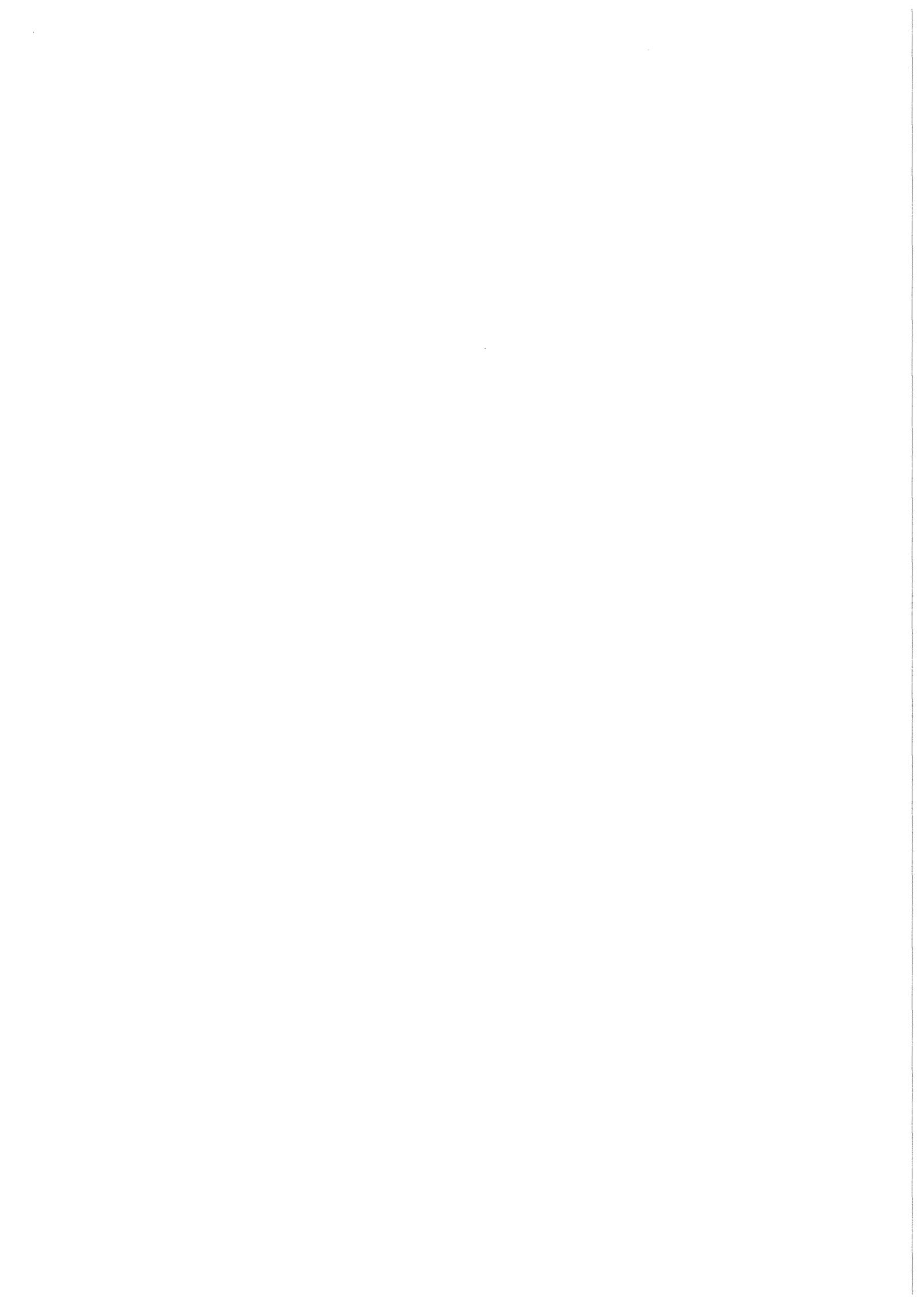


**KfK 4429
EUR 11390 d
März 1988**

**Ergebnisbericht
über Forschungs- und
Entwicklungsarbeiten des
Projekts Kernfusion 1987**

**Jahresbericht der
Assoziation KfK-Euratom**

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Projekt Kernfusion - Projektleitung

KfK 4429
EUR 11390d

Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten
des Projekts Kernfusion
1987

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

Arbeitsschwerpunkt

03 Projekt Kernfusion (PKF)

Vorwort

Das Kernforschungszentrum Karlsruhe und das Max-Planck-Institut für Plasma-physik in Garching bilden die Entwicklungsmeinschaft 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 Jahre 1987. Im Anhang befindet sich eine Zusammenfassung 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.

Arbeitsthema

03.01 Entwurfsstudien zu Fusionsanlagen

Vorhaben

03.01.01 Studien für NET/INTOR

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Lebensdaueranalyse und Optimierung der Ersten Wand

Das Studium des Versagensverhaltens von plasmanahen, zyklisch hochbelasteten Komponenten umfaßt zwei Ziele: Einerseits die Qualifizierung von verschiedenen Entwürfen und ihre Modifikation in einer Entwurfsphase, sowie die Anwendung und Weiterentwicklung von strukturmechanischen Modellen unter Berücksichtigung verschiedener Schädigungsmechanismen. Die Aktivitäten im Berichtsjahr umfassen beide Zielrichtungen.

Beurteilung von aktuellen Konzepten:

Zum Vergleich von verschiedenen Erste-Wand-Entwürfen wurden Temperatur- und Spannungsrechnungen mit der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Vergleichsrechnungen zwischen mehreren Vorschlägen für die Erste Wand zeigen deutlich niedrigere Spannungen bei Konzepten mit kleinen Ziegeln (KfK-Entwurf).

Anwendung von Versagensmodellen:

Das Wachstum vorhandener Risse durch zyklische Ermüdung ist ein Schädigungsmechanismus, der für spezielle Entwürfe der Ersten Wand, die in einer Maschine für Plasmazündexperimente (NET-Physik-Phase) einsatzfähig sein sollen, untersucht werden muß. Für das KfK-Konzept wurde der Einfluß der Wahl des Kühlmediums und der Wandstärke der Kühlrohre auf die Lebensdauer untersucht.

Auslegung einer Testeinrichtung:

Zum Test großflächiger Ausschnitte (ca. 0,2 - 0,3 m²) der Ersten Wand ist der Aufbau einer Anlage geplant. Die Dimensionierung und die Wahl der Einspannbedingungen für den zu testenden Wandausschnitt sind kritische Parameter für die Übertragbarkeit der experimentellen Ergebnisse auf eine reale Erstwand-Struktur. Der Einfluß dieser Größen wurde in dreidimensionalen Berechnungen gezeigt.

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

Die in Abstimmung mit dem NET-Team durchgeführten Arbeiten betreffen das Vakuumverhalten der Plasmakammer bei den verschiedenen Betriebszuständen. Für metallische Wände wurde die nach der Evakuierung noch vorhandene Beladung mit Fremdgasen abgeschätzt. Es ergab sich, daß die Restgasbeladung bei einer Evakuierungstemperatur von 573 K und einem Druck von unter 10⁻⁶ Pa noch immer etwa 30 % des gesamten Brennstoffinventars im Plasma entspricht. Solange die Ausgasung nicht durch radioaktive Bestrahlung ausreichend stimuliert werden kann, sind die vorgesehenen zusätzlichen Glimmentladungsprozesse unverzichtbar. Ziel neuer Untersuchungen ist die Simulation des zeitlichen Verlaufes der Gasdichten während der "dwell-time" (Zeit zwischen zwei Brennvorgängen).

Die Wasserstoff-Wandwechselwirkungsprozesse in einem Fusionsreaktor sind bei Verwendung von Graphit als Wandmaterial sehr viel komplexer als bei metallischen Werkstoffen. Beim Betrieb des JET mit Limitern aus Graphit hat sich gezeigt, daß größere Mengen Wasserstoff der Gasphase entzogen werden, wenn das Plasma in stärkeren Kontakt mit den Limitern tritt und es zu einer erhöhten Zerstäubung von Graphit kommt. Die für NET vorgesehene Verwendung von Graphit als Wandmaterial wird daher das Tritiuminventar und die radioaktive Kontamination der Bauteile wesentlich mitbestimmen. Bei der Simulation des dwell-time-Verhaltens muß deshalb der Einfluß des zerstäubten Wandmaterials berücksichtigt werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.01.01P33B	<u>R.A. Müller</u> F. Engelhardt

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23614		DPE, Diegele
24161		Dr. T. Fett
24874		Prof. Dr. D. Munz G. Schweinfurth <u>Dr. H. Stamm</u>

Vorhaben
03.01.02 Alternative Konzepte

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

Unter diesem Titel wird auch die Unterstützung des IPP Garching durch KfK bei Experimenten an den Anlagen ASDEX und ASDEX-UPGRADE aufgeführt. Dabei entwickelt das INR eine Apparatur zur Messung der Ionen-temperatur des Plasmas mittels der Spektroskopie schneller Neutronen. Bei der Reaktion



entstehen Neutronen mit einer Energie von genau 2.45 MeV. Die thermische Bewegung der Deuteriumatome führt aber zu einer Linienverbreiterung gemäß

$$\Delta E = 67.4 \sqrt{T_i} \quad (\Delta E \text{ und } T_i \text{ in keV})$$

Aus der Messung der Linienbreite ΔE läßt sich somit die Ionentemperatur T_i bestimmen, vorausgesetzt die Energieauflösung des Spektrometers ist gut genug. Messungen mit dem hier aufgebauten ${}^3\text{He}$ -Spektrometer am van-de-Graaff Generator des IK III zeigten, daß dies der Fall ist. Es ergab sich eine Energieauflösung von ± 1 keV entspricht. Bei ASDEX muß aber mit einer Linienverbreiterung durch Streuneutronen gerechnet werden. Mit Versuchen, die Streueffekte enthalten und mit der Entwicklung von Korrekturverfahren wurde begonnen.

Außerdem beteiligt sich das INR an Messungen der Wärmebelastung der Divertor-Prallplatten von ASDEX. Diese Messungen sind für die NET-Divertorentwicklung wichtig. Thermographiemessungen zeigten sehr hohe, kurzzeitige, lokale Temperaturwerte, die nicht für die Wärmespannungen im Material wohl aber für die Erosion sehr bedeutsam sein können.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. G. Fieg Dr. H. Würz

Vorhaben
03.01.02 Alternative Konzepte

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

Die Beteiligung an Studien, die nicht unmittelbar NET-gebunden sind, soll u.a. auch eine Bewertung der KfK-eigenen Entwicklungsarbeiten ermöglichen.

Mit dem Planungsteam des im Bau befindlichen Fusions-experimentes ASDEX-Upgrade wurde untersucht, was ASDEX-Upgrade im Hinblick auf NET zu Fragen des Materialtransports, der Energiedeposition und der Disruptionen beitragen kann. ASDEX-Upgrade wird hier auf dem Weg von JET und ASDEX zu NET als ein wichtiger Zwischenschritt angesehen, der eine enge Zusammenarbeit zwischen Physik und Technologie erfordert.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		K. Kleefeldt

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). Gegenwärtig betrifft dies das Stellaratorexperiment W7X des IPP. 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. Diese Untersuchungen wurden planmäßig beendet und die Ergebnisse in einem Bericht geschlossen dargestellt (24403). Die grundsätzliche Machbarkeit eines solchen Reaktors aus der Sicht der untersuchten kritischen Bereiche ist gegeben.

2. Leiterentwürfe für W7X

Die für W7X erstellten Leiterentwürfe wurden in einem IPP-Stellarator Workshop bezüglich ihres Betriebsstroms, des Kühl- und Biegeverhaltens sowie der AC Verluste bewertet. Mehrere modulare Stellaratorversionen, die von den Plasmaphysikern für W7X diskutiert werden, wurden miteinander verglichen, um relative Aussagen über benötigte Leitermengen zu erhalten. Da noch keine Entscheidung über eine Referenzkonfiguration für W7X seitens des IPP gefällt werden konnte, wurden weitere Leiteruntersuchungen vorläufig zurückgestellt. Sie sollen nach der Entscheidung über die W7X-Referenzkonfiguration wieder aufgenommen werden.

3. Berechnungsverfahren und Auslegungsrechnungen

Es wurde eine Vielzahl von Berechnungsprogrammen für Magnet-, Kühl- und allgemeine Auswerteprobleme erstellt, verbessert, erweitert und angewendet.

Magnetprobleme:

- Erstellung eines Programms für die Berechnung der Spannungs- und Dehnungsverteilung in einer Zylinder-spule.
- Erweiterung des Programms ANAMAG zur analyti-schen Magnetfeldberechnung um einen Grafikeil.
- Umstrukturierung von EFFI zu einer nutzergerechten Datendarstellung für spezifische Probleme, z.B. Feld und Kraft für D-Spulen in Abhängigkeit von der Bogen-länge (numerisch und graphisch).
- Zur Simulation der U-I-Charakteristik von Supraleitern wurde ein Programm erstellt, um aus den Einzelkompo-nenten des komplexen Supaleiters die gemessene U-I-Charakteristik nachzubilden.

- Erstellung eines Druck-Enthalpie-Diagramms für Helium und Stickstoff und graphische Darstellung unter Verwendung des Programms SIMPLO.
- Berechnung thermohydraulischer Größen für eine Venturi-Düse.

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. 2), sowie Beiträge zu POLO (Vorhaben 03.03.03. Es wurde ein CAD/CAM-Arbeitsplatz eingerichtet, der nach der Implementierung als erstes für TOSKA-Upgrade und POLO-Entwürfe eingesetzt worden ist.

Kühlprobleme:

- Umstrukturierung des Programms zur Berechnung von Druckabfall und Wärmeübergang in einem regenera-tiven Wärmetauscher (Schüttung aus Steinen) und Ein-bau einer graphischen Ausgabe.
- Erstellung eines Auswerteprogramms für kühltech-nische Größen bei TESPE unter Anwendung bereits vorhandener Programme.

Veröffent-lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24403		F. Becker DI K. Jentzsch DI W. Lehmann DI J. Lühning (bis 30.6.) <u>Dr. W. Maurer</u> A. Vogt H-IT: DI G. Böhme DI. J. Hübner

Arbeitsthema

03.02 Strukturwerkstoffe für Fusionsanlagen

Vorhaben

03.02.01 Nichtmetallische Werkstoffe

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

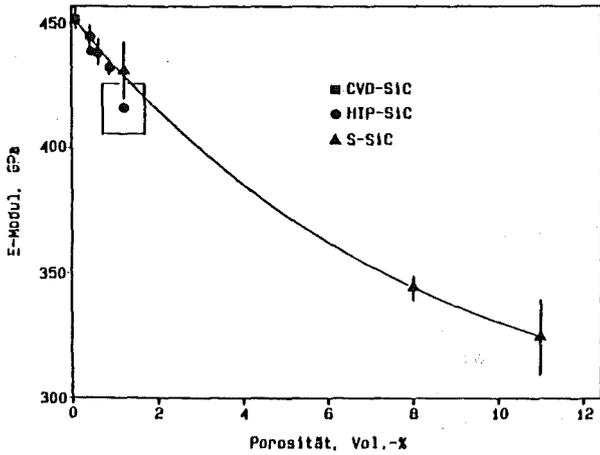
Eigenschaftsmessungen an SiC und an Fenstermaterialien

Eigenschaftsuntersuchungen an verschiedenen SiC-Typen und -Qualitäten aus industrieller Herstellung galten der Ein-schätzung ihres Widerstandes gegen die Bildung thermischer Risse bei der Verwendung für Wandschutz-Ziegel in der Fusions-Brennkammer. In diesem Zusammenhang wurden Messungen des Elastizitätsmoduls und der Biege-bruchfestigkeit fortgesetzt. Der Thermoschockparameter $R'' = k \cdot \alpha_f (1 - \nu) / E \cdot \alpha$ bei hohen Temperaturen ergibt sich zu etwa 40 W/cm für gesintertes SiC und zu etwa 60 W/cm für isostatisch heißgepreßtes SiC.

Eine kritische Begrenzung der Betriebstemperatur an der plasmaseitigen Ziegeloberfläche kann durch das Verdamp-fungsverhalten des SiC-Materials gegeben sein. Langzeit-Glühversuche im Hochvakuum zeigten, daß bei 1700 °C min-destens mit einer Zersetzungsrate (durch Ausdampfen von Si) von 1 mnv/Jahr zu rechnen ist. Da bei anfänglich schnellerer Si-Verdampfung auf dem SiC eine Graphitschicht zurück-bleibt, ist im Fusionsreaktor mit der gleichen Erosionsrate durch einfallende Plasmateilchen zu rechnen wie für Graphit.

Zur Charakterisierung und Reproduzierbarkeitskontrolle wur-den eingehende mikroskopische Gefügeuntersuchungen an allen gelieferten Materialien durchgeführt.

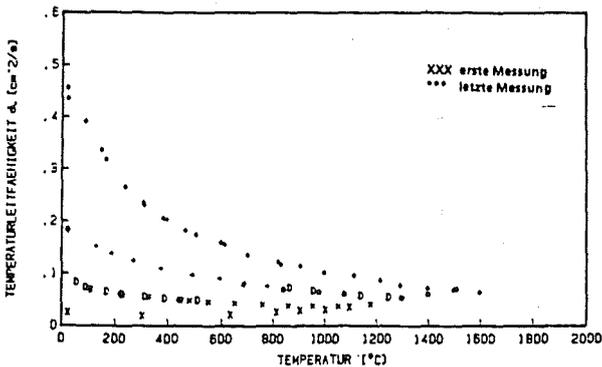
An bestrahltem heißgepreßten SiC wurde die Tempera-turleitfähigkeit gemessen. Die Neutronendosis betrug $2,6 \cdot 10^{20} \text{ n/cm}^2$ bei 475 K. Die Erholung der bestrah-lungsbedingten Defekte beginnt bei 1075 K (800 °C in Abb. 14)



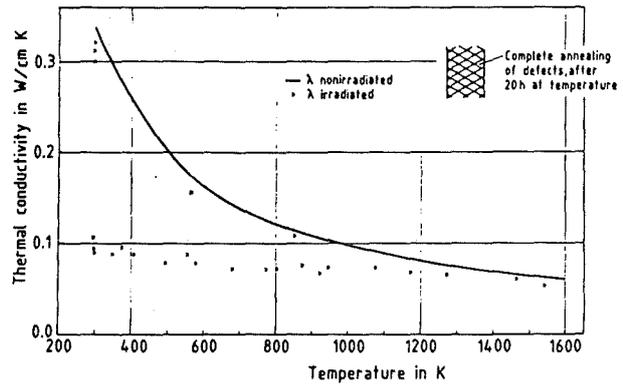
E-Modul verschiedener SiC-Typen und Qualitäten in Abhängigkeit von der Porosität

und ist nach mehreren Meßzyklen, jeweils von Raumtemperatur bis 1500 °C, nahezu abgeschlossen

..., was zu einer Angleichung des Temperaturverlaufs an den des unbestrahlten SiC führt. Für Fenstermaterialien aus AlN unterschiedlicher Reinheit ergab sich, daß das stark verunreinigte heißgepreßte AlN im Niedertemperaturbereich eine um den Faktor 2 geringere Temperaturleitfähigkeit aufweist als viel reineres gesintertes AlN. An Al₂O₃, das bei 475 K mit einer Neutronendosis von 2,6·10²⁰ n/cm² bestrahlt worden war, konnte die vollständige Erholung der bestrahlungsinduzierten Defekte nach einer 20 h Glühung bei 1275 K festgestellt werden (Abb. 15). In einer eingehenden Analyse der Niedertemperaturleitfähigkeit in α-Al₂O₃ (Ein- und Vielkristalle) wurde der dominierende Mechanismus der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit in α-Al₂O₃ bestimmt. Er ist bedingt durch Phononenstreuung an Punktdefekten im Gitter und Phononen-Umklappprozesse, die den hyperbelartigen Verlauf der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bestimmen. Aus den Ergebnissen am bestrahlten, polykristallinen Al₂O₃ folgt, daß bereits bei niedrigen Bestrahlungsdosen eine Sättigung der Störung des Wärmetransports durch bestrahlungserzeugte Gitterdefekte erfolgt.

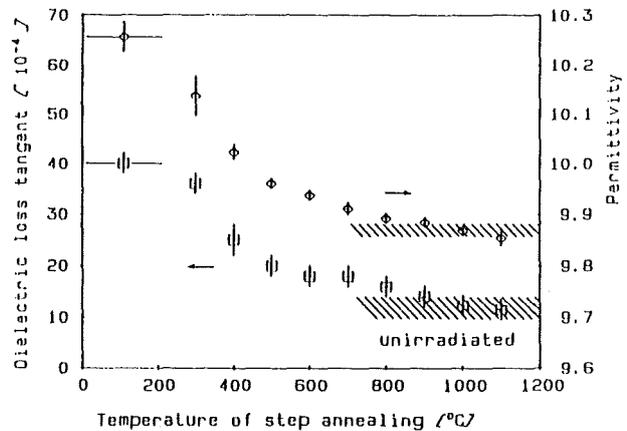


Temperaturleitfähigkeit von bestrahltem heißgepreßten SiC.



Wärmeleitfähigkeit von bestrahltem und unbestrahltem α-Al₂O₃ (AL23).

Die dielektrischen Eigenschaften einer breiten Auswahl potentieller Isolatormaterialien (vor allem aus Al₂O₃, MgAl₂O₄ und AlN) für Transmissionsfenster bei der Radiofrequenzheizung des Fusionsplasmas wurden bestimmt. Während sich einkristalline Al₂O₃-Proben im Frequenzbereich der Ionen-Zyklotronresonanz-Heizung bei 50 MHz durch besonders niedrige Verluste auszeichneten, konnte diese Eigenschaft bei 30 - 40 GHz, nahe den Frequenzen der Elektronen-Zyklotronresonanz-Heizung, nicht aufgezeigt werden. Für polykristallines AlN wurde besseres Verhalten von optisch durchscheinenden gesinterten Qualitäten relativ zu opaken heißgepreßten Qualitäten in der mechanischen Festigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und im dielektrischen Verlust festgestellt. In ersten Nachbestrahlungsuntersuchungen einschließlich Defektausheilungsstudien wurden bereits bei der mäßigen Dosis von 2,6·10²⁰ schnellen Neutronen/cm² deutliche Änderungen in den dielektrischen Eigenschaften gefunden. Es wurde eine starke Erhöhung der dielektrischen Verluste in polykristallinem Al₂O₃ gemessen, und zwar auch im GHz-Bereich (Abb. 16), in dem die Verluste des einkristallinen Al₂O₃ praktisch unverändert blieben.



Temperaturabhängige Ausheilung von polykristallinem Al₂O₃ (Reinheit 99,5 %) bezüglich der dielektrischen Parameter bei 30 - 40 GHz nach Neutronenbestrahlung (Fluenz: 2,6·10²⁰ schnelle Neutronen/cm²).

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23050	03.02.01P46A	Dr. Ch. Adelhelm
24837	03.02.01P47A	M. Blumhofer
	03.02.01P47B	Ing. J. Burbach
	03.02.01P47C	<u>Prof. Dr. W. Dienst</u>
	03.02.01P47D	G. Gausmann
		G. Haase
		Dr. R. Heidinger
		S. Hellgardt
		V. Karcher
		K.-H. Kurz
		<u>Dr. B. Schulz</u>
		Dr. H. Zimmermann

Keramische Schichten und mehrphasige Materialien für die Erste Wand

Die Entwicklung mehrphasiger keramischer Materialien, die für die Herstellung sowohl von Schutzschichten als auch von kompakten Formkörpern (z.B. Ziegeln) verwendet werden können, wurde weitergeführt mit dem Ziel, einige wichtige mechanische Eigenschaften wie Wärmeshockbeständigkeit, Bruchzähigkeit und Biegebruchfestigkeit im Verhältnis zu den entsprechenden einphasigen Materialien zu verbessern. Diese Konzeption gründet sich auf die Vernichtung von durch äußere oder innere Spannungen eingebrachter Energie durch Einführung eines hohen Anteils an Phasengrenzen bei Optimierung des Gefüges. Ihre Anwendung zielt auf keramische Materialien allgemein. Mit besonderem Erfolg läßt sie sich auf Übergangsmetallkarbide, -nitride und -boride anwenden.

Im ersten Schritt wurde die Phasenkombination TiC/TiB₂ untersucht. Sie gehört zu den eutektischen Systemen, die sich als besonders günstig für die Ausbildung eines optimalen Gefüges mit hoher Atombeweglichkeit an den Phasengrenzflächen erweisen. Die kompakten TiC/TiB₂-Formkörper, die auf pulvermetallurgischem Wege hergestellt wurden, zeigten im Vergleich zu den einphasigen Materialien ein erheblich verbessertes Sinterverhalten, das sich in einer hohen Dichte niederschlug. Die Phasengrenzflächen wurden durch Transmissionselektronenmikroskopie und Auger-Spektroskopie untersucht. Es zeigte sich, daß sich teilweise kohärente Phasengrenzflächen ausgebildet hatten. An Bruchflächen wurden röntgenamorphe Schichten aus Ti, C und B beobachtet, die offenbar nicht im Gleichgewicht stehen, und die wahrscheinlich für die Atombeweglichkeit und damit für das gute Sinterverhalten und die Ausbildung des feinen Gefüges mit verantwortlich sind. In ersten Tests zeigten diese Proben im Vergleich zu einphasigem Material ein verbessertes Thermochockverhalten (beim Abschrecken von 1000 °C in Wasser) und eine erhöhte Bruchzähigkeit.

Aus dem gleichen Material wurden auch alternierende TiC-TiB₂-Schichten hergestellt. Durch direktes Magnetron-Sputtern mit rotierendem Probenhalter unter TiC- und TiB₂-Targets wurden die Mehrlagenschichten auf Stahlsubstrate (AISI 316L und MANET) aufgebracht. Der Rißausbreitungswider-

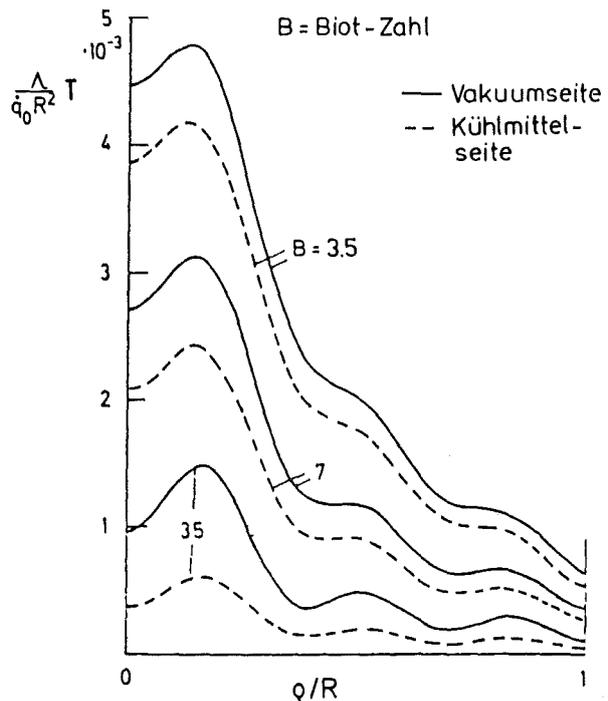
stand wurde für verschiedene Lagenstärken gemessen und zeigte ein Maximum bei 20 - 50 nm pro Einzellige (Gesamt-Schichtstärke 5 µm, Anzahl der Einzellagen übereinander: 250 - 100).

Mit Hilfe von zahlreichen Röntgenmikrosondenanalysen an Feststoffpartikeln aus dem JET-Torus wurden Beiträge zur Kenntnis der chemischen Zusammensetzung dieser Teilchen, die u.a. durch die Plasma/ Wand-Wechselwirkung entstanden sind, geliefert.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25275	03.02.01P45A	K. Biemüller
	03.07.01P01A	Prof. Dr. H. Holleck
		H. Janzer
		Dr. H. Kleykamp
		Dr. H. Leiste
		E. Nold
		G. Schlickeiser
		<u>Dr. A. Skokan</u>
		H. Späte

Keramik-Fenster für HF-Generator

In der Fusionstechnologie wird zur Plasmaheizung die HF-Leistung verwendet, die mittels Elektronenröhren (Gyrotrons) erzeugt wird. Zur Trennung des Röhrenvakuum vom Plasma sind HF-Fenster aus Keramik vorgesehen. Aufgrund der unvermeidlichen Verluste wird das Fenster stark inhomogen erwärmt. Abb. 17 zeigt die Temperaturverteilung über dem Radius des Fensters. Aufgrund der inhomogenen Tempe-



Temperaturen in HF-Fenster in normierter Darstellung (\dot{q}_0 = spez. Volumenheizung, Λ = Wärmeleitfähigkeit, R = Scheibenradius)

raturen resultieren inhomogene thermische Spannungen, deren Zuganteil zu vorzeitigem Versagen durch Rißwachstum führen kann.

Aus theoretischen Überlegungen wurde eine Größe definiert, die elektrische, thermische und bruchmechanische Daten enthält und deren Wert eine Aussage über die Eignung des Materials für das gestellte Problem gestattet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.02.01P48A	Dr. T. Fett Prof. Dr. D. Munz

**Vorhaben
03.02.02 Metallische Werkstoffe**

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Entwicklung und Qualifizierung des martensitischen Stahls 1.4914 als Erste Wand Material

Die auftretenden Probleme an der Ersten Wand von Fusionsanlagen wurden anhand eines umfangreichen Datenvergleichs der beiden Referenzwerkstoffe 316L und 1.4914 dargestellt (24738). Im Berichtszeitraum wurde unter maßgeblicher Mitwirkung des IMF eine Harmonisierung der Aktivitäten auf dem Gebiete der vergütbaren martensitischen 9-12% Chrom-Stähle im europäischen Rahmen erreicht. Nach eingehenden Diskussionen wurde eine leicht modifizierte Version des 1.4914, als MANET 2 bezeichnet, als martensitischer Referenzwerkstoff ausgewählt.

Die Probleme bei der Herstellung von Halbzeug aus der 1. NET-Charge des 1.4914 (MANET 1) sind zufriedenstellend gelöst worden (PA 8740). Das Versuchsmaterial wurde an die assoziierten EG-Labors ausgeliefert.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24738 PA 8740	03.02.02 P46A	B. Dafferner Prof. K. Ehrlich Ing. M. Schirra DI Ch. Wassilew

Fertigung und Erprobung von Hohlproben aus dem martensitischen Stahl 1.4914

Im Unterschied zu austenitischen Stählen erfordert die Herstellung von Hohlproben (H-GRIM) aus 1.4914 zusätzliche thermomechanische Behandlungen, deren Einfluß auf die

Probenqualität es zu untersuchen galt. Der vorgeschlagene Fertigungsprozess erwies sich als erfolgreich. Obwohl die Bruchlastspielzahlen N_f der Vollproben (S-GRIM) beider Materialien praktisch gleich sind, ist für die H-GRIM Proben, unter sonst gleichen Bedingungen, N_f für den Martensit deutlich kleiner als für den Austenit. Die Ursache für dieses Verhalten ist bislang ungeklärt. Unabhängig von der Probenform ist das zyklische Verformungsverhalten beider Materialien sehr unterschiedlich.

Im Hinblick auf die zu erwartende inhomogene Temperaturverteilung der in der Zweistrahl-Anlage bestrahlten H-GRIM-Proben war zunächst die Durchführbarkeit (Formstabilität) von Zug-Druck Wechselversuchen an H-GRIM-Proben unter azimutalen Temperaturgradienten zu prüfen. Entsprechende Versuche, durchgeführt zum größten Teil am Austenit AISI 316L, im Temperaturbereich 350 bis 550 °C, mit einer Dehnungsamplitude 0.6% und T-Gradienten bis zu 50 °C/180 Grad, verliefen formstabil. Auf gleiche Weise verhielten sich martensitische H-GRIM Proben. Im Vergleich zu Versuchen mit homogener Temperaturverteilung scheinen T-Gradienten die Lebensdauer der Proben zu verlängern.

Die Verwendungsmöglichkeit der H-GRIM Proben ist im Hinblick auf Anisotropieeffekte begrenzt. Darum sind Überlegungen über Probenformen angebracht, die unter gegebenen Versuchsbedingungen homogene Strahlenschädigung und damit auch homogene Wärmeentwicklung gewährleisten. Diese Überlegungen gaben Anlaß, die Einsatzmöglichkeit einer sogenannten segmentierten H-GRIM Probe (SH-GRIM) zu bedenken, die aus der H-GRIM Probe durch Heraustrennen von Wandteilen entsteht.

Temperaturwechselversuche

Im Berichtszeitraum wurde der Prototyp einer Testeinrichtung fertiggestellt und dessen Funktionsfähigkeit geprüft. Als Teil dieses Programms sind Rechnungen der axialen Temperaturverteilung in T-zyklierten H-GRIM Proben durchgeführt und diese mit gemessenen Verläufen verglichen worden. Die Übereinstimmung ist sehr zufriedenstellend. Auf Grund dieser Ergebnisse werden im Laufe des kommenden Jahres weitere Anlagen dieses Typs fertiggestellt und in Betrieb genommen.

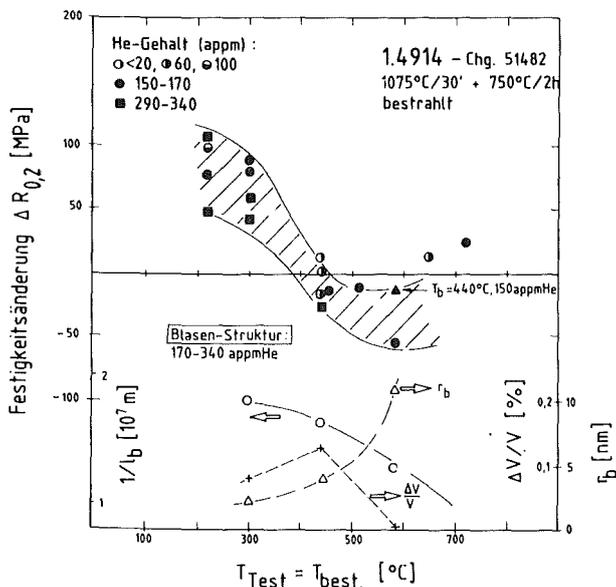
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		W. Baumgärtner Prof. Dr. M. Boček DI C. Petersen Ing. D. Rodrian DP G. Rubiolo (GW) Dr. W. Scheibe DI R. Schmitt Ing. H. Schneider W. Schweiger

Bestrahlungsversuche mit Ionen

Dieses Jahr stand im Zeichen routinemäßiger Flachprobenbestrahlungen in einem weiten Parameterbereich und entsprechender Nachuntersuchungen zur Frage des Heliumeinflusses auf die Materialeigenschaften des Martensits 1.4914. Außerdem konnten Komplettierungsarbeiten zum Bestrahlungsbeginn von LCF-Proben (Low Cycle Fatigue) im Ein- und Zweistrahlbetrieb weitgehend beendet werden (24453). Diese Arbeiten umfaßten im wesentlichen Tests von Bestrahlungseinsätzen, die Ergänzung des bestehenden Heliumkühlkreislaufes durch einen neuentwickelten Nebenkreislauf zur Aufrechterhaltung einer hohen Kühlmittelreinheit und den Aufbau diverser Abschirmeinrichtungen zur sicheren Handhabung bestrahlter aktivierter Prüflinge. Parallel dazu laufende Entwicklungsarbeiten beinhalteten die Spezifizierung und den Kauf einer LCF-Werkstoffprüfmaschine für zukünftige In-beam-Experimente, Erweiterung der Messwerterfassung, Entwicklung und Erstellung diverser Softwaremodule zur Versuchsüberwachung und Steuerung, sowie die Konstruktion einer hochstromfähigen und gleichzeitig gering aktivierenden Experimentierkammer.

Im Hinblick auf die Entwicklung von LCF-Proben, die während der Bestrahlung der Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt werden, sind neben der Herstellung und Spezifizierung einer Kleinserie miniaturisierter H-GRIM-Proben in Zusammenarbeit mit dem IMF-IV Auslegungsstudien begonnen worden, welche die wechselseitige Beeinflussung von Bestrahlungsparametern, Spannungsbelastungen und Probengeometrien zum Inhalt haben.

Zur Frage des Heliumeinflusses auf mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften des Martensits 1.4914 wurden Flachzugproben zwischen 220°C und 700°C bei einem He-



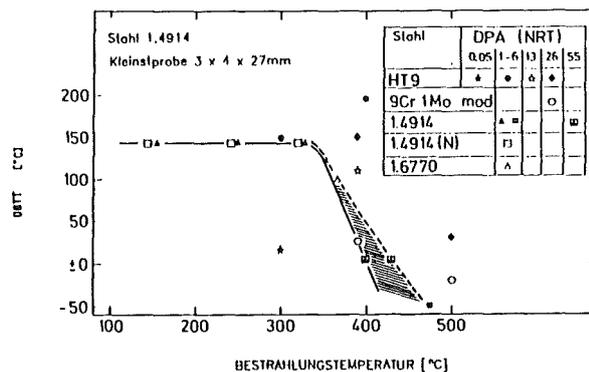
Streckgrenzenänderung und Heliumblasenentwicklung in He-implantierten Flachproben aus dem Martensit 1.4914

Schädigungsverhältnis von 1850 appm He/dpa bis zu 340 appm Helium homogen implantiert. Diese Heliumdosis übertrifft die für NET erwartete Gesamtbelastung um etwa das Vierfache. Die in nachfolgenden Zugversuchen ermittelte bestrahlungsinduzierte Streckgrenzenänderung ist in Abb.18 wiedergegeben und den mikrostrukturellen Parametern Blasen-schwellen $\Delta V/V$, Blasenradius r_b und reziprokem Blasenabstand $1/l_b$ gegenübergestellt. Der Übergang der Streckgrenzen-erhöhung zu einer Entfestigung bei 400-450°C kann durch sich überlagernde Härtungs- (Helium, bestrahlungsinduzierte Defektcluster) und Entfestigungsanteile (Versetzungsklettern) beschrieben werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25345		Ing. G. Bürkle
V 24286		DI R. Lindau
V 24217		<u>Dr. A. Möslang</u>
24453		Dr. D. Preininger
22676		Ing. G. Przykutta

Bestrahlungsversuche mit Neutronen

Ein mögliches Problem beim Einsatz des 12%-chromhaltigen Werkstoffes 1.4914 ist die Änderung von Bruchzähigkeit und Spröbruchübergangstemperatur durch Bestrahlung. Im Berichtszeitraum wurden Proben, die im Rahmen des Projektes Schneller Brüter im BR-2 bestrahlt worden waren (Bestrahlungsexperiment ISIS), in Kerbschlagversuchen getestet. Die daraus resultierenden Ergebnisse führen zusammen mit anderen Daten zu der Aussage, daß für Bestrahlung unterhalb ~370°C bereits bei niedrigen Neutronenfluenzen eine beträchtliche Verschiebung der Übergangstemperatur und eine Reduktion der Kerbschlagenergie in der sogenannten Hochlage auftritt, (24220). In diesem Temperaturbereich der Bestrahlung liegt die an miniaturisierten Kerbschlagproben gemessene Übergangstemperatur bei etwa 150°C. Aufgrund der bekannten Schwierigkeiten bei der Übertragbarkeit von Kerbschlagdaten auf die bruchmechanisch relevanten Auslegungsgrenzen ist mit diesen Untersuchungen noch nicht die Frage beantwortet, welche niedrigste Einsatz-temperatur für diesen Werkstoff angegeben werden kann.



Die Übergangstemperatur T_b verschiedener 9-12% Cr-Stähle nach Bestrahlung

Über den qualitativen Unterschied des Kriechverhaltens unter Bestrahlung bei konstant anliegender Spannung (PFR-M2) bzw. bei Spannungswechseln (Mol 5B) ist berichtet worden (V 24502). Dieses Ergebnis ist besonders relevant für das im Fusionsreaktor zu erwartende Wechsellastverhalten unter Bestrahlung.

Zur Entwicklung geeigneter Strukturwerkstoffe für NET sind Bestrahlungsversuche an zyklisch innendruckbelasteten und temperaturgeregelten Rohrproben aus Werkstoff 1.4914 und 316 L in der Druckrohrtesteinrichtung auf der KNK-II-Zentralposition vorgesehen. Die erforderliche Drucktransientenanlage befindet sich in der Fertigung. Wesentliches Bauteil ist der Druckerzeuger mit sehr speziellen Anforderungen. Die vorgesehene Gesamtanordnung erlaubt bei gleichzeitigem Betrieb aller acht Rohrproben im Testeinsetz Druckzyklen von 65 s Dauer.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 24220		U. Biedermann
V 24502		<u>Prof. K. Ehrlich</u> DI(F.H.) K. Müller DI G. Reiman DI L. Schmidt DI C. Wassilew

Niedrigaktivierende Legierungen

Mit den Qualifizierungsversuchen an zwei von Saarstahl hergestellten Versuchsschmelzen (Ce-Ta-bzw. Ta-Hf-legiert) ist begonnen worden. Härtungsverhalten, Kornfeinheit und δ -Ferritfreiheit entsprechen dem konventionellen (Nb-haltigen) 1.4914-Stahl.

