisionsberechnung, zur Kameranachführung bei Bewegungen des Trägersystems und zur Szenendarstellung. Die Systemsteuerung wird durch Spracheingabe und graphische Eingaben unterstützt, Kollisionswarnungen erfolgen durch Sprachausgabe.

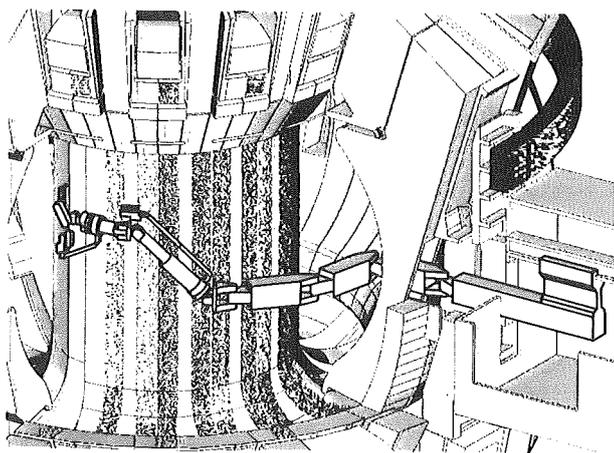


Abb. 9: Manipulatorarm mit Greifer und zwei Halterungen für Stereokameras in Arbeitsposition im Innern des NET-Vakuumbehälters

Für JET wurde ein weiteres CAT-Prototypsystem in einer ersten Ausbaustufe implementiert und on-line erprobt. Es liefert eine synthetische Szenendarstellung des Trägersystems mit seinen verschiedenen End-Effektoren, den Kamera-Armen und der Arbeitsumgebung. Das System enthält Moduln zur Kollisionskontrolle, zur Kamera-nachführung und zur Unterstützung der manuellen Steuerung von Gelenkarm-Bewegungen. Für dieses System wurde ein Hochleistungs-Grafiksystem eingesetzt, das eine Bildwiederholrate von etwa 15 Bildern/Sekunde erlaubt. JET beabsichtigt, zwei dieser vom KfK entwickelten Systeme in der Fernhandhabungs-Warte zu installieren.

Für die Vermessung großer Komponenten der NET-Anlage wird an einem interaktiven Fernvermessungssystem mit einem Laser-Theodoliten gearbeitet. Die Fernsteuerung des Theodoliten und Basis-Algorithmen zur Vermessung wurden implementiert.

#### (b) Rechnerunterstützte Handhabungstechnik für Fusionsanlagen

Ziel dieser Arbeiten ist es, den Einsatz heutiger Industrierobotertechnologie für Handhabungsaufgaben in der Fusion zu untersuchen. Dazu wurden im Berichtszeitraum zwei Handhabungsaufgaben mit dem MANUTEC R3-Roboter gelöst. Die erste Aufgabe ist der automatische Aufbau einer Bleiziegelwand zur Abschirmung einer Strahlungsquelle. Hierbei wurde untersucht, wie die Robotersteuerung an verschiedene Arbeitspositionen angepaßt werden kann und mit welcher Zuverlässigkeit eine bislang nur manuell durchgeführte Arbeit automatisiert werden kann. Der Aufbau derartiger Abschirmungen dauert zur Zeit mit einem Servomanipulator mehrere Stunden, mit dem Roboter ist dieselbe Aufgabe nach erfolgter Programmierung in wenigen Minuten durchführbar. Als zweite Handhabungsaufgabe wurde demonstriert,

wie mit dem Roboter ein Rohrleitungsflansch automatisch auf- und zugeschraubt (s. Abb. 10) und der geöffnete Flansch an eine Ablageposition gebracht werden kann. Das zugehörige Roboterprogramm funktioniert derzeit zuverlässig unter der Voraussetzung, daß der Flansch eine feste Position einnimmt. Es dient als Vorbereitung dafür, dieselbe Aufgabe auch bei einer beliebigen Flanschposition durchzuführen. In diesem Fall muß die aktuelle Position des Flansches vermessen werden. Zu diesem Zweck wurde ein Bilderkennungsprogramm entwickelt, das an den Roboter adaptiert wird.

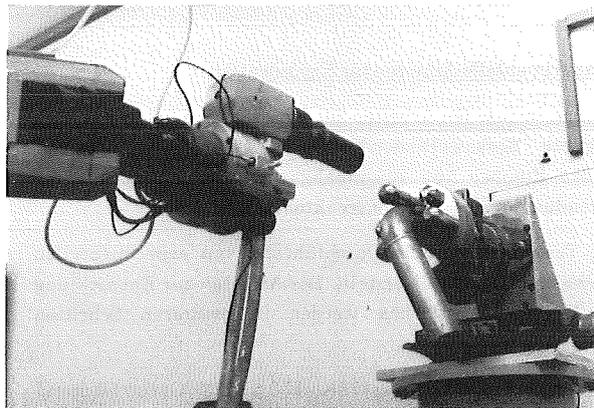


Abb. 10: Schlagschrauber in der Hand eines Industrieroboters kurz vor dem Öffnen einer Flanschverbindung

Dieses Programm ist in der Lage, nach einer entsprechenden Bildvorverarbeitung den Flansch in einem Kamerabild automatisch zu identifizieren und seine Lage und Orientierung bis auf wenige Millimeter zu bestimmen. Die verbleibende Restungenauigkeit beim Aufsetzen des Schlagschraubers muß dann mit einem Kraft-Momentensensor kompensiert werden.

Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Steuerung des Roboters durch externe Sensoren beeinflussen läßt. Hierzu wurden am Roboter ein selbstentwickelter taktischer Sensor sowie ein handelsüblicher Ultraschallsensor installiert. Die Funktionsfähigkeit dieser Sensoren zur Kollisionsdetektion konnte demonstriert werden. Zur off-line Programmierung eines Industrieroboters wurde von der Universität Karlsruhe das Programmiersystem SRL übernommen und auf einem hauseigenen Rechner installiert.

#### (c) Arbeiten zu Hochflexiblen Handhabungssystemen

Im Berichtszeitraum startete das IRE ein neues Vorhaben mit der Absicht, im nukleartechnischen Bereich entwickeltes Know-how auf nichtnukleare Anwendungen von mehrgliedrigen Systemen mit kinematischer Redundanz zu übertragen. Ziel ist es, für das eigentliche

Handhabungswerkzeug ein hochflexibel einsetzbares Trägersystem auf der Basis eines dafür geeigneten Fahrzeugs eines Industriepartners zu entwickeln.

Zur Vermeidung von Kollisionen des Arbeitsgerätes mit der Umwelt wird im IRE ein Meßsystem zur Erfassung der Umgebungsgeometrie entwickelt. Ein Kollisionsanalyse-system prüft während des Betriebs die Bewegungen auf Kollision und meldet solche an die Steuerung.

Veröffent- lichungen:	Primär- berichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
22779	03.05.03P18A	<u>J. Benner</u>
22944	03.05.03P18B	C. Fischer
V 23541	03.05.03P18C	H. Knüppel
	03.05.03P18D	B. Köhler
	03.05.03P20A	T. Kornelson
	03.05.03P20B	<u>R. Krieg</u>
	03.05.03P20C	U. Kühnapfel
	03.05.03P20D	<u>K. Leinemann</u>
		G. Messemer
		G. Rittirsch
	H.A. Rohrbacher	
	<u>E.G. Schlechtendahl</u>	
	J. Schröder	
	P. Schultheiß	
	D. Smidt	
	E. Stratmanns	
	W. Till	
	<u>M. Wadle</u>	

## Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)

### Entwicklung und Realisierung von Steuerungskonzepten für Telemanipulatoren zum Einsatz in der Fusionstechnologie

IDT entwickelt und realisiert Steuerungskonzepte für Telemanipulatoren zum Einsatz bei Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten im Vakuumbehälter eines Fusionsreaktors. Diese Arbeiten basieren zu einem wesentlichen Teil auf den Entwicklungsergebnissen zu 04.01.12 (PWA).

Darüberhinaus arbeitet IDT im Rahmen dieses Vorhabens an der Entwicklung von Subsystemen für das In-Vessel-Handling mit, die in direktem Bezug zur Manipulatorsteuerung stehen, wie z.B. Beobachtungssystem, Signalübertragungssystem und Trägersystem.

Das auf der Großrechenanlage des KfK von IDT realisierte Simulationssystem zur Untersuchung der Manipulator-dynamik wird seit etwa zwei Jahren routinemäßig als Entwurfswerkzeug bei der Entwicklung von Steuer- und

Regelalgorithmen eingesetzt. Weiterentwicklungen an diesem System zielen auf eine Verbreiterung der Anwendungsmöglichkeit, die Vereinfachung der Benutzerschnittstelle, verbesserte Effizienz und die Integration graphischer Hilfsmittel. Zusammen mit dem Institut für Mechanik der Universität Karlsruhe wurden alternative rechnergestützte Modellierungsansätze am Beispiel des EMSM-2 erprobt. Die vom IDT gewählte Modellierung (Newton-Euler-Verfahren) zeigt Vorteile in der Transparenz des Verfahrens und in der Erweiterbarkeit auf spezielle Manipulatoren. Durch Umstellung der geschlossenen Berechnung der Systemmatrizen auf iterative numerische Verfahren konnte eine Verbesserung der Bedienungsfreundlichkeit des Simulationssystems erreicht werden. Für die Integration eines CAD-Systems, das die Berechnung der für die Simulation relevanten Parameter direkt aus den Konstruktionsunterlagen (3D-Modelle) gestattet, wurde ein Konzept erarbeitet; die Beschaffung des CAD-Systems wurde eingeleitet.

Die Hardware für die rechnergestützte Steuerung des EMSM-2 im Teststand des IDT wurde weitgehend fertiggestellt; nach meßtechnischer Verifikation und Bestimmung wichtiger mechanischer und elektrischer Parameter des EMSM-2 konnte mit der Realisierung der ersten Version der Software einer digitalen EMSM-2-Steuerung begonnen werden. Wesentliche Teile der Software (Einlesen/Test von Peripherie-Signalen, graphische Auswertung, Archivierung, Aufzeichnen und Auswerten von Daten für die Betriebsart "Analogbetrieb aufzeichnen", interaktive Eingabeschnittstelle für die Definition von Versuchsparametern) sind bereits fertiggestellt, so daß eine baldige Aufnahme des Versuchsbetriebs möglich sein wird.

