

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

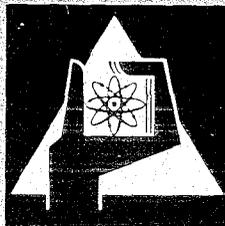
Januar 1970

KFK 1143

Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

Sicherheitsbericht  
für  
FR2-Kapselversuchseinsätze mit einwandigen NaK-Kapseln  
zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben

H. Häfner



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1970

KFK 1143

Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

Sicherheitsbericht  
für  
FR2-Kapselversuchseinsätze mit einwandigen  
NaK-Kapseln zur Bestrahlung von  
Hochleistungsbrennstäben

H. Häfner

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe



## Zusammenfassung

Im PSB-Bestrahlungsprogramm ist ab Anfang 1970 die Bestrahlung von U/Pu-Mischkarbid-Brennstäben mit Längen bis zu 1 m im FR2 vorgesehen. Zunächst sollen in Versuchsgruppe 6 Stäbe von 475 mm Länge (300 mm Brennstofflänge und 10 mm Hüllrohraußendurchmesser zum Einsatz kommen, und zwar sowohl Stäbe mit He- und Ar-Bonding als auch mit Na-Bonding. Für die Brennstäbe mit Gas-Bonding ist die Messung der Brennstoffzentraltemperatur (max. 2000°C) vorgesehen. Die maximale Stableistung soll 1150 W/cm betragen bei einer Hüllrohroberflächentemperatur von 630°C; der Abbrand ist vorläufig auf ca. 50 000 MWd/t Brennstoff begrenzt.

Für dieses Bestrahlungsvorhaben wurde im IRE eine Hochleistungskapsel entwickelt, in der NaK als den Brennstab umgebendes Wärmeübertragungsmedium verwendet wird. Das NaK ist nur durch eine Wand, ein Kapselrohr aus Niob-1 % Zirkon, vom Reaktorkühlwasser getrennt. In den NaK-Spalt ist ein gut wärmeleitendes Zwischenrohr eingeführt, um auf geringere Wärmestromdichten an der Kapseloberfläche zu kommen und um eine Konvektion im NaK weitgehend auszuschalten.

Der vorliegende Bericht enthält neben einer Beschreibung der Kapselversuchseinsätze und ihres Betriebsverhaltens die eigentlichen Sicherheitsbetrachtungen, die wegen der möglichen Gefahren von NaK/Wasser-Reaktionen im Falle eines Kapsellecks einen besonders breiten Raum einnehmen.

## Summary

Irradiation of U/Pu mixed carbide fuel pins of lengths up to 1 m is scheduled to start in the FR2 reactor in early 1970 as part of the irradiation program to be performed within the framework of the Fast Breeder Project. At the initial stage, comprising experimental group No. 6, pins of 475 mm length (300 mm fuel length and 10 mm outer diameter of the cladding tube) will be introduced including pins with He and Ar bonding as well as with Na bonding. The central fuel temperature ( $2,000^{\circ}\text{C}$  max.) will be measured in the case of fuel pins with gas bonding. Maximum pin power is intended to be 1,150 W/cm for a temperature of the cladding tube surface of  $630^{\circ}\text{C}$ ; for the time being, the burnup is limited to 50,000 MWd/te of fuel.

For the purposes of this irradiation experiment a capsule for a high pin power was developed at the Institute of Reactor Development using NaK as heat transfer medium which surrounds the fuel pin. The separation between NaK and the reactor cooling water is achieved by only one wall which consists of a capsule tube of niobium-1% zirconium. An intermediate tube with good thermal conductivity is fitted into the NaK gap in order to achieve lower heat flux densities on the capsule surfaces and to avoid convection in the NaK.

In addition to the description of the capsule rigs and their operational behavior this report includes the actual safety considerations which play a particularly important part because of the possible risks of NaK/water reactions resulting from a leak in the capsule.

Sicherheitsbericht  
für  
FR2-Kapselversuchseinsätze mit einwandigen  
NaK-Kapseln zur Bestrahlung von  
Hochleistungsbrennstäben

Zu dem Bericht haben beigetragen:

E. Bojarsky

A. Gerken

T. Malmberg

K. Philipp

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Aufgabe der Versuchseinrichtung
3. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes
  - 3.1 Allgemeiner Aufbau des KVE
  - 3.2 Die Bestrahlungskapsel
  - 3.3 Die Brennstäbe
4. Betriebsverhalten der Kapsel
  - 4.1 Kühlung der Kapsel im Normalbetrieb
  - 4.2 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel
  - 4.3 Festigkeitsnachweis der Brennstabhüllen
  - 4.4 Beanspruchung der Kapselwand
  - 4.5 Beanspruchung des Zwischenrohres
  - 4.6 Beanspruchung des Wasserführungsrohres
5. Aktivitäten in der Kapsel
6. Sicherheitsbetrachtungen
  - 6.1 Allgemeines zur Sicherheit
  - 6.2 Festigkeit der Kapselwand
  - 6.3 Denkbare Störfälle
  - 6.4 Gefahren der Reaktion zwischen NaK und  $D_2O$  - Versuchsergebnisse
  - 6.5 Reaktionen zwischen Karbidbrennstoff und  $D_2O$
  - 6.6 Auswirkungen großer Kapsellecks (max. Störfall)
    - 6.6.1 Verhalten des Wasserführungsrohres
    - 6.6.2 Belastung der benachbarten BE, TA-Stäbe und des Al-Tanks
    - 6.6.3 Sicherheit des Tankdoppelbodens
  - 6.7 Auswirkungen kleiner Lecks
  - 6.8 Möglichkeiten der Schadendetektion
  - 6.9 Maßnahmen bei Störfällen
  - 6.10 Zusammenfassung
7. Literatur

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

- Tabelle 1: Betriebsdaten der Brennstabprüflinge (Seite 12)
- Tabelle 2: Ergebnisse der CRASH-Rechnung für eine Standzeit von 8400 Stunden (Seite 14)
- Tabelle 3: Versuchsbedingungen und Ergebnisse der Interatom-Versuche (Testreihe FR2) (Seite 31)
- Tabelle 4: Einfluß der Neutronenbestrahlung auf die Hydrolyse von UC in Wasser bei 80°C (Seite 34)
- 
- Abb. 1: Schemazeichnung FR2-Kapselversuchseinsatz Typ 7 für IK-Positionen
- Abb. 2: Zusammenstellungszeichnung FR2-Bestrahlungskapsel Typ 7
- Abb. 3: Zeichnung des Testbrennstabes
- Abb. 4: Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel
- Abb. 5: Cantemperatur als Funktion der Anzeige
- Abb. 6: Zeitlicher Druckverlauf einer NaK-Wasserreaktion bei Leck am unteren Kapselende (im NaK)
- Abb. 7: Zeitlicher Druckverlauf einer NaK-Wasserreaktion bei Leck am oberen Kapselende (Gaspuffer)



## 1. Einleitung

Im Bestrahlungsprogramm des Projektes Schneller Brüter ist ab Anfang 1970 in Versuchsgruppe 6 und später in Versuchsgruppe 7 die Bestrahlung von U/Pu-Mischkarbid-Brennstäben mit Längen bis zu ca. 1 m im FR2 vorgesehen. Weitere Karbidbestrahlungen werden später im MZFR, DFR und BR2 folgen. Das Bestrahlungsvorhaben im FR2 ist also das erste einer Reihe, und es wird sich dabei um einen breit angelegten Parameterstest handeln. Dabei sollen erste Antworten zum Schwellverhalten des Brennstoffs, zur Spaltgasfreisetzung und zur Verträglichkeit zwischen Brennstoff und Hülle bei den verschiedenen Versuchsbedingungen gewonnen werden.

Die Erfahrung mit den bisherigen Kapseln hat nun gezeigt, daß eine über lange Zeit sichere Bestrahlung von langen Pins im FR2 nicht ohne weiteres möglich ist, solange man als Wärmeübertragungsmedium Flüssigmetalle nimmt, die beim Reaktorabschalten erstarren.

Begründung: Entsprechend dem axialen Flußverlauf bei einer mittleren Eintauchtiefe der TA-Stäbe von ca. 750 mm ist die max. Stableistung und Cantemperatur etwa in Coremitte oder knapp darunter zu erwarten. Bei einer Stablänge von z.B. 1000 mm beträgt die Stableistung an den beiden Stabenden nur noch etwa 75 % des Wertes in Stabmitte, wenn diese auf Höhe der Coremitte liegt. Entsprechend niedrig liegt auch die Cantemperatur an den Stabenden. Das hat zur Folge, daß beim Reaktorstart das wärmeübertragende Medium (PbBi oder Na) in Stabmitte zuerst flüssig wird und umgekehrt beim Reaktorabschalten von den Stabenden her zur Mitte hin erstarrt. Nach dem ersten Abschalten werden also immer in Stabmitte Erstarrungslunker (ca. 2 Vol.% bei PbBi und ca. 5 Vol.% bei Na) auftreten, die beim darauffolgenden Anfahren des Reaktors burnouts der Brennstabhülle verursachen können. Außerdem können beim ersten Anfahren in Stabmitte infolge der Schmelzexpansion der Flüssigmetalle unzulässige Beanspruchungen von Brennstabhülle und Kapselrohr auftreten. Bei Reaktorschnellschlüssen können darüber hinaus infolge des ungleichmäßigen Erstarrens (Einspannung oben und unten) besonders bei langen Stäben solche Zugkräfte auftreten, daß es zum Abreißen der Stäbe kommen kann.

