

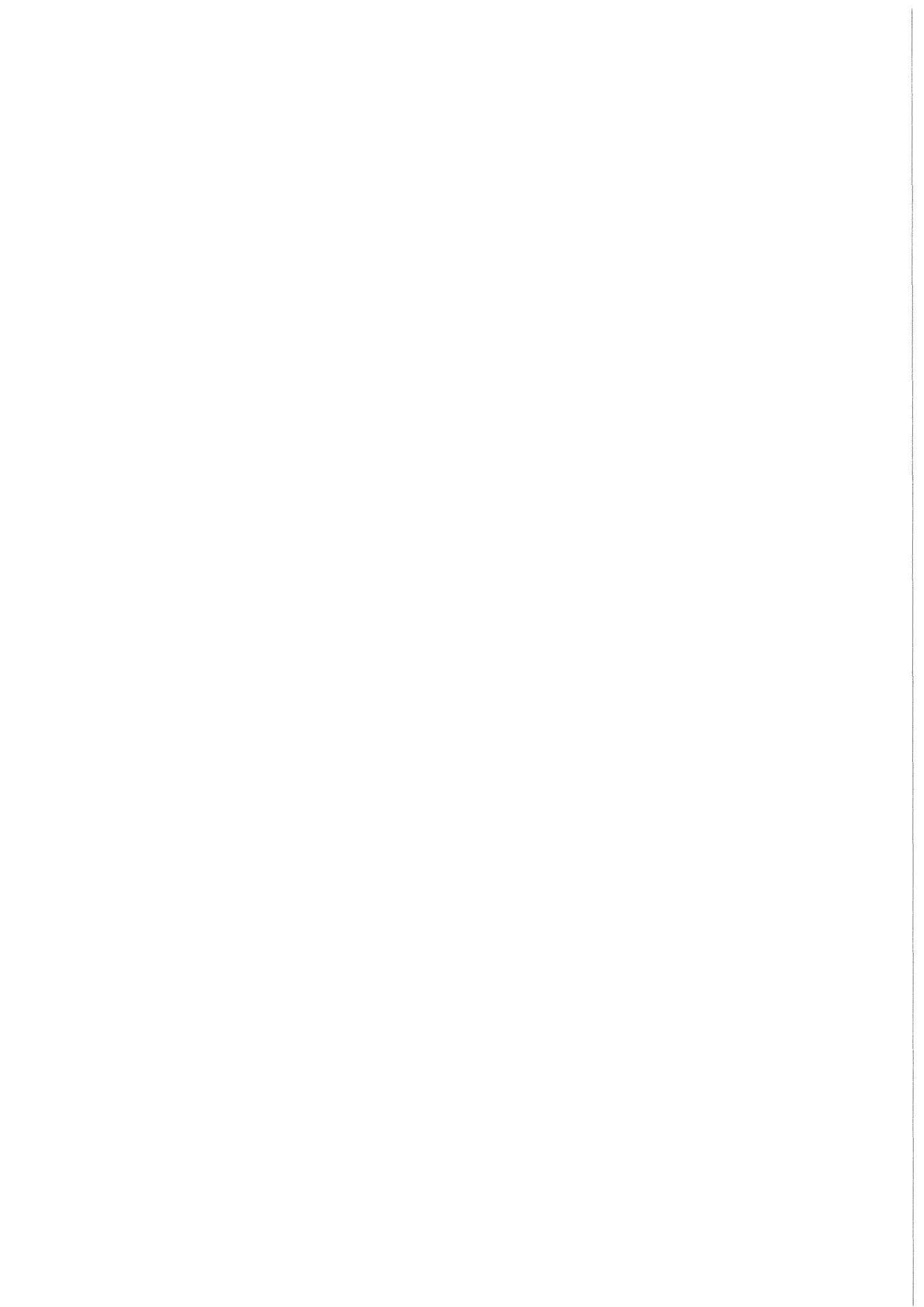


KfK 4597  
EUR 11394 d  
Mai 1989

# **Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Projekts Kernfusion 1988**

**Jahresbericht der  
Assoziation KfK-Euratom**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**  
Projekt Kernfusion – Projektleitung

KfK 4597  
EUR 11394 d

**Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten  
des Projekts Kernfusion  
1988**

Jahresbericht der Assoziation KfK-Euratom

zusammengestellt von  
G. Kast

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Manuskript

**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 Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion. Die Partner arbeiten gemeinsam an dem Ziel, die physikalischen und technischen Voraussetzungen für die Nutzung der durch Kernfusion freigesetzten Energie zu schaffen und zukünftige Großexperimente zu planen und durchzuführen.

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

Die hier zusammengefaßten Berichte sind Beiträge der KfK-Institute im Jahre 1988. 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/ITER

IMF

#### Erste-Wand-Testeinrichtung

Im Rahmen eines Programmes zum Test von Erste-Wand-Komponenten, bei dem das Gesamtverhalten der Struktur unter zyklischer thermischer Ermüdung untersucht werden soll, und bei dem Rechenmethoden zur Lebensdauervorhersage verifiziert werden sollen, wurden Berechnungen für die Auslegung der Testanlage durchgeführt. Um in den Experimenten „repräsentative“ thermomechanische Randbedingungen zu setzen, wurde der Einfluss einiger Parameter, durch Finite Elemente-Rechnungen untersucht. Insbesondere wurden die Größe der Testsegmente, die mechanische Abstützung und die Beschleunigung der Tests durch höhere Wärmeströme betrachtet.

Die thermische Belastung der Ersten Wand im Reaktor besteht aus der Energiedeposition von geladenen Teilchen in den oberflächennahen Schichten (in der KfK-Testeinrichtung durch den Oberflächenwärmestrom eines Graphitheizers simuliert) und der Energiedeposition der Neutronen als innere Wärmequelle in der gesamten Struktur. Zur Qualifizierung der Tests wurden für beide Fälle, Reaktor- und Testbedingungen, die resultierenden Temperatur- und Spannungsfelder untersucht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<b>DP. E. Diegele</b> Dr. T Fett Dr. B. Schinke G. Schweinfurth

IRE

#### CAD-Technik für NET

Im Rahmen der Mitarbeit am NET-Entwurf müssen CAD-Daten zwischen dem NET-Team (CAD-System MEDUSA) und KfK (CAD-System BRAVO) ausgetauscht werden. Als Schnittstelle dient das genormte neutrale IGES-Datenformat (Initial Graphics Exchange Specification). Die physikalische Datenübertragung zwischen Garching und Karlsruhe wurde inzwischen in Zusammenarbeit mit HDI und IPP wesentlich vereinfacht. Die Mängel der logischen Übertragung wurden im Rahmen eines NET-Studienkontrakts untersucht, indem anhand von Testzeichnungen die übertragbare Teilmenge der jeweils verfügbaren Zeichnungselemente ermittelt wurde. Hieraus resultierten Empfehlungen zur Vermeidung nicht übertragbarer Elementtypen und eine Software, die solche Elemente in einer MEDUSA-Zeichnung anzeigt. Ein weiteres Softwarepaket erlaubt es, fehlerhafte Einträge im IGES-File zu erkennen und zu beseitigen.

Auf aktuelle Anforderung von KfK-Stellen wurde eine Reihe von Zeichnungen von NET zum KfK übertragen. Daneben wurde auf dem CAD-Rechner des KfK ein Duplikat des CAD-Archivs von NET samt den nötigen Verwaltungs- und Zugangsprogrammen erstellt. Es ist allen Benutzern dieses Rechners zugänglich und soll im Endausbau alle bei NET archivierten CAD-Daten in verwertbarer Form enthalten. Bis jetzt sind etwa 90 % des Bestandes (mehr als 320 Einzelzeichnungen) im KfK abgelegt.

Ein weiterer NET-Studienkontrakt, der im Juli 1988 beendet wurde, betraf den Datenaustausch zwischen MEDUSA und CADD 4X, den das NET-Team im Rahmen der Arbeiten zu ITER vorzunehmen hat. Wieder wurde die im IGES-Format übertragbare Elementmenge ermittelt und in Empfehlungen festgehalten. Außerdem wurde Software entwickelt, die einen komfortablen Austausch zwischen NET und ITER-Partnern in USA über öffentliche Netze erlaubt.

#### Untersuchungen zum Vakuum- und Exhaustverhalten

Ziel der Arbeiten ist die Simulation des Vakuum- und Exhaustverhaltens während der „dwell-time“ (Zeit zwischen zwei Brennvorgängen). Es zeigte sich, daß das verfügbare, für die Berechnung der Vorevakuierung entwickelte Rechenprogramm hierfür wesentlich erweitert werden muß. Insbesondere ist es erforderlich, den Übergang von der Brennzeit zur dwell-time detaillierter zu erfassen. Der gesamte Prozeß wurde deshalb in fünf aufeinanderfolgende Teilprozesse unterteilt. Eine erste derartige modulare Programmversion wurde entwickelt und erfolgreich getestet. Hierfür werden zunächst einfache Beschreibungen der Plasma-Wand-Wechselwirkungsvorgänge und des Ausgasverhaltens der metallischen Wandmaterialien verwendet.

Bei Graphit als Wandmaterial sind die Wechselwirkungsprozesse mit dem Deuterium und Tritium in der Plasmakammer sehr viel komplexer. Die verschiedenen Graphitsorten weichen in ihrem Verhalten recht stark voneinander ab. Auch können hier die Auswirkungen von Erosionsvorgängen nicht mehr vernachlässigt werden, da in den Ablagerungen der Erosionsprodukte nennenswerte Mengen an Deuterium und Tritium eingebunden sind. Um die Eigenschaften eines für diese Berechnungen geeigneten „Referenzgraphits“ definieren zu können, wurden die verfügbaren Informationen systematisch gesammelt und ausgewertet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.01.01P57A 03.01.01P57B 03.01.01P58A 03.01.01P58B	<b>U. Gengenbach</b> S. Haas <b>A. Ludwig</b> U. Marek <b>R.A. Müller</b> W. Reichert

## ITP

Im Rahmen einer ganzjährigen Delegation eines Ingenieurwissenschaftlers zum NET-Team, wurde die kryotechnische Auslegung des NET-Entwurfes bearbeitet. Aufgrund der bisher vorhandenen Daten wurde eine zusammenfassende Darstellung der zur Versorgung der NET Magnete nötigen Kryoleistung und daraus resultierende Anlagenschemata, Rohrleitungsquerschnitte, etc. erarbeitet. Für die sonstigen möglichen Verbraucher von Kryoleistung (z.B. Kryopumpen) wurde ein allgemeiner Fragebogen konzipiert, damit zukünftig eine einheitliche Erfassung und Erweiterung der Daten möglich ist.

Für die Magnete sind 4 gleiche Anlagen vorgesehen, für die folgende Leistungsdaten ermittelt wurden:

- 4 x 25 kW bei 4.5 K
- 4 x 40 kW bei 50 ÷ 80 K (Schildkühlung)
- 4 x 300 kW bei 80 K (Abkühlung)
- 4 x 120 kW Zusatzleistung beim Abkühlen mit LN<sub>2</sub>
- 4 x 4.5 kg/s Umwälzleistung bei 4.5 K
- Gesamtbedarf an elektrischer Energie 30 ÷ v 40 MW

Für einzelne Problemkreise wurden vom NET-Team erste Industriestudien vergeben, die betreut wurden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.03.05P05A	DI H. Katheder

## Vorhaben

### 03.01.02 Alternative Konzepte

## INR

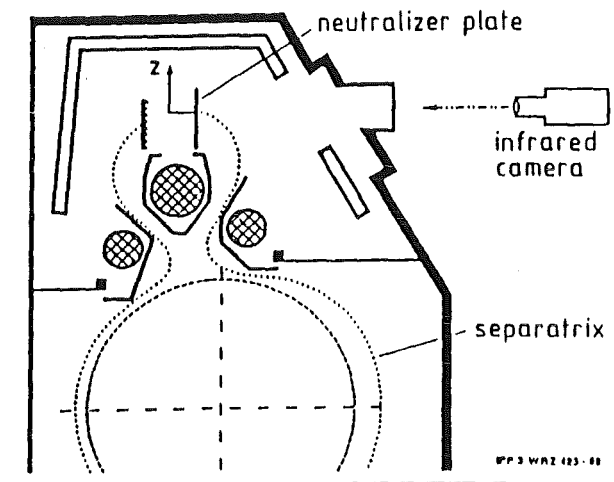
### <sup>3</sup>He-Spektrometer

Man kann die Energieverteilung der Deuterium-Ionen in einem Plasma dadurch bestimmen, daß man das Spektrum der Neutronen aus der (D,D)-Reaktion mit hoher Energieauflösung mißt. Ein <sup>3</sup>He-Spektrometer besitzt die erforderliche Auflösung, doch muß auch der Einfluß der Streuneutronen genügend klein sein. Dies wurde durch Monte Carlo Rechnungen für die Anlage ASDEX-UP geprüft; auch wurde die optimale Kollimation ermittelt. Für die vorgesehene Position sind die Verhältnisse günstig.

### Divertorbelastung

Der Wärmefluß auf die Divertorplatte von ASDEX wurde aus Messungen der zeit- und ortsabhängigen Oberflächentemperatur berechnet. Zur Temperaturmessung diente eine Infrarotkamera (siehe Abbildung).

Aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatur nach einem Plasma-Zusammenbruch wurde die dabei auf die Divertorplatte je cm<sup>2</sup> aufgebrachte Energie bzw. Leistung ermittelt.



Querschnitt von ASDEX und Position der Infrarotkamera

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V26579	03.01.02P25A 03.01.02P29A	Dr. G. Fieg Dr. H. Würz

## IRE

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

Ein Beitrag des IRE bestand in der Bewertung der Wandbelastungen auf erste Wand und Divertor im Rahmen der D-<sup>3</sup>He-Studie, die von der Universität von Wisconsin mit Beteiligung von KfK durchgeführt wurde.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		K. Kleefeldt R.A. Müller

## ITP

Studien, die nicht unmittelbar NET/ITER-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. Die amerikanische ARIES-Studie (Advanced Reactor Innovation and Evaluation Study) ermöglicht die Bewertung fortgeschrittener Tokamakreaktoren. Das KfK beteiligt sich deshalb an dieser Studie.

Gemäß den Anforderungen werden die erforderlichen Berechnungsverfahren und numerischen Methoden erweitert und verbessert.

### 1. Arbeiten für W7X

Zur Diskussion der Entscheidung des IPP über eine Referenzkonfiguration für W7X wurde ein Workshop durchgeführt. Dabei wurden von KfK die bisher diskutierten Leiterentwürfe abschließend bewertet, sowie die benötigte Kälteleistung für die ausgewählte Konfiguration für W7X (modulare Konfiguration mit vier Feldperioden zu je 12 Spulen) abgeschätzt (V25946, V25947). Die vom IPP vorgesehene technische Spezifikation für eine Baubarkeitsstudie in der Industrie wurde mit KfK diskutiert und abgestimmt. Die industriellen Arbeiten zu dieser Studie wurden von KfK mit Hinblick auf Leiter- und Spulentests verfolgt.

### 2. ARIES-Studie

Die ARIES-Studie (Advanced Reactor Innovation and Evaluation Study) hat zum Ziel, den Einfluß verbesserter plasma-physikalischer und technischer Bedingungen auf verschiedene Tokamakkonfigurationen zu untersuchen. Im ersten Jahr der Studie wurden vorwiegend eine Vielzahl von Plasmaszenarien untersucht, daneben aber auch technologische Daten fortgeschrittener Materialien gesammelt. Drei unterschiedliche Szenarien für weitere Untersuchungen wurden ausgewählt, die in den nächsten beiden Jahren näher ausgearbeitet werden sollen. Die KfK-Beiträge beziehen sich auf das Magnetsystem, dabei insbesondere auf Leiterentwürfe mit fortgeschrittenen Materialien.

### 3. Berechnungsverfahren und Auslegungsrechnungen

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

Magnetprobleme:

- Auslegung eines Solenoiden mit Eisen-, bzw. Holmiumkern in der Magnetbohrung zur Felderhöhung.
- Erstellung eines Programms zur Berechnung von Stromzuführungen für supraleitende Fusionsmagnete.
- Erstellung eines Programms zur Berechnung des elektrischen Feldes für einen Supraleiter beim Übergang in die Normalleitung (mit Graphik).
- Erstellung von Farbgraphikausgaben für die Magnetberechnungsprogramme POISSON und ANAMAG.

Kühlprobleme:

- Erstellung des Programms HELDEG zur Berechnung charakteristischer Größen von Helium für eine Isobare als Funktion der Temperatur unter Verwendung des vorhandenen Programms HEPROP.
- Erstellung eines Druck-Entropie-Diagramms (HSDIAG) für Helium und Stickstoff und graphische Darstellung.

- Erweiterung des vorhandenen Druck-Enthalpie-Diagramms (PHDIAG) bzgl. Erweiterung des Anwendungsbereiches für H und T (bis unter den Lambda-Punkt).
- Kombination von HSDIAG und PHDIAG mit Farbgraphik.
- Erstellung von PTLOSS (ersetzt HEHTX) zur Berechnung des Druck- und Temperaturverlaufs in einem beheizten Kanal.

Die bestehenden Auswertprogramme für verschiedene meßtechnische Probleme wurden größtenteils erweitert oder an aktuelle Probleme angepaßt (Spannungsaddition, Spline-Approximation von Datenmengen, Graphische Verarbeitung von Datensätzen). Wesentlicher Einsatz der erstellten oder bereits vorhandenen Programme waren begleitende Rechnungen einerseits zur Definition von TOSKA-Upgrade (Vorhaben 03.03.02) sowie Beiträge zu POLO (Vorhaben 03.03.05), und andererseits zur Beantwortung aktuell auftauchender Fragen wie Feldverteilungen für NET-Spulen (V 25948).

Die neu eingerichteten CAD/CAM Arbeitsplätze wurden erstmals eingesetzt:

- zur Erstellung der Fertigungsunterlagen für eine Flüssig-heliumpumpe, die einen Antrieb durch supraleitende Spulen hat,
- sowie die Stützstruktur für die LCT-Spule, die bei TOSKA-Upgrade im Twin Test eingesetzt werden soll. Die erarbeiteten Unterlagen dienen als Ausgangsbasis für FEM Rechnungen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25946 V 25947 V 25948	03.01.02 P28A	F. Becker Dr. R. Heller DI K. Jentzsch DI W. Lehmann <b>Dr. W. Maurer</b> DI F. Spath Dr. A. Ulbricht A. Vogt DI G. Zahn



# Arbeitsthema

## 03.02 Strukturwerkstoffe für Fusionsanlagen

Vorhaben  
**03.02.01 Nichtmetallische Werkstoffe**

### IMF

#### Lebensdauer von Mikrowellenfenstern

Für das zur Trennung des Gyrotron-Vakuums vom Plasma eines Fusionsreaktors vorgesehene Keramik-Fenster wurden die Temperaturen und thermischen Spannungen berechnet. Die Abbildung zeigt die Tangentialspannungen im Fenster für die Keramiken  $Al_2O_3$  und  $AlN$ .

Diese Spannungen gelten für eine Scheibe von 70 mm Durchmesser und 3 mm Dicke bei einer mittleren Belastung von 200 kW bei 150 GHz und einem Wärmeübergangskoeffizienten zum Kühlmedium von  $5 \text{ kW/m}^2/\text{K}$ . Hier zeigt sich schon die Überlegenheit des  $AlN$  aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit und des geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten gegenüber der Aluminiumoxid-Keramik. Für die bei Lebensdauervorhersagen benötigten Daten des unterkritischen Rißwachstums wurden erste Messungen in dem Umgebungsmedium Fluorcarbon FC43 bei  $50^\circ\text{C}$  durchgeführt. Es ergaben sich die in der Abbildung wiedergegebenen Abhängigkeiten der Rißgeschwindigkeit  $v$  vom Spannungsintensitätsfaktor  $K$ , die durch Potenzgesetze der Form

$$v = A K^n$$

mit den Parametern

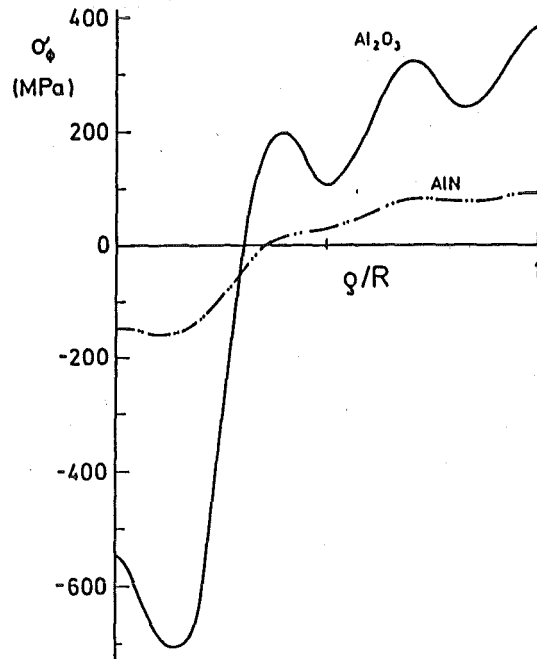
$$AlN: A = 1 \cdot 10^{-72} \text{ in } [\text{MPa}, \text{m}, \text{s}], n = 135$$

$$Al_2O_3: A = 4 \cdot 10^{-26} \text{ in } [\text{MPa}, \text{m}, \text{s}], n = 33$$

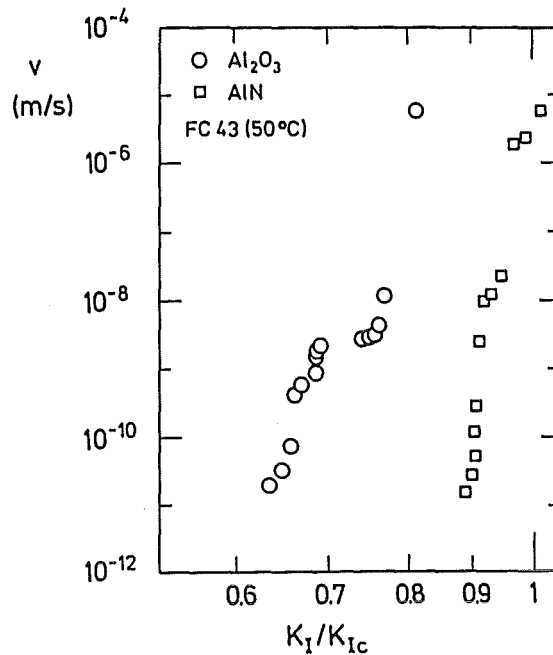
beschrieben werden können.

Es zeigt sich für das  $AlN$  ein sehr geringes unterkritisches Rißwachstum, wodurch dieses Material dem  $Al_2O_3$  auch hierin deutlich überlegen ist.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26581 V27030		Dr. T. Fett



Tangentialspannungen im HF-Fenster



Rißgeschwindigkeiten für zwei Fensterkeramiken

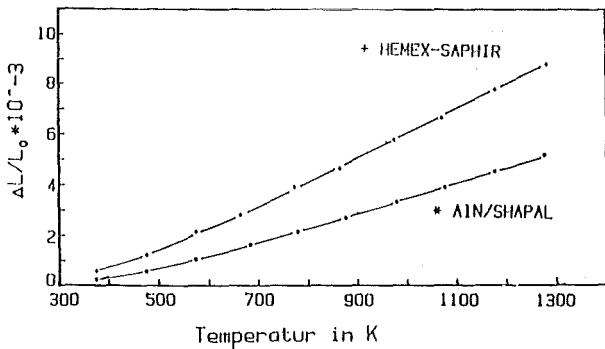
#### Eigenschaftsmessungen an Materialien für Wandschutzziegel und Mikrowellenfenster

Die Eigenschaftsuntersuchungen an verschiedenen SiC-Typen und -Qualitäten aus industrieller Herstellung wurden weitgehend abgeschlossen und dokumentiert. In Vorbereitung der abschließenden Messung des Widerstandes kleiner

SiC-Ziegel gegen die Bildung thermischer Risse wurde ein 50 kW-Azetylen/Sauerstoff-Brenner in Betrieb genommen.

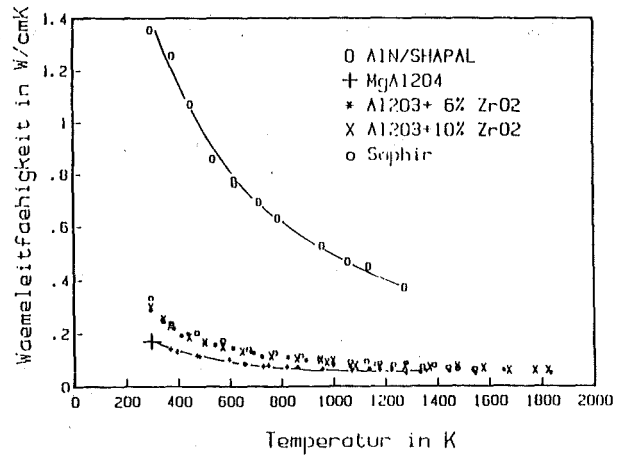
Die Auswertung von E-Modul- und Biegebruchfestigkeitsmessungen zeigte, daß die Porositätsabhängigkeit durch einen Faktor  $(1-P)^3$  angenähert werden kann. Die Abhängigkeit vom Gefügekornmesser erscheint unsicher, ist aber wahrscheinlich viel schwächer als einem Faktor  $\sqrt{d}$  entsprechend. Alle bisher untersuchten SiC-Typen und Qualitäten werden im Hochtemperaturbestrahlungsversuch HFR-D217/2 (3 dpa, 1500 °C) eingesetzt, der im 1. Quartal 1989 beginnt.

Ergebnisse der thermophysikalischen Eigenschaftsmessung an Materialien für Mikrowellenfenster sind in den Abbildungen wiedergegeben. Für bestrahlte Keramikproben wurde eine Laserflash-Apparatur geliefert und abgenommen. Eine kritische Literaturdurchsicht zum Zusammenhang zwischen Gitterschäden und Wärmetransport ergab, daß der Ansatz von Kelly vielversprechend ist und weiter verfolgt wird.

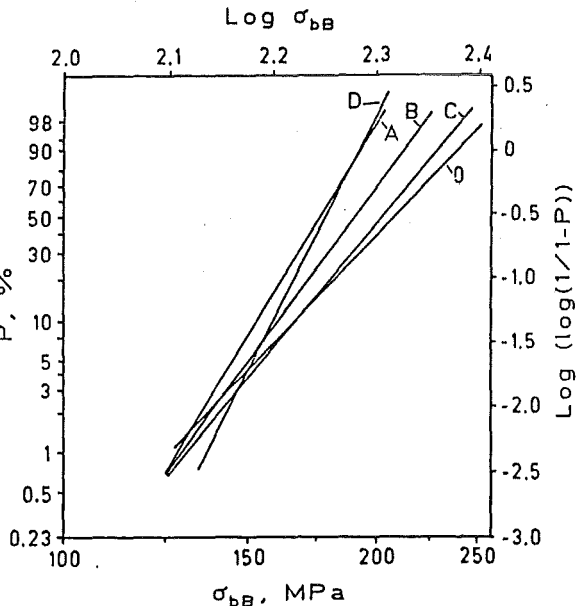


Thermische Ausdehnung von Fenstermaterialien

Bei der Untersuchung der Gefügestruktur und der Biegebruchfestigkeit verschiedener  $Al_2O_3$ -Materialien zeigte es sich, daß die Abhängigkeit der Festigkeit von der Gefügekorngröße für grobkörnige Qualitäten ausgeprägter ist als für feinkörnige. Für den Standardtyp des grobkörnigen  $Al_2O_3$ -Materials AL23 (99,5%, mittlere Korngröße 9  $\mu m$ ) wurde die Festigkeitsschwankung zwischen verschiedenen Herstellungschargen untersucht. Die Weibullverteilungen der Biegebruchfestigkeit in der Abbildung zeigen, daß bei steigender mittlerer Festigkeit mit breiterer Festigkeitsverteilung (kleinerem Weibull-Modul) zu rechnen ist. Somit verschwinden die Festigkeitsunterschiede bei technischer interessanter niedriger Versagenswahrscheinlichkeit.



Wärmeleitfähigkeit von Fenstermaterialien



Weibull-Diagramm der Biegebruchfestigkeit von AL23 aus verschiedenen Herstellungschargen.

Die Meßeinrichtungen zur Bestimmung dielektrischer Eigenschaften von Fenstermaterialien wurden durch einen Aufbau ergänzt, der die Untersuchung im Frequenzbereich der Gyrotronentwicklung des KfK bei 145 GHz ermöglicht. Für eine erste Auswahl der wichtigsten Materialien (Saphir, polykristallines  $Al_2O_3$ ,  $MgAl_2O_4$  und AlN) wurden die Dielektrizitätskonstante und der dielektrische Verlusttangens ( $\tan \gamma$ ) bestimmt. Der Vergleich zu Messungen bei 30 - 40 GHz zeigte keine wesentliche Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante auf. Im dielektrischen Verlust wurde ein Anstieg mit wachsender Frequenz für polykristallines  $Al_2O_3$  beobachtet, der aber bei Saphir ausblieb. In Saphir wurden die bisher niedrigsten Werte von  $\tan \gamma$  ( $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ ) gefunden. Die Defektausheilstudien an neutronenbestrahlten  $Al_2O_3$ -Proben wurden zur Untersuchung des Einflusses der Glühatmosfera auf die Erholung der dielektrischen Eigenschaften im GHz- und MHz-Bereich fortgesetzt.

Im Frequenzbereich von 45 - 60 MHz, der für den Einsatz der Ionen-Zyklotron-Resonanz-Heizung wichtig ist, wurde

eine Studie der dielektrischen Eigenschaften von Silikatkeramik durchgeführt. Unterschiedliche Steatitqualitäten ( $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ) zeigten vergleichbare Verluste ( $\tan \gamma \approx 15 - 18 \cdot 10^{-4}$ ), in Forsterit ( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ )-haltigem Material lag  $\tan \gamma$  bei  $8 \cdot 10^{-4}$ . Eine weitere deutliche Verlusterniedrigung kann mit der Verwendung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erzielt werden ( $\tan \delta > 2 \cdot 10^{-4}$ ).

Sinterstudien wurden für AlN mit dem Ziel durchgeführt, die für geringe dielektrische Verluste günstigen Herstellungsparameter aufzuzeigen. Mit Ca-Verbindungen ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}_3\text{N}_2$ ) als Sinterhilfen wurde nachgewiesen, daß Zugaben von bis zu 0,5 Gew.-% die dielektrischen Eigenschaften nicht beeinträchtigen. Zwischen Materialien mit grobem und feinem Korn konnte kein entscheidender Unterschied gefunden werden. Allerdings scheint ein gewisses Kornwachstum notwendig zu sein, um die sphärische Gestalt der Körner im Ausgangspulver in eine polyedrische Struktur zu überführen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25276	03.02.01P49A	M. Blumhofer
25975	03.02.01P49B	Ing. J. Burbach
26322	03.02.01P49C	J. Bürkin
V26346	03.02.01P49D	<b>Prof. Dr. W. Dienst</b>
26937	03.02.01P51A	G. Gausmann
26952		G. Haase
26953		<b>Dr. R. Heidinger</b>
		V. Karcher
		Dr. S. Nazaré
		Ch. Odemer (Azubi)
		Dr. M Rohde
		<b>Dr. B. Schulz</b>
		Dr. H. Zimmermann

### Keramische Schichten und mehrphasige Materialien für die Erste Wand

Die Entwicklung mehrphasiger keramischer Materialien für die Herstellung von Wandschutz-Ziegeln wurde im System TiC-SiC weitergeführt. Durch Heißpressen oberhalb 1900 °C gelang die Herstellung dichter Formkörper, während Kaltpressen und Sintern bei 2200 °C weniger dichte Proben ergab. Durch Zusätze von Al konnte die Dichte nur geringfügig, durch Bor-Zusätze dagegen deutlicher gesteigert werden.

Die Untersuchungen zum Phasenaufbau des Systems Si-C hinsichtlich des peritektischen Zerfalls von SiC wurden fortgesetzt.

Für den Fall einer strahlungsgekühlten Schutzvorrichtung der Ersten Wand können die Wandschutz-Ziegel ihre Wärme nur dann in ausreichendem Maß abgeben, wenn die Absorptionsfähigkeit der Wand hinter den Ziegeln durch eine Beschichtung erhöht wird. Hierzu wurden Plasmaspritzschichten aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{TiO}_2$  in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen röntgenographisch und metallographisch charakterisiert. Die Haftung des Verbundes erwies sich anhand von Querschnitts-Gefügebildern auch nach thermischer Zyklisierung (100 - 360 °C,  $10^4$  Zyklen, durchgeführt durch J. Neumann) als gut.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25275		K. Biemüller Prof. Dr. H. Holleck H. Janzer Dr. H. Kleykamp G. Schlickeiser <b>Dr. A. Skokan</b>

### Chemisch-analytische Arbeiten

Feuster- und Isolatormaterialien wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  wurden chemisch-analytisch charakterisiert. Die Nachweisgrenze metallischer Verunreinigungen in  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  (ELIMA 3) konnte mit der ICP-OES-Meßtechnik wesentlich gegenüber der AAS gesenkt werden. Die Analyse von Lithiumzirkonaten wurde im Programm aufgenommen. Pb17Li-Proben den PICOLO-Kreislaufs und statischer Kapselversuche wurden hinsichtlich der durch Korrosion gelösten Elemente analysiert. In Pb17Li ausgelagerte Zugproben aus V3Ti1Si sowie Benetzungsproben des Systems Pb17Li-AISI 316 wurden oberflächenanalytisch nachuntersucht. Nichtmetallanalysen zeigten, daß die Sauerstofflöslichkeit in Pb17Li bis 550 °C unterhalb der Nachweisgrenze von 2 µg/g liegt.