Ein Signalübertragungssystem, basierend auf PCM-Technik und Mehrfaser-Lichtwellenleitersystem, das sowohl die Audio-/Video-Übertragung (je zweikanalig), als auch die Übertragung aller Kontroll- und Statussignale zwischen Handhabungsgeräten und Steuerung in digitaler Form ermöglicht, wurde konzipiert. Die Beschaffung der benötigten Komponenten wurde eingeleitet. Die Signalübertragung über eine 600 m lange Strecke wurde exemplarisch realisiert.

Zur Vorbereitung der Kraft/Momenten-Sensor-Integration in den Teststand 1 wurde eine Adaptierung der Signalschnittstellen der Steuerungshardware vorgenommen.

Nach Überarbeitung und Neuinbetriebnahme konnte mit der Erprobung der Kamerasteuerung (CameraTracking) für den EMSM 1 (in Zusammenarbeit mit HIT und IRE) begonnen werden /22839/.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22839	--	Dipl.-Ing. H.-M. Becker <u>Dipl.-Inform. H. Breitwieser</u> Dr. E. Holler Dipl.-Ing. J. Isele Dipl.-Inform. P. Kohlhepp Dipl.-Ing. W. Weber Dipl.-Inform. (FH) S. Müller

## Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

### Reaktorkomponenten und Handhabungstechniken

Die Arbeiten in diesem Vorhaben betreffen Arbeiten zum Thema Handhabungstechniken für NET und die Erstellung des TFTR-Invesel-Maintenance-Manipulators (TMM) für das Princeton Plasma Physic Laboratory.

#### 1. Handhabungstechniken für NET

Als Basis für diese Arbeiten dienen die Ergebnisse der im Rahmen dieses Vorhabens ausgearbeiteten Studien "Pipe and Vacuum Duct Connections" und "Vacuum Tight Connections and Closures, Lip Welding and Cutting". Die Studien enthalten neben der Beschreibung zum Stand der Technik Hinweise für ein mittelfristiges F + E-Programm.

In Abstimmung mit dem NET-Team wurde ein zunächst auf Ende '87 befristeter EG-Vertrag zur Entwicklung o.g. Techniken abgeschlossen.

Im Berichtszeitraum wurde ein Teststand zur Erprobung fusionsrelevanter Rohrleitungsverbindungen erstellt und mit ersten Versuchsobjekten ausgerüstet. Für das fernbediente Trennen und Schweißen wurden die ersten prototypischen Geräte entwickelt. Mit der Entwicklung eines an den zu erwartenden Schweißnahtgeometrien orientiertes Lippen-schweißgerät wurde begonnen. Die Konzipierung eines Teststandes zum integralen Testen der verschiedenen NET-relevanten Verbindungstechniken wurde aufgenommen.

#### 2. TFTR-Maintenance Manipulator (TMM)

KfK ist Ende '85 mit PPPL übereingekommen, die Realisierung des TMM im Rahmen eines deutsch-amerikanischen Gemeinschaftsprojektes durchzuführen. KfK übernimmt dabei das Engineering, die Auftragsüberwachung und die Erprobung, das PPPL die Herstellungskosten.

In der ersten Hälfte '86 erfolgte die Auslegung und Konstruktion, sowie die Ausschreibung zur Detailkonstruktion und Herstellung des mechanischen Teils. In der zweiten Hälfte '86 wurde der Auftrag zur Fertigung des mechanischen Teils an ein deutsches Industrieunternehmen erteilt, die Steuerung wurde durch KfK konzipiert.

Für die Steuerung wurde eine Punkt-zu-Punkt-Steuerung gewählt. Die Koordinaten der jeweiligen Punkte sind fest in einem zerstörungsfreien Speicher (PROM) abgelegt. Die Positionsbestimmung erfolgt mittels inkrementaler Impulsgeber. Die kinematische Analyse wurde mit Hilfe des CAD-Systems "Applicon BRAVO !" durchgeführt. Das Ergebnis ist eine Bahnkurve, die die Position der Gelenke vorgibt.

Im Rahmen eines Zusatzauftrages führt KfK die Entwicklung und Erprobung von Spezialwerkzeugen für die fernbediente Instandhaltung im Inneren des TFTR-Vakuumgefäßes durch. Hierzu wurde das Konzept mit PPPL abgestimmt.

Veröffent-  
lichungen

22778

Primärberichte

03.05.03.16A

Beteiligte Mitarbeiter

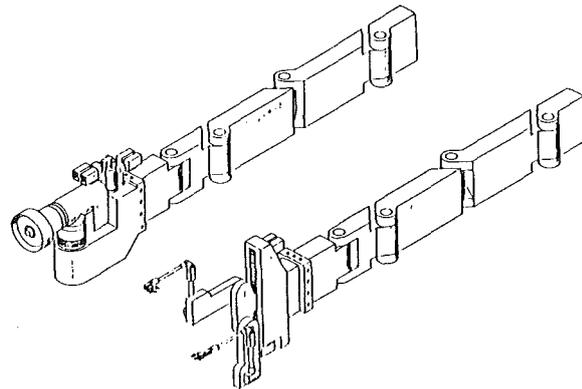
L. Gumb  
B. Haferkamp  
A. Hinz  
E. Hörl  
E. Lotz  
G. Müller  
M. Selig  
M. Trettin

### Entwicklung von Komponenten zur fernbedienten Instandhaltung

Bei dem elektrischen Master-Slave-Manipulator "EMSM 2-B" handelt es sich um eine Weiterentwicklung des "EMSM 2", die sich durch erheblich höhere Belastbarkeit und verbesserte Leichtgängigkeit auszeichnet. Das Gerät ist ein Schritt in Richtung eines auf die Instandhaltung in Fusionsanlagen zugeschnittenen Manipulators. Es ist darüber hinaus als "Werkzeug" für Handhabungsversuche mit Anlagen-Komponenten vorgesehen. Der in Auftrag gegebene Prototyp wurde weitgehend fertiggestellt und am Ende des Berichtszeitraumes für einen ersten Test angeliefert.

In einer Studie wurden die Probleme des automatischen Arbeitens bei der Instandhaltung ermittelt, grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten genannt und der erforderliche hohe Aufwand deutlich gemacht.

Im Rahmen des Vorhabens RM3 des NET-Technologieprogramms wurden fünf Konzepte für ein System zur fernbedienten Handhabung von In-Vessel-Komponenten untersucht und bewertet. Ausgewählt und vertieft bearbeitet wurde ein Manipulator-Trägersystem mit einem horizontalen Gelenk-Ausleger (s.Bild). Mit drei wahlweise einsetzbaren Arbeitseinheiten können Tiles, HF-Antennen, Divertor-Platten und aktive Magnete ausgetauscht werden.



Manipulator-Trägersystem mit verschiedenen Arbeitseinheiten,  
links: Greifer für HF-Antennen,  
rechts: Elektrische Master-Slave-Manipulatoren

Veröffent-  
lichungen

Primärberichte

Beteiligte Mitarbeiter

W. Hennhöfer  
J. Hübener  
M. Salaske  
W. Köhler

Vorhaben  
03.05.04 Sicherheitsuntersuchungen

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

a) Zuverlässigkeitsanalysen

Für die TESPE-Versuchseinrichtung des ITP wurde die Zuverlässigkeit bestimmt, mit der im Falle eines Quench (Übergang von Supraleitung in Normalleitung) die Magnetspulen abgeschaltet werden. Dabei zeigte sich, daß der Common-Mode-Fehler infolge einer Fehljustierung der Quenchdetektoren nicht zu einer Zerstörung der Magnete führen kann, weil die maximal mögliche Fehljustierung nicht zu einer Schädigung ausreicht. Dieses Beispiel stützt das im Bereich der Fusionstechnologie verfolgte Konzept, unter Anwendung des Diversitäts- und Redundanzprinzips Schwachstellen im System und Unsicherheiten in den Daten für eine Zuverlässigkeitsanalyse von Teilsystemen durch konstruktive Maßnahmen zu kompensieren. Die errechneten Unverfügbarkeiten sind deshalb in erster Linie als relative Bewertungskriterien der einzelnen Komponenten im gegenseitigen Zusammenspiel zu betrachten.

Die Unverfügbarkeit des Abschaltsystems pro Anforderung ergibt sich aufgrund der Annahmen zu  $1,12 \cdot 10^{-2}$ . Dieser Wert streut im Bereich  $8,6 \cdot 10^{-4}$  bis  $4,8 \cdot 10^{-2}$ . Etwa 70 % des Anteils wird durch das Steuergerät verursacht. Eine Reduzierung der Geräteunverfügbarkeit um den Faktor 10 führt in der Gesamtverfügbarkeit zu einer Verbesserung um den Faktor 3.

Als Folge der Analysen wird empfohlen, für ein größeres Magnetsystem ein weiteres, vom ersten möglichst unabhängiges Abschaltkriterium einzuführen, um eine merkliche Verminderung der Gesamtunverfügbarkeit zu erzielen.

b) Stabilitätsanalysen für den Kryostat

Die Arbeiten zu einem vereinfachten Lösungsverfahren zur Beulanalyse wurden fortgesetzt. Entsprechend der grundlegenden Idee des Verfahrens wird nicht die ideale, sondern eine gestörte (imperfekte) Geometrie untersucht. Zur Erfassung der Beulphänomene werden Approximationen unterschiedlichen Näherungsgrades gemacht. Das Verfahren ersten Grades ist geeignet zur Beulwertbestimmung von Strukturen mit neutralem und stabilem Nachbeulverhalten. Mit den Approximationen höheren Grades wird die Anwendbarkeit erweitert auf Strukturen mit instabilem Nachbeulverhalten, deren Beulwerte sensitiv gegen Imperfektionen sind.