Bei der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher δ -Ferritgehalte auf die mechanischen Eigenschaften des Stahltyps 1.4914 wurde im instrumentierten Kerbschlagversuch festgestellt, daß oberhalb eines gewissen Gehaltes die weiche δ -Ferritphase spaltbruchauslösend wirkt.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<u>Dr. K. Anderko</u> W. Meyer DI Schäfer Ing. Schirra

Chemische Wechselwirkung des Strukturmaterials mit Flüssigmetallen

Ein Korrosionsversuch am Stahl 1.4914 im Pb-Li-Kreislauf PICOLO bei 550°C hat ergeben, daß der Materialabtrag einer linearen Beziehung

$$\Delta D [\text{mm}] = -0,029 + 0,046 \cdot 10^{-3} \cdot t [\text{h}]$$

gehört. Die Massenverluste sind entschieden zu hoch, sie führen zu einer Verstopfung durch Abscheidung von Korrosionsprodukten, die im wesentlichen aus Eisen bestehen. Die Versuche werden bei tieferen Temperaturen fortgesetzt.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24210	03.02.02P44A	<u>Dr. H.U. Borgstedt</u>
V 24213	03.02.02P44B	Ing. G. Drechsler
24364		DI G. Frees
24473		DI M. Grundmann
V 25034		(Doktorand)
V 25035		Z. Perić

Rißbildung und Rißausbreitung unter thermozyklischer Beanspruchung

Die Untersuchungen an Rohrproben aus austenitischem Stahl 1.4436 wurden bezüglich der im letzten Jahresbericht beschriebenen Versuchsbedingungen (Flüssigmetallkühlung $T_{\min} = 300^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$) beendet. Der jeweilige Ausgangspunkt des Versagens lag auf der Rohrinneenseite. Korrosionseffekte durch das verwendete Kühlmedium beeinflussten diese Vorgänge.

Ein anschließender Anlagenumbau ermöglicht die Verwendung von Wasser als Kühlmedium; dies führt zu geänderten Versuchsparametern ($T_{\min} = 100^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 400^{\circ}$). Erste Untersuchungen wurden erfolgreich durchgeführt. Begleitend fanden analytische Berechnungen der Temperaturverteilung sowie der elastischen und plastischen Spannungsverteilung in der Rohrwand statt.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V24738	03.02.02P54A 03.02.02.P55A 03.02.02P55B 03.02.02P55C	<u>DI J. Neumann</u> Ing. E. Wiens Dr. T. Fett

Arbeitsthema

03.03 Supraleitungsmagnete

Vorhaben 03.03.02 Entwicklung von Toroidalfeldspulen

Institut für Technische Physik (ITP)

Die Arbeiten zielen spezifisch auf die Entwicklung der TF-Spulen von NET ab. Hierzu dient seit langem das Projekt LCT ("Large Coil Task") der IEA, dessen experimentelle Phase im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Weiterhin sollen mit den aus der Entwicklung (Vorhaben 03.03.06) resultierenden TF-Spulenleitern für NET industrielle Prototypplängen und Testwicklungen gefertigt werden, für deren Untersuchungen eine geeignete Testanordnung zu konzipieren und zu bauen ist. KfK ist für die gegenwärtigen Entwurfsarbeiten dazu federführend und plant diese Testeinrichtung unter Verwendung der TOSKA-Anlage und von LCT-Spulen für das Hintergrundfeld. Am Kältebedarf dieses Testsystems orientiert sich auch die Planung einer neuen He-Kälteanlage.

1. Das große Spulenprojekt LCT (Large Coil Task)
- 1.1 Übersicht über den Verlauf der Tests (V25513) (24459)

Anfang des Jahres wurde das "Standard Testprogramm mit Pulsfeld" erfolgreich fortgesetzt (CH- und JAERI-Spule). Beim Bewegungsmanöver der Pulsspule in der japanischen Spule, trat jedoch am Bewegungsmechanismus ein Defekt auf, der ein Ausfahren der Pulsspule in eine andere Spule äußerst riskant erscheinen ließ. Das Gremium der "Projekt Officer" beschloß darauf die Reihenfolge der Tests so zu ändern, daß erst am Schluß des Meßprogramms das Verfahren der Pulsspule erneut versucht werden sollte. Es wurde mit dem Teil des erweiterten Testprogramms ("Extended Tests") begonnen, bei dem die Pulsspule nicht verfahren werden muß. Dieser Teil des Programms umfaßt für alle Spulen:

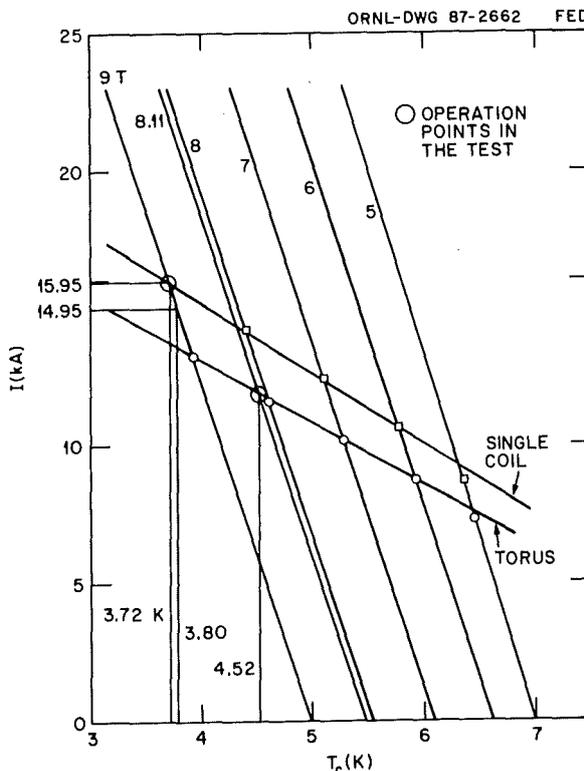
- einen Einzelspulentest bis zur Auslegungsgrenze (für die japanische Spule auch mit Pulsfeld);
- einen Test im Torus mit dem höchstmöglichen Feld;
- einen Test im Torus mit dem Ausfall einer Spule und den damit verbundenen höchsten seitlich auf die Spule wirkenden Kräften (Schieflastfall).

Die erweiterten Tests mit Pulsfeld in der japanischen Spule führten zu einer beträchtlichen Stickstoffleckage von ca. 0,4 kg/h in den Vakuumtank. Es konnte bewiesen werden, daß die Leckage nicht im N₂-Kreislauf der Pulsspule lokalisiert war. Nach einer Zwangspause im Experimentierbetrieb, verursacht durch Probleme mit den Kompressoren der

Kälteanlage in den Monaten Juni und Juli, wurde dann in einer äußerst intensiven Testphase im August das restliche Testprogramm abgewickelt. In einem feldsymmetrischen Torus erreichten alle Spulen 9 T maximales Feld. Die Schiefplastests im Torusverband waren teilweise durch Auslegungsgrenzen der einzelnen Spulen bestimmt.

Das Testprogramm wurde durch Tests zur Magnetsicherheit (Kühlmittelverlust und Messungen zur Temperatur der heißesten Zone ("Hot Spot")) an der Euratom- und Westinghouse-Spule ergänzt. Dafür wurden die Standardpulsfeldtests der US-Spulen und die erweiterten Pulstests aller Spulen wegen des Defekts im Bewegungsmechanismus, sowie der aufgetretenen Stickstoffleckage, aus dem Testprogramm gestrichen. Am 3. September 1987 war das Testprogramm abgeschlossen. Die Aufwärmung des Torus begann. Am 9. Oktober 1987 konnte der Tank geöffnet und inspiziert werden. Es waren keine dramatischen Schäden nach der immerhin 2-jährigen Testperiode feststellbar. Jedoch zeigte die Fülle der beobachteten Details, daß dem Kraftschluß bei komplizierten Strukturen in Zukunft mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden muß.

Die japanische und die Euratom-Spule wurden noch im Berichtsjahr aus dem Vakuumtank ausgebaut und für ihre Verschiffung in die Herkunftsländer vorbereitet. Die Partner arbeiten jetzt noch an der gemeinsamen Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse. Der gesamte organisato-

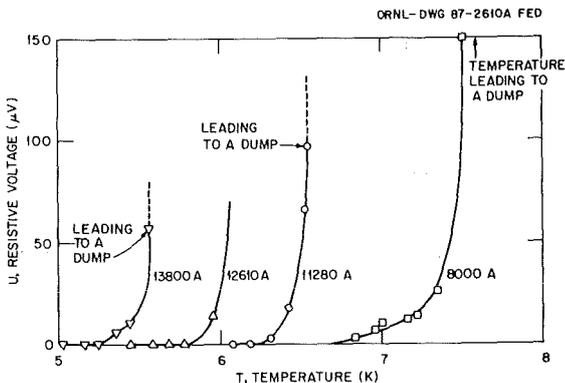


Die aus Kurzprobenmessungen abgeleitete kritische Linie für den höchsten Feldpunkt in der Spule für Einzelspulen- und Torus-Konfiguration.

rische Rahmen des internationalen Experimentes hat sich als tragfähig erwiesen (V 24645).

1.2 Der erweiterte Einzelpulventest bis 140 % Nennstrom (V 24290)

In dem Einzelpulventest bis zur Auslegungsgrenze erreichte die Euratom-Spule als einzige Spule 9 T bei 140 % des Nennstromes ohne resistive Spannungen und Übergang zur Normalleitung. Die Analyse des Testpunktes ergab, daß die Spule an den kritischen Werten des supraleitenden Kabels betrieben werden konnte, die aus den Kurzprobenmessungen der Einzeladern extrapoliert worden waren. In einer Serie von Messungen mit Injektion von aufgeheizten Heliumgaspfropfen (Temperatur nahe der Übergangstemperatur), konnte mit einer sehr hohen Empfindlichkeit der Spannungsmessung der Übergang zur Normalleitung im Bereich der Übergangstemperatur ("current sharing temperature") herausgemessen werden. Bei drei

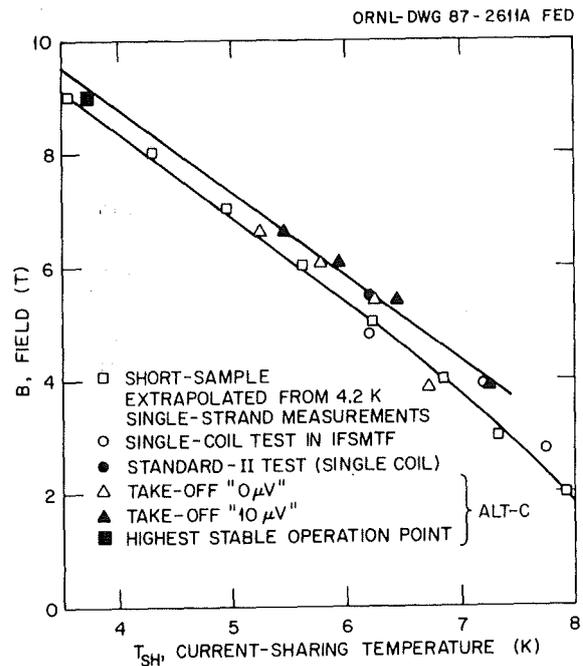


Der Übergang des Leiters in den resistiven Bereich ("take off"), gemessen mit injiziertem Heliumgaspfropfen nahe der Übergangstemperatur ("current sharing temperature").

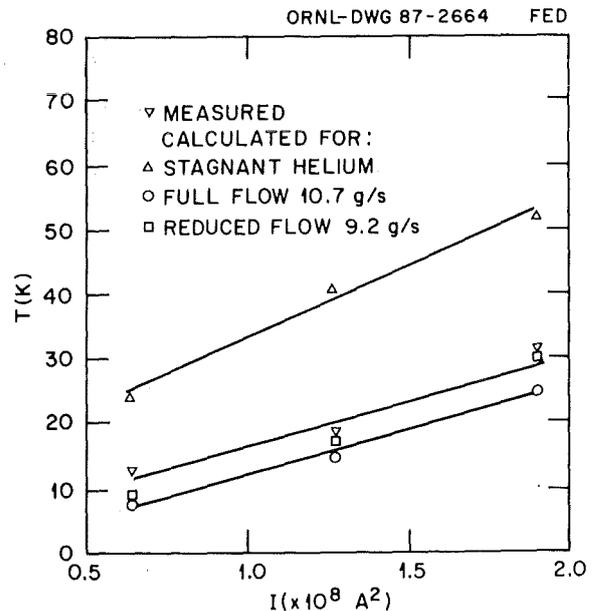
Stromwerten wurde die Temperatur soweit gesteigert, bis eine sich ausbreitende normalleitende Zone eintrat, die dann eine Schnellabschaltung auslöste. Die aus diesen Übergangskurven extrapolierten kritischen Daten des Kabels wurden mit den aus Abb. 1 abgeleiteten Werten verglichen, was im Rahmen der Meß- und Extrapolationsgenauigkeiten eine gute Übereinstimmung liefert

Aus den gemessenen Übergängen zur Normalleitung konnte auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone bestimmt werden, die aufgrund der komplexen thermohydraulischen Vorgänge nicht mehr proportional zum Quadrat des Stromes ist. Aus der gemessenen Temperatur des bei der Schnellabschaltung aus dem am Eintritt des gequenchten Leiters rückströmenden Gases wurde abgeschätzt, daß diese etwa der Temperatur der heißesten Zone ("Hot Spot") entspricht

Die mechanischen Messungen zeigen, daß sich die Vergleichsspannungen bei diesem Lastfall verdoppeln. Die größten Abweichungen liegen im geraden Stück des D. Wie schon beim TOSKA-Test untersucht wurde, könnten sich diese Abweichungen aus Nichtlinearitäten im Kraftschluß



Vergleich der erwarteten und gemessenen Übergangstemperaturen ("Current sharing" Temperaturen)



Abgeschätzte Temperaturen der heißesten Zone des Leiters ("Hot Spot") für ruhendes und fließendes überkritisches Helium, sowie Vergleiche mit der gemessenen Temperatur des bei der Schnellabschaltung aus dem gequenchten Leiter ausgestoßenen Gases.

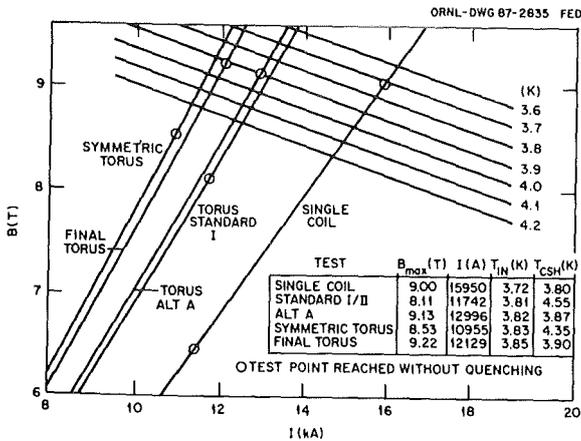
erklären lassen, die das Finite Element-Modell nicht enthält (V 24291).

1.3 Die erweiterten ("Extended") toroidalen Tests

Die erweiterten Test der japanischen und der Schweizer Spule in toroidaler Konfiguration hatten gezeigt, daß sich die Anlage auch mit der aufgetretenen Stickstoffleckage noch

sicher betreiben läßt. Strom- und Feldbelastung der einzelnen Spulen mußten jedoch sehr sorgfältig aufeinander abgestimmt werden, um eine Schnellabschaltung des Torus durch Überlastung einer Spule möglichst zu verhindern. Eine Schnellabschaltung bedeutete nämlich neben dem hohen Verlust an Helium eine Wartephase von 4 - 5 Tagen, bis erneut genügend Helium für einen Test in toroidaler Konfiguration verflüssigt worden war. Durch Kauf und Einspeisung von flüssigem Helium konnte die Zeit auf 2 - 3 Tage verkürzt werden.

Im erweiterten toroidalen Test der Euratom-Spule konnte aufgrund der sehr guten Ergebnisse des Einzelspulentests das Maximal-Feld auf 9,1 T gesteigert werden .In

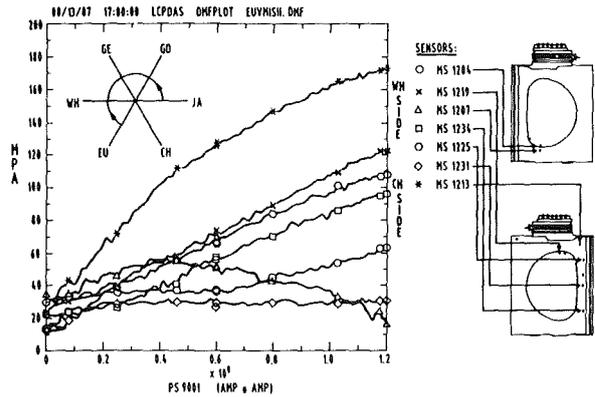


Die Lastlinien der Euratom-Spule für den Höchstfeldpunkt in Einzelspulen- und Torus-Konfiguration.

diesem Test erfuhr die Spule ihre höchste radiale Kompression. Die Spule wurde mit einer integralen Kraft von 52 MN gegen den zentralen Stützpfiler gepreßt. Der Spalt zwischen Wicklung und Innenring des Spulengehäuses erreichte bei diesem Test seinen größten Wert von 2,53 mm (Einzelspulentest 140 % : 2,11 mm). Die maximale Vergleichsspannung im Gehäuse war mit 144 MPa niedriger als im erweiterten Einzelspulentest (246 MPa). Die Testkonfiguration konnte mit einem Massenstrom von 150 g/s und 75 g/s ohne meßbare Verschlechterung der Stabilität gefahren werden. In dem abschließenden feldsymmetrischen Torus-Lastfall erreichte die Euratom-Spule 9,2 T maximales Feld ohne sichtbare resistive Spannungen.

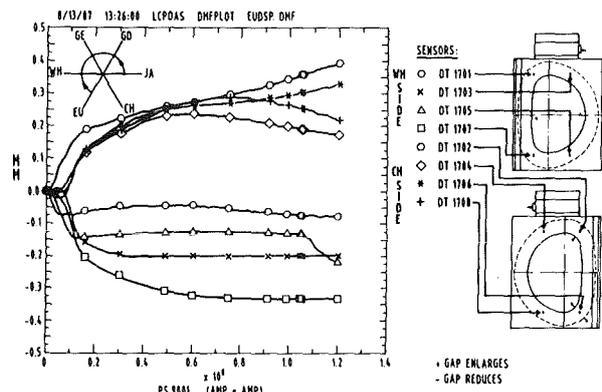
Der Schiefkasttest (Ausfall der Nachbarspule) erfolgte für beide seitlichen Richtungen. Beide Tests zeigten ein unterschiedliches Verhalten. Während die Vergleichsspannungen in der Testkonfiguration Euratom / General Electric Spule linear mit dem Stromquadrat ansteigen, ist dies in der Testkonfiguration Euratom / japanische Spule nicht der Fall

Einige Vergleichsspannungen sind nicht linear mit dem Stromquadrat, was auf andere Randbedingungen in Kraftschluß zur Torusstruktur schließen läßt. Nachgewiesene Spalte zwischen Strukturteilen nach dem Öffnen des Tanks bestätigen dies. Die maximale integrale Schiefkast betrug für die Euratom-Spule 26,6 MN. Dies war auch die höchste Schiefkastkraft in der gesamten Testreihe. Unter



Einige ausgewählte Vergleichsspannungen als Funktion des Stromquadrates während des Schiefkasttestes der EU/JA-Spulen.

dieser Kraftwirkung war keine globale Bewegung der Wicklung im Gehäuse feststellbar . Alle Verformungen blieben im elastischen Bereich und waren reversibel.



Spalt zwischen Wicklung und Seitenblech als Funktion des Stromquadrates.

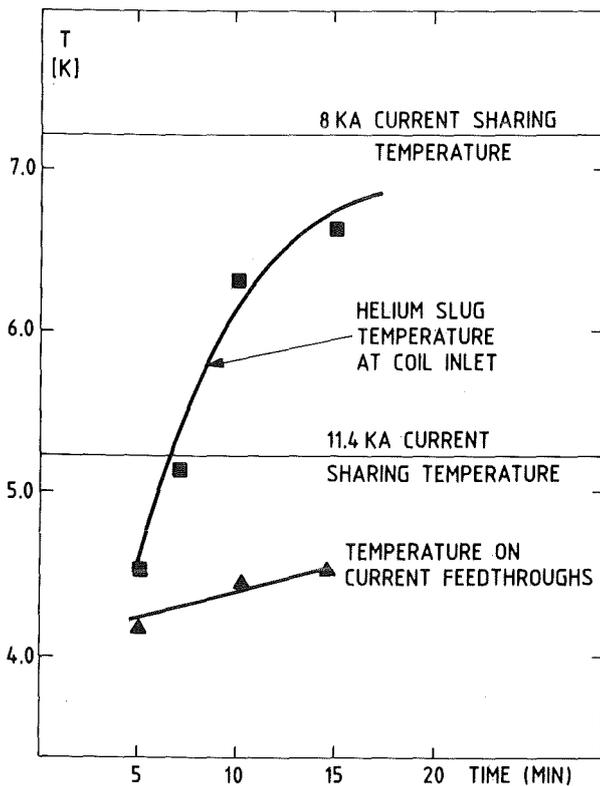
1.4 Sicherheitstests

Es wurden an der Euratom-Spule Verifikationstests zur Messung der "Hot Spot" Temperatur (vergl. 1.2) durchgeführt und das Verhalten bei Kühlmittelverlust untersucht.

Eine Erniedrigung des Massenstroms um die Hälfte (~ 75 g/s) führte zu einer Erhöhung der "Hot-Spot" Temperatur um 5 K, was der Erwartung entspricht. Eine um 2 s verzögerte Schnellabschaltung zeigte keine Änderung in der Temperaturhöhe gegenüber einer Verzögerung von 1 s. Unter den vorgegebenen Kühlbedingungen und den komplexen thermohydraulischen Verhältnissen ließen sich innerhalb der Meßgenauigkeit keine weiteren Aussagen gewinnen. Bei dem verzögerten Quench zeigte sich erstmal ein Überspringen des Quenches in die andere Leiterhälfte, wodurch sich die resistive Spannung in der Brücke kompensiert (V 24646). Dies kann als einziger Nachteil der verwendeten Brückenschaltung angesehen werden.

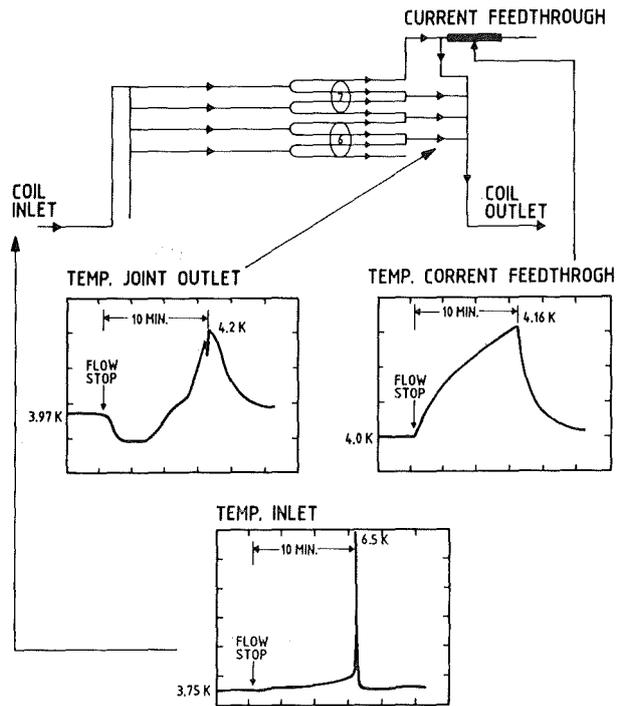
Die Untersuchungen zum Kühlmittelverlust erstreckten sich zunächst auf wichtige Komponenten der Spule (Strom-

zuführungen, Doppelscheibenkontakte). Die Unterbrechung des Kühlmittelstromes mit steigender Länge der zeitlichen Intervalle zeigte, daß alle untersuchten Komponenten weit unterhalb ihrer kritischen Betriebsparameter blieben. Bei der Unterbrechung des Massenstromes der gesamten Spule erwies sich die Temperatur des Gaspfropfens aus dem Rohrleitungssystem am Spuleneintritt als eine kritische Größe bei der Wiederherstellung des Massenstromes durch die Spule. Übersteigt diese Temperatur die Übergangstemperatur bei den entsprechenden Betriebswerten, so wird die Spule dann normalleitend. Bei 8 kA war eine



Temperatur des Heliumgaspfropfens am Spuleneintritt und an der Stromdurchführung als Funktion der Dauer der Kühlmittelunterbrechung.

Wiederherstellung nach 15 Minuten Kühlmittelfluß-Unterbrechung möglich. Einige typische Temperaturprofile am Eintritt und an den Austritten zeigt Abb. 9. Beim Nennstrom erreicht der Heliumgaspfropfen bereits nach 7 Minuten die Übergangstemperatur. Deshalb wurde in einem Versuch beim Nennstrom der Massenstrom für 10 Minuten unterbrochen und dann die Spule ohne Massenstrom auf den Stromwert 0 innerhalb von etwa 50 Minuten gefahren. Es konnte demonstriert werden, daß die Spule ohne aktiven Kühlmittelstrom in einer Zeit von 55 Minuten entregt werden konnte. Dabei wurden alle Wärmeverluste von der Enthalpie des Spulenmaterials und des Heliums ohne Überschreiten der Übergangstemperatur absorbiert. Die Wicklungstemperatur war von 3,8 K auf 4,2 K gestiegen, die des Spulengehäuses auf 8 K. Damit hat die Spule gezeigt, daß ein möglicher Störpegel so gering ist, daß sie auch mit überkritischem ruhendem Helium stabil bleibt.



Temperaturverläufe am Eintritt und an den Austritten nach der Wiederherstellung des Kühlmittelstromes durch die Spule.

1.5 Zusammenfassung

Die Euratom-Spule konnte auch in den erweiterten Tests erfolgreich an ihren elektrischen Auslegungsgrenzen stabil betrieben werden. Die mechanischen Spannungen bei den einzelnen Lastfällen entsprachen den erwarteten Werten. Alle Verformungen waren reversibel. Die Spule ist auch ohne aktiven Kühlmittelfluß eine bestimmte Zeit stabil und läßt sich sicher entregnen. Die verwendete Technologie hat sich als voll tauglich und reif für die Anwendung bei großen Fusionsmagneten erwiesen. Die kontinuierlich gute Qualität des Leiters (7 km) und die sorgfältige Entwicklung und werkmännische Fertigung der Spule sind dabei ebenfalls bestätigt worden. Sie sind ein Verdienst der Industriepartner.

2. Die Erweiterung der TOSKA-Anlage für den Test von NET-Modellsulen

Unter Federführung von KfK werden zusammen mit den anderen EURATOM-Supraleitungslabors, im Rahmen von NET-Studien, mögliche Testkonfigurationen für NET-Modellsulen untersucht. Im Berichtsjahr wurde speziell eine vergleichende Detaillierung von "Cluster"- und Solenoidkonfiguration unter Verwendung der TOSKA-Anlage erarbeitet.

Es wurde eine rechnerische Optimierung beider Testkonfigurationen verbunden mit detaillierten Untersuchungen über die NET-Relevanz aller mechanischen und elektrischen Daten durchgeführt. Um die notwendigen Leiterlängen für die Modellsulen zu reduzieren, wurde deren minimaler Biegeradius von 1,2 m auf 1 m reduziert. Dies ergab für die

Clusterkonfiguration auch eine wesentliche Verbesserung der Installationsbedingungen, jetzt ohne aufwendige Änderungen am Vakuumbehälter.

Beide Konfigurationen erreichen die Feldstärken der NET-Spulen, allerdings bei einem höheren Strom von 22 kA, (NET-Strom: 16 kA). Nicht alle mechanischen Spannungen und Drücke der NET-Spulen können in den Modellspulen erreicht werden, wie Tabelle 1 zeigt. Zur Erhöhung des axialen Druckes sind daher zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Die Solenoidlösung ist technisch einfacher und besser handhabbar. Ein spezifischer Test des Leiters des zentralen Solenoids hinsichtlich seiner Pulseigenschaften ist in beiden Testeinrichtungen nicht möglich. Der Solenoid ist auf die volle Funktion aller drei entwickelten NET-Leiter angewiesen. Der Cluster besitzt in dieser Beziehung eine höhere Flexibilität und Redundanz. Die benutzten LCT-Spulen sind bei den im Cluster auftretenden hohen Schiefelastkräften noch nicht betrieben worden, was ein gewisses Risiko darstellt. Einen weiteren, wesentlichen Teil der Arbeiten bildeten die Ausarbeitung eines Testprogrammes, Kosten-, Termin- und Personalabschätzungen, sowie Erstellung von Kühlkonzepten mit Kälteleistungsabschätzungen.

In einer Bewertung mit dem NET-Team waren Eignung und technische Machbarkeit für beide Versionen unstrittig, die Höhe der erforderlichen Aufwendungen legte aber eine möglichst noch weitergehende Minimierung nahe. Eine Möglichkeit dazu bietet sich aufgrund der sehr guten Betriebseigenschaften der Euratom-LCT-Spule zusammen mit den Ergebnissen zur HeII-Zwangskühlung (Vorh. 03.03.07) an. Bei stark unterkühltem Betrieb dieser Spule (3,5 + 1,8 K) erscheinen Magnetfelder von 10,5 - 11 T mit dieser Spule allein machbar. Es wird deshalb nun noch eine "Twin Test" Anordnung studiert, die nur aus dieser LCT-Spule und den NET-Testwicklungen besteht.

Tabelle : Vergleich der NET-Werte mit den in der Solenoid- und Clusterkonfiguration erreichbaren Werten

	NET		Solenoid-Configuration S1			Cluster-Configuration C6	
	TF-Coil	OH-Coil	KfK-Coil	OH-Coil	Sultan-Coil	KfK-Coil	Sultan-Coil
Maximum Field [T]	11,4	11,5	12,27	11,62	11,54	12,1	12,0
Current [kA]	16	40	22	50	22	22	22
Axial Pressure [MPa]	140	100	66,4	57,9	66,5	27,4	26,3
Radial Pressure [MPa]	40	10	43,3	39,1	42,1	65,1	64,3
Hoop Stresses							
σ_{Hoop} [MPa]	140	200	209	222	185	310,7	309,9
τ_{max} [MPa]	30	30	19,3*	18*	20,7*	26,8	28,8

* For this calculation it was assumed that the pancake is supported by a rod at two areas and without a case.

3. Planung einer neuen He-Kälteanlage

Zur Erneuerung und zum Ausbau der Kälteversorgung für die Supraleitungsexperimente des ITP wird an der Planung einer leistungsstarken Heliumanlage gearbeitet. Als Basis dient in erster Linie die Spulenanordnung für NET-Leiter-Testwicklungen in der Versuchsanlage TOSKA-Upgrade. Die Vorplanung für eine vielseitig einsetzbare 3 kW-He-Tiefkühltemperaturanlage wurde durch Industriestudien europäischer Fachfirmen fortgesetzt und abgeschlossen.

Im Rahmen dieser Studien wurden verschiedene Verfahrensweisen untersucht. Die ausgewählten Vorschläge zielen auf einen Kälteprozeß mit 2 bis 3 Turbinenvorkühlstufen und einer Joule-Thomson-Turbine ab, wobei die Arbeitskreisläufe niederdruckseitig vom Turbinenkreis getrennt geführt werden. Das optimierte Verfahren wurde in detaillierten Fließschemata dargestellt, die neben der Coldbox das Kompressoraggregat mit He- und Ölrückkühlung, die Verteilerbox und den LHe-Tank enthalten. T-s-Diagramme, Schematas und Tabellen zeigen für die verschiedenen Betriebsweisen, wie Vollast und "Stand by", die thermodynamischen Daten und den elektrischen Leistungsbedarf, der im Mittel bei 1 MW liegt, was einen guten Wirkungsgrad erkennen läßt. Für das Prozeßleitsystem und die Elektroversorgung erfolgten gründliche Ausarbeitungen unter Einbeziehung von Geräten verschiedener Hersteller. Neben der direkten Rückkühlung des Schmier- und Kühlöls der He-Schraubenverdichter mit Luft wurden insbesondere aus Umweltschutzgründen auch Wasser-Glykol-Zwischenkreisläufe untersucht; dabei wurde auch die Wärmerückgewinnung betrachtet. Eine Komponentenbeschreibung ergänzt die Ausarbeitung.

Gebäudeentwürfe geben ein Bild vom Platzbedarf, der Anordnung der Maschinen und Apparate im Keller-, Erd-

und Obergeschoß und der Verbindung der Leitwarte zur vorhandenen TOSKA-Halle. Aufgeschlüsselte Kostenschätzungen für die 3 kW-Anlage ergeben einen guten Überblick über die erforderlichen Finanzmittel und zeigen auch die Kosten für eine Erhöhung oder eine Verminderung der Kälteleistung und andere Optionen auf. Ein Terminplan veranschaulicht, daß die gesamte Anlage innerhalb von 2½ Jahren betriebsfähig erstellt werden kann. Damit stellt die Vorplanung mit den Industriestudien eine gute Basis für den Bau der neuen He-Kälteanlage dar. Wie in Kap. 2 erwähnt, wird für den Test der NET-Modellspulen jetzt eine modifizierte Clusterkonfiguration (Twin-Test) als Alternative studiert. Dabei kann die erforderliche Kälteleistung auf etwa 2 kW reduziert werden. Diese kostengünstigere Ausführung wird nun näher untersucht, wobei neben der Kühlung mit 3,3 K auch eine 1,8 K-Variante einzubeziehen ist, um an der LCT-Spule ein möglichst hohes Feld zu erreichen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24459	03.03.02	<u>Dr. A. Ulbricht</u> (für 1.)
V 24645	03.03.02/35A	DI G. Zahn
V 24290	03.03.02/35B	Dr. W. Maurer
V24291	03.03.02/35C	DI G. Nöther
V24646	03.02.02/35D	Dr. S. Gauss
V25513	03.03.02/35E	DI G. Friesinger
	03.03.02/35F	DI W. Herz
	03.03.02/35G	
	03.03.02/35H	<u>DI G. Zahn</u> (für 2.)
	03.03.02/35I	Dr. W. Maurer
	03.03.02/35J	DI K. Jentzsch
	03.03.02/35K	L. Schappals
	03.03.02/35L	Dr. A. Ulbricht
	03.03.02/35M	DI W. Herz
	03.03.02/35N	
	03.03.02/35O	H-IT DI A. Grünhagen DI E. Lotz (bis 31.7.87)
	03.03.02/36A	<u>DI F. Spath</u> (für 3.) DI R. Heil A. Speier

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

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

Spannungsanalyse von Spulen-Systemen für das Projekt TOSKA-UPGRADE mit der FEM-Methode

Für das Projekt TOSKA-UPGRADE wurden zwei Spulen-Systeme (Solenoid- und Cluster-Konfiguration) einer Spannungsanalyse unterzogen. Die Solenoid-Lösung besteht aus zwei TF-Spulen (Toroidal-Feld) und einer OH-Spule (Ohmsche Heizung). Die Cluster-Lösung wird nur mit TF-Spulen aufgebaut und zwar in folgender Anordnung: EU-LCT-, KFK-, SULTAN- und CH-LCT-Spule. Für beide Konfigurationen wurden die Festigkeitsrechnungen mit der FEM-Methode durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analysen liefert eine Übersicht über die Spannungsverteilungen, die Deformationen und die Spannungsspitzen in den einzelnen Spulen. Die Ergebnisse wurden mit denen der NET-DN-Spulen verglichen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.03.02P33A	<u>A. Grünhagen</u>
	03.03.02P33B	

Vorhaben 03.03.05 Entwicklung von Poloidalfeldspulen

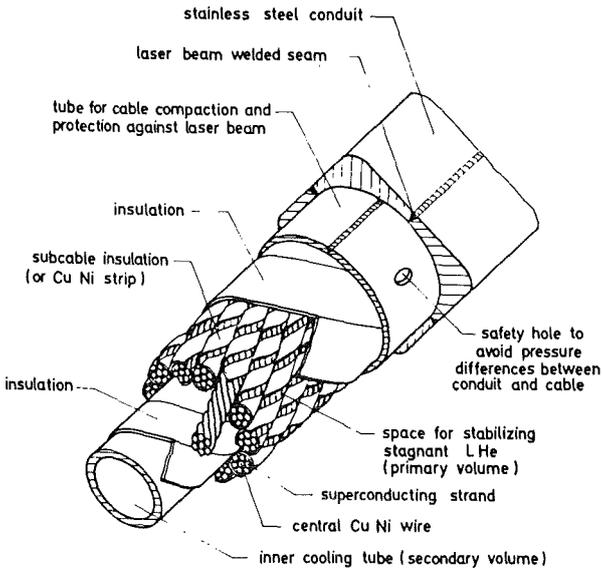
Institut für Technische Physik (ITP)

Die Arbeiten zielen auf die Entwicklung der supraleitenden PF-Spulen von NET ab. Der gegenwärtig wesentlichste Schritt ist die Entwicklung einer Modellspule mit 3 m Durchmesser und ihr Test in der TOSKA-Anlage. Dabei soll ein geeignetes Leiter- und Spulenkonzent auf NbTi-Supraleiterbasis verifiziert werden. Für die Prüfung der Zuverlässigkeit dieser Technologie unter realen Betriebsbedingungen eines Tokamaks, ist der Bau einer EF-Spule (8 m Durchmesser) für TORE SUPRA in Cadarache, zusammen mit dem CEA/Frankreich vorgesehen. Die Konstruktion dieser Spule aufgrund der Ergebnisse der Modellspulentwicklung ist im Gange.

1. Entwicklung der Modellspule

1.1 Fertigung des Leiters

Den Auftrag zur Fertigung des Leiters (Abb. 10) von 4 x 145 m Länge, erhielt die Vacuumschmelze Hanau. Er wird je zur Hälfte in zwei unterschiedlichen Ausführungen gefertigt.



Der konstruktive Aufbau des Leiters für die POLO-Modellspule.

Bei 2 Längen erhalten die Subkabel eine Umbändelung mit einem CuNi-Band und bei den beiden anderen Längen werden die Subkabel mit einer Glas/Kapton/Glas Isolation zur Erhöhung des transversalen Widerstandes umbündelt. Die Glas/Kapton/Glas Isolation ist als Prepreg verarbeitet. Durch Aushärten werden die Subkabel gegeneinander fixiert. Die Fertigung der Viertelprofile der Stahlhülle, in Längen bis zu 700 m, erwies sich insgesamt als technisch problemlos. Erheblicher Zeitverzug, verbunden mit hohem Finanzaufwand, wurde jedoch dadurch verursacht, daß lange Zeit die geeignete Maschine für den abschließenden Feinzug des Profils nicht zur Verfügung stand. Inzwischen konnte das Laserschweißverfahren in der Fertigungsstraße zur Herstellung von zwei U-Profilen von 120 m Länge aus Viertelprofilen erfolgreich demonstriert werden. Ebenso ist die Herstellung eines Rundkabelprototyps im Gange. Die Prototyplängen werden neben der Erprobung der Leiterfertigung als Teststücke für die Spulenfertigung (Wickerversuche, Test von Vorrichtungen) benötigt.