Zur Klärung des Segregationsverhaltens wurden frisch erzeugte Bruchflächen von MANET-1.4914-Proben nach Auslagerung bei 475 °C oberflächenanalytisch nachuntersucht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25273 25274	03.06.02P04A	<b>Dr. Ch. Adelheim</b> Ch. Gosgnach D. Linder E. Nold G. Streib S. Winkler

### Vorhaben 03.02.02 Metallische Werkstoffe

#### IMF

#### Rißbildung und Rißausbreitung unter thermozyklischer Beanspruchung

Die Untersuchungen an Rohrproben aus dem austenitischen Stahl 1.4436 unter zyklischer, thermischer Last wurden erfolgreich fortgesetzt. Dabei bewährte sich die gewählte drucklose Kühlung der Rohrinneiseite mit vollentsalztem Wasser. Die maximale Versuchstemperatur betrug 375 °C, die minimale Temperatur 100 °C. Rißentstehung fand ausschließlich auf der Rohrrinnenwand statt. Es wurde das Rißwachstum in Abhängigkeit von der Zyklenzahl ermittelt. Außerdem wurde die Entwicklung der Rißgeometrie untersucht; für ausgewählte Bereiche der Rohrrinnenwand erfolgte eine statistische Auswertung der Rißlängen. Das Rißwachstums-

verhalten wurde mit den Methoden der linearelastischen Bruchmechanik (LEBM) beschrieben.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		Dr. T Fett <b>DI. J. Neumann</b> Dr. B. Schinke Ing. E. Wiens

### Ermittlung des Ermüdungsrißwachstums in metallischen Verbundstrukturen

Erste Wand Konzepte in der Fusion benutzen gelötete oder explosionsgeschweißte Verbindungen zwischen Kühlrohren oder Platten um einen doppelten Einschluß des Kühlmittels sicherzustellen. Das Ermüdungsrißwachstum wurde an dem Stahl SS316L für zwei Arten des Verbundes untersucht: (a) für gelötete Strukturen mit den Lötungen NICROBRAZ 30 und NICROBRAZ 50, und (b) für sprengplattierte Proben mit einer weichen Zwischenschicht aus Kupfer. Gelötete Platten mit zweidimensionalen halbelliptischen Oberflächenrissen und gelötete Stabproben mit einem durchgehenden Anriß wurden im Vierpunkt-Biege-Test mechanisch ermüdet. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, daß die Lötung einen Riß von seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung in die Lotschicht ablenken kann. Eine Ausnahme trat nur bei der gut haftende Lötung (NICROBRAZ 30) an den Stabproben auf, bei denen der Riß durch die Lötnaht gewachsen ist. Das Verhalten des sprengplattierten Dreischichtverbundes ist dem des gelöteten Verbundes ähnlich. Halbelliptische Oberflächenrisse laufen nicht durch die Platte. In der weichen Zwischenschicht tritt eine Rißverzweigung auf. Die Risse laufen in der weichen Schicht senkrecht zur ursprünglichen Richtung und werden dort, falls die Versuchsführung dehnungsgesteuert ist, gestoppt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		G. Balzer <b>DP. E. Diegele</b> DI. S. Müller G. Thun

### Inelastisches Materialverhalten und Lebensdauervorhersagen

Ziel der Arbeit ist die Verbesserung von Rechenprogrammen, die das Versagensverhalten von thermisch hochbelasteten Komponenten in der Kernfusion beschreiben.

Zur Sicherung des doppelten Einschlußes (double containment) des Kühlmittels in der Ersten Wand werden Konzepte mit explosionsgeschweißten und gelöteten Komponenten betrachtet. Für einen metallischen Dreischichtverbund mit weicher Zwischenschicht wurden die Spannungsintensitäts-

faktoren eines durchgehenden Risses für Zug- und Biegebelastung bestimmt und mit denen des homogenen Materiales verglichen. Für gelötete Komponenten wurde in dreidimensionalen FE-Rechnungen die Temperaturerhöhung in der Ersten Wand parametrisch untersucht, die von Rissen in der Lotschicht verursacht wird. Bei einem realistischen Wärmestrom von 60 W/cm<sup>2</sup> führen schon Risse mit 2cm<sup>2</sup> Fläche zu kritischen Temperaturerhöhungen (ca. 550°C).

Für zyklische In-pile Experimente wurden inelastische Rechnungen durchgeführt. Aus den gemessenen globalen Verlängerungen der Hohlproben sollen die lokalen Dehnungen in der Probenmitte bestimmt werden. Ein neuer „quadratischer“ Probentyp (H-QUADR) zeigt im Vergleich mit dem bisher benutzten Typ (H-GRIM) den gewünschten recht homogenen Dehnungszustand entlang der Bestrahlungslänge.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<b>DP. E. Diegele</b> G. Schweinfurter

### Bestrahlungsversuche mit Neutronen

In der KNK II-Druckrohrtesteinrichtung sind Bestrahlungsversuche an zyklisch innendruckbelasteten und temperaturgeregelten Druckrohrproben aus MANET (1.4914) geplant. Vorversuche mit der in 1988 fertiggestellten Drucktransientenanlage und einer neu beschafften Temperaturregelanlage sind in Vorbereitung. Bei den noch offenstehenden Fragen zur Probenherstellung konnte z.B. nachgewiesen werden, daß die durch Punktschweißen auf der Probenoberfläche angebrachten Temperaturmeßstellen keinen Einfluß auf die Standzeit der Proben haben.

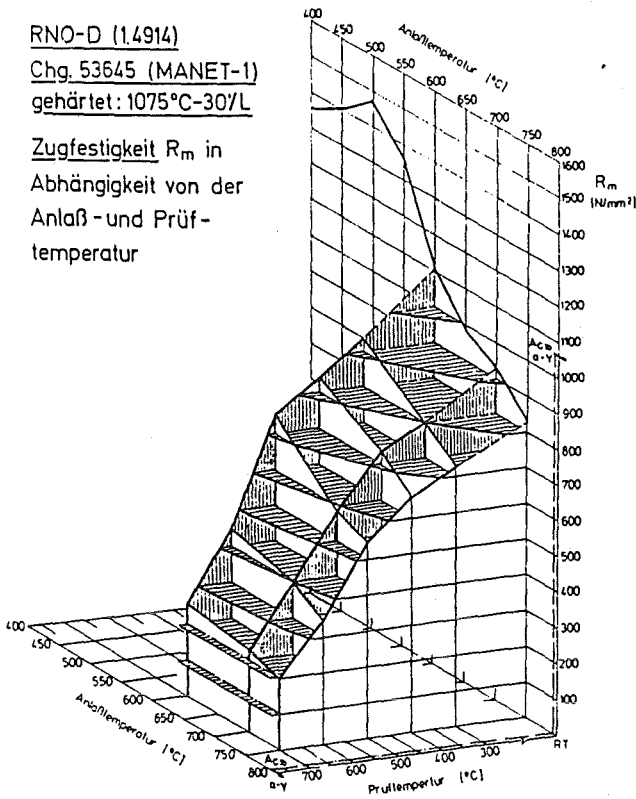
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		U. Biedermann H.-D. Großgarten DI H. Lehning DI G. Reimann <b>DI L. Schmidt</b> R. Vouriot

### Martensitischer Stahl (1.4914) für die erste Wand

An Proben aus der ersten NET-Charge des Stahles 1.4914 (MANET 1) wurden die zur Werkstoffcharakterisierung notwendigen mechanischen Eigenschaften und die Mikrostruktur untersucht. Zunächst wurde in Härte- und Anlaßversuchen die optimale Vergütungsbehandlung mit 1075°C/o,5 h+750°C/2 h bestätigt. Proben mit Anlaßtemperaturen von 600, 700 bzw. 750°C wurden in Zug- und Zeitstandversuchen geprüft. Die Zugfestigkeit ist in der Abbildung dargestellt. Die Zeitstandversuche zeigten, daß diese spezielle Charge infolge ihres erhöhten Stickstoffgehaltes eine deutlich erhöhte Zeitstandfestigkeit hat.

RNO-D (1,4914)  
 Chg. 53645 (MANET-1)  
 gehärtet: 1075°C-30'/L

Zugfestigkeit  $R_m$  in  
 Abhängigkeit von der  
 Anlaß- und Prüf-  
 temperatur



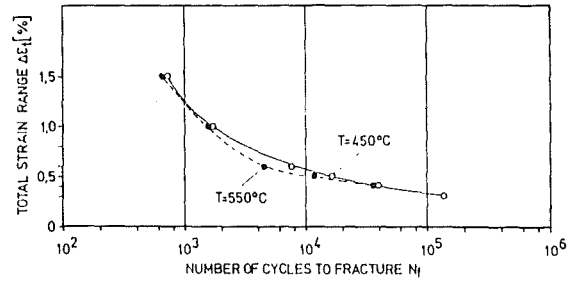
Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit von der Anlaß- und Prüftemperatur

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25985	03.02.02 P62A 03.02.02 P62B	B. Dafferner DI. E. Materna-Morris W. Meyer <b>DI. (FH) L. Schäfer</b> Ing. Schirra DI. C. Wassilew

### Isotherme Ermüdung von MANET 1

Der Einfluß der Dehnungsamplitude und der Temperatur auf die Bruchlastwechselzahl  $N_f$  ist in einem Versuchsprogramm bestimmt worden. Die Ergebnisse an GRIM Vollproben (S-GRIM) sind für die Temperaturen 450 und 550°C in einem Dehnungsamplitudenbereich von  $\Delta\epsilon_f=0,4$  bis 1,5% in der Abbildung wiedergegeben.

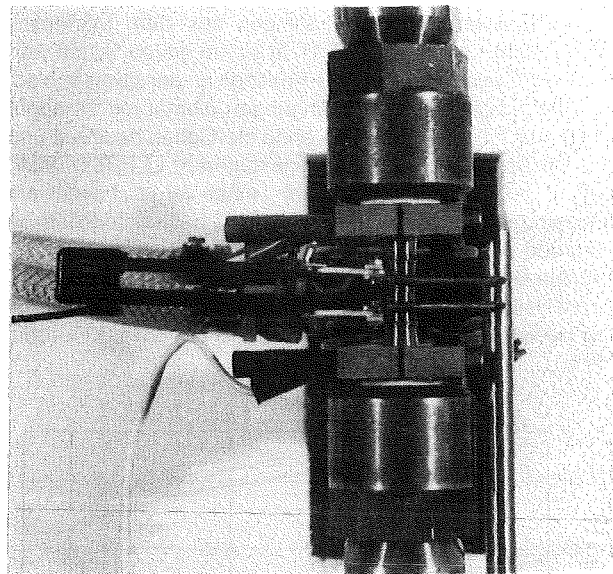
Vergleiche mit Ergebnissen eines austenitischen Stahles (AISI 316L) zeigen bei 550°C und  $\Delta\epsilon_f \geq 0,6\%$  gleiches Materialverhalten. Jedoch bei  $\Delta\epsilon_f=0,4\%$  wird für den MANET 1 ein dreifach größeres  $N_f$  gefunden als beim Austenit.



Abhängigkeit der Bruchlastwechselzahl des MANET 1 von der Dehnungsamplitude für zwei Temperaturen.

### Temperaturwechselversuche

Neben der Abnahme und vorläufigen Installation von fünf Thermozyklieranlagen konzentrierten sich die Arbeiten auf die Meßeinrichtungen zur direkten Dehnungsmessung. Die Meßeinrichtungen wurden gefertigt und erprobt, damit können jetzt innerhalb einer Meßlänge von 8 mm die Dehnungen an zylindrischen oder auch uhrglasförmigen Rohrproben (H-GRIM) zuverlässig gemessen werden. In der Abbildung ist ein typischer Aufbau an einer H-GRIM-Probe zu sehen.



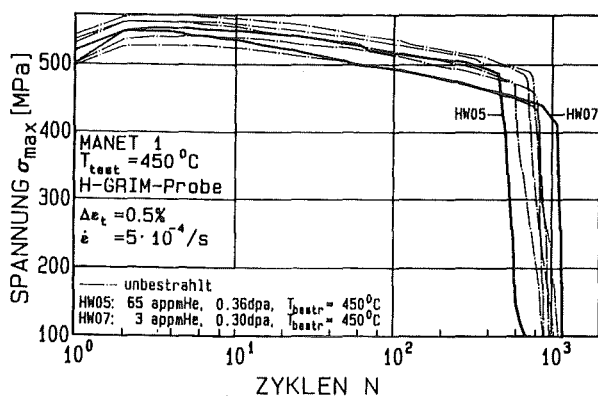
Dehnungsaufnehmer für 8 mm Meßlänge an einer eingebauten H-GRIM-Probe.

Weil die Ergebnisse temperaturzyklrierender Experimente letztlich mit denen isothermer Ermüdungsversuche verglichen werden sollen, wurde ein Verfahren entwickelt, um die der mechanischen Dehnung überlagerte Wärmedehnung zu erfassen. Am AISI 316L wurden durch Variation des Temperaturintervalles ( $\Delta T=350-550^\circ\text{C}$  bei  $T_{\min}=200^\circ\text{C}$ ) Dehnungsamplituden  $\Delta\epsilon_f$  von 0,4 bis 1,2% erzeugt. Verschiedene Rechenansätze zur Ermittlung einer Vergleichstemperatur werden zur Zeit geprüft. Die im Versuch erhaltenen Bruchlastwechselzahlen lagen deutlich unter denen der isothermen Wechsellastversuche bei 550°C. Rastermikroskopische Untersuchungen der Bruchflächen zeigten eine typische Rastlinienstruktur, aus der die Rißwachstumsgeschwindigkeit ermittelt werden kann.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.02.02 P48A 03.02.02. P59A	W. Baumgärtner <b>Prof. M. Boček</b>  DI. C. Petersen Dr. G. Rubiolo (GW) Dr. W. Scheibe DI. R. Schmitt Ing. H. Schneider W. Schweiger

### Bestrahlungsexperimente mit Ionen

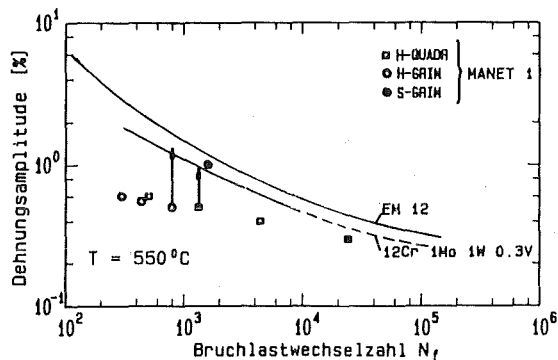
Primäres Ziel ist die Untersuchung der Überlagerung von Strahlenschäden, gasförmigen Transmutationsprodukten und mechanischer Wechselbeanspruchung in reaktorrelevanten Werkstoffen an der Zweistrahlanlage des KfK. Dazu wurden an dieser Bestrahlungsanlage wesentliche Ergänzungen im Strahlführungssystem, an der Versuchssteuerung (26864) und der Meßdatenerfassung durchgeführt. Die Umrüstung auf eine schwach aktivierbare Bestrahlungskammer läßt durch die damit verbundene ca. 40-fache Aktivitätsreduzierung inzwischen längere Hochstrombestrahlungen zu und ermöglichte somit den Beginn des Bestrahlungsprogramms an wechselverformbaren Prüflingen aus dem martensitischen Stahl 1.4914 (MANET 1). In einem ersten Schritt wurden Low-Cycle-Fatigue (LCF)-Prüflinge an der Zweistrahlanlage bei vergleichbaren Bedingungen einmal mit 64 apm Helium und einmal praktisch ohne He-Gehalt bestrahlt und anschließend einem dehnungsgesteuerten LCF-Test unterzogen. Die Abbildung zeigt anhand eines Vergleichs mit dem unbestrahlten Martensit, daß bei 450°C bestrahlte Prüflinge aufgrund bestrahlungsinduzierter Entfestigung zu höheren Bruchlastspielzahlen  $N_f$  neigen und die Anwesenheit von 65 apm Helium - dies entspricht etwa 70% des für NET erwarteten He-Gehalts - die Bruchspielzahl  $N_f$  um etwa 30% reduziert.



Zyklusunabhängige Maximalspannungen  $\sigma_{max}$  dehnungsgesteuerter Prüflinge im unbestrahlten, bestrahlten und He-implantierten Zustand

Im Hinblick auf die Entwicklung von LCF-Proben, welche während der Bestrahlung der Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt werden, konnte erfolgreich eine Probenform mit quadratischem Querschnittprofil ertüchtigt werden, welche Durchstrahlbarkeit, Kühlbarkeit und LCF-Tauglichkeit glei-

chermaßen in sich vereinigt. In diesem Zusammenhang haben rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Rißeinleitung und -fortpflanzung sowie teilinstitutsübergreifende Modellrechnungen entscheidend zu einem besseren Verständnis der Verformungslokalisation in dünnwandigen LCF-Prüflingen mit zylindrischem oder quadratischem Querschnittsprofil beigetragen. Werkstoffparameter, wie sie üblicherweise an massiven Proben gewonnen werden, können somit durch Konvertierung der nominellen in die wahren Dehnungen prinzipiell auch an nichtstandardisierten Prüflingen bestimmt werden. In der Abbildung, welche das Ermüdungsverhalten verschiedener 12%-Cr-Stähle zeigt, ist eine solche Konvertierung anhand von zwei Beispielen mit Pfeilen markiert.



LCF-Ergebnisse verschiedener Probengeometrien aus 1.4914 (Symbole) und Vergleich mit 12% Cr-Stählen (Kurven). Pfeile konvertieren nominelle in wahre Dehnungen.

Schließlich konnten analytische Arbeiten zu He-implantierten, zuggetesteten und anschließend mikrostrukturell nachuntersuchten Proben aus dem Werkstoff 1.4914 weitgehend abgeschlossen werden (25345 und 26279). TEM-Analysen des He-induzierten Blasenschwellens bestätigten u.a. nicht nur die überragende Schwellresistenz, sondern zeigten auch, daß für das Schwellen im Martensit 1.4914 der He-Gehalt maßgebend ist und Variationen im He/dpa-Verhältnis oder etwa in der Schädigungsrate das Schwellen praktisch nicht beeinflussen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26279	03.02.02 P68A	DI.(BA) S. Baumgärtner
25345	03.02.02 P68B	Ing. G. Bürkle
26864	03.02.02 P68C	DI. R. Lindau <b>Dr. A. Möslang</b> Dr. D. Preininger Ing. G. Przykutta

### Bestrahlungsversuche mit Neutronen

Im Berichtszeitraum wurde eine Kerbschlagmaschine für miniaturisierte Kerbschlagproben installiert und die rechnergestützte Auswertung zur Durchführung instrumentierter Kerbschlagversuche erfolgreich entwickelt und erprobt.

Dem Bestrahlungsexperiment SIENA am Hochflußreaktor in Petten sind nach Erreichen von einer Dosis von 5 dpa 36 Proben aus dem Material MANET 1 (1.4914) entnommen worden und stehen 1989 zu ersten Nachuntersuchungen zur Verfügung.

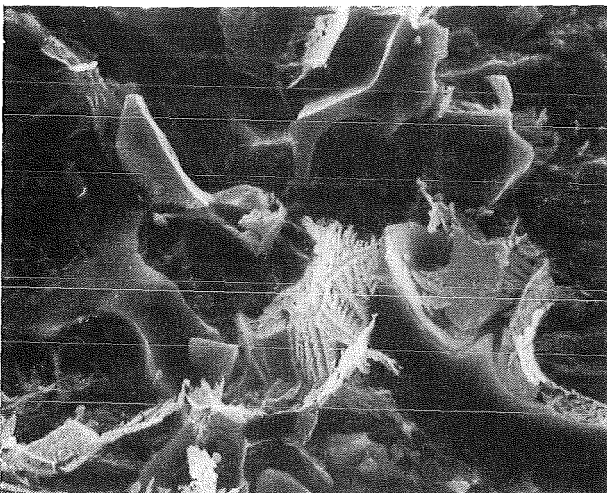
Zur Untersuchung des Deformationsverhaltens bei Wechselast und Temperaturzyklisierung unter Bestrahlung sind Druck- und Temperaturregelanlagen beschafft worden und stehen in der Erprobung. Die Probleme beim Aufschweißen der Thermolemente an die aus dem martensitischen 12% Cr-Stahl gefertigten Druckrohre sind gelöst worden und es wurde in out-of-pile-Versuchen nachgewiesen, daß diese Thermolementenschweißungen keinen negativen Einfluß auf die Standzeit der Prüflinge haben.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<b>Prof. K. Ehrlich</b> DI. (FH) K. Müller DI. L. Schmidt DI. C. Wassilew B. Dafferner G. Reimann

### Niedrig-aktivierende Legierungen

Von den Ce-Ta bzw. Ta-Hf-legierten Versuchsschmelzen wurden die Zugfestigkeitseigenschaften im Bereich RT bis 700°C bestimmt. Von beiden Legierungen wurden kontinuierliche Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder erstellt.

Durch instrumentierte Kerbschlagprüfung und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen konnte die Wirkung unterschiedlicher  $\delta$ -Ferritanteile auf die Kerbschlagarbeit martensitischer Chromstähle aufgeklärt werden (V25984, V25988). Die Kerbschlagarbeit der Tieflage und des Übergangsbereiches wird durch kleine Mengen des weichen  $\delta$ -Ferrits (ca. 0,5%) erhöht. Durch größere Mengen  $\delta$ -Ferrit wird die Schlagarbeit dagegen generell erniedrigt und die Übergangstemperatur deutlich erhöht. Dies ist ein Effekt eines spröden dendritischen Karbidsaumes, der sich (im festen Zustand) zwischen der  $\delta$ -Ferritphase und der Martensitmatrix ausbildet (siehe Abbildung).



Dendritisches  $M_{23}C_6$ -Karbid in Grenzfläche  $\delta$ -Ferrit/Martensitmatrix.

Im Berichtszeitraum sind erste vorbereitende Arbeiten zur Berechnung von Elementaktivierungen aufgenommen worden. Berechnungen dieser Art liefern derzeit noch stark kontroverse Aussagen. In einem ersten Schritt wurde deshalb die derzeitige Situation bzgl. geeigneter Rechenprogramme und relativer Datenbibliotheken ermittelt. Neben dem in Europa vorhandenen wurde auch das in Japan und Amerika existierende Potential in Betracht gezogen. Ziel der weiteren Arbeiten ist es, den heutigen Wissensstand über die Fe-, V- und Cr-Basislegierungen festzustellen, sowie die derzeit erreichbaren Genauigkeiten für entsprechende Vorhersagen zu quantifizieren. Weiterhin sollen in Abstimmung mit den anderen europäischen Gruppen verbesserte Ergebnisse für die o.g. Basislegierungen erzeugt werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V25984 V25988	03.02.02P56A	<b>Dr. K. Anderko</b> Dr. S. Cierjacks DI. (FH) E. Materna-Morris W. Meyer DI Schäfer Ing. M. Schirra

### Chemische Wechselwirkung des Strukturmaterials mit Flüssigmetallen

Die Korrosionsversuche am Stahl 1.4914 wurden im Pb-Li-Kreislauf PICOLO fortgesetzt. Die nach einer Inkubationszeit einsetzende Korrosionsgeschwindigkeit betrug

$$R[\text{mm}] = -0.0693 + 3.044 \cdot 10^{-5} t [\text{h}].$$

Die Angriffstiefe war um den Umfang der Probe ungleichmäßig verteilt [25034, 25906].

Die chemische Aktivität des Sauerstoffs im Pb-17Li wurde mit Hilfe von elektrochemischen Sauerstoffsonden ermittelt, bei 700 K betrug sie  $p_{O_2} \sim 10^{-60}$  atm [25892]. Die chemische Aktivität des Lithiums in der Legierung wurde aus den Meßwerten errechnet:

$$\text{Log } a_{\text{Li}} = 0,795 - \frac{3591}{T (\text{K})}$$

Die Pb-17Li-Schmelze reduziert in längerer Einwirkungszeit die Zeitstandfestigkeit bei 550°C des Stahls 1.4914 [24210, 25900], dieselbe Tendenz deutet sich bei Ermüdungsversuchen bei 500°C an, die nach längerer Vorauslagerung in der Schmelze geringere Lastwechselfestigkeiten ergaben.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24210 25034 25035 25892 25900 25906 26906	03.02.02P64A 03.02.02P64B 03.06.01P10A	<b>Dr. H.U. Borgstedt</b> Ing. G. Drechsler DI. G. Frees DI. M. Grundmann (Doktorand) Z. Peric

# Arbeitsthema

## 03.03 Supraleitungsmagnete

Vorhaben

### 03.03.02 Entwicklung von Toroidalfeldspulen

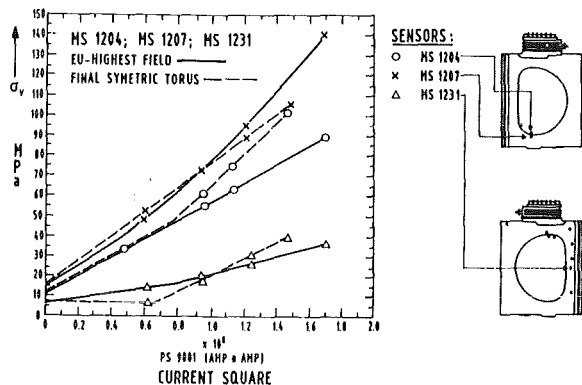
#### ITP

Die Arbeiten zielen spezifisch auf die Entwicklung der TF-Spulen von NET ab. Hierzu diente zunächst das Projekt LCT (Large Coil Task), das im Berichtsjahr mit einer zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse abgeschlossen wurde. 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. Als geeignetes Testbett wird mit Zustimmung der EURATOM-Gremien die TOSKA-Anlage des KfK ausgebaut. Über die Gestaltung der Einbauten in TOSKA wird nach Abschluß der vergleichenden Studien im Laufe des Jahres 1989 entschieden.

In diesem Zusammenhang sind auch die Planungen für die Erstellung einer neuen Kälteanlage durchgeführt worden.

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

Das große Spulenprojekt wurde mit der Erarbeitung eines zusammenfassenden Berichtes, an dem alle Teilnehmer des Experimentes mitgearbeitet haben, abgeschlossen. Es ist als Zeitschriftenband („Fusion Engineering and Design“) [V27106] erschienen [V25960], [V25587], [V22552]. Die detaillierte Auswertung lieferte für die Euratom LCT-Spule noch wichtige Ergebnisse bzgl. des Verhaltens der mechanischen Struktur. Während die gemessenen von Mises Spannungen in den Toruslastfällen noch linear mit den Kräften skalieren, werden durch die Schiefkast andere Kopplungsbedingungen zwischen Wicklung und Gehäuse geschaffen. Dies führt zu einer Nichtlinearität der von Mises Spannungen gegenüber den Kräften (Abb.).

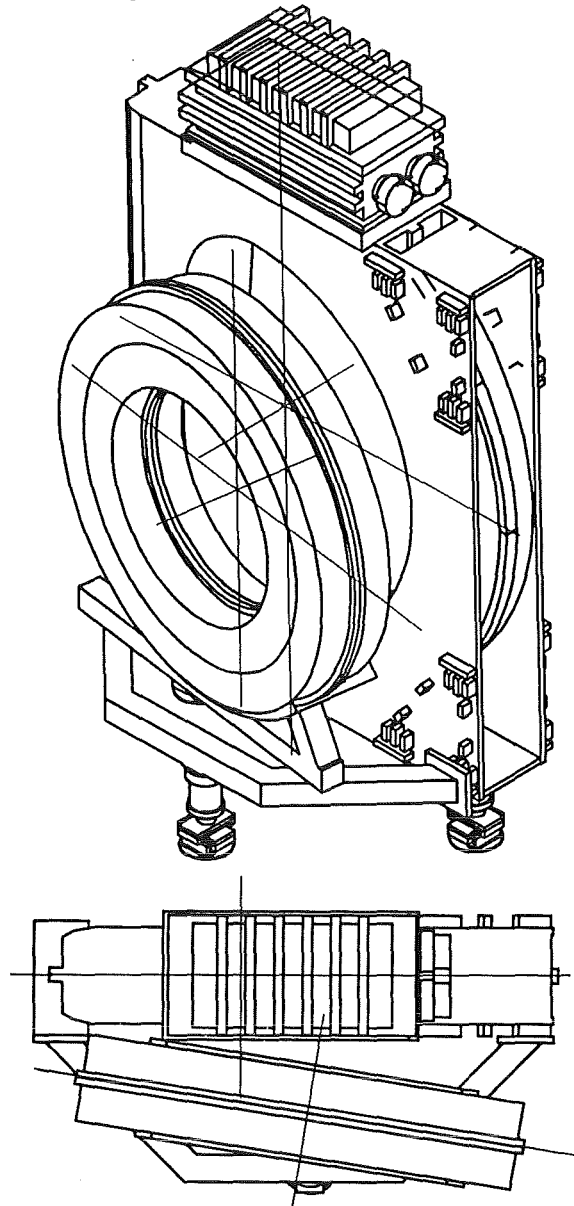


Die von Mises Spannungen als Funktion der Last für einen LCT Toruslastfall ohne und mit Schiefkastkräften. Die Einwirkung der Schiefkast führt zu einer anderen Randbedingung der Kraftübertragung zwischen Wicklung und Gehäuse und damit verbundenen Nichtlinearitäten.

Damit wurde offensichtlich, daß die Kräftekopplung zwischen Wicklung und Gehäuse in dem verwendeten Rechenmodell nicht alle Belastungsmöglichkeiten richtig wiedergibt. Es wird eine wichtige Aufgabe bei der weiteren Nutzung der LCT-Spule in Hochstrombereichen sein, diesen Kopplungsmechanismus besser beschreiben und experimentell bestätigen zu können [V26301]. Die LCT-Spule mit ihrer Ausrüstung ist Anfang 88 im ORNL ausgebaut und zur Verschiffung vorbereitet worden. Sie erreichte Anfang März das KfK, wo die Spule im ITP zur Wiederverwendung vorbereitet wird.

#### 2. Die Erweiterung der TOSKA-Anlage für den Test von NET-Modellspulen (TOSKA-U)

Eine Vereinfachung der kryotechnischen und räumlichen Randbedingungen konnte in der sogenannten „TWIN“-Testkonfiguration gegenüber der 1987 untersuchten Cluster- und Solenoidkonfiguration erzielt werden (Abb.).



Prinzip der TWIN-Testkonfiguration in TOSKA-U: Die NET-Modellspule neben der Euratom-LCT-Spule



In dieser Testkonfiguration wird die Modellspule aus NET-TF Leiter neben der KfK-LCT-Spule betrieben, die durch einen Betrieb bei 1.8 K ein erhöhtes Hintergrundfeld liefern kann. Auf der Basis der in den LCT-Tests gewonnenen Werte der Spule, sind finite Element Rechnungen durchgeführt worden. Es konnte gezeigt werden, daß bei geeigneter Strukturverstärkung die mechanischen Spannungen in Wicklung und Gehäuse auch bei 1,75-fachem Nennstrom (Auslegung für das LCT-Testprogramm war 1,4-facher Nennstrom) ihre vorgegebenen Grenzwerte noch nicht übersteigen. Eine sich anschließende Untersuchung der elektrischen und thermo-hydraulischen Betriebsparameter führte zu dem Ergebnis, daß die Spule bei 1,75-fachem Nennstrom betrieben werden kann, ohne daß neben der Strukturverstärkung Änderungen an der Spule vorgenommen werden müssen (V26302):

Auf der Basis eines 1,8 K Betriebes der KfK LCT-Spule mit Feldstärken über 10 T wurde dann die TWIN Konfiguration optimiert. Es ergaben sich zwei mögliche Konfigurationen. Bei der einen TWIN-Konfiguration wird die NET-Modellspule neben die LCT-Spule gestellt (**A**djacent **T**est **C**onfiguration **A**TC), bei der anderen befindet sich die NET-Modellspule in der Öffnung der LCT-Spule (**I**n bore **T**est **C**onfiguration **I**TC). Die Betriebsparameter und mechanischen Spannungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Verglichen mit der Clusterkonfiguration wird die LCT-Spule bereits im Normalbetrieb einer Schiefast ausgesetzt, die etwa dem 4,3-fachen der höchsten Schiefast beim LCT-Testprogramm entspricht, aber unter anderen Einbettungsbedingungen. Die notwendige Stützstruktur muß daraufhin optimiert werden. Die in der Bohrung gelagerte NET-Modellspule (ITC) erfordert einen kleineren Krümmungsradius (0.81 m) für den NET-Leiter, verglichen mit 1 m für die ATC-Konfiguration. Der Vorteil ist jedoch, daß für die ITC die benötigte NET-Leitermenge nur die Hälfte der von ATC beträgt, um die gleiche Feldstärke von 11 T zu erreichen. Um mehr Platz im Anschlußbereich der Modellspule zu erzielen, wurde auch eine Lösung untersucht, bei der die Modellspulenebene 60 ° gegen die LCT-Spulenebene geneigt ist. Einen Vergleich aller untersuchten Testkonfigurationen bezüglich der erreichten mechanischen Spannungen in den NET-Modellspulen zeigt nachstehende Tabelle. Mit der Ausarbeitung eines Entwurfs der Strukturverstärkung der LCT-Spule wurde begonnen. Der Bedarf an Kälteleistung verglichen bei 4.4 K betrug für den Cluster 2.6 kW, für den TWIN 1.7 kW, wobei die existierende Linde-Anlage für den 1.8 K Betrieb genutzt wird. Die Abb. zeigt das ausgearbeitete Verfahrensschema zur Kälteversorgung von TOSKA-U. Für den 1.8 K Kreislauf sind die entsprechenden Verbindungsleitungen zur Linde-Anlage und ein Kontrollkryostat in Auftrag gegeben worden. Weitere Planungen betrafen die Überwachung der Isolationsvakua der Kryostate und Transferleitungen sowie die Ausstattung des Leitungssystems mit kalten Trennstellen, welche ein schnelles Umschalten der Linde-Anlage von TOSKA-U auf andere Verbraucher gestattet.