Abb. 11 zeigt Approximationen ersten Grades für unterschiedliche Geometrien. Es zeigt sich, daß bei kleinen Imperfektionen in den dargestellten Fällen die Nähe-

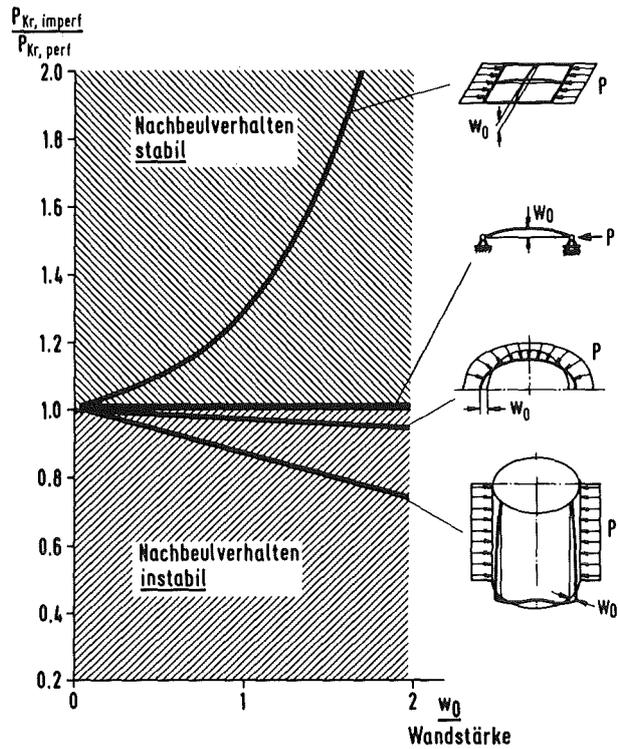


Abb. 11: Näherungsweise Ermittlung von Beullasten für einfache Geometrien

- $P_{Kr, imperf.}$ : Näherungswert für Beullast bei Vorgabe einer fiktiven Imperfektion  $w_0$
- $P_{Kr, perf.}$ : Exakte Beullast für ideale Geometrie

ungswerte mit den theoretischen kritischen Lasten der idealen Geometrien gut übereinstimmen. Der Verlauf der Kurven bei größeren Imperfektionen zeigt den Typ des Nachbeulverhaltens an. Falls dieser instabil ist, sind die Ergebnisse der Approximation ersten Grades unzureichend. Eine Erweiterung auf Approximationen höheren Grades ist erforderlich. Für eine Zylinderschale lieferte eine Approximation zweiten Grades befriedigende Ergebnisse.

In einigen Fällen liefert das Verfahren ersten Grades Beulwerte in exakter Übereinstimmung mit den Lösungen der klassischen linearisierten Stabilitätstheorie. Daher wurde in einer Studie untersucht, ob dies auch allgemein bei Schalen beliebiger Geometrie zutrifft. Dazu wurde eine allgemeine Näherungslösung des Stabilitätsproblems hergeleitet und mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren verglichen. Es zeigte sich, daß die beiden Lösungsausdrücke nur von ähnlicher Struktur sind. Daher kann im allgemeinen das Verfahren ersten Grades nicht den exakten klassischen Beulwert liefern. Auch aus diesen Gründen werden zur Absicherung des Verfahrens geeignete Experimente vorbereitet.

c) Störfallbeanspruchung eines Blanket-Kanisters

Für das beim KfK in Entwicklung befindliche Feststoff-Blanket mit Heliumkühlung wurde angenommen, daß ein Kühlrohr in einem Blanket-Kanister bricht und das austretende Kühlmittel den Kanister unter Innendruck setzt. Der Kanister soll diesem Druck standhalten. Aus elastischen Analysen ging hervor, daß an einigen hochbeanspruchten Stellen die Werkstoff-Fließgrenze schon zwischen 5 und 10 bar Innendruck erreicht wird. Aufwendigere nichtlineare Analysen mit dem Rechenprogramm ABAQUS (Berücksichtigung großer plastischer Verformungen) zeigten, daß nach einer Optimierung der Konstruktion selbst der Kühlmitteldruck von 60 bar noch aufgenommen werden kann. Unter der Voraussetzung, daß das Material, einschließlich der Schweißnähte, sehr hohe Dehnungen zuläßt, stellte sich ein Versagen durch plastische Instabilität rechnerisch erst bei einem Druck in der Größenordnung von 200 bar ein. Da die Analysen mit einem fortgeschrittenen, noch nicht ausreichend getesteten Verfahren durchgeführt wurden, wird eine entsprechende experimentelle Überprüfung vorbereitet.

d) System-Analyse

Zur Vermeidung späterer kostspieliger Änderungen im Entwurf von NET bzw. von Teilsystemen wird versucht, mögliche Störfallsequenzen frühzeitig zu erkennen. Im Gegensatz zu den Sicherheitsbetrachtungen von Teilsystemen werden hier Störfallsequenzen für die gesamte Anlage betrachtet (Overall Plant Accident Scenarios). Bei dieser Arbeit wird die Erfahrung von Sicherheitsuntersuchungen an Leichtwasser-Reaktoren genutzt und dort übliche auslösende Ereignisse analog unterstellt. Diese Arbeit stellt keine Risikoanalyse dar, da eine solche Analyse einen detaillierten Entwurf sowie Zahlenwerte für die Zuverlässigkeit einzelner Bauteile erfordert. Vielmehr werden hier mit "engineering judgement" die kritischen Störfallabläufe identifiziert.

Im Berichtszeitraum wurde die erste Version einer Studie erstellt, die für alle wesentlichen Teilsysteme das Gefährdungspotential identifiziert. In einem zweiten Schritt wurden bestimmte Versagensarten unterstellt und die sich daraus ergebenden Störfallsequenzen soweit beschrieben, bis ein weiteres Teilsystem von den Folgen erfaßt wird. In einem weiteren Schritt werden dann die Einzelereignisse zusammengefügt und ergeben so "Overall Plant Accident Scenarios". Nach einer gründlichen Diskussion dieser Studie in einer NET-Arbeitsgruppe werden kritische Störfallabläufe herausgegriffen, um die zunächst nur abgeschätzten Zusammenhänge auch numerisch zu belegen.

e) Sicherheitsleitlinien für den Entwurf von NET

Die Erstellung von sicherheitsrelevanten Leitlinien für den Entwurf von NET zielt darauf ab, Sicherheitsüberlegungen bereits in einer frühen Phase in den Entwurfsprozeß einzubeziehen, um im Sinne des in der Sicherheitstechnik geltenden Mehrstufenprinzips einen Beitrag zur Verwirklichung der Basissicherheit zu leisten. Im Rahmen einer speziellen NET-Arbeitsgruppe sollen allgemeine sicherheitsrelevante Leitlinien und entwurfsspezifische Sicherheitsleitlinien erstellt werden. Es wurden Beiträge zu den Allgemeinen Sicherheitsleitlinien ausgearbeitet und in Abstimmung mit der Arbeitsgruppe ein erstes Konzept erstellt.

Veröffent- lichungen:	Primär- berichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
23267	03.05.04P04A	B. Dolensky
V 23462	03.05.04P04B	W. Kramer
	03.05.04P05A	R. Krieg
		K.H. Lang
		T. Malmberg
		R. Meyder
		S. Raff
		H. Schnauder
		E. Wehner
		A. Wickenhäuser
		E. Wolf

## Abteilung für Angewandte Systemanalyse (AFAS)

Dieser Beitrag zum FuE-Vorhaben wurde zusätzlich zum FuE-Programm bearbeitet.

### Umweltverträglichkeitsstudie Fusionsreaktor

Im Rahmen der "Umweltverträglichkeitsstudie Fusionsreaktor" sollen durch die AFAS Strahlenexpositionswerte für die nähere Umgebung und in größeren Entfernungen der Fusionsanlagen berechnet werden. Da derartige Anlagen derzeit lediglich in der Planung existieren und auch noch keine Standortentscheidungen vorliegen, sind die aus unterschiedlichen Emissionsdatensätzen und unterschiedlichen Standorten resultierenden Werte für die Ortsäquivalentdosis und die Kollektiväquivalentdosis zu vergleichen und zu bewerten. Zur Bestimmung der Kollektivdosiswerte muß der Transport von radioaktiven Emissionen bis zu Entfernungen von mehr als 1000 km berechnet werden. Dazu wurde das Trajektorien-Puff-Modell "MESOS" entsprechend modifiziert, und es wurden für ein Nuklid Rechnungen für ausgewählte Standorte durchgeführt.

Aus meteorologischen Datensätzen für die Jahre 1982 und 1983 wurden Trajektorienverläufe für Standorte in England (2° westlicher Länge, 53,5° Breite), Frankreich (5° östlicher Länge, 44° Breite und 2,5° östlicher Länge, 48,75° Breite) und der UDSSR (29,5° östlicher Länge, 51,25° Breite) berechnet und dabei die Trajektorien ausgewählt, die ein bestimmtes Gebiet, z.B. die Bundesrepublik Deutschland, erreichen. Im Jahre 1982 hätten vom englischen Standort 22 % der gestarteten Trajektorien das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erreicht, vom Standort in der UDSSR 5 %, vom nördlichen Standort in Frankreich 39 %, vom südlichen 18 %. Abbildung 1 zeigt als Beispiel den Verlauf von 2 Trajektorien, die am 9.2.1982 am südlichen Standort in Frankreich um 6 Uhr bzw. um 21 Uhr gestartet wurden. Die erste Trajektorie erreicht nach etwa 40 Stunden

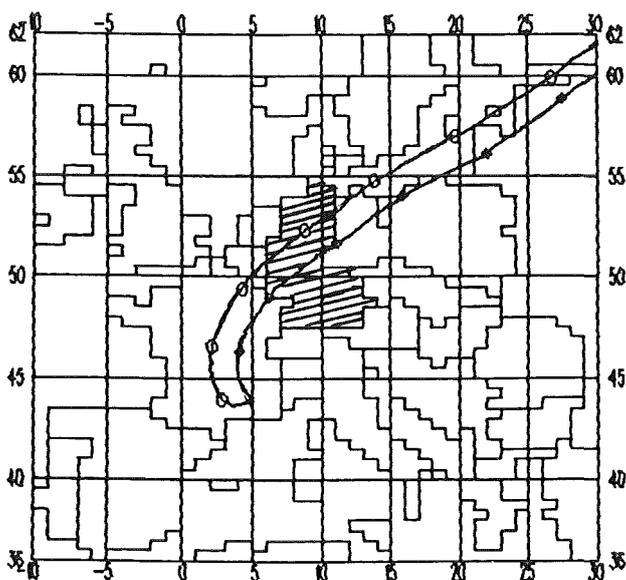


Abb. 1: Verlauf von Trajektorien, die am 9.2.1982 um 6 Uhr (o) und um 21 Uhr (◇) in Südfrankreich gestartet wurden

das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, die zweite nach 24 Stunden. Für die Trajektorien, die das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erreichen, wurden die zugehörigen normierten Konzentrations- und Depositionswerte errechnet. Unter den meteorologischen Bedingungen des Jahres 1982 wären vom englischen Standort 1,8 % der insgesamt emittierten Menge auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland abgelagert worden. Für den nördlichen französischen Standort ergäben sich 6,0 %, für den südlichen 1,4 % und für den Standort in der UDSSR 0,11 %. Aus diesen und weiteren Größen kann für ausgewählte Gebiete und unterschiedliche Standorte mit den geltenden Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der Strahlenexposition die kollektive Äquivalentdosis errechnet werden.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
--	03.05.04P07A	Dipl.-Physiker K.R. Bräutigam <u>Dr. G. Halbritter</u>

## Hauptabteilung Sicherheit (HS)

03.05.04/06A Verhalten von Tritium im System Luft-Boden-Pflanze

Der Schwerpunkt der Arbeit im vergangenen Jahr lag auf der Vorbereitung, der Teilnahme und der Auswertung des ersten HT-Ausbreitungsexperiments in Frankreich, das einen Unfall mit sehr schneller Tritiumfreisetzung simulieren sollte.