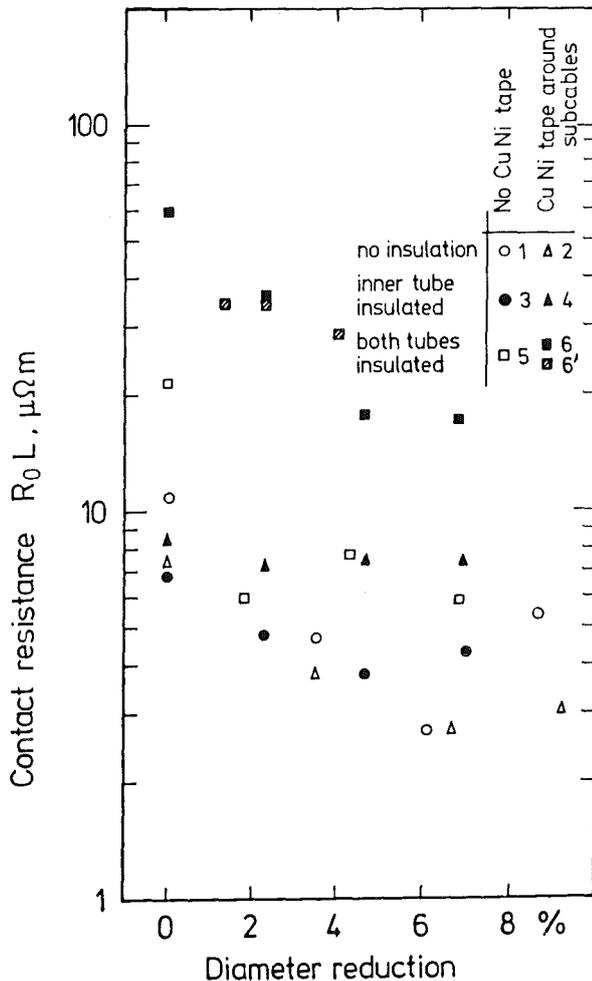
1.2 Labormessungen zur Absicherung des Leiterkonzepts

1.2.1 Elektrische Messungen

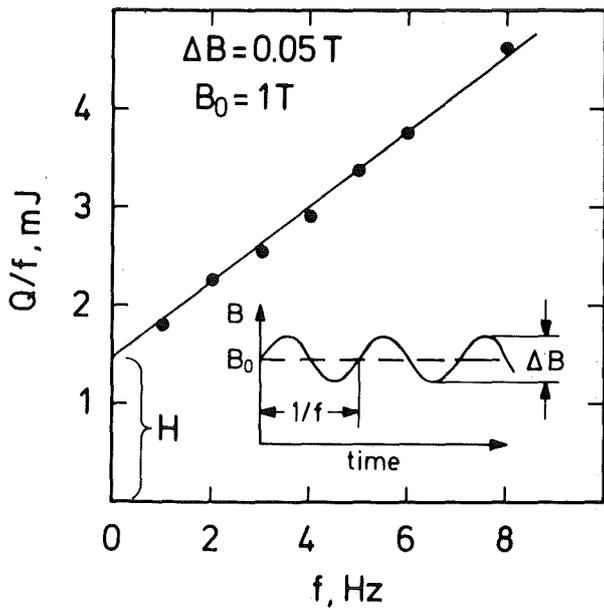
In einer Testserie mit verschiedenen Kompaktierungsgraden handgefertigter Kabelmuster wurde der transversale Widerstand zwischen den Subkabeln untersucht. Der unterschiedliche Kompaktierungsgrad konnte durch Dichtziehen des Außenrohres auf die Subkabel mit verschiedenen Durchmesserreduktionen erreicht werden. Den transversalen Widerstand zwischen gegenüberliegenden Subkabeln, gemessen durch eine Strom-Spannungsmessung im Heliumbad zeigt Abb. Aus den Messungen ist deutlich zu ersehen, daß sowohl die Kaptonisolationen des Innen- und Außenrohres als auch die Umbändelung der Subkabel mit einem CuNi-Band zur Erhöhung des transversalen

Widerstandes erheblich beitragen. Zusammen mit den Widerstandsmessungen wurden an einigen Proben auch Zeitkonstantenmessungen und AC-Verlustmessungen durchgeführt. Während die Zeitkonstantenmessung zu hohe Werte gegenüber einer einfachen Modellberechnung ergaben, stimmten die Verlustmessungen (Abb. 12) sehr gut mit den aus den Widerstandsmessungen berechneten Werten überein. Auch die Hysteresisverluste sind in guter Übereinstimmung mit den Erwartungen. Die Rechnungen zeigen, daß selbst bei nicht isolierten Subkabeln mit einem kleinen transversalen Widerstand von $R_0 \cdot L = 5 \mu\Omega m$ im Falle des spezifizierten schnellen Plasmaabbruchs die transient abzuführende Wärmelast (1.2 mJ/cm^2) kleiner als die maximal abführbare Wärmelast (2.0 mJ/cm^2) ist. Damit ist die auch das Kabelkonzept mit nicht isolierten Subkabeln geeignet, die Spezifikationen für einen Plasmaabbruch zu erfüllen, ohne die transient abführbare Wärmelast zu überschreiten.

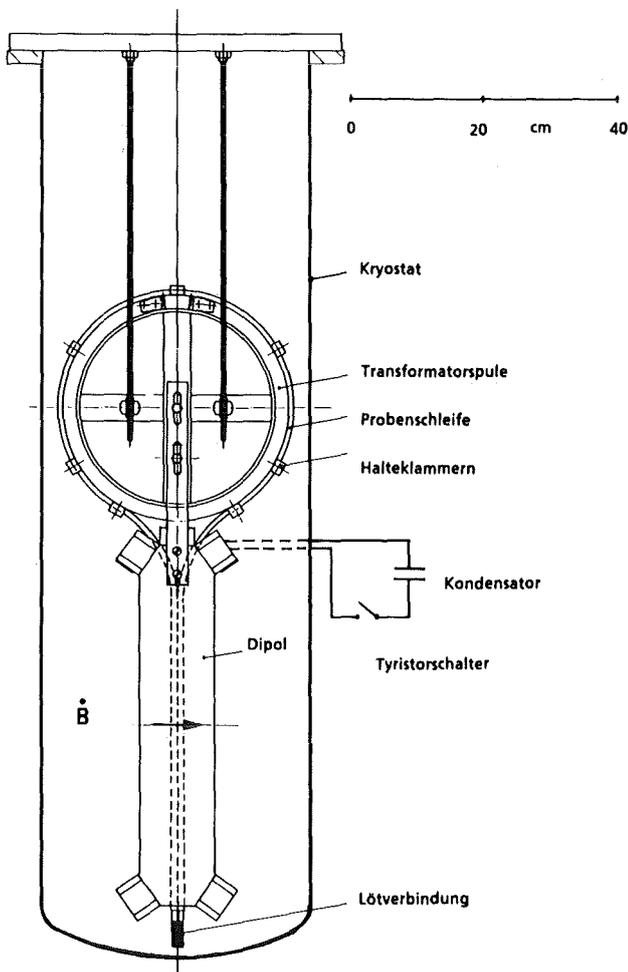
Untersuchungen der Stabilität der Supraleiterdrähte mit Mischmatrix (Cu/CuNi/NbTi) bei kurzen Feldspulen haben gezeigt, daß der transiente Wärmeübergang während des Pulses die Stabilität bestimmt. Die Experimente wurden für verschiedene Kühlungsarten durchgeführt (V25049). Zur Untersuchung der Stabilität eines vollständigen Kabels ist



Transversaler Widerstand als Funktion der Kompaktierung des Kabels für verschiedene Ausführungen mit nicht isolierten Subkabeln.



Gemessene AC-Verluste pro Zyklus in einem Probekabel (Nr. 3), 7% Durchmesserreduktion.



Experimentierkryostat mit Kabelleiterschleife und Pulsdipol zur Untersuchung der Stabilität.

eine Apparatur aufgebaut worden, bei der der Leiter in einem Pulsfeld gemessen werden kann. Der Leiterstrom wird induktiv in die Leiterschleife eingekoppelt. Die Apparatur ist betriebsbereit, erste Messungen des kritischen Stromes des Kabels sind im Gange.

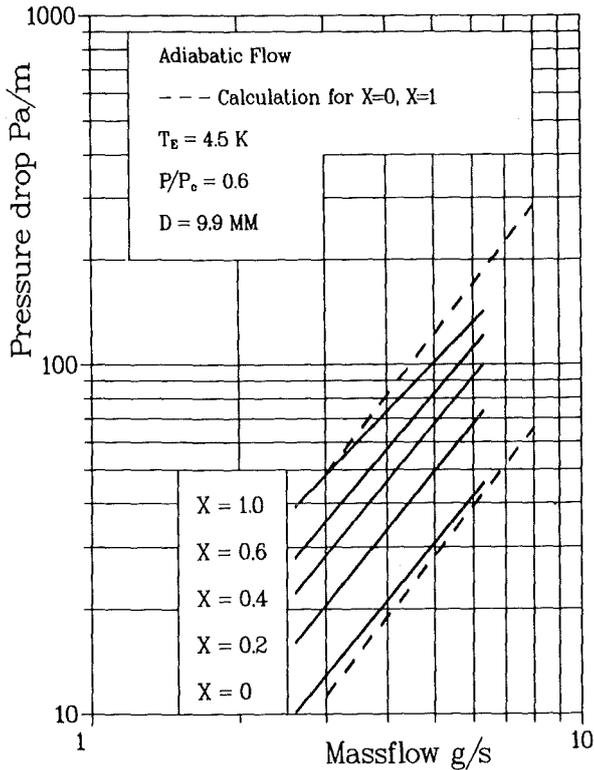
1.2.2 Thermohydraulische Messungen

Die thermohydraulischen Untersuchungen zur Zweiphasenströmung wurden fortgesetzt. Durch Einbau einer Sichtstrecke konnte gemeinsam mit Mitarbeitern der CEA Saclay für verschiedene Parameter die Strömung beobachtet und photographisch registriert werden (Abb. 14). Unter aufgeprägten Wärmelasten wurden die Wandtemperaturen am Rohrfang gemessen und mit einer kapazitiven Meßmethode das Verhältnis zwischen Dampf- und Flüssigkeitsanteil bestimmt. Die Aufrechterhaltung der Zweiphasenströmung aufgrund einer Druckdifferenz zwischen zwei Behältern erwies sich als sehr instabil. Stabilere Betriebsbedingungen konnten dann mit einer vorhandenen He-Pumpe erreicht werden. Dieser Betriebsmode wird nun sowohl beim Test der Modellschleife als auch für die TORE SUPRA Spule angewendet werden. Als Pumpe wird eine schon früher bei CERN entwickelte Heliumpumpe verwendet werden für die gute Betriebserfahrungen vorliegen.



Photographische Aufnahme einer 2 Phasenströmung; oben: He Dampf; unten: Flüssig-Helium.

Der gemessene Druckabfall der Zweiphasenströmung für verschiedene Dampfgehalte ist in guter Übereinstimmung mit den theoretisch erwarteten Werten (Abb. 15). Das Experiment hat bestätigt, daß ein Kühlsystem mit einer Zweiphasenströmung sich auch unter den hier auftretenden Wärmelasten stabil betreiben läßt. Das Experiment ist damit abgeschlossen.



Vergleich des gemessenen und berechneten Druckabfalls einer 2-Phasenströmung als Funktion des Massenstromes mit dem Dampfgehalt als Parameter.

1.3 Modellspulenbau

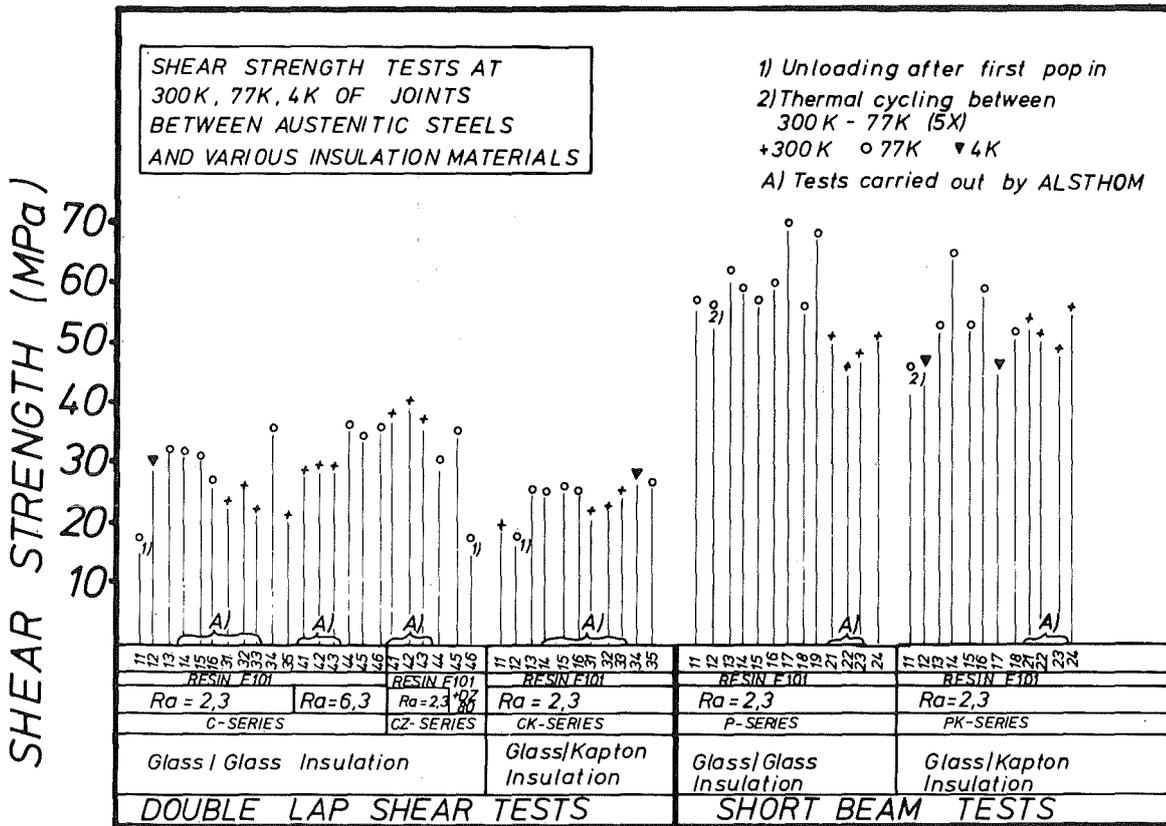
Die Modellspule befindet sich in der Phase der Konstruktion beim Auftragnehmer (Alsthom-Atlantique), mit begleitenden material- und fertigungstechnischen Untersuchungen zur Absicherung des Konzepts im KfK.

1.3.1 Elektrische und mechanische Materialuntersuchungen zur Absicherung der Konstruktion

Die Modellspule ist eine selbsttragende Stützstruktur ohne zusätzliche metallische Konstruktion. Das Isolationsmaterial muß neben der elektrischen Durchschlags- und Teilentladungsfestigkeit auch die notwendige mechanische Festigkeit haben. Die Abstützung der Spule an drei Punkten und später bei der TORE SUPRA Spule an sechs Punkten, bringt im Betrieb eine gewisse Durchbiegung und Verdrehung der freien Spulenabschnitte zwischen den Stützen mit sich. Dies führt zwangsläufig zu relativ hohen Scherspannungen zwischen den einzelnen Windungen. Die errechnete Gesamtscherspannung im Betriebsfall beträgt ca. 11 MPa. Diese Scherspannung muß demnach weit unterhalb der Versagensgrenze, also der Scherfestigkeit des Isolationsmaterials, liegen. Es wurde deshalb ein Testprogramm für die Bestimmung der Scherfestigkeiten verschiedener Isolationsmaterialien definiert. Da die Scherfestigkeit nach verschiedenen Methoden gemessen werden kann und sich je nach der Methode unterschiedliche Scherfestigkeitswerte

ergeben, wurden vorab die verschiedenen Testmethoden - der Kurzbiegeversuch nach der Norm LN 29971 und der Zugscherversuch nach DIN 53 283 - in ihrer Aussagefähigkeit bewertet. Die Bewertung ergab, daß der einseitig überlappte Zugscherversuch eine zu vereinfachte Meßmethode darstellt (zusätzliche Biegespannungen in der überlappten Zone). Sie ergibt darüberhinaus einen zu kleinen Absolutwert, da an den Randzonen unter Last 2- bis 3-fach höhere Scherspannungswerte auftreten. Um das Problem der Biegespannung in der Probe zu vermeiden, wurde die beidseitig überlappte Scherzugprobe gewählt, was zu einer Aufrechterhaltung der Symmetrie bzw. Unidirektionalität der Krafteinleitung führte. Die Proben wurden bei der Fa. Alsthom mit den Materialien und Fertigungsschritten ähnlich denen für die Spulenisolierung gefertigt. Untersucht wurden zwei Arten von Isolationsystemen, der vakuumimprägnierte Verbund Glasfaserband/Glasfaserband - Epoxydharz und der Verbund Glasfaserband/Kaptonband/Glasfaserband - Epoxydharz. Die Flächen der metallischen Proben (Edelstahl Typ 1.4301) wurden vorab sandgestrahlt. Die Messungen wurden unabhängig voneinander bei der Fa. Alsthom (RT und 77 K) und bei der KfK (RT, 77 K und 4 K) durchgeführt. Abb. zeigt die Versuchsergebnisse. Die Ergebnisse zeigen, daß sich eine Rauigkeit von 6,3 µm als günstig erweist. Die chemische Vorbehandlung mit dem Primer DZ-80 zeigt keinen signifikanten Unterschied gegenüber den unbehandelten Proben. Das Glasfaserband/Glasfaserband Isolationsystem ergibt höhere Scherzugfestigkeitswerte gegenüber dem Glasfaserband/Kapton/Glasfaserband System. Bei kryogenen Temperaturen beträgt die Scherzugfestigkeit bei Verwendung der Zugscherprobe ca. 30 MPa. FEM Berechnungen für den Kurzbiegeversuch zeigten, daß die Scherspannung entlang der Probenmitte ohne Spannungsspitzen einen relativ gleichmäßigen Verlauf besitzt. Die Messungen ergaben einen Wert von ca. 50 MPa für das Glasfaserband/Glasfaserband System und ca. 45 MPa für das Glasfaserband/Kapton/Glasfaserband System bei 4 K. Damit kann bei einem errechneten Scherspannungswert von ~ 11 MPa im Spulenbetrieb eine Sicherheitsmarge von ca. 4 - 5 erreicht werden, was als vernünftig angesehen wird.

Zur Untersuchung des elektrischen Isolationsverhaltens der zur Auswahl stehenden beiden Systeme wurde die Ausrüstung des Hochspannungslabors erweitert und zwei Testkryostaten, ein Verdampfer- und ein Badkryostat in Betrieb genommen. Teilentladungsmessungen an der Leiterisolierung ergaben, daß beide Systeme bei Nennspannung 5.7 kV praktisch teilentladungsfrei sind. Nach 10^7 Spannungsimpulsen ist deutlich eine Reduktion der Teilentladungseinsatzspannung bei der GFK/Kapton Isolierung zu sehen. Dies ist wesentlich geringer bei der GFK-Isolierung. Die Durchschlagspannung der Proben lag bei 13 - 16 kV und damit ca. 3 mal höher als die Nennspannung. Die Proben für die Untersuchung der elektrischen Isolation und die Kurzbiegeproben haben die gleiche geometrische Anordnung. Die Außenisolierung der Wicklung mit 7 Lagen Kapton/Glas zeigt hingegen einen frühen Einsatz der Teilentladung weit unterhalb 23 kV. Dieses Problem wird noch näher untersucht.



Scherspannungsmessungen an dem Isolationssystem Glasband/Glasband nach Glasband/Kapton/Glasband für zwei Probenarten (Zugscher, Kurzbiege) und 3 Temperaturen.

1.3.2 Komponentenentwicklung

Axiale und radiale Potentialtrenner für 23 kV Nennspannung sind Basiskomponenten in der Modellspule. Es wurden mehrere Prototypen entwickelt, berechnet und gebaut. Die elektrostatische Berechnung und Optimierung nach Gesichtspunkten vereinfachter Bauformen konnten gemeinsam mit dem Hochspannungsinstitut der Universität Karlsruhe durchgeführt werden. Das berechnete Äquipotentiallinienbild eines radialen Potentialtrenners zeigt Abb. 17. Im elektrischen Test bis 46 kV und zum Test von thermohydraulischen Eigenschaften (Druckzyklen bis 2,5 MPa bei 29,0, 77 und 4 K; Dichtigkeit) sind Testeinrichtungen konstruiert und gebaut worden.

1.3.3 Status der Modellspule

Gemeinsam mit der Firma Alsthom wurde am Entwurf der Modellspule weitergearbeitet. Besonderes Augenmerk wurde der Vergießtechnik, der Vergußkokille, der Verbindungszone, dem Isolationssystem, den Hochspannungstrennern, der Leiterstützstruktur, den Leiterverbindungen und -endverschlüssen sowie dem Kurzschlußring gewidmet. Für alle Komponenten und die Fertigungstechnik gibt es jetzt Firmenentwürfe. Für den Anstieg des Quenchdrucks im Leiter wurden von der Fa. Alsthom erste Rechnungen

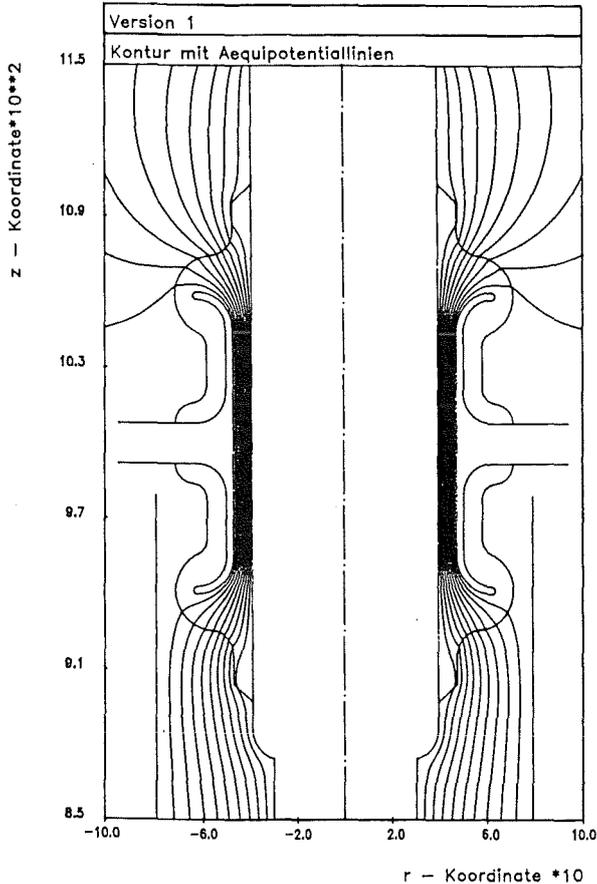
vorgelegt. Sie zeigen, daß die maximalen Drücke in der Spule, selbst nach einer 6-mal größeren Zeit als der zwischen Detektion der normalleitenden Zone bis zum Abschluß der Sicherheitsentladung vorgesehen (3 s statt 500 ms), 30 bar bei 15 kA Strom nicht überschreiten. Durch die Kompressibilität des He bleibt der Druck weit unter dem adiabatischen Wert von 120 bar, der der Auslegung zugrunde gelegt wurde. An Flanschverbindungen zwischen den Leiterenden und den Verbindungselementen wurden erfolgreich Schweißversuche durchgeführt um sicherzustellen, daß das Schweißen am Leiter die innenliegende Isolation nicht beschädigt.

2. Umbauten und Ergänzungen der Spulentesteinrichtung TOSKA für die POLO-Tests

Die Inbetriebnahme der Schaltanlage zum Test der Modellspule mit maximal 23 kV und 30 kA konnte wegen des erheblichen Aufwandes noch nicht abgeschlossen werden.

Die mechanische Stützstruktur zur Aufnahme der Modellspule in der Vakuumkammer der TOSKA-Anlage wurde entworfen. Dazu wurde das Schwingungsverhalten der Spule unter transienter Last berechnet. Eine Spulendurchbiegung von 14 mm wird eine Scherspannung von 11 MPa verursachen.

Umfangreiche Arbeiten zur Datenerfassung der elektrischen, thermohydraulischen und mechanischen Daten wurden gemeinsam mit HDI durchgeführt. Schwerpunkte waren dabei die Komponentenentwicklung für die Meßgrößen auf Hochspannungspotential und die



Berechnete Äquipotentiallinien eines radialen Potentialtrenners für die Stromdurchführungen der Modellschule.

Erarbeitung eines Konzeptes der "Software" der Datenerfassung und ihrer Auswertung auf einem VAX-Rechner. Blockdiagramme zur Erfassung der unterschiedlichen Zeitfenster während des Entladevorgangs in den geplanten Betriebsmoden (Wechselrichterbetrieb, Sicherheitsentladung, Hochspannungsentladung, Teilspulentladung und Betrieb mit und ohne transiente elektro-mechanische Last) wurden erarbeitet.

4. Tore Supra Spule

Für die Tore Supra Spule wurden Entwürfe erstellt für

- die Spulwicklung einschließlich der Verbindungszone mit den LHe Versorgungsleitungen, den Doppelscheibenverbindungen und Potentialtrennern
- den Leiterendverschlüssen in einer senkrechten Anschlußkammer des Vakuumgefäßes
- das Vakuumgefäß einschließlich der Spulbefestigung am Eisenjoch und Isolierstrecken zur Verminderung der Wirbelströme.

Wirbelstromberechnungen für das Vakuumgefäß wurden an der Universität Graz durchgeführt. Für die Spule ist von der CEA Grenoble eine gasgekühlte Stromzuführung für 12 kA Nennstrom entwickelt worden. Der stromtragende Leiter ist in zwei Varianten mit konstantem und variablem Querschnitt ausgeführt. Im KfK/ITP, das über ein entsprechendes Hochstromnetzgerät verfügt, wurde ein geeigneter Testkryostat bereitgestellt und zusammen mit Mitarbeitern der CEA Grenoble konnten Tests bis 15 kA im Dezember erfolgreich abgeschlossen werden. Die Auswertungen sind im Gange. Die Kostenabschätzungen führten zu dem Ergebnis, daß eine Realisierung mit den vorgegebenen Spezifikationen nicht möglich ist. Eine Revision des Entwurfs unter Nutzung gewonnener Erkenntnisse (vereinfachtes inneres Isolationssystem des Leiters, vergl. 1.2.1) und Änderungen der Spezifikationen, sind im Gange.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V24381	03.03.05/01 A	H. Bayer
V25049	03.03.05/02 A	F. Beckenbach
	03.03.05/02 B	P. Duelli
	03.03.05/02 C	DI S. Förster
	03.03.05/02 D	DI G. Friesinger
	03.03.05/02 E	Y. Han
	03.03.05/02 F	T. Hardy
	03.03.05/02 G	<u>Dr. U. Jeske</u>
	03.03.05/02 H	DI H. Katheder
	03.03.05/02 I	DI J. Lühning (bis 30.6.87)
	03.03.05/02 J	B. Mertens
	03.03.05/03 A	DI G. Nöther
	03.03.05/03 B	Dr. A. Nyilas
	03.03.05/03 C	H.P. Raber
		L. Schappals
		Dr. G. Schenk
		Dr. C. Schmidt
		K. Schweikert
		DI L. Siewerd
E. Specht		
H.J. Spiegel		
DI M. Süßer		
Dr. G. Tateishi (seit 15.10.87)		
Dr. A. Ulbricht		
A. Vogt		
R. Wagner (bis 31.8.87)		
D. Weigert		
DI F. Wüchner		
V. Zwecker (seit 1.10.87)		
HDI:		
DI K. Rietzschel		
DI W. Heep		
KTB:		
DI M. Oehmann		
J. Seibert		

Vorhaben
03.03.06 Materialentwicklung und Testmagnete

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Thermische und mechanische Tieftemperaturuntersuchungen an Faserverbunden

Für den Einsatz von polymeren Faserverbunden in der Fusionstechnologie sind strahlungsresistente Polymermatrizen erforderlich. Besonders hohe Stabilität gegen radioaktive Bestrahlung zeigen Polyimide. Glas- und Kohlefaserverbunde mit thermoplastischer und duroplastischer Polyimid-Matrix wurden bei He-Temperatur getestet.

Hervorzuheben ist die besonders hohe interlaminaire Scherfestigkeit, die bei tiefen Temperaturen zwischen 150 und 170 MPa liegt (üblicher Verbund ca. 120 MPa). Dies läßt auf eine besonders starke Faser-Matrix-Bindung schließen.

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

Institut für Technische Physik (ITP)

Bei der Entwicklung großer Fusionsmagnete stehen unabhängig von Typ und Geometrie verschiedene technologische Entwicklungen im Vordergrund. Dies sowohl auf dem Gebiet der Materialien, speziell dem Supraleiter und den Tieftemperaturstrukturmaterialien, als auch beim Bau von supraleitenden Hochfeldmagneten. Die Untersuchungen von Prototypenleitern in kurzen Stücken und als Probewicklungen werden in zwei Einrichtungen durchgeführt, dem Hochfeldteststand (100 kN, 10 kA, 13 T) und der Hochfeld-Magneteinrichtung HOMER. Für Strukturmaterialuntersuchungen bei tiefen Temperaturen steht eine 200 kN-Zugmaschine zur Verfügung.

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten ist Bestandteil von EURATOM-Programmvorhaben für die Entwicklung der NET-Spulen. Die Ziele dabei sind die Entwicklung eines A15-TF-Spulenleiters und die Charakterisierung der Strukturwerkstoffe.

1. Hochfeldleiterentwicklung

Die verschiedenen Aufgabenstellungen haben dazu geführt, daß die klassische Bronze-Technik zur Herstellung von Nb₃Sn-Vielkernleitern durch neue Methoden ergänzt wurde. Das Arbeitsprogramm enthält deshalb auch Beiträge zu solchen Herstellungsmethoden, wie Internes Sn-Diffusionsverfahren und pulvermetallurgische Verbundkernmethode.

Ergänzend zu diesen Untersuchungen an einzelnen Drähten wurden verschiedene Modelleiter für die NET-TF-Spulen im reduzierten Maßstab industriell hergestellt. Die dabei gemachten Erfahrungen gehen direkt in die fertigungstechnische Entwicklung des 1:1 Prototypleiters für die NET-TF-Spulen ein.

1.1 Labortechnische Voraussetzungen

Beim Bau des Hochfeldleiterteststandes (100 kN/10kA bei 13 T) für NET-TF-Leiter im reduzierten Maßstab ist ein entscheidender Fortschritt erzielt worden. Die modifizierten Spannbacken konnten ohne ersichtliche Gleitbewegungen bis 115 kN belastet werden. Die 10 kA-Stromzuführungen wurden angeschlossen, ein kombinierter Kraft/Strom-Test steht unmittelbar bevor. Im NET Fusionsspulenverband wirken starke transversale Druckkräfte auf die supraleitenden Drähte. Um den Effekt dieser Druckspannungen σ_t auf die kritische Stromdichte von Nb₃Sn-Drähten zu messen, wurden zwei neuartige Vorrichtungen gebaut (V24126) und erfolgreich getestet. Die erste ist für den Betrieb bis 13.5 T im Hochfeldleiterteststand, während die zweite in die normaleitenden 20 T-Spule des Hochfeldlabors in Grenoble eingesetzt werden kann. Bei beiden Apparaturen werden variable Druckspannungen σ_t transversal auf die flache Seite eines rechteckig verformten Drahtes angelegt. Dabei ist σ_t senkrecht zur Stromrichtung und parallel zum Magnetfeld. Die Druckspannung wird außerhalb des Kryostaten durch ein Schraubensystem erzeugt und wird über ein Gestänge und eine Druckmeßdose auf die Probe übertragen. Die oberen Grenzen für I und σ_t betragen zur Zeit 200 A und 200 MPa.

1.2 Optimierung von I_c in supraleitenden Drähten

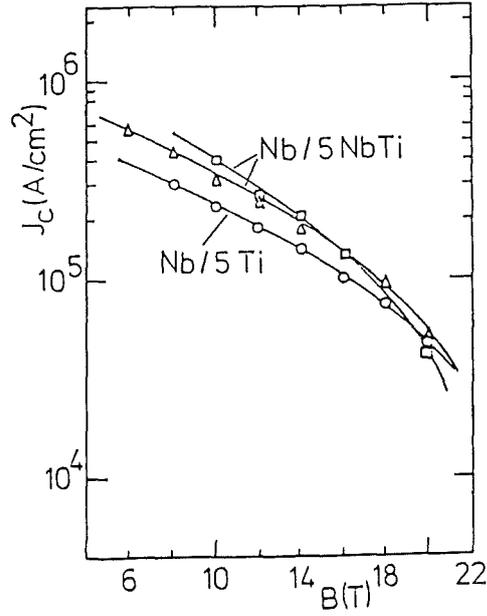
Die Entwicklung von supraleitenden Drähten konzentriert sich sowohl auf mittlere Felder (10 - 12 Tesla) als auf höchste Felder ($B > 18$ Tesla).

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

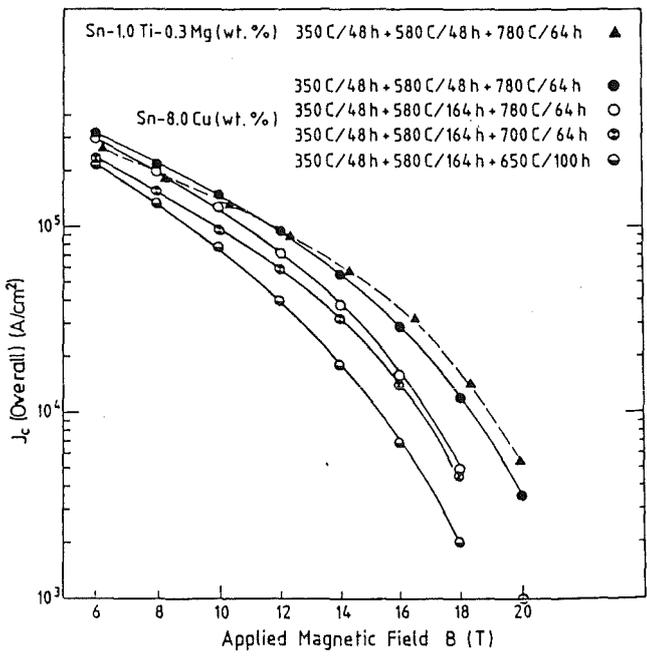
Die pulvermetallurgische Nb/Ta-Verbundkernmethode (V24121) zur Herstellung von Nb₃Sn-Drähten wurden weiter entwickelt und auf Nb/NbTi-Verbundkerne erweitert. Diese Drähte erreichen bei 10 - 12 T ebenfalls wesentlich höhere Stromdichten als Bronzedrähte ($j_c > 4 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$ in der A15-Schicht). An solchen Drähten wurde nun eine Vorkompression $\epsilon_m \approx 0.5\%$ beobachtet, während sie normalerweise nur $\sim 0.3\%$ beträgt. Diese Erhöhung ist darauf zurückzuführen, daß die Ta-"Wände" beim Abkühlen von 1000 K bei der Reaktionsglühung auf 4.2 K weniger kontrahieren und damit einen zusätzlichen Druck von innen ausüben. Weitere Untersuchungen werden nun durchgeführt um herauszufinden, ob dieser Effekt zu einer erhöhten Belastbarkeit von Nb₃Sn-Drähten ausgenutzt werden könnte.

Eine weitere Möglichkeit, j_c in Nb₃Sn-Drähten bei 10 - 12 T zu erhöhen, besteht in deren Herstellung nach dem Internen Sn-Diffusionsverfahren, das bislang in Europa noch nicht

angewandt wurde. Bei diesem Verfahren werden die duktilen Komponenten Cu, Nb und Sn zu Draht verformt, was ohne zeitraubende Erholungsglühungen möglich ist. Erstmals ist es nun gelungen, den industriell wichtigen Schritt des kaltisostatischen Strangpressens erfolgreich durchzuführen und die Strangpreßparameter zu definieren. Die verformten Querschnitte betragen 60 mm, womit bereits Rückschlüsse auf industrielle Querschnitte (~ 140 mm) möglich sind. An solchen Drähten mit Ti + Mg-Zusätzen zum Sn-Kern wurden $j_c = 1.5 \cdot 10^5$ A/cm² gemessen bezogen auf den Querschnitt ohne Cu, also nahe an den bisher höchsten bekannten Werten. Die Untersuchungen an diesen Drähten erstreckten sich auch auf die Elementarverteilung in den Filamenten mittels Auger- und EDX-Spektrometrie.



Kritische Stromdichten (A15-Schicht) für verschiedene Verbundkerndrähte: o Nb/5 Ti (700°C/64 h), Δ Nb/5 NbTi (700°C/64 h), □ Nb/5 NbTi (650°C/136 h).



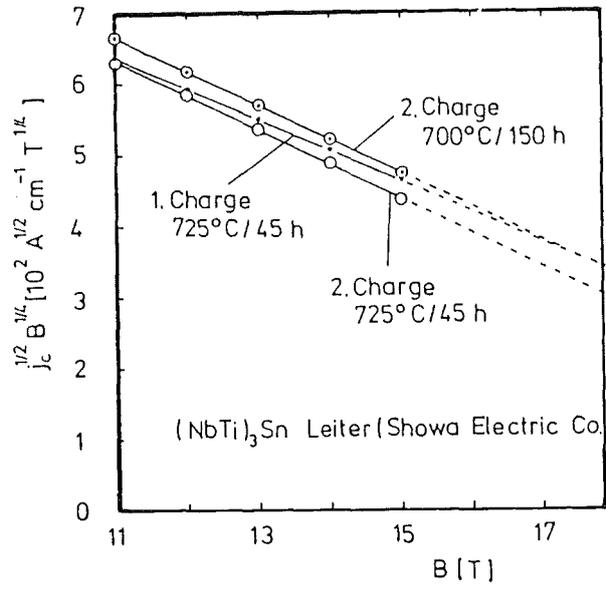
Kritische Stromdichten (ohne Cu) in Nb₃Sn-Drähten mit 588 Filamenten nach dem Internen Sn-Diffusionsverfahren mit und ohne Zusätze zum Sn-Kern.

1.2.2 Leiter für den Höchstfeldbereich (B > 18 T)

Durch die Anwendung von Nb/NbTi Verbundkernen beim Bronzeverfahren in hohen Feldern gelang es, die Stromdichten zu erhöhen. Wie Abb. zeigt, beträgt der höchste Wert bei 20 T $j_c = 5.3 \times 10^4$ A/cm², d.h. er liegt etwa einen Faktor 2 höher als beim üblichen Bronzeverfahren (V24121).

Im Hinblick auf die Herstellung von Höchstfeldspulen waren die Untersuchungen im Berichtsjahr auch darauf ausgerichtet, kommerziellen Ta- und Ti-zulegierte Nb₃Sn-Drähten an den Grenzen ihrer Stromtragfähigkeit kennenzulernen, um beim technischen Einsatz alle Möglichkeiten voll auszuschöpfen. Dabei wurden erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen festgestellt. Zwei (Nb,Ti)₃Sn-Chargen mit nominell gleicher Zusammensetzung wiesen nach derselben Glühbehandlung (725°C, 45

h) Unterschiede in der Stromdichte von 14% auf. Erst nach Änderung der Glühbehandlung auf 700°C/150 h bei der Charge mit niedrigerem j_c konnten die Stromdichten beider Drähte bei 15 T einander angeglichen werden. In



Die Meßwerte der kritischen Stromdichte in Abhängigkeit vom Magnetfeld in der Normierung nach Kramer für zwei nominell gleiche (NbTi)₃Sn-Leiter aber aus verschiedenen Chargen mit gleicher und neu abgestimmter Glühbehandlung.

der Darstellung der Meßwerte zeigte sich, daß eine niedrige Glüh Temperatur und lange Glühzeiten die Stromdichten im ganzen Feldbereich begünstigen. Der größte Anstieg wurde erwartungsgemäß bei niedrigen Feldern beobachtet, war aber bei 20 T immer noch groß genug, um mit einer Einsatz-

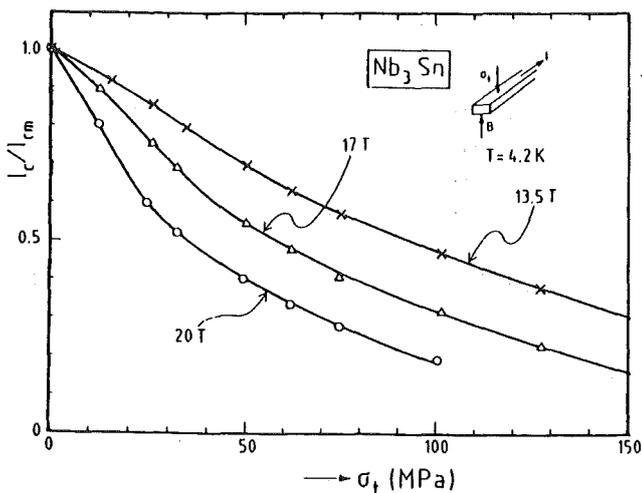
Spule aus diesem Draht im HOMER-Magneten 20.1 T bei 1.8 K zu erreichen, das höchste je mit rein supraleitenden Spulen erreichte Feld.

Andere Parameter von Nb₃Sn-Drähten, wie der resistive Übergang in die Normalleitung, der allgemein mit einem Potenzgesetz beschrieben wird, hängen vom inneren Aufbau des Drahtes ab und damit praktisch vom Hersteller, der nur bestimmte Konfigurationen in seinem Fabrikationsprogramm hat. Bei den Untersuchungen ergab sich, daß dieser Übergang in die Normalleitung auch von der Kraftbelastung am Draht beeinflusst wird, wobei zunächst ein verbreiteter Übergangsbereich auftritt. Nach mehreren Lastwechseln und damit einer gewissen Materialverfestigung wurde aber die alte Übergangsbreite wieder erreicht.

1.3 Einfluß von transversalen Druckspannungen auf J_c

Der Einfluß transversaler Druckkräfte auf j_c von binären Nb₃Sn-Drähten wurde erstmals untersucht (V24126). Die Abhängigkeit des kritischen Stroms von der transversalen Druckspannung σ_t ist für verschiedene Magnetfeldstärken dargestellt.

Werden die Druckspannungen auf die Filamente in einer NET-TF Spule mit ca. 100 MPa angenommen, so ist nach Abb. 21 bei 13.5 T eine Abnahme des kritischen Stromes um 50% zu erwarten, bei 12 T etwa um 40%. Die Abnahme von I_c/I_{c0} mit dem Absolutwert der mechanischen Spannung ist also bei transversalen Druckkräften wesentlich höher als bei axialen Zugkräften, wo 100 MPa gerade einen 10%-Effekt bewirken würden. Daraus ergibt sich, daß TF-Fusionsleiterkonzepte so ausgelegt werden müssen, daß die transversalen Druckkräfte minimal werden.