Die burnout-Gefahr ist bei Kurzproben (bisherige Versuche) geringer, weil hier durch geeignete Wärmedämmungen ein "gezieltes" Erstarren erreicht werden kann, so daß Erstarrungslunker vor allem an bestimmten ungefährlichen Stellen auftreten.

Für Langproben wurde deshalb schon früher die Verwendung von eutektischem NaK, das bereits bei  $-11^{\circ}\text{C}$  flüssig ist, als Wärmeübertragungsmedium vorgeschlagen und ein Entwurf für eine einwandige NaK-Kapsel vorgelegt [1]. Mit dem eutektischen NaK liegen bereits Erfahrungen vor, da es schon seit 1 1/2 Jahren in Kapseltyp 4a und 5 als den Brennstab umgebendes Kühlmedium verwendet wird.

Der unter [1] zitierte Bericht ist die Grundlage zu diesem Sicherheitsbericht, ebenso wie die beiden ersten Sicherheitsberichte für Bestrahlungskapseln [2 und 3] Grundlage zu diesem Bestrahlungsvorhaben sind.

## 2. Aufgabe der Versuchseinrichtung

Mit dem hier beschriebenen Kapseltyp sollen im FR2 Brennstäbe mit U/Pu-Mischkarbiden bei Stabileistungen bis max. 1150 W/cm (gemittelt über den Reaktorzyklus ca. 1000 W/cm) und Hüllrohroberflächentemperaturen von max. ca.  $650^{\circ}\text{C}$  bis zu Abbränden von max. 60 000 MWd/t bestrahlt werden können. Grundsätzlich sind auch höhere Stabileistungen mit diesem Kapseltyp zu erreichen [1].

Eine Temperaturregelung während des Betriebs ist nicht notwendig. Die gewünschte bzw. max. zulässige Cantemperatur soll durch Wahl der Bestrahlungsposition einstellbar sein und kann dem axialen Neutronenflußverlauf entsprechend variieren. Während des Betriebes sollen an einigen Stellen entlang des Brennstabes die Temperaturen wie bisher kontinuierlich gemessen und registriert werden.

In der bereits spezifizierten Vg. 6 ist die Bestrahlung von insgesamt 25 Stäben (15 mit Gasbonding und 10 mit Na-Bonding) mit Längen von 475 mm bei 300 mm Brennstofflänge vorgesehen. In Vg. 7 soll dann auf größere Brennstablängen bis zu ca. 1 m übergegangen werden. 10 der 15 Stäbe mit Gasspalt von Vg. 6 werden zentrale Thermolemente zur kontinuierlichen Messung der Zentraltemperatur im Brennstoff erhalten.

Die Bestrahlungskapseln sollen im FR2 vorzugsweise auf Zwischengitterpositionen anstelle von Isotopenkanälen, können aber auch auf BE-Positionen eingesetzt werden.

### 3. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes

#### 3.1 Allgemeiner Aufbau des KVE

Der Kapselversuchseinsatz (KVE), der in Abb. 1 schematisch dargestellt ist, setzt sich wie bisher aus drei Baueinheiten zusammen: der Bestrahlungskapsel, dem Oberteil und der Kühlwasserführung. Die relativ leichte Demontierbarkeit gestattet die wiederholte Verwendung des Oberteils, das im wesentlichen zur oberen Core-Abschirmung und zur Übertragung der Meßleitungen dient.

Für die konstruktive und thermodynamische Auslegung der eigentlichen Bestrahlungskapsel sind folgende Faktoren bestimmend: Durch die Positionierung auf BE- oder Isotopenkanälen ist der Kapseldurchmesser relativ eng begrenzt; nach oben bei ca. 32 mm durch den Kanaldurchmesser und nach unten bei ca. 20 mm. Unterhalb dieses Durchmessers ist die Wärmestromdichte an der Kapseloberfläche bei der gewünschten Stableistung so hoch, daß bei den gegebenen Kühlverhältnissen starkes Sieden des Kühlwassers nicht zu vermeiden ist. Es ist also zwischen Brennstabhülle und Kühlwasser eine geeignete Schichtung einzubringen, in der gerade der gewünschte Temperaturabfall bei den entsprechenden Schichtdicken eintritt. Als Wärmeübergangsmedium zwischen Brennstab und Kapselwand sind Flüssigmetalle besonders geeignet, die wegen ihrer relativ guten Wärmeleitfähigkeit u.a. den Vorteil haben, daß keine allzu engen Maßtoleranzen gefordert zu werden brauchen. Als weitere Gesichtspunkte müssen bei der Kapselauslegung beachtet werden, daß die Beanspruchung der Kapselwand durch thermische Spannungen, Innendruck und Korrosion in zulässigen Grenzen bleibt und daß Reaktivität des Reaktors und Leistungsdichte der Testbrennstäbe durch die Kapselmaterialien möglichst wenig beeinflußt werden.

Prinzipiell sind bei der hohen Stableistung Kapselschichtmaterialien mit außergewöhnlich guten Wärmeleiteigenschaften notwendig, wenn man auf den gewünschten Kapseldurchmesser kommen will. Die eutektische NaK-Legierung stellt hier bereits einen Kompromiß dar. Die gegenüber Na schlechtere Wärmeleitfähigkeit wird wegen der schon genannten Vorteile des NaK in Kauf genommen. Der sich im NaK-Spalt bei der hohen Stableistung einstellende Temperaturgradient ist aber so steil, daß der Kapseldurchmesser bei der gewünschten Betriebstemperatur weit unter der vom Sieden her gegebenen Grenze läge, wenn man die einfache Schichtung: Brennstab, NaK, Kapselwand, wählen würde; auch bei Verwendung eines extrem gut wärmeleitenden Materials für die Kapselwand. Um den gewünschten Kapseldurchmesser zu erreichen, ist es also erforderlich, in den NaK-Spalt ein wesentlich besser als NaK wärmeleitendes Zwischenrohr einzusetzen. Dafür ist, vor allem auch wegen des niedrigen Einfangquerschnitts für thermische Neutronen, am besten Al geeignet; aber auch Nb ist noch gut brauchbar.

Als Kapselwandmaterial wird die hochwärmefeste Niob-Legierung mit 1 % Zr eingesetzt. Dieses Material ist gut schweißbar und hat neben den Vorteilen von Zircaloy 2 (geringe therm. Ausdehnung und damit geringe Wärmespannungen) vor allem den entscheidenden Vorteil einer gegenüber Zircaloy 2 5mal besseren Wärmeleitfähigkeit.

Auch bei relativ dickwandigen Kapselrohren ergeben sich trotz der hohen Stableistungen kaum nennenswerte Spannungen; zudem besitzt das Material außergewöhnlich gute Festigkeitseigenschaften, auch nach Bestrahlung. Die über diese Legierung verfügbaren Daten wurden in [4] zusammengestellt. Darüber hinaus hat das IRE zusammen mit dem IMF Untersuchungen mit diesem Material durchgeführt, deren Ergebnisse in [5] enthalten sind.

Die ursprünglich als Kapselmaterial vorgesehene Molybdän-Legierung TZM mußte wegen ihrer äußerst geringen Duktilität und schlechten Verarbeitbarkeit ausscheiden.

Das Kühlwasserführungsrohr wird aus neutronenökonomischen Gründen im Corebereich aus Zircaloy 2 gefertigt und ist aus Gründen, die im Abschnitt "Sicherheitsbetrachtungen" genannt werden, doppelwandig vorgesehen.

### 3.2 Die Bestrahlungskapsel (Abb. 2)

Die Bestrahlungskapsel besteht aus einem nahtlos gezogenen Rohr aus der genannten Nb-Legierung, das an beiden Enden durch angeschweißte Endstopfen verschlossen ist. Der äußere Kapseldurchmesser beträgt 27 mm, die Wanddicke 1,5 mm. Der Brennstab ist am oberen Endstopfen durch Gewinde fest fixiert, und am unteren so geführt, daß er sich frei ausdehnen kann. Durch den oberen Endstopfen werden auf einem Lochkreis von 12 mm  $\varnothing$  max. 6 Thermoelemente von 1 mm Durchmesser zur Messung der Brennstaboberflächen-temperatur hindurchgeführt und hart eingelötet.

An ihrem oberen Ende ist die Nb-Kapsel mit einem Trägerrohr aus Edelstahl verschraubt und hart verlötet, durch das die Thermoelemente zur Trennstelle (Vielfachstecker wie bisher) geführt werden. Auch das Trägerrohr mit der Steckverbindung ist dicht und mit Helium gefüllt. Am unteren Endstopfen der Kapsel ist ein Strömungskörper aus Zircaloy 2 aufgeschraubt. Durch Zentrierrippen auf dem Strömungskörper und auf dem Trägerrohr ist die Kapsel im Wasserführungsrohr zentriert.