### 3. Neue He-Kälteanlage

Die Planungsarbeiten für eine leistungsstarke Heliumanlage zur Erneuerung und zum Ausbau der Kälteversorgung für die Supraleitungsexperimente des ITP wurden fortgesetzt. Als Basis dient in erster Linie die Spulenanordnung für NET-Leiter-Testwicklungen TOSKA-Upgrade.

Unter Verwendung der 1987 erstellten Industriestudien mit Kostenschätzung, und in Abstimmung mit den daran beteilig-

ten Firmen, wurde die Planung für die Version mit 2 kW Kälteleistung (bei 4.2 K) konkretisiert (Abb.).

Es wurden verschiedene Aufstellungsvarianten untersucht, mit dem Ergebnis, daß für die neue Kälteanlage ein Anbau an die Experimentierhalle mit einer Verbindungsbrücke zur TOSKA-Halle die technisch und kostenmäßig optimalste Lösung ergibt. Unter Federführung der Bauabteilung wurde die Bauentwurfsplanung für das Gebäude und die Haustechnik durchgeführt. Hierzu wurden detailliertere Aufstellungspläne erarbeitet. Diese Unterlagen flossen zusammen mit einer Anlagen- und Baubeschreibung und Kostenkalkulation in die „Haushaltsunterlage Bau“ (Grüne Mappe) ein. Diese Grüne Mappe wurde im Herbst fertiggestellt und bei den zuständigen Behörden zur Genehmigung eingereicht.

Anschließend wurden der Bauantrag und das Entwässerungsgesuch erstellt. Hierzu wurden mit dem Wasserwirtschaftsamt in intensiven Gesprächen die Entwässerung und die Schutzmaßnahmen wegen der auf dem Gebäudedach vorgesehenen Öl-, Glykol- und Freon-Kühler vorgeklärt.

Zur Zeit wird an den technischen Ausschreibungsunterlagen gearbeitet. Hierzu gehören die Werkpläne und das Leistungsverzeichnis für das Gebäude mit Haustechnik sowie die Spezifikation für die Kälteanlage inklusive Versorgungseinrichtungen und Prozeßleitsystem.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25587	03.03.02 P40A	<b>Dr. A. Ulbricht</b> (für 1.)
V 25960	03.03.02 P40B	H. Bayer
V26301	03.03.02 P40C	Dr. S. Gauss (bis 31.1.88)
V26302	03.03.02 P40D	Dr. W. Maurer
V26552	03.03.02 P40E	DI F. Wüchner
V27106	03.03.02 P40F	<b>DI G. Zahn</b> (für 2.)
		Dr. R. Heller
		DI W. Herz
		Dr. A. Hofmann
		DI K. Jentzsch
		Dr. W. Maurer
		L. Schappals
		Dr. A. Ulbricht
		A. Vogt
		HIT
		DI A. Grünhagen
		H. Kapulla
		B. Kneifel
		<b>F. Spath</b> (für 3.)
		DI R. Heil
		A. Speier

	Unit	ATC		ITC upright coils		ITC 60° slope	
		MC	EU-COIL	MC upright (90°)	EU-COIL	MC 60° slope	EU-COIL
Minimum bending radius for MC	m	1.0	not important	0.81	not important	0.81	not important
Temperature (Inlet)	K	3.5	1.8	3.5	1.8	3.5	1.8
Magnetic field at reference point of winding pack	T	11.69	10.33	11.40	8,00	11.25	7.55
Stored self energy	MJ	138	253	32	253	39	253
Total stored energy	MJ	507		356		356	
Case thickness	mm	25 50	50	50		50	
Hoop stress	MPa	210 170		166			
Axial pressure	MPa	48 52	x	70	x	x	x
Radial pressure	MPa	62 82		95			
Shear stress	MPa	14 11		9			

x has to be investigated together with the reinforcement of the EU-coil

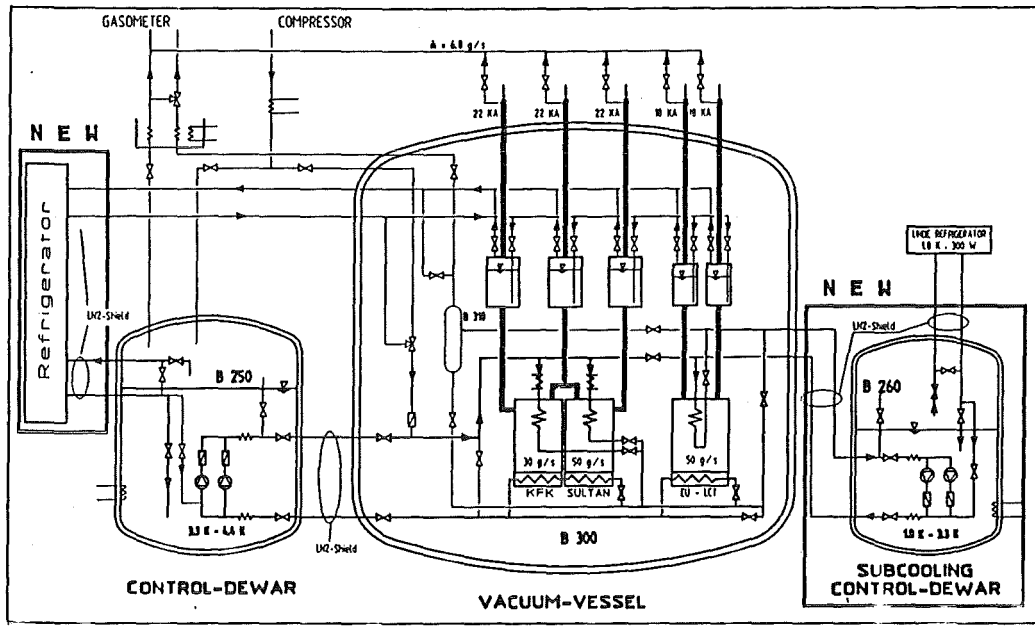
Vergleich der Betriebsparameter der verschiedenen untersuchten TWIN-Testanordnungen für NET-Modellschulen in TOSKA-U

	NET	TWIN Configuration		
		TF Coil	Adjacent MC	Inserted MC Upright (90°)
Maximum Field [T]	11.4	11.85	11.6	11.46
Current [kA]	16	22	22	22
Axial Pressure [MPa]	140	48/52*	70	+
Radial Pressure [MPa]	40	62/82*	95	+
Hoop Stress [MPa]	140	210/170*	166	+
Shear Stress [MPa]	30	14/11*	9	+
Minimum Bending Radius [m]	2.1	1.0	0.81	0.81

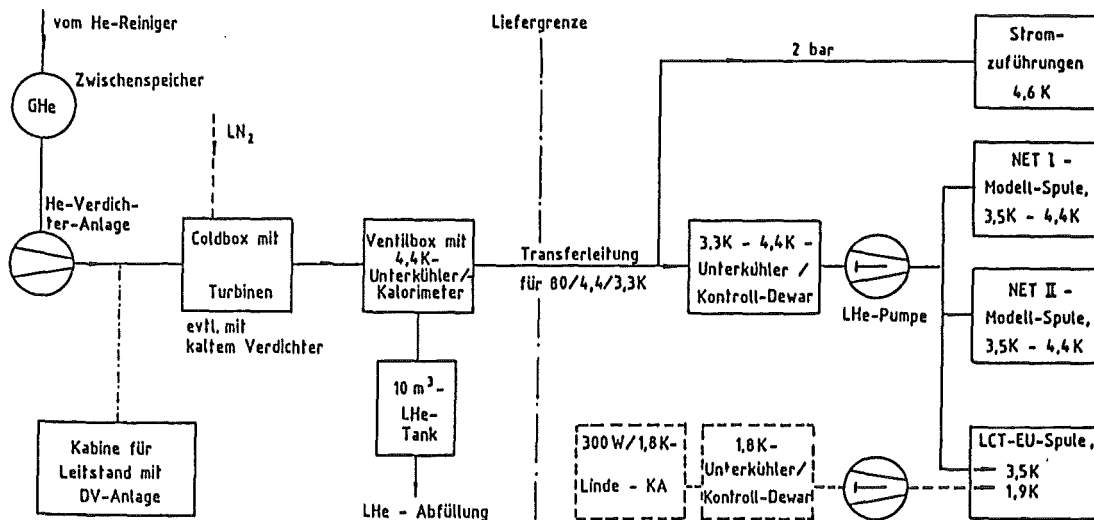
\* first number for 25 mm thickness of coil case/second number for 50 mm thickness

+ will be determined

Vergleich der mechanischen Spannungen der NET-Schulen und der in den TWIN-Testkonfigurationen erreichbaren Spannungen  
(MC = Model Coil)



Die kryogene Versorgung von TOSKA-U mit der neuen Kälteanlage und der Linde-Anlage für einen 1.8 K forcierten Kühlkreislauf



2 kW - He - Kälteanlage

TOSKA-Up-Twin-Test-Anlage

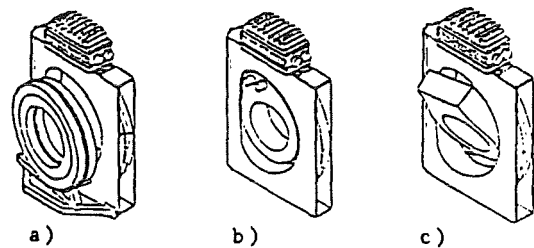
Blockschema der neuen Helium-Kälteanlage

## HIT

### Spannungsanalyse von Spulensystemen für das Projekt TOSKA-UPGRADE mit der FE-Methode.

Für das Projekt TOSKA-UPGRADE wurden zwei weitere Spulensysteme (Adjacent Twin Configuration „ATC“ und Inserted Twin Configuration „ITC“) einer Spannungsanalyse unterzogen. Für die ITC gibt es zwei Varianten, nämlich die „upright“- und die „60°“-Variante. (Abb.)

Alle Modellsysteme bestehen aus zwei Toroidalfeldspulen. Die Festigkeitsrechnungen für die Modellspulensystemkonfigurationen a) und b) wurden mit den FEM-Programmen PERMAS und ABAQUS durchgeführt. Die Analysen lieferten eine Übersicht über die Spannungsverteilungen, die Deformationen und die Spannungsspitzen in den einzelnen Spulen. Die Ergebnisse wurden mit denen der NET-Spulen verglichen.



Twin-Konfigurationen mit LCT-Spule a) Adjacent Twin Configuration b) Inserted Twin Configuration - upright c) Inserted Twin Configuration - 60°

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25669	03.03.02 P37A	A. Grünhagen B. Kneifel

## Vorhaben

### 03.03.05 Entwicklung von Poloidalfeldspulen

#### 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 Spulenkonzept auf NbTi-Supraleiterbasis verifiziert werden. Für die Prüfung dieser Technologie unter realen Betriebsbedingungen eines Tokamaks, ist dann seitens CEA der Bau einer EF-Spule (8 m Durchmesser) für TORE SUPRA in Cadarache vorgesehen. KfK/ITP trägt dazu mit der Leiter- und Spulenentwicklung, sowie den Testergebnissen der Modellspule bei.

#### 1. Entwicklung der Modellspule

##### 1.1 Fertigung des Leiters

Es konnten 4 Längen (je 150 m) des Rundkabels gefertigt werden. Zwei der Kabellängen haben eine CuNi-, die beiden anderen eine Glas/Kapton/Glas Umbündelung als „Isolation“ der Subkabel. Die Aufbringung und Kompaktierung des Schutzrohres mit dem spezifizierten Werkstoff bereitet noch Schwierigkeiten. Ein alternatives Verfahren zur Herstellung der Schutzhülle durch eine Stahlbandbandage mit anschließender Kompaktierung konnte im Labormaßstab erfolgreich demonstriert werden (V 26298).

Die Schweißung der Profilhülle mit einer Strahlteilung und einem Laser mußte aus Gründen der mangelnden thermischen Stabilität des Systems aufgegeben werden. Für Wickelversuche beim Spulenhändler wurden deshalb 50 m Kabelhülle und 20 m Kabelhülle mit einem Rundkabel auf der Fertigungsanlage mit zwei Lasern geschweißt (Abb.).

Die geschweißten Leiterlängen waren zwar für die Wickelversuche geeignet, jedoch entsprach die Qualität der Schweiß-

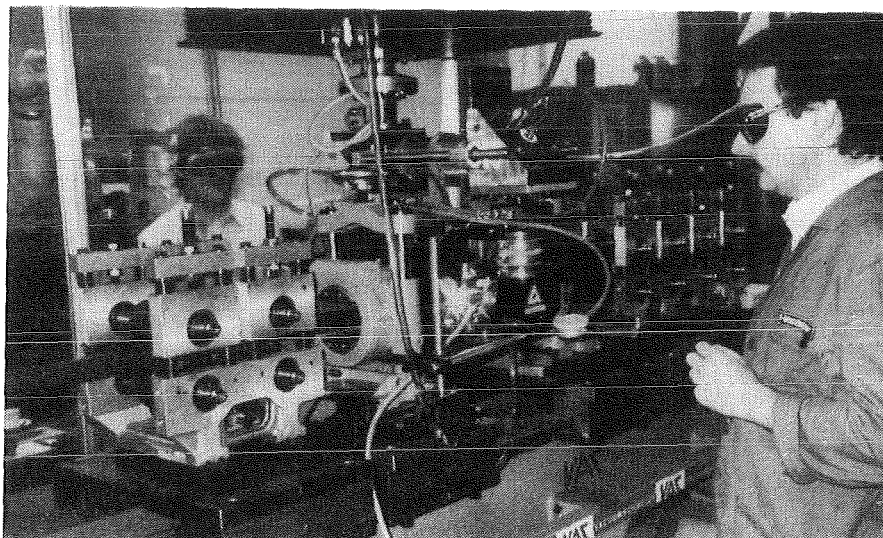
naht nicht den Anforderungen, die an das Endprodukt gestellt werden müssen. Als Ursache hierfür konnten Ziehmittellrückstände auf den Oberflächen der durch einen Ziehprozeß hergestellten Profile ermittelt werden. Eine Beschleifung der Kontaktflächen der Schweißzone führte letztlich zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Inzwischen konnten 150 m der U-Profile aus den gereinigten Viertel-Profilen geschweißt werden. Der verwendete Laser war hierfür ausreichend stabil. Alle Vorprodukte für die Leiterfertigung stehen für die Komplettierung bereit.

#### 1.2 Labormessungen zur Absicherung des Leiterkonzepts

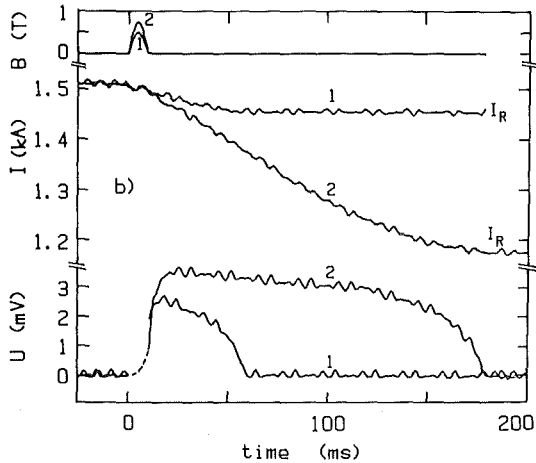
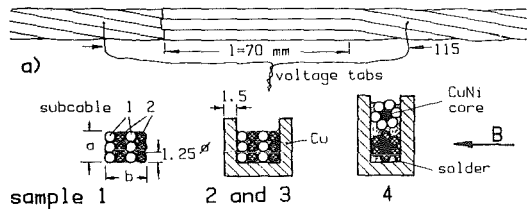
Es wurden weitere ergänzende Messungen zur Einzelleiter-Stabilität durchgeführt, bei der die Probe zusätzlich zum Pulsfeld einem konstanten Hintergrundfeld ausgesetzt war. Die Experimente dienten der Überprüfung des Stabilitätsmodells in einem bisher noch nicht untersuchten Parameterbereich.

Im Vorjahr durchgeführte Experimente zur Stabilität der Subkabelverbindungen wurden ausgewertet und ein Modell zur Beschreibung der Ergebnisse entwickelt. Das Modell erlaubt, aus der Geometrie der Verbindung und den gemessenen Übergangswiderständen die Stabilitätsgrenze zu berechnen (V 26305) (Abb. S. 65).

Das bisher verwendete einfache Stabilitätsmodell wurde ergänzt durch exakte Rechnungen des Temperaturanstiegs der Leiteroberfläche bei einem exponentiell abfallenden Wärmestrom wie er z.B. beim Plasmaabbruch auftritt. Die Rechnungen zeigen, daß bei einer exponentiell abfallenden Wärmelast es in jedem Fall zum Quench kommt, wenn die „current-sharing“-Temperatur  $T_{cs}$  überschritten wird. Daraus folgt, daß zur exakten Berechnung der Stabilitätsgrenze bei überkritischer Kühlung die analytisch mögliche Berechnung des Temperaturanstiegs und die Kenntnis von  $T_{cs}$  ausreichend ist.



Laserschweißanlage zur kontinuierlichen Durchlaufschweißung der Hülle des Pololeiters (VAC/HIL Hanau).



Drei verschiedene Lötverbindungen der Subkabel und das typische Verhalten während eines transversalen Feldpulses.

Das Experiment zur Stabilität des Polo-Kabels mit CuNi umbündelten Subkabeln wurde abgeschlossen. Eine detaillierte Auswertung ist noch im Gange. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Stabilität des Kabels liegt im oberen Strombereich wesentlich unter der Stabilität des Einzelleiters.
- Die Möglichkeit der Stromumverteilung führt nicht zu einer wesentlichen Erhöhung der Stabilität (serielle und parallele Stromeinspeisung in die Subkabel), in beiden Konfigurationen ergibt sich ein ähnliches Stabilitätsverhalten.

c) Die einzelnen Subkabel haben eine sehr unterschiedliche Stabilitätsgrenze. Nach Entfernen des „schwächsten“ Subkabels wird die Stabilität des verbleibenden Kabels erhöht.

d) Zwischen den Kühlbedingungen fl. He (1 bar) und überkritisch (4 bar) ergeben sich nur geringe Unterschiede. Dies wird aus den Einzelleiterexperimenten und von der Theorie her erwartet.

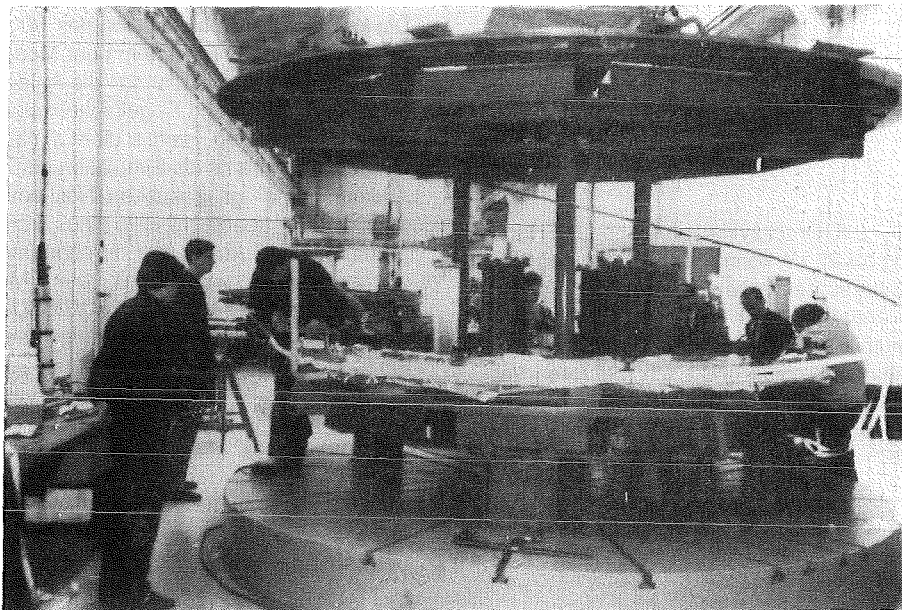
Die Klärung der Punkte a)-c) bedarf noch weiterer Untersuchungen und Modellrechnungen. Als vorläufige Interpretation gilt: Die Kontaktwiderstände zwischen Subkabeln, die die Kabelverluste bestimmen, streuen sehr stark, die Kabelverluste sind damit lokal sehr unterschiedlich, was das frühzeitige lokale Auftreten von Normalzonen erklären kann. Oberhalb des Recoverystroms (und nur dort gilt das Modell) wird die Stabilität also von den schwächsten Punkten, das sind die Kontakte mit kleinstem Widerstand, bestimmt.

Die rein formale Berechnung der Stabilitätsgrenze, bei der von homogen verteilten Kabelverlusten ausgegangen wird, ergibt also viel zu hohe Stabilitätsgrenzen. Dies ist für die Anwendung bei großen Spulen eine wichtige Erkenntnis. Für den konkreten Fall der TORE SUPRA-Spule liegt jedoch auch die gemessene Stabilitätsgrenze, bei  $I = 15 \text{ kA}$ , noch weit über den Anforderungen beim Plasmaabbruch.

Die Untersuchungen zur Zweiphasenströmung wurden weiter ausgewertet (V 25929). Die notwendigen Kenntnisse zum Betrieb des Zweiphasenkühlsystems der Polomodellspule konnten damit erarbeitet werden.

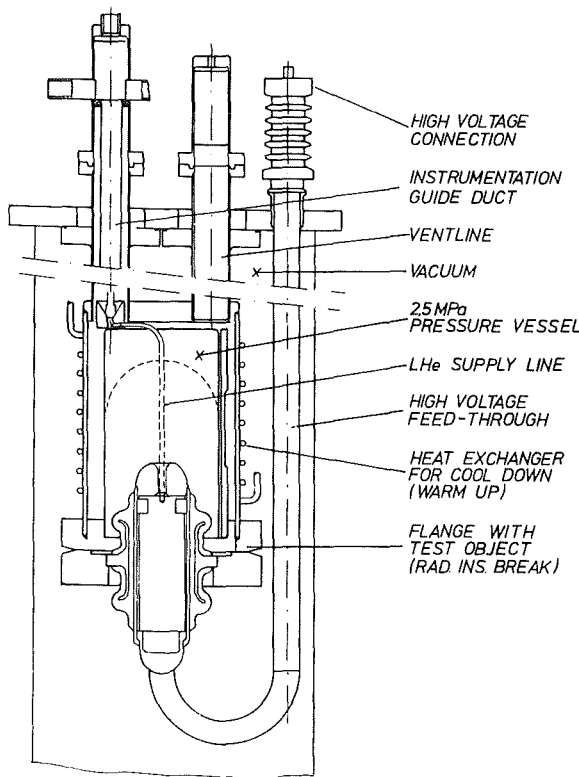
### 1.3 Modellspulenbau

Für alle wesentlichen Komponenten der Modellspule liegen die Konstruktionen vor. Die Vorrichtungen zum Wickeln der Modellspule (Abzugsvorrichtung, Reservespule, Wickeltisch) sind vorhanden und wurden mit einer 50 m Testlänge erfolgreich erprobt (Abb.).



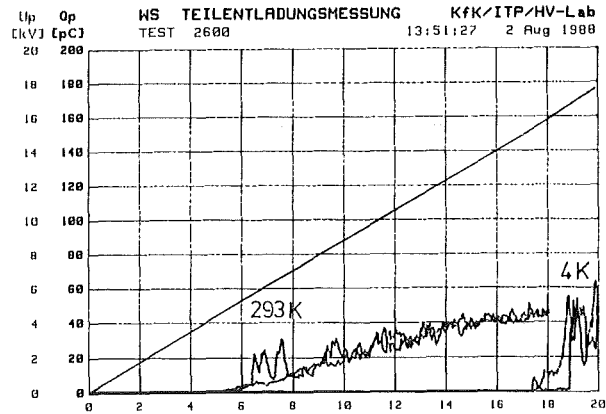
Wickeltisch mit der Reservespule beim Test der Wickleinrichtung für die POLO-Spule, mit 60 m Probeleiter (Alstom, Belfort).

Zum Wickeln des Leiters war ein Wickelzug von 1500 N ausreichend. Die Leiterisolation wurde unter dem Zug mehr komprimiert als erwartet, so daß das Isolationsband verstärkt werden muß. Der Übergangsbereich von der unteren in die obere Doppelscheibe konnte ohne Probleme gebogen werden. Die Vorrichtungen werden gegenwärtig für eine andere Fertigung genutzt. Die Werkzeuge zum Biegen und Ablängen sind in der Fertigung oder schon getestet. Die Kokille ist angeliefert und muß noch einem Lecktest unterzogen werden. Für die Instrumentierung der Modellspule wurde ein detaillierter Vorschlag für Sensorplatzierung und Verkabelung ausgearbeitet. Für die Basiskomponenten (radiale und axiale Potentialtrenner, Meßleitungsdurchführungen) liegen getestete KfK-Entwicklungen vor. Für die radialen Potentialtrenner wurde eine Apparatur in Betrieb genommen, die es gestattet, Druckzyklen, Lecktests und Messung der Teilentladungen zwischen Raumtemperatur und Heliumtemperatur auszuführen (Abb.).



Versuchskryostat zum Test des radialen Potentialtrenners der POLO-Spule.

Nach Abkühlung auf 4,2 K, Druckzyklen bis 25 bar und Hochspannungsbelastung bis 22 kV, konnte für 2 Prototypen eine Leckrate  $< 2 \cdot 10^{-8}$  mbarl/s gemessen werden. Die Einsatzspannung für die Teilentladungsaktivität lag bei 4,2 K wesentlich höher als bei Raumtemperatur (Abb.) (V 26295). Ebenso konnte eine Meßleitungsdurchführung nach mehreren Verbesserungen als einsatzfertiger Prototyp gefertigt und erfolgreich getestet werden.



Prüfung: RB11 (LENZ) repar. -HV via KB11 im Kryostat. Ut [kV]  
LHe im Druckr., Vakuum ca. 0,1 Pa im Kryostatr.  
293K, Vakuum ca. 0,2 Pa, Druckraum 25 bar N2

Teilentladungseinsatzspannung bei 293 K und 4 K für den radialen Potentialtrenner der POLO-Spule.

Der Spulenhändler konnte alle für die Modellspule gebrauchten axialen Potentialtrenner zum Test bei 4,2 K bereitstellen. Hierzu wurde eine Apparatur gebaut, in der, zusammen mit der Fertigungskontrolle, die Abnahmemessungen durchgeführt werden.

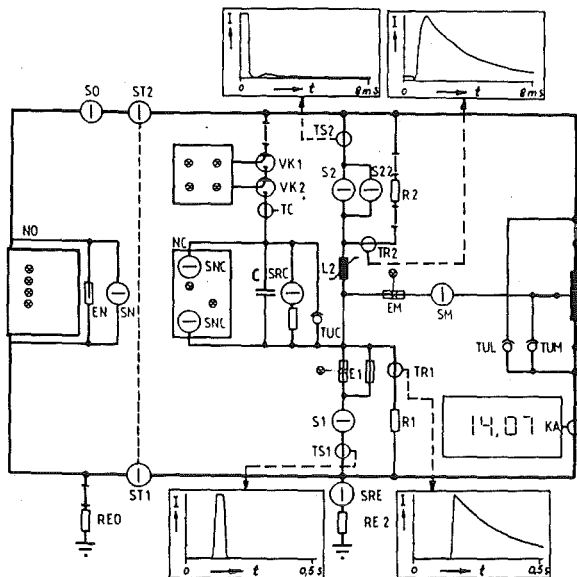
Für alle Komponenten (Doppelscheibenverbinder, Mittelabgriff und Kabelendverschlüsse) sind Prototypen für Montage- und Kalttests in der Fertigung.

Für die Hochspannungsinstrumentierungskabel konnte ein geeigneter durchschlagsfester Aufbau erarbeitet werden. Zur weiteren Absicherung sind noch Prüfungen an Prototypen notwendig. Für die Instrumentierung wurde ein berührungsloser induktiver Wegaufnehmer erfolgreich zwischen 300 - 4 K mit einer für die Modellspule typischen zeitlichen Magnetfeldänderung getestet. Die Meßgenauigkeit wurde durch den Feldpuls nicht beeinträchtigt. Ein optischer Wegaufnehmer mit kalter Elektronik wurde entwickelt und für den Test vorbereitet.

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

Die kryotechnische Installation des TOSKA-Meßstands wurde auf das Verfahrensschema der Modellspulentests umgerüstet. Mit einem Kalttest soll die Anlage einschließlich der geänderten Meß- und Regeltechnik einer Funktionsprüfung unterzogen werden. Hierbei dient die Meßstrecke des Zweiphasenexperimentes als Simulation der Modellspule. Für die Auslegung der gasgekühlten Hochspannungs-Hochstromdurchführung konnte mit Hilfe eines erarbeiteten Rechenprogrammes eine Auslegung durchgeführt werden. Das Rechenprogramm wurde mit den Messungen der im vergangenen Jahr getesteten TORE SUPRA Stromdurchführung getestet. Es war notwendig für die Stromzuführung einen geeigneten Wärmetauscherteil, sowohl bezüglich der Funktion als auch der Fertigungstechnik, zu entwickeln. Die Durchführung ist zwangsgekühlt und damit in ihrer Ausführung relevant für den späteren Einsatz bei allen Arten von forciert gekühlten Magneten. Die Stützstruktur der Spule wird für die Entladung mit piezo-elektrischen Kraftaufnehmern überwacht, die in einer Testeinrichtung einer Eichung unterzogen wurden.

Die Hochstrom-Hochspannungsschaltanlage konnte vom Hersteller übergeben werden (Abb.)



- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| NO 30KA-POWER SUPPLY                                 | TC PEARSON CURRENT TRANSFORMER       |
| EN OVERVOLTAGE PROTECTION FOR THE 30KA-POWER SUPPLY  | TUC,TUL,TUM VOLTAGE DIVIDER          |
| SN SHORT-CIRCUITING SWITCH FOR THE 30KA-POWER SUPPLY | S1 DC SWITCH                         |
| S0 HIGH CURRENT CONTACTOR                            | S2,S22,SH VACUUM CIRCUIT-BREAKER     |
| ST1,ST2 ISOLATING SWITCH                             | L2 INDUCTANCE                        |
| NC HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY                         | E1,E2 EXPLOSION SEPARATOR            |
| C CAPACITORBANK                                      | R1 30mΩ - DISCHARGING RESISTOR       |
| SRC VACUUMCONTACTOR                                  | R2 HIGH VOLTAGE DISCHARGING RESISTOR |
| VK1,VK2 IGNITRONS                                    | SRE GROUNDING-RELAY                  |
|  | RE0 GROUNDING RESISTOR 32mΩ          |
|  | RE2 GROUNDING RESISTOR 20Ω           |

30 kA, 22 kV Schaltanlage zum Test der POLO-Modellspule.  
 Oben: Hochspannungsentladung  
 Unten: Sicherheitsentladung

Die Betriebsmoden wurden mit einer normalleitenden Spule in einer vorläufigen Abnahme bis 10 kA getestet. Für den Kalttest ist die Datenerfassung auf die Peripherie der ITP/VAX umgestellt worden.

### 3. TORE SUPRA Spule

Für die TORE SUPRA Spule hat nun CEA die Federführung übernommen. Die weitere KfK-Beteiligung beschränkt sich auf die Einbringung der POLO-Modellspulen-Erfahrungen, Test von Hochspannungskomponenten und Mitwirkung beim Testbetrieb. Diese Entscheidung war notwendig, um seitens KfK ausreichende Ressourcen für die neue He-Kälteanlage zu schaffen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 26298	03.03.05P06A	H. Bayer
V 26305	03.03.05P06B	P. Duelli
V 25929	03.03.05P06C	DI S. Förster
V 26295	03.03.05P06D	DI G. Friesinger
		Dr. R. Heller
		T. Hardy
		<b>Dr. U. Jeske</b>
		DI H. Katheder
		DI G. Nöther
		Dr. A. Nyilas
		Prof. Dr. D. Li (seit 12.9.88)
		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 (bis 13.10.88)
		Dr. A. Ulbricht
		A. Vogt
		D. Weigert
		DI F. Wüchner
		V. Zwecker
		HDI:
		DI K. Rietzschel
		DI W. Heep
		HVT:
		DI. M. Oehmann
		J. Seibert

### Vorhaben 03.03.06 Materialentwicklung und Testmagnete

#### IMF

An Faserverbunden mit relativ strahlungsresistenten Polymermatrizen (Polyetheretherketon, PEEK und Polyimid, PI) wurden folgende Ergebnisse von mechanischen und thermischen Eigenschaften erzielt:

- Hohe interlaminae Scherfestigkeit mit PEEK/Kohlefaser-verbunden (190 MPa bei 4.2 K)
- Hohe statische Bruchwerte bei UD-Verbunden unter Zug- bzw. Biegebelastung (2,6 GPa bzw. 2,9 GPa bei 4.2 K)
- Eine noch nicht optimale Dauerfestigkeit (ca 45% bis 50% der statischen Festigkeit). Der Grund dürfte derzeit noch durch unzureichende Produktionsqualität (Faserondulation) gegeben sein.
- Thermische Ausdehnung von UD-Verbunden negativ in Faserrichtung, senkrecht dazu positiv mit Werten die etwa der Hälfte der Polymermatrix entsprechen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23834 25974		DI. K. Ahlborn Dr. G. Hartwig DI.(FH) S. Knaak

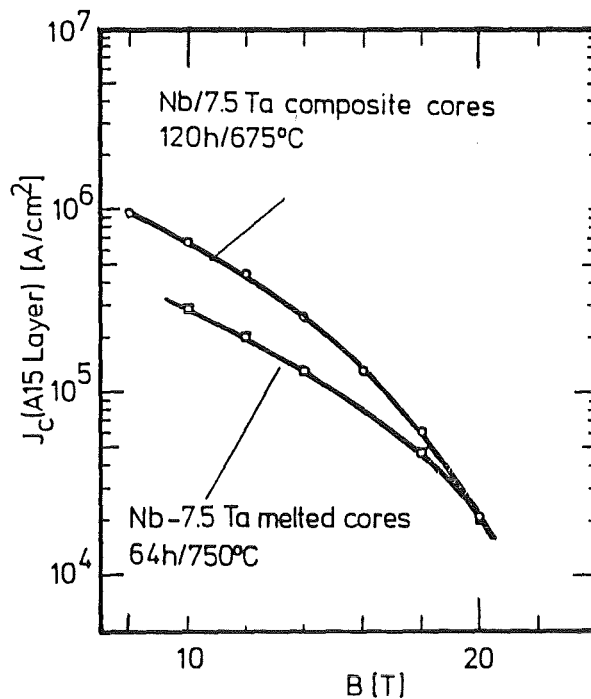
## ITP

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 der NET-Leiter und die Charakterisierung der Strukturwerkstoffe für NET.