Das Ziel dieses Feldexperiments war, die HT-Deposition im Boden und in Pflanzen sowie die Reemission von HTO aus dem Boden unter natürlichen Bedingungen zu untersuchen und mit im Labor gewonnenen Daten zu vergleichen.

Der KfK-Beitrag bestand in der Exposition von Boden- und Pflanzenproben aus der Karlsruher Umgebung in der Schadstoffwolke und Analyse des aufgenommenen Tritiums in HTO und OBT. Bei den Bodenproben handelte es sich um sandigen Boden aus Spöck, Parabraunerdeboden vom Michaelsberg und moorigen Boden aus dem Tiefgestade Leopoldshafen. Die ungestörten Bodenkerne ohne Bewuchs befanden sich in Stahlzylindern mit 30 cm Durchmesser und 40 cm Höhe. Vor und nach der Tritiumexposition wurden daraus Bodensäulen von 2 cm Durchmesser entnommen und in 5 cm Segmente aufgeteilt.

Das Bodenwasser wurde durch Gefriertrocknung entzogen und mit Hilfe der Flüssigszintillationsspektrometrie

gemessen. OBT muß noch analysiert werden durch Verbrennung des trockenen Materials und Messung des Oxidationswassers.

Aus dem HTO-Profil ist erkennbar, daß 80-90% des aufgenommenen Tritiums in den oberen 10 cm des Bodens zu finden sind. Aber auch in 40 cm Tiefe war noch Tritium nachweisbar, was durch die hohe Mobilität des HT-Gases erklärbar ist. Die Depositionsgeschwindigkeiten lagen in dem aus der Literatur bekannten Bereich.

Im Gewebewasser der Pflanzen (Gras, Weizenkeimlinge, Bohnen, Wirsingkohl, Mais und Fichten) lag der Tritium-Gehalt erwartungsgemäß niedriger, war jedoch noch gut nachweisbar.

Die Tritium-Konzentration in der Luft wurde mit einem Tritium-Monitor in 1 min Abständen gemessen.

Die Tritiumexposition von Nutzpflanzen unter kontrollierten Umweltbedingungen soll in einer Klimakammer durchgeführt werden. Diese wurde in Betrieb genommen und für erste Experimente vorbereitet.

Die Methodik zur Aufarbeitung des Pflanzenmaterials wurde weiter verbessert. Ein Verbrennungsautomat zur Gesamtanalyse des OBT wurde geliefert und in Betrieb genommen.

Die Auftrennung der organischen Substanz in ihre Hauptkomponenten wurde mit tritiiertem Pflanzenmaterial getestet.

Hinsichtlich der Bodenuntersuchungen wurden Methoden getestet, welche die Entnahme von natürlich gewachsenen Bodenkernen ohne erhebliche Störung der Bodenstruktur ermöglichen.

Veröffent-  
lichungen

Primärberichte

Beteiligte Mitarbeiter

Fr. Dr. S. Diabaté

Fr. DI(FH) Honig

## Vorhaben 03.05.05 Entwurf und Integration nuklearer Systeme

### Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

#### a) Untersuchungen zu Blanket-Schnittstellen und zur Flexibilität des NET-Designs

Eine Aufgabe von NET ist der Test der nuklearen Komponenten. Auch das Blanketkonzept kann nicht endgültig festgelegt werden, bevor Komponententests in einer frühen Betriebsphase der Anlage durchgeführt und ausgewertet wurden. Daher muß die Anlage flexibel genug ausgelegt werden, um die nachträglich ausgewählte Blanketausstattung einbauen und betreiben zu können. Im Rahmen eines NET-Kontraktes werden Anforderungen an die Flexibilität des Anlagenentwurfs untersucht. Gegenwärtig wird geprüft, welche Probleme auftreten, wenn nach einer ersten Ausstattung der NET-Anlage mit wenigen Blanketsegmenten und Abschirmsegmenten an den übrigen Plätzen Abschirmsegmente durch Blanketsegmente ersetzt werden sollen. Später soll zusätzlich geprüft werden, ob auch ein Wechsel des Blanketkonzeptes vom Kühlmittel Wasser zum Kühlmittel Helium oder Flüssigmetall erfolgen kann. Die bislang betrachteten Schwierigkeiten, die einer flexiblen Blanketbestückung entgegenstehen, liegen weniger in den unterschiedlichen Kühlkreisen, die vorgehalten oder nachträglich eingebaut werden müssen, als im beschränkten Platzangebot in der Nähe des Torus.

Im Berichtszeitraum wurde daher vorrangig die räumliche Anordnung der Komponenten, wie Ventile und Rohrleitungen, in diesem Bereich untersucht. Die Anzahl der zu versorgenden Kühlkreise und die weitgehend fernbediente Montage unter einschneidenden räumlichen Restriktionen erfordern eine sorgfältige Vorplanung der Platzbelegung. Erst dann kann entschieden werden, ob zusätzliche Versorgungsleitungen für andere Blankettypen permanent bereitgehalten werden können oder zusammen mit den Blanketsegmenten ausgetauscht werden müssen.

Für ein wassergekühltes Blanket mit Flüssigmetall als Brutstoff wurden erste Entwürfe für die Verbindungsleitungen zwischen den Segmenten und für die den Torus umschließenden Sammelleitungen ausgearbeitet. Dabei wurden sowohl einzuschweißende Zwischenstücke (Jumper), als auch Adapter mit Mehrfachflansch-Verbindungen untersucht. Die Rohrleitungsführung wurde mit dem CAD-System Applicon Bravo! dreidimensional modelliert (vergl. hierzu Abb. 12). Es zeigte sich, daß der bislang für diese Verbindungsleitungen vorgesehene Platz nicht ausreicht, wenn die angenommene Anzahl von separaten Kreisläufen (4 je Brutsegment und 3 je Abschirm-

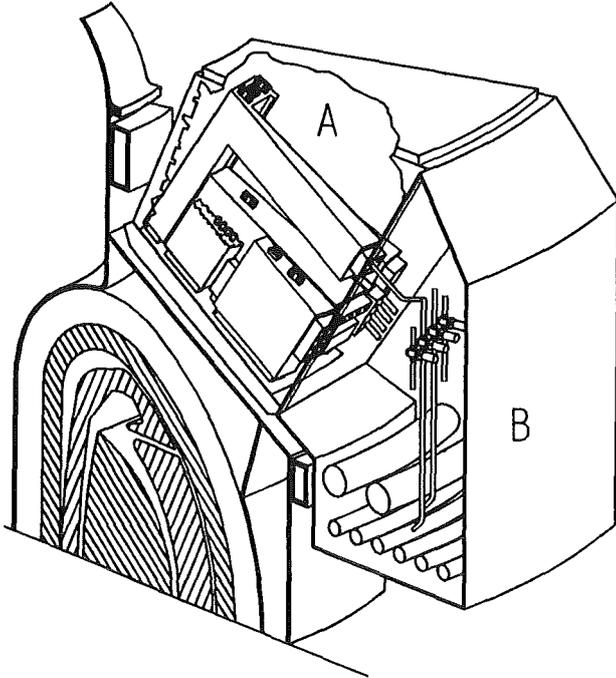


Abb. 12: Studie zur Kühlmittelzuführung für ein NET-Blanket

segment) beibehalten wird. Der Platzbedarf für diese Anordnung wurde ermittelt.

Im nächsten Schritt soll diese Untersuchung für ein heliumgekühltes Feststoffblanket durchgeführt werden. Anschließend müssen dann beide Entwürfe so aufeinander abgestimmt werden, daß die gewünschte Flexibilität erreicht wird.

b) CAD-Techniken und Verbesserung des Datenaustauschs

Bearbeitet wurden die Übertragung von CAD-Daten zwischen den CAD-Systemen des NET-Teams und des KfK, sowie die Erweiterung des KfK-Systems um Komponenten zur Planung und Simulation von Handhabungsvorgängen (hierzu siehe unter 03.05.03). Ein CAD-Modell der aktuellen NET-Double-Null-Version wurde aufgebaut. Da die laufenden Entwurfsarbeiten der KfK am NET-Konzept orientiert sind, bedeutete "Datenaustausch" zunächst die Übernahme von NET-Zeichnungen ins CAD-System der KfK. Die Kommunikation zwischen den CAD-Systemen erfolgte über das IGES-Format und das Rechnernetz EARN. Dabei erwies sich die physikalische Übertragung mit EARN als unproblematisch, die logische Übertragung führte hingegen besonders bei umfangreicheren Zeichnungen zu Schwierigkeiten durch Mängel der vorhandenen IGES-Prozessoren. Zur Identifikation der Mängel wurde in Zusammenarbeit mit dem NET-Team ein Testprogramm begonnen, das im kommenden Jahr zusammen mit PFT verstärkt fortgesetzt wird. Daneben wurde am CAD-Rechner

von NET ein eigener Benutzerbereich eingerichtet, so daß das IRE mittels Datenfernverarbeitung unmittelbar Einblick in das Zeichnungsarchiv von NET und die Zeichnungsinhalte nehmen kann.

c) Spezielle Fragen zur Impurity-Control (Divertor) und zum Plasma-Exhaustsystem,