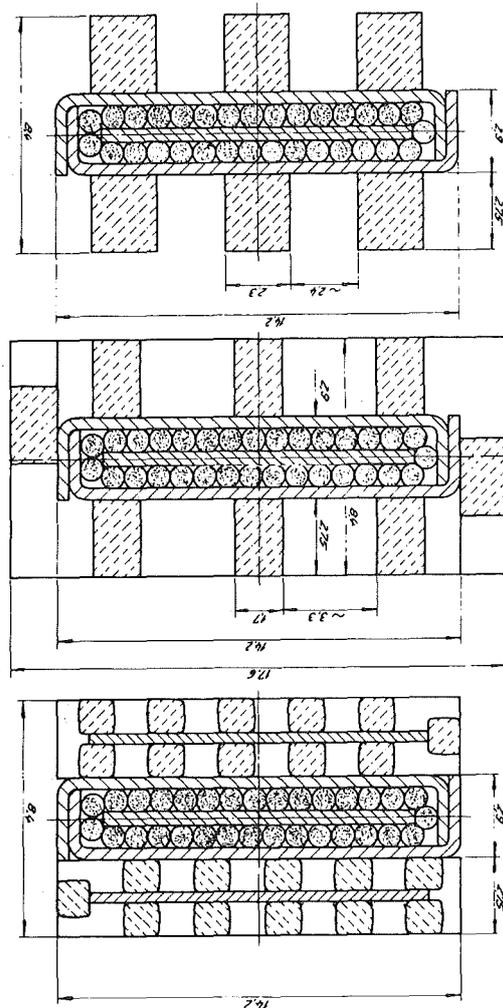
Normierter kritischer Strom I_c/I_{c0} als Funktion der transversalen Druckspannung in einem binären Nb₃Sn-Draht bei 13.5, 17 und 20 T.

1.4 Entwicklung von NET-TF-Spulenleitern

Drei Versionen des NET-TF-Spulenleiters im reduzierten Maßstab wurden in kurzen Musterlängen industriell gefertigt. Die Fertigungsparameter wurden

dabei definiert und deren Übertragbarkeit auf die spätere Fertigung des 1:1-NET-Leiters überprüft. Die industrielle Verlötlingsapparatur für die Verbindung des Nb₃Sn-Flachseils mit den beiden Cu-Ni-Profilen wurde aufgestellt. Die geröbелten Cu-Stabilisierungseinheiten im Maßstab 1:1 wurden ebenfalls in 2.6 m-Längen industriell gefertigt. Die Kurzschlüsse der einzelnen Cu-Profile an den Seitenkanten (die bei der KfK/LCT-Spule auftraten) konnten durch geschickte Wahl der Roebelparameter, des Aspektverhältnisses der Cu-Profile, der Schlaglänge und der Anzahl Cu-Profile vermieden werden.

Für die Nb₃Sn-Seilherstellung wurde die erste Reaktionsglühung auf einer Glühtrommel mit 1200 mm Durchmesser durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, daß die Glühung des Seils im



NET-Modelleiter im reduzierten Maßstab, bestehend aus einem Kern (Nb₃Sn Flachkabel, in CuNi-Profilen einngelötet), umgeben von einer Kupferstabilisierungsstruktur.

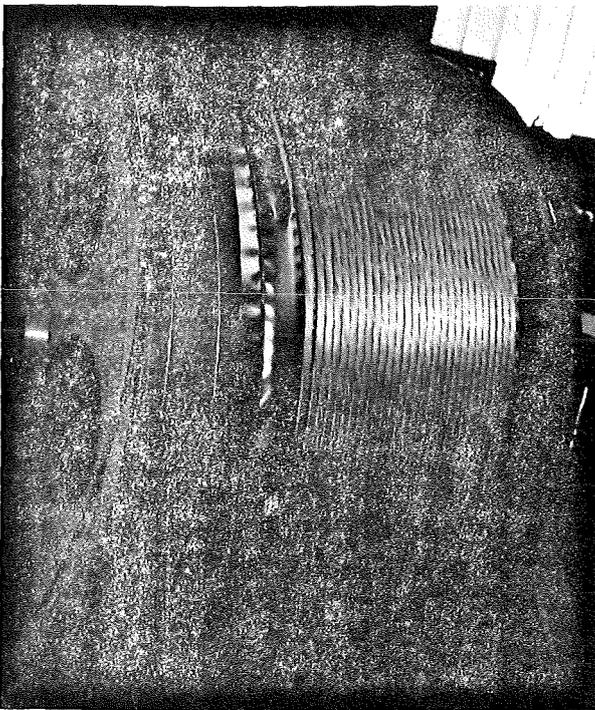
- a) Cu-Profile um Kern geröbелt, b) geröbелte Kupferprofile auf die Flächen des Kerns aufgelötet
- c) Cu-Profile parallel zum Kern aufgelötet. Die äußere Stahlhülle wurde zunächst weggelassen.

industriellen Maßstab weitere Verbesserungen der Seilführung auf der Glühtrömmel und eine bessere Anpassung der Seil/Kern-Parameter erfordert.

Zwei Handmuster des 1:1-NET-Leiters wurden im ITP selbst gefertigt. Trotz Handfertigung konnte gezeigt werden, daß die Fertigungstoleranzen beherrscht werden können. Die Laserschweißung der Stahlhülle mit Hilfe einer speziell zu diesem Zwecke gefertigten Schweißvorrichtung ist vorbereitet.

2. Kraftbelastung und Training in Höchstfeldspulen

Die Testeinrichtung HOMER hat in allen Ausbaustufen bis zu 20.1 T das Magnetfeld ohne vorzeitigen Normalübergang, d.h. Trainingsschritt, erreicht. Wie sich schon bei anderen Magnetsystemen gezeigt hatte, sind Solenoidstrukturen mit



Teilansicht der 1200 mm ϕ Glühtrömmel mit 1-lagig aufgewickelm Nb₃Sn-Flachseil.

sorgfältigem mechanischem Wicklungsaufbau trainingsicher, da z.B. am Ort hoher axialer Kräfte, d.h. in der Mittelebene, die Windungen homogen gepackt sind.

An "split-coil"-Spulensystemen hingegen, bei denen am Ort höchster Belastung Inhomogenitäten in der Packungsdichte durch Übergänge des Leiters von Lage zu Lage vorhanden sind und die nicht kryogen stabil betrieben werden, sind deutlich Grenzen in der axialen Belastung beobachtet worden. So setzte an Modellwicklungen das Training bei 20 MPa axialem Druck ein und der maximal erreichbare Druck lag bei 30 MPa, unabhängig von den Kühlbedingungen. Bei reinen Solenoidspulen wurden unter ähnlichen Randbedingungen von Stromdichte und Kühlung schon

axiale Drücke von 55 MPa realisiert. Das Resultat besagt, daß unter Bedingungen hoher Stromdichte schon kleinste Bewegungen im μm -Bereich irreversible Normalleitung auslösen können, so daß für solche Wicklungen eine Druckreduzierung oder eine Kühlung vorgesehen werden sollte.

3. Charakterisierung von Strukturmaterialien

Die Arbeiten zur Bestimmung der mechanischen Tieftemperatureigenschaften der für das NET-TF-Spulengehäuse benötigten Strukturmaterialien wurden fortgesetzt. Drei Grundwerkstoffe DIN 1.4429, 1.4435 und 1.4306 in den Abmessungen von 5000x1500x30 mm wurden in Form von Platten gefertigt. Da bei der Fertigung des NET-Spulengehäuses zur Zeit von einer Schweißkonstruktion ausgegangen wird, wurde zunächst mit der Bestimmung der optimalen Schweißparameter für diese Werkstoffe begonnen. Als neutralstes Schweißverfahren erwies sich das mechanische WIG-Verfahren mit Drahtvorschub. In Zusammenarbeit mit der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV Duisburg) wurden von fünf namhaften Drahtelektrodenherstellern zehn verschiedene artgleiche kommerzielle Schweißdrähte besorgt. Vor Beginn der eigentlichen Schweißungen wurden in einer speziell entwickelten Heißrißprüfmaschine die Heißrißneigung der verschiedenen Kombinationen Grundwerkstoff/Schweißzusatzdraht in bezug auf Ferritgehalt und 77 K-Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes untersucht. Für die Übertragbarkeit der Schweißparameter auf die Schweißausführung wurde für die 30 mm Plattenstärke zunächst die DHV 45° Naht gewählt. Jedoch ergab sich nach ersten Versuchen, daß der beste Nahtöffnungswinkel bei 60° liegt. Es wurden neun Platten mit den jeweiligen drei Grundwerkstoffen und in Kombination mit drei verschiedenen Zusatzwerkstoffen in Abmessungen von 1000x500x30 mm als Stumpfnahht geschweißt. Ebenfalls wurden für strukturmechanische Untersuchungen neun Ecknähte in jeweils 1000 mm Längen produziert.

Im Rahmen des VAMAS Round-Robin Testprogrammes wurden zwei Werkstoffe bezüglich der mechanischen Eigenschaften bei 4.2 K untersucht. Die Testergebnisse werden mit denen von zwei weiteren europäischen, neun japanischen Laboratorien und dem NBS verglichen. Die 200 kN Tieftemperatur-Testeinrichtung wurde bezüglich der Festigkeits- und Bruchzähigkeitsmessungen erweitert. Es ist jetzt möglich, vier Proben hintereinander in einer Abkühlung auf 4,2 K zu testen, gleichzeitig dazu mit einer erweiterten und verbesserten Meßtechnik. Mittels des neuen Verdampferkryostaten können innerhalb von 5 Stunden 4.6 Kerreicht werden, bei einem Heliumverbrauch von $\sim 3\text{l/h}$. Die Konstruktion einer kraftschlüssigen Kopplung des Kryostaten (25 kN/50 kN) mit einem Servozylinder (MTS), zum Zwecke von Rißausbreitungsmessungen ist durchgeführt.

Bezüglich der Faserverbundwerkstoffe für NET wurden in Zusammenarbeit mit der Industrie Hybridwerkstoffe in Form von Platten in verschiedenen Kombinationen von

GFK, CFK und Aramidfasern hergestellt. Die Proben für die Messungen von interlaminarer Scherfestigkeit und der Biegefestigkeit wurden gefertigt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23598	03.03.06/03A	R. Berghöfer
24294	03.03.06/05A	DI N. Brünner
24395	03.03.06//5B	DP U. Fath
25048	03.03.06/05C	<u>Dr. R. Flükiger</u> (für 1.)
25193	03.03.06/05D	F. Gauland
25194	03.03.06/05E	Dr. S. Gauß
25195	03.03.06/05F	Dr W. Goldacker
25196	03.03.06/05G	Dr. Y. Hariharan (bis.30.6.)
25224	03.03.06/05H	DP W. Hehn
25228	03.03.06/05I	Dr. K. Heine
25229	03.03.06/06A	Dr. A. Hofmann
V24003		M. Karb
V24004		Frl. A. Kling
V24005		DP. H.P. Krämer
V24054		B. Lott
V24121		<u>Dr. A. Nyilas</u> (für 3.)
V24122		H. Orschulko
V24123		J. Pytlik
V24126		H. Raber
V24127		Dr. T. Schneider
V24292		Dr. E. Seibt
V24388		DI W. Specking
V24491		S. Stumpf
V24644		<u>Dr. P. Turowski</u> (für 2.)
V24832		Dr. F. Weiss (bis 31.8.) Dr. T. Wolf Dr. J. Xu

**Vorhaben
03.03.07 Kryotechnische Systeme und Entwicklungen**

Institut für Technische Physik (ITP)

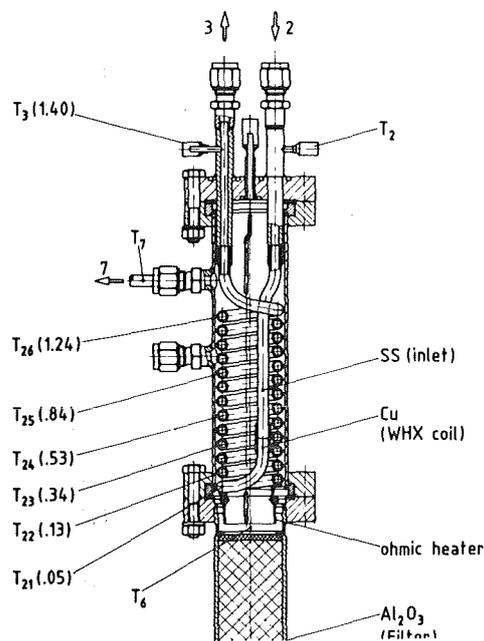
Die Arbeiten haben zum Ziel, die für den Betrieb supra-leitender Fusionsmagnete erforderlichen kryotechnischen Voraussetzungen zu schaffen bzw. zu optimieren. Im Berichtsjahr standen die experimentellen Untersuchungen zur Kühlung mit He II-Zwangsströmung im Vordergrund, aus denen auch die Übertragbarkeit dieser Technik auf NET-Spulen abgeleitet werden konnte. Ferner wurden Untersuchungen zur Verbesserung der thermischen Isolation großflächiger Kryostate und Transferleitungen durchgeführt und die Laboreinrichtungen für Tieftemperatur-Meßtechnik und Sondenkalibrierung modernisiert.

Die inzwischen eindeutig gegebene Präferenz für Zwangskühlung bei allen Fusionsmagneten macht vertiefende Untersuchungen zur Thermohydraulik und von Komponenten, wie Umwälzorganen, nötig. Dafür wurde die HELITEX-Anlage adaptiert.

1. Grundlagen zur Kühlung mit erzwungener Strömung von superfluidem Helium (V 24006, V 24128, V 24494)

1.1 Wärmeaustauscher für thermomechanische Pumpen

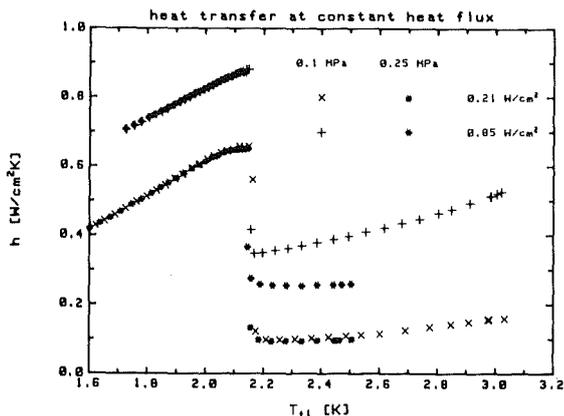
Die an dem in Abbildung 24 dargestellten Modellwärmeaustauscher durchgeführten Messungen wurden analysiert. Zusätzlich wurde ein Rechenmodell zur Beschreibung der Temperaturverteilung in dem spiralförmig aufgewendelten Kupferrohr, das von "warmem" Helium (He I oder He II) durchströmt und außen mit He II gekühlt wird, erarbeitet. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ist hinreichend gut. Das Aufbauprinzip dieses Wärmeaustauschers hat sich bewährt und kann für technische Anwendungen vorgesehen werden.



Modell-Wärmeaustauscher am warmen Ende einer thermomechanischen Pumpe.

1.2 Wärmeübergang an strömendes He II (He)

Messungen zur Wärmeübertragung von Kupfer an Helium II wurden bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (0 bis 1,5 m/s) und unterschiedlichen Drücken (0,1 und 0,25 MPa) durchgeführt. Die Abb. zeigt den gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten beim Übergang von He II auf He I. Im He II-Bereich ($T_{F1} < 2,16$ K) ist der Wärmeübergangskoeffizient unabhängig von Druck und Strömungsgeschwindigkeit. Er hängt jedoch von Temperatur und Wärmestromdichte ab. Empirische Korrelationen hierzu sind hergeleitet worden. Beim Übergang von He II auf He I fällt der Wärmeübergangskoeffizient je nach Druck und Strömungsgeschwindigkeit auf 20 - 30 % des He II-Wertes ab.

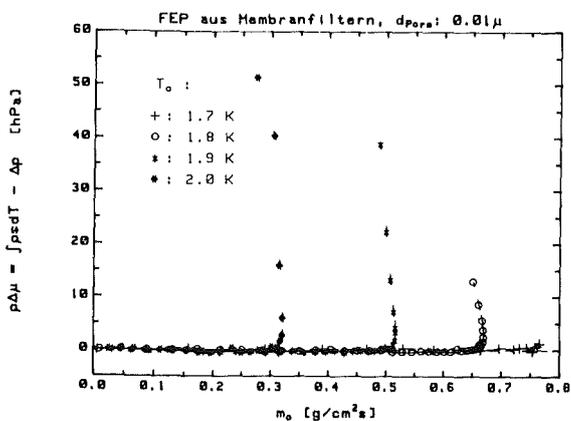


Wärmeübergangskoeffizient h bei konstanten Wärmeströmen ($0,21 \text{ W/cm}^2$ und $0,85 \text{ W/cm}^2$) von Kupfer an Helium mit der Temperatur T_{He} und unterschiedlichen Drücken ($0,1$ und $0,25 \text{ MPa}$).

1.3 Superfilter

Neben den schon seit längerem verwendeten Filtern aus gepreßtem Al_2O_3 -Pulver sind jetzt auch kommerziell erhältliche Membranfilter mit $0,01 \mu\text{m}$ Porenweite eingesetzt worden. Mit einem Stapel von 75 Scheiben konnten hervorragende Durchflußdaten mit dissipationsfreier Strömung bis zu $0,7 \text{ g/(s cm}^2)$ für He II von $1,8 \text{ K}$ erzielt werden. Die Differenz $\rho\Delta\mu$ zwischen dem erwarteten Fountaindruck $\int \rho s dT$ und der experimentell bestimmten Druckdifferenz Δp am Superfilter ist ein Maß für die Dissipation. Sie ist als Funktion der Massenstromdichte, bezogen auf den Gesamtquerschnitt des Superfiltermaterials dargestellt

Aufgrund des abrupten Einsatzes der Dissipation erst kurz vor Erreichen des Sättigungsmassenstromes eignen sich diese Einheiten sehr gut für physikalische Untersuchungen. Bei wiederholtem thermischen Zyklieren tritt aber eine Degradation auf, so daß die Verwendung dieser Materialien in technischen Einrichtungen noch fraglich ist.



Vergleich zwischen idealem und gemessenem Fountaindruck an einem Stapel von $0,01 \mu\text{m}$ Filterscheiben in Abhängigkeit von der He-Massenstromdichte m_0 .

1.4 Ausbau der Versuchseinrichtung

Zur Durchführung von Untersuchungen mit direkter Relevanz für Magnetsysteme wird die vorhandene Versuchseinrichtung so umgebaut, daß auch der Betrieb von supraleitenden Testspulen mit erzwungener He II-Kühlung ermöglicht wird. Es wird angestrebt, den für Großmagnete vorgeschlagenen Kühlkreis in wesentlichen Elementen nachzubilden. Die Fountaineffekt-Pumpe wird für einen Massendurchsatz von etwa 6 g/s ausgelegt. Der Meßeinsatz ist so gestaltet, daß ein innengekühlter Leiter mit einem Strom von bis zu 3000 A auch im 10 T -Hintergrundfeld des HOMER-Magneten betrieben werden kann. Die Konstruktionsarbeiten hierzu sind weitgehend abgeschlossen, und die Fertigung hat begonnen.

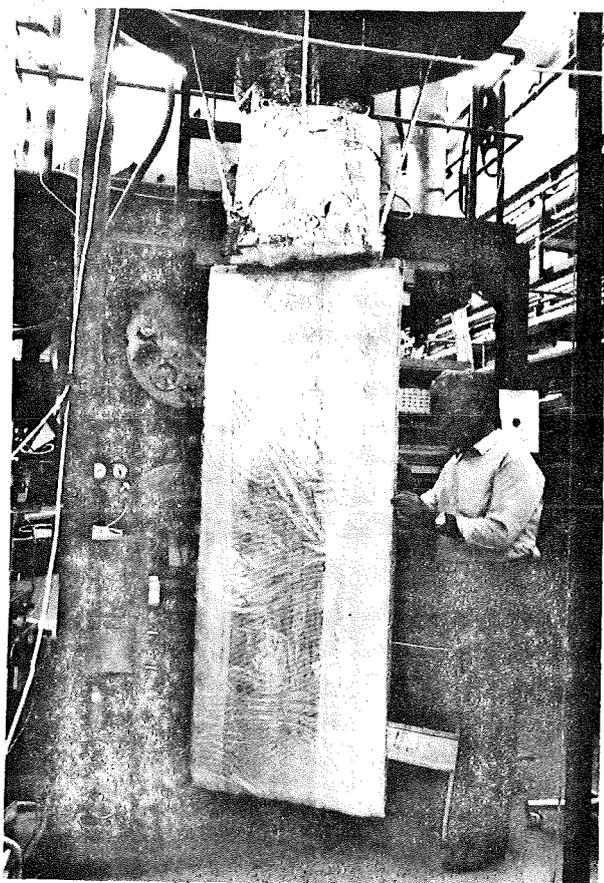
2. Untersuchungen zur Übertragung der He II-Kühltechnik auf Fusionsmagnete

In einer Studie wird gezeigt, daß die Spezifikationen der NET/TF-Spulen mit etwa 11 T Maximalfeld auch mit NbTi, verbunden mit $1,8\text{-K}$ -Kühlung, erfüllt werden können. In Ergänzung zu früheren Untersuchungen wird hierbei vor allem dem Problem der aus der Neutronenabsorption resultierenden inhomogenen thermischen Belastung innerhalb solcher Spulen Rechnung getragen. Es wird gezeigt, daß nur an wenigen Lagen im Hochfeldbereich He II-Temperaturen erforderlich sind. Nach außen hin kann ein Temperaturanstieg auf etwa 3 K zugelassen werden. Die ohnehin vorhandene elektrische Isolation der Leiter gewährleistet hinreichend gute thermische Entkopplung. Folglich wird der Aufbau solcher Spulen kaum komplizierter sein als bei konventioneller Kühlung mit He I.

Zwei Leitertypen werden bei dieser Untersuchung betrachtet: a) Ein Kabel vom Typ des POLO-Leiters (Vorh. 03.03.05) mit quadratischem Querschnitt und zentralem Kühlkanal und b) ein rechteckiger, dem LCT-Typ ähnlicher Leiter. Es wird gezeigt, daß bei beiden Konzepten wesentlich höhere Lasten als aus dem Referenzfall mit $0,3 \text{ mW/cm}^3$ nuklearer Erwärmung an der inneren Lage resultierend, abgeführt werden können. Auch bei Kühlkanallängen von etwa 500 m können hinreichend große hydraulische Querschnitte zur Verfügung gestellt werden, um die He-Konvektion mit thermomechanischen Pumpen zu betreiben.

3. Superisolationstechniken

Die Untersuchungen zur thermischen Isolation großer Kryostate wurden im Testkryostaten TESSI an ebenen Testplatten ($2,7 \text{ m}^2$ Testfläche) fortgesetzt. Dabei kamen käufliche Superisolationen (ein- und beidseitig aluminiumbedampfte Kunststoff-Folien mit und ohne Spacer und massive Alufolien plus Spacer in Form eines Glasfasergewebes) zur Anwendung. Die Isolationen wurden in Form von Matten ("Blankets") und in Form von Einzellagen verarbeitet, wobei insbesondere den Überlappungen und Stoßstellen in den Randzonen besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Dies ist für Anwendungen bei großen Flächen von Bedeutung, da dort Übergangsstellen zwischen einzel-

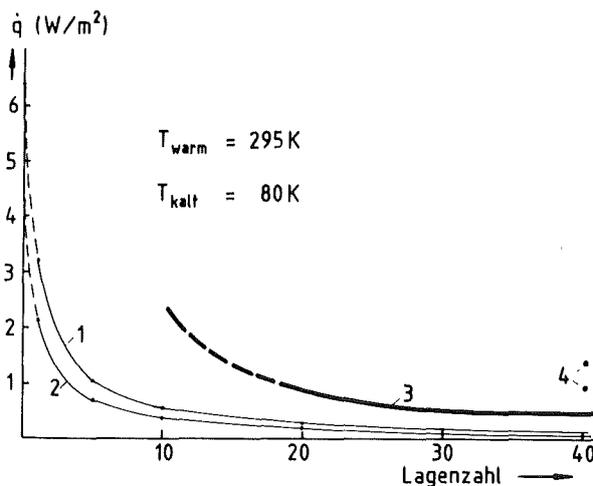


Ebener Superisolationsteinsatz unterhalb superisoliertem LN₂-Reservoir, aufgehängt am Kryostatdeckel. Im Hintergrund der Vakuumtank des TESSI-Kryostaten.

nen Matten unumgänglich sind. Die Erwartungen auf eine verbesserte Isolationsqualität durch Verwendung beidseitig "kräftig" (mit je ca. 400 Å) aluminisierter Kunststoff-Folien erfüllten sich, wobei verschiedene Spacertechniken zu ähnlichen Isolationsqualitäten führten. Ein vor dem Einbau nicht speziell präpariertes (regeneriertes) C-Papier als Spacermaterial mit Getterwirkung führte bei Verwendung dieser hochwertigen Reflektoren zu keiner Isolationsverbesserung. Die Matten- oder Blanketbauweise bietet auch bei zylindrischen Objekten, wie z.B. Kryoleitungen, Vorteile. Zusammen mit einer Industriefirma wurden diesbezüglich an einem vertikalen zylindrischen Testeinsatz (320 mm Ø x 1900 m Höhe) - ein 80 K-Kälteschild für innenliegende He-Leitungen simulierend - ebenfalls innerhalb des Testkryostaten TESSI Messungen durchgeführt. Dabei kam eine kommerziell erhältliche französische Superisolation zur Anwendung. An dem in Blanketbauweise ausgeführten Modell wurden deren Isolationsqualität und deren Qualitätsdegradation bei Störungen im Isolationsaufbau und im Isolationsvakuum untersucht. Es zeigte sich, daß bei präziser Vorbereitung und Verarbeitung der Superisulationsblankets (Testfall 12 Lagen-Blankets), insbesondere an den Überlapp- und Stoßstellen im Boden- und Deckelbereich des Zylinders, beachtliche Isolationsqualitäten erzielbar sind. Diese lassen

sich mit den Isolationsqualitäten, wie sie am ebenen Testmodell mit diesen oder ähnlichen hochwertigen Superisulationsarten gemessen wurden, vergleichen. Die Abb. zeigt die aus einer Vielzahl von Messungen an der ebenen und zylindrischen Testfläche gewonnen Isolationswerte für hochwertige Superisolationen in Abhängigkeit der Lagenzahl. Diese Daten sind Anhaltswerte für die hier angewandte Blanketbauweise bei Verwendung hochwertiger, beidseitig mit 400 Å Schichtdicke aluminisierter Reflektoren und bei Verwendung hochwertiger Spacertechniken.

TESSI I+II 1986-87



Superisulations-Qualitäten bei Blanketbauweise à 10 bzw. 12 Lagen pro Blanket.

- 1: Theorie Wärmestrahlung $\epsilon = \text{konst.} = 0,03$ (ideale Schilde)
- 2: Theorie Wärmestrahlung $\epsilon = \text{konst.} = 0,02$ (ideale Schilde)
- 3: Meßergebnis mit beidseitig mit je 400 Å alumin. Folien
- 4: Meßergebnisse mit einseit. mit 200-250 Å alumin. Folien.

4. HELITEX-Anlage

Die HELITEX-Anlage, welche aufgrund anderer prioritärer Aufgabenstellungen seit Ende 1983 nicht mehr betrieben werden konnte, wurde für vergleichende thermohydraulische Untersuchungen von Heliumzwangsströmungen reaktiviert. Die Modifikation betrifft insbesondere einen flexibleren kryoverfahrenstechnischen Einsatz der Anlage bei He I- und später He II-Betriebsbedingungen. Ab Mitte 88 sind zunächst Untersuchungen zur Stabilität und Ökonomie bei geschlossener Sekundärkreiskühlung mit kaltem Umwälzorgan unter fusionsmagnetrelevanten Wärmelasten vorgesehen. Die Arbeiten im Berichtszeitraum betrafen insbesondere die verfahrenstechnische Auslegung der Testkreisläufe, die Kälteversorgung bei He I- und He II-Bedingungen, die Festlegung der meßtechnischen Ausstattung der Experimentieranlage, die Konzeption und Bestellung einer integrierten Datenerfassungs- und -Verarbeitungsanlage durch HDI und die Umgestaltung und Verbesserung des Experimentierbereiches durch den Bau einer neuen erhöhten Meßkabine.

5. Tiefemperatur-Meßtechnik

Die Arbeiten betreffen den Ausbau der Test- und Kalibrier-einrichtungen für Tiefemperatur-Meßsonden sowie Test und Kalibrierung von Meßsonden für Überwachung und Steuerung von Kryosystemen.

Die Modernisierung der Kalibriereinrichtung wurde zusammen mit HDI fortgesetzt. Ein neuer Kalibriereinsatz für 20 Temperatursensoren wurde erstellt und eingesetzt, die restlichen Komponenten für Regelung und Datenerfassung der Einrichtung wurden bestellt.

Vorklärungeu bzgl. der evtl. Einrichtung einer bestätigten Tiefemperatur-Kalibrierstelle des Deutschen Kalibrier-Dienstes (DKD) im ITP erfolgten mit KfK-Instanzen und in Gesprächen mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt vor Ort und innerhalb des von PTA neu gegründeten Fachausschusses "Temperatur".

Bzgl. der Messung von Massenströmen in Kryosystemen wurde ein Meßgerät mit Nutzung des Coriolis-Prinzips bei Temperaturen bis 4 K untersucht. Das Gerät erwies sich prinzipiell als funktionstüchtig, weist jedoch bei unserer Kryoanwendung folgende Nachteile auf: Temperaturgang des Meßwertausgangs, sehr hoher Druckverlust, Untauglichkeit für zweiphasige Medien.

Als evtl. Alternative zum Platinwiderstandsfühler für Temperaturmessungen wurde ein Iridium-Dünnschichtsensor im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 4 K untersucht.

Die Erwartungen, daß dieser Fühler auch bei Temperaturen unter 20 K einsetzbar sein könnte, erfüllten sich aufgrund einer zu geringen Empfindlichkeit bei diesen Temperaturen nicht.

Bei der Bestimmung des Dampfgehaltes in zweiphasigen He I-Strömungen bewährte sich während der Polo-Experimente zur Zwangskühlung die im Institut für Elektronik der Ruhr-Universität Bochum gebaute kapazitive Meßeinrichtung mit tiefkalter Elektronik. Dieses Gerät ist insbesondere zur Überwachung einer ausreichenden Kühlung zweiphasig gekühlter SL-Magnete vorteilhaft.

Veröffentli- chungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 24006	03.03.07P03D	DI W. Barth
V24128	03.03.05P01A	R. Berggötz
V 24494	03.03.05P02F	<u>Dr. A. Hofmann</u> (zu 1. bis 2.)
	03.03.07P03B	DI L. Hütten
	03.03.07P03C	DP H.P. Krämer
		<u>DI W. Lehmann</u> (zu 3. bis 5.)
		H.P. Schittenhelm
		H.J. Spiegel
		M. Süpfle
		DI M. Süßer
		Ing. B. Vogeley
		DI G. Zahn

Arbeitsthema

03.04 Heiztechnik

Vorhaben

03.04.02 Hochfrequenzheizverfahren

Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)

Gyrotron-Modellierung

Bei den numerischen Rechnungen zur Unterstützung der Gyrotronentwicklung wurde in dem benutzten selbstkonsistenten Modell unerwartet in zwei Fällen im TEO61-Modus eine Verzweigung (Bifurkation) gefunden. Eine genauere numerische Untersuchung ergab, daß in beiden Fällen die Lösung aus zwei Ästen besteht. Im einen Ast, der normalen Lösung, nehmen mit wachsendem Strom des Elektronenstrahls Frequenz und Ausgangsleistung zu; im anderen Ast, der anormalen Lösung, nehmen dagegen Frequenz und Ausgangsleistung ab. Daher interessiert nicht nur, ob es für ein eingeschwungenes Gyrotron solche anormalen Zustände gibt, sondern vor allem auch, ob es in diese gelangen kann.

Veröffentli- chungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24589	03.04.02P08A	<u>Dr. H. Wenzelburger</u>
24590	03.04.02P09A	Dr. E. Borie, IK-II

Institut für Kernphysik (IK)

Nach erstem Betrieb des Gyrotrons im Jahre 1986 wurden umfangreiche Untersuchungen zunächst unter Einsatz des 19 mm langen, mit 0.05° leicht konischen Resonators durchgeführt. Eine wesentliche Verbesserung wurde mit der Inbetriebnahme des Gun-Modulators erreicht, wodurch der Anschwingvorgang im Gyrotron vom Transienten der Beschleunigungsspannung zeitlich separiert werden konnte. Bei stabilerem Betrieb konnte das Schwingverhalten einzelner Moden genauer untersucht werden; Leistungen im Bereich 80-120 kW wurden erreicht.

Im Verlauf der Experimente wurde eine Strahlablage im Resonator von 0.4 mm deutlich, die durch ein im Kanonenbereich angebrachtes Dipolmagnetpaar kompensiert werden konnte.

Nach sorgfältiger Symmetrierung des Strahls wurden - abhängig von der gewählten Parametereinstellung - Leistungen im Bereich 120 - 140 kW erreicht. Die Pulslänge lag zwischen 0.1 und 5 ms, wobei die Pulsfrequenz im Bereich 0.2 bis 5 Hz lag.

Um Unsicherheiten bei der kalorimetrischen Leistungsmessung zu vermeiden, die aus der Überlagerung verschiedener Ausgleichsvorgänge resultierten, wurde eine Rechnerauswertung installiert, die basierend auf einem Modell mittels zyklischer Messungen eine Genauigkeit von besser als 5% (bzw. 5 W gemittelt) liefert.

Zum Modennachweis wurden Thermopapiere und Flüssigkristallfolien eingesetzt. Ebenso wurde mit dem Fernfeldanalysator gearbeitet, jedoch ergaben sich wegen den eingesetzten Harmonischen Mischern unerwartete Probleme bei der Symmetrierung der vier Empfangskanäle, so daß von einer Weiterverwendung des phasenkohärenten Systems zunächst abgesehen wurde.

Die Frequenzmessung erfolgte weiterhin mittels harmonische - Mischung und nachgeschalteten schmalbandigen Filtern. Die Verwendung des 8-Kanal-Ansalyators wurde ebenso wie die Messungen an Übertragungskomponenten durch den Ausfall der abstimmbaren Signalquellen (sowohl Careinotron als auch Gun-Oszillation) verzögert.

Wesentliche Aussagen über das Gyrotron liefern Untersuchungen der Oszillationsbereiche der einzelnen Moden in Abhängigkeit von den Strahl- und Magnetparametern. Durch sorgfältigen Abgleich der theoretischen Berechnungen mit den experimentellen Ergebnissen wurde eine Erklärung für die verminderte Ausgangsleistung gefunden. In den Bereichen in denen hohe Ausgangsleistung und guter Wirkungsgrad im axialen Grundmode (z.B. TE031) erwartet werden, schwingt stattdessen ein axialer Obermode (z.B. TE 032) mit verminderter Leistung. Daher war der Einfluß der Resonatorgeometrie auf diese axiale Modenkompetition auch experimentell weiter zu untersuchen.

Nach Abschluß der Messungen an der ersten Gyrotronversion wurde daher im Oktober eine zweite Version zusammengestellt, die eine neue, nicht vorkonditionierte Kanone und einen kurzen (10 mm) zylindrischen Resonator benutzte. Nach längerem Konditionieren kam diese Gyrotronversion im November in Betrieb. Bis zum Jahresende konnten einige Messungen durchgeführt werden, die die Frequenzlage der erzeugten Moden (TE 231: 147,25 GHz; TE 031: 150,25 GHz; TE 521: 155,28 GHz) sowie eine Ausgangsleistung bis zu 100 kW nachwiesen.

Nach dem Arbeiten am modularen 150 GHz-Gyrotron wurde mit dem 140 GHz Prototyp-Gyrotron für den Einsatz am Wendelstein VII-AS begonnen. Hierfür wurde ein Zusammenarbeitsvertrag mit Fa. Valvo geschlossen, der die wissenschaftlichen Vorarbeiten und die Auslegungsrechnungen bei KfK, die Konstruktion und Fertigung hingegen bei der Industrie vorsieht. Zusätzlich sind eine Kanone und ein Fenster in Produktion, die Voruntersuchungen zum 140 GHz-Gyrotron im modularen Aufbau ermöglichen.

Die Anschlußarbeiten für den Zeitraum 1987 - 1989 wurden mit Euratom abgestimmt und werden von dort unterstützt.

Die theoretischen Arbeiten hatten insbesondere die Weiterentwicklung von Kanone und Resonator sowie die Erklärung der experimentellen Ergebnisse zum Ziel. Neben weiteren Fallstudien, wie beispielsweise der Optimierung eines TE 061-Resonators für hohe Leistungen, wurden die Rechenprogramme für den komplexen Resonator verbessert. Untersuchungen von Gyrotrons mit komplexen Resonatoren wurden unter Einschluß der Modenkompetition durchgeführt. Mit der Entwicklung von Rechenprogrammen zur selbstkonsistenten Behandlung der Modenkompetition wurde begonnen. Zusätzliche Untersuchungen zum Verhalten bei der Zyklotronharmonischen lieferten erste Ergebnisse.

Veröffentlichungen:	Primärberichte:	Beteiligte Mitarbeiter:
V 24741	03.04.02 P09A	W. Baumgärtner
24504	03.04.02 P09B	Dr. E. Borie (bis Juli 87)
24800	03.04.02 P09C	H. Budig
25232	03.04.02 P09D	Dr. G. Dammertz
24803	03.04.02 P09E	U. Feißt
	03.04.02 P09F	P. Grundel
	03.04.02 P09G	DI R. Hietschold
	03.04.02 P09H	<u>Dr. G. Hochschild</u>
	03.04.02 P09I	Ing. A. Hornung (Uni)
	03.04.02 P09J	DP B. Jödicke
	03.04.02 P09K	Dr. M. Kuntze
	03.04.02 P09L	R. Lehm
	03.04.02 P09M	DI A. Möbius
		N. Münch
		H. Oppermann
		Dr. B. Piosczyk
		G. Redemann
		DI H. Stickel
		R. Vincon

Arbeitsthema

03.06 Blanketentwicklung

Vorhaben

03.06.01 Blanket: Konzepte, technische Entwürfe und Experimente

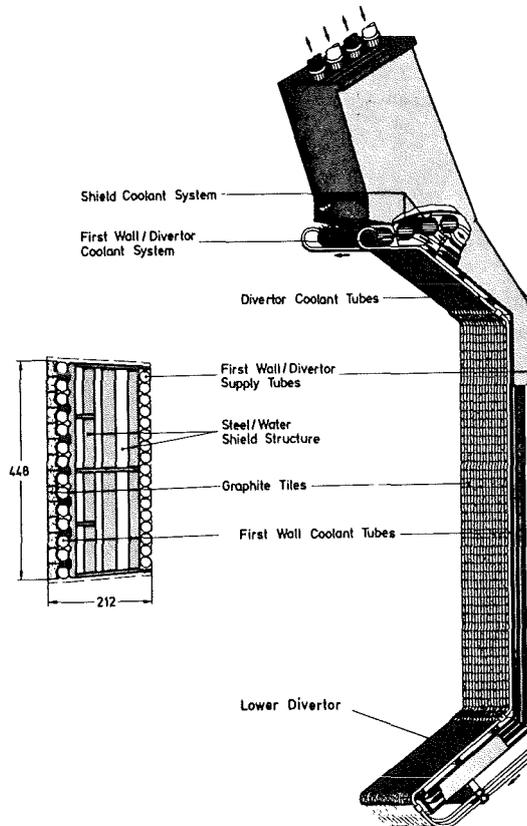
Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Heliumgekühltes Feststoffblanket

Das Konzept des Outboard-Brutblankets mit kanisterförmigen Blanketelementen wurde in Zusammenarbeit mit dem INR neu überarbeitet. Das Blanketsegment besteht aus einem Erste-Wand-Segmentkasten, der die Kanister zur Aufnahme des Brutstoffes und die Versorgungsleitungen umschließt. Innerhalb der Kanister sind parallel zueinander Berylliumplatten mit eingelöteten Kühlschlangen angeordnet; die Spalte zwischen den Platten sind mit einer Li_4SiO_4 -Kugelschüttung gefüllt. Durch die Schüttung strömt Spülgas. Jeweils fünf Berylliumplatten einschließlich der Keramikschichten werden von einer Stahlhülle umgeben und bilden einen Brutstoffblock, der mit den Kanisterwänden nicht mehr in Kontakt steht. Das Keramikmaterial wird in Taschen aus Drahtnetz eingefüllt. Durch diese Anordnung soll der Volumenausgleich bei Temperaturänderungen und die gute Verteilung des Spülgases im Brutstoff hinreichend gewährleistet werden. Zur Zeit sind Versuche in Vorbereitung, die Aufschluß über das Verhalten dieser Schüttungsanordnung im zyklischen Langzeitbetrieb geben sollen. Neue Temperaturfeldrechnungen für die modifizierte Blanketanordnung ergaben ausreichende Abstände von den Auslegungsgrenzen der einzelnen Materialien.

Abschirmblankets

Im Jahr 1987 wurde als erster Schritt zusammen mit der Firma Sulzer eine Durchführbarkeitsstudie für Outboard-Abschirmblanketsegmente mit Helium- und alternativ mit Wasserkühlung durchgeführt. Die vorgeschlagenen Abschirmelemente bestehen bei Heliumkühlung aus drei hintereinander angeordneten Stahlplatten mit eingearbeiteten poloidal verlaufenden Kühlkanälen; bei Wasserkühlung wurde ein als Schweißkonstruktion ausgeführter Kasten mit Wasserführungs- und Versteifungsblechen ausgearbeitet. Die Abschirmelemente werden von dem geschlossenen Erste-Wand-Segmentkasten umgeben. Abb. zeigt als Beispiel den Entwurf eines wassergekühlten Inboard-Blanketsegmentes. Es besteht aus einer Abschirm-/Tragstruktur, die sich über die gesamte Torushöhe einschließlich der Divertorbereiche erstreckt und zusammen mit dem Tragflansch eine steife Baueinheit bildet. Die Erste Wand ist in die Abschirmstruktur integriert. Es sind zwei Kühlsysteme vorgesehen. Ein Kühlmittelstrom führt die in der Abschirmung entstehende Wärmemenge ab, während Wasser aus dem zweiten System die Erste-Wand- und Divertorkühlrohre nacheinander von unten nach oben durchströmt.