Bei der Version mit Zentraltemperaturmessung wird das Hochtemperatur-Thermoelement durch eine zentrale Bohrung im oberen Endstopfen der Nb-Kapsel hindurchgeführt. Die Abdichtung wird dadurch erreicht, daß der Gewindeendstopfen des Brennstabes mit dem oberen Kapselendstopfen fest verlötet wird.

Aus Gründen der Betriebssicherheit wird der guten und sicheren Ausführung der Kapsel besonderes Augenmerk geschenkt. So werden z.B. an den Hersteller der Kapselrohre die gleichen hohen Anforderungen gestellt wie bei den Brennelement-Hüllrohren (Abnahmezeugnisse, Toleranzen, Druckprobe, Dichtheitsprobe, Materialtests, Ultraschallprüfung).

Die Fertigung der Kapsel erfolgt nach einem detaillierten Plan und wird sorgfältig überwacht. Nach jedem Montageschritt wird eine Prüfung, Reinigung und Dichtheitsprüfung (Druckprobe) durchgeführt.

Um eine größtmögliche Sicherheit der Schweißnähte zu erreichen, werden zunächst eine Reihe von Probeschweißungen durchgeführt, die metallographisch untersucht werden. Jede Schweißnaht an der eigentlichen Bestrahlungskapsel wird später mehrfach geröntgt, um Fehlstellen (Poren, Risse) ausfindig zu machen. Es wird also ein hohes Maß an Sicherheit dafür erreicht, daß die Kapsel im Betrieb dicht bleibt und daß weder Spaltprodukte noch NaK austreten können.

Im NaK-Raum befindet sich ein Zwischenrohr, ebenfalls aus der Nb-Legierung mit 1 % Zr. Die Dicke des Zwischenrohres (21 Ø x 3,0) ist so gewählt, daß man auf den gewünschten Kapseldurchmesser, bzw. die ohne Sieden noch abführbare Wärmestromdichte kommt. Durch den Einbau des Zwischenrohres wird eine nennenswerte Konvektion im NaK-Spalt vermieden.

Bei höheren Stabileistungen, z.B. 1300 W/cm, müßte das Zwischenrohr aus Al gefertigt werden, wenn man die gegebene Brennstabtemperatur nicht überschreiten wollte. Bei Korrosionsversuchen des IMF von Al in NaK bei 325°C haben sich keinerlei Veränderungen der Oberflächen feststellen lassen.

Auch bei relativ niedrigen Stabileistungen ist es mit diesem Kapseltyp möglich, hohe Cantemperaturen zu erreichen, indem man für das Zwischenrohr ein schlecht wärmeleitendes Material, z.B. Zircaloy 2, nimmt.

Das vorliegende Kapselkonzept ist also recht universell einsetzbar, denn es kann durch Wahl des Materials für das Zwischenrohr und durch Variation der NaK- bzw. Zwischenrohrschichtdicken bei gleichem Kapseldurchmesser hinsichtlich Stabileistung und Cantemperatur ein weiter Bereich überdeckt werden.

Die max. 6 Thermoelemente zur Messung der Cantemperatur in jeder Kapsel werden unterhalb des oberen Endstopfens, in dem sie hart eingelötet sind, durch eine Wendel zugentlastet und an der Meßstelle durch Drahtschlingen fest auf die Brennstabhülle aufgepreßt. Es ist daran gedacht, am Meßende von

1 mm auf 0,5 mm Manteldurchmesser verjüngte Thermoelemente einzusetzen, so daß eine möglichst genaue Temperaturmessung erreicht wird. Das erscheint vor allem im Hinblick auf die steilen Temperaturgradienten im inneren NaK-Spalt von ca. 110°C pro mm vorteilhaft.

Das Zwischenrohr ist innen glatt, so daß aufsteigende Gasblasen (etwa beim Kippen oder Drehen der Kapsel) möglichst nicht hängen bleiben und später im Betrieb einen burnout verursachen können.

Als wärmeübertragendes Medium wird die eutektische NaK-Legierung (22 % Na, 78 % K) mit einem Schmelzpunkt bei -11°C eingesetzt. Lunkerprobleme treten also nicht mehr auf. Dadurch ist auch burnout des Prüflings weitgehend ausgeschlossen.

Das Einfüllen des Flüssigmetalls und das darauffolgende Verschließen der Kapsel geschieht nach dem gleichen Schema wie bei der Na-Kapsel (Typ 4) und der NaK-Kapsel (Typ 4a und 5). Über dem Flüssigmetallspiegel steht eine He-Atmosphäre.

Die Kapsel wird wie bisher mit einer Dichtheit entsprechend einer Leckrate von  $< 10^{-6}$  Torr·l/s ausgeführt.

Bei der Montage und bei den Prüfungen dieser neuen Kapsel können weitgehend die Erfahrungen von bisherigen Kapseltypen nutzbar gemacht werden. Die zusätzlich erforderlichen Löt- und Schweißversuche sind weitgehend abgeschlossen.

### 3.3 Die Brennstäbe (Abb. 3)

Die in dem vorliegenden Kapseltyp zunächst zum Einsatz kommenden 25 Brennstäbe der Vg. 6 sind bereits spezifiziert [6]. Für Vg. 7 liegt noch keine Spezifikation vor. Wie bereits eingangs erwähnt, handelt es sich bei Vg. 6 um Stäbe mit 475 mm Gesamtlänge bei 300 mm Brennstofflänge. Die Stäbe haben also ein Spaltgasplenum. Der Hüllrohräußerdurchmesser beträgt 10 mm, die Hüllrohrdicke 0,55; Hüllrohrmaterial ist der Werkstoff Nr. 4988 bzw. AISI 316. Der karbidische Brennstoff wird in Tablettenform eingefüllt und hat

15 % PuC-Anteil. Die max. Tablettendichte beträgt 93 % th.D., die max. Schmierdichte ca. 85 % th.D.

Von den 25 Stäben haben 10 ein He-Bonding (Typ A u. B), 5 ein Ar-Bonding (Typ C) und 10 ein Na-Bonding (Typ D u. E). Die 5 Stäbe mit Ar-Bonding und 5 Stäbe mit He-Bonding werden mit einem Hochtemperatur-Thermoelement von 1,6 mm Durchmesser zur Messung der Brennstoffzentraltemperatur ausgestattet. Aus diesem Grund erhalten die Tabletten in der oberen Hälfte dieser Stäbe eine zentrale Bohrung von ca. 2,2 mm Durchmesser. Die max. Brennstoffzentraltemperatur wird bei He-Bonding zu ca. 1500°C und bei Ar-Bonding zu ca. 2000°C erwartet.

Der Festigkeitsnachweis für die Brennstabhüllen wird in Abschnitt 4.3 erbracht.

#### 4. Betriebsverhalten der Kapsel

##### 4.1 Kühlung der Kapsel im Normalbetrieb

Die Kühlmitteldurchflussmengen auf BE- und Isotopenkanalpositionen des FR2 werden vom Reaktorbetrieb bei einem Druckverlust des Einsatzes von  $\Delta p = 15 \text{ m Fl.S. mit } 12 \text{ m}^3/\text{h}$  angegeben. Da die Kapselversuchseinsätze - bezogen auf diesen Durchfluß - einen höheren Druckverlust aufweisen, ist die Durchflußmenge geringer. Sie betrug bei den bisherigen KVE vom Typ 4 ca.  $7 \text{ m}^3/\text{h}$ . Durch den Wegfall des PbBi-Auffangkegels und der Wärmedämmungen erhöht sich bei der gewählten Ausführung des Kühlkanals (siehe Abb. 2) der Durchfluß auf ca.  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Bei einem hydraulischen Durchmesser des eigentlichen Kühlkanals von  $d_h = 9 \text{ mm}$  (Kühlkanaldurchmesser  $D_i/D_a = 27/36 \text{ mm}$ ) ergibt sich die Kühlmittelgeschwindigkeit entlang der Kapsel zu  $w \approx 5,7 \text{ m/s}$ .

Für den Wärmeübergang zwischen Kapselwand und  $D_2O$  gilt der Ausdruck

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{\gamma_{fl}}{\gamma_w} \right)^{0,14} \cdot \left( \frac{D_a}{D_i} \right)^{0,45}$$

Daraus erhält man

$$\alpha = 0,024 \cdot \frac{\lambda}{d_h^{0,2}} \cdot \left( \frac{w \cdot \rho}{\eta g} \right)^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

Die max. Eintrittstemperatur des Kühlmittels bei 44 MW wird zu  $t_{ke} = 50^\circ\text{C}$  eingesetzt.

Für die entsprechende mittlere Kühlmitteltemperatur sind die folgenden Stoffwerte einzusetzen:

Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,536 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$
Prandtl-Zahl	$Pr = 4,15; Pr^{1/3} = 1,60$
Dyn. Zähigkeit	$\eta = 61,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kps}}{\text{m}^2}$
Dichte	$\rho = 1097 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Nach Einsetzen dieser Werte erhält man eine Wärmeübergangszahl von

$$\alpha \approx 22\,000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \approx 2,5 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bei der gegebenen max. Stabileistung  $X = 1150 \text{ Watt/cm}$  und Geometrie ( $q = 135 \text{ W/cm}^2$ ) ergibt sich ein Temperatursprung zwischen Kapselwand und Kühlmittel von

$$\Delta t_{w-k} = \frac{q}{\alpha} = 54^\circ\text{C}.$$

Bei einer gesamten Wärmeentwicklung der Kapsel von ca. 30 000 kcal/h ergibt sich eine Kühlmittelaufheizung von  $\Delta t_k \approx 3,5^\circ\text{C}$ .