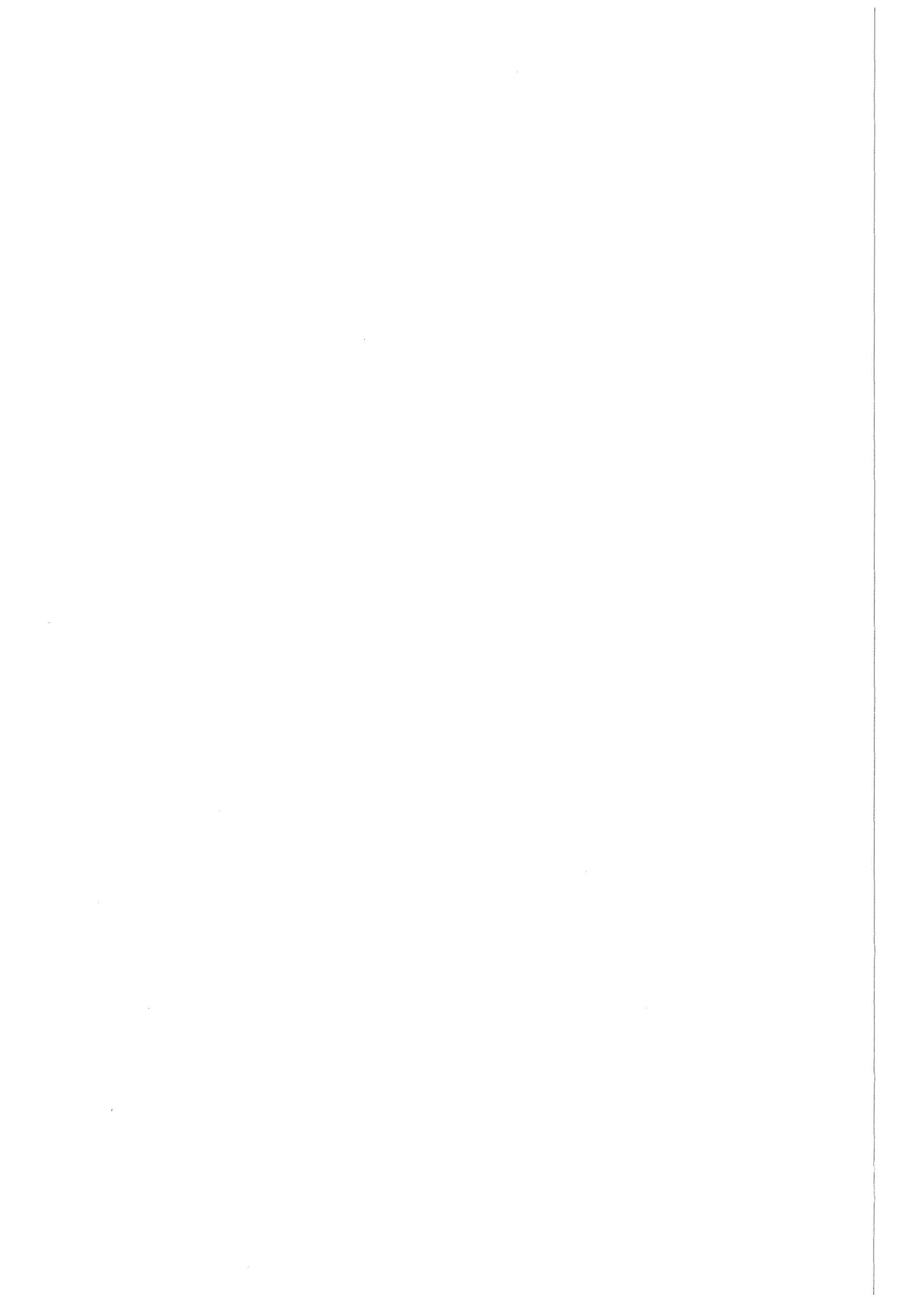
Bei der Divertorentwicklung für NET sind kritische Auslegungsgesichtspunkte die Wärmeabfuhr, die zyklierenden Wärmespannungen, die durch Teilchenbeschuss und Disruptionen hervorgerufenen Erosionsrate und die damit verbundene Einschränkung bei der Auswahl der Werkstoffe, sowie die Systemintegration.

Zur Frage der Kühlbarkeit wurde (durch eine Recherche) die Eignung von Wärmerohren (heat pipes) untersucht. Verglichen mit der Wärmeabfuhr durch unterkühltes Sieden mit Wasser oder durch Zwangskonvektion mit Helium erscheint das Entwicklungspotential der Wärmerohre zu gering. Die unterkühlte Siedekühlung mit Wasser läßt nach Literaturangaben kritische Wärmeflüsse bis zu 30 bis 50 MW/m<sup>2</sup> erwarten, was eine genügende Sicherheit zum Auslegungswert (10 MW/m<sup>2</sup>) darstellt. Zur thermohydraulischen Auslegung von Divertorkühlkanälen wurde im Rahmen einer Diplomarbeit ein Rechenprogramm für Heliumkühlung erstellt.

Mit dem Programm ABAQUS wurden thermomechanische Analysen für verschiedene Divertorentwürfe durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß für NET-typische Bedingungen der zulässige Wärmefluß für einige Varianten deutlich unterhalb des Auslegungsziels von 8 bis 10 MW/m<sup>2</sup> liegt. Desweiteren wurden Handhabungsmöglichkeiten konstruktiv untersucht.

Untersuchungen zum Plasma-Exhaustsystem sind unter 03.01.01 aufgeführt.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
	03.05.05.P09A	G. Class K. Kleefeldt W. Kramer A. Ludwig R.A. Müller K. Schramm



VERÖFFENTLICHUNGEN 1986

- 19957 ITP;  
JUENGST, K.P.  
Operation experience with a 3-coil arrangement of the 'TESPE' superconducting torus.  
Fusion Technology 1984. Proc. of the 13th Symp., Varese, I, September 24-28, 1984. In two volumes.  
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1985 Vol. 2 S.1469-74
- 20175 ITP;  
KOMAREK, P.  
Superconducting magnets in fusion research. Vortr.: Seminar 'Large Scale Application of Superconductivity', Karlsruhe, 22. August 1984  
Cryogenics, 25(1985) S.604-12
- 20464 IMF; ITP;  
LUEHNING, J.; JESKE, U.; ZEHLEIN, H.  
Vault-forming central support of the NET/INTOR TF-coils.  
Fusion Technology 1984. Proc. of the 13th Symp., Varese, I, September 24-28, 1984. In two volumes.  
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1985 Vol. 2 S.1553-58
- 20465 ITP;  
FOERSTER, S.; HOFMANN, A.; JESKE, U.; KATHEDER, H.; KRAUTH, H.; NYILAS, A.; LEHMANN, W.; SCHMIDT, C.; ULBRICHT, A.  
Superconducting poloidal field coil development.  
Fusion Technology 1984. Proc. of the 13th Symp., Varese, I, September 24-28, 1984. In two volumes.  
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1985 Vol. 2 S.1475-80
- 20727 HDI; ITP;  
HERZ, W.; KATHEDER, H.; KRAUTH, H.; NOETHER, G.; PADLIGUR, U.; RIETZSCHEL, K.; SIEWERDT, L.; SUESSER, M.; ULBRICHT, A.; WUECHNER, F.; ZAHN, G.  
Testing of the European LCT coil in the TOSKA facility.  
Fusion Technology 1984. Proc. of the 13th Symp., Varese, I, September 24-28, 1984. In two volumes.  
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1985 Vol. 2 S.1487-92
- 21244 ITP;  
JESKE, U.; POLO-TEAM  
A 2 MJ, 150 T/S pulsed ring coil. Status of the design and the test arrangements.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.32-35
- 21327 IDT; ITP; IT;  
JUENGST, K.P.; FRIESINGER, G.; GEIGER, W.; GRUENHAGEN, A.; KIESEL, H.; KOMAREK, P.; KUTSCHERA, M.; OBERMAIER, G.; SUESS, E.; YAN, L.  
Superconducting torus 'TESPE' at design values.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.36-39
- 21337 ITP;  
GOLDACKER, W.; FLUEKIGER, R.  
Phase transitions and superconducting properties of binary and Ti, Ta, Ga, and H alloyed Nb<sub>3</sub>Sn.  
Proc. of the Internat. Conf. on the Materials and Mechanisms of Superconductivity, Ames, Iowa, May 29-31, 1985  
Physica B, 135(1985) S.359-63
- 21428 ITP;  
FLUEKIGER, R.; GOLDACKER, W.  
Physical metallurgy and critical currents in Nb<sub>3</sub>Al multifilamentary wires.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.553-56
- 21429 ITP;  
FLUEKIGER, R.  
Disordering mechanism in irradiated and quenched A15 type compounds.  
Internat. Cryogenic Materials Conf., Boston, Mass., August 12-16, 1985  
Advances in Cryogenic Engineering Materials, 32(1986) S.873-80
- 21430 ITP;  
FLUEKIGER, R.; SPECKING, W.; TUROWSKI, P.  
Characterization of commercial Ta alloyed Nb<sub>3</sub>Sn multifilamentary wires and optimization of J<sub>sub(c)</sub> up to 23 tesla.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.472-75
- 21431 ITP;  
FLUEKIGER, R.; GOLDACKER, W.; ISERNHAGEN, R.  
Characterization of bulk and multifilamentary Nb<sub>3</sub>Sn and Nb<sub>3</sub>Al by diffractometric and resistive measurements.  
Internat. Cryogenic Materials Conf., Boston, Mass., August 12-16, 1985  
Advances in Cryogenic Engineering Materials, 32(1986) S.925-36
- 21433 ITP;  
MAURER, A.; ULBRICHT, A.; WUECHNER, F.  
Effect of azimuthal dependence of radial Young's modulus on the mechanical behaviour of the European LCT coil.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.428-31
- 21435 ITP;  
SCHMIDT, C.; SCHWEIKERT, K.; SPECHT, E.  
Test of a low loss superconductor for use in a poloidal field coil.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.493-96
- 21436 ITP;  
SPECKING, W.; NYILAS, A.; FLUEKIGER, R.  
Strain sensitivity of subscale fusion conductor based on Nb<sub>3</sub>Sn.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.676-79
- 21624 ITP;  
TUROWSKI, P.; NYILAS, A.; THOENER, M.  
An A15 composite conductor for a 15 T insert coil.  
Marinucci, C. [Hrsg.]  
Magnet Technology : 9th Internat. Conf., Zuerich, CH, September 9-13, 1985  
Villigen: Swiss Inst. for Nuclear Research, 1985. - S.647-50