Wassergekühltes Inboard-Abschirmblanketsegment

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24363	03.05.01P55A	DI E. Bojarsky
24592		DI H. Deckers
		W. Hofheinz
		DI H. Lehming
		DI P. Norajitra
		DI G. Reimann
		<u>DI H. Reiser</u>
		U. Reuter
		H. Schleger

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

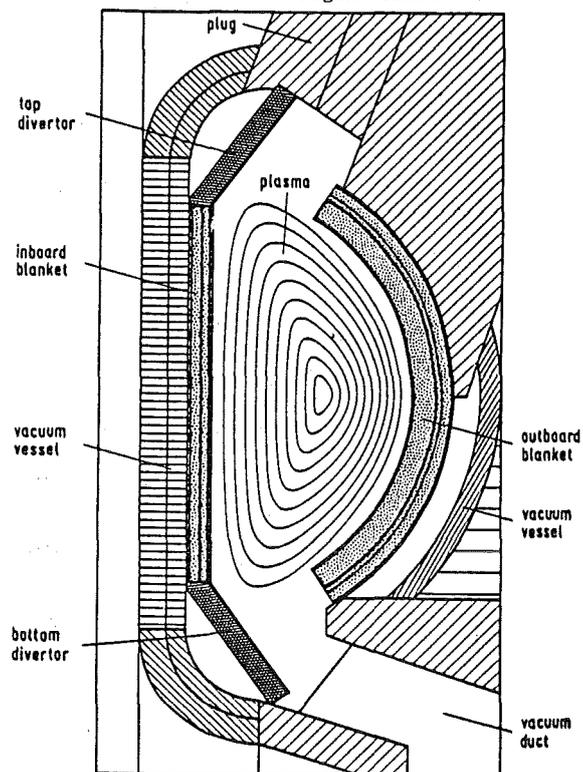
In Zusammenarbeit mit dem IMF III und der Firma Interatom wurde das Konzept eines heliumgekühlten Feststoffblankets für NET weiterentwickelt und erheblich verbessert. Die Schüttung aus 0.5 mm Durchmesser Li_4SiO_4 -Kügelchen befindet sich jetzt nur noch in 6 mm breiten Spalten zwischen Berylliumplatten. Im IMF-Teil dieses Berichtes ist das Konzept kurz beschrieben. Die folgende Tabelle enthält die Hauptdaten des Blankets. Eine Analyse der mechanischen Spannungen zeigt genügende Abstände zu Grenzwerten.

Breeding material:	0.5 mm Li_4SiO_4 pebbles (total weight = 20 t)
Li^6 enrichment:	90 %
Multiplier:	beryllium (total weight = 90 t)
First wall protection:	graphite tiles 20 mm thick inboard and 15 mm thick outboard
Blanket form:	poloidal inboard and with canisters outboard
Tritium breeding ratio:	1.04 (3 dimen. calc.), 1.37 (1 dimen. calc.)
Tritium production rate:	96 g/d
Total blanket power:	540 MW + 134 MW in the shields + 142 MW in the divertors
Nominal heat flux on the first wall:	10 W/cm ²
Max. local heat flux on first wall:	40 W/cm ² (outboard)
Helium coolant pressure:	6 MPa (blanket), 8 MPa or 9 MPa in divertors
F.W. and blanket helium pressure drops:	0.21 MPa
F.W. and blanket helium inlet and outlet temp.:	200 °C and 450 °C
F.W. max. steel temp.:	511 °C
Max. equiv. thermal stress in F.W. steel:	325 MPa
Max. temp. of graphite tiles:	1650 °C
Max. temp. in the blanket steel pressure tubes:	480 °C
Max. temp. in beryllium:	480 °C
Max. temp. at beryllium - pebble bed interface:	480 °C
Max. temp. in pebble bed:	600 °C
Min. temp. in pebble bed:	300 °C
Max. temp. in divertor (TZM):	925 °C
Max. equiv. thermal stress in TZM:	385 MPa
Helium pressure in purge flow system:	0.1 MPa
Tritium inventory in Li_4SiO_4 pebbles:	250 g (o. 1 % H_2 in purge helium)

Total tritium losses from plant < 10 Ci/d (oxidizing atmosph. in helium main circuit).

Hauptdaten des Feststoffblankets für NET

Die kombinierte Neutronen- und Gammatransportrechnung wurde mit einem dreidimensionalen Monte Carlo Programm durchgeführt, das eine sehr detaillierte Darstellung des Entwurfs erlaubt. Die Abbildung zeigt die rechte Hälfte eines vertikalen Schnittes durch den Torus in der Rechengeometrie. Es wurden auch die Möglichkeiten und Grenzen ein- und zweidimensionaler Rechnungen identifiziert.

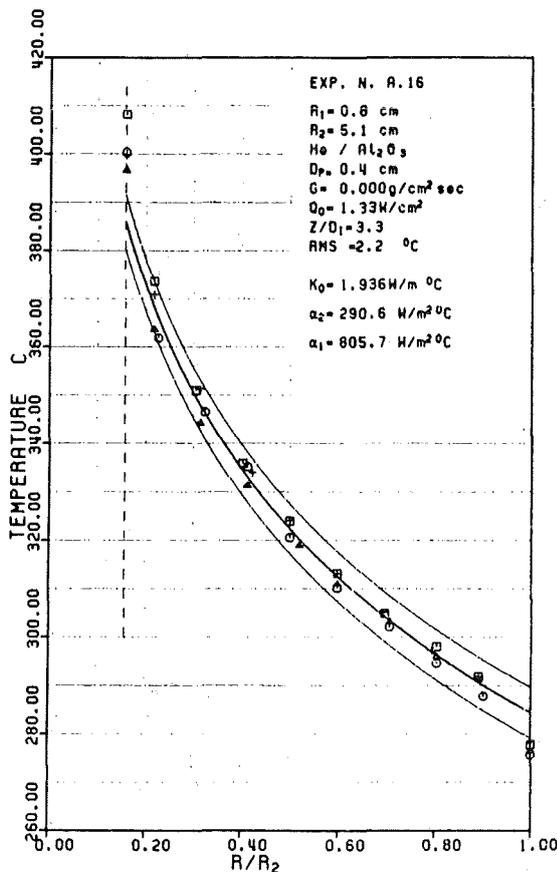


Darstellung des Blankets in den Monte Carlo Rechnungen (Vertikalschnitt durch den Torus).

Ein großes Problem des Tokamak-Reaktors stellen die elektromagnetischen Kräfte beim plötzlichen Abriss des Plasmapstromes dar. Zu ihrer Berechnung wurde das dreidimensionale Programm CARIDDI implementiert und verbessert. Es zeigte sich, daß um das Blanketgehäuse umlaufende Wirbelströme zu großen Kräften und Torsionsmomenten führen, so daß zweidimensionale Rechnungen völlig irreführend sein können.

Die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Kugelschüttungen wurde mit Mischungen aus Keramik- und Metallkugeln sowie mit Mischungen von Kugeln unterschiedlicher Größe fortgesetzt. Die radiale Temperaturverteilung in zylindrischen Schüttrohren wurde gemessen (siehe Abbildung).

Im Berichtszeitraum wurde auch die Möglichkeit geprüft, in einem wassergekühlten Abschirmblanket durch Zugabe eines Lithiumsalzes Tritium zu erbrüten. Es ergaben sich vielversprechende Tritiumproduktionsraten. Bei Verwendung von Beryllium als Neutronenvervielfacher erhält man ebenso gute Bruteraten wie mit den besten anderen Konzepten. Die Probleme der Korrosion und Tritiumabtrennung scheinen beherrschbar. Dieses Konzept ist nur für NET nicht jedoch für einen Leistungsreaktor anwendbar.



Gemessene Temperaturen (Symbole) und angepaßte berechnete Temperaturverteilung (-) in Kugelschüttungen von 4 mm Durchmesser Al_2O_3 Kugeln mit Heliumkühlung

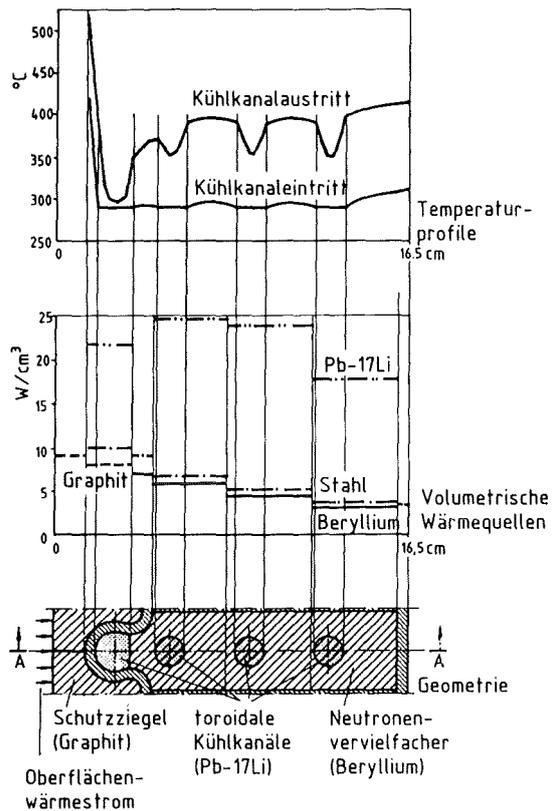
Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23232		DP. L. Boccaccini
23414		(Euratom-Stipendiat)
23788		Prof. M. Dalle Donne
24270		Dr. S. Dorner
24363		(Ingenieurbüro)
24592		DP. U. Fischer
25082		DP. M. Küchle
V25419		Dr. G. Sordon
		(EURATOM-Stipendiat)

Institut für Reaktorbauelemente (IRB)

Blanketkonzept mit Flüssigmetallkühlung

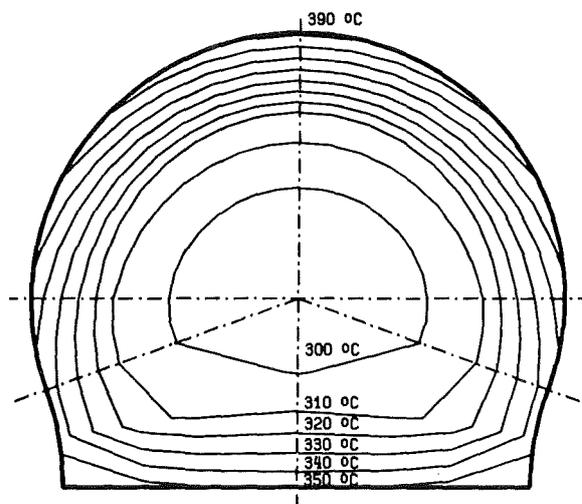
Die 1984 begonnene Entwicklung eines Blanketkonzeptes für NET, bei dem eine Lithium-Blei-Legierung sowohl als Brutstoff als auch als Kühlmittel dient, wurde fortgesetzt. Dieses Konzept zeichnet sich im Vergleich zu anderen Blanketkonzepten durch einen wesentlich einfacheren Aufbau aus. Schwerpunktartig wurden 1987 Temperaturfeldberechnungen und - in Zusammenarbeit mit der NIS-Ingenieurgesellschaft - eine Analyse der mechanischen Spannungen in den Blanketstrukturen durchgeführt. Der thermischen Analyse lag eine dreidimensionale Neutronik-Rechnung zugrunde, aus der sich die ortsabhängige volumetrische Wärmefreisetzung in den einzelnen Materialien ergab. Eine detaillierte Temperaturfeldberechnung wurde für den Frontbereich, d.h. die "Erste Wand", die Neutronenvervielfacher-Zone und die zugehörigen Kühlkanäle durchgeführt. Die Flüssigmetalltemperatur am Eintritt in diese Frontkanäle ergab sich aus einer globalen thermischen Analyse, bei der sich zeigte, daß 2/3 der Kühlmittelaufheizung in den Frontkanälen erfolgt. In Abb. 6 sind die untersuchte Geometrie, die Wärmequellverteilung und die radialen Temperaturprofile in der poloidalen Mitten-ebene eines Blanketsegmentes dargestellt. Abb. 7 zeigt die berechneten Isothermen im Austrittsquerschnitt des vordersten Kanals. Hier tritt mit 396 °C die höchste Temperatur an der Grenzfläche Flüssigmetall/Wand auf. Diese Temperatur ist tief genug, um Korrosionsprobleme zu vermeiden.

Die berechneten Temperaturfelder waren wichtige Eingangsgrößen für die Analyse der mechanischen Spannungen. Diese wurde bei NIS durchgeführt und ergab, daß sowohl die aus dem Innendruck resultierenden Primärspannungen als auch die durch Temperaturdifferenzen verursachten Sekundärspannungen im Bereich der nach dem ASME-Code zulässigen Werte liegen. Im nächsten Jahr werden diese Untersuchungen durch Berücksichtigung von plastischen Verformungen bei der Ermittlung der Lebensdauer im zyklischen Betrieb ergänzt.



Wärmequellstärke und Temperaturprofile im Frontbereich des Blankets.

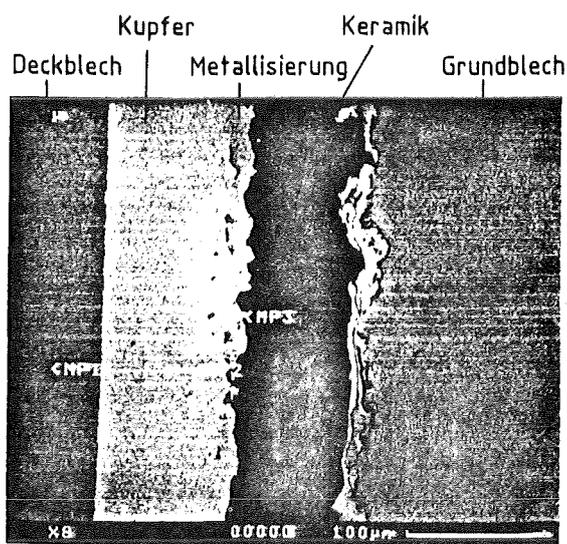
Wesentliche Voraussetzung zur Realisierung eines selbstgekühlten Blankets ist die Vermeidung unzulässiger MHD-Druckverluste. Für das diskutierte Konzept ist es vorgesehen, die Kanalstrukturen durch sogenannte Strömungskanaleinsätze (SKE) gegen das Fluid elektrisch zu isolieren. Die SKE's bestehen aus einem Doppelblech mit Keramikzwischen-schicht; sie sind an den Kanten verschweißt und



Geschwindigkeit des Kühlmittels 190 cm/s
 Eintrittstemperatur des Kühlmittels 290 °C
 mittlere Austrittstemperatur des Kühlmittels 325 °C

Isothermenfeld am Kühlkanalaustritt des ersten toroidalen Kanals.

werden lose in die Strömungskanäle eingeschoben; sie verhindern große elektrische Kurzschlußströme durch Tragstrukturen. Die Entwicklung der SKE's wird gemeinsam mit MBB durchgeführt. Abb. zeigt ein Schlibbild vom Aufbau eines SKE's, welches aus einem Grundblech, einer plasma-gespritzten Keramikschicht ($Al_2O_3 + TiO_2$), einer plasmage-spritzten Metallisierung (Ni), einer Kupferschicht und einem Deckblech besteht. Die Kupferschicht ist durch Diffusions-verschweißen mit der Metallisierungsschicht und dem Deck-blech verbunden. Noch auszuführende Entwicklungsschritte sind im wesentlichen das Umformen der Lamellenstruktur zu einem Strömungskanaleinsatz und der Bau prototypischer Proben.



Schlibbild eines Strömungskanaleinsatzes

Tritiumabtrennung aus Pb-17Li

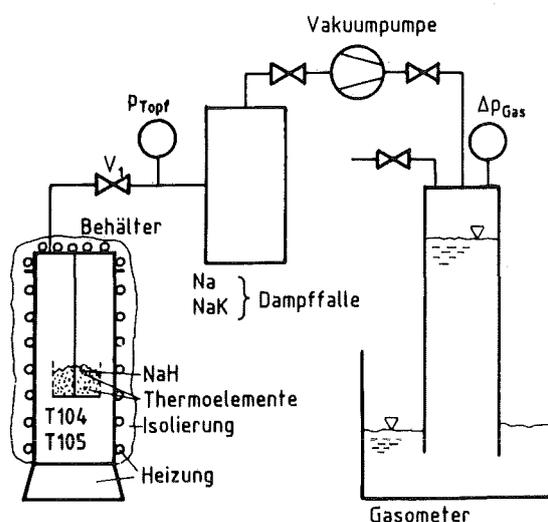
Die Tritiumabtrennung aus einem Pb-17Li gekühlten Blanket mit einem NaK-Sekundärkreislauf soll mit einer Kaltfalle im NaK-Kreis erfolgen. Der bisherige Kenntnisstand über die Kinetik der Abscheidung und Wiedergewinnung in Kaltfallen ist jedoch nicht ausreichend für die Auslegung von fusionsreaktorspezifischen Kaltfallen.

Zur Untersuchung dieser Vorgänge (WAWIK-Vorhaben) wird Tritium durch leichten Wasserstoff ersetzt. Folgende Versuchseinrichtungen sind geplant bzw. bereits in Betrieb:

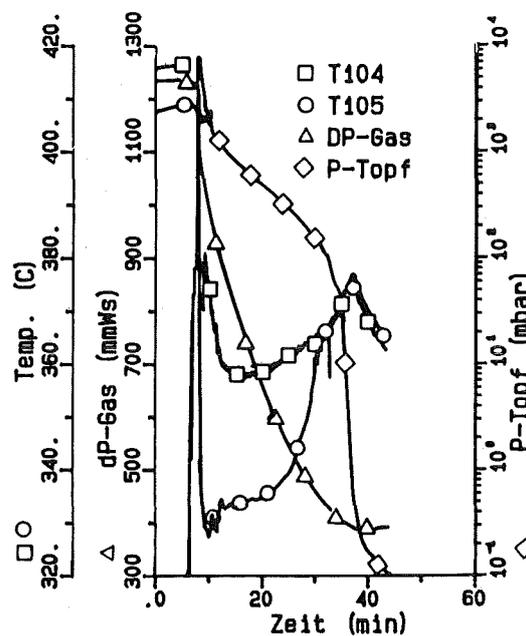
1. Versuchstand für Wasserstoffabscheidung: In einem NaK-Kreislauf wird über eine Nickel-Membran Wasserstoff eingespeist, der in zwei parallel durchströmten Kaltfallen als Hydrid abgeschieden wird. Die Konzentrationen stromauf und stromab der Kaltfallen sollen mit speziellen Sonden (Ni-Membran + Ionisationspumpe + Druckmessung) bestimmt werden. Mit der Montage der Komponenten wurde begonnen.
2. Versuchseinrichtungen zur Wasserstoff-Wiedergewinnung: Die Wiedergewinnung erfolgt durch thermische Zersetzung des Hydrids bei Temperaturen zwischen 300 und 400 °C und Abpumpen mit einer Vakuum-

pumpe. Für Vorversuche werden folgende Versuchsstände verwendet: a) ein elektrisch beheizter Behälter mit NaH-Pulver, evt. durchmischt mit Na_2O -Pulver, b) ein mit Na oder NaK gefüllter Behälter, der im oberen Bereich geheizt und im unteren Bereich gekühlt wird. Wasserstoff wird an der Flüssigmetalloberfläche absorbiert und kristallisiert am Boden als Hydrid aus. Beide Behälter werden an eine Vakuumpumpe angeschlossen; die freigesetzte Wasserstoffmenge wird über den Höhenstand in einem Gasometer gemessen.

Abb. zeigt die Versuchsanordnung für die Vorversuche mit NaH-Pulver; Abb. den Zeitverlauf der Signale bei einem



Versuchsstand für Wasserstoff-Freisetzung (Vorversuche mit NaH-Pulver)

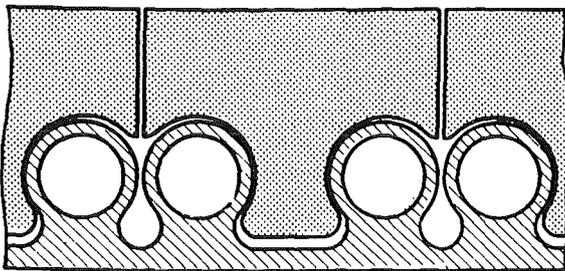


Wasserstoff-Freisetzung

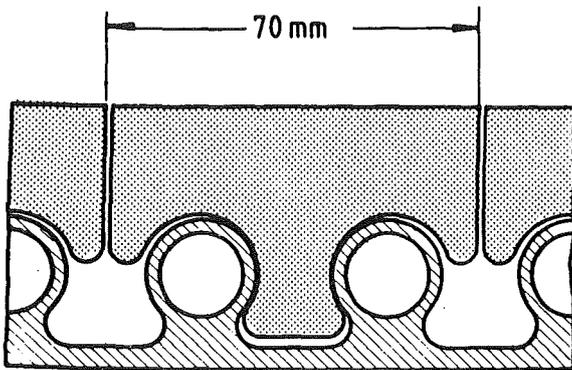
typischen Wasserstoff-Freisetzungsversuch. Das System wurde zuvor mit geschlossenem Ventil V_1 auf ca. 340 °C aufgeheizt. Nach Öffnen von V_1 fallen die Temperaturen, da die Freisetzung Energie verbraucht. Ein Maß für die freigesetzte Gasmenge ist der Abfall des Δp -Gas-Signals. Die aus derartigen Versuchen bestimmten Reaktionskonstanten stimmen gut mit entsprechenden Versuchen aus der Literatur überein.

Untersuchungen zur ersten Wand

Trotz hoher und zeitlich wechselnder thermischer Belastungen können Spannungen in der ersten Wand in zulässigen Grenzen gehalten werden, wenn die Kühlrohre plasma-seitig auf die Wand geschweißt und dort zugleich zur Halterung der Schutzziegel verwendet werden. Den im letzten Jahr dargestellten Temperatur- und Spannungsfeld-Rechnungen lag eine toroidale Ausrichtung der Kühlrohre zugrunde, wie man sie für Gaskühlung der ersten Wand wählen könnte. Bei Wasserkühlung ist wegen der Naturkonvektion im Notkühlfall eine poloidale Ausrichtung der Kühlrohre vorzuziehen; die Wölbung der ersten Wand auf der Outboard-Seite macht dabei einen gleichmäßigen Abstand zwischen den Rohren unmöglich. Um trotzdem das Konzept der strahlungsgekühlten Schutzziegel, die mit einem erweiterten Fuß lose zwischen parallele Rohre geschoben sind, beibehalten zu können, wurde eine Konstruktion mit paarweise parallelen Rohren und dazwischen



a) Schnitt durch die 1. Wand am oberen Ende des Blanketsegmentes



b) Schnitt in der Torus-Mittelebene

Anordnung der Rohre zum Kühlen der 1. Wand und zur Halterung der Graphit-Schutzziegel

sich ändernden Rohrabständen und Ziegelbreiten gewählt; dadurch können die Vorteile kurzer Wege zur Wärmesenke und freier Dehnbarkeit der Ziegel mit einer kleinen Zahl verschiedener Abmessungstypen bei den Ziegeln erkauft werden. Abb. zeigt die Anordnung der Rohre zum Kühlen der "Ersten Wand" und zur Halterung der Graphit-Schutzziegel.

Um Ausschnitte der ersten Wand mit strahlungsgekühlten Schutzziegeln experimentell bezüglich des Ermüdungsverhaltens und des integralen Verhaltens unter thermischer Wechselbeanspruchung untersuchen zu können, wurde der Aufbau eines Prüfstandes beschlossen und mit seiner Planung und Beschaffung begonnen. Der dazu erforderliche Hochtemperatur-Widerstandsheizer wird in einem Vorversuch auf Standzeit untersucht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23414		DI. K. Arheidt
23415		H.J. Brinkmann
23614		DI. V. Casal
24473		E. Eggert
24592		G. Eisele
V24942		Dr. Cl. Günther
25212		<u>DI. G. Hofmann</u>
25238		DI. H. John
25239		DI. W. Just
		H. Kreuzinger
		<u>DI. S. Malang</u>
		<u>Dr. J. Reimann</u>
		DI. K. Rust

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

a) Anlagentechnische Voraussetzungen für das Testen von Blankets in NET

Behandelt wurde die Frage, welche anlagentechnische Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit NET in den verschiedenen Betriebsphasen mit unterschiedlichen Typen von Abschirm- und Brutelementen ausgerüstet werden kann. Dabei wird davon ausgegangen, daß NET in der ersten Betriebsphase mit Abschirmelementen bestückt werden soll. Wenn dann mit steigendem Tritiumverbrauch das Brüten eine wachsende Bedeutung erlangt, soll durch Zusatz von Li-Salzen zum Kühlwasser der Abschirmelemente ein für den Versuchsbetrieb hinreichender Bruteffekt erreichbar sein. Daneben sollen aber auch technologisch orientierte Entwicklungsarbeiten an fortgeschrittenen Blanketentwürfen durchgeführt werden. Das erfordert die Verwendung von NET als Testbett, um fusionsrelevante Betriebsbedingungen für die Testblankets zu erhalten. Als Abschirm- und Blankettypen werden z.Zt. in Betracht gezogen: ein wassergekühltes Abschirmelement (KfK-IMF), ein wassergekühltes LiPb Blanketelement (JRC-Ispra und NET-Team), ein

heliumgekühltes Blanket mit Keramik-Brutstoff (KfK-INR und IMF), ein selbstgekühltes Flüssigmetall-Blanket (KfK-IRB).

Anhand eines eigenen Entwurfes der anlagentechnischen Gestaltung von NET wurde untersucht, wo die kritischen Aufgabenkomplexe liegen werden. Mit Hilfe von Ringleitungen und Verteilsystemen kann der flexible Einsatz von Testblankets und der Übergang zu einer nachfolgenden Ausrüstung von NET mit fortgeschrittenen Blankets im Prinzip ermöglicht werden. Aus den Anforderungen der Handhabung, der Reparaturfähigkeit und der Sicherheit der Anlage ergibt sich eine ziemlich komplizierte räumliche Anordnung der Versorgungsleitungen mit ihren Trennstellen. Diese Ergebnisse, die im Rahmen eines direkten NET-Kontraktes erarbeitet wurden, sind für die zukünftige Festlegung des NET-Anlagenkonzeptes von Bedeutung.

b) Entwurfsstudien und Experimente für Divertoren

Die Entwurfsarbeiten zum NET-Divertor konzentrieren sich für die Physikphase von NET auf einen Divertor mit Graphit-Schutzschicht. In der anschließenden Technologiephase wird dann ein erosionsfesterer Werkstoff auf Wolfram- oder Molybdänbasis erforderlich. Die genannten plasmaseitigen Schutzwerkstoffe müssen zum sicheren Einschluß des Kühlmittels mit einer Wärmesenke aus einem duktilen Werkstoff verbunden werden, wobei auswechselbare Schutzziegel wenig Erfolg versprechen.

Spannungs- und Temperaturanalysen für mehrschichtige Divertorelemente haben gezeigt, daß für die in Frage kommenden Werkstoffkombinationen klassische Auslegungsgrenzen (zulässige Temperatur und Spannung) bereits bei nominellen Wärmeflüssen von 5 bis 10 MW/m² rechnerisch erreicht werden. Diese Werte werden im Betrieb lokal möglicherweise noch überschritten, so daß die Grenzen der konstruktiven Möglichkeiten durch thermomechanische Experimente untersucht werden müssen. Fragen der Fertigung sind dabei von großer Bedeutung. Es wurde daher in Abstimmung mit NET ein Versuchsprogramm zum Verhalten von Werkstoffproben unter typischen zyklischen Belastungen entwickelt. Dafür ist eine im IRE vorhandene Plasmaspritzanlage vorgesehen, deren Eignung in Kalibrierungstests mit folgenden Ergebnissen nachgewiesen wurde:

- Es wurden Wärmeflüsse bis zu 15 MW/m² gemessen, die ggf. bis auf 30 MW/m² gesteigert werden können.
- Das von der Flamme an der Probe erzeugte Wärmeflußprofil ist Gauss-verteilt mit einer Halbwertsbreite von ca. 3 cm (Abb. 8).
- Der Wärmefluß kann über den Probenabstand und den Heizstrom auf den gewünschten Wert eingestellt werden, wobei die Oberflächentemperatur zu berücksichtigen ist.

Maßnahmen zur Nachrüstung der Anlage wurden eingeleitet, d.h. Erstellung eines Wasserkreislaufes für die Probenkühlung, Vorbereitungen für eine automatische Prozeßsteuerung und Entwurf einer Proben-Schwenkvorrichtung.

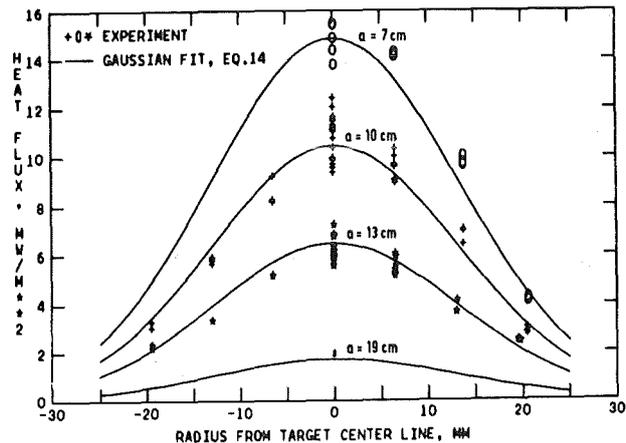
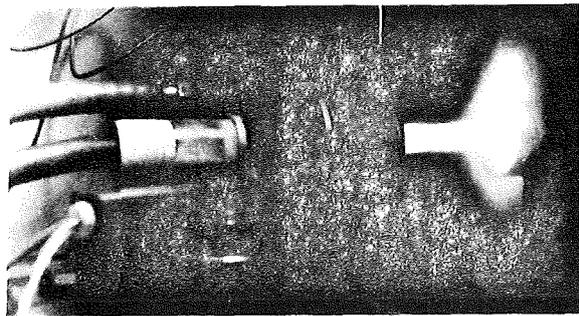


Abb. Plasmaspritzanlage und gemessene Wärmeflußverteilungen an der Probe für verschiedene Proben-Abstände "a".

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.06.01P01A	G. Class
	03.06.01P01B	K. Kleefeldt
	03.06.01P08A	K. Schramm
		G. Gering
		E. Stratmanns
		R.A. Müller

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

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

Die Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung eines Flüssigmetall-Blankets wurden abgeschlossen. Die Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit dem IRB. Unterschiede zu vorhergehenden Konstruktionen ergaben sich durch den Ringberg-Report 1986 des NET-Teams, in dem die Divertordaten geändert wurden.

Gleichfalls abgeschlossen wurden die Arbeiten zur NET-Blanketsegmentierung. Von Interesse sind zwei Lösungen: Bei der einen Option ist der Verschlußstopfen zwischen äußeren und inneren Blankets durch drei Divertorkassetten ersetzt. Im zweiten Fall sind je Sektor drei innere und zwei, statt bisher drei, äußere Blankets angeordnet. Dadurch wird es möglich, die äquatorialen Montageöffnungen für ein In-Vessel-Hantierungssystem geringfügig zu verbreitern.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.01.06P45A	B. Haferkamp W.E. Hörl W. Link <u>A. Suppan</u>

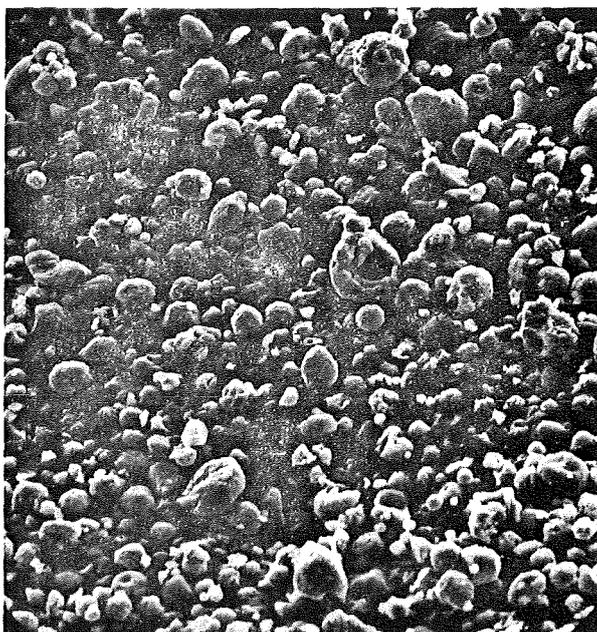
Vorhaben

03.06.02 Blanketmaterialentwicklung

Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF)

Herstellung und Charakterisierung von keramischen Brutmateriale

Die Untersuchung zur Gewinnung von Lithiumorthosilikatpulvern aus alkoholischen Suspensionen konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Zur technologischen Erprobung des angewandten Sprühtrocknungsverfahrens wurde eine Charge von 70 kg Li_4SiO_4 -Pulver unter industriellen Bedingungen produziert. Hierzu wurden ca. 800 l alkoholischer Suspension

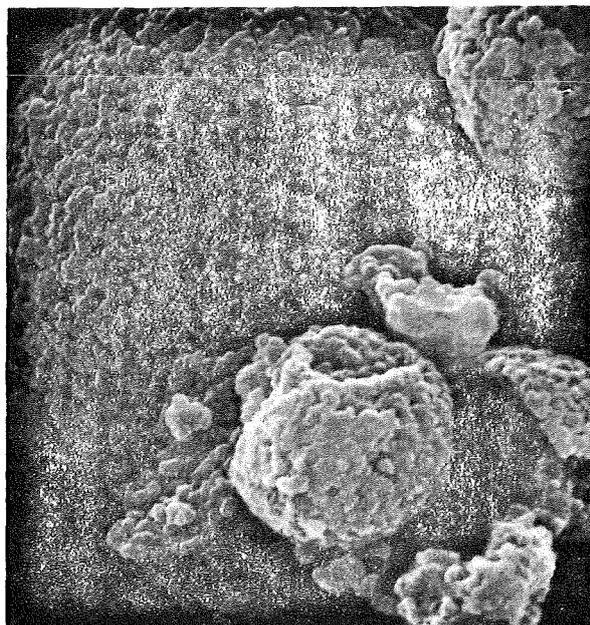


Li_4SiO_4 -Pulver, hergestellt nach dem Sprühtrocknungsverfahren mit anschließender Kalzination

hergestellt, sprühgetrocknet und anschließend unter hohem Luftdurchsatz bei 750 °C ca. 10 bis 20 Sekunden kalziniert. Dieses Pulver zeigte die gleichen Eigenschaften wie die im Labor hergestellten Ansätze: außergewöhnliches Fließverhalten, Phasenreinheit, hohe Sinteraktivität. Damit ist bewiesen, daß dieses Alkoholatverfahren direkt auf industrielle Maßstäbe übertragen werden kann. Die Abb. zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Pulvers aus der 70 kg Charge. Man erkennt Teilchengrößen im Bereich zwischen 5 µm und 50 µm. Ein neueres Sprühkalzinierverfahren liefert Pulver mit Teilchengrößen zwischen 0,1 µm und 10 µm. Dieses Pulver hat eine Oberfläche von 55 m²/g

Für Materialuntersuchungen wurden Pulver und gesinterte Tabletten aus Lithiumortho- und Lithiummetasilikat hergestellt. Im Rahmen eines französisch-deutschen Experimentes zum Verträglichkeitsverhalten der Silikatkeramik im Kontakt mit Beryllium wurden 50 Orthosilikat- und 30 Metasilikatproben in Form gesinterner Scheiben angefertigt.

Die Lithium-Ionenleitfähigkeit beim Orthosilikat wird durch Dotieren mit Al^{3+} - bzw. P^{5+} -Ionen erhöht. Zur Überprüfung der Annahme, daß eine solche Dotierung einen positiven Einfluß auf die Tritiumfreisetzung unter Bestrahlung hat, wurde:



Feines, hochoxydierfähiges Li_4SiO_4 -Pulver, hergestellt nach dem Sprühkalzinierungsverfahren

Mischkristallproben aus den ternären Systemen $\text{Li}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ und $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ einer Isotopenkanalbestrahlung (DIDO/Jülich) unterworfen. Die Nachbestrahlungsuntersuchungen dieser Proben sind im Gange.

Die Untersuchungen zur Herstellung kugelförmiger Granulate nach einem pulvermetallurgischen Verfahren wurden begonnen. Ziel dieser Untersuchungen ist die Optimierung der Form, die Verminderung der Oberflächenrauigkeit und die Erhöhung der Sinterdichte.

Die charakterisierenden Untersuchungen an Lithiummeta- und Lithiumorthosilikat-Proben aus verschiedenen Bestrahlungsexperimenten erbrachten folgende pauschale Ergebnisse: Zwischen 90 und 100 % der gesamten Porosität der untersuchten Metasilikatproben verschiedener Dichte wurde mit Hilfe des Quecksilberporosimeters als offene Porosität erfaßt. Eine hochdichte Probe bildete mit rund 40 % eine Ausnahme. Bei den Orthosilikatproben wurde demgegenüber eine starke Abhängigkeit dieses Anteils von der Dichte der Proben beobachtet. Er reichte von rund 10 % bei einer hochdichten Probe bis über 90 % bei einer niederdichten Probe. Die Messungen, die mit dem Heliumstereopyknometer durchgeführt wurden, ergaben, daß unterhalb der Meßgrenze des Quecksilberporosimeters ein zum Teil erhebliches Volumen an offener Porosität vorhanden sein kann. Bei den Orthosilikatproben war dieser Effekt besonders ausgeprägt.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Gaspermeationseigenschaften deuten darauf hin, daß ein Zylindermodell, das auf den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie aufbaut, für das Netzwerk der offenen Porosität eine brauchbare Beschreibung darstellt.

ment ELIMA 2 dazu geplant. Dieses war zunächst im schnellen Fluß des KNK II-Reaktors vorgesehen, wird nun aber aus betrieblichen Gründen im HFR/Petten durchgeführt. Die von fünf europäischen Partnern dafür bereitgestellten Brutmaterialtabletten sind im IMF III zu 72 Probenstäben verarbeitet und in Saclay und Petten angeliefert worden. Die Experimentserie B16 mit kontinuierlicher Messung der Tritiumfreisetzung ist durch einen Schaden am SILOE-Reaktor verzögert worden. Die Versuche werden am MELUSINE-Reaktor weitergeführt. Bei der KFA-Jülich sind die Vorbereitungen zu den TRIDEX-Bestrahlungen soweit gediehen, daß Anfang 1988 der erste Versuch mit KfK-Probenmaterial beginnen kann. Mit TRIDEX kann in maximal zwölf getrennt gespülten und beheizten Kapseln mit jeweils drei Probensäulen die Tritiumfreisetzung kontinuierlich gemessen werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22690	03.06.02P09A	B. Dörzapf
V25130	03.06.02P10A	<u>DP H. Elbel</u>
V25131	03.06.02P10B	DI E. Günther
V25285		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
		<u>DI(FH) H.E. Häfner</u> <u>DI(FH) K. Heckert</u> Ing.grad. K. Philipp

Konstitution und Thermodynamik von oxidischen Brutstoffen

Im System $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZrO}_2$ wurden Gleichgewichtsuntersuchungen zur Aufstellung des Phasendiagramms begonnen. Die Schmelztemperatur von Li_2ZrO_3 liegt bei 1680 °C und damit höher als bisher in der Literatur angegeben.

Die Untersuchungen zur Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe wurden mit einem verbesserten Feuchtegenerator mit stufenloser und über lange Versuchszeiten konstanter Einstellung der Wasserdampfkonzentration fortgesetzt. Nach thermoanalytischen Messungen nimmt Li_4SiO_4 nur bis zu Temperaturen von ~ 450 °C Feuchtigkeit auf. Hinweise auf Abdampfprozesse oberhalb ~ 720 °C ergeben sich aus kalorimetrischen Messungen, der dabei auftretende Gewichtsverlust ist jedoch sehr gering. Bis zu Temperaturen von 850 °C konnte hierbei keine Bildung fremder Phasen nachgewiesen werden. Erst nach 20 h Glühung bei 1000 °C in 1000 ppm H_2O konnten durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen neue noch nicht identifizierte Phasen beobachtet werden.

Langzeitversuche (3 Monate) an $\gamma\text{-LiAlO}_2$ ergaben bei Raumtemperatur und Umgebungsfeuchte eine stufenweise Reaktion mit H_2O , die über LiOH , $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ und $\text{LiAlO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ als Zwischenprodukte zu neuen, noch nicht identifizierten Reaktionsprodukten führt.