Unter Berücksichtigung der max. Eintrittstemperatur ergibt sich eine max. Oberflächentemperatur von

$$t_{w,max} = t_{ke} + \frac{1}{2} \Delta t_k + \Delta t_{w-k} \approx 105^\circ\text{C}.$$

Die Siedetemperatur wird also im normalen Betrieb nicht erreicht.

#### 4.2 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel

Der Temperaturabfall in einer zylindrischen Schicht um einen von innen beheizten zylindrischen Stab berechnet sich nach der Formel

$$\Delta t = \frac{X}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i}$$

Darin ist

$X$  = Stabileistung in W/cm

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Schicht in W/cm °C für eine mittlere Temperatur  $t_m$

$d_a$  = Außendurchmesser der Zylinderschale

$d_i$  = Innendurchmesser der Zylinderschale

Im folgenden wird der Temperaturabfall in den einzelnen Kapselschichten (von außen nach innen) für eine Stabileistung von 1150 W/cm berechnet. Die Temperaturdifferenzen für 1000 W/cm Stabileistung stehen in Klammern dabei.

Die Wärmeleitfähigkeiten sind aus [3 u. 4] entnommen.

Äußere Kapselwand (1,5 mm dick):

Nb - 1 % Zr

$t_m \approx 125^\circ\text{C}$  (Kapseloberflächentemp.  $t_{w,\max} = 105^\circ\text{C}$  bei 1150 W/cm bzw.  $99^\circ\text{C}$  bei 1000 W/cm)

$\lambda = 0,54 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = \frac{1150}{2\pi \cdot 0,54} \ln \frac{27}{24} = 40^\circ\text{C} \quad (35^\circ\text{C})$$

Äußere NaK-Schicht (1,5 mm dick):

$t_m \approx 200^\circ\text{C}$

$\lambda = 0,25 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_2 = \frac{1150}{2\pi \cdot 0,25} \ln \frac{24}{21} = 98^\circ\text{C} \quad (87^\circ\text{C}). \quad \text{Keine Konvektion!}$$

Zwischenrohr (3,0 mm dick):

Nb - 1 % Zr

$$t_m \approx 300^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,57 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_3 = \frac{1150}{2\pi \cdot 0,57} \ln \frac{21}{15} = 108^\circ\text{C} \quad (96^\circ\text{C})$$

Innere NaK-Schicht (2,5 mm dick):

$$t_m \approx 500^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,265 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_4 = \frac{1150}{2\pi \cdot 0,265} \ln \frac{15}{10} = 280^\circ\text{C} \quad (244^\circ\text{C}). \quad \text{Keine Konvektion!}$$

Die Cantemperatur ergibt sich also für 1150 W/cm Stabileistung zu

$$t_{\text{Can}} = t_{w,\text{max}} + \sum_{i=1}^{i=4} \Delta t_i = 105 + (40 + 98 + 108 + 280) = 631^\circ\text{C}$$

und für eine Stabileistung von 1000 W/cm zu  $t_{\text{Can}} = 99 + (35 + 87 + 96 + 244) = 561^\circ\text{C}$ .

Der Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel ist für 1150 W/cm Stabileistung auf Abb. 4 ersichtlich.

Da das Thermoelement von 0,5 mm Durchmesser im steilen Temperaturgradienten liegt, ergibt sich eine gewisse Abweichung der gemessenen bzw. angezeigten Temperatur von der tatsächlichen Hüllrohroberflächentemperatur. In Abb. 5 ist die tatsächliche Hüllrohroberflächentemperatur über der gemessenen Temperatur und für verschiedene Stabileistungen aufgetragen.

Die Benetzung der Wände durch NaK ist bei  $300^\circ\text{C}$  schon nach kurzer Zeit so gut, daß mit keinem Temperatursprung in den Grenzschichten zu rechnen ist. Da die Grenzschichttemperaturen im vorliegenden Fall im Außenspalt unter  $300^\circ\text{C}$  liegen, ist zu Beginn der Bestrahlung u.U. mit einer geringfügig höheren Cantemperatur zu rechnen. Das ist ungefährlich, weil alle KVE im ersten Zyklus auf einer Außenposition mit mäßiger Leistung "eingefahren" werden.

### 4.3 Festigkeitsnachweis der Brennstabhüllen

In Versuchsgruppe 6 sollen - wie schon in Abschnitt 3.3 kurz erwähnt - 5 Brennstabtypen bestrahlt werden. Dabei wird der max. Abbrand auf 4,5 %, entsprechend ca. 45 000 MWd/t begrenzt. Die entsprechende Standzeit beträgt 10 FR2-Zyklen, entsprechend 7200 h Betriebszeit + 1200 h Abschaltzeit. Die wichtigsten Betriebsdaten sind in nachfolgender Tabelle aufgenommen.

Tabelle 1: Betriebsdaten der Brennstabprüflinge

Typ		A	B	C	D	E
Bonding		He	He	Ar	Na	Na
Hüllmaterial		4988	4988	4988	4988	AISI 316
Nominelle Stableistung <sup>1)</sup>	W/cm	1000	1000	1000	1000	1000
Maximale Stableistung <sup>2)</sup>	W/cm	1150	1150	1150	1150	1150
Max.Hüllrohrtemp. innen	°C	725	725	725	725	725
Max. Brennstoffzentraltemp.	°C	1450	1450	2100	1100	1100
Spaltgasfreisetzung	%	20	20	80	0,5	0,5
Gasdruck am Ende der Standzeit atif		15	15	55	7	7

1) örtliches Maximum der über den Zyklus gemittelten Stableistung

2) maximal zulässige Stableistung zu Beginn eines Zyklus

Die Hüllrohre werden durch Innendruck und durch thermische Spannungen zyklisch beansprucht. Die thermischen Spannungen sind für alle fünf Brennstabtypen gleich groß; entsprechend einem Temperaturabfall in der Hülle von  $\Delta t_{Can} = 94^{\circ}C$  bei 1150 W/cm Stableistung.

Die Innendruckbelastung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

Gasdruckaufbau (Spaltgas + Füllgas)  
 Festkörperdruck (Brennstoffschwellen)

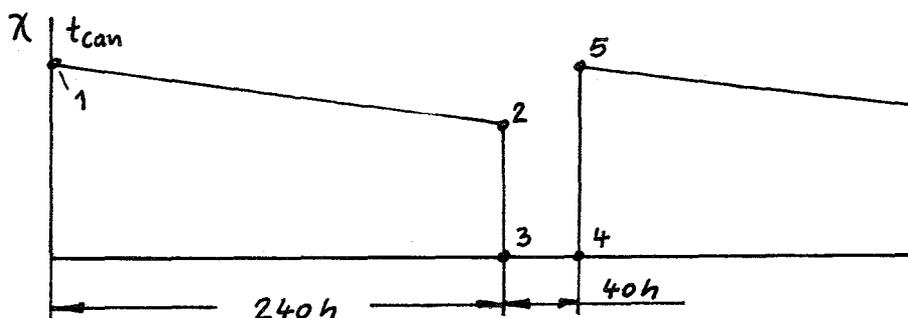
Beim Na-Bonding (Typ D, E) ist der Brennstoffschwelldruck gleich Null; das Schwellen erfolgt in einen großen Na-Spalt (250  $\mu$  rad.) hinein. Der Gasdruck bleibt mit 7 atü sehr klein.

Die Brennstäbe mit He- bzw. Ar-Bonding unterscheiden sich im Gasdruck (15 bzw. 55 atü) sowie auch im Brennstoffschwelldruck. Über den Brennstoffschwelldruck läßt sich z.Z. nur die rein qualitative Aussage machen, daß er mit steigender Zentraltemperatur abnimmt. Deshalb ist beim He-Bonding mit einem größeren Schwelldruck als beim Ar-Bonding zu rechnen. Ob jedoch die Summe aus Gasdruck + Schwelldruck beim He- oder Ar-Bonding größer ist, das kann nicht vorausgesagt werden.

Die Hüllrohrverformungen werden mit CRASH [7] gerechnet, wobei die Vergleichsspannung nach von Mises und das Kriechen nach Norton ermittelt werden. Die Materialdaten sind aus [8] entnommen.

Die Belastungsart ist zyklisch. Die Dauer eines Zyklus soll 240 h Bestrahlung + 40 h Abschaltzeit betragen. Das entspricht 1/3 der FR2-Zykluslänge (35 Tage), wobei die Abschaltzeit von ca. 5 Tagen gleichmäßig auf die 3 Zyklen verteilt wird. Es werden also 3 Abschaltungen je FR2-Zyklus angenommen. Für die maximale Betriebszeit von 10 FR2-Zyklen ergeben sich damit 30 Rechenzyklen. Jeder dieser Zyklen besteht aus den folgenden Betriebspunkten:

Punkt	1	2	3	4	5
$\chi$ [W/cm]	1150	1050	0	0	1150
$t_{Can,i}$ [°C]	725	673	100	100	725



Der Innendruckaufbau wird linear gerechnet. Diese Annahme trifft für den Spaltgasdruckaufbau recht gut zu. Der Brennstoffschwelldruck kann jedoch auch exponentiell oder parabolisch zunehmen. Im Vergleich zum linearen Anstieg - bei gleichem Enddruck - bedeutet ein exponentieller Anstieg eine Reduzierung der Kriechrate, ein parabolischer Anstieg führt zu einer Zunahme der Kriechrate.