- 21795 ITP;  
LEHMANN, W.; ZAHN, G.  
Kuehlverfahren fuer zwangsgekuehlte  
supraleitende Magnete.  
Bericht ueber die Jahrestagung 1985 des  
Deutschen Kaelte- und Klimatechnischen  
Vereins, Aachen, 20.-22.November 1985  
Stuttgart, 1985. - S.57-72  
(DKV-Tagungsbericht ; 12)
- 21796 ITP;  
BARTH, W.; LEHMANN, W.; TUROWSKI, P.  
Erfahrungen mit HeII-Kuehlung supraleitender  
Magnete.  
Bericht ueber die Jahrestagung 1985 des  
Deutschen Kaelte- und Klimatechnischen  
Vereins, Aachen, 20.-22.November 1985  
Stuttgart, 1985. - S.73-87  
(DKV-Tagungsbericht ; 12)
- 22007 IMF;  
BORGSTEDT, H.U.; GRUNDMANN, M.  
The fracture of austenitic and martensitic  
steel in liquid lithium.  
Structural Mechanics in Reactor Technology :  
SMIRT ; Trans.of the 8th Internat.Conf.,  
Bruxelles, B, August 19-23, 1985  
Amsterdam : North-Holland Publ.Co., 1985. -  
Vol. N S.97-102  
Nuclear Engineering and Design/Fusion,  
3(1986) S.273-86
- 22174 IMF;  
DIEGELE, E.; FETT, T.; MUNZ, D.  
Lifetime limitation of first wall structures  
by fatigue crack propagation.  
Lifetime Predictions for the First Wall and  
Blanket Structure of Fusion Reactors :  
Proc.of a Technical Committee Meeting,  
Karlsruhe, November 5-7, 1985  
IAEA-TECDOC-393(1986) S.23-49
- 22621 ITP;  
KOMAREK, P.  
Toward the availability of superconducting  
magnets for NET - the present KfK development  
effort.  
Nuclear Energy of Today and Tomorrow ; 4th  
Internat. ENS/ANS Conf. and 9th Foratom  
Congress, Geneva, CH, June 1-6, 1986 ;  
Transactions  
Bern : ENS, 1986. - Vol. 3 - S.87-93
- 22623 IDT;  
BORIE, E.; DUMBRAVS, O.  
Calculation of eigenmodes of tapered gyrotron  
resonators.  
International Journal of Electronics,  
60(1986) S.143-54
- 22663 ITP;  
GAUSS, S.; FLUEKIGER, R.  
P/M preparation of Nb-Ta composite rods for  
use in (Nb-Ta)<sub>3</sub>Sn multifilamentary  
superconductor wires.  
Kaysser, W.A. [Hrsg.]  
Horizons of Powder Metallurgy : Proc.of the  
Internat.Powder Metallurgy Conf.,  
Duesseldorf, July 7-11, 1986  
Freiburg : Schmid, 1986. - Pt. 1 S.623-26
- 22764 IT;  
PERINIC, D.; LORRAIN, CHR.  
Development of large components for the  
fusion reactor vacuum circuits.  
Nuclear Energy of Today and Tomorrow ; 4th  
Internat. ENS/ANS Conf. and 9th Foratom  
Congress, Geneva, CH, June 1-6, 1986 ;  
Transactions  
Bern : ENS, 1986. - Vol. 3 - S.9-14
- 22778 IT;  
SELIG, M.  
TFTR Maintenance Manipulator.  
KfK-Nachrichten, 18(1986) S.18-23
- 22779 IRE;  
KATE, F.; LEINEMANN, K.; LUDWIG, A.; MAREK,  
U.; SCHLECHTENDAHL, E.G.  
CAD mit Applicon Bravo! - Zwei Jahre  
Erfahrungen im IRE.  
KfK-Nachrichten, 18(1986) S.24-31
- 22807 IMF;  
DIENST, W.; HOFMANN, P.  
Chemische Vertraeglichkeit von festen  
Fusionsreaktor-Brutstoffen mit Stahlhuelen.  
Jahrestagung Kerntechnik 86. Aachen,  
8.-10.April 1986  
Kerntechnische Ges.e.V. Deutsches Atomforum  
e.V.  
Eggenstein-Leopoldshafen:  
Fachinformationszentrum Energie, Physik,  
Mathematik 1986 S.551-54
- 22823 ITP;  
SUESSER, M.  
Auswahlkriterien fuer Berstscheiben in der  
Kryotechnik.  
Die Kaelte und Klimatechnik, 39(1986)  
S.132-39
- 22826 IMF;  
FETT, T.  
Temperature distributions and thermal  
stresses in asymmetrically heat radiated  
tubes.  
Transactions of the ASME - Journal of Applied  
Mechanics, 53(1986) S.116-20
- 22839 IDT;  
SUESS, U.; WEBER, W.  
Untersuchung und Realisierung einer adaptiven  
Gelenkregelung nach dem  
Referenzmodellkonzept.  
Steuerung und Regelung von Robotern ; Tagung  
Langen, 12.und 13.Mai 1986  
Duesseldorf : VDI-Verl., 1986. - S.297-308  
(VDI-Berichte ; 598)
- 22929 INR;  
DALLE DONNE, M.; DORNER, S.  
Tritium control in a helium-cooled ceramic  
blanket for a fusion reactor.  
Fusion Technology, 9(1986) S.484-91
- 22930 INR;  
DALLE DONNE, M.  
Tritium release from a lithium ceramic:  
interpretation of the TRIO experiment.  
Fusion Technology, 9(1986) S.503-05
- 22944 IRE; IDT;  
HOLLER, E.; SCHLECHTENDAHL, E.G.  
Roboter und Manipulator kombinieren.  
Handelsblatt, (1986) Nr. 104 S.B2
- 23026 IMF;  
WEDEMEYER, H.; VOLLATH, D.  
Fabrication of lithium containing ceramic as  
breeder material for fusion reactors.  
Ondracek, G.; Voehringer, O.; [Hrsg.]  
Proc.of the 7th German-Yugoslav Meeting on  
Engineering Materials Science and Technology.  
Contemporary Inorganic Materials: Progress  
in Ceramics, Metals and Composites,  
Bad Herrenalb, April 22-26, 1985.  
Juelich: Kernforschungsanlage Juelich GmbH  
1986 S.179-90
- 23027 IMF;  
SCHULZ, B.  
Thermal diffusivity and conductivity of  
 $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub>.  
Ondracek, G.; Voehringer, O.; [Hrsg.]  
Proc.of the 7th German-Yugoslav Meeting on  
Engineering Materials Science and Technology.  
Contemporary Inorganic Materials: Progress  
in Ceramics, Metals and Composites,  
Bad Herrenalb, April 22-26, 1985.  
Juelich: Kernforschungsanlage Juelich GmbH  
1986 S.191-204

- 23093 IDT;  
BORIE, E.  
The role of the fine-structure constant in QED.  
Fundamental Constants in Physics and Metrology, 70th PTB-Symp., Braunschweig, October 21-22, 1985  
Metrologia, 22(1986) S.140-45
- 23110 IRCH;  
PENZHORN, R.D.; GLUGLA, M.  
Process to recover tritium from fusion fuel cycle impurities.  
86 Annual Meeting of the American Nuclear Society, Reno, Nev., June 15-19, 1986  
Transactions of the American Nuclear Society, 52(1986) S.277-78
- 23165 INR; IMF;  
DALLE DONNE, M.; FISCHER, U.; BOJARSKY, E.; REISER, H.  
Pebble bed canister: a ceramic breeder blanket with helium cooling for a fusion reactor.  
Nuclear: Energy of Today and Tomorrow; 4th Internat. EMS/ANS Conf. and 9th Foratom Congress, Geneva, CH, June 1-6, 1986; Transactions  
Bern: ENS, 1986. - Vol. 3 - S.127-33
- 23174 INR;  
SCHWENK, A.  
GANTRAS - a system of codes for the solution of the transport equation with rigorous treatment of anisotropic neutron scattering. Nuclear Data, Cross Section Libraries and their Application in Nuclear Technology: KTG/ENS Internat.State of the Art Seminar, Bonn, October 1-2, 1985 Proc.  
Bonn, 1986. - S.26-28
- 23178 IDT;  
GABOWITSCH, E.; SPANNAGEL, G.; TACZANOWSKI, S.  
Modelling of the tritium-cycle of fusion reactors.  
Hamza, M.H. [Hrsg.]  
Modelling, Identification and Control: MIC; Proc.IASTED 14th Internat.Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986  
Anaheim [u.a.] Acta Pr., 1986. - S.44-51
- 23211 IRB;  
MALANG, S.  
First wall concept with radiatively cooled protection tiles.  
International Tokamak Reactor: INTOR Phase 2A / Commission of the European Communities Pt. 3. Tokamak Concept Innovations: INTOR-Related Specialist's Meeting, Wien, A, January 13-17, 1986: Summaries  
Brussels, 1986. - Vol. 2. - S.E.7.14
- 23212 IRB;  
MALANG, S.  
Gas cooled divertor concept using small tungsten tiles.  
International Tokamak Reactor: INTOR Phase 2A / Commission of the European Communities Pt. 3. Tokamak Concept Innovations: INTOR-Related Specialist's Meeting, Wien, A, January 13-17, 1986: Summaries  
Brussels, 1986. - Vol. 2. - S.E.7.13
- 23213 IRB;  
MALANG, S.  
Flow channel insert for the reduction of MHD pressure drop in liquid metal flow.  
International Tokamak Reactor: INTOR Phase 2A / Commission of the European Communities Pt. 3. Tokamak Concept Innovations: INTOR-Related Specialist's Meeting, Wien, A, January 13-17, 1986: Summaries  
Brussels, 1986. - Vol. 2. - S.E.7.4
- 23214 IMF; IRB;  
MALANG, S.; ANDERKO, K.  
Periodic in situ annealing of ferritic steel blanket structures.  
International Tokamak Reactor: INTOR Phase 2A / Commission of the European Communities Pt. 3. Tokamak Concept Innovations: INTOR-Related Specialist's Meeting, Wien, A, January 13-17, 1986: Summaries  
Brussels, 1986. - Vol. 2. - S.E.7.21
- 23267 IRE;  
MALMBERG, T.  
Theoretical assessment of a proposal for the simplified determination of critical loads of elastic shells.  
KfK-4113 (August 86)
- 23272 ITP;  
NICK, W.  
Transienter Waermeuebergang an turbulent stromendes ueberkritisches Helium.  
KfK-4127 (August 86)  
Dissertation, Universitaet Karlsruhe 1986
- 23416 IRB;  
REIMANN, J.; MALANG, S.  
A study on tritium separation from LiPb by permeation into Na or NaK and cold trapping.  
KfK-4105 (Oktober 86)
- 23422 IMF;  
JAUCH, U.; KARCHER, V.; SCHULZ, B.  
Thermophysical properties in the system Li-Pb.  
Part I: Preparation and characterization of Li(17)Pb(83) eutectic alloy and the LiPb intermetallic compound.  
KfK-4144 (September 86) S.2-24
- 23634 INR;  
SCHWENK-FERRERO, A.  
GANTRAS - a system of codes for the solution of the multigroup transport equation with a rigorous treatment of anisotropic neutron scattering. Plane and spherical geometry.  
KfK-4163 (November 86)
- 23681 ITP;  
TABARSI, D.  
Wechselfeldverlustverhalten von technischen Supraleitern.  
KfK-4074 (Dezember 86)  
Dissertation, Universitaet Karlsruhe 1986
- 23747 IT;  
HUEBENER, J.; BOEHME, G.  
Demontierbare Vorrichtung zum gegenseitigen Abstuetzen zweier auf Tiefsttemperatur befindlicher Bauteile.  
DE-OS 35 16 874 (13.11.1986)  
EP-OS 0 200 867 (12.11.1986)