### 1. Optimierung von $J_c$ im Basissupraleiter

Die verschiedenen Spezifikationen, vor allem von TF-Spulen, haben die Notwendigkeit gezeigt,  $Nb_3Sn$ -Vielkernleiterdrähte mit noch höheren Stromdichten zu entwickeln. Dies gilt insbesondere für Drähte, die mittels der klassischen Bronze-Technik hergestellt wurden. Die im Vorjahr beschriebene Herstellung von  $Nb_3Sn$ -Drähten mittels der pulvermetallurgischen Verbundkernmethode resultiert in einer Zunahme der kritischen Stromdichte  $J_c$  gegenüber den klassischen  $Nb_3Sn$ -Bronze-Drähten um einen Faktor  $\sim 2$  bei 10 - 12 T. Es galt den Nachweis zu erbringen, daß diese Verbesserung im wesentlichen durch verbessertes Pinning erreicht wird. Systematische Untersuchungen an verschiedenen Drähten zeigten aber immer einen Kreuzungspunkt bei  $\sim 16$  T, der dieser Aussage widerspricht [24121]. Durch Korrektur der verschiedenen  $J_c$  vs. B-Kurven auf denselben Wert  $\epsilon_m$  des Prestresses (dieser wurde für alle Drähte experimentell bestimmt) ergab sich der in der Abbildung dargestellte Verlauf (V25914).



$J_c$  als Funktion des angelegten Feldes für 19-Kern- $Nb_3Sn$ -Drähte: Vergleich zwischen Nb/7.5 Ta Verbundkerndrähten (obere Kurve) und Drähten mit erschmolzenen Nb-7.5 Ta-Kernen (untere Kurve).

Der Vergleich zwischen geschmolzenen Nb-7Gew.%Ta-Kernen und pulvermetallurgisch hergestellten Nb-7Gew.% Ta-Verbundkernen zeigt nun, daß die Erhöhung von  $J_c$  für kleine B-Werte am größten ist, während sie in der Nähe von  $B_{c2}$  verschwindet. Dies ist der Beweis dafür, daß die Erhöhung von  $J_c$  allein auf die Erhöhung der Haftkraft zurückzuführen ist. Im Hinblick auf eine industrielle Anwendung der Verbundkernmethode wurde versucht, die Kerne nicht pulvermetallurgisch, sondern mit speziell konzipierten Bündeln aus Nb und Ta herzustellen. Es stellte sich heraus, daß die extrem große Nb-Ta-Zwischenfläche in pulvermetallurgisch hergestellten Kernen nur durch ganz besondere Maßnahmen erreicht werden kann. Neue Versuche mittels der „Extended Mesh“-Methode sind im Gange.

## 2. Leitertesteinrichtungen

### 2.1 Hochfeldleiterteststand

Der Hochfeldleiterteststand (10 kA/100 kN bei  $\leq 13$  T) für NET-TF-Leiter wurde erstmals erfolgreich unter axialer Vollast betrieben. Diese Anlage wird sowohl für die Tests des KfK-Leiterkonzeptes für NET-TF-Leiter (Kap.3), als auch für die anderen, im Auftrag des NET-Teams entwickelten Leiter dienen. Um darüber hinaus den Effekt der in Fusionsspulen wirkenden starken transversalen Druckkräfte auf  $J_c$  an den NET-Leitern direkt zu testen, wurde eine entsprechende Erweiterung der Testeinrichtung beschlossen. Die Konstruktion wurde fertiggestellt und die Fertigung begonnen.

### 2.2 Untersuchungen am HOMER-Teststand

Für die HOMER-Anlage wurde eine Testeinrichtung, in der auf einlagige Spulenanordnungen im Magnetfeld bis zu 11,5 T neben den Lorentzkräften auch mechanische Zug- und Druckkräfte hydraulisch auf supraleitende Windungen aufgebracht werden können, in Betrieb gesetzt. Ein wesentli-

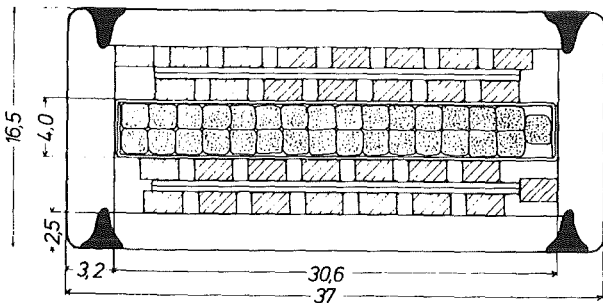


cher Punkt der damit möglichen Messungen von  $J_c$  unter mechanischer Belastung ist die exakte Bestimmung der erzeugten Dehnungen, die über dem Umfang einer Windung etwas ungleichförmig sein können, so daß mit mehreren Dehnungsmeßstreifen gemessen werden muß. Es wurden dazu Dehnungsuntersuchungen an einfachen Stahlreifen in dieser Anordnung gemacht. Der Magnetowiderstandseffekt bei Gleichstrommessungen zeigte sich als vernachlässigbar, die Unsymmetrie in der Arbeitsweise der Versuchsanordnung wurde zu 0,05 % bestimmt. Dies bedeutet einen nur geringfügigen Fehler im Dehnungsnullpunkt.

An Bündelleiterproben wurde der Effekt der mechanischen Vorspannung der  $Nb_3Sn$ -Leiter gegenüber der Stahlhülle durch Volumenänderung bei der Reaktionsglühung untersucht. Es ergaben sich keine Ansatzpunkte für Volumenänderungseffekte  $< 0,4$  %.

### 3. Entwicklung von NET-TF Spulenleitern

Ausgehend von der Fertigungserfahrung bei der industriellen Entwicklung des Modelleiters wurde das NET-TF Spulenleiterkonzept modifiziert [V26297] (Bild).



NET/KfK-16kA/12 T-Leiter

Die wesentlichen Unterschiede zu dem früheren Entwurf bestehen in der Auslegung der Materialdicke der Leiterhülle und in der flacheren Ausführung des supraleitenden Kerns durch das Weglassen des elektrisch isolierten Kernbandes. Die Fertigung des Cu-Sn-Nb Seiles ohne Kernband erwies sich fertigungstechnisch sicherer, im Vergleich zu einem Seil mit einem Kernband. Die dadurch gewonnene Dickenreduzierung kam einer verstärkten Ausführung der Hülle zugute. Die neuen NET-Spulenparameter mit Druckspannungen von 40 MPa in radialer und 140 MPa in transversaler Richtung machten eine deutlich dickere Hülle notwendig. Die ersten Abschätzungen ergeben trotzdem eine Radialdruckspannung von  $\sim 40$  MPa im supraleitenden Kern, was bei 12 T zu einer Reduktion von  $J_c$  um 15 - 20 % führt.

Die Reaktionsglühung des  $Nb_3Sn$ -Flachkabels erwies sich als unerwartet schwierig. In einem speziellen vakuumdichten Glühbehälter wurden drei Glühringe mit verschiedenen  $Nb_3Sn$ -Flachkabeln getestet, die als Scheiben aufgewickelt waren. Die unter hochreinem Argon durchgeführte Reaktionsglühung zeigte die prinzipielle Machbarkeit dieses Prozesses. Die optimierte Kombination, bestehend aus Seil, Glühring und Isolationsband (Graphitfolie) wies nach der Reaktionsglühung eine sehr niedrige Schwankung auf, sowohl in der Breite als auch in der Dicke. Auf etwa 10 m Länge war nur eine Toleranz in der Breite von 12,45 - 12,49 ( $\pm 20$   $\mu m$ ) und in der Dicke von 1,995 - 2,015 ( $\pm 5$   $\mu m$ ) feststellbar. Die durchgeführten mechanischen Messungen

bei 4 K für die Feststellung der Integrität der gelöteten Komponenten wies die korrekte Wahl des Lötmaterials nach. Bei speziell hergestellten Scherzugproben mit  $Sn_{58}Pb_{39}In_3$  und  $Sn_{50}Pb_{32}Cd_{18}$  wurden Scherzugfestigkeiten von  $\sim 39$  MPa und  $\sim 26$  MPa bei 4 K gemessen, dies liegt im vertretbaren Bereich.

## 4. Charakterisierung von Strukturmaterialien

### 4.1 Testprogramm für die Stähle des NET-Magnetsystems

Die stumpfnahgeschweißten Materialien 1.4429, 1.4435 und 1.4306 wurden für die mechanischen Untersuchungen vorbereitet. Die Doppelhalb-V-Naht mit einem Nahtöffnungswinkel von  $60^\circ$  bei einer Plattenstärke von 30 mm ermöglichte für die Probenentnahme eine zweckmäßige Vorgehensweise: Durch geschickte Platzierung der Proben in der Naht konnten jeweils 2 Proben in dem Schweißgut mechanisch herausgearbeitet werden. 60 mm lange Zugproben, sowohl quer zur Naht als auch longitudinal im Schweißgut, sind aus neun verschiedenen Werkstücken herausgearbeitet worden. Für die bruchmechanischen Untersuchungen wurden ebenfalls Kompaktzugproben (Riß entlang der Nahtmitte und Riß in der Wärmeeinflußzone) angefertigt. Für Rißausbreitungsmessungen sind 6 mm dicke Kompaktzugproben in den obengenannten Orientierungen maschinell herausgearbeitet worden. Der Beginn der Untersuchungen wurde programmäßig für das Jahr 89 vorgesehen.

Die Installation des Servozylinders und die ersten Tests bei 300 K des neuen Mehrfachprobeneinsatzes an der Zugmaschine wurden erfolgreich beendet. Die kraftschlüssige Kopplung des Servozylinders zum Verdampferkryostaten ist vorbereitet. Der speziell gefertigte Endoskopkopf mit Faseroptik - notwendig für die Ermittlung der Rißausbreitung im kryogenen Bereich - konnte erfolgreich getestet werden.

### 4.2 Charakterisierung von verbesserten Tieftemperaturstählen

Mechanische Untersuchungen an austenitischen Mangan-Chrom-Stählen, die nach Vorgabe in der Industrie gefertigt wurden, haben gezeigt, daß die Stähle mit hohem Mn-Gehalt (30 Gew.%) keinen verformungsinduzierten Ferromagnetismus bilden und damit für Tieftemperatur-Anwendungen besonders geeignet sind.

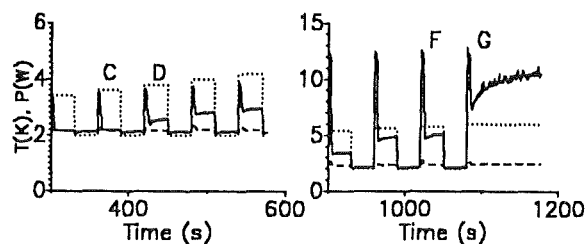
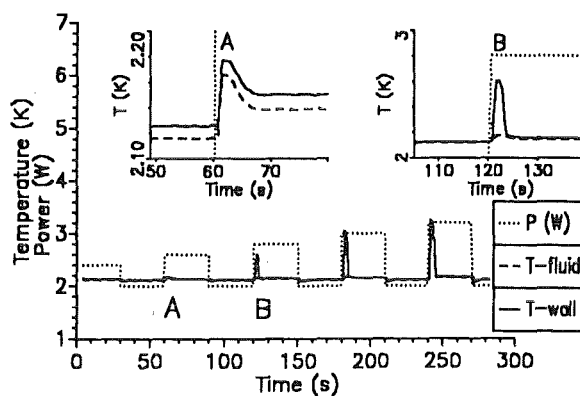
Kerbschlagbiegeversuche, die an austenitischen Schweißverbindungen bei tiefen Temperaturen durchgeführt wurden, haben ergeben, daß Prüfergebnissen bei 4 K nur eine bedingte Aussagekraft zukommt.

Zum genauen Studium des plastischen Verhaltens und der Bruchvorgänge von Metallen bei tiefen Temperaturen wurden verschiedene Wegaufnehmer kleinster Bauart entwickelt, die es erlauben, im Temperaturbereich von 300 bis 4 K Wegänderungen von weniger als 0,2  $\mu m$  zu erfassen.

Mit Spannungs-Dehnungs-Versuchen eines metastabilen Chrom-Nickel-Stahls konnte erstmals ein Beispiel dafür gegeben werden, wie durch dissipative Prozesse eine zeitliche Selbstorganisation der plastischen Deformation erfolgt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24121	03.03.06 15 A	R. Berghöfer (bis 30.6.88)
25228	03.03.06 15 B	DI N. Brünner
25229	03.03.06 15 C	<b>Dr. R. Flükiger</b> (für 1. und 2.1)
V26297	03.03.06 15 D	F. Gauland
V26699	03.03.06 16 A	Dr. W. Goldacker
V26946	03.03.06 16 B	DP W. Hehn
	03.03.06 16 C	Dr. A. Hofmann Frl. A. Kling DP H.P. Krämer B. Lott <b>Dr. A. Nylas</b> (für 3. und 4.) Dr. B. Obst H. Orschulko J. Pytlík H. Raber Dr. T. Schneider Dr. E. Seibt DI W. Specking S. Stumpf <b>Dr. P. Turwoski</b> (für 2.2) Dr. T. Wolf

Hierzu sind im Berichtszeitraum umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Ein typisches Versuchsergebnis ist in der Abbildung wiedergegeben. Hier ist dargestellt, wie sich Wand- und Fluidtemperatur in der Mitte einer etwa 10 m langen Teststrecke verändern, wenn dort die Belastung von einer Grundlast (2 W) an einem Cu-Rohr von 4 mm Innendurchmesser und 10 cm Länge ausgehend, in Stufen erhöht und wieder abgesenkt wird. Hierbei kommt es zur Ausbildung von Temperaturspitzen. Die Spitzentemperatur der Wand hängt entscheidend davon ab, ob während der Laständerung das Fluid superfluid bleibt (A) oder ob ein Übergang zu He I (B) oder gar zu He-Dampf (F, G) stattfindet.



Temperaturänderung an einem veränderlich beheizten Cu-Rohr, das in einem selbsterregten TMP-Kühlkreis eingebunden ist. Die Spitzen A..G kennzeichnen Betriebszustände bei unterschiedlichen Amplituden des Heizpulses (2,4 ... 6,0 W).

Bei den hier vorliegenden Betriebsbedingungen bilden sich die Spitzen stets ohne aktive Regeleingriffe zurück. Es gibt aber auch Bedingungen, bei denen das System nach einer plötzlichen (oder auch langsamen) Laständerung ins Schwingen gerät. Diese besonders heiklen Betriebsbedingungen wurden systematisch abgegrenzt. Sie liegen außerhalb der Bereiche, die bei technischen Anwendungen (etwa der Kühlung der LCT-Spule) erwartet werden. Außerdem konnte verifiziert werden, daß solche Schwingungen mit einfachen Maßnahmen unterdrückt werden können.

## 1.2 Materialien für TMP's:

Genauere Untersuchungen an TMP's, die aus Zellulosenitrat-Filternscheiben der Firma Sartorius hergestellt wurden, haben gezeigt, daß die in Edelstahlrohren fixierten Scheiben beim Abkühlen reißen. Da sich diese Risse offensichtlich in den einzelnen Scheiben gegeneinander versetzt ausbilden, ist die damit verbundene Degradation der Pumpwirkung nur sehr gering. Es ist noch zu untersuchen, ob diese Materialien bei geeigneter Abstützung in technischen Anlagen eingesetzt werden können (V 25928).

## Vorhaben

### 03.03.07 Kryotechnische Systeme und Entwicklungen

#### ITP

Die Arbeiten haben zum Ziel, die für den Betrieb supraleitender Fusionsmagnete erforderlichen kryotechnischen Voraussetzungen zu schaffen bzw. zu optimieren. Im Vordergrund stehen experimentelle Untersuchungen zur Kühlung mit He-Zwangsströmung, wie sie bei allen NET-Spulen vorgesehen ist. Ferner wurden Untersuchungen zur Verbesserung der thermischen Isolation großflächiger Kryostate und Transferleitungen durchgeführt und die Laboreinrichtungen für Tieftemperatur-Meßtechnik und Sondenkalibrierung modernisiert.

#### 1. Kühlung mit erzwungener Strömung von superfluidem Helium

##### 1.1 Kühlkreis mit selbsterregter thermomechanischer Pumpe (TMP) bei zeitlich veränderlicher Belastung

Frühere Untersuchungen (25923, 24128) haben gezeigt, daß die Temperaturverteilung in Kühlkreisen, bei denen die Konvektion von Helium mit selbsterregten TMP's angetrieben wird, unter stationärer thermischer Belastung sehr gut vorausgesagt werden kann. Die vorhandenen Rechenprogramme genügen den Anforderungen aber nicht mehr, wenn

- das System in Grenzbereichen sehr kleiner oder sehr großer Wärmelast betrieben wird,
- sich die thermische Belastung schnell ändert.

### 1.3 Berechnungsgrundlagen

Die in der Literatur auffindbaren Daten für die Viskosität von Helium II wurden gesichtet und für numerischen Zugriff aufbereitet. Sie sind Bestandteil des Rechencodes PTLOSS, einem Programm zur Berechnung von Druck- und Temperaturverteilung in eindimensionalen Strömungen von He II/He I in beheizten Kanälen.

### 1.4 Auslegung von thermomechanischen Pumpen für den 1,8 K-Betrieb der LCT-Spule

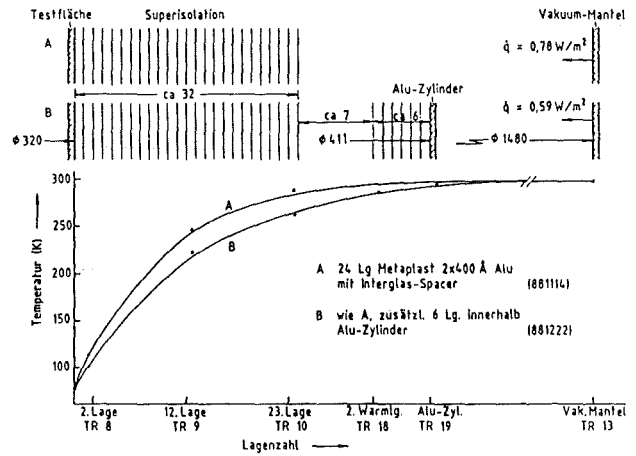
Unterschiedliche Konfigurationen von TMP's werden hinsichtlich ihrer Eignung für den vorgesehenen Einsatz der LCT-Spule in TOSKA/upgrade untersucht. Einige typische Betriebszustände sind in der Tabelle gegenübergestellt. Die technisch besonders einfachen Lösungen, die die Anregung der He-Strömung mittels einer Fremdheizung vorsehen (Syst. 1 u. 2), erfordern eine nicht vernachlässigbare Zusatzbelastung von mindestens 14 W bei optimistischer bzw. 20 W bei konservativer Annahme für den Gesamtströmungswiderstand, wenn eine Wärmelast von 10 W in der Spule und zusätzlich 20 W an den Stromzuführungen angenommen wird. Wenn diese Belastung durch Einbau geeigneter Wärmeaustauscher an der Pumpe (selbsterregte TMP, System 3) zum Antrieb der Strömung genutzt wird, ergibt sich, auch bei konservativer Annahme für den Strömungswiderstand, in den äußeren Scheiben der Spule eine hinreichend niedrige Temperatur. Aufgrund dieser Abschätzung wird für die LCT-Spule eine TMP mit ca. 250 mbar maximalem Förderdruck und ca. 20 g/s maximalem LHe-Strom vorgeschlagen. Die vorhandenen Versuchsergebnisse lassen eine Skalierung in diesem Leistungsbereich zu.

Modellsystem	1	2	3
therm. Belastung (W) (Spule + Stromzuführung)	10 + 20		
Fördordruck (mbar)	10	100	114
He-Strom (g/s)	14	14	15
Ein-/Austrittstemp. (K)	1,8/3,4	1,8/3,4	1,8/3,5
erforderl. 1,8-Kälteleistung (W)	44	50	30

Tabelle: Vergleich der 1,8-LCT-Betriebsbedingungen bei unterschiedlichen Anordnungen von TMP's

## 2. Superisolationstechniken

Die Tests an einem LN2 gekühlten zylindrischen Einsatz (320 mm  $\phi$  x 1900 mm Höhe) innerhalb des Testkryostaten TESSI wurden nahezu abgeschlossen (V 25959). Dabei wurden Lagenzahl und Stoßkonfiguration einer hochwertigen Blanketisolation variiert. Im Hinblick auf Kälteschildsysteme langer He-Transferleitungen wurde die hochwertige, aber teure Superisolation in Blanketbauweise, mit einer gewickelt aufgetragenen, preiswerten Superisolation verglichen. Vergleichsmessungen der Temperaturprofile und Isolationswirkung mit einer gestuft ausgeführten Superisolation führten zu den aus der Abbildung ersichtlichen Ergebnissen.



Temperaturprofile zwischen Kalt- (80 K) und Warm- (Raumtemperatur) Fläche

Ein Experiment zur Abklärung von spontanen Störungen des Isolationsvakuums und deren Auswirkung auf momentane und bleibende Degradation der Isolationsqualität wurde vorbereitet.

## 3. HELITEX-Anlage

Die HELITEX-Anlage, welche aufgrund anderer prioritärer Aufgabenstellungen seit Ende 1983 nicht mehr betrieben werden konnte, wurde im Berichtsjahr durch umfangreiche Umrüstungen und Neuausstattungen modernisiert. Diese Modernisierung betrifft insbesondere einen flexibleren kryoverfahrenstechnischen Einsatz der Anlage bei He I- und später auch bei He II-Bedingungen. Die geplanten He I-Experimente zur vergleichenden thermohydraulischen Untersuchung der Heliumzwangskühlung im Hinblick auf die NET-Magnete und zur Stabilität und Ökonomie bei geschlossener Sekundärkreislaufkühlung mit kalten Umwälzorganen wurden 1988 vorbereitet. Hierzu wurden das Kryoverfahrensschema, die steuer- und regeltechnische Ausstattung zum Betrieb der Anlage mit dem (MG)-Refrigerator sowie die Verrohrung und Instrumentierung der beiden Heliumkryostate neu konzipiert. Der Kontrollkryostat mit dem LHe-Badwärmehaustauscher als thermischer Koppelstelle zwischen dem primären Refrigeratorkreislauf und dem Sekundärkreislauf mit kalter Pumpe wurde neu installiert und instrumentiert und steht für erste Funktionstests bereit.

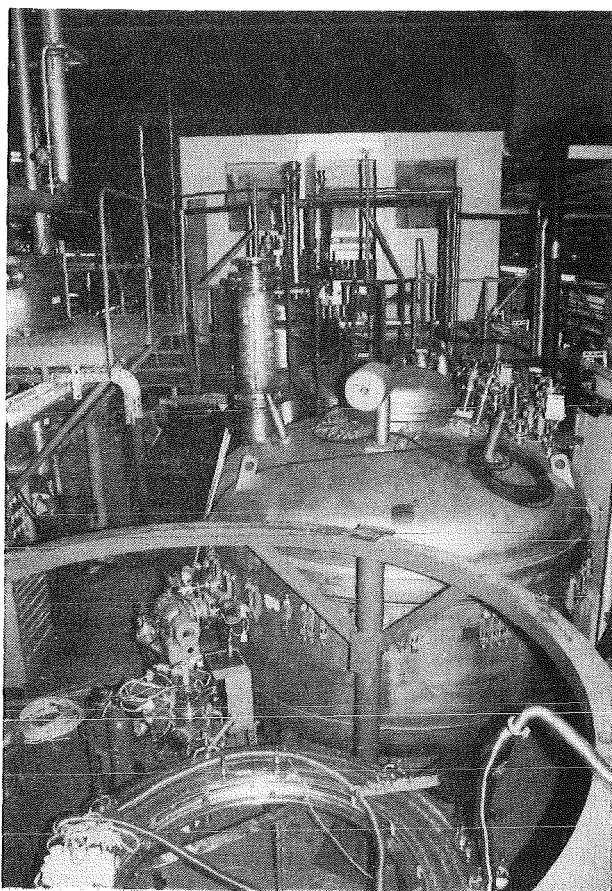
Die He-Transferleitungen zwischen Kontrollkryostat und dem das eigentliche Testobjekt aufnehmenden „Objektkryostaten“ wurden zur Verbesserung der thermischen Isolationsqualität aufgetrennt und mit Superisolation und verlustärmeren Abstützungen und Vakuumentrennungen versehen.

Das erste Testobjekt (frühere Hohleiter-Dummy-Spule) wurde bzgl. der Instrumentierung revidiert und aufgerüstet und für den Einbau und die Verrohrung innerhalb des Objektkryostaten vorbereitet.

Die meßtechnische Instrumentierung von Kontroll- und Objektkryostaten wurde begonnen (Kalibrierung von Temperatur- und Drucksensoren, Entwicklung und Einbau von kalten und vakuumdichten Meßstellendurchführungen).

Die Meß-, Steuer-, Regel- und Überwachungs-Technik für den Refrigeratorbetrieb der Anlage wurde durch Umrüstung des früheren Schaltpultes und Neubau eines Schaltschranks durch eine Industriefirma aktualisiert und modernisiert. Für die Aufnahme des Schaltpultes und der gegenüber früher leistungsfähigeren Datenerfassungs- und Datenverarbeitungsanlage wurde eine Meßkabine auf einer zweiten Geschossebene installiert (vgl. Bild). Die von HDI bearbeitete Meßdatenerfassungs- und -Verarbeitungsanlage, bestehend aus den Hardwarekomponenten Camac Crate mit Camac Controller, PDP 11/83-Rechner, Festplatte, Magnetband, Konsolterminal, Schönschriftdrucker, 3 Sichtgeräten (davon 2 mit Graphikfähigkeit) und Plotter, wurde entsprechend gemeinsam erarbeitetem Pflichtenheft entwickelt bzw. beschafft. Sie gestattet die Datenerfassung von 94 Meßkanälen (davon 20 mittelschnelle mit Zykluszeiten 1 - 3 sec. und 10 schnelle mit Zykluszeiten 10 - 100 msec, bei (quasi)stationären und transienten Betriebszuständen im Testkreislauf. Die zur Auswertung der Meßdaten erforderliche Software ist bei HDI in Entwicklung. Über ein Interface ist der Zugang des PDP 11/83-Rechners zum KfK-LAN und damit die Verbindung zur ITP-VAX gegeben. Letztere übernimmt die Aufgaben der Datensicherung und -Archivierung und die der OFF-Line-Datenauswertung wie Berechnungen und graphische Darstellungen.

Die kryoverfahrenstechnische Ausstattung konnte im Berichtszeitraum weitgehend abgeschlossen werden, so daß die Betriebsbereitschaft diesbezüglich für das erste Quartal 1989 erwartet werden kann.



HELITEX-Anlage, von vorn nach hinten: Hohlleiter-Dummyspule, Objektkryostat, Kontrollkryostat, Meßkabine.

#### 4. Tieftemperaturmeßtechnik

Die Arbeiten betreffen den Ausbau der Test- und Kalibriereinrichtungen für Tieftemperatur-Meßsonden sowie Test und Kalibrierung von Meßsonden zur Überwachung und Steuerung von Kryosystemen.

Die Modernisierung der Temperaturfühler-Kalibriereinrichtung im Hinblick auf die Einrichtung einer durch die PTB bestätigten Kalibrierstelle konnte im Berichtszeitraum wegen Personalengpässen nicht fortgesetzt werden.

Im bestehenden institutsinternen Kalibrierkryostaten wurden im Berichtszeitraum ca. 50 Temperaturfühler v.a. für die Testeinrichtungen TOSKA/Polo, HELITEX und MTA kalibriert.

Zur Kalibrierung von piezoresistiven Drucksensoren bei Temperaturen zwischen 4 und 20 K wurden ein LHe-Badkryostat eingerichtet und 14 Fühler für HELITEX kalibriert. Die Auswertung der Meßwerte erfolgte durch einen HP-Rechner zur Polynomentwicklung der bei tiefen Temperaturen nichtlinearen Charakteristik.

An verschiedenen Hochtemperatur-Supraleiterdrahtproben wurden Messungen bzgl. des Übergangs Supraleitung-Normalleitung und der evtl. Einsatzfähigkeit zur kontinuierlichen Standmessung in LN<sub>2</sub>-Bädern durchgeführt. Dabei zeigte sich die prinzipielle Funktionsfähigkeit. Materialsprödigkeit und Inhomogenität erfordern jedoch derzeit noch „massive“ Proben mit hohen Zeitkonstanten und längenabhängigen Sensitivitäts-Unterschieden.

Zur Verbesserung der Meßtechnik in der Temperaturfühler-Kalibriereinrichtung wurden Vorbereitungen zur Implementierung eines Softwarepaketes „Regloptimierung“ und zur Dampfdruckmessung innerhalb des LHe-Bades mittels eines Quarzwendelmanometers getroffen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25959	03.03.07 P06A	DI W. Barth
24128	03.03.02 P39A	R. Berggötz
V 25937	03.03.07 P04A	<b>Dr. A. Hofmann</b> (zu 1)
25245		Dr. S. Kasthuriengan
25923		(bis 15.09.1988)
V26302		DI H.P. Krämer
V25928		<b>DI W. Lehmann</b> (zu 2 - 4)
		H.P. Schittenhelm
		H.J. Spiegel
		DI M. Süßer
		B. Vogetley
		K. Wagner
		DI G. Zahn

# Arbeitsthema

## 03.04 Heiztechnik

### Vorhaben 03.04.02 Hochfrequenzsysteme

#### IDT

#### Gyrotron Modellierung

Unter den bestehenden Möglichkeiten die Frequenz eines Gyrotrons zu erhöhen, ist es wohl am billigsten und einfachsten, dieses bei den höheren Harmonischen der Zyklotronfrequenz zu betreiben. Aus diesem Grunde wurde für das KfK-Gyrotron in Fortsetzung früherer Entwurfs- und Simulationsrechnungen /25788, 26695/ in einer Parameterstudie ermittelt, wie insbesondere für die zweite Harmonische des TE<sub>03</sub>-Modes der Wirkungsgrad und der Strahlstrom von der Ausgangsleistung abhängt. Außerdem wurde in einigen typischen Fällen die Modenkonzurrenz mit einer zweiten Harmonischen als Haupt- bzw. Störmode studiert. So vermag z.B. bei dem gewählten Resonator in Gegenwart des parasitären TE<sub>41</sub>-Modes wohl die zweite Harmonische des TE<sub>23</sub>-Modes nicht aber die des TE<sub>03</sub>-Modes stabil zu schwingen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25788 26695 V27072	03.04.02P10A	Dr. H. Wenzelburger Dr. E. Borie ITP

#### ITP

Die Anstrengungen konzentrieren sich gegenwärtig auf die Entwicklung eines Gyrotrons mit 140 GHz/200 kW für den Stellarator W7AS des IPP Garching. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen zu weiteren fortgeschrittenen ECRH-Systemen mit höherer Leistung führen. Wesentliches Entwicklungsinstrument sind modulare Gyrotronaufbauten für die Optimierung der kritischen Komponenten.

Im Berichtsjahr wurden zwei modular aufgebaute Gyrotron-systeme, einmal bei 150 GHz und zum anderen bei 140 GHz, gepulst (0,5 ms Pulslänge, 0,5 Hz Wiederholfrequenz) betrieben.

Mit dem 150 GHz-Gyrotron wurden Ausgangsleistungen von 210 kW bei 14 A Strahlstrom reproduzierbar im TE<sub>031</sub>-Mode erreicht. Der Wirkungsgrad betrug etwa 20%.

Mit dem 140 GHz-Gyrotron wurden Ausgangsleistungen von 200 kW bei 12 A Strahlstrom im TE<sub>031</sub>-Mode erreicht, bei einem Wirkungsgrad von 25%.