Die Beurteilung des Hüllrohrstandzeitverhaltens erfolgt nach drei Kriterien:

1. max. Hüllrohraufweitung durch Kriechen
2. max. plast. Verformung einer Randfaser (tritt im ersten Zyklus auf)
3. max. Wechseldehnung einer Randfaser je Zyklus (gegen Ermüdungsbruch) [9].

Durch die max. Hüllrohraufweitung wird im wesentlichen der zulässige Innendruck bestimmt. Die Kriterien 2 und 3 erlauben eine Beurteilung der therm. Spannungen.

Tabelle 2: Ergebnisse der CRASH-Rechnung für eine Standzeit von 8400 h  
(4,5 % Abbrand)

Innendruck (Gas + Schwellen) am Ende der Standzeit $\sigma_{ii}$		40	80	120	160
Hüllrohraufweitung durch Kriechen	tats. %	0,027	0,044	0,070	0,15
	zul. %	0,15	0,15	0,15	0,15
plast. Verformung im ersten Zyklus	tats. %	0,054	0,054	0,054	0,054
	zul. %	0,2	0,2	0,2	0,2
Wechseldehnung je Zyklus	tats. %	0,1	0,1	0,1	0,1
	zul. %	1	1	1	1

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der CRASH-Rechnung zusammengestellt. Dabei zeigt sich, daß die thermischen Spannungen allein noch keine Gefahr für die Hülle darstellen. Bei 160 atü Innendruck wird die zulässige Kriechaufweitung der Hülle erreicht. Es darf sich also bis zum Standzeitende hin ein max. Schwelldruck von  $160 - 15 = 145$  atü beim He-Bonding und von  $160 - 55 = 105$  atü beim Ar-Bonding aufbauen.

Aufgrund der vorliegenden Bestrahlungsergebnisse ist vorläufig noch nicht genau abzuschätzen, ob in Vg. 6 evtl. größere Schwellraten auftreten werden. Diese Frage kann jedoch an Hand der ersten Bestrahlungen von Stäben bis zu geringeren Abbränden geklärt werden.

#### 4.4 Beanspruchung der Kapselwand

Wärmespannungen: Die Wärmespannungen in einer Rohrwand errechnen sich zu

$$\sigma_{th} = \frac{E \alpha}{2(1-\nu_p)} \cdot \Delta t \cdot f.$$

Nach Abschnitt 4.2 beträgt der Temperaturabfall  $\Delta t$  in der Außenwand (1,5 mm Nb-1 % Zr)  $40^\circ\text{C}$ .

Für eine mittlere Wandtemperatur von  $125^\circ\text{C}$  gelten folgende Werte [4]:

E-Modul	$E = 7500 \text{ kp/mm}^2$
Querdehnzahl (Poisson-Zahl)	$\nu_p = 0,38$
therm. Ausdehnungszahl	$\alpha = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Daraus erhält man (bei einer Stableistung von  $1150 \text{ W/cm}$ ) eine Wärmespannung von

$$\sigma_{th} = 1,75 \text{ kp/mm}^2.$$

Innendruck: Der "Einfülldruck" in der Kapsel beträgt im kalten Zustand ca. 1 ata. Nach Ausdehnung des He und des NaK im Betriebszustand bleibt der Druck im normalen Betrieb immer noch unter 3 ata.

Die Druckbeanspruchung infolge Innendruck ergibt sich daraus zu maximal

$$\sigma_p = p_i \cdot \frac{r_i}{s} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{12}{1,5} = 0,24 \text{ kp/mm}^2.$$

Die Gesamtbeanspruchung  $\sigma_{ges}$  ist also mit

$$\sigma_{th} + \sigma_p = 2,0 \text{ kp/mm}^2$$

äußerst gering.

Aus [4] sind Festigkeitswerte für die als Kapselmaterial eingesetzte Niob-Legierung zu entnehmen. Die niedrigsten dort eingetragenen Werte für  $\sigma_{0,2}$  liegen bei der Betriebstemperatur für vollrekristallisiertes Material bei  $15 \text{ kp/mm}^2$ , also um den Faktor 7,5 über der errechneten Belastung. Gegen  $\sigma_B$  ist eine 12,5fache Sicherheit vorhanden.

Zeitstandfestigkeiten wurden für diese Legierung, die ja vor allem für den Hochtemperatureinsatz entwickelt wurde, nur für hohe Temperaturen gemessen. Für  $980^{\circ}\text{C}$  wird die 1000 h-Zeitstandfestigkeit von Oak-Ridge noch zu  $14 \text{ kp/mm}^2$  angegeben. Über die mechanischen Eigenschaften von bestrahltem Material sind nur qualitative Angaben zu finden. Wegen der relativ hohen Grundverformbarkeit von Niob gegenüber z.B. Molybdän ist keine bedeutende Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften zu befürchten, was von verschiedenen Stellen bestätigt wird [4]. In Oak-Ridge wurde z.B. in Flüssen von  $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  thermischer und 5 bis  $10 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  schneller Neutronen ( $> 1 \text{ MeV}$ ) nach 1000 h bei  $980^{\circ}\text{C}$  bzw.  $1100^{\circ}\text{C}$  noch keine nennenswerte Veränderung der Zeitstandfestigkeit festgestellt.

An anderer Stelle wurde ebenfalls von Oak-Ridge gesagt, daß bei Temperaturen von  $40^{\circ}\text{C}$  nach Neutronendosen von ca.  $10^{20}$  thermische nvt und ca.  $3 \cdot 10^{18}$  schnelle nvt eine leichte Erhöhung der Festigkeit, aber eine gleichbleibende Duktilität festgestellt wurde. Hier wurde auch angegeben, daß rekristallisiertes Material einen geringfügig größeren Einfluß der Bestrahlung erkennen läßt als nur kaltverformtes. Es wurde auch beobachtet, daß ein Ausheilen der Strahlenschäden ab  $350^{\circ}\text{C}$  eintritt und durch ein einstündiges Glühen bei  $1000^{\circ}\text{C}$  eine völlige Reduktion der Festigkeit auf die alten Werte und eine Wiederherstellung der Ausgangsduktilität eintritt. Ein weiteres Ergebnis liegt aus Argonne vor. Hier war an Vanadinproben nach Dosen bis  $2 \cdot 10^{20}$  nvt ( $> 1 \text{ MeV}$ ) keine nennenswerte Veränderung zu erkennen. Wegen der ähnlich guten Grundverformbarkeit können Parallelen zu Niob gezogen werden.

Ein wesentlicher positiver Hinweis kann auch auf Grund folgender Tatsache gemacht werden: "United Nuclear" hat Karbid-Brennstäbe mit Niob-Hüllen im thermischen Fluß bei Stableistungen von 500 - 560 W/cm und Cantemperaturen von  $500^{\circ}\text{C}$  bis zu einem Abbrand von 110 000 MWd/t bestrahlt.

Dabei sind Aufweitungen der Hülle infolge Brennstoffschwellen von 2,3 bis 3 % aufgetreten. Ein Zeichen dafür, daß die Bruchdehnung selbst nach hohen thermischen Neutronendosen noch relativ hohe Werte annimmt [23].

#### 4.5 Beanspruchung des Zwischenrohres

Die Beanspruchung des Zwischenrohres ist rein thermischer Art. Der Temperaturabfall im Zwischenrohr beträgt wegen der guten Wärmeleitfähigkeit trotz der hohen Stableistung von 1150 W/cm und der großen Wanddicke von 3,0 mm nur 40°C.

Mit den Werten

$$\begin{array}{ll} r_i = 7,5 \text{ mm} & \Delta t = 40^\circ\text{C} \quad (t_m \approx 300^\circ\text{C}) \\ r_a = 10,5 \text{ mm} & E = 6700 \text{ kp/mm}^2 \\ f_i = 1,10 & \alpha = 7,35 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ f_a = -0,90 & \nu_p = 0,38 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} r_i \\ r_a \\ f_i \\ f_a \end{array}} \right\} \quad [4.7]$$

errechnet sich die tangentielle Wärmespannung an der Innen- bzw. an der Außenfaser zu

$$\sigma_{th,i} = \frac{6700 \cdot 7,35 \cdot 10^{-6}}{2(1-0,38)} \cdot 40 \cdot 1,10 = 1,75 \text{ kp/mm}^2 \text{ (Druckbeanspruchung)}$$

$$\sigma_{th,a} = \frac{6700 \cdot 7,35 \cdot 10^{-6}}{2(1-0,38)} \cdot 40 \cdot (-0,9) = -1,43 \text{ kp/mm}^2 \text{ (Zugbeanspruchung)}$$

Bei diesen relativ geringen Beanspruchungen kommt es wie auch beim Kapselrohr während des Betriebes zu keinerlei Verformungen.