Sonderfertigung

Im Zuge der Sonderfertigung von Silikatkeramiken durch isostatisches Heißpressen wurden für Eigenschaftsmessungen hochdichte Li_2SiO_3 -Proben hergestellt. Erste Versuche für hochdichte Li_4SiO_4 -Proben sind angelaufen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		F. Bauer DI K. Keller <u>Dr. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl</u> Dr. P. Weimar

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.06.02P03A	Dr. V. Schauer G. Schlickeiser <u>Dr. A. Skokan</u>

Bestrahlung von Brutmaterialien

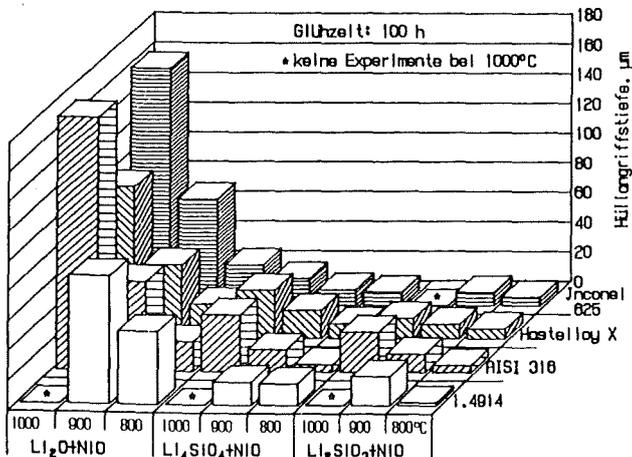
Innerhalb der europäischen Bestrahlungsserie der B15-Experimente ist das dritte Experiment DELICE 03 am OSIRIS-Reaktor in Vorbereitung. Um den Einfluß unterschiedlicher Neutronenspektren zu untersuchen, ist ein Vergleichsexperi-

Eigenschaften von oxidischen Brutstoffen

Bei der Messung thermophysikalischer Eigenschaften an Li_4SiO_4 zeichneten sich bezüglich der Wärmeleitfähigkeit starke Diskrepanzen mit bisher veröffentlichten Daten von anderer Seite ab. Die thermische Ausdehnung von Li_4SiO_4 lag um ca. 10 % höher, als die röntgenographisch bestimmte.

Die Untersuchungen mechanischer Eigenschaftswerte keramischer Brutmaterialien wurden mit der Bestimmung des E-Moduls, der Druckfestigkeit, des Kriechverhaltens sowie der Thermoschockbeständigkeit von zwei Li_4SiO_4 -Chargen (90 und 78 % TD) aus IMF III-Produktion fortgesetzt. Der E-Modul des Li_4SiO_4 ist dem des Li_2SiO_3 sehr ähnlich. Die Druckfestigkeit des 78 % dichten Li_4SiO_4 liegt mit ca. 200 MPa innerhalb des Streubandes der Li_2SiO_3 -Werte. Die des 90 % dichten Materials ist mit Werten um 100 MPa außerordentlich niedrig. Es ist nicht klar, ob dies allein auf die unterschiedliche Korngröße (ca. 100 μm bei 90 % TD und ca. 15 μm bei 78 % TD) zurückzuführen ist, oder ob auch unterschiedliche Herstellungsparameter eine Rolle spielen. Die gemessenen Kriechgeschwindigkeiten des Li_4SiO_4 liegen um eine Größenordnung höher als die des Li_2SiO_3 . Die Thermoschockbeständigkeit von Li_4SiO_4 ist relativ schlecht. Die kritische Temperaturdifferenz von 10 mm-Tabletten liegt bei < 240 K (Li_2SiO_3 : 700 K). Unter Bestrahlung verschlechtert sich die Thermoschockbeständigkeit. Vergleichsmessungen an bestrahlten und unbestrahlten Tabletten des LISA1-Bestrahlungsexperimentes ergaben eine Verringerung der kritischen Temperaturdifferenz von über 100 K.

Die chemische Verträglichkeit von Li_2O , Li_4SiO_4 und Li_2SiO_3 mit den Hüllmaterialien AISI 316, 1.4914, Hastelloy X und Inconel 625 wurde in Kapselglühversuchen im Temperaturbereich von 800 bis 1000 °C abschließend untersucht. In einer thermochemischen Studie wurden die Sauerstoffpotentiale und die Gasphasen-Partialdrucke im System Li-Si-O ermittelt. Das Verträglichkeitsverhalten von Be, das als Neutronenvervielfacher in Betracht gezogen wird, wurde gegenüber AISI 316, Li_4SiO_4 und Li_2SiO_3 zwischen 600 und 900 °C untersucht. Als vorläufige maximale Einsatztemperatur wurde 650 °C ermittelt (V24872). Die Verträglichkeitsproben wurden



Ausmaß der chemischen Wechselwirkungen zwischen Li_2O , Li_4SiO_4 und Li_2SiO_3 (mit 1 Mol% NiO) und den Hüllmaterialien 1.4914, AISI 316, Hastelloy X und Inconel 625.

sowohl mit einer Augermikrosonde als auch mit einer Ionenmikrostrahlsonde untersucht, um die chemische Zusammensetzung der Reaktionsprodukte zu ermitteln.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23761	03.06.02P01B	M. Blumhofer
V24205	03.06.02P01C	Prof. Dr. W. Dienst
24836	03.06.02P05A	Dr. O. Götzmann
V24872	03.06.02P05B	G. Haase
		<u>Dr. P. Hofmann</u>
		K.-H. Kurz
		H. Metzger
		Dr. B. Schulz
		<u>Dr. H. Zimmermann</u>

Chemisch-analytische Arbeiten

An Proben aus Verträglichkeitsuntersuchungen von Be mit AISI 316 bzw. Li_2SiO_3 wurde einerseits eine Ni-Be-Phase neben Ni-verarmtem Stahl und andererseits eine Be-O-Phase nachgewiesen.

Analysen des Flüssigbrutstoffes Pb^{17}Li wurden um die N-, V-, Al- und Ti-Bestimmung erweitert. In allen Pb^{17}Li -Proben lag der N-Gehalt niedriger als die Nachweisgrenze von 0,3 μg .

Hohe Sauerstoffgehalte waren immer von hohen Fe-, Cr- und Ni-Anteilen begleitet. Korrosionsproben aus V3Ti1Si und 1.4914 mit Pb^{17}Li und 1.4914 mit $\text{Li}_2\text{O}/\text{NiO}$ wurden mikroanalytisch nachuntersucht.

Keramische Werkstoffe wie SiC, AlN und Schichten wie TiN und TiC wurden chemisch-analytisch charakterisiert. Zu Fragen der Haftfestigkeit wurden TiN-TiB₂- und TiC-TiN-Schichten nach Kratztests oberflächenanalytisch untersucht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V25273		<u>Dr. Ch. Adelhelm</u>
V25274		Ch. Gosgnach
		D. Linder
		E. Nold
		G. Streib
		S. Winkler

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

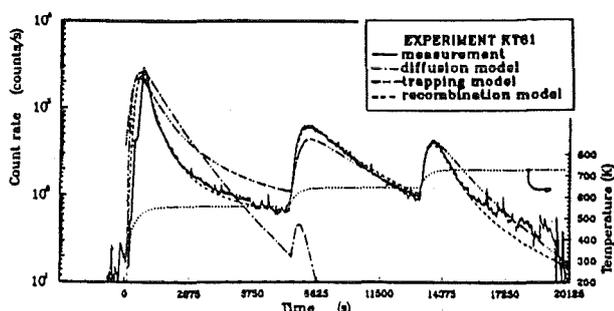
Wegen seiner hohen Lithium-Konzentration und guten Tritium-Freisetzung ist Lithiumorthosilikat der bei KfK bevorzugte feste Brutstoff. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit und begrenzte mechanische Festigkeit legen es nahe, das Material in Form kleiner Kugeln (0.5 mm Durchmesser) einzusetzen. Im INR wurden die Herstellbarkeit, die Struk-

tur, die mechanischen Eigenschaften und die Tritiumfreisetzung aus solchen Kugeln untersucht. Aus der Schmelze hergestellte Kugeln (Firma Schott, Mainz) zeigten bessere Eigenschaften als gesintertes Material (Rundheit, Oberfläche, Dichte, mechanische Festigkeit). Durch Tempern bei 1000 °C entstand eine kristalline Struktur mit Korngrößen von 10-30 µm.

Die Messungen zur in-situ Tritium-Freisetzung in Grenoble wurden fortgesetzt. Wie zu erwarten war, konnte bei 300 °C und 350 °C der asymptotische Zustand nicht erreicht werden, er wurde durch Extrapolation gewonnen. Die Werte für die Freisetzungszeit entsprechen früheren Messungen und liegen deutlich höher als bei Labormessungsdaten an extrem trockenem Material.

Außerdem wurde die Tritiumfreisetzung aus bestrahlten Proben bei stufenweiser Aufheizung bestimmt. Es wurden 60 Versuche durchgeführt und zahlreiche Parameter variiert. Einen großen Einfluß auf die Freisetzung hatten Probenfeuchte, Spülgasfeuchte und Temperatur.

Zur Tritiumfreisetzung wurden verschiedene theoretische Modelle entwickelt und mit den Messungen verglichen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel.



Tritiumfreisetzung bei stufenweiser Aufheizung einer bestrahlten Probe. Vergleich der Messung mit Rechnungen nach verschiedenen Modellen.

Deutlich die beste Übereinstimmung mit den Messungen ergibt das Rekombinationsmodell. Hierbei wird angenommen, daß Wasser mit dem Brutstoff reagiert und sich chemisch gebundene OH-Gruppen bilden. Die OH-Gruppen sind im Gitter und an den Korngrenzen angelagert. Atomar freigesetztes Tritium kann mit dem Wasserstoff der OH-Gruppen austauschen.

Im Hinblick auf die große Bedeutung der Feuchte für die Tritiumfreisetzung wurde eine neue Laborapparatur für Freisetzungsmessungen entwickelt, die eine extrem sorgfältige Trocknung des Spülgases vorsieht.

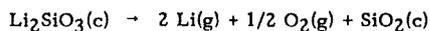
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22690	03.06.02P08A	Dr. W. Breitung
23800	03.06.02P08B	Dr. S. Dörner
23801	03.06.02P08C	(Ingenieurbüro)
24260		U. Hain
V25336		R. Huber
V25337		J. Lebkücher
		I. Schub
		Dr. G. Schumacher
		<u>Dr. H. Werle</u>

Institut für Radiochemie (IRCH)

Im Hinblick auf die Entwicklung keramischer Brutstoffe für das Brüten von Tritium in einem Fusionsreaktor werden grundlegende Arbeiten zur Ermittlung der thermischen Stabilität von Lithiumsilikaten und zur Bestimmung der Wasserstoff- bzw. Wasserlöslichkeit in diesen Substanzen durchgeführt.

Verdampfungsuntersuchungen an Lithiummetasilikat (Li₂SiO₃)

Verdampfungsuntersuchungen an Li₂SiO₃ wurden durch massenspektrometrische Knudsenzellenmessungen vorgenommen. Bei der Verdampfung von festem Li₂SiO₃(c) konnten Li⁺- und zum ersten Mal O₂⁺-Ionen als Hauptspezies im Massenspektrum nachgewiesen werden. Das p_{Li}/p_{O₂}-Verhältnis hat einen Wert von 1.88 und ist nahezu unabhängig von der Temperatur. Demnach verdampft Li₂SiO₃(c) inkongruent gemäß der Reaktion



Anhand der unter Gleichgewichtsbedingungen über festem Li₂SiO₃ gemessenen Sauerstoffpartialdrücken kann das p_{H₂O}/p_{H₂}-Verhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur aus der Beziehung

$$\log \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} = \frac{1580}{T} + 0.979$$

ermittelt werden. Daraus folgt, daß im Temperaturbereich 200 - 1000 °C Wasser die bevorzugte chemische Form des aus Lithiummetasilikat freigesetzten Tritiums ist.

Bei den Verdampfungsuntersuchungen von geschmolzenem Li₂SiO₃(l) konnten die Ionen Li⁺, O₂⁺, Li₂O⁺, LiO⁺, Li₂SiO₃⁺ und Li₃O⁺ bei unterschiedlichen Meßtemperaturen beobachtet werden. Aus den gemessenen Ionenintensitäten erfolgte die Berechnung von Partialdrücken und - nach der Methode des dritten Hauptsatzes - die der freien Reaktionsenthalpien (ΔH⁰_{298,5} in kJ/mol) der Reaktionen

a) festem Li_2SiO_3

$\text{Li}_2\text{SiO}_3(\text{c}) = 2 \text{Li}(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g}) + \text{SiO}_2(\text{c})$	1007,96±4,13
$\text{Li}_2\text{SiO}_3(\text{c}) = \text{Li}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SiO}_2(\text{c})$	540,36
$\text{Li}_2\text{O}(\text{g}) = 2 \text{Li}(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$	453,00

b) geschmolzenem Li_2SiO_3

$\text{Li}_2\text{SiO}_3(\text{l}) = 2 \text{Li}(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g}) + [\text{SiO}_2]$	984,63±5,54
$\text{Li}_2\text{SiO}_3(\text{l}) = \text{Li}_2\text{O}(\text{g}) + [\text{SiO}_2]$	531,56±4,80
$\text{Li}_2\text{O}(\text{g}) = 2 \text{Li}(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$	452,14±1,46
$\text{LiO}(\text{g}) = \text{Li}(\text{g}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$	66,85±3,59

Wasserstofflöslichkeit in Lithiummetasilikat

Wegen der erwarteten sehr geringen Löslichkeit von Wasserstoff im Li_2SiO_3 wurde eine gasvolumetrische Methode mit optimiertem Totvolumen gewählt. Zur Messung der Löslichkeit wurden etwa 500 Pellets aus Li_2SiO_3 (insgesamt etwa 45 g) in einem außenbeheizten Aluminiumoxid-Keramikbehälter im Temperaturbereich 450 - 550 °C mit Wasserstoff bei Drücken im Bereich zwischen 460 und 548 h Pa mehrmals be- und entladen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Temperatur (°C)	Beladungsdruck (h Pa)	Löslichkeit L mol H/mol Li_2SiO_3
450	468	$2,2 \cdot 10^{-5}$
450	499	$2,3 \cdot 10^{-5}$
450	548	$2,6 \cdot 10^{-5}$
500	547	$3,6 \cdot 10^{-5}$
550	541	$4,3 \cdot 10^{-5}$

Weitere Ergebnisse lieferten Messungen nach einer Tracermethode mit Tritium. Bei der Versuchsdurchführung werden Lithiummetasilikat-Pellets mit einem Gemisch aus Tritium und Wasserstoff beladen und nach Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts zwischen Gas- und Festphase der Tritiumgehalt in den Pellets durch Flüssigszintillation gemessen. Diese Versuche führten zu der Erkenntnis, daß eine wesentliche Fraktion des Tritiums an Restmengen Wasser in den Pellets irreversibel getrappt wird.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.06.02P02A 03.06.02P02B	Dr. M. Ghugla Dr. H. Ihle Dr. R.-D. Penzhorn P. Schuster K.H. Simon Dr. K. Zmbov (Gast)

Vorhaben

03.06.03 Grundlagenarbeiten zum Blanket

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

Die Grundlagenarbeiten zum Blanket betreffen im INR 1) die Auswertung, Überprüfung und Aufbereitung relevanter Wirkungsquerschnitts-Daten, 2) die Entwicklung neuartiger Rechenverfahren zum Neutronentransport, 3) die experimentelle Überprüfung von Kerndaten und Rechenmethoden durch Messung der Neutronenmultiplikation von Beryllium und Blei an der Anlage KANT.

Bei einer Berechnung der Neutronenmultiplikation in Bleikugelschalen wurden erstmals energie- und winkelabhängige Neutronenemissionsquerschnitte konsequent eingesetzt. Ermöglicht wurde dies durch die Entwicklung eines speziellen Neutronentransportprogramms sowie eines entsprechenden Programms zur Verarbeitung der doppelt-differentiellen Daten. Die Studie führte u.a. zu einer Neubewertung der Bleiwirkungsquerschnitte im Europäischen Fusionsdaten-File. Das spezielle Neutronentransportprogramm ist jetzt eindimensional in Kugel-Platten- und Zylindergeometrie einsetzbar. Arbeiten zur Entwicklung eines zweidimensionalen Modells in Platten- und Zylindergeometrie sind im Gange.

Für die Blanket- und Schild-Berechnung hat sich das Monte Carlo Programm MCNP als außerordentlich nützlich und fruchtbar erwiesen. Eine neue Programmversion mit erweiterter Datenbibliothek wurde inzwischen implementiert. Nach wie vor besteht allerdings die Notwendigkeit einer Erneuerung der MCNP Datenbibliothek. Die programmtechnischen Voraussetzungen hierfür wurden größtenteils schon geschaffen.

Die Arbeiten zur Erstellung einer fusionsorientierten gekoppelten Neutronen-Photonenbibliothek wurden fortgeführt. Die Datenstruktur soll eine einfache Handhabung und große Flexibilität ermöglichen.

Bei KANT (Karlsruher Neutronen-Transmissionsexperiment zur Bestimmung der Neutronenmultiplikation in Beryllium und Blei) wurden der Neutronengenerator, die Quellstärkenmessung mittels assoziierter α -Teilchen und die Detektoren für Neutronenspektrumsmessungen erprobt. Dazu wurde ein Deuteriumtarget verwendet. Die Messung der assoziierten α -Teilchen wurde durch eine vom Deuteronenstrahl erzeugte Röntgenstrahlung erschwert. Durch eine Lochblende konnte der Effekt so reduziert werden, daß er für die spätere Messung mit Tritiumtarget ohne Belang sein wird. Der Flüssigszintillator-Detektor, als Neutronenspektrometer oberhalb ca. 8 MeV vorgesehen, wurde aufgebaut und mit einer Cf-252-Neutronenquelle erprobt. Die für seine Eichung und die Extraktion der Energiespektren nötigen Rechenprogramme wurden beschafft und implementiert.

Das Rückstoßprotonen-Spektrometer mit seinen Auswerterroutinen wurde einmal durch Messung eines Cf-252-Neutronenspektrums zum anderen durch Vergleich mit einem ^3He -Spektrometer getestet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23788	03.06.03P01A 03.06.03P01B	Dr. I. Broeders Dr. W. Eyrich <u>Dr. U. Fischer</u> H. Fries Dr. K. Hayashi (Gast aus Japan) Dr. F. Kappler B. Krieg Dr. H. Küsters <u>Dr. U. von Möllendorff</u> DM. A. Schwenk-Ferrero DP. E. Stein E. Wiegner

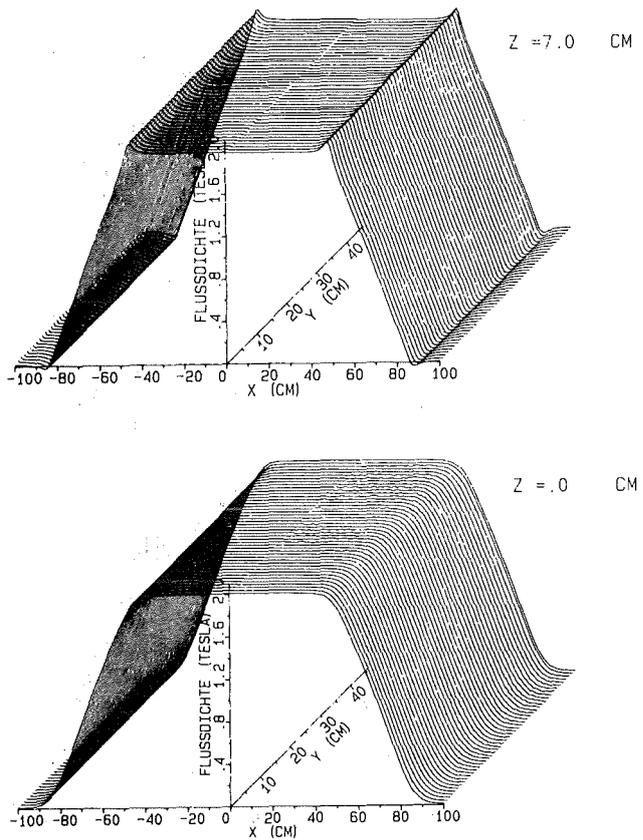
Institut für Reaktorbauelemente (IRB)

MHD-Untersuchungen an Flüssigmetall

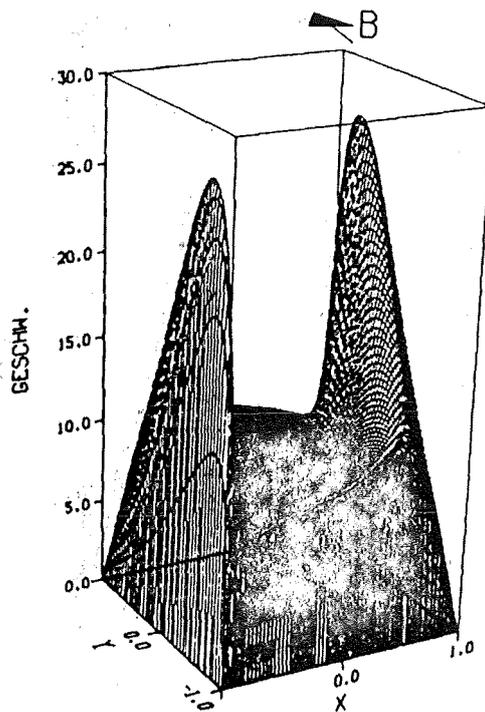
Das in 1984 gestartete Programm MEKKA (Magnetohydrodynamik Experiment in Natrium-Kalium Karlsruhe) zur Untersuchung der Druckverluste und Strömungsverteilungen von Flüssigmetallen in hohen Magnetfeldern wurde fortgesetzt. Der Aufbau des Flüssigmetallkreislaufs, für den die eutektische, bei Raumtemperatur flüssige Natrium-Kaliumlegierung (NaK) verwendet wird, ist weitgehend abgeschlossen. Es wurden erste Testläufe mit einer Bypassleitung anstelle der Teststrecke durchgeführt, wobei das NaK sowohl mit der elektromagnetischen Pumpe als auch der Spaltrohrpumpe umgewälzt wurde. Die Fertigung der Geradrohrteststrecke mit kreisförmigem Querschnitt einschließlich der erforderlichen Lecktests ist abgeschlossen.

Die für die spätere Auswertung von MHD-Experimenten erforderliche räumliche Verteilung des Magnetfeldes des normalleitenden Dipolmagneten (MA-Magnet) wurde mit Hilfe einer mit Schrittschaltmotoren gesteuerten Positioniereinrichtung ausgemessen

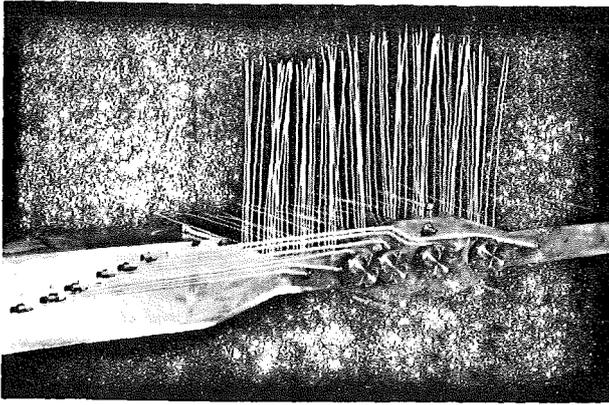
Um MHD-Strömungen besser verstehen zu lernen, wird versucht, diese mittels direkter numerischer Simulation zu berechnen. Die Behandlung zweidimensionaler Fälle konnte im wesentlichen abgeschlossen werden. Sie konnten bis zu Hartmann-Zahlen $M = 10^3$ durchgeführt werden. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit den Vorhersagen analytischer Überlegungen weitgehend überein; insbesondere konnten die bekannten "M-förmigen" Geschwindigkeitsprofile gefunden werden. Zur Zeit laufen Versuche zur direkten Simulation dreidimensionaler MHD-Strömungen. Erste Ergebnisse bei kleinen Hartmann-Zahlen ($M=10$) zeigen, daß die numerische Simulation von MHD-Strömungen auch bei drei Dimensionen zumindest für niedrige Hartmann-Zahlen möglich ist.



Verteilung des Magnetfeldes im normalleitenden Dipolmagneten (MA-Magneten) in der Mittelebene ($z=0$) und am oberen Rand ($z=+7$).



"M-förmiges" Geschwindigkeitsprofil einer eingelaufenen, zweidimensionalen MHD-Strömung bei $M=10^3$ in einem Rechteckrohr. Das Magnetfeld ist um den Winkel 10° gegen die y-Achse geneigt.



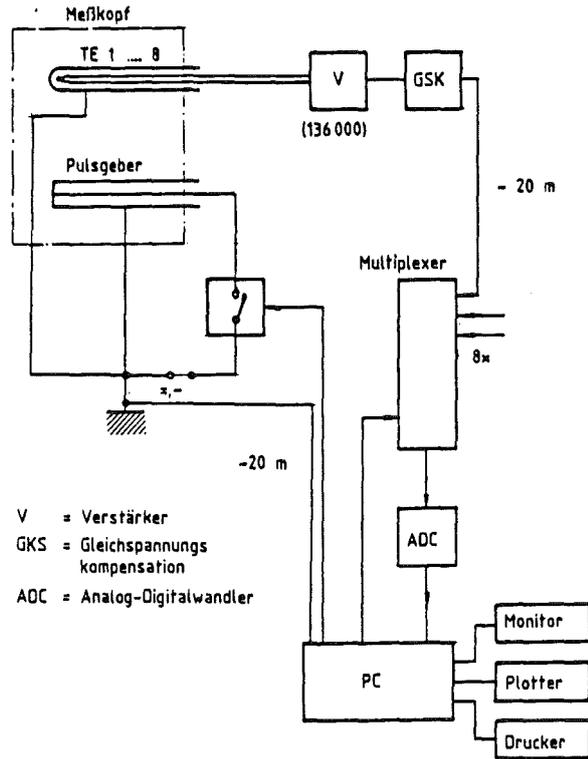
Die "Flow-Tailoring" Teststrecke mit Verengungen und Erweiterungen, Potentialmeßsonden, Druckmeßbohrungen und Traversierflanschen für die Geschwindigkeitsmeßsonde.

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, 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 für die Experimente verwendete Teststrecke, ein gerader Kanal mit rechteckigem Querschnitt (100 mmx140mm) und einer Wandstärke von 1,5 mm, wurde im KfK entworfen und gebaut. Durch Erweiterungen und Verengungen des Kanals in Richtung des Magnetfeldes (Abb. 14) wird die Strömung in Richtung 1. Wand verschoben, wodurch dort eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewirkt wird. Die Teststrecke wurde bei ANL in die ALEX-Anlage eingebaut. Die Ergebnisse erster Messungen der Potentialverteilung auf den Kanalwänden stimmen gut mit den vom ANL theoretisch vorausgesagten Werten überein.

Entwicklung einer Geschwindigkeitsmeßsonde

Zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern in Flüssigmetall mit überlagertem, starkem Magnetfeld wird im IRB ein Verfahren entwickelt. Es beruht auf der Temperatur-Puls-Laufzeit-Methode (TPL-Methode). Das Fluid wird am Meßort mit einem Temperaturpuls markiert, dessen Ausbreitung gemessen wird. Die Ausbreitung des Pulses hängt sowohl von der Temperaturleitzahl des Fluids als auch von dessen Geschwindigkeit ab. Bei explosionsartiger Energiefreisetzung läßt sich dieser Zusammenhang durch einfache analytische Gleichungen beschreiben. Das Meßverfahren ist bereits weitgehend automatisiert. Sein schematischer Aufbau ist in Abb. 15 dargestellt. Ein PC steuert die pulsartige Beheizung eines Pulsgebers und speichert die von Thermoelementen gelieferten Signale nach Verstärkung und Gleichspannungskompensation (GSK). Er wertet die gespei-

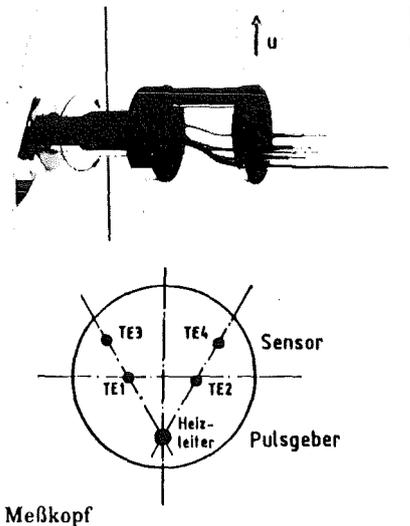


- V = Verstärker
- GKS = Gleichspannungskompensation
- ADC = Analog-Digitalwandler

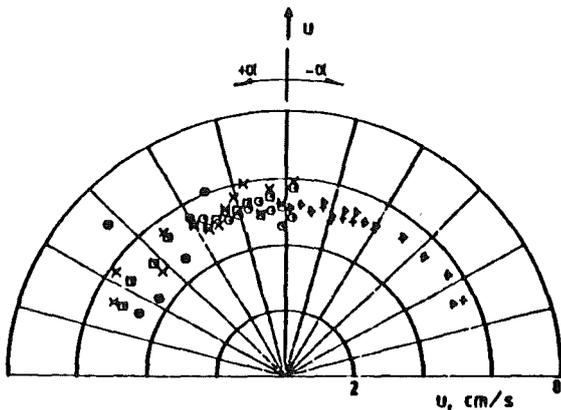
Meßsystem

cherten Signale aus und liefert den Wert der Geschwindigkeit am Meßort.

Abb zeigt eine Fotoaufnahme eines Meßkopfes sowie eine schematische Draufsicht. Er besteht aus dem Pulsgeber, ein Miniaturheizleiter von 0,5 mm Außendurchmesser und aus 4 stahlmantelten Thermoelementen von 0,25 mm Außendurchmesser mit Bornitrid als Isolator. Dieser Meßkopf wurde in der Natriumteststrecke TEFLU eingesetzt. Er läßt sich zur Ausmessung von Geschwindigkeitsprofilen längs einer Durchmesserlinie in Richtung der Achse des Pulsgebers verfahren sowie um dessen Achse drehen. Die analytische Beschreibung der Pulsausbreitung zeigt, daß die Laufzeit bis zur Detektion eines Maximums im Abstand r zwar von der Fluidgeschwindigkeit und den Stoffdaten abhängt, nicht jedoch von der Strömungsrichtung. Diese



Meßkopf



Symbol Auswertung
 ○ } Maximum
 ⊕ } MFQ (Anpassung der anal. Funkt.)
 × } Δ Maximum

Geschwindigkeit u in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung α .

wirkt sich nur auf die Höhe des zu detektierenden Maximums aus. Abb. zeigt Ergebnisse von Versuchen, bei denen der Meßkopf in der Mitte des Strömungskanals bei jeweils konstantem Fluiddurchsatz um seine Achse gedreht wurde. Bei Richtung $\alpha=0$ strömt das Fluid vom Pulsgeber zum Sensor. Bei positiven Werten von α sind Auswerte-

ergebnisse aufgetragen, bei denen der PC die Laufzeit bis zur Detektion eines Maximums an den Sensoren ermittelte; die Werte stimmen mit den Sollwerten (durchgezogen) überein. Auch wenn die Sensoren nicht in Strömungsrichtung Pulsgeber→Sensor liegen ($\alpha \neq 0$), liefert die Methode den richtigen Wert der Strömungsgeschwindigkeit ($\alpha \leq 70^\circ$). Bei negativen Werten von α sind die gleichen Messungen dargestellt. Die Auswertung erfolgte hier durch Anpassen der analytischen Gleichung an die Meßsignale. Man erkennt, die Geschwindigkeit wird auch hier richtig ermittelt, die Meßwertstreuungen sind jedoch deutlich geringer.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
2346		G. Arnold Dr. L. Barleon DI. V. Casal R. Kirchner H. Kreuzinger H. Kußmaul K.-J. Mack DI. H. Miller DP. A. Sterl K. Thomauske

Arbeitsthema 03.07 Tritiumtechnologie

Vorhaben 03.07.01 Vakuumtechnik für Fusionsanlagen

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

Entwicklung von großen Anlagenkomponenten für Tritiumbetrieb

Industriestudien

Die Fa. Pfeiffer, Wetzlar, hat zur Auslegung der vakuumtechnischen Größen einer Turbomolekularpumpe ein Rechenmodell entwickelt. Bei Modelluntersuchungen an einer 5000 l/s-Pumpe wurden Messungen zum Verhalten bei Störfällen durchgeführt. Die Extrapolation auf eine Pumpe mit 50.000 l/s ergibt bei einem Druckanstieg am Ansaugstutzen von 33 mbar/s Axialkräfte von $1,6 \cdot 10^5$ N auf die Lager. Diese Kräfte erfordern sehr steife und voluminöse Magnetlager oder geeignete Notlager.

Die Fa. VAT, Haag, wurde mit der Erstellung einer Durchführbarkeitsstudie für Ganzmetall-Vakuumschieber ND 1500 mm beauftragt. Zu Beginn dieser Studie wurden die verschiedenen vorhandenen technischen Lösungen verglichen und ausgewertet.

Die Angebote der Ausschreibung für die Studie über eine trockene Vorpumpe liegen vor. Die technischen Details der Pumpenkonzepte werden mit den Anbietern geklärt.

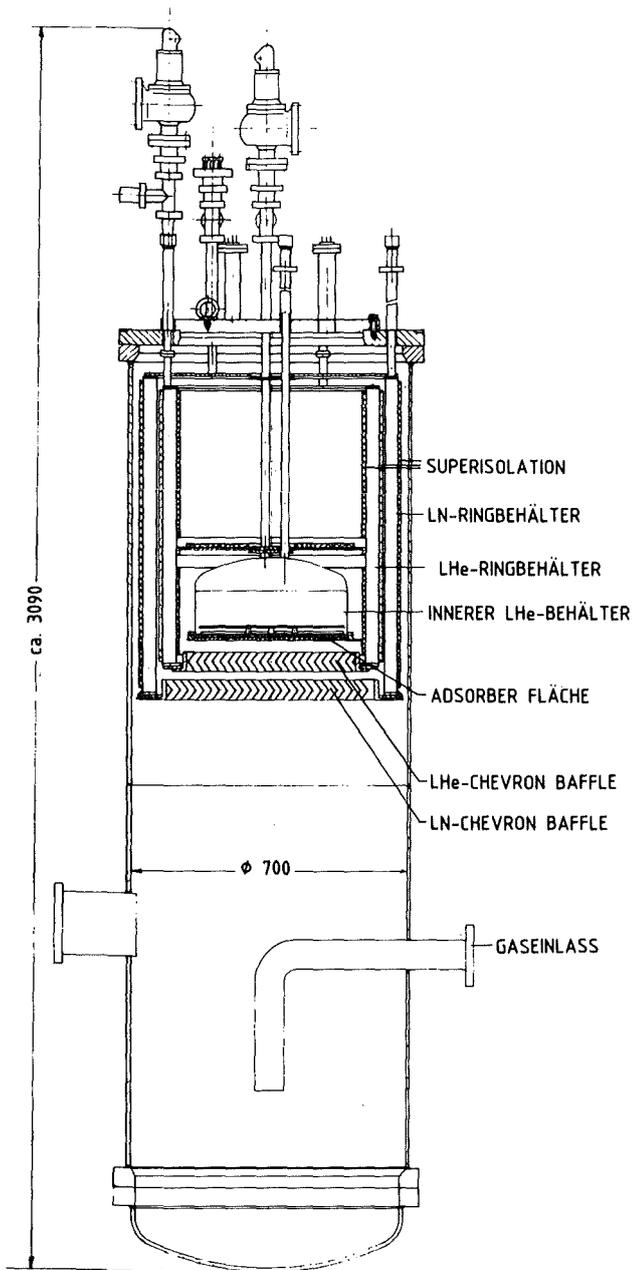
Untersuchungen zur Kryosorption von Plasmaabgas

In der Versuchsanlage TARZAN (Temperatur-Zyklierungsanlage) wurden bisher 212 Probenteller thermozykliert. Untersucht wurden 9 Proben mit Plasmaschichtbindung, 36 Proben mit Lotbindung und 167 Proben mit anorganischer Kleberbindung.

Für das Kryopumpen von Plasmaabgas unter den Betriebsbedingungen eines Fusionsreaktors mit Sorptionspaneelen von 400 mmØ wird die Versuchsanlage TITAN (Tiefen-

ratur-Adsorption) gebaut. Die Auslegungsrechnungen sind abgeschlossen. Ein Gasdosiersystem für einen Durchsatzbereich von 10^{-4} bis 10 mbarl/s wurde gebaut und in Betrieb genommen.

Verschiedene technische Lösungen für das Plasmaabgas-Pumpensystem des NET-Reaktors wurden analysiert und verglichen. Eine Sorptions-Kryopumpe wurde dafür vorgeschlagen und ausgelegt. Zur Optimierung der internen Konfiguration von Kryopumpen wurde ein Studienauftrag an die Fa. Dornier, Friedrichshafen, vergeben.



TITAN-Kryopumpe

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.07.01P01A	H. Haas
	03.07.01P02A	J. Hanauer
	03.07.01P02B	W. Höhn
		B. Kammerer
		U. Kirchhof
		H. Lukitsch
		A. Mack
		W. Obert *
		<u>D. Perinić</u>
		D. Zimmerlin
		* z.Z. bei JET, Abingdon

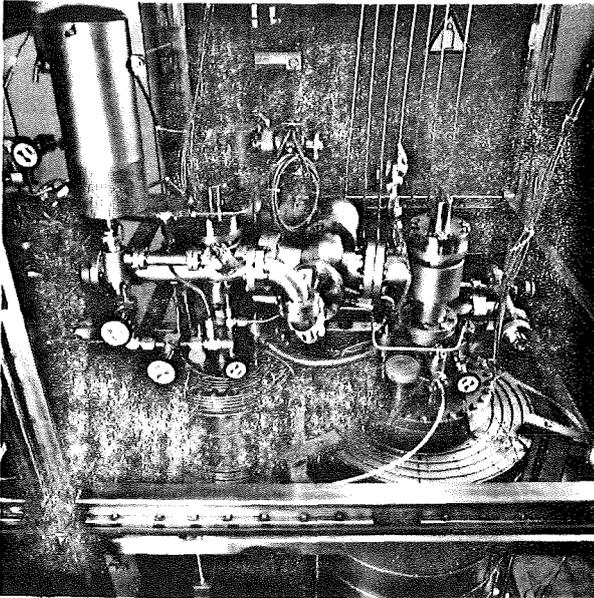
Vorhaben 03.07.02 Tritiumprozeßtechnik

Institut für Radiochemie (IRCH)

Im Rahmen der Thematik Brennstoffreinigung und Tritiumrückgewinnung aus dem primären Brennstoffkreislauf von Fusionsanlagen wird ein Verfahren zur Absorption gasförmiger Verunreinigungen an heißen Metallgettern entwickelt. Dabei wird angestrebt, die Verunreinigungen bei möglichst niederen Temperaturen der Getter um ca. vier Größenordnungen bis auf Restkonzentrationen im ppm-Bereich zu reduzieren. Ferner sollen die in NO_3 , CO_4 und Q_2O ($\text{Q} = \text{H, D, T}$) enthaltenen Wasserstoffisotope durch Cracking der Moleküle quantitativ zurückgewonnen werden. Für die entsprechenden Experimente wurde der Teststand PEGASUS (Plasma Exhaust Gas Purification System) aufgebaut, in dem ab Januar 1988 Versuche mit Wasserstoff und anschließend mit Tritium im Tracermaßstab (ca. 100 Ci) vorgesehen sind.

Die Hauptbestandteile des Teststandes sind:

- eine große Handschuhbox (3,20 m x 2 m x 1,20 m)
- ein Ultra-Hochvakuumssystem mit Turbopumpe und metallisch gedichteten Ventilen, Leckrate $\leq 10^{-7}$ mbar l/s
- eine Gasmischstation zur Herstellung der Testgase aus Trägergasen (He , Q_2) und Verunreinigungen (O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , H_2O)
- 2 Tritium-Speicher (Uranbetten)
- mehrere Gasreinigungsstufen mit 700 - 1000 g Gettermaterial
- ein Gaschromatograph mit Helium-Ionisationsdetektor, Empfindlichkeit ≤ 1 ppm



Teilansicht der PEGASUS-Anlage: Gasreiniger (links oben) und Gasvorratsbehälter mit Widerstandsheizung (Vordergrund)

sprechend. Daher wurden für die fusionsrelevanten Gase CH_4 , NH_3 , CO , CO_2 sowie den entsprechenden deuterierten Verbindungen Eichkurven einzeln und im Gemisch erstellt. Dabei zeigte sich, daß bei Mischungen von Methan mit den deuterierten Methanen innerhalb der Experimentierzeit kein Isotopenaustausch stattfindet, NH_3 und ND_3 tauschen dagegen sofort aus. Dies erschwert die quantitative Analyse dieser Gase, weil keine Eichkurven der entstehenden Verbindungen NH_2D und NHD_2 erstellt werden können. Diese deuterierten Substanzen können jedoch rechnerisch mit einer Genauigkeit von etwa 10 % erfaßt werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.07.02P03A	Dr. M. Devillers (Gast) Chr. Nolte Dr. R.-D. Penzhorn M. Sirch Dr. E. Willin

Tritiumprozeßtechnik

Die 1987 erstmals unter eigener Zielvereinbarung bearbeitete Analytik von tritiumhaltigen und tritiierten Gasen betraf methodisch hier die Gaschromatographie, die Weiterentwicklung von Ionisationskammern und ein in der Literatur unter der Bezeichnung Omegatron bekanntes Massenspektrometer.

Bezüglich der Gaschromatographie wurden Versuche zur Trennung von Wasserstoffisotopen begonnen; in diesem Zusammenhang ist ein hierfür geeignetes Säulenmaterial synthetisiert und eine Trennsäule präpariert worden. Um befriedigende Ergebnisse zu erhalten, sind weitere Optimierungen nötig.