#### 1. Ausbau der Experimentiereinrichtungen

Der umfangreiche Experimentierbetrieb war nur möglich durch wesentliche Verbesserungen am experimentellen Aufbau. Zunächst wurde das verbesserte supraleitende Mag-

netssystem von ABB in Betrieb genommen. Damit war es möglich, das gewünschte Feldprofil und die gewünschte Magnetfeldstärke problemlos einzustellen und zu reproduzieren. Die Kryoverluste waren so gering, daß ein ruhiger und reibungsloser Versuchsbetrieb über Wochen und Monate ablaufen konnte. Allerdings neigten die Magnetstromnetzgeräte zu Ausfällen.

Es wurde ein großer Ausheizofen in Betrieb genommen, womit der komplette Gyrotronaufbau einschließlich Elektronenkanone bis zu 500°C ausgeheizt werden kann. Dadurch wurde das Strahlvakuum verbessert und die Konditionierungszeit für die Elektronenkanone und das gesamte Gyrotronssystem verkürzt. Gleichzeitig wurde ein wesentlich stabileres Betriebsverhalten erreicht.

Schließlich wurde die Hochfrequenz-Diagnostik verbessert. Zur Frequenzmessung wurde ein Frequenz-Zeit-Analysator eingesetzt, der repetierende Frequenzmessungen innerhalb des einzelnen Pulses mit hoher Auflösung liefert, wodurch z.B. auch thermische Driteffekte nachweisbar sind.

Zur Steigerung der Strahlleistungen, bis in den MW-Bereich im Dauerbetrieb, ist eine neue Hochspannungseinspeisung (100 kV/30 A) vorgesehen, die von Siemens erstellt wurde.

#### 2. Ergebnisse mit dem 150 GHz-Gyrotron

Der 150 GHz-Gyrotronaufbau hatte seit März eine neue Elektronenkanone und einen kurzen (10 mm) zylindrischen Resonator. Eingangs- und Ausgangstaper sowie Kollektor stammten aus der ersten Gyrotronversion. Der gesamte Aufbau wurde bei 280°C ausgeheizt. Folgende Moden und Frequenzen wurden gemessen:

TE <sub>231</sub>	147,68 GHz
TE <sub>031</sub>	150,67 GHz
TE <sub>521</sub>	155,78 GHz

In einer ersten Meßperiode, von April bis Juni, lagen die Frequenzen etwa 0,5 GHz tiefer als oben angegeben, was durch den anschließenden Ausheizvorgang im Ofen erklärbar wäre. Bei einem Resonatordurchmesser von 6,48 mm genügt eine Radiusänderung von 0,01 mm, um eine Frequenzänderung von 0,5 GHz hervorzurufen.

Die weiteren Messungen beziehen sich immer auf den TE<sub>031</sub>-Mode bei 150,67 GHz, weil hier die größten Hochfrequenzleistungen und besten Wirkungsgrade gemessen wurden. Die Parameteroptimierung bezüglich Magnetfeldstärke, Beschleunigungsspannung und Anodenspannung wurde für verschiedene Strahlströme durchgeführt. Zusätzlich wurden zwei supraleitende Steuerungsmagnete eingesetzt, um die Strahlage zu variieren. Bei optimierter Einstellung reagiert das Gyrotron außerordentlich empfindlich auf jede Parameteränderung. Die maximale Ausgangsleistung von 200 kW bei 14 A wurde für  $B = 5,88 \text{ T}$ ,  $U_b = 76,5 \text{ kV}$ ,  $U_{\text{mod}} = 22 \text{ kV}$  gemessen. Dies entspricht  $\alpha = 1,0$  ( $\alpha = v \perp / v \parallel$ ) selbstkonsi-

stente Rechnung für  $\alpha = 1$  ergab befriedigende Übereinstimmung mit den Messungen. Bei  $\alpha > 1$  sind Abweichungen zwischen Theorie und Experiment noch nicht abschließend geklärt.

### 3. Ergebnisse mit dem 140 GHz-Gyrotron

Der 140 GHz-Gyrotronaufbau war komplett neu erstellt worden. Dazu mußte die Elektronenkanone neu berechnet und gebaut werden. Die Messungen begannen mit einem kurzen (10 mm) zylindrischen Resonator, weitere Resonatoren sind in Vorbereitung. Der ganze Gyrotronaufbau wurde diesmal im Ofen bei 460°C ausgeheizt. Der Experimentierbetrieb mit dem 140 GHz-Gyrotron war wesentlich stabiler als beim 150 GHz-Gyrotron (keine Vakuumeinbrüche). Es wurden folgende Frequenzen gemessen:

TE <sub>231</sub>	137,61 GHz
TE <sub>031</sub>	140,37 GHz
TE <sub>521</sub>	145,15 GHz

Die weiteren Messungen wurden bei 140,37 GHz im TE<sub>031</sub>-Mode durchgeführt. Als maximale Ausgangsleistung wurden 210 kW bei 12 A gemessen. Die Parameter wurden in Abhängigkeit vom Strahlstrom optimiert. Für eine bestimmte Einstellung des Hochfrequenzfensters und der Steuerungsmagnete wurden folgende optimale Parametersätze gefunden:

$I_b$	8	10	12	A
$U_b$	70.0	70.0	71.8	kV
$U_{mod}$	25.5	25.5	25.4	kV
$P_{out}$	108	140	170	kW
B	5.462	5.462	5.490	T
$\alpha$	1.5	1.45	1.5	

Bei diesen optimierten Einstellungen genügen geringe Änderungen von Strahlstrom, Magnetfeld, Modulationsspannung oder Beschleunigungsspannung (Größenordnung 0,5%), um die HochfrequenzAusgangsleistung des Gyrotronsystems um etwa 20% sinken zu lassen.

Das Hochfrequenzfenster spielte eine entscheidende Rolle für den Betrieb des Gyrotronsystems. Nur in einem sehr engen Bereich (0,1 - 0,2 mm) konnte der Scheibenabstand variiert werden, wenn das System sauber im TE<sub>031</sub>-Mode schwingen sollte. Außerhalb dieses Bereiches ließ sich der TE<sub>031</sub>-Mode entweder überhaupt nicht anregen oder der Mode wurde von den beiden anderen überlagert. Weitere Messungen sind hier noch beabsichtigt.

### 4. Gyrotrontheorie

Die theoretischen Arbeiten befaßten sich insbesondere mit den Einflüssen realer Parameterabweichungen auf die Entwurfsdaten von Gyrotrons. Bedingt durch die experimentellen Umstände wurden die Wechselwirkungsrechnungen mit besser angepaßten Strahlparametern überprüft. Abweichungen von einer linearen Kontur des Resonators, wie sie durch Fertigungstoleranzen oder durch Wärme entstehen können, wurden untersucht. Die Entwurfsprogramme wurden um die selbstkonsistente Behandlung komplexer Resonatoren und um die harmonische Wechselwirkung erweitert.

### 5. 140 GHz-Gyrotron für W7AS

Im Jahr 1989 wird ein prototypisches Gyrotron, das nach Entwurfsvorgaben der KfK industriell von Philips erstellt wird, nach Erprobung im KfK am W7AS für harmonische ECRH-Experimente eingesetzt werden. Basierend auf den Entwurfsrechnungen und auf den technischen Erfahrungen mit dem modularen Gyrotron von KfK und unter Ausnutzung der industriellen Technologien wurde das neue Gyrotron als Prototyp konstruiert und die Einzelteile gefertigt. Nach dem derzeitigen Stand des Zusammenbaus ist die Auslieferung für April 1989 zu erwarten.

Für den Probetrieb im KfK sind bereits umfangreiche Vorbereitungen getroffen. Insbesondere wurde hierfür ein neues supraleitendes Magnetsystem entworfen und von Interatom gebaut. Dieser Magnet hat die Abnahmetests auf Antrieb bestanden. Ein zweiter Teststand wurde zur Prototypenerprobung aufgebaut. Ergänzungen der Hochspannungszuführung und der Mikrowellendiagnostik sind in Arbeit.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26508	03.04.02P11A	W. Baumgärtner
26698	03.04.02P11B	Dr. E. Borie (ab 01.07.88)
26701	03.04.02P11C	H. Budig
26878	03.04.02P11D	Dr. G. Dammertz
V 259478	03.04.02P11E	Dr. O. Dumbrais (TU Hamburg-Harburg)
	03.04.02P10A	U. Feißt
		DP. G. Gantenbein (ab 1.10.88)
		DI. T. Geist (Uni Karlsruhe)
		P. Grundel
		DI R. Hietschold
		<b>Dr. G. Hochschild</b>
		Ing. A. Hornung (Uni Karlsruhe)
		Dr. B. Jödicke (bis 31.08.88)
		Dr. M. Kuntze
		R. Lehm
		N. Münch
		H. Oppermann
		Dr. B. Piosczyk
		G. Redemann
		R. Vincon
		Dr. H. Wenzelburger (IDT)

# Arbeitsthema

## 03.06 Blanketentwicklung

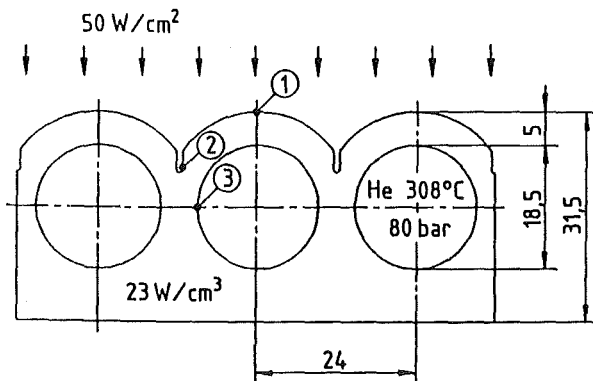
Vorhaben

### 03.06.01 Blanket: Konzepte, technische Entwürfe und Experimente

IMF

#### Heliumgekühltes Feststoffblanket

Das Konzept des Outboard-Brutblankets mit kanisterförmigen Blanketelementen, ausgelegt für die Betriebsbedingungen in NET, soll nunmehr auf sein Potential unter DEMO-Bedingungen hin untersucht werden. Bei der heliumgekühlten Ersten Wand aus martensitischem Stahl 1.4914 ohne Graphitziegel-Schutzschicht wird der Heliumstrom durch toroidal in der Wand verlaufende Bohrungen geführt. Es wurden Temperaturrechnungen und linear elastische Spannungsrechnungen zur Optimierung der statischen Wandbelastung durchgeführt, siehe Abbildung. Parallel zu diesen Rechnungen wurden konstruktive Arbeiten zur Auslegung des DEMO-Blankets sowie zur Gestaltung eines Testblanketelementes in NET begonnen. Fertigungsversuche zur Herstellung einer Lötverbindung zwischen Kühlrohren aus Edelstahl und Berylliumplatten haben ermutigende Zwischenergebnisse erbracht.



Punkt	Temperatur /°C/	von Mises Spannung /MPa/	
		primär	primär + sekundär
1	562	14	181
2	430	22	342
3	360	37	189

Rechnungen zum Outboard-Brutblanket: Temperatur und Vergleichsspannungen in der Ersten Wand.

#### Abschirmblankets

Die Auslegungsarbeiten für NET-Abschirmblankets wurden abgeschlossen. Zuletzt war in Zusammenarbeit mit der Firma Sulzer ein wassergekühltes Outboard-Blanket entworfen

worden. Es ist als Schweißkonstruktion ausgeführt. Die Erste Wand ist Bestandteil des Blanketkastens. Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, daß ein solches Blanket mit vorhandenen Techniken hergestellt werden kann.

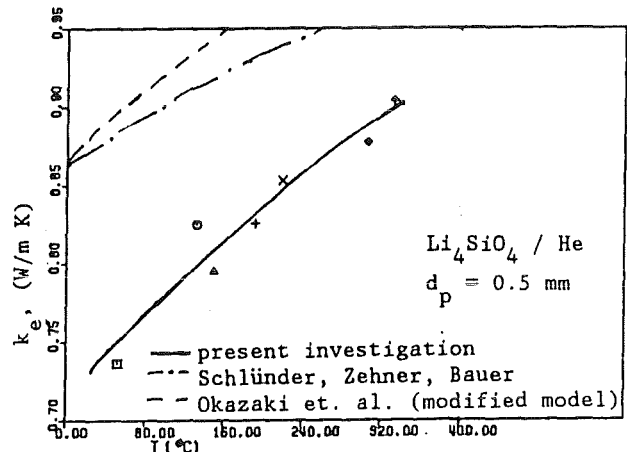
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26138 26278 26907 V26981	03.06.01P12A	DI E. Bojarsky DI H. Deckers H.-D. Großgarten W. Hofheinz DI H. Lehning DI P. Norajitra DI G. Reimann DI H. Reiser

#### INR

Der Entwurf des heliumgekühlten Feststoffblankets wurde 1988 nicht geändert. Das Konzept soll in einem Horizontalkanal von NET von ca. 2 m Höhe und 1 m Breite erprobt werden. Für diesen Testeinheit wurde austenitischer Stahl als Strukturmaterial ausgewählt. Es wurden das Kühlsystem, das Kühlgas-Reinigungssystem und das Spülgassystem mit Tritiumabtrennung konzipiert und dimensioniert.

Die Blanketarbeiten wurden reorganisiert und das Feststoffblanket wird jetzt in einer gemeinsamen Arbeitsgruppe von KfK, CEA (Frankreich) und ENEA (Italien) weiter verfolgt. Dazu wurde ein Sechsjahresplan mit Kostenschätzung aufgestellt. Eine für alle Blanketkonzepte verbindliche Materialdatenbasis wurde als Entwurf erstellt.

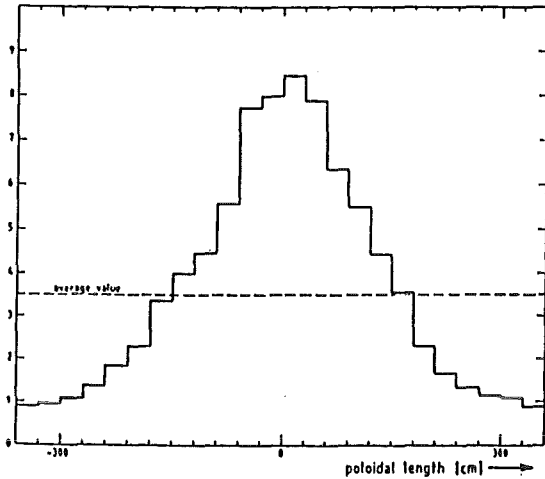
Die in den Ergebnisberichten 1985 und 1987 erwähnten Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Kugelschüttungen wurden mit prototypischen Lithiumorthosilikat-Kugeln in Heliumatmosphäre fortgesetzt. Messung und Rechnung stimmen befriedigend überein (siehe Abbildung, Nullpunkt ist unterdrückt).



Wärmeleitfähigkeit einer Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>/He Kugelschüttung in Abhängigkeit von der Temperatur



Mit einem dreidimensionalen Monte-Carlo-Programm wurde die Abschirmwirkung des Feststoffblankets berechnet. Sie ist wesentlich geringer als die der Abschirmblankets (Faktor 5 statt Faktor 24 Schwächung des Neutronenflusses). Es gibt mit zunehmender Tiefe in der Abschirmung eine wachsende Überhöhung des Neutronenflusses in der Torusmittelebene. Die Abbildung zeigt das poloidale Profil in der Toroidalfeldspule.



Dosis in  $10^9$ rad im Isolator der Toroidalfeldspule von NET nach einem Vollastjahr, Poloidalverteilung auf der Innenseite des Torus

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
23788		DP. L. Boccaccini
V26073		(Euratom-Stip.)
V26076		<b>Prof. M. Dalle Donne</b>
26078		DP. U. Fischer
26138		DP. M. Kühle
26506		Dr. G. Sordon
V26509		
V26556		
V26580		
26907		
26908		

## IRB

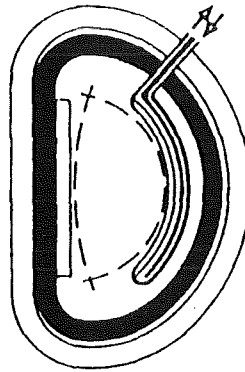
### DEMO-relevantes Flüssigmetall-Testblanket für NET

Im vergangenen Jahr wurden zwei europäische Gruppen zur Entwicklung von Brutblankets für Fusions-Leistungsreaktoren zusammengestellt. Eine der beiden Gruppen, bestehend aus CEA, JRC-Ispra und KfK, befaßt sich mit Konzepten, bei denen eine eutektische Blei-Lithiumverbindung Pb-17Li als Brutstoff verwendet wird. Im Rahmen dieser Gruppe wird die 1984 begonnene Entwicklung eines Blanketkonzeptes, bei dem Pb-17Li sowohl als Brutstoff als auch als Kühlmittel dient, fortgesetzt. Untersucht wurden vor allem die Fragen, ob sich dieses Konzept für einen Leistungsreaktor eignet und wie es im „Next European Torus, (NET)“ getestet werden kann. Für eine erste Überprüfung der Reaktorrelevanz wurden vom NET-Team folgende minimalen Anforderungen an ein Brutblanket für einen DEMO-Reaktor spezifiziert:

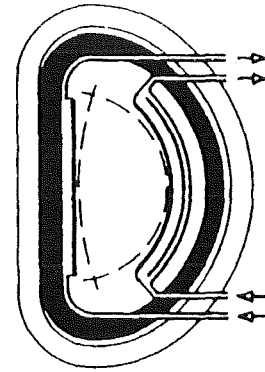
- Tritium-Gesamtbrutrate  $> 1$ .
- Durchschnittliche Neutronenwandbelastung  $\geq 2 \text{ MW/m}^2$ .
- Vollast-Lebensdauer  $\geq 20\,000 \text{ h}$ .
- Kühlmittelbedingungen für eine Stromerzeugung mit einem Nettowirkungsgrad  $\eta_{\text{netto}} \geq 20 \%$ .

Untersucht werden die beiden in der folgenden Abbildung schematisch dargestellten Varianten eines Blanketkonzeptes mit Flüssigmetallkühlung, mit denen sich diese Anforderungen erfüllen lassen:

A) Ein Blanketkonzept, bei dem eine dicke Schicht aus Beryllium die beim Fusionsprozeß frei werdende Neutronen so stark vervielfacht, daß auf die Anordnung von Brutblankets auf der inneren Torusseite verzichtet werden kann. Hierdurch werden Reaktorkonzepte ermöglicht, bei denen alle Kühlmittelzu- und -ableitungen von oben an die Blanketsegmente angeschlossen werden. Bei flüssigmetallgekühlten Brutblankets auf der inneren Torusseite wären bei dieser Anordnung die magneto-hydrodynamischen (MHD) Druckverluste zu groß.



Variante A



Variante B

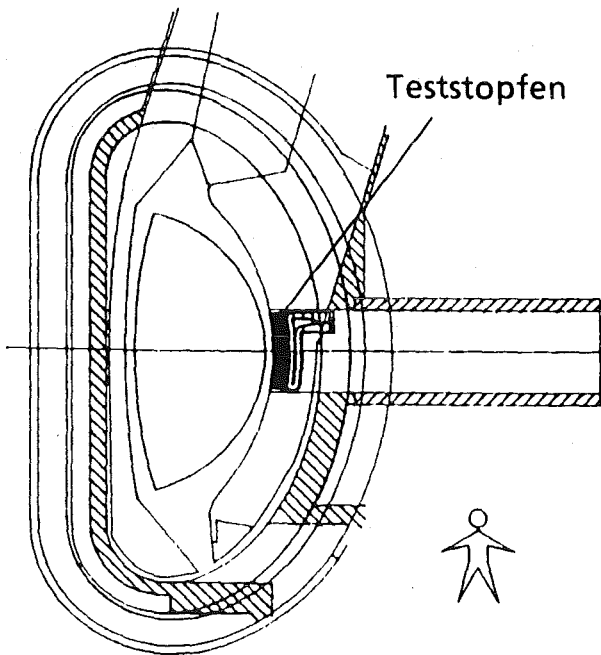
Schematische Anordnung der Blanketsegmente und der Kühlschlüsse.

B) Ein Blanketkonzept, bei dem durch Anbringen von Brutblankets auf der äußeren und inneren Torusseite eine ausreichend hohe Brutrate ohne Verwendung eines Beryllium-Neutronenvervielfachers erreicht werden kann. Dies ist aus MHD-Gründen jedoch nur dann möglich, wenn Kühlmittelleitungen sowohl von oben als auch von unten an die Blanketsegmente angeschlossen werden können.

Im INR durchgeführte Neutronik-Rechnungen haben ergeben, daß in beiden Fällen eine Tritiumbrutrate von etwa 1,05 erreichbar ist.

Zum Testen dieses Konzeptes wurde ein in der nächsten Abbildung dargestellter „Teststopfen“ entworfen, der in eines der radialen Fenster in der Torusmittelebene paßt. Diese Fenster sind ca. 2 m hoch und 0.6 m breit und werden als Öffnungen für einen gelenkigen Hantierungsarm vorgesehen. Erste Überlegungen ergaben, daß diese Position wahrscheinlich für alle Tests ausreichend ist, so daß auf wesentlich schwieriger auswechselbare Testsegmente verzichtet werden kann.



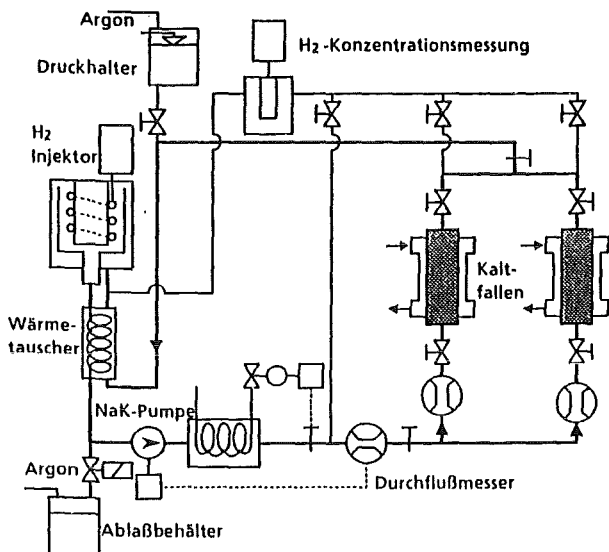


Anordnung eines Testblankets in einem horizontalen Fenster.

### Tritiumabtrennung aus Pb-17Li

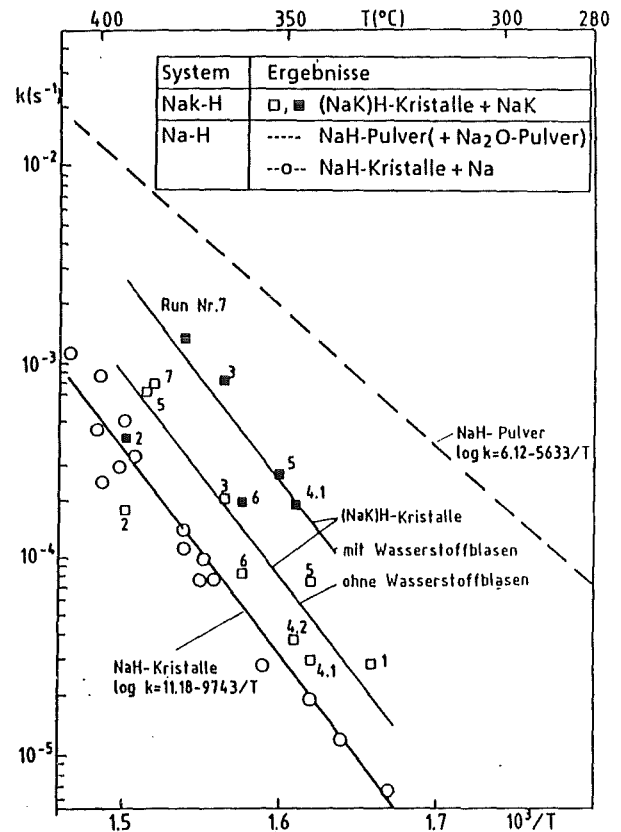
Die Tritiumabtrennung aus einem Pb-17Li gekühlten Blanket mit einem NaK-Sekundärkreislauf soll durch Permeation in den NaK-Kreis und Abscheidung als Hydrid in einer Kaltfalle erfolgen. Der derzeitige Kenntnisstand über die Kinetik der Abscheidung und Wiedergewinnung in Kaltfallen ist nicht ausreichend für die Auslegung von fusionsreaktorspezifischen Kaltfallen. Zur Untersuchung dieser Vorgänge im Rahmen des WAWIK-Vorhabens wird Tritium durch leichten Wasserstoff ersetzt.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Kreislauf zur Wasserstoff-Abscheidung mit zwei parallel durchströmten Kaltfallen, der Wasserstoff-Zugabe und -Konzentrationsmessung. Der Kreislauf ist festgelegt, mit der Inbetriebnahme wurde begonnen.



Kreislauf für Wasserstoff-Abscheidung.

Zur Wasserstoff-Wiedergewinnung durch thermische Zersetzung des Hydrids wurden weitere Vorversuche mit NaK-Hydrid-Kristallen in einem teilweise mit NaK gefüllten, beheizten Behälter durchgeführt. Die nächste Abbildung zeigt die Freisetzungsrates als Funktion der Temperatur. Die Anfangsphase der Freisetzung ist gekennzeichnet durch starke Wasserstoff-Blasenbildung, die Endphase durch Wasserstoff-Diffusion. Die Rührwirkung der Blasen ist günstig für die Freisetzung. Im Vergleich zu entsprechenden Versuchen in Natrium ergibt sich für NaK eine um eine Größenordnung höhere Freisetzungsrates.



Freisetzungsrates als Funktion der Temperatur.

### Untersuchungen zur ersten Wand

Im Laufe des Berichtsjahres wurde der KfK-Beitrag zur ersten Wand (FW) der NET-Basismaschine neu definiert als Vorbereitung und Durchführung von thermischen Wechselast-Experimenten an industriell gefertigten FW-Ausschnitten. Proben nach dem Design der NET-Basismaschine sollen vom NET-Team zur Verfügung gestellt werden; daneben und danach sollen auch Proben anderer FW-Designs, z.B. KfK-Entwicklungen für Testblankets in NET und für einen DEMO-Reaktor, getestet werden. Die beiden Ziele solcher Experimente sind jeweils a) Vorhersageverfahren zum Versagen der ersten Wand durch thermische Ermüdung zu überprüfen und b) das integrale Verhalten der ersten Wand einschließlich eventueller Schutzziegel und keramischer Beschichtungen über eine große Zahl von thermischen Zyklen zu untersuchen. Das Vorhaben wird in Zusammenarbeit von IRB und IMF IV durchgeführt; hier wird über den IRB-Anteil berichtet.

Die aktiv gekühlten Proben (FW-Ausschnitte von bis zu 0,25 m<sup>2</sup>) sollen im Vakuum mit einem Oberflächen-Wärmestrom von bis zu 100 W/cm<sup>2</sup> beaufschlagt werden. Dabei stellt sich eine für das Design typische Temperaturverteilung im Strukturmaterial ein, die in der folgenden Heizpause wieder teilweise verschwindet. Heiz- und Pausen-Phasen von jeweils wenigen Minuten wechseln regelmäßig miteinander ab und verursachen entsprechend wechselnde thermische Spannungen im Strukturmaterial.

Der Oberflächenwärmestrom soll durch Wärmestrahlung auf die Proben aufgebracht werden; die Probenkühlung soll in der ersten Ausbaustufe durch Wasser erfolgen. Ein geeigneter Prüfstand, bestehend aus einem Vakuum-Behälter mit eingebauten Strahlungsheizern, aus einer Stromversorgung für die Heizer, aus einem Vakuum-Pumpstand, aus Wasserkreisläufen für die Probenkühlung und aus Geräten zum Steuern und Messen der Versuchsabläufe wurde entworfen.

Der Strahlungsheizer stellt eine hoch und ungewöhnlich belastete Komponente dar, für die keine Vorbilder zu finden waren. Die erforderliche Temperatur von etwa 2200 °C ist zwar für Heizelemente aus Graphit nicht unüblich, aber die schnellen Temperaturwechsel um jeweils etwa 1000 °C in den Heiz- und Pausenphasen der Betriebszyklen ließen ein Versagen der Heizer nach zu kurzer Standzeit befürchten. Es wurde daher ein Vorversuch aufgebaut, mit dem Flächen-Heizelemente aus verschiedenen Graphit-Werkstoffen bei hohen Temperaturen, hohen Wärmestromdichten und häufigen, schnellen Temperaturwechseln auf Standzeit getestet werden können. Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen, aber die gewonnenen Ergebnisse lassen bereits erkennen, daß Heizelemente sowohl aus CFC (Kohlefaser-verstärktes Graphit) als auch aus Feinkorngraphit mehr als 5000 typische Betriebszyklen überstehen, wenn die maximale Temperatur 2100 °C nicht übersteigt. Das beobachtete Versagen scheint mit einer lokalen Desintegration des Materials an der heißesten Stelle bei Temperaturen über etwa 2100 °C in Verbindung zu stehen, die mit wachsender Zyklenzahl und/oder steigender Temperatur fortschreitet. Neben einer besseren Klärung der Schädigungsmechanismen sollen weitere Heizerversuche einer Vermessung der Temperaturverteilung und einer auf gleichmäßige Temperaturen zielenden geometrischen Optimierung dienen. Nach den Ende 1988 vorliegenden Ergebnissen erscheint es aussichtsreich, den Experiment-Anforderungen entsprechende Heizer aus erhältlichen Graphit-Werkstoffen herzustellen.

#### Entwicklung eines Primärkreislaufmoduls für ein DEMO-relevantes Testblanket für NET

Die externen Kühlkreisläufe haben die Aufgabe, die Wärme und das gebrütete Tritium vom Blanket abzuziehen, um sie dem jeweiligen Verwendungszweck zuzuführen. Im ersten Kreislauf wird der vom Blanket kommende Blei-Lithium-Strom mit einer Kreiselpumpe über einen Wärmetauscher und ein Reinigungssystem zum Blanket zurückgefördert. Im Wärmetauscher wird die Wärme an das zweite Medium, an NaK, weitergegeben. Gleichzeitig permeiert das im Pb-17Li enthaltene Tritium durch die Wärmetauscherwand in den NaK-Strom. Der Wärmestrom wird in einem zweiten Wärmetauscher an den Wasser-Kühlkreislauf weitergeleitet. Durch die im Vergleich zum Pb-17Li größere Löslichkeit des NaK für Tritium kann das Tritium in einem Extraktionssystem aus dem NaK gewonnen werden, ohne größere Permeationsverluste in den Wasserkreislauf. Der NaK-Strom wird mit einer elektromagnetischen Pumpe durch beide Wärmetauscher

und durch das Tritiumextraktionssystem gefördert. In den Kaltfallen des Extraktionssystems wird das NaK unter seine Sättigungstemperatur für NaK Tritid abgekühlt und dadurch die Tritiumverbindung zur Ablagerung gezwungen. Durch Trennen der abgelagerten Tritid-Kristalle vom Flüssigmetall und einer Erhitzung auf ca. 400 °C wird das Tritium anschließend wiedergewonnen und steht damit für den Brennstoffkreislauf zur Verfügung. Für den DEMO-Reaktor ist ein kombinierter doppelwandiger Wärmetauscher vorgesehen, bei dem das äußere Rohr von Pb-17Li umströmt wird, im inneren Rohr das Wasser im Gegenstrom fließt und NaK im Spalt der doppelten Wand strömt.

Für NET ist vorläufig die aus zwei bewährten Wärmetauschern (Pb-17Li/NaK und NaK/H<sub>2</sub>O) bestehende Version vorgesehen, bis die Machbarkeit und die Sicherheit des doppelwandigen Dreistoffwärmetauschers nachgewiesen ist. Bei DEMO hat das innere Rohr des Dreistoffwärmetauscher auch die Funktion des Dampferzeugers bzw. Überhitzers für das Kraftwerk. Die Erstauslegung der Kühlkreisläufe und deren Komponenten für den NET-Testplug wird zur Zeit in Zusammenarbeit mit der Fa. Interatom durchgeführt.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25669	03.05.01 P 10A	DI. K. Arheidt
25778		H.J. Brinkmann
V26556		DI. V. Casal
V26557		E. Eggert
V26558		G. Eisele
V26559		Dr. Cl. Günther
26906		<b>DI. G. Hofmann</b>
		<b>DI. H. John</b>
		DI. W. Just
		H. Kreuzinger
		<b>DI. S. Malang</b>
		D. Rackel
		<b>Dr. J. Reimann</b>
		DI. K. Rust

## IRE

### Entwurfsstudien und Experimente für Divertoren

Die bestimmenden Randbedingungen bei der Auslegung des NET Divertors sind die hohe Wärmestromdichte, hohe Erosionsraten, außergewöhnliche Kurzzeitbelastungen bei Plasmazusammenbrüchen und eine eingeschränkte Werkstoffauswahl im Hinblick auf Plasmaverunreinigungen. Die gegenwärtigen Konzepte für die Divertorwand, bestehend aus dem Verbund eines hochwärmebeständigen Schutzwerkstoffes mit einem duktilen Strukturwerkstoff, erfordern vielfältige experimentelle Untersuchungen an Kleinproben und repräsentativen Divertorausschnitten.