#### 4.6 Beanspruchung des Wasserführungsrohres

Wie schon erwähnt, wird aus Gründen, die unter dem Abschnitt "Sicherheitsbetrachtungen" genauer erläutert sind, ein doppelwandiges Wasserführungsrohr eingesetzt. Dieses Wasserführungsrohr besteht also im Corebereich aus zwei konzentrischen Rohren aus Zircaloy 2, die einen Gasspalt (Ar/He-Gemisch) einschließen. An der Innenseite des inneren Rohres (Kühlrohr) strömt das eigentliche Kühlwasser entlang, während das äußere Mantelrohr

vom Moderatorwasser umgeben ist. Zwischen dem Kühlwasser (Coreeintritt) und dem Moderatorwasser (Coreaustritt) besteht im Betrieb eine Temperaturdifferenz von 16 bis 17°C; unabhängig von der Jahreszeit. Demzufolge werden sich die beiden Wände des Wasserführungsrohres, die an den Enden fest miteinander verschweißt sind, verschieden thermisch ausdehnen. Dadurch kommt es zu Wärmespannungen in den Schweißnähten und das äußere Mantelrohr wird auf Beulen beansprucht. Im folgenden sollen diese Probleme abgeschätzt werden.

Im vorliegenden Fall, wo das innere Kühlrohr wesentlich starrer ist als das äußere Mantelrohr, kann man dieses als an den Enden fest eingespannt betrachten. Unter dieser Voraussetzung errechnet sich das Biegemoment  $M_0$  und die Querkraft  $Q_0$  nach [10] zu

$$M_0 = 2 \beta^2 D \Delta r = 0,325 \text{ kp mm/mm}$$

und

$$Q_0 = 2 \beta M_0 = 0,175 \text{ kp/mm,}$$

wobei

$$\beta^2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r_m^2 \cdot s^2}} = 7,25 \cdot 10^{-2} \text{ 1/mm}^2$$

und

$$D = \frac{E \cdot s^3}{12(1-\nu^2)} = 870 \text{ kp mm.}$$

Folgende Werte sind einzusetzen:

Mittlerer Radius des Rohres	$r_m = 22,5 \text{ mm}$
Wandstärke	$s = 1,0 \text{ mm}$
Aufweitung des Rohres	$\Delta r \approx r_m \cdot \alpha \cdot \Delta t = 2,57 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$
thermische Ausdehnungszahl	$\alpha = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Elastizitätsmodul	$E = 9300 \text{ kp/mm}^2$
Querdehnzahl	$\nu = 0,33$
Temperaturunterschied	$\Delta t = 20^\circ\text{C}$ (sicherheitshalber angenommen)

Der Temperaturabfall in der Wand des Mantelrohres ist vernachlässigbar klein und deshalb hierbei nicht berücksichtigt.

Die Biegespannung in der Kehlnaht der Nahthöhe  $h = \sqrt{s^2/2} = \sin 45^\circ \cdot s \approx 0,7 \text{ mm}$  ist

$$\sigma_b = \frac{6 M_o}{h^2} = 3,9 \text{ kp/mm}^2.$$

Die mittlere Scherspannung infolge Querkraft ist

$$\tau \approx \frac{Q_o}{h} = 0,25 \text{ kp/mm}^2.$$

Die axiale Kraft infolge unterschiedlicher Wärmedehnungen ist

$$N = E \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot s = 1,06 \text{ kp/mm},$$

so daß man als Druckspannung, bezogen auf die Höhe der Kehlnaht,

$$\sigma_d = \frac{\sin 45^\circ N}{h} = 1,06 \text{ kp/mm}^2$$

erhält.

Die resultierende Druckspannung errechnet sich, unter Vernachlässigung des Einflusses der Querkraft, zu

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_d = 3,9 + 1,06 \approx 5 \text{ kp/mm}^2.$$

Die zulässige Schweißnahtspannung bei Betriebstemperatur ist

$$\sigma_{zul} \approx 0,65 \cdot \sigma_{o,2} = 16 \text{ kp/mm}^2.$$

Es ist noch zu bemerken, daß die resultierende Spannung konservativ gerechnet ist, da infolge Wärmeleitung ein Temperatenausgleich zwischen Kühlrohr und Mantelrohr im Schweißnahtbereich eintritt und somit das maximale Biegemoment sicher nicht an dieser Stelle liegt.

Mit dem Geometrieparameter

$$K = \frac{s^2}{12 \cdot r_m^2} \approx 1,65 \cdot 10^{-4}$$

und  $l/r_m > 100$ ,

wobei  $l = 2380$  mm die Einspannlänge des Mantelrohres ist, ergibt sich nach [11], daß Schalenbeulen nicht zu erwarten ist.

Auch eine Instabilität durch Knicken ist nicht zu befürchten, da die kritische Knickspannung

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \approx 4 \text{ kp/mm}^2$$

wesentlich größer ist als die axiale Kraft  $N/s = 1,06 \text{ kp/mm}^2$ , wobei der Schlankheitsgrad  $\lambda = l/i = \frac{2380}{15,9} \approx 150$  beträgt.

Der Trägheitsradius ist bekanntlich

$$i = \frac{1}{2} \sqrt{r_a^2 + r_i^2}$$

## 5. Aktivitäten in der Kapsel

In [2] und [3] sind Angaben über die Aktivität von bestrahlten Brennstäben gemacht worden. Diese Angaben bezogen sich auf U 235. Eine Abschätzung in [12] zeigt, daß in erster Näherung auch bei Plutonium mit den Werten für U 235 gerechnet werden kann, da die Spaltungsausbeute der einzelnen Isotope bei der Spaltung von U 235 und Pu 239 nur wenig verschieden sind. Es werden also auch hier wieder die für U 235 ermittelten Werte übernommen. Dabei werden zunächst die Aktivitäten in den Kapseln der Vg. 6 betrachtet. In Vg. 7 sind dann alle Werte einfach mit dem Verhältnisfaktor der Stablänge von Vg. 7 zu der von Vg. 6 zu multiplizieren.

Bei den Brennstoffabmessungen des Karbidbrennstabes von 8,4 - 8,8 mm Durchmesser und 300 mm Länge, einer Schmierdichte von max. 85 % und einem Pu-Anteil von 15 % ergibt sich ein Spaltstoffgewicht (U 235 + Pu 239)

von ca. 24 g je Brennstab. Das gesamte Brennstoffgewicht UC + PuC beträgt ca. 210 g je Stab. Die Gesamt- $\gamma$ -Aktivität des Brennstabes errechnet sich für eine mittlere Stableistung von 1000 W/cm nach einem Jahr Bestrahlungszeit und 2,4 h nach Abschalten des Reaktors zu ca. 13 000 Ci. Das entspricht einer Linienquellstärke von 450 Ci je cm Stablänge. Die Sättigungsaktivität der flüchtigen Spaltprodukte (Edelgase u. Halogene) beträgt ca. 340 Ci/g spaltbares Material und ist nach 30 Tagen erreicht. Der Brennstab enthält also ca. 8000 Ci an flüchtigen Spaltprodukten. Davon sind 55 % Edelgase und Folgeprodukte und 45 % Halogene und Folgeprodukte, 2,4 Stunden nach Abschalten des Reaktors sind noch 3300 Ci pro Brennstab enthalten und nach 10 Tagen Abklingzeit ca. 300 Ci an flüchtigen Spaltprodukten. Der Anteil an Jod 131 beträgt zum Zeitpunkt des Reaktorabschaltens ca. 300 Ci pro Brennstab und nach 8 Tagen verbleiben noch 150 Ci an Jod 131. Die bei einem eventuellen Leck der Brennstabhülle austretenden Halogene werden im NaK zu 99,9 % gebunden [13, 14].

NaK-Aktivität. Die bei der Aktivierung von NaK interessierenden Isotope sind vor allem Na 24 und K 42 mit einer Halbwertszeit von 15 bzw. 12,5 h und  $\gamma$ -Energien von 2,75 und 1,37 MeV bzw. 1,5 und 0,32 MeV. Die Sättigungsaktivität von Na 24 beträgt für einen Neutronenfluß von  $\Phi = 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ca. 4 Ci/g Na bzw. die von K 42 0,28 Ci/g K [15]. In einer Kapsel sind also zum Zeitpunkt des Reaktorabschaltens ca. 400 Ci Na 24-Aktivitäten und ca. 104 Ci an K 42-Aktivitäten vorhanden, wenn man einen Fluß von  $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  zugrunde legt. Nach 3 Tagen sind diese Aktivitäten auf insgesamt 16 Ci je Kapsel abgeklungen.

## 6. Sicherheitsbetrachtungen

Bei einer einwandigen NaK-Kapsel, also einer Kapsel, bei der Brennstab und NaK nur durch eine Wand vom Reaktorkühlwasser getrennt sind, haben sicherheitstechnische Überlegungen ein besonderes Gewicht. Deshalb nehmen die Sicherheitsbetrachtungen einen besonders breiten Raum innerhalb dieses Berichtes ein.