Eine in Zusammenarbeit mit Ontario Hydro, Kanada, entwickelte Ionisationskammer, die bereits in einer Reihe anderer Versuche erfolgreich zur Tritiumpartialdruckmessung eingesetzt wurde, konnte inzwischen auch im Hinblick auf die Absolutdruckabhängigkeit des Meßsignals charakterisiert werden. Eine abgeänderte Version der I-Kammer wurde ad hoc mit Heizschalen ausgestattet und ist als Detektor zur Radiogaschromatographie vorgesehen.

Zur massenspektroskopischen Analyse von Gemischen aller Wasserstoffisotope und Helium wurde eine Vakuumapparatur mit einem nicht massediskriminierenden Gaseinlaßsystem aufgebaut. Leider verzögerte sich die Lieferung des Massenseparators, d.h. des Omegatrons, um mehr als drei Monate; daher liegen Ergebnisse hierzu noch nicht vor.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. M. Glugla Dr. H.E. Noppel Dr. R.-D. Penzhorn K.H. Simon

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24423		Dr. H. Albrecht
25360		Th. Kastner
25365		U. Kuhnes P. Schuster

Tritiumspeicherung in Metallen

Die Untersuchungen zur Wasserstoffgetterung an Titan wurden abgeschlossen. Neu begonnen wurden die Messungen der Absorptionsisothermen an Zirkon/Kobalt. Die Ergebnisse zeigen, daß der Zersetzungsdruck von $\text{ZrCoH}_{0,8}$ durch die Funktion

$$\log p_{\text{H}_2}/\text{Pa} = - \left(\frac{4751 + 183}{T} + 12,74 \pm 0,35 \right)$$

wiedergegeben wird. Daraus ergibt sich ein Wasserstoffpartialdruck bei Zimmertemperatur von $6 \cdot 10^{-6}$ mbar (vgl. mit Urantritid: $4 \cdot 10^{-6}$ mbar). Die bei Zimmertemperatur und hoher Wasserstoffbeladung gebildete ternäre Verbindung ist nicht pyrophor. Um den Effekt von Fremdgasen auf das System Wasserstoff-ZrCo zu ermitteln, wurde die Legierung unter strömendem Methan auf 304 °C erhitzt. Die gaschromatographische Analyse der Gasphase ergab, daß das Methan unter diesen Bedingungen langsam in die Elemente ge-crackt wird. Der Zersetzung des Methans an der ZrCo-Oberfläche beeinträchtigt dessen Getter-eigenschaften nicht.

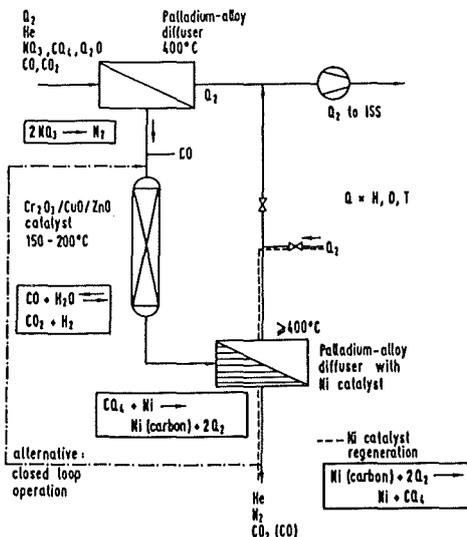
Bei der Analytik des Plasmaexhaustgases werden Meßmethoden benötigt, die eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen deuterierten Verbindungen erlauben. In diesem Zusammenhang erscheint die Methode der Fourier-Transform Infrarot Spektroskopie besonders erfolgver-

Plasma-Exhaust-Reinigung durch Kombination von katalytischen Reaktionen mit selektiven Permeationsmembranen

Das Fusionstechnologie-Programm für NET mit DT Brennstoffkreislauf setzt voraus, daß rechtzeitig geeignete Verfahrens- und Ingenieurkonzepte sowohl für die Abtrennung der "Fusionsasche" Helium als auch für die bei der Fusion unvermeidlichen teilweise als deuterierte/tritiierte Verbindungen auftretenden Verunreinigungen CQ_4 ($Q = D, T$), CO , CO_2 , O_2O , N_2 , NQ_3 usw. vom unverbrauchten Brennstoff zur Verfügung stehen. Außerdem müssen die Wasserstoffisotope aus den Verunreinigungen nahezu vollständig zurückgewonnen werden.

Nach bisherigen Erkenntnissen haben sich zwei auf experimentellen Arbeiten basierende Verfahrenskonzepte als aussichtsreich und für eine Weiterentwicklung zu einer Pilotanlage geeignet erwiesen. In beiden Verfahren werden in einem ersten Schritt die Verunreinigungen und Helium durch einen Palladium/Silber-Permeator bei $350\text{ }^\circ\text{C}$ nahezu vollständig aus dem Brennstoffstrom entfernt. Das zu den Verunreinigungen gehörende Ammoniak, NO_3 , wird an der Membrane katalytisch in die Elemente gecrackt und der freiwerdende Wasserstoff zusammen mit dem ungebundenen Brennstoff zurückgewonnen. Dieser in eigenen Versuchen auch unter Verwendung hoher Tritiummengen beobachtete Vorgang stellt eine wesentliche Vereinfachung für den gesamten Verfahrensablauf dar.

Gemäß dem ersten Verfahrenskonzept werden in den darauffolgenden Prozeßschritten die Wasserstoffisotope aus dem O_2O durch Reaktion mit Kohlenstoffmonoxid entsprechend der bekannten Wassergasreaktion in Gegenwart eines zinkstabilisierten Kupferchromit-Katalysators bei $150 - 170\text{ }^\circ\text{C}$ zu O_2 konvertiert. Der theoretisch zu erwartende unbedeutende Einfluß von Methan auf das



Schematische Darstellung eines Plasma-Exhaust-Reinigungsverfahrens

sich einstellende thermodynamische Gleichgewicht wurde experimentell bestätigt. Methan wird in dem sich anschließenden Schritt ebenfalls katalytisch bei $500\text{ }^\circ\text{C}$ an einem Ni-Katalysator in Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt. Experimente mit CD_4 und D_2 haben ergeben, daß der sich auf dem Katalysator niederschlagende Kohlenstoff keine nennenswerte Wasserstoffmenge inkorporiert. Alternativ kann - so im zweiten Verfahren - Methan zuerst, zusammen mit Kohlenstoffmonoxid und Restmengen an Wasserstoff, zu Wasser und Kohlenstoffdioxid an einem geeigneten Sauerstoffdonator oxidiert werden. Danach wird wie im bereits beschriebenen Verfahren, das O_2O zu O_2 überführt.

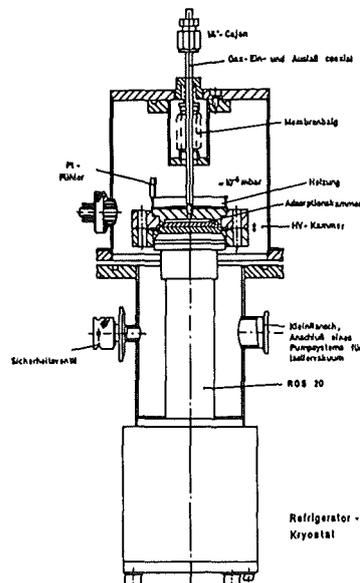
Beiden Verfahren wiederum gemeinsam ist die Abtrennung der aus den Verunreinigungen freigesetzten Wasserstoffisotope durch einen zweiten Palladium/Silber-Permeator.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24451		Dr. M. Glugla
25242		K. Günther
25243		Ing. D. Herbrechter (KAH)
		K.H. Simon
		Dr. R.-D. Penzhorn
		Dr. R. Rodriguez (Gast)

Kryoadsorption an Molekularsieben

Zu den grundsätzlich möglichen Reinigungsverfahren für den Fusionsbrennstoff bzw. das Brutmantel-Spülgas zählt die Rückhaltung von Verunreinigungen durch Kryoadsorption am Molekularsieb oder anderen Adsorbenten. Im Hinblick auf die technische Anwendung ist dabei die Ermittlung des kosorbierten und die des permanent eingelagerten Tritiums von besonderer Bedeutung.

Im Berichtszeitraum ist ein Refrigerator-Kryostat konzipiert und in Auftrag gegeben worden, der mit Tracermengen an Tritium im geschlossenen Kreislauf betrieben



Aufbau des Refrigerator-Kryostaten

werden soll . Gegenwärtig wird eine Handschuhbox, in der sich noch eine Versuchsanordnung für Kr-85-Experimente befindet, umgerüstet und für die vorgesehenen Kryoversuche bereitgestellt. Außerdem wird die erforderliche Analytik, insbesondere die Radiogaschromatographie, Massenspektroskopie, Feuchtemessung, Fouriertransform-Infrarot-Spektroskopie, Ionisationskammer usw. ertüchtigt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. E. Noppel Dr. R.-D. Penzhorn

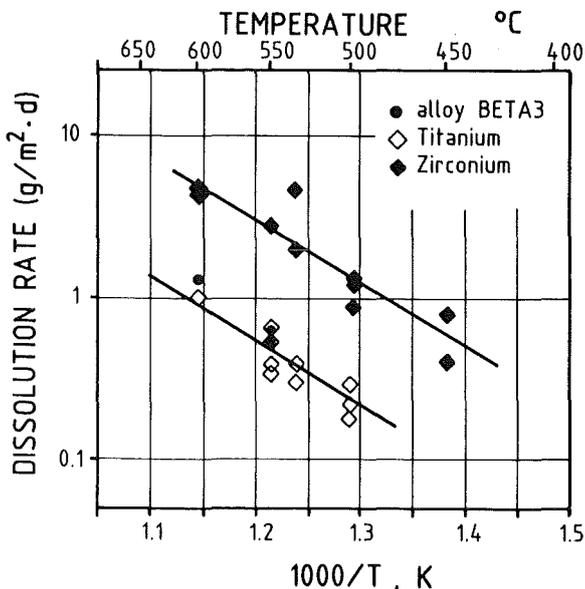
Tritiumanreicherung von Prozesswässern

Die Arbeiten zu dieser Zielvereinbarung laufen parallel mit den Arbeiten zur Zielvereinbarung 04.02.01 und sind unter dieser Nummer beschrieben.

Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

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

Eine Grundvoraussetzung für die Verwendung von festen Getterstoffen zur Tritiumextraktion ist ihre Verträglichkeit mit dem flüssigen Eutektikum. Laborexperimente mit Kapseln wurden deshalb auch 1987 fortgeführt. Die Abbildung zeigt Ergebnisse für drei mögliche Gettermetalle. Die hohen Korrosionsraten erlauben ihre Anwendung nur bei Temperaturen, die wesentlich unter 500°C liegen. Das sollte jedoch kein Hinderungsgrund für den Einsatz dieser Metalle sein, da wegen der Korrosion der Strukturmaterialien gegenwärtig ebenfalls Blankettemperaturen unterhalb von 400°C diskutiert werden.



Mit dem TRITEX-Kreislauf sollen Fragen des Wasserstofftransports in einem gepumpten Pb-17Li-Kreislauf, sowie der Kinetik der Wasserstoffaufnahme untersucht werden. TRITEX befindet sich in der Inbetriebnahmephase. Parallel zu der TRITEX-Erstellung wurde die Permeation von Deuterium durch das Wandmaterial des Kreislaufs, den Stahl 1.4922, untersucht sowie in einem Thermoloop der Deuteriumtransport durch das flüssige Metall nachgewiesen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25153	03.07.02P06A	H. Feuerstein
V 25154	03.03.02P06B	H. Gräbner
	03.07.02P06C	P. Welter
		J. Oschinski
		S. Horn
		G. Kieser (DTI)
		N. Paroth

Vorhaben

03.07.03 Baubegleitende Untersuchungen zum Tritium-Labor

Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)

Gemäß dem Planungsfortschritt zum Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) wurde die erste Version eines Buchhalterprogramms entwickelt. Dieses Programm soll vor allem dem Betreiber des Labors bei der Tritium-Inventur dienen; es ist aber auch so ausgelegt, daß die Studien zur Modellbildung durch die entsprechende Datensammlung Unterstützung finden werden. Insbesondere soll später mittels einer Datenbank das Prozeßgeschehen von Teilen des Labors (z.B. der Infrastruktur) festgehalten werden. Diese Daten können beispielsweise zur Validierung von Simulationsmodellen eingesetzt werden. Ein vorläufiges Konzept dieser Datenbank wurde erarbeitet.

Das Buchhalterprogramm wurde durch Studien zur Bilanzierung ergänzt. Eine erste Untersuchung betrachtet Tritiumtransfers innerhalb der TLK-Infrastruktur. Beispielfähig wurden das Lager und die Transferstation herangezogen. Quantitativ wurde für dieses Beispiel ermittelt, wie sich eine bessere Lokalisierung eines unterstellten Verlusts auf die zugehörige Entdeckungswahrscheinlichkeit auswirkt. Eine weitere Arbeit betrachtet den Tritiumtransfer. Rechenergebnisse zeigen, daß die Güte der Bilanzierung mit zunehmender Inventurhäufigkeit abnimmt

Das Programmsystem KATRIA zur Modellierung des Tritiumkreislaufs in einem Fusionsreaktor wurde so erweitert, daß nunmehr das Tritiuminventar beliebig aufgebauter Brennstoffkreisläufe als Funktion der Zeit sowie für Normal- und Störfallbetrieb berechnet werden kann; damit ist es möglich, auf Planungsänderungen ohne nennenswerten zusätzlichen Aufwand mit begleitenden Modellrechnungen reagieren zu können /22625, V24987/.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22625 V24987 25418	03.05.02P19A	Dr. E. Gabowitsch <u>Dr. G. Spannagel</u> (B. Haas, HDI) (P. Schmitteckert, PROTEUS)

In einer Glasapparatur wurden mit 20 g-Mengen Voruntersuchungen zu den VERDI-Versuchen mit dem Ziel der optimalen Pulverisierung des Urans und der Verminderung des Sinterns beim Aufheizen des Uranpulvers gemacht. In dieser Apparatur wurden auch Getterversuche durchgeführt, wobei Auslegungsdaten für die Getterapparate gewonnen wurden (Uran-Ausnutzungsgrade und erreichbare Reinigungsfaktoren).

Die Ergebnisse der Versuche von Glasapparatur und Anlage VERDI sind vergleichbar.

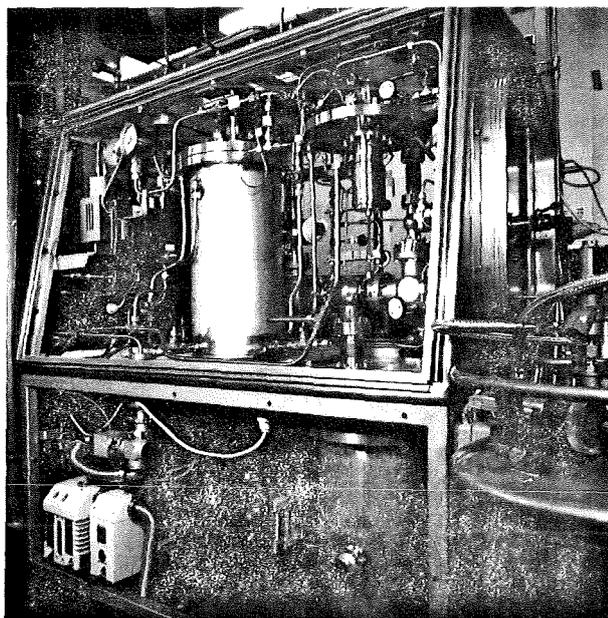
Hauptabteilung Ingenieurtechnik (IT)

Für die Systeme der Tritium-Versorgung des TLK hat der Generalingenieur die Planung des fest installierten Tritium-Transfersystems und des Tritiumlagers (Grundstufe: 10g Tritium) weitgehend abgeschlossen. Nach Abstimmung und Prüfung der systemübergreifenden Prozesse steht die Freigabe zur Erstellung der Anfrageunterlagen bevor. Bearbeitet wurden ferner die Handschuhkästen als zweite Hüllen mit den angeschlossenen Tritiumrückhaltesystemen und die mobile Transferstation. Die begleitenden Arbeiten und die Beurteilung der Planungsunterlagen erwiesen sich als schwierig und aufwendig, da viele Iterationsschritte erforderlich waren und das übergeordnete sicherheitstechnische Konzept nicht frühzeitig vorlag bzw. von KfK schließlich selbst erarbeitet werden mußte.

Studien zweier Firmen zur gaschromatographischen Wasserstoffisotopentrennung wurden beurteilt und ein Lieferantenvorschlag gemacht.

Nach Auswahl des Lieferanten für die Handschuhkästen des TLK wurde eine Testeinheit spezifiziert und bestellt.

Die Abnahme des Versuchsstandes VERDI zur Erprobung des Tritiumreinigungsverfahrens durch den TÜV (Veranlassung der Genehmigungsbehörde) war gründlich und langwierig, obwohl nur Anzeigepflicht besteht. Die ersten Messungen zur Entfernung der Verunreinigungen O₂, N₂, CO₂, CH₄, NH₃ bei Temperaturen ≤ 700 °C bestätigten die Anwendbarkeit des Verfahrens (Urangetter und Molekularsieb), zeigten aber, daß auf den Einsatz eines Getters bei hoher Temperatur (900 °C) auf Dauer nicht verzichtet werden kann, ohne erheblichen Tritiumverlust durch Wasserstoffverbindungen im Abfall hinnehmen zu müssen. Der für diese Temperaturen gebaute Apparat mit permeationshemmender Keramik als Uranbehälter muß deshalb weiterentwickelt werden. Ein Uranbehälter aus Edelstahl für die erste Getterstufe bei 500 - 600°C wurde mit mehreren Kammern konstruiert. Diese Bauweise läßt noch bessere Dekontamination durch Vermeiden durchgehender unerfaßter Randströme erwarten. Am Aufbau und Betrieb von VERDI ist KTB beteiligt.



Versuchsstand VERDI
in der Box rechts: Einkammer-Urangetterbehälter
links: mit wassergekühltem Außenbehälter

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.07.03P01A 03.07.03P01B	A. Edinger J. Hanauer <u>E. Hutter</u> G. Neffe P. Schira U. Tamm J. Weinhold

Arbeitsthema 03.08 Sicherheit und Umwelteinfluß

Vorhaben 03.08.01 Komponentenbezogene Sicherheitsuntersuchungen

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

a) Stabilitätsanalysen für den Kryostaten

Zur Überprüfung der früher entwickelten, einfach anwendbaren Lösungsstrategie für die Analyse von Beulproblemen werden auch Beulexperimente herangezogen. Abb. 9 zeigt die Durchführung und die Ergebnisse eines Beulexperimentes an einem dünnwandigen Zylinder. Die Belastung erfolgte durch Absenkung des Zylinderinnendruckes. Bei praktischen Beulproblemen sind die immer vorhandenen, fertigungsbedingten Imperfektionen von wesentlicher Bedeutung. Abb. 9 zeigt, wie sich aus der anfänglichen Imperfektion schon vor Erreichen der Beullast die Beulform entwickelt. (Bei einem perfekten Zylinder würde die Beulform bei Erreichen der Beullast plötzlich auftreten.)

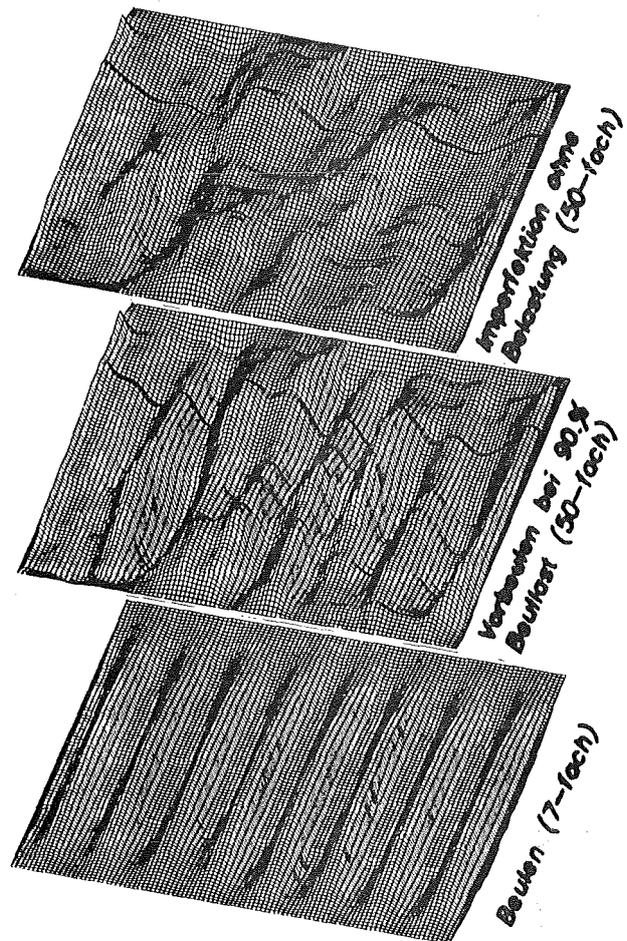
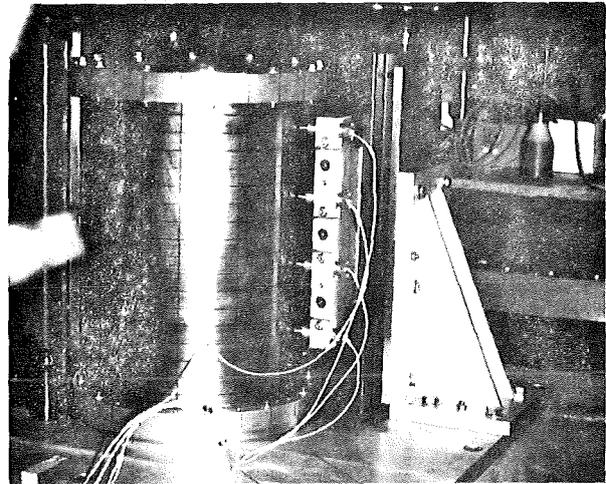
Dieser Übergang muß von der Rechnung näherungsweise beschrieben werden. Bei obigem Experiment wurde gleichzeitig die Steifigkeitsverminderung infolge der anwachsenden Belastung gemessen. Bei ausreichend kleinen Lastschritten ist auf diese Weise eine zerstörungsfreie Beullastbestimmung möglich.

b) Störfallbeanspruchung eines Blanket-Kanisters

Der Versagensdruck eines Blanket-Kanisters für das von KfK entwickelte Feststoff-Blanket mit Heliumkühlung wurde in einem Experiment ermittelt. Er lag bei 90 bar. Eine Erhöhung dieses Wertes durch bessere Fertigungsbedingungen erscheint möglich. In früheren Rechnungen traten erste plastische Verformungen bereits bei 10 bar, ein Versagen durch plastische Instabilität dagegen erst bei über 200 bar auf. Damit wurde gezeigt, daß bei einer einmaligen Störfallbeanspruchung die klassische Auslegungsgrenze der beginnenden Plastizität erheblich überschritten werden darf. Bei sorgfältiger Auslegung und Herstellung vermag der Kanister dem größten diskutierten Störfalldruck von 60 bar standzuhalten.

c) Versagensverhalten eines Toroidalfeld-Magneten

Wie unter 03.08.02 erläutert, wurde in Zusammenarbeit mit dem ITP mit Untersuchungen zum störfallbedingten Versagensverhalten der Struktur eines supraleitenden Toroidalfeld-Magneten begonnen. Als Anfangsstörung wird der Bruch eines Leiters in einer Spule angenommen. Interessierende Fragen sind: Wie ändert sich das Temperaturfeld infolge der durch den Lichtbogen erzeugten Wärme; kommt es zum Versagen weiterer Windungen; wie entwickeln sich die Wärmequellen; werden durch Versagen der Isolation zusätzliche Ströme induziert? Dazu werden Wärmeleitungs-



rad. Abweichung vom Kreiszyylinder
(überhöht dargestellt)

Beulexperiment an einem außendruckbelasteten, dünnwandigen Kreiszyylinder mit geometrisch imperfekter Mantelfläche

rechnungen für die sehr inhomogene Leitergeometrie des Magneten durchgeführt. Des weiteren wird untersucht, wie sich ein in einem Querschnitt durchschmolzener Magnet unter den vorliegenden elektromagnetischen Kräften verformt. Dazu werden strukturmechanische Rechnungen durchgeführt, die auch plastische Beanspruchungszustände zu beschreiben gestatten. Von besonderer Bedeutung ist, ob sich ein ausgeprägtes plastisches Gelenk auszubilden vermag, das möglicherweise zu einer zweiten Bruchstelle und damit zu einem freifliegenden Trümmerteil führt.

d) Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Die Zuverlässigkeit der Stromabschaltung für die europäische supraleitende Magnetspule im Rahmen des LCT-Projektes (Large Coil Task) war Gegenstand der Untersuchungen. Als auslösendes Ereignis wurde der Verlust der Supraleitung angenommen. Bei der Systemanalyse der vorhandenen Stromabschaltung wurden alle Komponenten identifiziert und berücksichtigt, die die Zuverlässigkeit der Abschaltung beeinflussen, wie z.B. Quench-Detektoren, Hoch- und Niederspannungsschalter, logische Steuerungen, usw. Für die Ermittlung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems wurden alle Ausfallarten der einzelnen Komponenten betrachtet, die zur Unverfügbarkeit des Gesamtsystems beitragen. Wartungs- und Reparaturstrategien wurden angemessen berücksichtigt. Ziel der Analyse war es, die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihres Beitrages zur Unverfügbarkeit des Gesamtsystems zu bewerten, um so kritische Komponenten aufzufinden und damit die Grundlage für zukünftige Systemverbesserungen zu schaffen. Erste Rechnungen deuten darauf hin, daß die eingesetzten Logik-Komponenten, das sind programmierbare Mikroprozessorsteuerungen, die Systemzuverlässigkeit der Stromabschaltung am stärksten beeinflussen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24603	03.08.01P02A	B. Dolensky
24791	03.08.01P05A	Y.S. Hoang
24792	03.08.01P05B	<u>R. Krieg</u>
24793		T. Malmberg
		<u>S. Raff</u>
		<u>H. Schnauder</u>
		E. Wehner
		A. Wickenhäuser
		E. Wolf

Institut für Datenverarbeitung in der Technik (IDT)

Rechnereinsatz an der Versuchsanordnung TESPE

In toroidalen Magnetsystemen kann aufgrund einer magnetoelastischen Wechselwirkung ab einem kritischen Strom die seitliche Lage der Spulen instabil werden. Die Untersuchung zu diesem Buckling-Effekt wurde am TESPE 1987 mit der Veröffentlichung der Ergebnisse abgeschlossen /23714, 24486, 22766/. Die Experimente zeigten u. a., daß die Stabilität der Spulenlage durch Messung der Eigenfrequenzen der seitlichen Schwingungen überwachbar ist und daß schon die geringen Schwingungen der Spulen aufgrund der Betriebserregung genügen können, um die Eigenfrequenzen zu bestimmen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23714	03.08.01P01A	<u>Dr. W. Geiger</u>
24486		
22766		

Institut für Technische Physik (ITP)

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 werden in TESPE-S untersucht. Zunächst wurden solche Betriebszustände und Störungen eingestellt und in getrennten Experimenten untersucht, die möglichen Zerstörungen von Magneten vorausgehen. Mit der Durchführung von Experimenten zu Vakuumzusammenbruch, Kurzschlüssen, Verlust der Kühlung, Hot-spot-Verhalten sowie Lichtbogenentladungen an Opferelektroden ist diese Experimentierphase mit nicht-zerstörenden Tests abgeschlossen. Es sind nun Versuche in Vorbereitung, die die sichere Handhabung eines supraleitenden Magneten auch im Falle seiner lokalen Zerstörung zeigen sollen. Über Code-Entwicklungen und -Verifizierungen am TESPE-S-Experiment wird versucht, die Ergebnisse auf andere, größere Magnetsysteme zu übertragen.

1. Grenzwerte

Der Torus war für einen Betriebsstrom von 7 kA bei einem maximalen Magnetfeld an der Wicklung von 7 T entworfen worden. Nachdem diese Werte in den vergangenen Betriebsjahren vielfach angesteuert und immer ohne vorzeitigen Quench erreicht worden waren, wurde Ende 1987 das Mag-

netssystem auf seine Grenzwerte gefahren. Der erste Quench trat bei ca. 7,7 kA in Spule D3 auf. In nur 3 Schritten konnte das System auf 8 kA und 8 T, bei einer gespeicherten Energie von rund 11 MJ, gebracht werden. Die Temperaturreserve bei diesen Werten liegt bei nur 0,3 K und der Strom bei rund 95 % des Kurzprobenwertes. Vier der sechs Spulen erwiesen sich als besonders stabil, und ein Quench trat bei ihnen bisher nicht auf. Damit wurde gezeigt, daß auch größere Magnetsysteme nach dem hier entworfenen Konzept gebaut und sicher betrieben werden können: Hohe Stromdichten bei gleichzeitig erhöhter mechanischer Festigkeit durch weniger Kupfer für die elektrische und mehr Stahl für die mechanische Stabilisierung des Supraleiters, sowie durch hohe Qualität der mechanischen Fertigung der Spulen und deren Einpassung in ihr Stahlgehäuse. Dagegen ist die konzipierte direkte Benetzung der He-transparenten Wicklung mit flüssigem Helium nicht notwendig, wie Versuche zum Betrieb von auf 5,8 K angewärmten Spulen bei Strömen bis zu 70 % des Kurzprobenwertes gezeigt haben.

2. Kühlmittelausfall

Bei einem Versagen der Heliumzufuhr wird bei badgekühlten Magneten zunächst der Heliumvorrat im Magneten ohne Temperaturerhöhung verbraucht. Bei TESPE-S ist die entsprechende Zeit 1-2 Stunden. Bei dem sich anschließenden Temperaturanstieg verhalten sich badgekühlte und mit überkritischem Helium gekühlte Magnete ähnlich. Bei etwa 1 K Temperaturerhöhung der Wicklung muß spätestens abgeschaltet werden, da dann die Temperaturreserve beim Nennstrom von 7 kA verzehrt ist und sich normalleitende Bereiche ausbilden würden. Bei TESPE-S liegt diese Zeit typisch bei 10 min und für größere Magnete wegen der größeren Masse noch darüber. Zu klären war demnach, ob die vorhandene Temperaturreserve ausgenutzt werden kann. Dazu wurde eine der TESPE-S-Spulen entsprechend angewärmt und anschließend das Gesamtsystem bis zum Quench in dieser Spule hochgefahren. Beispielsweise konnte die bei 5,8 kA/5,8 T vorhandene Reserve von 1,5 K voll ausgenutzt werden und damit gezeigt werden, daß bei Kühlmittelausfall eine ausreichende Zeit für Gegenmaßnahmen verfügbar ist, auch wenn keine aktive Kühlung angewendet wird.

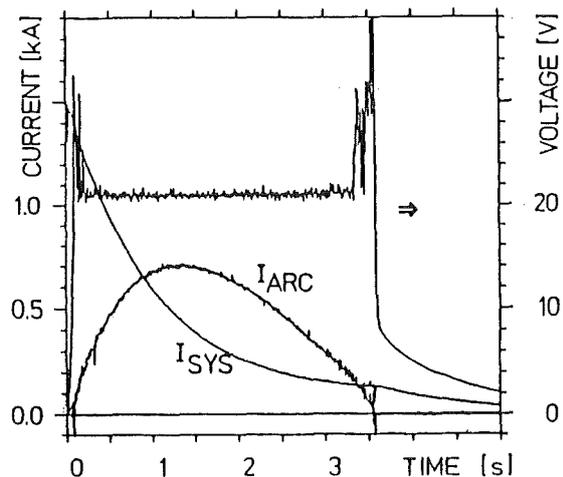
3. Hot-spot

Im Normalfall wird das Auftreten einer normalleitenden Zone im Supraleiter mit geeigneter Instrumentierung detektiert und der Magnet durch Schnellabschaltung geschützt. Bei mangelhafter Funktion dieses Sicherheitssystems kann es jedoch lokal zu unzulässig hohen Temperaturen, zum Durchbrennen des Leiters und damit zu einem Lichtbogen kommen. Erste Untersuchungen wurden mit verzögert einsetzender Abschaltung durchgeführt, z.B. wurden bei 6500 A Zeiten bis zu 2 s und bei 4500 A bis zu 4 s eingestellt. Die bisherige maximale Temperatur betrug etwa 90 K. In künftigen Versuchen wird die Abschaltverzögerung und damit die Temperatur schrittweise bis zu einer Schädigung erhöht.

4. Lichtbögen

Die Eigenschaften von Lichtbögen sind stark von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängig. Tritt ein Lichtbogen im oder an einem supraleitenden Magneten auf, so ist zu erwarten, daß sein Wicklungs- und Gehäuseaufbau, die beteiligten Materialien und das Magnetfeld wesentliche Rollen spielen. Insbesondere ist auch das Systemverhalten des Magneten mit Lichtbogen und des restlichen Magnet-systems zu untersuchen. Dazu wurden zunächst nichtzerstörende Tests durchgeführt, bei denen ein Lichtbogen über einem Magneten in speziellen mit Heliumgas gefüllten Lichtbogenkammern initiiert wurde.

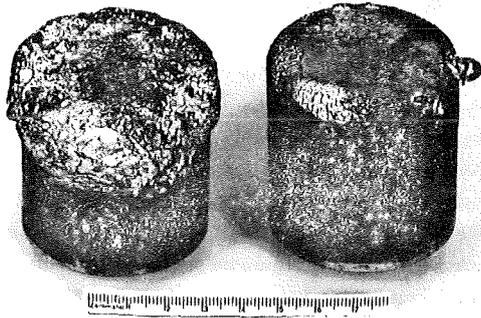
Die Energie für den Lichtbogen stammt aus dem Magnet-system. Zur Initiierung des Lichtbogens wurden drei verschiedene Methoden erprobt, von denen sich zwei als reproduzierbar und zuverlässig erwiesen. Im ersten Fall wurde zunächst eine Schnellentladung in einen externen Widerstand begonnen; unmittelbar darauf wurde nach Art einer Schmelzsicherung ein dünner Kupferdraht in dem Gasraum zwischen Polen der Lichtbogenkammer verdampft. Durch die erzeugten Ladungsträger konnte der Isolationswiderstand der Gasstrecke reduziert und die Verwendung von Hochspannung vermieden werden. Der brennende Lichtbogen wirkt elektrisch ähnlich wie ein Kurzschluß über dem Magneten, so wie er früher untersucht worden war. Nicht nur vom betroffenen Magneten, sondern durch elektromagnetische Kopplung auch von Nachbarmagneten, wird beim Entladen Energie in den Lichtbogen gepumpt. Die Überlagerung dieser Effekte ergibt für den zeitlichen Verlauf des Lichtbogenstroms I_{ARC} und des Systemstroms I_{SYS} die abgebildeten Meßkurven. Bei einem ruhigen Brennen



Zeitlicher Verlauf von Systemstrom I_{SYS} , Lichtbogenstrom I_{ARC} und Lichtbogenspannung.

des Lichtbogens erweist sich die Brennspannung als konstant (20 - 30 V je nach Gasdruck). Der Einfluß folgender Parameter auf Spannung und Strom des Lichtbogens wurde untersucht: Systemstrom (500 - 6000 A), Elektrodenabstand (4 - 20 mm), Gasdruck (40 - 1000 mbar), unterschiedliche Elektrodenform und -anordnungen, Fremdmaterial und

räumliche Einengungen. Als Beispiel für die zerstörende Wirkung des Lichtbogens sind in nachfolgender Abbildung die Elektroden nach einem 3140 A-Lichtbogen zu sehen; es sind 171 g Kupfer abgeschmolzen. Für Lichtbögen an Supraleitern anstelle der Opferelektroden wäre die Schädigung wegen der um mehr als eine Größenordnung höheren Stromdichte erheblich größer, ganz abgesehen von der weit höheren gespeicherten Energie und entsprechend längeren Brenndauer (bei NET bis zu 2 Stunden, falls sämtliche Energie einer Spule im Lichtbogen deponiert würde). Die



Elektroden nach einem Lichtbogen von 3140 A.

zweite zur Lichtbogen-Initiierung eingesetzte Methode war die der Trennung von stromdurchflossenen Kontakten. Hierzu waren die Pole der Lichtbogenkammer beim Entladen des Magnetsystems in Kurzschlußposition, wodurch ein Kurzschlußstrom angeworfen wurde. Nach Erreichen eines gewünschten Stroms wurden die Pole elektromotorisch auseinandergefahren. Dadurch wurde Leiterbruch und Durchbrennen des Leiters simuliert und ein entsprechender Lichtbogen erzeugt.

Das Brennverhalten eines Lichtbogens, der an den Stromzuführungen der Magnete entstanden ist, wurde an sog. Laufschienen simuliert und untersucht. Durch die Lorentzkraft getrieben, erreichte die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens Werte bis zu 100 m/s bei Stromstärken von 1000 A. Die intensivere Kühlung des sich bewegenden Lichtbogens führt zu erhöhten Brennspannungen von etwa 40 V. Befestigungen und Abstützungen der Stromzuführungen wirken sich als Lichtbogen-Stopper aus, wie das Einbringen von Fremdmaterial in die Lichtbogenbahn zeigte, und können zu stark lokaler Energiedeponierung mit den entsprechenden zerstörerischen Konsequenzen führen.

Neben ersten Auswertungen der Lichtbogenexperimente sind Vergleiche mit Berechnungen durchgeführt worden. Während zum Beispiel für den Fall des ruhigen Brennens des Lichtbogens analytische Rechnungen unter vereinfachten Annahmen eine sehr exakte Beschreibung lieferten, ist für komplexere Spannungs-Charakteristiken der Einsatz eines Rechenprogramms erforderlich. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem INEL, Idaho, wurde das Programm MSCAP des INEL erprobt. Es handelt sich um ein Netzwerkprogramm zur Berechnung von nichtlinearen, zeitabhängigen Vorgängen in Magnetsystemen, das auch die Besonderheiten

supraleitender Magnete berücksichtigen kann, wie Quenzen, schnelle Entladung, Kurzschlüsse aller Art und Lichtbögen. Das Programm befindet sich noch in der Entwicklungsphase, liefert jedoch schon recht gute Ergebnisse, wie Nachrechnungen von einigen der oben beschriebenen Experimente zeigten. Umfangreichere Auswertungen und Berechnungen stehen noch aus.

Damit sind die nichtzerstörenden Tests abgeschlossen. Die Vorbereitungen für die Experimente mit zerstörendem Potential haben begonnen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22766	03.08.01 / 03A	P. Duelli
23714		Dr. J.S. Herring (1.6.-30.11.87)
24452		DI L. Hütten
		<u>Dr. K.P. Jüngst</u>
		H. Kiesel
		DI. H. Kronhardt (ab 1.4.87)
		Dr. G. Leppelmeier (bis 31.3.87)
		G. Obermaier
		E. Süß
		Dr. H. Yanagi (ab 1.4.87)
		<u>IRE:</u>
		DI H. Schnauder
		<u>KTB:</u>
		DI M. Oehmann
		J. Seibert

Vorhaben
**03.08.02 Anlagenbezogene Sicherheits-
 untersuchungen**

Institut für Reaktorentwicklung (IRE)

a) Systemanalyse für NET

Zur Vermeidung späterer kostspieliger Änderungen im Design einer Fusionsanlage bzw. ihrer Teilsysteme wird versucht, mögliche Störfallabläufe frühzeitig zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu den Sicherheitsbetrachtungen, die zu jedem Teilsystem durchgeführt werden, wird hier im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe die gesamte Anlage betrachtet. Vorläufig zusammengestellte Störfallabläufe umfassen insgesamt ca. 15 verschiedene auslösende Ereignisse; sie reichen von Plasma Disruptions bis hin zu Fehlern im Tritiumsystem. Da die ursprüngliche Beschreibung dieser Abläufe in Textform sich als ungeeignet erwies, wurden sie in Form von Ereignisbäumen dargestellt. Die zunächst auf "engineering judgement" basierenden Störfallabläufe sollen in Zukunft im Rahmen einer Systemanalyse vertieft untersucht werden.