Ein Versuchsprogramm zur Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens von Kandidatenwerkstoffen und Werkstoffkombinationen bei typischen Belastungszyklen wurde in Abstimmung mit NET vorbereitet. Dazu dient eine im IRE vorhandene Plasmaspritzanlage, die für diese Testanforderungen umgerüstet wurde. Zur Auswahl von Temperaturmeßgeräten (Pyrometer, Thermolemente) wurden Vorversuche durchgeführt, wobei der Eigenemission der Plasmaflamme und den schnellen Transienten Rechnung zu tragen war. Schließlich wurden Probenform und die Einspannungsart auf der Grundlage von Finite-Element-Rechnungen spezifiziert. Insgesamt 180 Proben aus 45 verschiedenen Werkstoffen bzw. Werkstoffmodifikationen wurden von NET für diese Versuche bestellt, davon sind etwa zwei Drittel auf Kohlenstoffbasis und ein Drittel hochschmelzende Metalle. Die Versuche sollen Anfang 1989 beginnen.

Für Versuche an repräsentativen Divertorausschnitten wurde ein Konzept für eine entsprechende Testeinrichtung erarbeitet. Es geht von einer zu beheizenden Fläche von  $30 \times 10 \text{ cm}^2$  aus bei für NET typischen Belastungsprofilen, oder auch größeren beheizten Testflächen bei vermindertem Wärmestrom. Als eine räumlich und zeitlich sehr flexibel zu handhabende Wärmequelle wurde eine handelsübliche Elektronenstrahlkanone mit 300 kW Anschlußleistung vorgeschlagen. Der Vorschlag wird zur Zeit mit NET geprüft.

Bei den Divertoren ist die zu erzielende Wärmestromdichte eine Schlüsselgröße, die derzeit nur unscharf für NET definiert werden kann. Von großem Einfluß sind dabei u.a. Abweichungen der Divertorform von der Idealgeometrie, welche in einer Studie analysiert wurden. Es zeigte sich, daß mit geometriebedingten Überhöhungsfaktoren von 2 bis 3 gegenüber den aus der Physik bestimmten Nominalwerten der Wärmestromdichten zu rechnen ist.

Die im vorangegangenen Berichtszeitraum erarbeiteten Ergebnisse über die anlagentechnischen Voraussetzungen für den flexiblen Einsatz von Testblankets in NET und dessen nachfolgender Ausrüstung mit fortgeschrittenen Blankets wurden veröffentlicht. Dieses Teilvorhaben wurde damit abgeschlossen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26277 26488	03.06.01P17A	<b>G. Class</b> G. Gering <b>K. Kleefeldt</b> K. Lang K. Schramm E. Stratmanns E. Wolf

## Vorhaben

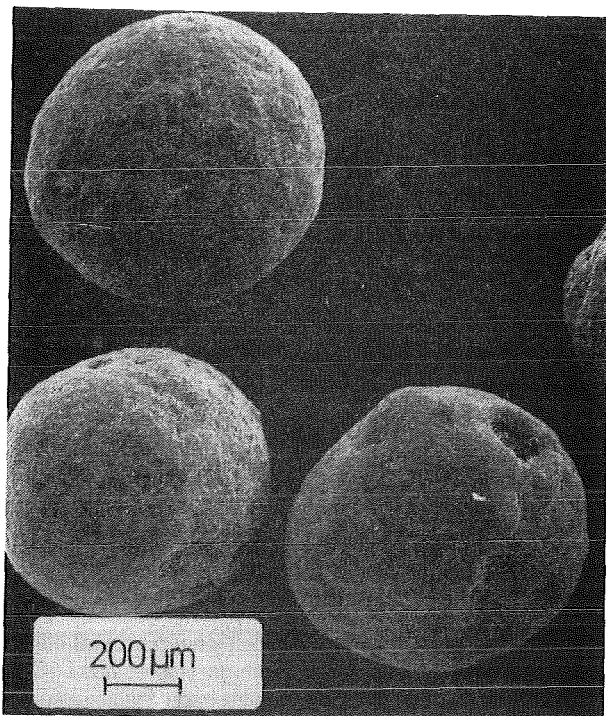
### 03.06.02 Blanketmaterialentwicklung

## IMF

### Herstellung und Charakterisierung von keramischen Brutmaterialien

Im Rahmen des Karlsruher Blanketkonzeptes wird die Herstellung eines kugelförmigen Sintergranulates aus Li-Orthosilikat entwickelt. Das Granulat wird nach Plastifizieren der Pulver durch Extrudieren und nachfolgendes Abrunden hergestellt. Zum Sintern dieses Materials wurde ein Fließbett eingerichtet, in dem das Granulat bei  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  auf etwa 90% der theoretischen Dichte verdichtet werden kann. Die so hergestellten Kugeln haben nunmehr ein den Orthosilikat-Tabletten vergleichbares Verhalten. Die Abbildung zeigt das Aussehen der Granulatteilchen nach dem Wirbelbettsintern. Man erkennt, wie die Teilchen abgerundet und die Oberflächen glatt geschliffen wurden.

Die Freisetzung des Tritiums aus dem keramischen Brutmaterial eines Fusionsreaktors hängt von mehreren Faktoren ab. Einer dieser Faktoren ist die spezifische Oberfläche des Materials. Die sog. BET-Methode zur Bestimmung dieser Größe wurde eingesetzt, um Lithiumorthosilikat-Proben verschiedener Formen (Tabletten, Kugeln, Sintergranulat und erschmolzene Kügelchen) zu untersuchen, die nach unterschiedlichen Herstellungsverfahren gefertigt worden waren. Die Werte der spezifischen Oberfläche, die an Tabletten und Kugeln gefunden wurden, reichten von  $> 0.2$  bis über  $6 \text{ m}^2/\text{g}$ . Die Tabelle zeigt typische Werte für die Dichte und die spezifische Oberfläche von Materialien, die in Bestrahlungsexperimenten erprobt wurden.



Lithiumorthosilikat-Granulatteile, gesintert in einem Hochtemperaturwirbelbett.

Experiment	Probenform	Hg-Poros. Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Spez. Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)
DELICE 02	Tabletten	1.89	6.1
ELIMA	Tabletten	1.71	6.36
		2.15	1.54
VOM-23H	Kugeln	2.11	2.2
LISA 1	Tabletten	2.27	0.77
LISA 2	Tabletten	2.18	0.2
	Sintergranulat	2.19	2.1
	erschmolz. Kügelchen	2.23	5.9
TRIDEX 3	Tabletten	2.21	< 0.2
	Sintergranulat	1.88	0.4
	erschmolz. Kügelchen	2.22	2.3

Spezifische Oberflächen von Lithiumorthosilikat-Proben für verschiedene Bestrahlungsexperimente.

Für Materialuntersuchungen, insbesondere für die Bestrahlungsvorhaben ELIMA-3, TRIDEX-3, DELICE-03 und LILA/LISA-1 wurden Pulver, Sintergranulat und gesinterte Tabletten aus reinem und Al-dotiertem Li-Orthosilikat und aus Li-Metazirkonat hergestellt. Ein erster Bestrahlungsversuch an zylinderförmigen Mischkristallproben der Zusammensetzung  $\text{Li}_{3,7}\text{Al}_{0,1}\text{SiO}_4$  zeigte bei niederen Temperaturen (350 - 400 °C) ein deutlich besseres Tritiumfreisetzungverhalten als das reine Orthosilikat. Dieses Ergebnis ist insofern von besonderer Bedeutung als gegenwärtig das Lithiumzirkonat,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , bei dem ebenfalls ein verbessertes Tritiumfreisetzungverhalten beobachtet wurde, als Alternative zum Lithiumaluminat und dem Orthosilikat diskutiert wird. Eine erste Vergleichsbestrahlung (LILA/LISA-1) soll nun weitere

Hinweise auf das Tritiumfreisetzungverhalten beider Materialien liefern.

Der Helium-gespülte und -gekühlte Blanketmodul enthält das keramische Brutmaterial in Form einer Kugelschüttung. An verschiedenen Testschüttungen wurden Messungen durchgeführt, um die Permeationskoeffizienten zu bestimmen, die für die Berechnung des Druckabfalls benötigt werden.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
22314 22315 V 26628 V 26633 V 26638	03.06.02 P 18A	B. Dörzapf <b>DP H. Elbel</b> DI E. Günther R. Hanselmann J. Heger W. Laub H. Nagel R. Scherwinsky <b>Dr. D. Vollath</b> <b>Dr. H. Wedemeyer</b> M. Wittmann

#### Proben für spezielle Anwendungen

Für physikalische Messungen werden hochdichte Proben benötigt, die durch isostatisches Heißpressen (HIP) hergestellt werden. Hierfür wurden gesinterte Li-Orthosilikat-Tabletten in Metallkapseln eingebracht und mittels HIP bis zur theoretischen Dichte nachverdichtet. Ebenso wurden kaltisostatisch vorgepreßte Li-Orthosilikatproben in Glasampullen eingeschmolzen und isostatisch heißgepreßt. Die gewonnenen Erkenntnisse legen den Schluß nahe, daß hochdichte Li-Orthosilikatproben durch isostatisches Nachverdichten vorgesintertener Prüflinge erzeugt werden können.

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

#### Bestrahlung von Brutmaterialien

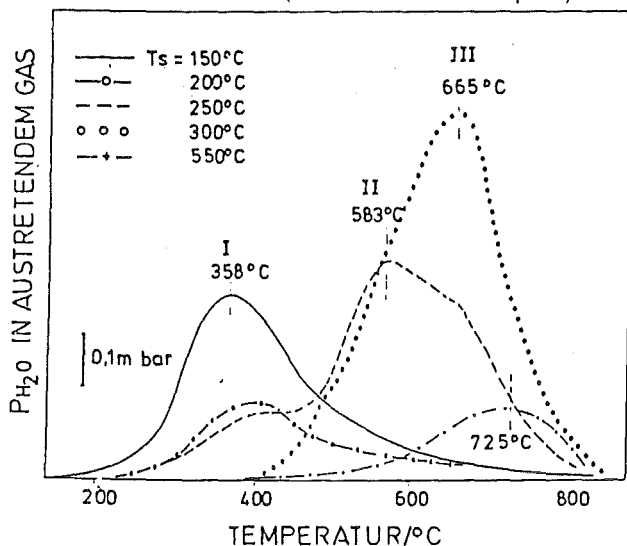
Die beiden Bestrahlungsexperimente ELIMA 2 im HFR/ Petten und DELICE 03 im OSIRIS/Saclay, mit denen im Rahmen eines Vergleichs an Proben von fünf europäischen Partnern der Einfluß unterschiedlicher Neutronenspektren untersucht werden soll, sind 1988 angelaufen. Im KNK II-Reaktor wartet das Experiment ELIMA 1 mit 24 Probenstäben auf seinen Einsatz; ein weiteres, ELIMA 3, vor allem mit Kugelschüttungen aus Li-Orthosilikat, befindet sich in Vorbereitung. In Vorbereitung ist auch ein gemeinsames Experiment mit kontinuierlicher Messung der Tritiumfreisetzung an Li-Aluminat des CEA und von Li-Orthosilikat von KfK (LILA/LISA) im SILOE-Reaktor. Bei der KFA-Jülich ist eine erste TRIDEX-Bestrahlung mit KfK-Probenmaterial angelaufen. Für die Nachuntersuchung soll 1989 das neue Brutkeramiklabor in den Heißen Zellen zur Verfügung stehen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.06.02P15A	DI(FH) H.E. Häfner DI(FH) K. Heckert Ing.grad. K. Philipp

### Konstitution und Thermodynamik von oxidischen Brustoffen

Die Fortführung der Untersuchungen im System  $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2$  führte zur Klärung der Stöchiometrie der Phasen auf der  $\text{Li}_2\text{O}$ -reichen Seite. Hier existiert zwischen  $\text{Li}_6\text{ZrO}_6$  und  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  nur eine Phase der Zusammensetzung  $\text{Li}_6\text{Zr}_2\text{O}_7$  nicht aber  $\text{Li}_4\text{ZrO}_4$ . Die Phasenumwandlung von  $\text{Li}_6\text{ZrO}_6$  wurde durch DTA bei  $420^\circ\text{C}$  beobachtet (Literaturwert:  $650^\circ\text{C}$ ); sie ist reversibel und von höherer Ordnung, da sie sich durch Hochtemperatur-Röntgenbeugung nicht nachweisen läßt.  $\text{Li}_6\text{Zr}_2\text{O}_7$  schmilzt wahrscheinlich inkongruent bei  $920^\circ\text{C}$ .

Die Feuchtigkeitsaufnahme von  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  wurde bei verschiedenen konstanten Temperaturen isobar untersucht. Die maximale Wasseraufnahme erfolgt bei  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 100\text{ Pa}$  zwischen  $325$  und  $375^\circ\text{C}$ . An den so beladenen Proben wurde die Wasserfreisetzung zwischen  $20$  und  $800^\circ\text{C}$  durch Messung des  $\text{H}_2\text{O}$ -Partialdrucks im austretenden Gas bei einer Aufheizrate von  $10\text{ K/min}$  gemessen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung dargestellt. Sie zeigen, daß die Freisetzung als Aktivierungsprozeß in mehreren Stufen erfolgt, wobei die freigesetzte Menge wie auch die Temperatur des Freisetzungsmaximums von der Beladungstemperatur abhängen. Bei mittleren Beladungstemperaturen überlagern sich mehrere unterschiedliche Freisetzungsmechanismen, bei höheren Beladungstemperaturen dominiert die Freisetzung von chemisorbiertem Wasser (dissoziative Chemisorption).



Freisetzung von Wasser aus  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ( $T_s$  - Beladungstemperatur).

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 26633 V 26978		Dr. V. Schauer G. Schlickeiser Dr. A. Skokan

### Eigenschaften von oxidischen Brustoffen

Die Wärmeleitfähigkeit von  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  unterschiedlicher Herkunft wurde an HIP- und an drucklos gesinterten Proben untersucht. Die Dichten betragen  $93$  und  $92\%$  TD. Durch DTA-Messungen stellte sich heraus, daß letztere Proben  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  enthielten. Weiterhin zeigten kalorimetrische Messungen irreversible Veränderungen der spezifischen Wärme, wahrscheinlich durch Wasserfreisetzung. Die Meßwerte liegen deutlich niedriger als bisher veröffentlichte. Eine Angabe der Wärmeleitfähigkeit kann für  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  als materialspezifische Eigenschaft derzeit noch nicht gemacht werden.

Die Messungen mechanischer Eigenschaftswerte an  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  bei Raumtemperatur wurden abgeschlossen. Die vorhandene Datenbasis gestattet es, die gemessenen Eigenschaften als Funktionen der Porosität und der Korngröße darzustellen. Für den E-Modul ergibt sich die Beziehung

$$E = 110 (1 - P)^3, \text{ GPa}$$

(P Porosität). Ein Einfluß der Korngröße ( $d$  in  $\mu\text{m}$ ) wurde nicht gefunden. Für die Druckfestigkeit gilt

$$\sigma_d = 975 (1 - P)^{1.5} d^{-0.44}, \text{ MPa}$$

und für die Biegebruchfestigkeit nach ANL-Messungen

$$\sigma_b = 195 (1 - P)^3 d^{-0.44}, \text{ MPa.}$$

Für die Betrachtung der mechanischen Wechselwirkung zwischen Bruststoff und Hüllmaterial ist die Verwendung der Kriechdaten bei niedriger Belastung ( $\leq 40\text{ MPa}$ ) und niedrigen Verformungsgraden sinnvoll. Die  $100\text{ h}$ -Werte der Kriechgeschwindigkeit lassen sich durch die Formel

$$\dot{\epsilon} = 50 \sigma \exp(-180/RT) \exp(29 P)$$

( $\rho$  Spannung in MPa, R Gaskonstante in  $\text{kJ}/(\text{mol K})$ ,

T Temperatur in K) darstellen.

Die chemische Verträglichkeit von Be mit  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  und dem austenitischen Stahl 1.4919 (ss AISI 316, Ispra) wurde in Kapselglühversuchen im Temperaturbereich von  $600$  bis  $900^\circ\text{C}$  mit maximalen Glühzeiten von  $1000\text{ h}$  untersucht. Erste chemische Wechselwirkungen finden in den Systemen  $\text{Be}/\text{Li}_2\text{SiO}_3$  und  $\text{Be}/\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ab  $650^\circ\text{C}$  statt, wobei man die Reaktionen in homogene und in lokale, stärkere unterteilen kann. Die lokalen Reaktionen in den Li-Silikaten, die besonders oberhalb  $700^\circ\text{C}$  ausgeprägt sind, haben ihre Ursache in flüssigen  $\text{Li}_x\text{Si}_y$ -Reaktionsprodukten. Die maximale Einsatztemperatur sollte im System  $\text{Be}/\text{Li}_2\text{SiO}_3$   $650^\circ\text{C}$  und im System  $\text{Be}/\text{Li}_4\text{SiO}_4$   $700^\circ\text{C}$  nicht überschreiten.

Be reagiert mit rostfreiem Stahl bereits bei  $600^\circ\text{C}$  unter Bildung einer BeNi-Verbindung. Die Wechselwirkungen hängen stark von der Temperatur ab und reichen bei  $750^\circ\text{C}/1000\text{ h}$  bis zu  $150\text{ m}$  Tiefe. Als sichere maximale Betriebstemperatur für das System  $\text{Be}/\text{rostfreier Cr-Ni-Stahl}$  ist  $600^\circ\text{C}$  zu betrachten.

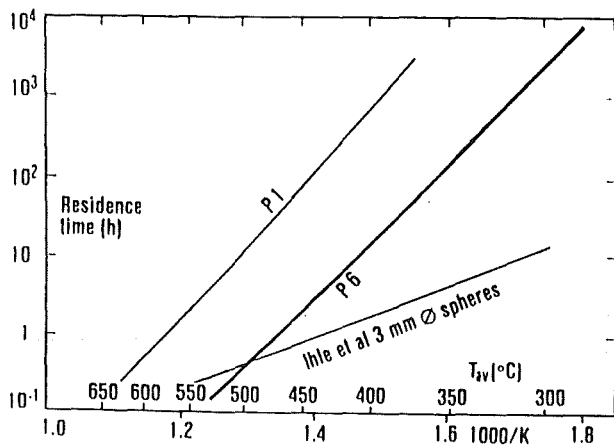
In unterstützenden thermochemischen Studien wurden die Sauerstoffpotentiale und die Gasphasenpartialdrucke in den Systemen  $\text{Be-Li-Si-O}$ ,  $\text{Li-Al-O}$  und  $\text{Li-Zr-O}$  ermittelt. Von spezieller technischer Bedeutung im Hinblick auf mögliche Brust-

stoffverdampfungsverluste ist dabei die Berechnung der jeweiligen LiOH-Partialdrucke bei gegebenem H<sub>2</sub>O (mit H<sub>2</sub>)-Partialdruck.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24205	03.06.02P13A	M. Blumhofer
24872	03.06.02P11A	Ing. J. Burbach
25980	03.06.02P11B	Prof. Dr. W. Dienst
26718	03.06.02P11C	Dr. O. Götzmann G. Haase <b>Dr. P. Hofmann</b> H. Metzger Dr. B. Schulz <b>Dr. H. Zimmermann</b>

## INR

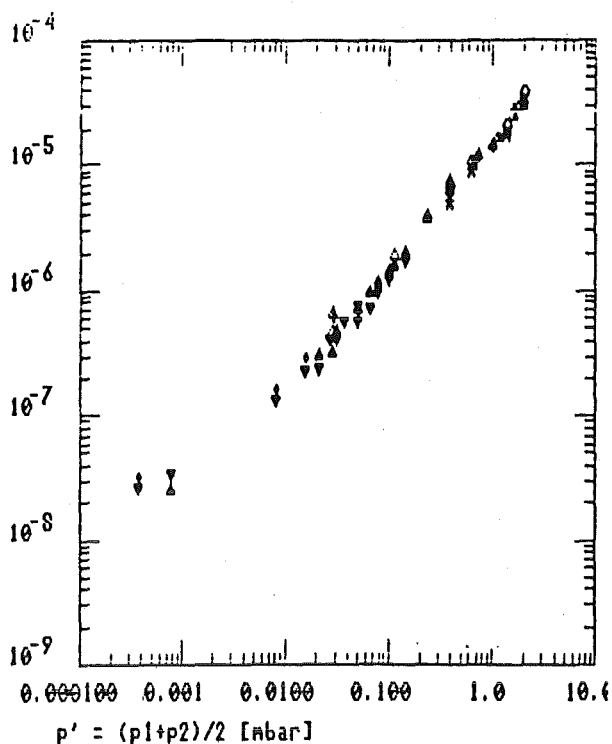
Der inpile Test LISA-2 mit verschiedenen Lithiumorthosilikat-Proben und Aluminat-Pellets ergab für die aus der Schmelze hergestellten und getemperten 0.5 mm Orthosilikat-Kugeln (P6) die kleinsten Tritium-Verweilzeiten (siehe Abbildung) und für das NET-Blanket ein akzeptables Inventar von etwa 1 kg (Spülgas He + 0.1 vol.-% H<sub>2</sub>). Es ist zu erwarten, daß dieses Inventar durch Optimierung der Proben und des Spülgases weiter reduziert werden kann.



Tritium-Verweilzeit (residence time) verschiedener Lithiumorthosilikat-Proben, inpile-Test LISA-2, Spülgas He + 0.1 vol% H<sub>2</sub>, P1 Sintergranulat 0.5 mm ø P6 Kugeln aus der Schmelze 0.5 mm ø

Eine wesentlich verbesserte Apparatur für Langzeit-Thermoschock-Versuche mit Kugelschüttungen in der fürs Blanket relevanten Geometrie wurde fertiggestellt.

Es wurde die Durchlässigkeit für Deuterium, zur Simulation von Tritium, durch eine 3 mm dicke Scheibe aus hochdichtem Lithiumorthosilikat bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom Druck gemessen. Da eine Diffusion durch das Material bei dieser Temperatur nicht stattfinden sollte, Risse nicht vorliegen und für Helium dasselbe Verhalten beobachtet wurde (siehe Abbildung), handelt es sich um den Transport durch offene durchgehende Porosität.



Durchlässigkeit einer 3 mm dicken Lithiumorthosilikat-Scheibe für Helium in cm<sup>3</sup> (NPT/cm.s über dem Druckmittelwert (P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub>)/<sub>2</sub> [mbar]

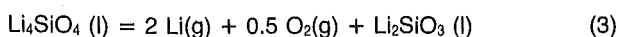
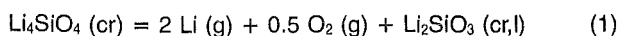
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25336	03.06.02P16A	Dr. W. Breitung
25337	03.06.02P16B	R. Huber
25338	03.06.02P16C	J. Lebkücher
25454	03.06.02P16D	P. Moretto (Doktorand)
V26069	03.06.02P16E	I. Schub
V26561	03.06.02P16F	Dr. G. Schumacher
V26633	03.06.02P16G	<b>Dr. H. Werle</b>

## IRCH

Im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung physikochemischer Eigenschaften keramischer Stoffe für das Brüten von Tritium in einem Fusionsreaktor werden grundlegende Arbeiten über die Verdampfungseigenschaften von Lithiumsilikaten, die Reaktion der Silikate mit H<sub>2</sub>O und Be und über die Löslichkeit von Wasserstoff in diesen Verbindungen durchgeführt.

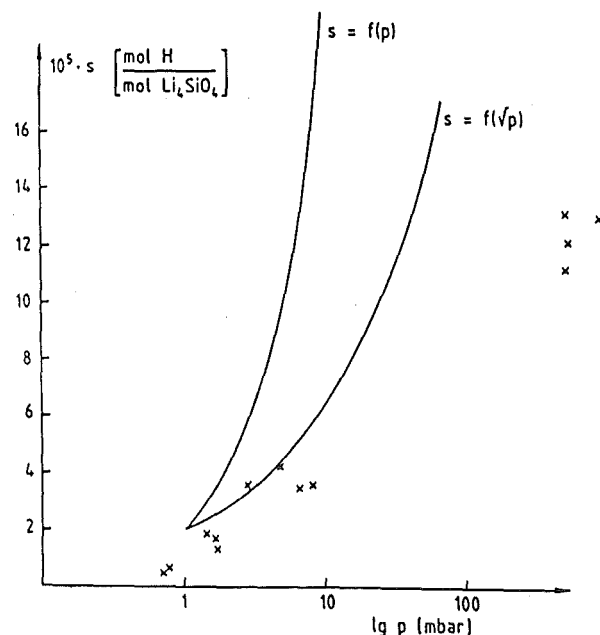
### Verdampfungsuntersuchungen an Lithiumorthosilikaten

Mit der Methode der Massenspektrometrie mit Knudsenzelle wurden Verdampfungsuntersuchungen an festem und flüssigem Lithiumorthosilikat vorgenommen. Die für die beobachteten Li-, O<sub>2</sub>-, Li<sub>2</sub>O-, LiO- und Li<sub>3</sub>O-Partialdrücke über festem und flüssigem <sup>7</sup>Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>- und <sup>6</sup>Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> geltenden Verdampfungsreaktionen werden nachstehend angegeben:



Anhand der aus den gemessenen Ionenintensitäten ermittelten Partialdrücke wurden Reaktionsenthalpien für diese und weitere Reaktionen nach der Methode des dritten Hauptsatzes berechnet. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß unter Gleichgewichtsbedingungen bei Ausschluß von Einwirkungen von Strukturmaterialien in Lithiumorthosilikat erbrütetes Tritium bei den in einem Reaktor-Brutmantel zu erwartenden Temperaturen vornehmlich als T<sub>2</sub>O freigesetzt werden wird. Ergebnisse der Lithiumpartialdruckmessungen zeigen, daß erst bei einer Temperatur von 1120 °C ein Li-Partialdruck von 10<sup>-2</sup> Pa erreicht werden wird. In Bezug auf den thermischen Lithiumabtrag aus dem Reaktorblanket stellt daher diese Temperatur eine obere Grenze dar; sie könnte jedoch in Anwesenheit von Wasser deutlich niedriger ausfallen (Verdampfung von LiOT).

Während beim Lithiummetasilikat die Wasserstofflöslichkeit schwerpunktmäßig bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen wurde, konzentrierten sich die nun durchgeführten Experimente mit Lithiumorthosilikat auf die Druckabhängigkeit. Die Abbildung zeigt, daß die gefundenen Meßwerte nicht einer einfachen  $\sqrt{p}$ - oder  $p$ -Abhängigkeit folgen und die Zunahme kleiner ist, als nach einem Sievert- oder Henry-Gesetz zu erwarten wäre. Offensichtlich sind Absorptionssphänomene und vom aktuellen Redoxpotential abhängiges Trapping von entscheidender Bedeutung.



Gasvolumetrisch gemessene Löslichkeit von H in Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, Druckabhängigkeit bei 550 °C

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
24949 24950 V26478 V26614	03.06.02P12A	Dr. M. Glugia Dr. H. Ihle <b>Dr. R.-D. Penzhorn</b> P. Schuster K.H. Simon Dr. K. Zmbov (Gast)

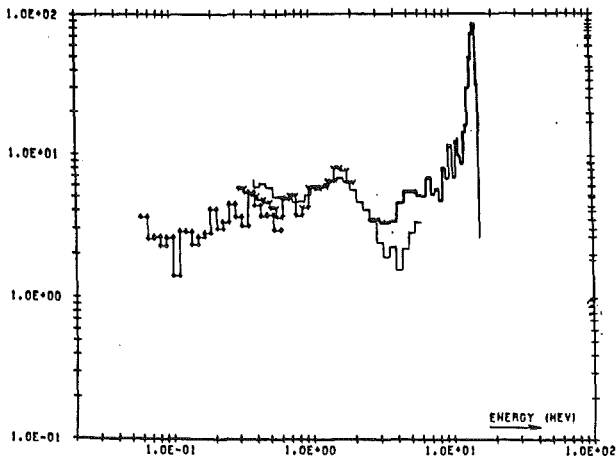
### Vorhaben

#### 03.06.03 Grundlagenarbeiten zum Blanket

### INR

An der Anlage KANT wurden die ersten Spektren von Neutronen gemessen, die aus der Oberfläche von Beryllium-Kugelschalen mit einer 14 MeV-Neutronenquelle im Zentrum austreten. Es wurde das Spektrum von 50 keV bis 14 MeV erfaßt, wobei für Energien oberhalb 2.5 MeV ein Flüssigkeitsszintillator, für den übrigen Bereich drei Rückstoßprotonen-Zählrohre mit unterschiedlichem Wasserstoffgehalt verwendet wurden.

Für den Flüssigkeitsszintillator wurde eine (n, γ)-Pulsformdiskriminierung vorgenommen, die Ansprechfunktion bestimmt und ein Entfaltungsprogramm implementiert und erprobt. Dann wurden die Spektren von 7 Be-Kugelschalen gemessen. Mit allen Detektoren wurde das Spektrum einer Kugelschale mit 5 cm Innenradius und 22 cm Außenradius bestimmt (siehe Abbildung nächste Seite).



Gemessenes Neutronenspektrum von der Oberfläche einer Beryllium-Kugelschale mit  $R_i = 5$  cm,  $R_a = 22$  cm und einer 14 MeV-Punktquelle im Zentrum

Die Spektrumsform stimmt gut mit einer Monte Carlo Rechnung überein.

Bei der Quellstärkebestimmung mit den assoziierten  $\alpha$ -Teilchen ergaben sich Schwierigkeiten, die mit der Tatsache zusammenhängen, daß das Target des Neutronengenerators sich auf Hochspannungspotential befindet. Als Alternative wird eine Aktivierungsmethode entwickelt.

Die theoretischen Arbeiten des INR betreffen die Auswertung, Überprüfung und Aufbereitung relevanter Wirkungsquerschnittsdaten sowie die Entwicklung neuartiger Rechenverfahren zum Transport von 14 MeV-Neutronen.

Das zweidimensionale Neutronentransportprogramm mit direkter Berücksichtigung der Energie-Winkel-Korrelation bei der Streuung wurde fertiggestellt und ist als Option eines allgemeinen Transportprogramms verfügbar, zur Überprüfung wird ein zweidimensionales Experiment nachgerechnet.

Vergleichsmessungen zeigten: Die direkte Berücksichtigung der Energie-Winkel-Korrelation bringt bei der derzeit üblichen Darstellung der Kerndaten (Legendre-Polynome im Schwerpunktsystem) keine Verbesserung. Wenn die Daten aber in einer den kernphysikalischen Prozessen angemessenen Form vorliegen (EFF2 File), ist eine Verbesserung zu erwarten.

Zur Erstellung einer gekoppelten Neutronen-Photonen-Datenbibliothek wurden die zur Darstellung der Gamma-Reaktionen notwendigen Erweiterungen im Gruppendatenformat erarbeitet und ein Transformationsprogramm erstellt.

Für die inelastische Streuung am Kupfer im Kontinuumsbereich wurde eine Neuauswertung der Neutronenemissionsspektren unter Berücksichtigung der Precompound-Reaktionen durchgeführt. Die Auswirkung dieser Änderung auf integrale Daten wurde geprüft.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V26075	03.06.03P09A	Dr. I. Broeders Dr. W. Eyrich <b>Dr. U. Fischer</b> H. Fries Dr. K. Hayashi (Gast aus Japan) Dr. F. Kappler B. Krieg Dr. H. Küsters <b>Dr. U. von Möllendorff</b> DM. Schwenk-Ferrero (Doktorandin) E. Wiegner D. Woll

## IRB

### MHD-Untersuchungen an Flüssigmetall

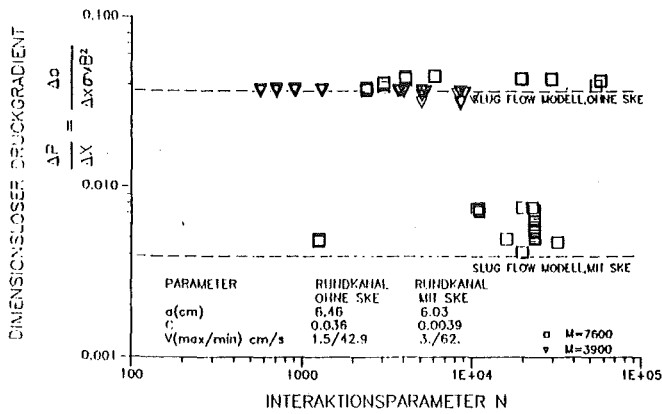
Das in 1984 gestartete Programm MEKKA (Magneto-Hydrodynamik Experiment in Natrium-Kalium Karlsruhe) zur Untersuchung der Druckverluste und Strömungsverteilungen von strömenden Flüssigmetallen in Magnetfeldern hoher Feldstärke wurde fortgesetzt.

In einem ersten Schritt wurden Experimente in geraden Kanälen mit kreisförmigem und rechteckigem Querschnitt durchgeführt, wobei ein normalleitender Dipolmagnet mit 2 Tesla Feldstärke und eutektisches Natrium-Kalium als Flüssigmetall verwendet wurde.

Das erste Experiment in MEKKA soll den Nachweis erbringen, daß durch Anwendung von Strömungskanaleinsätzen (SKE) der MHD-Druckverlust reduziert werden kann. Es wurde ein gerader Kanal mit kreisförmigem Querschnitt, einem Innendurchmesser von 130 und einer Wandstärke von 5 mm entsprechend einem Wandleitparameter  $C = 0,036$  und einer Gesamtlänge von 6 m verwendet. Zehn axial und acht am Umfang verteilte Druckmeßstellen erlauben Druckdifferenzmessungen in axialer Richtung und am Umfang. Mit einem Strömungsgleichrichter am Eintritt in die Teststrecke, bestehend aus zwei Lochplatten mit nachfolgendem Wabengitter, wird das Strömungsprofil abgeflacht.