VORTRAGE 1986

- V22535 ITP;  
KOMAREK, P.  
Die Bedeutung des Supraleiters bei technisch anspruchsvollen Magnetprojekten.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten, Dynamik und Statistische Physik, Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik, Oberflaechenphysik, Tiefe Temperaturen, Vakuumtechnik, Freudenstadt, 7.-11.April 1986  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, Bd.21(1986) S.1428
- V22536 ITP;  
TUROWSKI, P.; BRUENNER, N.; FOERSTER, S.  
Supraleitender Hochfeldmagnet HOMER.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten, Dynamik und Statistische Physik, Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik, Oberflaechenphysik, Tiefe Temperaturen, Vakuumtechnik, Freudenstadt, 7.-11.April 1986  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, Bd.21(1986) S.1429
- V22539 ITP;  
FLUEKIGER, R.; GOLDACKER, W.  
Physikalische Metallurgie und kritische Stroeme in Nb<sub>3</sub>Al Multifilamentleitern.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten, Dynamik und Statistische Physik, Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik, Oberflaechenphysik, Tiefe Temperaturen, Vakuumtechnik, Freudenstadt, 7.-11.April 1986  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, Bd.21(1986) S.1434
- V22554 ITP;  
HOFMANN, A.; KRAEMER, H.P.  
Stroemung von Helium II in poroesen Medien.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten, Dynamik und Statistische Physik, Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik, Oberflaechenphysik, Tiefe Temperaturen, Vakuumtechnik, Freudenstadt, 7.-11.April 1986  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, Bd.21(1986) S.1489
- V22555 ITP;  
KATHEDER, H.; SUESSER, M.  
Druckabfall einer diabatischen 2-phasen Heliumstroemung.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten, Dynamik und Statistische Physik, Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik, Oberflaechenphysik, Tiefe Temperaturen, Vakuumtechnik, Freudenstadt, 7.-11.April 1986  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, Bd.21(1986) S.1489
- V22600 ITP;  
KOMAREK, P.  
Fusion energy application.  
Meeting 'High Field Superconductors', Rutherford Laboratory, Abingdon, GB, February 5-6, 1986
- V22601 ITP;  
FLUEKIGER, R.  
Emerging high field materials.  
Meeting 'High Field Superconductors', Rutherford Laboratory, Abingdon, GB, February 5-6, 1986
- V22625 IDT;  
GABOWITSCH, E.; SPANNAGEL, G.; TACZANOWSKI, S.  
Modelling of the <sup>3</sup>H-cycle of fusion reactors.  
5th Internat.Symp. 'Modelling, Identification and Control' (MIC '86), Innsbruck, A, February 18-21, 1986  
4th Internat.Conf.on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 4), Madrid, E, June 30 - July 4, 1986  
Book of Abstracts 4P05
- V22628 IDT;  
BORIE, E.; DUMBRAJS, O.; JOEDICKE, B.  
Parameter studies for a 150 GHz gyrotron at KfK.  
10th Annual Internat.Conf.on Infrared and Millimeter Waves, Lake Buena Vista, Fla., December 8-13, 1985
- V22637 IMF;  
BORGSTEDT, H.U.; FREES, G.; DRECHSLER, G.  
Corrosion of stainless steel in flowing LiPb eutectic.  
2nd Internat.Conf.on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V22676 IMF;  
PREININGER, D.  
Predictions of the helium-induced creep ductility loss in austenitic stainless steels.  
2nd Internat.Conf.on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V22690 INR; IMF;  
WERLE, H.; ABASSIN, J.J.; BRIEC, M.; CLEMMER, R.G.; ELBEL, H.; HAEFNER, H.E.; MASSON, M.; SCIERS, P.; WEDEMEYER, H.  
The LISA1 experiment: in-situ tritium release investigations.  
2nd Internat.Conf.on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V22762 ITP;  
KATHEDER, H.; SUESSER, M.  
Pressure drop of nonadiabatic two-phase helium flow.  
11th Internat.Cryogenic Engineering Conf.with Exhibition (ICEC-11), Berlin, April 22-25, 1986
- V22763 ITP;  
HOFMANN, A.; KHALIL, A.; KRAEMER, H.P.; WEISEND, J.G.; SRINIVASAN, R.; VOGELY, B.  
Investigations on fountain effect pumps for circulating of pressurized helium II.  
11th Internat.Cryogenic Engineering Conf.with Exhibition (ICEC-11), Berlin, April 22-25, 1986
- V22766 IDT; ITP;  
JUENGST, K.P.; LEPPELMEIER, G.W.; GEIGER, W.; KOMAREK, P.; STEEVES, M.M.  
First results of the TESPE-S magnet system safety experiments.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V22824 ITP;  
MYLLAS, A.  
Werkstoffprobleme bei 4 K und supraleitenden Magneten.  
Vortr.: DESY, Hamburg, 24.April 1986
- V22825 ITP;  
HOFMANN, A.; KHALIL, A.  
Considerations on magnet design based on forced flow of helium II in internally cooled cables.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V22840 ITP;  
JESKE, U.; SCHMIDT, C.  
A low loss superconducting cable for poloidal field coils (design, development, and measurement).  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V22841 ITP;  
MAURER, W.  
Design of a conductor of a superconducting coil of a modular stellarator reactor.  
Technical Committee and Workshop on Fusion Reactor Design and Technology, Jalta, SU, May 26 - June 6, 1986

- V22842 ITP;  
HUEBENER, J.; MAURER, W.  
General design of a modular stellarator reactor.  
Technical Committee and Workshop on Fusion Reactor Design and Technology, Jalta, SU, May 26 - June 6, 1986
- V22966 ITP;  
FLUEKIGER, R.  
Neue Materialien fuer Hochfeldsupraleiter.  
Seminar, Atominstytut der Oesterreichischen Universitaeten, Wien, A, 17.Juni 1986
- V23039 ITP;  
HERZ, W.; KOMAREK, P.; KATHEDER, H.; MAURER, W.; NOETHER, G.; SHEN, S.S.; SIEWERDT, L.; SUESSEER, M.; ULBRICHT, A.; WUECHNER, F.; ZAHN, G.  
Testing of the EURATOM LCT-coil, a forced-flow cooled NbTi coil, in the international fusion superconducting magnet test facility ((IFSMTF)).  
Applied Superconductivity Conf., Baltimore, Md., September 29 - October 3, 1986
- V23041 ITP;  
OKUNO, K.; MUKAI, H.; LUBELL, M.S.; SHEN, S.S.; JAKOB, B.; ZICHY, J.A.; WUECHNER, F.  
Response of superconducting coils to internal heating.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23042 ITP;  
MAURER, A.; ULBRICHT, A.; WUECHNER, F.  
An improvement of the flange bolting in the FEM-model of the EURATOM-LCT coil and comparison with results measured in the TOSKA test.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23046 ITP;  
HOFMANN, A.  
Thermomechanically driven helium II flow, an option for fusion magnets with internally cooled conductors?  
11th Internat.Cryogenic Engineering Conf.with Exhibition (ICEC-11), Berlin, April 22-25, 1986
- V23047 ITP;  
JESKE, U.; FOERSTER, S.  
Design of a 3 m diameter superconducting model coil under TORE SUPRA load conditions.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23050 IMF;  
DIENST, W.; HEIDINGER, R.  
Ceramic insulator materials for rf windows.  
IAEA Consultants' Meeting on Insulators for Fusion Applications, Karlsruhe, June 25-27, 1986
- V23051 ITP;  
HAUBENREICH, P.N.; FIETZ, W.A.; ELLIS, J.F.; LUE, J.W.; MCMANAMY, T.J.; SCHWENTERLY, S.W.; STAMPS, R.E.; KATO, T.; KOIZUMI, K.; KAMIYA, S.; WUECHNER, F.; HERZ, W.; ULBRICHT, A.; ZAHN, G.; ZICHY, J.A.  
Experience with cooldown of superconducting magnet coils in the large coil task.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23052 ITP;  
LUTON, J.N.; ULBRICHT, A.; ELLIS, J.F.; OKUNO, K.; SHEN, S.S.; SIEWERDT, L.; WILSON, C.T.; WUECHNER, F.; ZAHN, G.; ZICHY, J.A.  
Testing electrical insulation of LCT coils and instrumentation.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23053 ITP;  
SHEN, S.S.; BAYLOR, L.R.; CLINARD, J.A.; COGSWELL, F.D.; DRESNER, L.; ELLIS, J.F.; FIETZ, W.A.; FLETCHER, W.M.; HAUBENREICH, P.N.; HERZ, W.; IWASA, Y.; JAKOB, B.; KAMIYA, S.; KATO, T.; LUBELL, M.S.; LUE, J.W.; LUTON, J.N.; MCMANAMY, T.J.; MUKAI, H.; OKUNO, K.; SCHWENTERLY, S.W.; SIEWERDT, L.; STAMPS, R.E.; ULBRICHT, A.; WILSON, C.T.; WINTENBERG, R.E.; WOOD, R.J.; WUECHNER, F.; ZICHY, J.A.  
First results of the full-array LCT coil tests.  
Applied Superconductivity Conf., Baltimore, Md., September 29 - October 3, 1986
- V23060 IMF;  
EHRlich, K.  
Assessment of the martensitic 12% Cr steel type 1.4914 for fusion reactor applications.  
2nd Internat.Conf.on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V23084 IMF;  
EHRlich, K.  
The martensitic 12% Cr steel type 1.4914 as a possible structural material for fusion reactors.  
Vortr.: ENEA (Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative), Casaccia, I, 9.-11.Juli 1986
- V23132 ITP;  
FLUEKIGER, R.; KOMAREK, P.  
Advanced superconducting materials.  
Workshop Superconducting Magnets and Cryogenics, Upton, N.Y., May 12-16, 1986
- V23222 IDT;  
SPANNAGEL, G.  
Simulation studies on <sup>3</sup>H accountability.  
TSTA Working Group Seminar, LANL, Los Alamos, N.M., July 15, 1986
- V23232 INR; IMF;  
DALLE DONNE, M.; FISCHER, U.; BOJARSKY, E.; REISER, H.; SORDON, G.; BOGUSCH, E.; NORAJITRA, F.  
Pebble bed canister: a ceramic breeder blanket with helium cooling for NET.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23258 IK;  
JOEDICKE, B.  
Startup and mode competition in a 150 GHz gyrotron.  
11th Annual Internat.Conf.on Infrared and Millimeter Waves, Pisa, I, October 25-30, 1986
- V23271 ITP;  
NYILAS, A.  
Laser beam welding of advanced superconducting cable conduits.  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23273 ITP;  
KOMAREK, P.  
The current research on cryogenics at KfK.  
IRR-Commission Meeting, Praha, CS, September 8-12, 1986
- V23285 IMF;  
WEDEMAYER, H.; VOLLATH, D.; GUENTHER, E.  
Li<sub>6</sub>SiO<sub>6</sub> and Li<sub>8</sub>SiO<sub>6</sub>: potential blanket materials for fusion reactors?  
14th Symp.on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986