### 6.1 Allgemeines zur Sicherheit

Die Kapselversuchseinsätze sitzen auf Isotopenkanalpositionen bzw. BE-Positionen und werden durch das normale FR2-Kühlsystem gekühlt; es ergaben sich also keine Sonderprobleme bezüglich eigener Kreisläufe. Die normale BE-Instrumentierung, D<sub>2</sub>O-Austrittstemperaturüberwachung und Canschädenüberwachung sind auch bei den KVE gegeben. Das Auswechseln der KVE erfolgt auf die gleiche Weise wie das der BE mit der Auswechselflasche.

Die Demontage des bestrahlten Einsatzes bzw. das Lösen der Kapsel und der Wasserführung vom Oberteil erfolgt mittels Manipulatoren in der Heißen Zelle des FR2. Die entsprechenden Manipulationen sind seit Jahren erprobt und zur Routine-Arbeit geworden.

Zur Messung der Cantemperaturen können jeweils zwei KVE auf einen vom Projekt 36 her vorhandenen 12-Farben-Punkt drucker bzw. 4 KVE auf einen 24-Punkt drucker aufgeschaltet werden. Innerhalb jeder Kapsel kann an 6 Stellen mittels Miniatur-Mantelthermoelementen die Cantemperatur gemessen werden. In den Fällen, wo eine Messung der Brennstoff-Zentraltemperatur vorgesehen ist, wird diese durch Linienschreiber kontinuierlich geschrieben.

Jeweils drei Thermoelemente innerhalb einer Kapsel können auf die ebenfalls vorhandene 2 v. 3-Sicherheitsschaltung vom Projekt 36 gelegt werden und bilden bei Platzierung an geeigneter Stelle eine echte NaK-Füllstandsdetektion, zumal die Thermoelemente direkt auf der Brennelementhülle befestigt werden. Bei Überschreitung eines bestimmten, von Fall zu Fall einstellbaren Grenzwertes (z.B. 670°C am Can) an zwei der drei Meßstellen wird dann Reaktorschnellschluß ausgelöst.

Diese bewährte Sicherheitsschaltung bietet eine gute Gewähr dafür, daß gefährliche Überhitzungen an den Brennstabhüllen durch Absinken des NaK-Füllstandes beim - allerdings äußerst unwahrscheinlichen - Auftreten eines Kapsellecks erkannt werden. Zumindest bei kleinen Kapsellecks kann dadurch ein burnout der Brennstabhüllen vermieden werden. Die Auswirkungen kleiner bzw. großer Kapsellecks werden weiter hinten beschrieben.

Ein Defekt an einer Brennstabhülle bedeutet, solange die Kapsel unbeschädigt ist, keine Gefahr für den Reaktor und die Umgebung.

Fragen der Notkühlung der Kapseln, der Auswechslung und des Transportes von unbeschädigten Kapseln sind bei allen bisherigen Kapseltypen (1 bis 6) besprochen worden. Da diese Punkte problemlos sind, kann auf ihre erneute Darlegung verzichtet werden. Die Probleme, die mit beschädigten Kapseln auftreten können, werden noch behandelt.

Es darf hier betont werden, daß inzwischen eine große Erfahrung mit der Auslegung und Fertigung sowie mit der Montage und dem Betrieb von Bestrahlungseinsätzen vorliegt. Bei der Bestrahlung von über 60 KVE bis zu 2 1/2 Jahren Einsatzdauer und maximalen Abbränden von 85 000 MWd/t Brennstoff sind bisher keinerlei Beeinträchtigungen der Reaktorsicherheit aufgetreten.

Im übrigen werden im französischen Forschungsreaktor El 3 bereits seit 1962 NaK-Kapseln auf Brennelementpositionen, also ebenfalls direkt im Primärkreislauf bestrahlt. Auch im BR2, JRR 2 [17] und GETR [18] werden einwandige NaK-Kapseln seit langem bestrahlt. Über die Gefahren von Na- bzw. NaK-Wasserreaktionen im El 3-Core wurden Untersuchungen durchgeführt, über deren Ergebnisse in [16] berichtet wird. Die dabei im Hinblick auf die Gefahren durch Druckwellenausbreitung gewonnenen Ergebnisse sind für uns nicht direkt übertragbar. Das Risiko wird dort als "nicht allzu hoch und nicht so akut wie zuvor befürchtet" bezeichnet. Umso mehr aber sind die Ergebnisse im Hinblick auf die pH-Wert-Erhöhung und auf die Gefahren einer Al-Korrosion für uns interessant, zumal der FR2 in dieser Hinsicht mit dem El 3 direkt vergleichbar ist:

	FR2	E1 3
D <sub>2</sub> O-Menge im Tank und im Hauptkreislauf	≈ 30 m <sup>3</sup>	≈ 22 m <sup>3</sup>
Durchsatz	≈ 2000 m <sup>3</sup> /h	≈ 1100 m <sup>3</sup> h
Gesamte Durchlaufzeit	≈ 50 s	≈ 70 s
pH-Wert im Normalbetrieb	≈ 6,5 - 7	≈ 6,0

Auch die Kühlwasserführung ist die gleiche wie beim FR2.

## 6.2 Festigkeit der Kapselwand

Wie aus Abschnitt 4.4 zu ersehen ist, unterliegt die Kapselwand im normalen Betrieb nur sehr geringen mechanischen Beanspruchungen von 2 kp/mm<sup>2</sup>. Für den ungünstigsten Fall, daß die Brennstabhülle bei einem Stab des Typs C innerhalb einer Kapsel defekt ist und die Spaltgase zu 80 % aus dem Brennstoff ins Puffervolumen freigesetzt werden, ist mit einem Kapselinnendruck von max. 50 ata zu rechnen. Damit würde sich die Spannung durch Innendruck in der Kapselwand zwar um den Faktor 16 erhöhen, die Gesamtspannung läge aber mit ca. 5,5 kp/mm<sup>2</sup> trotzdem noch um fast den Faktor 3 unterhalb der  $\sigma_{0,2}$ -Grenze. Infolgedessen sind tiefergehende Studien hinsichtlich thermal ratcheting überflüssig. Ermüdungserscheinungen am Werkstoff treten bekanntlich erst dann auf, wenn die Wärmespannungen mindestens den doppelten Wert von  $\sigma_{0,2}$  erreichen. Über den Einfluß der Bestrahlung auf den Kapselwerkstoff sind ebenfalls in Abschnitt 4.4 einige Hinweise gegeben worden. Alles in allem scheint dieser Einfluß auf die Werkstoffeigenschaften von Niobbasis-Legierungen (leichte Verfestigung bei guter Duktilität) keine negativen Folgen zu haben.

Auch von der Korrosion ist keine Gefahr für die Kapsel gegeben, weder vom Kühlwasser noch von seiten des NaK. Nach vielen Literaturangaben in [4] ist Niob bzw. Nb-1 % Zr in NaK bzw. Na bis mindestens 800°C gut beständig. Der Einfluß des O<sub>2</sub>-Gehaltes im NaK bzw. Na war bei diesen Untersuchungen gering. Über die Wasserkorrosion werden z.Z. im IMF Versuche bei 120°C durchgeführt; nach 1500 Stunden konnte noch kein bedeutender Abtrag festgestellt werden.

Theoretisch wäre nach einem burnout der Brennstabhille auch ein Zusammenreffen von UC-Partikeln mit dem Kapselmaterial Nb-1 % Zr möglich; eine Reaktion der beiden Komponenten setzt nach [19] jedoch erst oberhalb 1000°C ein.

Durch den Einsatz der Nb-1 % Zr-Legierung ist also ein Höchstmaß an Betriebssicherheit erreicht, wenn die entsprechenden Prüfungen (siehe Abschnitt 3.2) während und nach der Montage durchgeführt werden, zumal das Kapselrohr im scharfen Kühlstrom nur eine mittlere Temperatur von 125°C annimmt. Das Auftreten eines Kapsellecks während des Betriebs ist also in hohem Maße unwahrscheinlich.

Auch bei den bisher bestrahlten über 60 Kapseln ist niemals ein Defekt infolge unzulässiger mechanischer Beanspruchungen an der Kapselwand aufgetreten. Ein Korrosionsangriff an der Kapsel, wie er bisher vom Blei-Wismut her festgestellt wurde, ist hier aber nicht zu erwarten.

### 6.3 Denkbare Störfälle

Als Störfälle können wir zwei Gruppen unterscheiden, solche für die eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, die aber nur den Wert des Experiments und nicht den Reaktorbetrieb beeinträchtigen, nämlich

Defekte der Brennstabhille

und solche, die äußerst unwahrscheinlich sind, aber den Reaktorbetrieb direkt stören würden, nämlich

Defekte der Kapselwand.

Defekte an den Brennstabhüllen können durch unzulässige mechanische Beanspruchungen, z.B. infolge unerwartet hoher Brennstoffschwellraten oder durch örtliche Überhitzungen, z.B. infolge von Gasblasen im NaK-Spalt, auftreten. Letzteres ist - wie sich auch bei allen bisherigen NaK- bzw. Na-Kapseln gezeigt hat - weniger wahrscheinlich.

Hilfsschäden haben in jedem Fall ein Austreten von flüchtigen, evtl. auch geringer Mengen an festen Spaltprodukten aus dem Brennstab in die Kapsel zur Folge. Dabei werden die Halogene zu 99,9 % im NaK gelöst, während sich die Edelgase im Puffervolumen ansammeln und zur Druckerhöhung in der Kapsel beitragen. Eine Detektion für solche Schäden ist nicht vorgesehen; sie sind aber auch völlig unkritisch, solange nicht gleichzeitig ein Kapselleck auftritt.