Für systemspezifische Sicherheitsuntersuchungen bei KfK wurde das Magnetsystem herausgegriffen. Hier ist die störfallbedingte Beschleunigung von Teilen der Magnete eine viel diskutierte Frage. Um einen Überblick über diese Szenarien zu bekommen, wurden als erste Aufgabe folgende Fragen gestellt: Wie verformt sich ein Toroidalfeldmagnet, wenn er plötzlich aufgetrennt wird; erreichen die dann freikragenden Träger, bei unveränderten Lasten, eine stabile Lage oder nicht? Welche Zeitspannen sind nötig, um einen Toroidalfeldmagneten überhaupt aufzutrennen? Die Bearbeitung dieser Fragestellungen erfolgt unter 03.08.01.

b) Sicherheitsleitlinien für den Entwurf von NET

Die Ausarbeitung von sicherheitsrelevanten Empfehlungen für den Entwurf von NET ist Aufgabe einer internationalen Arbeitsgruppe, an der Mitarbeiter des IRE beteiligt sind. Die frühzeitige Einbeziehung sicherheitstechnischer Kriterien in den Entwurfsprozeß soll dazu beitragen, ein hohes Maß an Sicherheit für die Bevölkerung und das Betriebspersonal zu gewährleisten sowie die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Anlage zu erhöhen. Die in der Diskussion befindlichen Empfehlungen beziehen sich insbesondere auf den Schutz gegen ionisierende Strahlen, elektromagnetische Felder und chemisch gefährliche Stoffe. Darüber hinaus werden sicherheitstechnische Grundsätze sowie die mögliche Vorgehensweise für Sicherheitsanalysen beschrieben und detailliertere Empfehlungen für einige Teilsysteme einer Fusionsanlage ausgearbeitet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24449	03.08.02P02A	<u>W. Kramer</u> <u>R. Krieg</u> <u>R. Meyer</u>

Vorhaben
03.08.03 Fusionstechnologie und Umwelt

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

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

Zur Abschätzung der radiologischen Folgen von Tritiumfreisetzungen aus Fusionsreaktoren muß das für andere kerntechnische Anlagen entwickelte Unfallfolgenmodell UFO-MOD derart ertüchtigt werden, daß das dynamische Verhalten der verschiedenen chemischen Formen von Tritium in der Atmosphäre und in den Nahrungsketten realistisch berücksichtigt wird. Der letztgenannte Problemkreis kann mit sogenannten Compartment-Modellen behandelt werden, die den Transport von Stoffen zwischen in sich abgeschlossenen Teilbereichen (Boxen) mittels Austauschraten beschreiben, und die mathematisch ein System gekoppelter linearer Differentialgleichungen erster Ordnung darstellen. Das am NRPB, UK, zur numerischen Lösung derartiger Gleichungssysteme entwickelte Rechenprogramm COMA (COmpartment Model Analysis) wurde auf der Rechenanlage der KfK implementiert. Die Anwendung von COMA und die damit erzielbaren Ergebnisse wurden anhand eines Modells für den Transport von HT und HTO in Blattgemüse demonstriert.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. C. Steinhauer

Abteilung für Angewandte Systemanalyse (AFAS)

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

Hauptabteilung Sicherheit (HS)

a) Französisches Tritium-Feldexperiment

Die Ergebnisse der KfK-Experimente während des französischen HT-Ausbreitungsversuches im Oktober 1986 wurden in einen gemeinsamen Bericht aller Beteiligten integriert und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die am KfK-Standpunkt (ca. 800 m von der HT-Quelle) aufgestellten Pflanzen- und Bodenproben wurden für ca. 9 Minuten von der HT-Wolke gestreift. Die über diese Zeit integrierte Tritium-Konzentration der Luft betrug $6,54 \cdot 10^8$ Bq/s/m³. In der ersten Stunde nach

der Freisetzung wurde eine HTO-Konzentration von 79 Bq/m³ Luft gemessen. Die Tritium-Aktivität der Luftfeuchte war demnach 7000 Bq/l, bezogen auf die Lufttemperatur von 19 °C und die relative Luftfeuchte von 70,5 %

- Die im Gewebewasser der exponierten Pflanzen gemessenen Tritium-Konzentrationen lagen eine Stunde nach der Freisetzung noch unter der HTO-Konzentration der Luftfeuchte von 7000 Bq/l. Dieser Verlauf ist typisch für eine reine HTO-Kontamination. Über den Anteil von HT kann keine weitere Aussage gemacht werden, als daß trotz wesentlich höherer Konzentration von HT der Effekt nicht höher ist als bei HTO.
- Die höchste Konzentration im Gewebewasser wurde in Gras gefunden (6130 Bq/l), die niedrigste in Fichtenzweigen (1020 Bq/l). Die Aufnahme hängt dabei im wesentlichen von der Fläche der oberirdischen Pflanzenteile und dem Öffnungszustand der Stomata ab
- Etwa 3 % des insgesamt aufgenommenen Tritiums wurden in das organische Material eingelagert, wobei der größte Teil (etwa 70 %) mit inaktivem Wasser wieder zurückgetauscht werden konnte.
- Die Kontamination der exponierten Bodenproben (40 cm tief) betrug $1 \cdot 10^6$ Bq/m² bei moorigem Boden aus dem Tiefgestade Leopoldshafen (Depositionsgeschwindigkeit $v_g = 1,54 \cdot 10^{-3}$ m/s), $5,4 \cdot 10^5$ Bq/m² bei Parabraunerde vom Michaelsberg ($v_g = 8,2 \cdot 10^{-4}$ m/s) und $4,6 \cdot 10^5$ Bq/m² bei sandigem Boden aus Spöck ($v_g = 7,1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Die Deposition von HT im Boden und die Umwandlung zu HTO ist u. a. abhängig von der Bodenporosität und vom Wassergehalt. In gut durchlüfteten und trotzdem feuchten Böden herrschen optimale Lebensbedingungen für Mikroorganismen, die für die H1/HTO-Umwandlung verantwortlich sind. Der moorige Boden mit seinem hohen organischen Anteil von 21 % und der hohen Wasserkapazität hatte deshalb die besten Voraussetzungen. Parabraunerde ist wegen des hohen Anteils sehr kleiner Bodenpartikel schlechter durchlüftet und sandiger Boden hat eine wesentlich niedrigere Wasserkapazität.
- 70 - 94 % des aufgenommenen HT wurden in den oberen 10 cm der Bodenschicht als HTO abgelagert. Jedoch war in allen Böden auch in tieferen Schichten (bis 40 cm gemessen) eine erhöhte HTO-Konzentration meßbar, was durch die hohe Mobilität des HT erklärt wird.

nicht austauschbar gebundene OBT, also das durch enzymatische Reaktionen an Kohlenstoff gebundene Tritium, bestimmt wurde.

Sojabohne hatte im Vergleich zu Mais und Fichte die höchste Tritium-Aufnahmerate im Gewebewasser als auch im OBT, was vermutlich auf die absichtliche Infektion der Wurzeln mit Rhizobium-Bakterien zurückzuführen ist. Dieser Bakterienstamm verursacht in Leguminosen die Bildung von sogenannten Wurzelknöllchen, in denen Luftstickstoff gebunden und der Pflanze verfügbar gemacht wird. Außerdem enthalten diese Bakterien das Enzym Hydrogenase, das die Oxidation von Wasserstoff katalysiert.

Die Verläufe der Tritium-Konzentration in Abhängigkeit von der Zeit zeigen ein Maximum bei 11 Stunden nach der Freisetzung bei Sojabohnen und Mais, was auf die Aufnahme von Tritium-haltigem Bodenwasser zurückzuführen ist. Bei der Fichte waren die höchsten Werte erst nach 25 Stunden erreicht.

Eine endgültige Bewertung dieser Ergebnisse erfordert noch zusätzliche Daten und steht deshalb noch aus.

c) HT-Exposition von Pflanzen unter definierten Bedingungen in einer Klimakammer

1987 wurden die folgenden Vorarbeiten für die geplanten HT-Expositionsversuche von Pflanzen in einer Klimakammer durchgeführt:

- Klärung verschiedener technischer Probleme sowie des Strahlenschutzes.
- Überführung von HT aus einer Ampulle in eine Druckgasflasche, um das HT später dosiert in die Klimakammer einleiten zu können.
- Erstellung einer detaillierten Versuchsplanung.
- Kontamination von verschiedenen Pflanzen (Weizen, Gras, Mais, Bohnen) mit HTO und Auftrennung in die organischen Hauptkomponenten mit dem Ziel, die Methodik der Aufarbeitung unter aktiven Bedingungen zu testen und einen späteren Vergleich der Tritium-Verteilung in HT-kontaminierten Pflanzen zu ermöglichen. Die spezifische Tritium-Konzentration war in den einzelnen Fraktionen unterschiedlich, am höchsten in den Lipiden und am niedrigsten in den Nukleinsäuren.

Für die unvermeidbare Ableitung geringer Mengen von HT nach Versuchsende wurde von den Behörden ein Kamin gefordert. Die baulichen Maßnahmen für die Installation des Kamins wurden eingeleitet. Bei Fertigstellung kann mit den Tritium-Experimenten begonnen werden.

b) Kanadisches Tritium-Feldexperiment

Die Mitarbeit beim kanadischen Experiment, das im Juni 1987 stattfand, beschränkte sich auf die Versuchsauswertung. Von verschiedenen Pflanzen, die der HT-Wolke ausgesetzt waren, wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten (1, 11, 25 Stunden nach der Freisetzung) Proben entnommen. Im KfK wurden lediglich die OBT-Analysen durchgeführt, wobei auch das

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24450/87	03.02.01P10A 03.08.03P10A	D. Honig S. Diabaté Dr. H. Schüttelkopf

VERÖFFENTLICHUNGEN 1987

- 22625 IDT
GABOWITSCH, E.; SPANNAGEL, G.; TACZANOWSKI, S.
Modelling of the ^3H -cycle of fusion reactors. 5th Internat. Symp. 'Modelling, Identification and Control' (MIC '86), Innsbruck, A, February 18-21, 1986
Velarde, G. [Hrsg.]
4th Internat. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 4), Madrid, E, June 30 - July 4, 1986 Proc.
Singapore : World Scientific 1987 S.434-37
- 22676 IMF
PREININGER, D.
Prediction and analysis 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
Journal of Nuclear Materials, 141-143(1986) S.491-96
- 22690 INRS IMF
WERLE, H.; ABASSIN, J.J.; BRIEC, H.; CLEMMER, R.G.; ELBEL, H.; HAEFNER, H.E.; MASSON, M.; SCIERS, P.; WEDEMAYER, H.
The LISA1 experiment: in-situ tritium release investigations.
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
Journal of Nuclear Materials, 141-143(1986) S.321-26
- 22766 IDTS ITP
JUENGST, K.P.; LEPPELMEIER, G.W.; GEIGER, W.; KOMAREK, P.; STEEVES, M.M.
First results of the TESPE-S magnet system safety experiments.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.2 S.1759-64
- 23050 IMF
DIENST, W.; HEIDINGER, R.
Ceramic insulator materials for RF windows. Insulators for Fusion Applications; Report of a Consultants Meeting, Karlsruhe, June 25-27, 1986
IAEA-TECDOC-417(1987) S.65-93
- 23232 INRS 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.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.1 S.423
- 23414 INRS IRBR IT
MALANG, S.; CASAL, V.; ARHEIDT, K.; FISCHER, U.; LINK, W.; RUST, K.
Liquid metal cooled blanket conception for NET.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.2 S.1273-80
- 23415 IRB
REIMANN, J.; DINNER, P.; MALANG, S.; WU, C.
Tritium separation from LiPb blankets by permeation into a gas stream or into NaK.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.2 S.1579-84
- 23598 ITP
NYILAS, A.
Kriterien fuer die Auslegung von austenitischen Werkstoffen im kryogenen Bereich.
Bericht ueber die Kaelte-Klima-Tagung 1986 des Deutschen Kaelte- und Klimatechnischen Vereins, Bad Homburg, 19.-21. November 1986 Stuttgart, 1986. - S.135-43
(DKV-Tagungsbericht ; 13)
- 23614 IMFS IRB
MALANG, S.; DIEGELE, E.; HOFMANN, G.; RUST, K.
A first wall concept with radiatively cooled protection tiles.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.1 S.473-78
- 23714 IDTS ITP
GEIGER, W.; JUENGST, K.P.
Magnetoelastic buckling measurements on the superconducting torus TESPE.
Yamamoto, Y. [Hrsg.]
Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures; Proc. of the IUTAM Symp., Tokyo, J, October 12-17, 1986
Amsterdam [u.a.] : Elsevier 1987 S.21-26
- 23761 IMF
HOFMANN, P.; DIENST, W.
Chemical compatibility between lithium-based oxide ceramics and stainless steels.
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
Journal of Nuclear Materials, 141-143(1986) S.289-93
- 23788 INR
FISCHER, U.
Optimal use of beryllium for fusion reactor blankets.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.2 S.1179-84
- 23788 INR
FISCHER, U.
Optimal use of beryllium for fusion reactor blankets.
Fusion Technology; Proc. of the 14th Symp., Avignon, F, September 8-12, 1986
Oxford [u.a.] : Pergamon Pr. 1986 Vol.2 S.1179-84
- 23800 INR
DALLE DONNE, M.; DORNER, S.; LUPTON, D.F.
Fabrication and properties of Zr_5Pb_3 , a new neutron multiplier material for fusion blankets.
2nd Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-2), Chicago, Ill., April 13-17, 1986
Journal of Nuclear Materials, 141-143(1986) S.369-72
- 23801 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
Journal of Nuclear Materials, 141-143(1986) S.357-63

- 24210 IMF
 BORGSTEDT, H.U.; GRUNDMANN, M.
 The influence of liquid Pb-17Li eutectic on the mechanical properties of structural materials.
 Structural Mechanics in Reactor Technology ; SMIRT ; Trans.of the 9th Internat.Conf., Lausanne, CH, August 17-21, 1987
 Rotterdam [u.a.] : A.A.Balkema, 1987. - Vol. N, S.145-50
- 24260 INR
 WERLE, H.; BREITUNG, W.; SCHUMACHER, G.
 Comparison of tritium release from lithium-silicates with predictions of diffusion theory.
 Hastings, I.J. [Hrsg.]
 Proc.of the Specialists' Workshop on Modelling Tritium Behaviour in Fusion Blanket Ceramics, Chalk River, CDN, April 23-24, 1987
 Chalk River : Atomic Energy of Canada Ltd. Research Company 1987 S.68-88
- 24270 INR
 FISCHER, U.
 Multi-dimensional neutronics analysis of the 'canister blanket' for NET.
 KfK-4255 (April 87)
- 24294 ITP
 FLUEKIGER, R.
 Application of advanced superconductors for energy systems - the material aspect.
 IUPAC CHEMRAWN VI World Conf.on Advanced Materials for Innovations in Energy, Transportation and Communications, Tokyo, J, May 17-22, 1987
 Invited Papers and Poster Presentations.
 Paper E19
- 24363 INRS IMF
 BASCHEK, H.D.; BOGUSCH, E.; BOJARSKY, E.; DALLE DONNE, M.; KUECHLE, M.; REISER, H.
 Konzeptionelle Untersuchungen zu einem heliumgekuehlten Feststoffblanket fuer NET.
 Jahrestagung Kerntechnik 87. Karlsruhe, 2.-4.Juni 1987
 Kerntechnische Ges.e.V. Deutsches Atomforum e.V.
 Eggenstein-Leopoldshafen;
 Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1987 S.741-44
- 24364 IMF
 BORGSTEDT, H.U.; KONYS, J.
 Korrosion von Vanadinlegierungen in der Blanketfluessigkeit Lithium.
 Jahrestagung Kerntechnik 87. Karlsruhe, 2.-4.Juni 1987
 Kerntechnische Ges.e.V. Deutsches Atomforum e.V.
 Eggenstein-Leopoldshafen;
 Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1987 S.753-56
- 24395 ITP
 FLUEKIGER, R.
 Atomic ordering, phase stability and superconductivity in bulk and filamentary A15 type compounds.
 KfK-4204 (Mai 87)
- 24403 ITPR IT
 BOEHME, G.; EL-GUEBALY, L.A.; EMMERT, G.A.; GRIEGER, G.; HARMEYER, E.; HERRNEGGER, F.; HUEBENER, J.; JENTZSCH, K.; KISSLINGER, J.; KOMAREK, P.; KULCINSKI, G.L.; LARSEN, E.M.; MAURER, W.; RAU, F.; SANTARIUS, J.F.; SAWAN, H.E.; SCHARER, J.E.; SVIATOSLAVSKY, I.N.; VOGELSSANG, W.F.; WALSTROM, P.L.; WITTEBERG, L.J.; NOBIG, H.
 Studies of a modular advanced stellarator reactor ASRA6C.
 KfK-4268 (Juni 87)
 FPA-87-2 (Juni 87)
 IPP 2/285 (Juni 87)
- 24423 IRCH
 ALBRECHT, H.
 Freisetzung von Spalt- und Aktivierungsprodukten beim LWR-Kernschmelzen.
 Abschlussbericht des SASCHA-Programmes.
 KfK-4264 (Juni 87)
- 24449 IRES PKF
 FIEGE, A.; GULDEN, W.; KRAMER, W.
 Zur Sicherheit kuenftiger Fusionsanlagen.
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.3-10
- 24450 HS
 KOENIG, L.A.; DIABATE, S.; PAPADOPOULOS, D.; STRACK, S.
 Untersuchungen zum Umweltverhalten von Tritium.
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.11-22
- 24451 IRCH
 PENZHORN, R.D.; GLUGLA, M.
 Reinigungsverfahren im Brennstoffzyklus eines Fusionsreaktors.
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.23-30
- 24452 ITP
 JUENGST, K.P.
 Zur Sicherheit von supraleitenden Magnetsystemen fuer die Fusion.
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.31-36
- 24453 IMF
 MOESLANG, A.; EHRLICH, K.; KALETTA, D.
 Die Dual-Beam-Technik - eine Einrichtung zur Simulation der Strahlenschaedigung in Fusionsreaktorwerkstoffen.
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.37-43
- 24459 ITP
 ULBRICHT, A.; KOMAREK, P.
 Stand der Experimente beim grossen Torusspulenprojekt 'Large Coil Task' (LCT).
 KfK-Nachrichten, 19(1987) S.89-100
- 24473 IMFS IRB
 BORGSTEDT, H.U.; COEN, V.; MALANG, S.
 Fluessige Brutstoffe.
 Jahrestagung Kerntechnik, Karlsruhe, 2.-4.Juni 1987 - Fachsitzung 'Materialien fuer Kernfusionsanlagen'
 Bonn : Dt.Atomforum 1987. - S.81-102
- 24486 IDT
 GEIGER, W.
 Magnetoelastisches Buckling in supraleitenden toroidalen Magnetsystemen.
 KfK-4260 (Maerz 87)
- 24504 IK
 BORIE, E.; JOEDICKE, B.
 Startup and mode competition in a 150 GHz gyrotron.
 International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 8(1987) S.207-26
- 24589 IDT
 BORIE, E.; JOEDICKE, B.; DUMBRAJS, O.
 Parameter studies for a 150 GHz gyrotron operating in the TE031 mode.
 International Journal of Electronics, 61(1986) S.735-46
- 24590 IDT
 BORIE, E.
 Self consistent code for a 150 GHz gyrotron.
 International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 7(1986) S.1863-80
- 24592 INRS IMFS IRB
 KUECHLE, M.; BOJARSKY, E.; DORNER, S.; FISCHER, U.; REIMANN, J.; REISER, H.
 Potential and problems of an aqueous lithium salt solution blanket for NET.
 KfK-4271 (Juli 87)

- 24592 INRS IMFS IRB
KUECHLE, M.; BOJARSKY, E.; DORNER, S.;
FISCHER, U.; REIMANN, J.; REISER, H.
Potential and problems of an aqueous lithium
salt solution blanket for NET.
KfK-4271 (Juli 87)
- 24603 IRE
MALMBERG, T.
Analysis of a proposal for the simplified
determination of critical loads of elastic
shells.
Nuclear Engineering and Design, 100(1987)
S.263-79
- 24738 IMF
EHRlich, K.; ANDERKO, K.; MUNZ, D.
Metallische Strukturwerkstoffe als
Erste-Wandmaterialien.
Jahrestagung Kerntechnik, Karlsruhe,
2.-4.Juni 1987 - Fachsitzung 'Materialien
fuer Kernfusionsanlagen'
Bonn : Dt.Atomforum 1987. - S.24-52
- 24791 IRE
GOELLER, B.; DOLENSKY, B.; KRIEG, R.;
HESSEMER, G.; WEHNER, E.; XU, M.
On the failure criterion of plastic
instability.
Structural Mechanics in Reactor Technology :
SMIRT ; Trans.of the 9th Internat.Conf.,
Lausanne, CH, August 17-21, 1987
Rotterdam [u.a.] : A.A.Balkema, 1987. - Vol.
B, S.537-42
- 24792 IRE
WEHNER, E.; KRIEG, R.; DOLENSKY, B.
Load carrying capacity of canister type
blanket elements for NET under accident
conditions.
Structural Mechanics in Reactor Technology :
SMIRT ; Trans.of the 9th Internat.Conf.,
Lausanne, CH, August 17-21, 1987
Rotterdam [u.a.] : A.A.Balkema, 1987. - Vol.
B, S.151-56
- 24793 IRE
RAFF, S.; DOLENSKY, B.; KRIEG, R.
A simplified procedure for elastic buckling
analysis.
Structural Mechanics in Reactor Technology :
SMIRT ; Trans.of the 9th Internat.Conf.,
Lausanne, CH, August 17-21, 1987
Rotterdam [u.a.] : A.A.Balkema, 1987. - Vol.
B, S.569-74
- 24836 IMF
DIENST, W.; KUMMERER, K.
Feste Brutstoffe fuer Kernfusionsreaktoren.
Jahrestagung Kerntechnik, Karlsruhe,
2.-4.Juni 1987 - Fachsitzung 'Materialien
fuer Kernfusionsanlagen'
Bonn : Dt.Atomforum 1987. - S.103-20
- 24837 IMF
KOZELIK, K.; DIENST, W.; LINKE, J.;
THUEMMLER, F.
Nichtmetallische Strukturwerkstoffe im
Bereich der Ersten Wand von Fusionsreaktoren.
Jahrestagung Kerntechnik, Karlsruhe,
2.-4.Juni 1987 - Fachsitzung 'Materialien
fuer Kernfusionsanlagen'
Bonn : Dt.Atomforum 1987. - S.53-80
- 25048 ITP
MIRAGLIA, S.; GOLDBACKER, W.; FLUEKIGER, R.;
SEEBER, B.; FISCHER, O.
Thermal expansion studies in the range 10K -
1200K in $PbMo_6S_8$ by means of X-ray
diffraction.
Materials Research Bulletin, 22(1987)
S.795-802
- 25082 INR
SORDON, G.
Thermomechanical analysis of different first
wall designs for the helium cooled pebble bed
canister blanket for NET.
KfK-4287 (August 87)
EUR-10537e (August 87)
- 25193 ITP
GAUSS, S.; FLUEKIGER, R.
Powder metallurgical alternative for the
processing of $(Nb-Ta)_3Sn$ multifilamentary
wires, starting from elementary Nb and Ta
powder:
Applied Superconductivity Conf., Baltimore,
Md., September 29 - October 3, 1986
IEEE Transactions on Magnetics, 23(1987)
S.657-60
- 25194 ITP
WEISS, F.; FLUEKIGER, R.; MAURER, W.
Changes in superconducting properties by room
temperature neutron irradiation for binary
and alloyed Nb_3Sn multifilamentary wires.
Applied Superconductivity Conf., Baltimore,
Md., September 29 - October 3, 1986
IEEE Transactions on Magnetics, 23(1987)
S.976-79
- 25195 ITP
FLUEKIGER, R.; KUEPFER, H.; JORDA, J.L.;
MULLER, J.
Effect of atomic ordering and composition
changes on the electrical resistivity of
 Nb_3Al , Nb_3Sn , Nb_3Ge , Nb_3Ir , V_3Si , and V_3Ga .
Applied Superconductivity Conf., Baltimore,
Md., September 29 - October 3, 1986
IEEE Transactions on Magnetics, 23(1987)
S.980-83
- 25196 ITP
SPECKING, W.; WEISS, F.; FLUEKIGER, R.
Effect of filament diameter and spacing on
 $J_{sub}(c)$ of Nb_3Sn wires in the intermediate
field range (10-12 T) and at high fields.
Applied Superconductivity Conf., Baltimore,
Md., September 29 - October 3, 1986
IEEE Transactions on Magnetics, 23(1987)
S.1188-91
- 25212 IRB
MALANG, S.
Einrichtung zur Verringerung des
MHD-Druckverlustes in dickwandigen Kanaelen.
DE-PS 36 00 645 (14.7.1987)
- 25224 ITP
MYLLAS, A.; RABER, H.
Tiefemperaturwegaufnehmer.
DE-OS 35 27 709 (12.2.1987)
- 25228 ITP
FLUEKIGER, R.
Multifilament-Supraleiterdraehte, bestehend
aus mit Kupfer oder mit Kupfer-Legierung
umgebenen Filamenten aus Nb_3Sn oder V_3Ga mit
Zusaetzen sowie Verfahren zu deren
Herstellung.
DE-OS 35 31 770 (19.3.1987)
- 25229 ITP
FLUEKIGER, R.; GAUSS, S.
Verfahren zur Herstellung von
Multifilament-Supraleiterdraehten aus Nb_3Sn -
oder V_3Ga -Filamenten, eingebettet in einer
Cu- oder Cu-Legierungs-Matrix, welche
metallische Zusatzelemente enthalten, mit
vorbestimmten supraleitenden Eigenschaften.
DE-OS 35 31 769 (19.3.1987)
- 25232 IK
KITLINSKI, M.; HOCHSCHILD, G.; WIESBECK, W.;
THUMM, M.; WILHELM, R.
Verfahren zur Bestimmung der in einem
Wellenleiter vorhandenen Moden und Anordnung
zur Durchfuehrung des Verfahrens.
DE-OS 35 32 214 (16.4.1987)

- 25238 IRB
MALANG, S.
Einrichtung zur Verringerung des
MHD-Druckverlustes in dickwandigen Kanälen.
DE-OS 36 00 645 (16.7.1987)
- 25239 IRB
MALANG, S.
Erste Wand fuer einen Fusionsreaktor.
DE-OS 36 00 646 (16.7.1987)
- 25242 IRCH
PENZHORN, R.D.; GLUGLA, M.; SCHUSTER, P.
Verfahren und Vorrichtung zur Dekontamination
des Abgases des Brennstoffkreislaufs eines
Fusionsreaktors von Tritium und/oder
Deuterium in chemisch gebundener Form
enthaltenden Abgas-Bestandteilen.
DE-OS 36 06 317 (3.9.1987)
- 25243 IRCH
PENZHORN, R.D.; GLUGLA, M.
Verfahren und Vorrichtung zur Dekontamination
des Abgases des Brennstoffkreislaufs eines
Fusionsreaktors von Tritium und/oder
Deuterium in chemisch gebundener Form
enthaltenden Abgas-Bestandteilen.
DE-OS 36 06 316 (3.9.1987)
- 25360 IKCH
ALBRECHT, H.
Results of the SASCHA program on fission
product release under core melting
conditions.
Radiochimica Acta, 41(1987) S.133-40
- 25365 IRCH
ALBRECHT, H.
Radioactivity emission from the Chernobyl
accident in comparison with the results of
the SASCHA program.
Radiochimica Acta, 41(1987) S.141-43
- 25418 IDT
GABOWITSCH, E.; SPANNAGEL, G.; TACZANOWSKI,
S.
Modelling of the tritium-cycle of fusion
reactors.
International Journal of Modelling and
Simulation, 7(1987) S.122-29

VORTRÄGE 1987

- V24003 ITP;
MIRAGLIA, S.; GOLDACKER, W.; FLUEKIGER, R.;
SEEBER, B.; FISCHER, O.
Roentgenstrukturanalyse von $PbMo_6S_8$ im
Temperaturbereich $T = 10\text{ K} - 1200\text{ K}$.
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) TT-4.4
- V24004 ITP;
WEISS, F.; SPECKING, W.; FLUEKIGER, R.
Einfluss der Neutronenbestrahlung auf $J_{sub}(c)$
von binaeren und zulegierten Nb_3Sn -Draehten.
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) TT-4.5
- V24005 ITP;
FLUEKIGER, R.
Elektrische Widerstandsaeenderung,
Stoichiometrie und Dehnungsgrad in A15
Verbindungen.
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) TT-4.6
- V24006 ITP;
HOFMANN, A.
Physikalische Grundlagen zur Kuehlung
supraleitender Magnete mit erzwungener
Stroemung von Helium II.
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) TT-7.1
- V24054 IK;
JAKI, J.; GOERING, K.; KLUGE, W.; MATTHAEY,
H.; METZLER, M.; WIEDNER, U.
The detector system of the low energy pion
spectrometer LEPS.
Spring Meeting of Nuclear Physics Sections of
the Deutsche Physikalische Gesellschaft,
Nederlandse Natuurkundige Vereniging,
Belgische Natuurkundige Vereniging, Societe
Belge de Physique, Dansk Fysisk Selskab,
Groningen, NL, March 23-27, 1987
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen
Gesellschaft, R.6, Bd.22 (1987) PE-54
- V24121 ITP;
GAUSS, S.; SPECKING, W.; WEISS, F.; SEIBT,
E.; XU, J.; FLUEKIGER, R.
 Nb_3Sn multifilamentary wires with
microstructured filaments.
Cryogenic Engineering Conf. and
Internat.Cryogenic Materials Conf.
(CEC/ICMC), St.Charles, Ill., June 14-18,
1987
- V24122 ITP;
GOLDACKER, W.; FLUEKIGER, R.
Calculation of stress tensors in Nb_3Sn
multifilamentary wires.
Internat.Cryogenic Materials Conf.,
St.Charles, Ill., June 14-18, 1987
- V24123 ITP;
GOLDACKER, W.; MIRAGLIA, S.; HARIHARAN, Y.;
WOLF, T.; FLUEKIGER, R.
 $PbMo_6S_8$ wires from HIP prereacted material.
Cryogenic Engineering Conf. and
Internat.Cryogenic Materials Conf.
(CEC/ICMC), St.Charles, Ill., June 14-18,
1987
- V24126 ITP;
SPECKING, W.; GOLDACKER, W.; FLUEKIGER, R.
Effect of transverse compression on $J_{sub}(c)$
for multifilamentary Nb_3Sn .
Internat.Cryogenic Materials Conf.,
St.Charles, Ill., June 14-18, 1987
- V24127 ITP;
FLUEKIGER, R.; JORDA, J.L.
Phase diagrams and properties of Nb based
superconducting materials.
Annual Meeting of the Metallurgical Society
of the American Institute of Mining,
Metallurgical, and Petroleum Engineers,
Denver, Colo., February 24-27, 1987
- V24128 ITP;
HOFMANN, A.; KHALIL, A.; KRAEMER, H.P.
Operational characteristics of loops with
helium II flow driven by fountain effect
pumps.
Cryogenic Engineering Conf. and
Internat.Cryogenic Materials Conf.
(CEC/ICMC), St.Charles, Ill., June 14-18,
1987
- V24205 IMF;
DIENST, W.; ZIMMERMANN, H.
Investigation of the mechanical properties of
ceramic breeder materials.
3rd Internat.Conf.on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V24213 IMF;
BORGSTEDT, H.U.; GRUNDMANN, M.
Liquid metal embrittlement as a corrosion
phenomenon.
European Corrosion Meeting (EUROCORR 87),
Karlsruhe, April 6-10, 1987
- V24217 IMF;
PREININGER, D.; MATERNA-MORRIS, E.
Gefuegeaeenderungen im martensitischen 12%
Cr-Stahl 1.4914 durch Kriechverformung.
DGM Hauptversammlung, Saarbruecken,
9.-12.Juni 1987
- V24220 IMF;
WASSILEW, C.; EHRlich, K.
Effect of irradiation at low temperatures on
the impact properties of type 1.4914 steel.
3rd Internat.Conf.on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
Internat.Conf.on Materials for Nuclear
Reactor Core Applications, Bristol, GB,
October 27-29, 1987
- V24286 IMF;
PREININGER, D.
Slip induced martensitic transformation in
the austenitic steel of type DIN 1.4948.
3rd Internat.Conf.on Progress in
Microstructures, Aachen, May 5-8, 1987
Book of Abstracts, S.132
- V24290 ITP;
FRIESINGER, G.; GAUSS, S.; KOMAREK, P.;
MAURER, W.; SIEWERDT, L.; ULBRICHT, A.;
WUECHNER, F.; ZAHN, G.; LUBELL, M.S.; SHEN,
S.S.
Testing of the Euratom LCT coil in the
toroidal arrangement of the international
fusion superconducting magnet test facility
(IFSMTF) without (standard I) and with
external pulsed fields (standard II).
10th Internat.Conf.on Magnet Technology
(MT-10), Boston, Mass., September 21-25, 1987

- V24291 ITP;
MAURER, A.; MAURER, W.; KOMAREK, P.;
ULBRICHT, A.; WUECHNER, F.
Investigation of the mechanical properties of
the Euratom LCT coil by tests under
different boundary conditions.
9th Internat. Conf. on Structural Mechanics in
Reactor Technology (SHIRT 9), Lausanne, CH,
August 17-21, 1987
- V24292 ITP;
FLUEKIGER, R.
Superconduttività a $T > 100$ K nel sistema
Y-Ba-Cu-O.
Vortr.: ENEA, Frascati, I, 15. April 1987
- V24381 ITP;
KOMAREK, P.; NYILAS, A.
Characterization of superconductors and
insulating materials at cryogenic
temperatures, for use in electrical
engineering.
CIGRE Symp., Wien, May 5-7, 1987
Paper 100-09
- V24388 ITP;
FLUEKIGER, R.
Development of new superconducting materials
in Europe.
Vortr.: Nat. Research Inst. for Materials,
Tokyo, J, 8. Juni 1987
- V24491 ITP;
FLUEKIGER, R.; WEISS, F.; GOLDBACKER, W.;
SEIBT, E.; WOLF, T.; MUELLER, T.
Comparison between fabrication processes of
conventional and of oxide wires.
Workshop High Tsub(c)-Superconductors and
Potential Applications, Genova, I, July 1-3,
1987, S. 131
- V24494 ITP;
HOFMANN, A.
Basic considerations on cooling of
superconducting magnets by forced flow of
helium II.
Vortr.: University of California, Los
Angeles, Calif., 9. Juni 1987
- V24502 IMF;
HERSCHBACH, K.
Contradictory results observed for in-pile
creep of ferrites.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V24644 ITP;
FLUEKIGER, R.
The material aspect in advanced
superconducting wires.
10th Internat. Conf. on Magnet Technology
(MT-10), Boston, Mass., September 21-25, 1987
- V24645 ITP;
HAUBENREICH, P.N.; KOMAREK, P.; SHIMAMOTO,
S.; VECSEY, G.
Productive international collaboration in the
large coil task.
12th Symp. on Fusion Engineering, Monterey,
Calif., October 12-16, 1987
- V24646 ITP;
SHEN, S.S.; BAYLOR, L.R.; DRESNER, L.;
FEHLING, D.T.; LUBELL, M.S.; LUE, J.W.;
LUTON, J.N.; MCHANAMY, T.J.; WILSON, C.T.;
WINTENBERG, R.E.; WOOD, R.J.; ULBRICHT, A.;
WUECHNER, F.; FRIESINGER, G.M.; OKUNO, K.;
KATO, T.; TAKAHASHI, Y.; IIDA, F.; ZICHY,
J.A.; JAKOB, B.
Measurements of electromagnetic properties of
LCT coils in IFSMTF.
12th Symp. on Fusion Engineering, Monterey,
Calif., October 12-16, 1987
- V24741 IK;
JOEDICKE, B.; BAUMGAERTNER, W.; BORIE, E.;
BUDIG, H.; DAMMERTZ, G.; GEIST, T.; GRUNDEL,
P.; HAUBRICH, G.; HIETSCHOLD, R.; HOCHSCHILD,
G.; HORNUNG, A.; KITLINSKI, M.; KUNTZE, M.;
LEHM, R.; MOEBIUS, A.; MUENCH, M.; OPPERMANN,
K.; PIOSCZYK, B.; REDEMANN, G.; STICKEL, H.;
VINCON, R.; WENZELBURGER, H.
The 150 GHz gyrotron experiment at the
Kernforschungszentrum Karlsruhe.
12th Annual Internat. Conf. on Infrared and
Millimeter Waves, Lake Buena Vista, Fla.,
December 14-18, 1987
- V24832 ITP;
FLUEKIGER, R.
Actual activities on new superconducting
materials.
Vortr.: Toikai University, Kanagawa-Ken, J,
28. Mai 1987
Vortr.: University of Tokyo, Tokyo, J, 29. Mai
1987
Vortr.: Kyushu University, Fukuoka, J, 2. Juni
1987
Vortr.: Tohoku University, Sendai, J, 3. Juni
1987
- V24872 IMF;
HOFMANN, P.; DIENST, W.
Compatibility studies of metallic materials
with Li-based oxides.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V24987 IDT;
GABOWITSCH, E.; SPANNAGEL, G.
Modelling and simulation of tritium handling
systems.
Internat. Conf. of the American Society of
Mechanical Engineers (ASME) on Modelling and
Simulation, Karlsruhe, July 20-22, 1987
- V25034 IMF;
BORGSTEDT, H.U.; DRECHSLER, G.; FREES, G.;
PERIC, Z.
Corrosion testing of steel X18CrMoVnB12 1
(1.4914) in a Pb-17 Li pumped loop.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25035 IMF;
BORGSTEDT, H.U.; GRUNDMANN, M.; KONYS, J.;
PERIC, Z.
A vanadium alloy for the application in a
liquid metal blanket of a fusion reactor.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25049 ITP;
SCHMIDT, C.; YI, C.
Stability of superconductors for poloidal
field coil application.
10th Internat. Conf. on Magnet Technology
(MT-10), Boston, Mass., September 21-25, 1987
- V25130 IMF;
VOLLATH, D.; WEDEMEYER, H.
Preparation of the aluminates and silicates
of lithium in aqueous and alcoholic media.
Symp. on Fabrication and Properties of Lithium
Ceramics in Conjunction with the 89th Annual
Meeting and Exposition of the American
Ceramic Society, Pittsburgh, Pa., April
26-30, 1987
- V25131 IMF;
VOLLATH, D.; WEDEMEYER, H.
Techniques for synthesizing lithium silicates
and lithium aluminates.
Symp. on Fabrication and Properties of Lithium
Ceramics in Conjunction with the 89th Annual
Meeting and Exposition of the American
Ceramic Society, Pittsburgh, Pa., April
26-30, 1987

- V25153 IT;
GRAEBNER, H.; FEUERSTEIN, H.; OSCHINSKI, J.
Compatibility of metals and alloys with
liquid Pb-17Li at temperatures up to 650°C.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25154 IT;
FEUERSTEIN, H.; GRAEBNER, H.; KIESER, G.
TRITEX, a forced convection loop with
Pb-17Li.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25273 IMF;
ADELHELM, CH.; KEMPF, D.; NOLD, E.
Analysis of V3Ti1Si-alloy after exposure to
Pb17Li.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25274 IMF;
NOLD, E.; ADELHELM, CH.; BORGSTEDT, H.U.
Quantitative depth profiles of
lithium-corroded vanadium and vanadium alloys
by Auger-electron-spectroscopy.
European Conf. on Applications of Surface and
Interface Analysis, Stuttgart, October 19-23,
1987
- V25275 IMF;
HOLLECK, H.; LEISTE, H.; NOLD, E.; SCHULZ,
H.; SKOKAN, A.
Multiphase ceramic materials and coatings for
possible fusion reactor applications.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25285 IMF;
ELBEL, H.
Open pore structure analysis of lithium
bearing ceramics.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25336 INR;
BREITUNG, W.; ELBEL, H.; LEBKUECHER, J.;
SCHUMACHER, G.; WERLE, H.
Out of pile tritium extraction from lithium
silicate.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
Book of Abstracts, S.146
- V25337 INR;
WERLE, H.; BRIEC, M.; CLEMMER, R.G.; ELBEL,
H.; MAEFNER, H.E.; MASSON, M.; SCHUMACHER,
G.; WEDEMAYER, H.
The LISA experiment: in-situ tritium release
from lithium silicate.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
Book of Abstracts, S.153
- V25345 IMF;
MOESLANG, A.; PREININGER, D.
Effect of helium implantation on the
mechanical properties and the microstructure
of the martensitic 12%Cr-steel 1.4914.
3rd Internat. Conf. on Fusion Reactor
Materials, Karlsruhe, October 4-8, 1987
- V25419 INR;
DALLE DONNE, M.
Pebble bed canister: un blanket ceramico
raffreddato ad elio per il NET.
Vortr.: Kernforschungszentrum Frascati, I,
19. Februar 1987
- V25513 ITP;
LUBELL, H.S.; CLINARD, J.A.; DRESNER, L.;
FIETZ, W.; FLETCHER, W.M.; HAUBENREICH, P.N.;
LUE, J.W.; LUTON, J.N.; MCMANAMY, T.J.;
SCHWENTERLY, S.W.; SHEN, S.S.; STAMPS, R.E.;
WILSON, C.T.; WINTENBERG, R.E.; WOOD, R.J.;
ULBRICHT, A.; FRIESINGER, G.M.; WUECHNER, F.;
OKUNO, K.; KATO, T.; IIDA, F.; TAKAHASHI,
Y.; TSUJI, H.; HIYAMA, T.; ZICHY, J.A.;
JAKOB, B.
The IEA-large coil task test results in
IFSMTF.
10th Internat. Conf. on Magnet Technology
(MT-10), Boston, Mass., September 21-25, 1987

Appendix : Table of Fusion Technology Contracts

Task Code No.	Title	KfK Departments
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 in Pb-17Li	IMF I, IMF II
B 9	Tritium Extraction from Liquid Pb-17Li by 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 High Field Composite Conductors	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 Fatigue 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 Field 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 Cryosystem	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	Plasma Exhaust Gas Purification by Use of Hot Metal Getters	IRCH
T 10 E	Adsorption of DT on Heated Metal Beds other than Uranium	IRCH
T 10 H	Catalyst Development Exhaust Purification Process	IRCH
Development of ECRH Power Sources at 150 GHz (This task is part of the Fusion Physics Programme of the EC.)		IDT, IK