- V23295 IMF;  
VOLLATH, D.; WEDEMEYER, H.  
On the preparation of the lithium-silicates series form  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  to  $\text{Li}_6\text{SiO}_6$  in alcoholic media.  
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V23350 IT;  
HUTTER, E.; NEFFE, G.; SCHIRA, P.  
A ceramic container for hydrogen purification on hot uranium.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23355 IRE;  
MUELLER, R.A.  
Evacuation of the NET vacuum chamber.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23413 ITP;  
ULBRICHT, A.  
The Euratom LCT coil.  
Applied Superconductivity Conf., Baltimore, Md., September 29 - October 3, 1986
- V23414 INR; IRB;  
MALANG, S.; CASAL, V.; ARHEIDT, K.; FISCHER, U.; LINK, W.; RUST, K.  
Liquid metal cooled blanket conception for NET.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23415 IRB;  
REIMANN, J.; DINNER, F.; MALANG, S.; WU, C.  
Tritium separation from LiPb blankets by permeation into a gas stream or into NaK.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23440 IRCH;  
SAMEH, A. ALI  
Production of fission molybdenum-99.  
Internat. Conf. on Nuclear and Radiochemistry, Beijing, RC, September 1-5, 1986
- V23462 IRE;  
SCHNAUDER, H.; WICKENHAEUSER, A.  
Interaction between reliability analysis and design in case of a neutral beam injector protection system.  
5th Internat. Conf. on Reliability and Maintainability, Biarritz, F, October 6-10, 1986
- V23463 IRB;  
CASAL, V.; ARNOLD, G.; KUSSMAUL, H.; MILLER, H.  
Velocity meter for local measurement in liquid metals.  
12th Meeting of the Liquid Metal Boiling Working Group, Ispra, I, October 15-17, 1986
- V23466 IDT;  
BORIE, E.; DUMBRAJS, O.  
A complex cavity with mode conversion for gyrotrons.  
11th Annual Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Pisa, I, October 25-30, 1986
- V23467 IDT;  
BORIE, E.  
Self consistent calculation for a 150 GHz gyrotron.  
11th Annual Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Pisa, I, October 25-30, 1986
- V23488 ITP;  
KOMAREK, P.  
Collaborative superconductivity research in Europe. Invited paper.  
Applied Superconductivity Conf., Baltimore, Md., September 29 - October 3, 1986
- V23541 IRE;  
SMIDT, D.; WADLE, M.  
Automatic path-planning for a multilink articulated boom within the torus of a fusion reactor and related applications.  
ENEA-Workshop 'Advanced Robotics in Plant Operation and Maintenance', Roma, I, November 5-6, 1986
- V23579 IMF;  
HOLLECK, H.  
Material selection for hard coatings.  
Internat. Conf. on Metallurgical Coatings, San Diego, Calif., April 7-11, 1986
- V23598 ITP;  
NYILAS, A.  
Kriterien fuer die Auslegung von austenitischen Werkstoffen im kryogenen Bereich.  
Jahrestagung des Deutschen Kaelte- und Klimatechnischen Vereins,  
Bad Homburg, 19.-21. November 1986
- V23599 ITP;  
ZAHN, G.  
Materialauswahl und Materialbeschaffungsprobleme fuer Kryoplanzen aus der Sicht des Anwenders.  
Jahrestagung des Deutschen Kaelte- und Klimatechnischen Vereins,  
Bad Homburg, 19.-21. November 1986
- V23614 IMF; IRB;  
MALANG, S.; DIEGELE, E.; HOFMANN, G.; RUST, K.  
A first wall concept with radiatively cooled protection.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23706 IMF;  
SKOKAN, A.; WEDEMEYER, H.; VOLLATH, D.; GUENTHER, E.  
Thermal properties and application of potential lithium silicate breeder materials.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23714 IDT; ITP;  
GEIGER, W.; JUENGST, K.P.  
Magnetoelastic buckling measurements on the superconducting torus TESPE.  
IUTAM Symp., Tokyo, J, October 12-17, 1986
- V23761 IMF;  
HOFMANN, P.; DIENST, W.  
Chemical compatibility between Li-based oxide ceramics and stainless steels.  
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V23788 INR;  
FISCHER, U.  
Optimal use of beryllium for fusion reactor blankets.  
14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, F, September 8-12, 1986
- V23800 INR;  
DALLE DONNE, M.; DORNER, S.; LUPTON, D.F.  
Fabrication and properties of  $\text{Zr}_2\text{Pb}_3$ , a new neutron multiplier material for fusion blankets.  
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
- V23801 INR;  
BRIEC, M.; BOTTER, F.; ABASSIN, J.J.; BENOIT, R.; CHENEBAULT, P.; MASSON, M.; RASNEUR, B.; SCIERS, P.; WERLE, H.; ROTH, E.  
In and out of pile tritium extraction from samples of tritium aluminates.  
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986

V23802 INR;

CLEMMER, R.G.; WERLE, H.  
The LISA-I and Trio in-pile tests.  
Internat.Symp.on Fusion Reactor Blanket and  
Fuel Cycle Technology, Tokai-Mura, J, October  
27-29, 1986

V23988 INFP;

NUECKER, N.; FINK, J.; SCHEERER, B.;  
LINDENBERGER, H.; ROTH, S.  
Gitter- und Elektronenstruktur von  
undotiertem und n-dotiertem  
Polyphenylenvinylen.  
Fruehjahrstagung DPG, Duenne Schichten,  
Dynamik und Statistische Physik,  
Halbleiterphysik, Magnetismus, Metallphysik,  
Tiefe Temperaturen, Muenster, 9.-13.Maerz  
1987  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen  
Gesellschaft, R.6, Bd.22 (1987) HL-14.44

Anhang

Zuordnung der von KfK übernommenen EG-Aufgaben zu den berichtenden Instituten:

EG-Aufgabe		berichtendes Institut
Task Code No.	Titel	
B 1	Blanket Design Studies	IMF III, INR, IRB, IT
B 2	Development of Computational Tools for Neutronics	INR
B 6	Corrosion of Structural Materials in Flowing Pb-17Li	IMF I, IMF II
B 6.3	Fatigue of Structural Steel under Liquid Eutectic Environment	IMF I, IMF II
B 9	Tritium Extraction based on the Use of Solid Getters	IT
B 11-16	Development of Ceramic Breeder Materials	IMF I, IMF III, INR, IRCH
B 15.3	End of Life of Solid Breeding Materials in Fast Neutron Flux	IMF I, IMF III, INR
M 1	The Large Coil Task (LCT)	ITP
M 3	Development of Composite High Field Superconductors	ITP
M 4	Superconducting Poloidal Field Coil Development	ITP
M 8	Design and Construction of a Poloidal Field Coil for TORE SUPRA as NET-Prototype Coil	ITP
M 9	Structural Materials Fatigue Characterization at 4 K	ITP
M 12	Low Electrical Conductivity Structures Development	IMF IV, ITP
MAT 1.6	Development and Qualification of Type 1.4914 Base Metal Properties	IMF II
MAT 1.9	Pre- and Post-Irradiation Properties of 1.4914 Martensitic Steel	IMF II
MAT 1.11	Post Irradiation Fracture Toughness of Type 1.4914 Martensitic Steel	IMF II
MAT 2.2	In-Pile Creep-Fatigue Testing of Type 316 and 1.4914 Steels	IMF II, IMF III
MAT 6/ MAT 13	Ceramics for First Wall Protection and for rf Windows	IMF I
MAT 9.2	Investigation of Fatigue under Dual Beam Irradiation	IMF II
MAT 18	Development of Low Activation Ferritic-Martensitic Steels	IMF II

N 1	Design Study of Plasma Facing Components	INR, IRB, IRE
N 2	Shield Design Studies	IMF III
N 3	Development of Procedures and Tools for Structural Design Evaluation	IMF IV
N 5	Development of Theory and Tools for Evaluation of Magnetic Fields Effects on Liquid Breeder Blankets	IRB
N 6	Studies of Pepple Beds of Ceramics Compounds	INR
RM 1	Background Studies on Remote Maintenance	IT
RM 2	Mechanical Components Assembly	IT
RM 3	Handling Equipment for In-vessel Components	IDT, IRE, IT
S+E 4.1.2	Safety Aspects of the Cryosystems	IRE
S+E 4.1.3	Safety Aspects of Superconducting Magnets	IDT, IRE, ITP
S+E 5.2.2	Behavior of Gaseous Tritium in the System Plant/Soil	HS
S+E 5.4	Overall Plant Accident Scenarios for NET	IRE
S+E 5.5	Development of Safety Guidelines for the Design of NET	IRE
S+E 6	Licensing Activities	PKF-PL
S+E 7	Long Term Studies	AFAS, INR
T 6	Industrial Development of Large Components for Plasma Exhaust Pumping	IT
T 10 A	Plasma Exhaust Purification by Means of Cryosorption on Molecular Sieves or Alternative Adsorbents	IRCH
T 10 C/ 10 E	Plasma Exhaust Gas Purification by Use of Hot Metal Getters	IRCH
T 10 H	Plasma Exhaust Purification Applying Catalysts	IRCH
Development of ECRH Power Sources at 150 GHz (This task is part of the Fusion Physics Programme of the EC.)		IDT, IK