Der SKE wird über eine Flanschöffnung am Auslauf der Teststrecke so eingeführt, daß sein Längsschlitz mit den Druckmeßbohrungen an der Seite des Rohres zusammenfällt. Für den SKE wurde zunächst eine vereinfachte Version gewählt, bei der die 0,5 mm dicke innere Wand gegen die äußere 2 mm dicke Wand des SKE durch ein 0,5 mm starkes Keramikpapier elektrisch isoliert ist. Mit dem SKE wird der Wandleitparameter von 0,036 auf 0,0039 reduziert.





MHD-Druckverluste am Geradrohr mit kreisförmigem Querschnitt

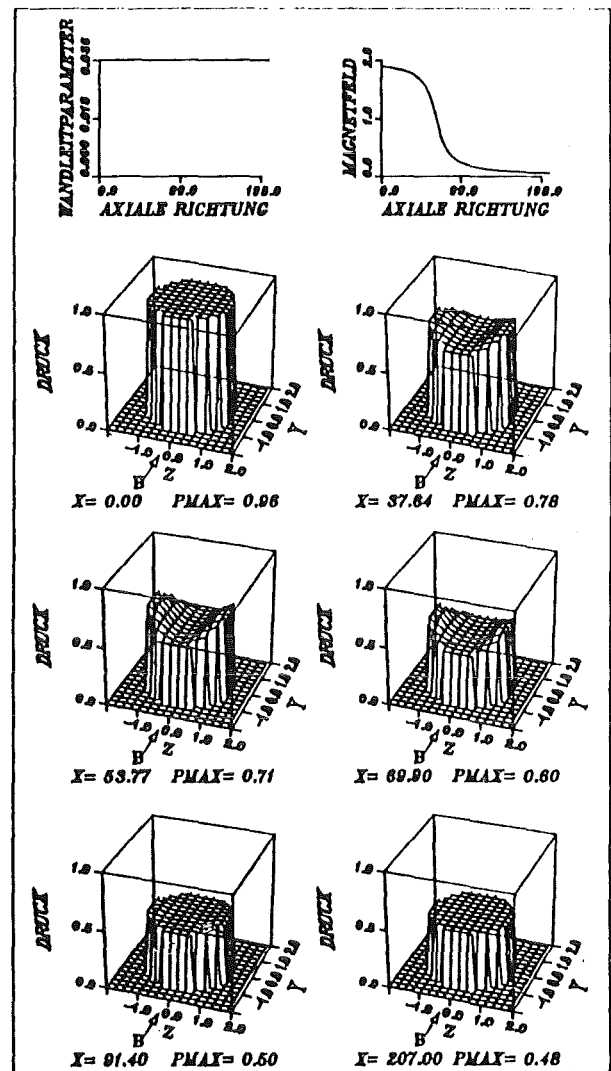
Die Ergebnisse der ersten Druckverlustmessungen im homogenen Magnetfeld mit dem dickwandigen Kanal sind in der vorstehenden Abbildung gezeigt. Hierin ist der dimensionslose Druckverlust als Funktion des Interaktionsparameters N zusammen mit der analytischen Vorhersage  $\Delta P/\Delta x = C/(C+1) = 0,036$  aufgetragen (obere Werte). Die Druckverlustmessungen wurden mit dem in den Magnet eingefahrenen SKE wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind ebenfalls zusammen mit der analytischen Voraussage  $\Delta P/\Delta x = 0,0039$  für den dünnwandigen (0,5 mm) SKE in dieser Abbildung eingetragen (untere Werte). Die Ergebnisse zeigen die vorausgesagte Reduktion des Druckverlustes um einen Faktor von nahezu 9.

Zur tieferen Einsicht in die Physik der MHD-Strömung werden theoretische Arbeiten durchgeführt. Hierbei werden zwei verschiedene Methoden angewandt. Bei der Methode der „angepaßten Asymptoten“, die vom ANL zusammen mit der Universität von Urbana entwickelt wurde, wird nur die Kernströmung numerisch berechnet, während für die Ränder analytische Lösungen herangezogen werden. Hiermit konnten die 3dimensionalen Strömungsverhältnisse im Kreisrohr am Ein- und Auslauf eines Magnetfeldes für fusionsrelevante Hartmann-Zahlen berechnet werden. Die nächste Abbildung zeigt als Beispiel die Druckverteilung über den Querschnitt in Abhängigkeit von der Koordinate in Strömungsrichtung für einen Strömungskanal wie oben beschrieben.

Bei der zweiten Methode werden die MHD-Gleichungen über den gesamten Kanal einschließlich der Ränder voll numerisch gelöst. Hiermit wurden erste 3dimensionale Rechnungen für einen Rechteckkanal bis zu Hartmann-Zahlen 100 durchgeführt, wobei sich wichtige Erkenntnisse über die Strömungsverteilung auch im Bereich der Wände ergaben.

### Entwicklung einer Geschwindigkeitsmeßsonde

Es wird eine Geschwindigkeitsmeßsonde nach der Temperatur-Puls-Laufzeit-Methode entwickelt. In 1988 wurden Messungen bis zu Fluidgeschwindigkeiten von 0.2 m/s durchgeführt, Komponenten optimiert und die Meßwertauswertung weiter automatisiert, so daß das Verfahren jetzt einsatzbereit ist.



Druckverteilung im Kreisrohr

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25694	03.06.03 P07A	G. Arnold
V26130	03.06.03 P07B	<b>Dr. L. Barleon</b>
V26344	03.06.03 P07C	<b>Di. V. Casal</b>
	03.06.03 P07D	W. Hartmann
	03.06.03 P07E	R. Kirchner
		H. Kreuzinger
		H. Kußmaul
		Di. L. Lenhart
		K.J. Mack
		H. Miller
		Dr. A. Sterl
		K. Thomaske

# Arbeitsthema

## 03.07 Tritiumtechnologie

### Vorhaben 03.07.01 Vakuumtechnik für Fusionsanlagen

#### HIT

#### Entwicklung von großen Anlagenkomponenten für Tritiumbetrieb

Die Durchführbarkeitsstudie für eine Turbomolekularpumpe mit einem Saugvermögen von 50 000 l/s für Helium bei der Fa. Pfeiffer, ABlar, wurde abgeschlossen. Alle Anforderungen des NET-Betriebes außer dem Massendurchsatz für die „dwelltime“ wurden erfüllt. Beim Einlaßdruck von  $4 \times 10^{-3}$  mbar wurde ein Massendurchsatz für Helium von 165 mbar/s spezifiziert. Nachgewiesen wurden 115 mbar/s. Auch mit dem niedrigeren nachgewiesenen Massenstrom können die angestrebten „dwelltime“-Perioden von rd. 20 s noch erreicht werden.

Die Durchführbarkeitsstudie für Ganzmetall-Vakuumschieber ND 1500 mm bei der Fa. VAT, Haag, wurde abgeschlossen. Die technische Machbarkeit eines solchen Schiebers für den Einsatz im NET wurde nachgewiesen. Die spezifizierete Schließzykluszahl (1000) entspricht den Anforderungen an das Turbomolekularpumpen-Vakuumsystem. Für das Kryocompoundpumpen-Konzept muß eine weitere Untersuchung für die entsprechend höhere Anzahl von Zyklen durchgeführt werden.

Eine Durchführbarkeitsstudie über ölfreie Vorpumpen wurde ausgeschrieben. Die Vergabe wurde bis zur Festlegung des endgültigen Vakuumsystemkonzeptes an NET zurückgestellt.

#### Entwicklung von Kryosorptionspumpen für Plasmaabgas

Es wurden bisher insgesamt 321 Adsorberproben (50 Ømm) hergestellt (32 gelötet, 209 geklebt, 78 plasmagespritzt, 2 gesintert). Davon wurden in der Versuchsanlage TARZAN (Temperatur-Zyklierungsanlage) bisher 250 Proben zwischen 570 K (Aktivkohle 420 K) und 78 K zyklert. 201 Proben haben die Zyklierungstests bestanden.

In der Versuchsanlage HELENE (Helium-Kryosorptions-Experimente) wurden 23 Proben auf Heliumadsorptionskapazität bei 4,2 K untersucht. Eine relativ hohe Kapazität zwischen 50 und 330 mbar/g wurde für die Aktivkohleproben ermittelt.

Alle untersuchten geklebten und gelöteten Proben haben eine Heliumadsorptionskapazität zwischen 175 und 330 mbar/g. Die nach dem Plasmaspritzverfahren hergestellten Proben weisen eine deutlich kleinere Kapazität zwischen 50 und 80 mbar/g auf.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V26678 26751 26784	03.07.01P03A	H. Haas J. Hanauer W. Höhn B. Kammerer U. Kirchhof M. Lieberknecht H. Lukitsch A. Mack W. Obert (z.Z. bei JET, Abingdo) <b>D. Perinić</b> D. Zimmerlin

### Vorhaben 03.07.02 Tritiumprozeßtechnik

#### IDT

Das Programmsystem KATRIM zur Modellierung des Tritiumkreislaufs in einem Fusionsreaktor wurde modifiziert und für NET-relevante Fragen eingesetzt. Die Tritiuminventare, minimal erforderlichen Brutraten sowie Startinventare wurden in Abhängigkeit von der Reaktorverfügbarkeit simuliert / V26097/. Eine Klassifikation der Tritiummodelle, und die Methodik zum Vergleich der unterschiedlich detaillierten Modelle eines Tritiumsystems wurden erarbeitet. Es wurde damit begonnen, die Tritiumkonzentrationen in einem wassergekühlten NET-Abschirmblanket, das mittels Lithiumsalz auch als Brutblanket dient, zu simulieren. Für derzeitig absehbare NET-Verfügbarkeit weist die Häufigkeitsverteilung der Tritiumkonzentration bei etwa 35 Ci/kg ein Maximum aus; der (unerwünschte) Wert von  $\geq 70$  Ci/kg wird nur sehr selten erreicht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V26097	03.07.02P16B	<b>Dr. G. Spannagel</b> Dr. E. Gabowitsch

## IRCH

### Katalytisches Verfahren zur Rückgewinnung von Tritium aus Verunreinigungen im Fusionsreaktor-Plasma-Exhaust

Zur Rückführung von in Verunreinigungen ( $\text{CQ}_4$ ,  $\text{C}_2\text{Q}_6$ ,  $\text{Q}_2\text{O}$ ,  $\text{NQ}_3$  usw.,  $\text{Q}=\text{D},\text{T}$ ) vorkommendem Tritium in den Fusionsreaktor-Brennstoffkreislauf wird ein Verfahren entwickelt, welches katalytische Prozeßschritte mit der selektiven Wasserstoffpermeation durch einen Palladium/Silber-Permeator kombiniert.

Da dem Permeator im Reinigungskreislauf hohe Bedeutung zukommt, wurde der Einfluß von Verunreinigungen auf die Permeationsgeschwindigkeit besonders eingehend untersucht. Die Ergebnisse liefern den Befund, daß die Gase  $\text{CH}_4$  ( $p < 400$  mbar),  $\text{CO}$  ( $p < 1$  bar),  $\text{CO}_2$  ( $p < 1$  bar),  $\text{H}_2\text{O}$  ( $p < 30$  mbar) und  $\text{NH}_3$  ( $p < 20$  mbar) bei Temperaturen über  $250^\circ\text{C}$  die Wasserstoffpermeationsrate nicht beeinflussen. Bei niedrigeren Temperaturen wird nur durch  $\text{CO}$  die Permeationsrate herabgesetzt, wobei es jedoch zu keiner dauerhaften Vergiftung der Permeationsoberfläche kommt.

Die katalytische Spaltung von Methan an Nickel auf einem Aluminiumoxid-Träger ist erster Ordnung; Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten für diese Reaktion sind bei verschiedenen Temperaturen gemessen worden. Der sich im Laufe der Zeit auf dem Katalysator niederschlagende Kohlenstoff kann durch Reaktion mit Wasserstoff nach

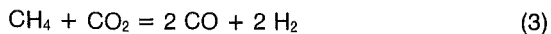


oder durch Reaktion mit  $\text{CO}_2$  gemäß dem Boudouard-Mechanismus



wieder in die Gasphase überführt werden. In Experimenten mit Deuterium konnte gezeigt werden, daß der Kohlenstoffniederschlag auf dem Katalysator höchstens 0.2 Atom% Wasserstoff enthält, woraus sich ein Tritiuminventar im Katalysator von nur etwa 0.7 g T pro kg Katalysator errechnen läßt.

Wird ein Methan/Kohlenstoffdioxid-Gasgemisch über einen Nickel-Katalysator geleitet, finden mehrere Reaktionen statt, die durch die Gleichung



summarisch beschrieben werden können und einen echten katalytischen Vorgang darstellen.

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

Die technische Durchführbarkeit eines auf einer Kombination aus einem Nickelkatalysator, einem Kupferchromitkatalysator und einem Palladium-Permeator basierenden Verfahrens zur Reinigung der unterschiedlichen Abgase von NET wurde im Rahmen einer Ingenieurstudie überprüft. Gleichzeitig wurden zum Vergleich andere Verfahren, die z.B. auf

der Getterung an U-Betten oder der Oxidation von Verunreinigungen und der nachfolgenden Produktion des entstandenen Wassers beruhen, untersucht. Dabei wurde deutlich, daß das katalytische Verfahren neben der generellen Einfachheit des Prozesses und der Produktion von hochreinem Wasserstoff weitere Vorteile, z.B. die geringen Mengen an festem Abfall und die moderaten Temperaturen, in sich birgt. Ein erarbeitetes chemisches Verfahrensfließbild zeigte, daß alle grundsätzlichen Fragen zur technischen Realisierung des Verfahrens beantwortet sind.

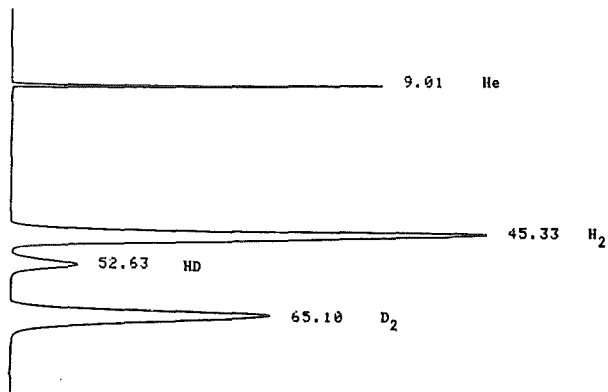
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26139	03.07.02P09A	Dr. M. Glugla
26280	03.07.02P09B	K. Günther
26473	03.07.02P09C	K. Nolte
26612		<b>Dr. R.-D. Penzhorn</b> Dr. R.A. Rodriguez (Gast) K.H. Simon

### Kryosorption an Molekularsieben und anderen Adsorbentien

Zur Beurteilung der Kryosorption an Molekularsieben bzw. an anderen Adsorbentien (Zeolite, Aktivkohle) als Verfahren für die Abtrennung von im Fusionsbrennstoffkreislauf vorkommenden Verunreinigungen aus einem Heliumprozeßgas (Plasma-Exhaust, Blanket) oder einem Wasserstoffprozeßgas (Plasma-Exhaust) werden Basisdaten ermittelt. Für diese Zwecke wird in einer Handschuhbox eine Ganzmetall-Apparatur erstellt, deren Hauptkomponente ein Refrigerator-Kryostat ist, der mit einer  $17,8 \text{ cm}^3$  großen Adsorptionskammer ausgestattet ist. Der Temperaturbereich, in dem die Kammer betrieben werden kann, erstreckt sich von  $-200$  bis  $450^\circ\text{C}$ . Somit können bei niedrigen Temperaturen Adsorptionsmessungen vorgenommen und durch Erhitzen auf hohe Temperaturen die Zeolite wieder vollständig regeneriert werden. Zur Evakuierung der Versuchsapparatur steht ein Turbomolekularpumpstand zur Verfügung, die Umwälzung der Gase erfolgt mit einer Metal-Bellows-Pumpe.

Die wichtigsten Meßgrößen der Experimente sind neben dem Gasdruck und -durchfluß die Zusammensetzung der Gase vor und nach der Adsorbentienkammer. Zur Konzentrationsbestimmung werden mehrere Methoden eingesetzt, nämlich Gaschromatographie, Massenspektrometrie, Flüssigszintillationszählung und in begrenztem Umfang die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie. Letztere Methode eignet sich besonders für die zerstörungsfreie qualitative und quantitative Erfassung von Deuterium- bzw. Tritium-substituiertem Methan, Ethylen, Ammoniak und Wasser sowie der Gase  $\text{CO}$  und  $\text{CO}_2$ . In Untersuchungen mit Tracermengen an Tritium werden mehrere im Institut entwickelte Ionisationskammern eingesetzt. Darüber hinaus ist eine naßchemische Methode für die Analyse tritiumhaltiger Spezies bereitgestellt worden. Gemäß dieser Methode wird tritiiertes Wasser direkt in Ethylenglykol aufgefangen und tritiumhaltiger Wasserstoff zunächst an einem Kupferoxydbett oxidiert und danach ebenfalls in Ethylenglykol zurückgehalten. Die Tritiummenge im Ethylenglykol wird durch Flüssigszintillationszählung ermittelt. Für die gaschromatographische Trennung und Analyse der Wasserstoffisotope wird eine mit Eisen auf Aluminiumoxid als Träger

befüllte 1/4"-Kupfersäule verwendet, die bei fl. N<sub>2</sub>-Temperatur betrieben wird. Mit dieser Säule ist eine sehr gute Trennung zwischen Helium und den Wasserstoffgasen H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub> in einem Zeitraum von etwa 60 min möglich (s. Abb.). Weitere Versuche sind auf die Herabsetzung der Retentionszeiten und der Erfassungsgrenzen der einzelnen Spezies ausgerichtet.



GC-Trennung von He, H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub>, Trägergas: Neon 4.8, gereinigt, Spezial-GC-Säule in fl. N<sub>2</sub>

Bedingungen als die, die erforderlich sind, um Wasserstoff aus Uranhydrid zurückzugewinnen. Nach Reaktion von ZrCo-Pulver mit zunehmenden Mengen an Stickstoff, Methan oder Sauerstoff nimmt die Wasserstoffaufnahme Kapazität allmählich ab, wobei nur Sauerstoff die Hydridbildung reversibel passiviert. Die nach Reaktionsättigung mit den o.a. Gasen resultierenden Produkte sind ZrCoC und ZrCoO<sub>>1.5</sub>. Weitere im Fusionsbrennstoffkreislauf zu erwartende Verunreinigungen, z.B. CO und CO<sub>2</sub>, sind gegenwärtig Gegenstand ähnlicher Versuche.

Oberflächenanalytische Methoden, wie XPS, AES und SIMS/SNMS, eignen sich hervorragend zur Charakterisierung von Wasserstoffgettern. Solche Untersuchungen wurden bisher an Titan und Zirconium-Cobalt durchgeführt. Dabei wurde im letzteren Fall beobachtet, daß die Reaktion an der Oberfläche mit Sauerstoff zu einer Anreicherung von ZrO<sub>2</sub> und Ausbildung von Co - zum Teil metallisch - führt. Um Aussagen über die Wechselwirkungen des Getters mit Wasserstoff zu machen, wurde eine extern hydrierte Probe der Zusammensetzung ZrCoH<sub>0.95</sub> untersucht. Ihre Oberflächenzusammensetzung entspricht derjenigen einer unhydrierten Probe nach dem Heizen. Anhand eines Tiefenprofils wurde festgestellt, daß der Einfluß des Wasserstoffs auf Cobalt gering ist, während die Bindungsenergie der Zr 3d<sub>5/2</sub>-Photolinie derjenigen in Zirconiumhydriden entspricht.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26316		K. Nolte Dr. H. E. Noppel Dr. R.-D. Penzhorn

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26611	03.07.02P15A	S. Bredendiek (Dipl.)
26881	03.07.02P15B	Dr. M. Devillers (Gast)
26477	03.07.02P15C	Dr. H. Klewe-Nebenius
V26477		Dr. R.-D. Penzhorn
V27007		G. Pfennig M. Sirch Dr. E. Willin

### Speicherung von Wasserstoff an Metalllegierungen

Gettermaterialien (Metalle, Metalllegierungen) eignen sich besonders für die Speicherung sowie für den Transport und sogar für die Verdichtung des im Brennstoffkreislauf eines Fusionsreaktors vorkommenden Tritiums. Im Hinblick auf die technische Anwendung sind diese Materialien in Bezug auf Speicherkapazität, Temperatur- und Wasserstoffkonzentrationsabhängigkeit des Dissoziationsdrucks, chemische Beständigkeit, strahlenbedingte Alterung usw. zu charakterisieren.

Zahlreiche Experimente haben zu der Erkenntnis geführt, daß ZrCo sehr gute Eigenschaften für die Zwischenlagerung und den Transport von Tritiumgas besitzt. Bei Zimmertemperatur ist zwischen der Metalllegierung - auch in Form eines feinen Pulvers - und Luft oder reinem Sauerstoff nur eine Oberflächenreaktion zu beobachten. Erst bei Temperaturen über 150 °C setzt eine meßbare Reaktion ein, die bei 250 °C keineswegs heftig ist. Auch das Hydrid ZrCoH<sub>3</sub> ist in Luft bei Zimmertemperatur beständig. Die max. H<sub>2</sub>-Speicherkapazität ist vergleichsweise hoch, die dabei auftretende Volumenexpansion nicht. Semiquantitative Versuche zeigen, daß die Reaktionsgeschwindigkeit von Wasserstoff mit aktiviertem ZrCo ähnlich schnell verläuft wie mit Uran. Der Wasserstoffpartialdruck über ZrCo-Hydrid ist bei Zimmertemperatur nur unwesentlich höher als über Uranhydrid. Andererseits kann der getterte Wasserstoff quantitativ (Experimente mit Tracermengen an Tritium) aus dem Gettermaterial bei etwa 330 °C ausgetrieben werden, d.h. unter deutlich günstigeren

### Tritiumprozeßtechnik

Die Arbeiten zur Entwicklung und Ertüchtigung von Analysemethoden zur qualitativen und quantitativen Erfassung von tritiumhaltigen und tritiierten Gasen konzentrierten sich auf die Gaschromatographie und die Massenspektrometrie mit einem Omegatron.

Ein vorhandener Gaschromatograph wurde umgerüstet, mit einer im Institut präparierten externen Säule mit LN<sub>2</sub>-Kühlung ausgestattet und erfolgreich zur quantitativen Analyse von gleichzeitig He, H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub> enthaltenden Proben eingesetzt. Für zukünftige Arbeiten soll ein eigens konfigurierter Doppelchromatograph mit einer dritten externen, LN<sub>2</sub>-gekühlten Säule eingesetzt werden. Die Probeneinspeisung erfolgt durch vermischungsfreie Kompression des zu analysierenden Gases auf Trägergasdruck. Mit einer Messung werden sowohl Verunreinigungen (CQ<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Luft, NQ<sub>3</sub>), als auch alle sechs unterschiedlichen molekularen H-Isotope und He quantitativ erfaßt.

Das Massenspektrometer vom Omegatron Typ ist nach Anlieferung in einem Handschuhkasten installiert und im Hinblick auf das Auflösungsvermögen charakterisiert worden. So läßt

sich z.B. der H<sub>2</sub><sup>+</sup>-Peak und der D<sup>+</sup>-Peak (theoretisch nötige Auflösung 1265) mit dem Instrument mit Standardeinstellungen klar trennen. Die funktionale Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von unterschiedlichen Parametern wie z.B. dem Magnetfeld oder der Amplitude des Hochfrequenzfeldes wurde gemessen. Sobald ein eichfähiges Totaldruckmeßgerät für den Druckbereich 10<sup>-5</sup> mbar bis 10<sup>-12</sup> mbar zur Verfügung steht, wird das Spektrometer auch für quantitative Analysen kalibriert.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26471 26861		<b>Dr. M. Glugla</b> Dr. E. Noppel Dr. R.-D. Penzhorn H. Schäfer K.H. Simon

### Tritiumreinigung mit Gettern

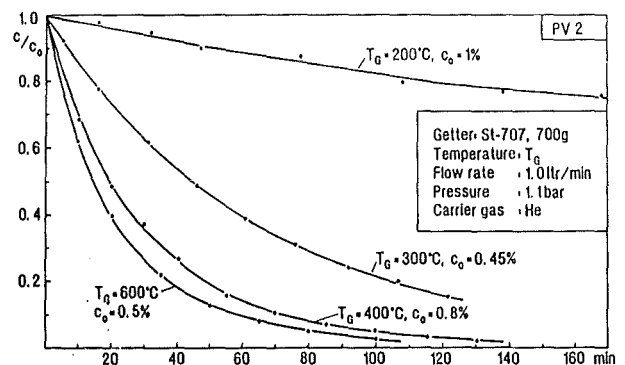
Das Ziel dieses Vorhabens besteht darin, die Anwendbarkeit verschiedener Gettermaterialien für die Reinigung von gasförmigen Prozeßströmen in der Tritium-Technologie zu untersuchen. Die Verunreinigungen sind dabei bis auf Restkonzentrationen im ppm-Bereich zu reduzieren; ferner sollen die in NQ<sub>3</sub>, CQ<sub>4</sub> und Q<sub>2</sub>O (Q=H,D,T) enthaltenen Wasserstoffisotope durch Crackung der Moleküle quantitativ zurückgewonnen und eine entsprechende, für den Betrieb mit Tritium geeignete Prozeß-Analytik entwickelt werden.

Der dafür gebaute Teststand PEGASUS (Plasma Exhaust GAS pUrrification System) ging im Oktober 1988 mit inaktiven Gasmischungen in Betrieb. Zuvor war eine etwa sechs Monate dauernde Testphase für verschiedene Komponenten erforderlich. Dabei wurden z.B. das Vakuumsystem und die Dichtheit des Kreislaufs optimiert, so daß dieser jetzt eine integrale Leckrate < 10<sup>-6</sup> mbar l/s aufweist. Ferner wurden Vorversuche mit den fünf installierten kommerziellen Gettern sowie mit einem Gaschromatographen durchgeführt, der ein bisher bei KfK noch nicht verwendetes, extrem empfindliches Detektorsystem enthält.

Die ersten Versuche galten der Sorption von CH<sub>4</sub> an dem Gettermaterial ST-707, welches aus einer Zr-V-Fe-Legierung besteht. Mit einer Mischung von 0,45 - 1,0 Vol.% CH<sub>4</sub> und He als Trägergas wurden im Kreislaufbetrieb jeweils die Eingangs- und Ausgangskonzentrationen (c<sub>in</sub> bzw. c<sub>out</sub>) am Getter gemessen. Wie die Abbildung zeigt, ergab sich bei den vier gewählten Temperaturen stets eine exponentielle Abnahme der Konzentration im Gasvorlagebehälter (= c<sub>in</sub>). Die den Kurven entsprechenden Abreicherungs-Halbwertszeiten T<sub>1/2</sub> sowie der jeweilige Reinigungseffekt des Getters c<sub>out</sub>/c<sub>in</sub> sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C
T <sub>1/2</sub> (min)	390	45,8	21,5	19,4
c <sub>out</sub> /c <sub>in</sub>	0,97	0,68	30,4	0,1

Ähnliche Versuche zur Abhängigkeit der Sorptionsgeschwindigkeit vom Gasdurchsatz sind noch nicht abgeschlossen. Im Jahr 1989 werden diese Experimente mit weiteren Gasmischungen fortgesetzt, wobei auch die anderen Getter zum Einsatz kommen. Ferner werden analoge Versuche mit Tritium-Tracern vorbereitet.

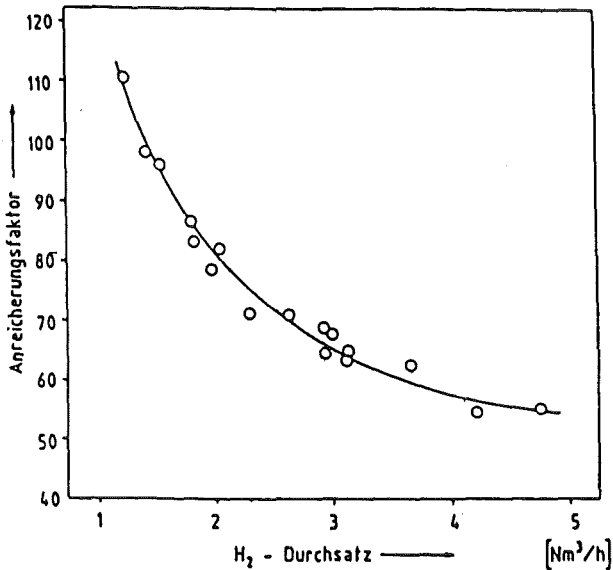


CH<sub>4</sub>-Konzentration in den Gassammeltank (V=11,5 l) während des Gasdurchflusses durch das Getter

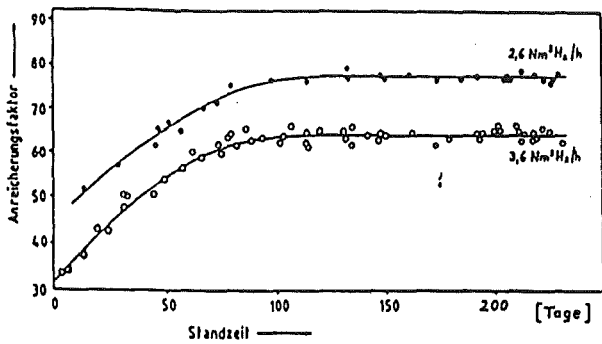
Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26799 V26475	03.07P13A	<b>Dr. H. Albrecht</b> Th. Kastner U. Kuhnes K. Schuster

### Tritiumrückgewinnung aus Reaktorkühlwässern

Schwerpunkt der Arbeiten war der Dauerbetrieb der Tritiumanreicherungsanlage über etwa neun Monate. Während dieser Zeit wurden die infrage kommenden Betriebsparameter wie Temperatur, Wasserstoffdurchfluß, wässriger Gegenstrom und Kontaktzeit variiert und optimiert. Die Austauschigenschaften des Katalysators wurden abhängig von der Standzeit überprüft. In der Abbildung erkennt man, daß die Tritiumanreicherung mit steigendem Wasserstoffdurchsatz abnimmt.



Aus der nachfolgenden Abbildung geht hervor, daß der Anreicherungs-faktor in den ersten drei Monaten ansteigt und dann bis zum Ende der Versuchsreihe konstant bleibt.



Nach Abschluß der Versuchsreihe wurde eine verbesserte Kolonne mit getrennten Reaktionsräumen aufgebaut. Mit dieser Kolonne werden jetzt Messungen durchgeführt.

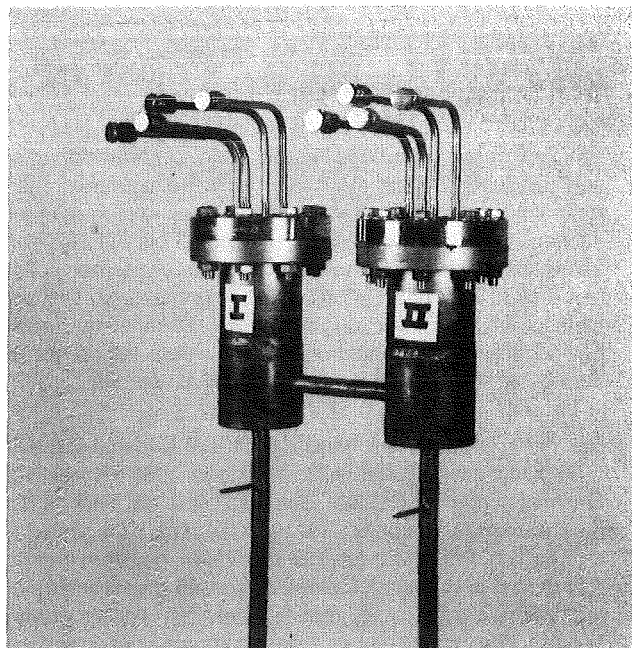
Veröffent-lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
		<b>U. Berndt</b> E. Kirste Dr. Sameh A. Ali

## HIT

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

Bei den Versuchen zur Verträglichkeit von Metallen mit flüssigem Pb-17Li wurden 1988 neben Getterstoffen auch Beryllium und eine MoRe-Legierung eingesetzt. Da es sich um Langzeitversuche handelt, liegen noch keine abschließenden Ergebnisse vor.

Parallel zu diesen Versuchen wurde in einem Konvektions-kreislauf der Transport von D<sub>2</sub> durch das flüssige Eutektikum untersucht. Die Abbildung zeigt den oberen Teil des Kreislaufes mit den beiden Ausgleichsbehältern und den Gasanschlüssen. In beiden Behältern wurde die Aufnahme bzw. Abgabe von D<sub>2</sub> durch Pb-17Li bestimmt.



Bei einem D<sub>2</sub>-Partialdruck von 100 mbar im Gasraum lösen sich pro Stunde und pro m<sup>2</sup> Grenzfläche bei 350°C 2,4 cm<sup>3</sup>, bei 550°C 19 cm<sup>3</sup> Deuterium.

Die Anlage TRITEX ist in Betrieb gegangen und wird ab Mitte 1989 für Versuche zur Verfügung stehen.

Veröffent-lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
25154 V25752		<b>Dr. H. Feuerstein</b> <b>Dr. H. Gräbner</b> S. Horn J. Oschinski

Vorhaben  
**03.07.03 Baubegleitende Untersuchungen  
zum Tritium-Labor**

**IDT**

Zur Optimierung der Tritiumbilanzierung in einem geschlossenen Tritiumkreislauf, wurde die herkömmliche Methodik modifiziert und theoretisch begründet. Im konkreten Fall des Karlsruher Tritiumlabors (TLK) wurde ein idealisierter Prozeß betrachtet: Ein Tritiumbatch wird für ein Experiment bereitgestellt, nach Abschluß des Experiments gereinigt und danach wieder mittels einer Transferstation dem Experiment zur Verfügung gestellt. Die entwickelte Methodik erlaubte dabei zu simulieren, wie sich die Bilanzierungsgüte in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Inventur und/oder den Abfallmengen ändert /26100/. Im Rahmen der Vorbereitung der praktischen und wissenschaftlichen Bewertung der im TLK anfallenden Daten, wurde ein Konzept zum Einsatz der Datenbanken erarbeitet.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26100	03.07.03P16A 03.07.03P16B	<b>Dr. G. Spannagel</b> Dr. E. Gabowitsch

**HIT**

Der Generalingenieur (GI) hat die Anfrageunterlagen für das Tritiumlager Grundstufe (TLG), das Tritiumtransfersystem (TTS) sowie die Tritium-Rückhaltesysteme (TRS) der Handschuhkästen für die Infrastruktursysteme und Experimente und das Zentrale Tritiumrückhaltesystem (ZTS) erstellt. Die drei ersten wurden geprüft und überarbeitet. Für das TLG und das TTS liegen Angebote vor. Die Firmenauswahl wurde getroffen.

Ein in mühevoller Abstimmung mit dem GI überarbeitetes Konzept zur Tritiumrückhaltung aus den Abgasen führte zu einer Aufwertung des ZTS in dem Sinne, daß nun alle Abgase sowohl aus den Handschuhkästen als auch aus den Primärsystemen von Tritiuminfrastruktur und Experimenten über dieses ZTS geleitet werden. Damit wurde erreicht, daß nur dieses System aus Sicherheitsgründen redundant auszuliegen ist und die individuellen TRS sowie die Unterdruckhaltung der Handschuhkästen vereinfacht werden können.

Am Sicherheitsrahmen für das Gesamtlabor und den sicherheitstechnischen Beschreibungen der Einzelgewerke TLG und TTS zur Vorlage bei der Genehmigungsbehörde wurde mitgearbeitet.

Die Isotopentrennanlage wurde vergeben. Sie wird ebenfalls von HIT technisch betreut.

Eine Testeinheit eines Handschuhkastens wurde geliefert und nach einem gemeinsam mit HVT erstellten Testprogramm mit gutem Ergebnis erprobt.

Im Versuchsstand VERDI zur Erprobung des Tritiumreinigungsverfahrens für das TLK wurden die Getterversuche

fortgesetzt. Die Temperaturabhängigkeit (460°C bis 700°C) der Getterung für N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> und Gemische von CH<sub>4</sub> und NH<sub>3</sub> in Wasserstoff wurde untersucht. Ebenso wurde der Einfluß von NH<sub>3</sub> auf Urancarbid sowie von H<sub>2</sub> auf Urannitrid aus vorhergehenden Beladungen geprüft. Versuche mit dem im Verfahrensfluß den Getterbetten nachgeschalteten, flüsigstickstoffgekühlten Molekularsieb bestätigten das Ziel einer Reinigung bis auf < 1 vpm Restverunreinigung im Wasserstoff.

Vor der Entsorgung des Uranpulvers sollte dieses durchoxidiert werden, damit keine Brandgefahr mehr besteht. Dies geschah im Temperaturbereich zwischen 25 und 400°C. Dabei wurden die gegeterten Verunreinigungen N<sub>2</sub> und C wieder freigesetzt. Das Konzept der Abfallvorbehandlung in der Anlage muß demnach überprüft werden.

Am Betrieb von VERDI ist HVT/TL beteiligt und gewinnt dabei erste Betriebserfahrungen.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26315 V 26547 26846	03.07.03P04A 03.07.03P04B	A. Edinger <b>E. Hutter</b> G. Neffe N. Paroth U. Tamm J. Weinhold

# Arbeitsthema

## 03.08 Sicherheit und Umwelteinfluß

Vorhaben

### 03.08.01 Komponentenbezogene Sicherheitsuntersuchungen

#### IRE

##### Stabilitätsanalysen für den Kryostaten

Bei der ursprünglichen Konzeption des Kryostaten wurde von einer dünnwandigen, elastischen Struktur ausgegangen, die auf ihr Beulverhalten untersucht werden sollte.

Die früher entwickelte, einfach anwendbare Lösungsstrategie für die Analyse von Beulproblemen setzt voraus, daß die Beulform bekannt ist. In neueren Untersuchungen wurde gezeigt, daß die Beulform, ausgehend von einer imperfekten Geometrie oder einer geschätzten Beulform, iterativ bestimmt werden kann. Die Konvergenz ist recht gut, d.h. die Beulform ist häufig nach drei bis fünf Rechenschritten erreicht. Bei dem Verfahren werden nur die üblichen linearen Finite-Element-Programme eingesetzt. Untersuchungen wurden auch zum Einfluß sehr lokaler Imperfektionen durchgeführt. Hier sind die Ergebnisse noch nicht voll befriedigend.

Bei den Beulexperimenten mit Zylinderschalen wurde der Einfluß von größeren Durchbrüchen untersucht, wie sie für einen Kryostaten für NET vorgesehen sind. Der Vergleich mit Rechnungen steht noch aus.

Die Arbeiten werden mit Ablauf dieses Jahres eingestellt, da für NET neuerdings ein dickwandiger Beton-Kryostat vorgesehen ist. Beulprobleme werden hier nur für den inneren Stahl-Liner erwartet.

##### Versagen von supraleitenden Magneten

Zur Untersuchung möglicher Folgen durch eine störfallbedingte Freisetzung der in den Spulen gespeicherten Energie wird in dem hier betrachteten Fall zunächst davon ausgegangen, daß an einer beliebigen Stelle der Spulenwicklung eines Toroidmagneten die Supraleitung verschwindet oder - etwa als Folge eines lokalen Kurzschlusses - der Leiter mechanisch beschädigt wird. Es ist nachzuweisen, daß solche Störungen nicht zu größeren Beschädigungen der Anlage führen. Da die detaillierte Analyse der Schadenspropagation in der Spule recht aufwendig ist, wurde zunächst angenommen, daß diese Schadenspropagation eine starke lokale Erwärmung und schließlich eine mechanische Durchtrennung des gesamten Spulenquerschnittes an einer beliebigen Stelle des Spulenumfanges zur Folge hat, daß dabei aber der Stromfluß durch Lichtbogenbildung aufrechterhalten wird. Die elektromagnetischen Kräfte wirken deswegen weiter und versuchen, die durchtrennten Spulenenden nach außen zu biegen. Mit Hilfe einer elastisch-plastischen Spannungsanalyse konnte gezeigt werden, daß selbst unter diesen sehr ungünstigen Annahmen die sich ergebenden Verformungen in vernünftigen Grenzen bleiben, wenn einige kleinere konstruktive Änderungen vorgenommen werden. Die Ausbildung eines plastischen Gelenkes, das zu einem zweiten Bruch des Spulenquerschnittes und damit zum Losreißen

eines Spulenteiles mit hoher Durchschlagkraft führen könnte, ist nicht zu erwarten.

Um den Vorgang der Durchtrennung eines Spulenquerschnittes genauer zu untersuchen, wurde mit der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Umsetzung der gespeicherten elektro-magnetischen Energie in Wärme begonnen. Da ein supraleitendes Kabel einen stark inhomogenen Aufbau hat, der mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Computerprogramme nicht in allen Einzelheiten beschrieben werden kann, wurden zunächst verschiedene Homogenisierungsmodelle zur Berechnung mittlerer Wärmeleitzahlen untersucht. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse sehr stark von dem gewählten Modell abhängen (Unterschiede mehr als eine Größenordnung). Es waren deswegen weitere Überlegungen zur Auswahl des richtigen Modells notwendig. Mit Hilfe der so ermittelten Wärmeleitzahlen wird zur Zeit die transiente Temperaturverteilung untersucht. Aus ihr sollen unter anderem die sogenannten Sprungzeiten ermittelt werden, die verstreichen, bis der Verlust der Supraleitung und damit die Wärmeerzeugung auch im Nachbarleiter einsetzt. Wegen der oben diskutierten Probleme bei der Modellierung sind experimentelle Überprüfungen der Ergebnisse unbedingt erforderlich.

##### Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Die Analyse der Zuverlässigkeit einer Abschaltung der supraleitenden EURATOM-LCT-Magnetspule im Fall eines Quench wurde abgeschlossen. Die untersuchte Systemkonfiguration entsprach weitgehend der Anordnung, die bei den LCT-Experimenten am Oak-Ridge National Laboratory eingesetzt wurde. Nach erneuter Überprüfung der verfügbaren Datenbasis über Ausfalldaten von Komponenten hat sich bestätigt, daß die Gesamtunverfügbarkeit der Abschaltung bei einer Anforderung unter Berücksichtigung von Common-Mode-Ausfällen bei  $3 \cdot 10^{-2}$  liegt. Dieser Wert ist zu 97,5% durch die relativ hoch angesetzte Ausfallrate der speicherprogrammierbaren Steuerungen bestimmt. Der Einfluß von Common-Mode-Ausfällen auf das Gesamtergebnis ist mit einem Faktor von etwa 3 relativ gering. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, daß ein Prozessfehler, der die Auslösung der Abschaltung bei Anforderung unwirksam werden läßt, nicht vorzeitig erkannt werden kann.

Die relativ hohe Nichtverfügbarkeit der Abschaltung bei Anforderung führt bei Experimentieranordnungen wie der LCT-Anordnung zu keinem hohen Sicherheitsrisiko. Für eine Anlage wie NET wäre eine erhöhte Zuverlässigkeit der Abschaltung bei Anforderung erforderlich. Es ist daher ein zweites, vom ersten völlig unabhängiges Anregekriterium für die Auslösung der Abschaltung bereitzustellen. Bei Erreichen dieses zweiten Anregekriteriums sollte dann aber die Auslösung der Abschaltung nicht über speicherprogrammierbare Steuerungen erfolgen.



Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V26490 25973	03.08.01P01A 03.08.01P09A 03.08.01009B	B. Dolensky Y.S. Hoang <b>R. Krieg</b> T. Malmberg R. Meyder <b>S. Raff</b> <b>Schnauder</b> E. Wehner A. Wickenhäuser E. Wolf

## ITP

Beim Betrieb von supraleitenden Magneten kann es zu Störungen kommen, deren letztliche Folge die Zerstörung eines Magneten sein kann. Die hierbei in einem Lichtbogen freigesetzte Energie kann zu einer Schädigung der Magnetumgebung führen. Ursachen und Ablauf der Störungen, ihre Detektion und Identifikation sowie die möglicherweise zerstörerischen Folgen werden in TESPE-S untersucht. Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Experimente wurde das Meßprogramm um sogenannte Druckkammerversuche erweitert, mit denen versucht wurde, die Verhältnisse innerhalb von Magnetwicklungen zu simulieren. Nach anstehenden umfangreichen Auswertungen der experimentellen Daten soll nun zusammen mit Code-Entwicklungen die Übertragung der Ergebnisse auf andere, größere Magnetsysteme erfolgen.

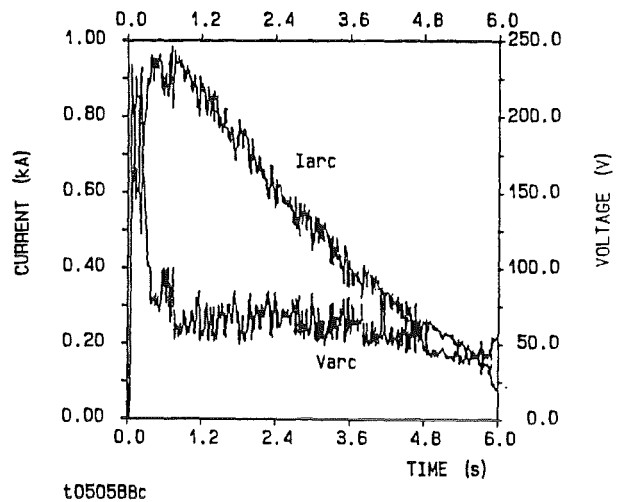
Nach der früheren Experimentierreihe mit frei brennenden Lichtbögen über Magnetwicklungen sowie der Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Lichtbogen und Magnet konzentrierten sich die Arbeiten im Berichtszeitraum auf Experimente mit räumlich eingeschlossenen Lichtbögen, die in einer die Wicklung simulierenden druckfesten Kammer brannten. Ihre Energie bezogen sie wechselnd aus einer oder allen sechs Spulen des supraleitenden Torus.

### Erste Druckkammerversuche

Die Charakteristik und das Verhalten eines Lichtbogens wird durch seine Umgebung stark beeinflusst. Die Energiebilanz eines Bogens fordert ein Gleichgewicht zwischen der im Bogen umgesetzten elektrischen Leistung und der von seiner Umgebung aufgenommenen Wärme, die hauptsächlich von der Masse des in der Nähe befindlichen Materials, dessen spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit abhängt. Für die Simulation der Lichtbogenumgebung innerhalb eines Magneten ist daher ein typischer Wicklungsaufbau anzunehmen. Da die Entwicklung bei Großmagneten deutlich zu Leitern mit Innenkühlung (s. LCT, NET) geht, wurde auch bei den Lichtbogen-Druckkammern davon ausgegangen.

Im ersten Schritt wurde der Lichtbogen zwischen Kupfer-Polen gezündet, deren Querschnitt  $20 \times 30 \text{ mm}^2$  bzw.  $15 \times 20 \text{ mm}^2$  betrug. Der Polabstand wurde von 5 bis 30 mm variiert. Der Brennraum wurde von den Polflächen sowie 1 mm dicken GFK-Platten begrenzt, welche die Wicklungsisolierung

darstellen sollten. Durch zusätzlich angebrachte Kupferplatten unterschiedlicher Dicke (1 bis 5 mm) wurde die den Bogen umgebende und ihn kühlende Masse der Kammer variiert. Der in dieser Anordnung maximal zu haltende Druck betrug 3 MPa. Die aufgenommene Strom-Spannungs-Kennlinie ist abgebildet.



Strom-Spannungs-Kennlinie eines räumlich eingeschlossenen Lichtbogens.

In der Lichtbogenentstehungsphase steigt die Spannung bis auf über 200 V bei gleichzeitigem Druckanstieg; nach Undichtwerden der Kammer und entsprechendem Druckausgleich mit der Umgebung sank die Spannung auf einen Wert von 60 V. Diese gegenüber frei brennenden Lichtbögen um rund 30 V erhöhte Spannung wird auf die kühlende Wirkung des dicht benachbarten Materials der Kammer zurückgeführt.

Erste Versuche zum Einfluß eines äußeren Magnetfelds auf das Verhalten eines räumlich eingeschlossenen Lichtbogens wurden mit einem Eisenmagneten (Feld ca. 15 mT) durchgeführt. Bereits aufgrund der Kraftwirkung dieses geringen Feldes wurde der Lichtbogen an eine der begrenzenden Wände gedrückt, so daß diese nach rund 1 s durchgebrannt bzw. durchgeschmolzen war. Die sich dadurch einstellende Gasströmung quer zum Bogen verlängerte ihn und führte zu einer intensiveren Kühlung; damit war eine Erhöhung der Brennspannung des Bogens um 20 V auf 80 V verbunden.

### Zweite Druckkammerversuche

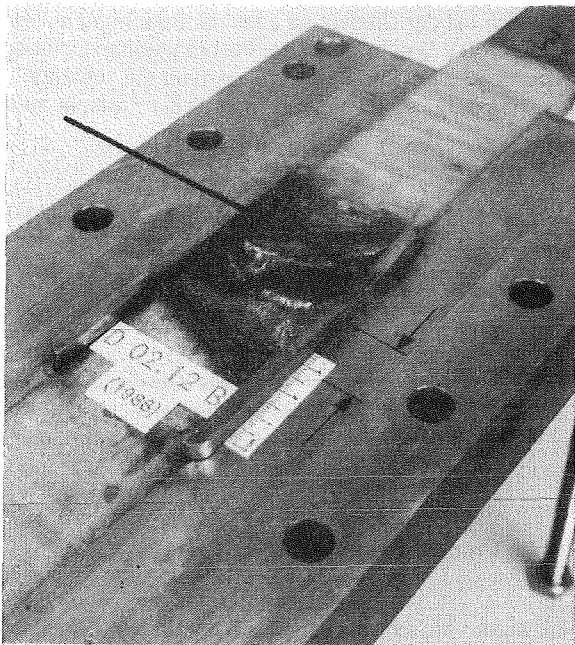
Hier wurde versucht, mit den Druckkammern die Eigenschaften eines Wicklungspakets noch näher nachzubilden. So wurden z.B. LCT-Supraleiter-Stücke als Lichtbogenelektroden verwendet. Das massive Kupfer der Kammerwand sollte die Wärmekapazität der Wicklung simulieren und eingelegte VA-Stahlbleche stellten die Leiterhülle dar. Die Auswirkung des in realen Wicklungen vorhandenen Heliumvolumens innerhalb des Leiters wurde dadurch untersucht, daß verschiedene Helium-Volumina an die Leiterstücke angeschlossen wurden und damit eine druckwirksame Leiterlänge bis zu 22 m simuliert werden konnte.

Es wurden Lichtbögen mit Anfangs-Stromstärken zwischen 500 und 2200 A untersucht. Typische Brennspannungen wurden mit etwa 80 V registriert. Der maximale Druckaufbau lag bei 20 MPa und trat auf, als beide Leiterstücke im Brennraum zuschmolzen. Der reine Druckeinfluß auf die Brennspannung wird mit zusätzlichen 20 V abgeschätzt. Beobachtete vorübergehende Spannungsanstiege bis zu 200 V werden auf eine Lichtbogenverlängerung zurückgeführt, die durch eine expansive Gasströmung während des Druckaufbaus entsteht.

Bei vertikaler Kammeranordnung findet beim Brennen von Lichtbögen hoher Stromstärke eine Materialverlagerung statt. Das am oberen Pol abgeschmolzene Material sammelt sich auf dem unteren Pol, es kann in die Kühlkanäle fließen und diese verstopfen.

Mit einer um die Druckkammer gewickelten Spule konnte der Lichtbogen einem Magnetfeld von rund 0,1 T bei 2000 A ausgesetzt werden. Dadurch wird der Lichtbogen gegen eine Kammerwand gedrückt und das Abschmelzen der Lichtbogenumgebung erhält eine deutliche Vorzugsrichtung (Abbildung). Die Ergebnisse dieser ersten Magnetfeld-Versuche führten zur Planung eines ergänzenden Experimentlaufs mit Feldern bis zu 4 T.

Die Begrenzung der Stromstärke auf rund 2000 A, anstelle einer Betriebsstromstärke von mehr als 10000 A beim LCT-Experiment, wurde gewählt, weil die wesentlichen Lichtbogeneigenschaften hier bereits sichtbar werden, andererseits die Zerstörungen noch mäßig waren und Rückschlüsse auf die Lichtbogeneigenschaften zuließen.



Unterer Teil der Druckkammer mit Supraleitern. Einseitiger Abbrand des Leiters aufgrund der Wirkung eines äußeren Magnetfeldes.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
V 25922 V 25925	03.08.01 P11A	P. Duelli <b>Dr. K.P. Jüngst</b> H. Kiesel DI H. Kronhardt G. Obermaier E. Süß Dr. H. Yanagi  <b>HVT:</b> DI M. Oehmann J. Seibert

## Vorhaben

### 03.08.02 Anlagenbezogene Sicherheitsuntersuchungen

#### IRE

#### Systemanalyse für NET

Zur Vermeidung späterer kostspieliger Änderungen des Designs von NET bzw. seiner Teilsysteme werden in diesem Vorhaben frühzeitig Störfallsequenzen identifiziert, deren Folgen nicht auf das auslösende System begrenzt bleiben. Dabei wird im Rahmen der Overall Plant Accident Scenarios Working Group von NET die sogenannte 'basic machine' von NET, d. h. die Version mit Abschirmblanket, betrachtet. Die entsprechenden Sicherheitsbetrachtungen für die Brutblankets werden von den assoziierten Institutionen durchgeführt, die diese Blankets entwickeln.

Im Berichtszeitraum wurden für die 'basic machine' folgende Reference Accident Sequences (RAS) definiert:

RAS1: Versagen des Magnetsystems,

RAS2: Versagen im Tritiumsystem,

RAS3: Kühlmittelverlust-Störfall außerhalb des Vakuumkessels

RAS4: Kühlmittelverlust-/Kühlmitteldurchsatz-Störfall im Vakuumkessel

RAS6: Kühlmittelverlust-Störfall in einem LiPb-Brutmodul

Die Durchführung der Störfallanalyse RAS1 liegt bei KfK. Über die bisherigen Arbeiten zum RAS1 wird unter 03.08.01 berichtet. Für die Blanketkonzepte, die im KfK entwickelt werden, liegen erste Betrachtungen zu ihrer Sicherheit vor.

#### Sicherheitsrelevante Empfehlungen für den Entwurf

Sicherheitstechnische Kriterien und Empfehlungen sollen dazu dienen, mit daraus abgeleiteten Leitlinien den Entwurf von NET zu unterstützen und einen einheitlichen Standard für die Beurteilung der Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Anlage in verschiedenen europäischen Ländern bereitzustellen.

Im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe wurden maßgebliche Beiträge für verschiedene Bereiche sicherheitsrelevanter Empfehlungen ausgearbeitet, die in folgende Arbeitsdokumente dieser Gruppe eingegangen sind:

- Empfehlungen zum Schutz gegen ionisierende Strahlen
- Empfehlungen zum Schutz gegen magnetische und elektromagnetische Felder
- Schutzmaßnahmen gegen äußere Einwirkungen.

Die zum Strahlenschutz der Bevölkerung und des Betriebspersonals empfohlenen Dosis-Grenzwerte für den Normalbetrieb und bei Störfällen berücksichtigen die in den einzelnen Ländern der EG bestehenden unterschiedlichen Regelungen und liegen unter den Werten der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) und der EG.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.08.02P04A 03.08.02P04B	<b>W. Kramer</b> <b>R. Meyder</b>

**Vorhaben**  
**03.08.03 Fusionstechnologie und Umwelt**

**INR**

Zur Abschätzung der radiologischen Folgen von Tritiumfreisetzungen aus Fusionsreaktoren muß das für andere kern-technische Anlagen entwickelte Unfallfolgenmodell UFO-MOD um ein Tritiummodell erweitert werden. Da Tritium ins Wasser übergeht, spielt bei der atmosphärischen Ausbreitung die Reemission aus Pflanzen und aus dem Boden eine erhebliche Rolle. Ein entsprechendes Ausbreitungsmodell wurde erstellt, das auch die Umwandlung von HT in HTO im Boden, die Aufnahme von Tritium durch Wurzeln der Pflanzen und die Umwandlung von HTO in organisch gebundenes Tritium berücksichtigt. Die Reemission beeinflusst die räumliche Verteilung der Dosis erheblich.

Veröffentlichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
	03.08.03P03A	<b>Dr. J. Ehrhardt</b> W. Raskob (Firma DTI)

**HS**

**Versuche zum Einbau von HTO in die organische Substanz von Pflanzen**

Weizen-, Mais- und Bohnenpflanzen wurden für 8 - 11 Tage mit HTO in Boden und Atmosphäre ( $1 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \text{ Bq/l}$ ) unter kontrollierten Klimabedingungen beaufschlagt. Die oberirdischen Pflanzenteile wurden eingefroren und gefriergetrocknet. Das Trockenmaterial wurde durch schonende Extrak-

tionsmethoden in die Hauptsubstanzklassen aufgetrennt, wobei austauschbar gebundenes Tritium durch die verwendeten Lösungsmittel entfernt wurde.

2 - 4 % des Gesamttritiums in den Pflanzenproben waren nichtaustauschbar organisch gebundenes Tritium und 96 - 98 % freies Gewebewasser und austauschbar organisch gebundenes Tritium. Die Tritiumverteilung in den organischen Komponenten zeigt Tab. 1. Der höchste Anteil war in der Rohfaserfraktion, die jedoch auch den höchsten Gewichtsanteil hatte. Die Nukleinsäurefraktion, mit weniger als 1 % Gewichtsanteil, war mit dem geringsten Tritiumanteil vertreten. Die höchste spezifische Aktivität (in Bq pro g Wasserstoff) wurde jeweils in der Fettfraktion gefunden.

**Tabelle:** Tritiumverteilung im organischen Material von Pflanzen in % (nur nichtaustauschbar gebundenes Tritium) nach Exposition mit tritiiertem Wasser bzw. Wasserdampf in Boden und Atmosphäre

	Weizen <sup>1)</sup>	Mais <sup>2)</sup>	Bohnen <sup>3)</sup>
<b>Proteine</b>	24	11	11
<b>Rohfaser</b>	41	57	59
<b>Fette/Pigmente</b>	18	12	17
<b>niedermolekulare Verbindungen</b>	16	20	13
<b>Nukleinsäuren</b>	1	n. a.	n. a.

n.a. = nicht analysiert

<sup>1)</sup> bei ca.  $2,5 \cdot 10^6 \text{ Bq/l HTO}$ , Expositionsdauer: 11 Tage von der Keimung an

<sup>2)</sup> bei ca.  $1 \cdot 10^6 \text{ Bq/l HTO}$ , Expositionsdauer: 8 Tage ab 7. Tag nach der Keimung

**Vorversuche zur HT-Exposition von Pflanzen**

Die Deposition von HT in Pflanzen soll unter kontrollierten klimatischen Bedingungen untersucht und quantifiziert werden. Als Expositionskammern sollen entgegen der ursprünglichen Planung kleinere Einheiten verwendet werden, um eine bessere Handhabung der Versuchspflanzen sowie einen besseren Strahlenschutz gewährleisten zu können. So sollen zunächst eine Glovebox aus Plexiglas mit einem Inhalt von ca. 300 Litern, später noch kleinere klimatisierte Gaswechsel-Meßküvetten für die Exposition eingesetzt werden. Die Klimatisierung der Glovebox wird dadurch erreicht, daß klimatisierte Luft aus einer großen Klimakammer, in der die Box installiert ist, kontinuierlich durchgeleitet wird. An der Luftansaugstelle soll Tritium in Form eines HT/N<sub>2</sub> Gemischs aus einer Druckgasflasche kontinuierlich eingeleitet werden.

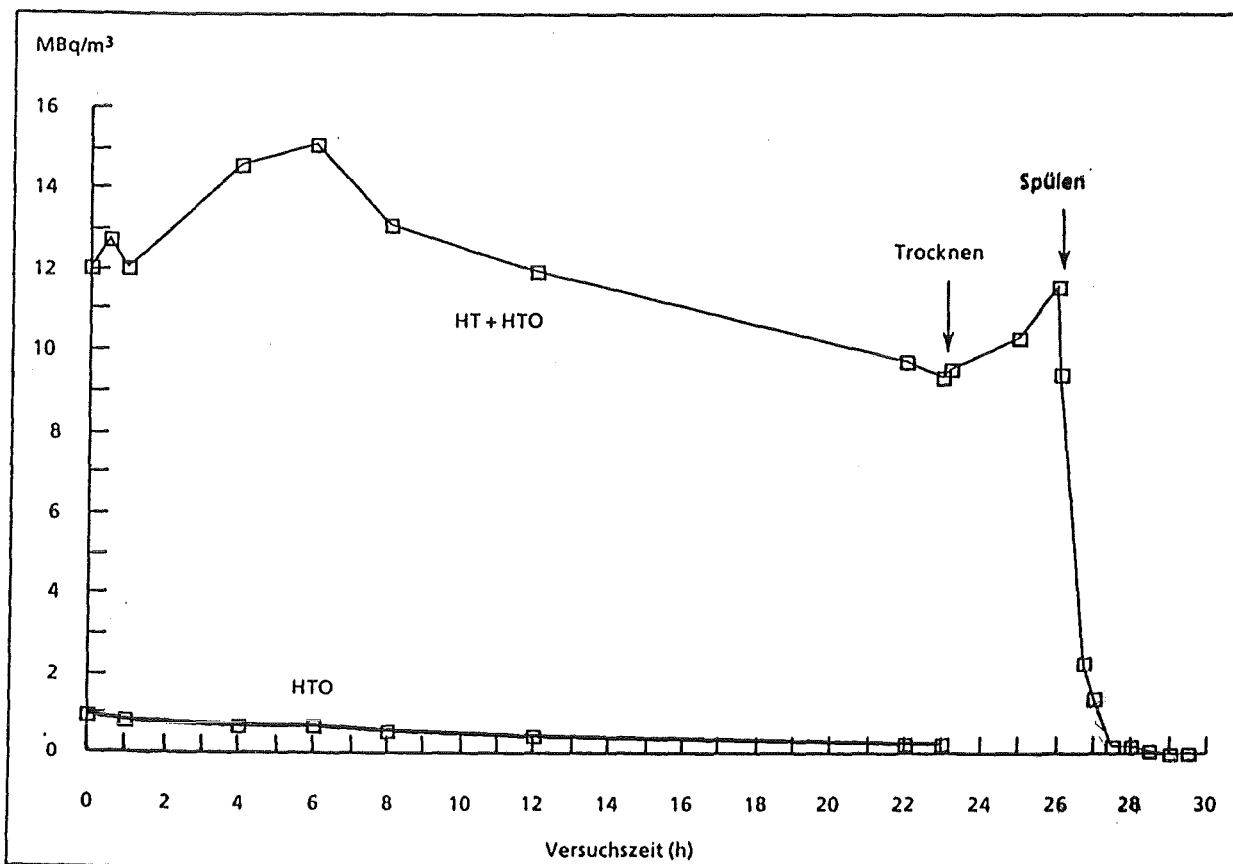
In ersten Vorversuchen wurde die Expositionskammer ohne Pflanzen als geschlossenes System getestet, wobei unter

sucht werden sollte, wie konstant die HT-Konzentration bei einmaliger Injektion in dem System gehalten werden kann und ob sich durch Oxidation bzw. Austauschreaktionen signifikante HTO-Konzentrationen aufbauen. Bei dem Versuch, dessen Ergebnisse in Abb. 1 dargestellt sind, wurden insgesamt ca.  $3,7 \cdot 10^6$  Bq mit einer Gasspritze injiziert. Die Tritiumkonzentration (HT + HTO) in der Box wurde mit Hilfe eines Tritiummonitors gemessen. Der zeitliche Verlauf der HTO-Konzentrationen wurde durch ein indirektes Verfahren ermittelt. Gegen Ende des Versuchs wurde HTO durch Ausfrieren gesammelt und gemessen.

Der Verlauf der Tritiumkonzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum ist in Abb. 1 dargestellt. Für den Anstieg zu Beginn des Versuchs und während der Trocknungsphase lassen sich z. Z. noch keine eindeutigen Erklärungen geben. Die unterschiedlichen Druckverhältnisse zu den einzelnen Meßzeiten hatten jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit einen Einfluß auf die Messungen mit dem Monitor. Insgesamt ist ein leichter Abfall der Tritiumkonzentrationen zu erkennen. Ein streng exponentiell abfallender Verlauf der Tritiumkonzentrationen konnte während des Spülens der Kammer mit Frischluft gemessen werden. Hieran ist ersichtlich, daß die Kammeratmosphäre ideal durchmischt wird. In Verbindung mit dem Trocknungsvorgang ließ sich durch diese Spülung problemlos eine Dekontamination erzielen. Das während der Trocknungsphase und des Spülvorgangs ausgefrorene Wasser enthielt nur ca. 0,01 % des insgesamt in der Expositions-kammer vorhandenen Tritiums als HTO. Der stetige Abfall im Versuchszeitraum deutet darauf hin, daß das HTO mit

großer Wahrscheinlichkeit aus dem HT-Vorratsbehälter stammte. Im Laufe der Zeit kam es zu einer Deposition aus der Atmosphäre an den Innenflächen der Kammer. Die Ergebnisse können als ein Hinweis dafür genommen werden, daß die Oxidation von HT zu HTO in der leeren Kammer im Hinblick auf die erwartete Deposition an den Pflanzen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Weitergehende Versuche sind jedoch vor Beginn der Pflanzenexperimente erforderlich.

Veröffent- lichungen	Primärberichte	Beteiligte Mitarbeiter
26752 26810	03.08.03P11A	Dr. L. König Dr. H. Schüttelkopf Dr. S. Diabaté D. Honig Dr. S. Strack



Verlauf der Tritiumkonzentration (Gesamt-T und HTO in der leeren Expositions-kammer (Plexiglas mit ca. 300 l Rauminhalt) nach einmaliger Injektion von molekularem Tritium ( $3,7 \cdot 10^6$  Bq)

**Appendix I:** 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 Material 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	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 MANET 1	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-Metal Breeder Blankets	IRB
N 6	Studies of Pebble Beds of Ceramic 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 5.4	Overall Plant Accident Scenarios for NET	IRE
S+E 5.5	Development of Safety Guidelines for the Design of NET	IRE
S+E 7	Generic Environmental Impact Assessment for a Fusion Facility	INR, IMK
T 6	Industrial Development of Large Components for Plasma Exhaust Pumping	IT
T 7	Optimization of Cryogenic Vacuum Pumping of Helium	IT
TPV 1	Development of Solid Particle Separators for Plasma Exhaust	IT
T 10A	Plasma Exhaust Purification by Means of Cryosorption on Molecular-Sieves or Alternative Adsorbents	IRCH
T 10C	Plasma Exhaust Gas Purification by Use of Hot-Metal Getters	IRCH
T 10E	Adsorption of DT on Heated Metal Beds other than Uranium	IRCH
T 10H	Catalyst Development for the Exhaust Purification Process	IRCH
Development of ECRH Power Sources (This task is part of the Fusion Physics Programme of the EC.)		IDT, ITP