Wie zuvor ausführlich dargelegt wurde, sind Kapsellecks äußerst unwahrscheinlich. Dennoch sollen die Auswirkungen solcher Schäden auf den Reaktorbetrieb im folgenden ausführlich untersucht werden. Dabei wird zwischen kleinen Lecks, z.B. Rissen in einer Schweißnaht, und größeren Lecks unterschieden. Größere Kapsellecks sind noch weniger vorstellbar als z.B. feine Schweißnahttrisse.

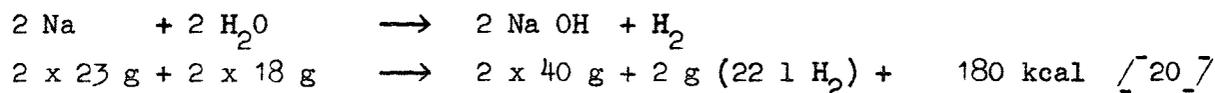
In jedem Fall ist ein Kapselleck mit gleichzeitigem Auslaufen von NaK über die Erhöhung des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit im Kühlwasser an den entsprechenden Meßstellen im Hauptkreislauf zu detektieren. Solche Meßstellen befinden sich im  $D_2O$ -Hauptkreislauf unmittelbar am Coreaustritt und vor und hinter den Ionenaustauschern.

Um weitere Aussagen über Detektionsmöglichkeiten machen zu können, wird zunächst die NaK/Wasser-Reaktion betrachtet.

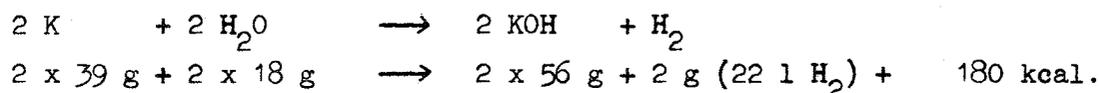
#### 6.4 Gefahren der Reaktion zwischen NaK und $D_2O$ - Versuchsergebnisse

Es ist bekannt, daß Na und NaK mit  $H_2O$  bzw.  $D_2O$  exotherm reagieren, und zwar, wenn die Metalle in flüssiger Form mit Wasser in Berührung kommen um Größenordnungen schneller als in fester Form.

Strömt flüssiges Na bzw. K unter Wasser aus (Wasserüberschuß), wie es bei einem Kapselleck im Reaktor der Fall wäre, so laufen folgende Reaktionen ab:



bzw.



Bei der in Vg. 6 vorgesehenen Brennstablänge von 475 mm sind in der Kapsel max. 60 g NaK enthalten. Bei einem Verhältnis K/Na = 78/22 % sind das max. 47 g K + 13 g Na.

Würde das gesamte NaK bei einem Riß in der Kapselwand aus dem Spalt auslaufen und mit H<sub>2</sub>O bzw. D<sub>2</sub>O reagieren, so würden also ca. 90 g Natron- und Kalilauge entstehen und ca. 20 l schwerer Wasserstoff (D<sub>2</sub>).

Gefahren durch Druckwellen: Der frei werdende Wasserstoff kann zusammen mit demjenigen aus der Hydrolyse über den Rekombinationskreislauf aus der He-Atmosphäre des Reaktors beseitigt werden. Der Wasserstoff entsteht in einem Wasserstrom und findet auf dem Wege vom Entstehungsort zum Schutzgasraum (He-Atmosphäre) keinen freien Sauerstoff. Außerdem sind die Kühlverhältnisse jederzeit so, daß die Reaktionswärme aus der NaK/D<sub>2</sub>O-Reaktion abgeführt werden kann. Die Bedingungen der Wasserstoffexplosion sind in keinem Fall gegeben. Das wurde auch durch die im Hinblick auf dieses Bestrahlungsvorhaben bei Interatom im Auftrag der GfK unter realen FR2-Bedingungen durchgeführten umfangreichen Versuche, deren Ergebnisse auf Tabelle 3 (Seite 31) zusammengefaßt sind, bestätigt [21]. Bei diesen Versuchen wurden NaK-Mengen von 250 bzw. 400 cm<sup>3</sup> zur Reaktion gebracht, also 5 bis 8mal mehr als eine FR2-Kapsel enthält.

Insgesamt wurden 10 Versuche durchgeführt, wobei insbesondere die Leckgröße (2,5 % bis 110 % des Kapselquerschnitts), die Lage des Lecks (Gasraum oder NaK-Raum) sowie das NaK-Volumen (47 % bis ca. 99 % des Kapselvolumens) und damit der Kapselinnendruck als Parameter variiert wurden.

Die verwendete Teststrecke entsprach genau einem KVE; die Kühlwassertemperatur betrug in den meisten Fällen 40 bis 60°C und der Kühlmitteldurchsatz 10 m<sup>3</sup>/h. Mittels eines pneumatischen Kolbens konnten die vorbereiteten Kapsellecks schlagartig geöffnet werden. Entlang des Kühlkanals waren 6 Druckmeßstellen (piezoelektrische Aufnehmer) und 4 Dehnungsmeßstreifen angeordnet. Letztere brachten jedoch keine zuverlässigen Meßwerte; sie sind in einigen Fällen abgerissen, was immerhin bedeutet, daß die kurzen Druckspitzen sich als Materialbeanspruchung auswirken.

Die 6 Druckmeßstellen P1 bis P6 waren wie folgt verteilt:

- P1 ca. 25 cm unterhalb der Kapsel
- P2 am Wasserführungsrohr unmittelbar an der Leckstelle  
(unteres Kapselende)
- P3 am Wasserführungsrohr 100 cm über der Leckstelle
- P4 über der D<sub>2</sub>O-Umlenkung, ca. 15 cm innerhalb der Can-  
schädenleitung
- P5 ca. 10 cm nach der D<sub>2</sub>O-Umlenkung in der Wasserrückführung
- P6 ca. 80 cm nach der D<sub>2</sub>O-Umlenkung in der Wasserrückführung  
(= 50 cm oberhalb Reaktordeckelunterkante).

Wie erwartet, treten gewisse Schwierigkeiten nur dann auf, wenn eine große Menge NaK mit dem Wasser schlagartig reagiert. Die spontan entstehende große Wasserstoffmenge kann dann starke Druckstöße auslösen. Die bei den Versuchen maximal aufgetretenen Reaktionsgeschwindigkeiten von 60 bis 90 cm<sup>3</sup> NaK je sec hatten Druckstöße von 70 bis 100 ata zur Folge. In drei von zehn Versuchen ist zwar die Kapsel während der Reaktion abgerissen bzw. fast abgerissen, doch war dabei nicht die Leckgröße von 110 % des Kapselquerschnitts (7 Bohrungen a 10 Ø) entscheidend, sondern vielmehr die Tatsache, daß zwischen den großen Bohrungen nur noch relativ dünne Stege standen, die der Beanspruchung nicht gewachsen waren. Dabei war es gleichgültig, ob das Leck im NaK-Bereich der Kapsel oder in Höhe des Gasplenums lag. Solch ungünstige Leckstellen sind praktisch jedoch ebenso wenig denkbar, wie das Austreten der gesamten NaK-Menge der Kapsel in

einer Sekunde. Dennoch werden die Auswirkungen solch starker Druckstöße in den folgenden Abschnitten behandelt.

Im einzelnen sind die Versuche wie folgt verlaufen: Bei 8 von 10 Versuchen setzte sofort mit dem Öffnen der Lecks eine schlagartige Reaktion ein, verbunden mit einer ersten Druckspitze. Nach dieser ersten Reaktion folgte ein langsamer gleichmäßiger Druckanstieg im Wasserführungsrohr, unterbrochen durch weitere Druckspitzen in kurzen Abständen. Die Anstiegszeit der Druckimpulse betrug wenige Millisekunden; Impulsdauer 10 bis 20 ms.

Das Maximum der Druckspitzen lag in einem Versuch mit sehr großen Lecks (Versuch 1) bei  $100 \text{ kp/cm}^2$ , sonst im allgemeinen bei  $70 \text{ kp/cm}^2$ . Die gesamte Reaktionsdauer betrug bei den Versuchen mit der Leckstelle am unteren Kapselende je nach Leckgröße und Kapselinnendruck 1,7 bis 6,5 sec; in dem einen Fall eines relativ kleinen Lecks (2,5 % vom Kapselquerschnitt) lief die Reaktion wesentlich langsamer ab. Die Versuche, bei denen die Lecks am oberen Kapselende, also im Gaspuffer lagen, zeigten einen wesentlich langsameren Reaktionsablauf (46 bis 225 s) und die einzelnen Druckspitzen traten in relativ großen Abständen auf. Das ist wohl dadurch zu erklären, daß nur immer eine bestimmte Menge Wasser durch das Leck eintreten und an der Oberfläche des NaK reagieren kann. Die dabei entstehende Gasblase verhindert dann für einige Zeit das weitere Eintreten von Wasser.

In Abb. 6 ist der zeitliche Druckverlauf, wie er für die Versuche mit dem Leck am unteren Kapselende typisch ist, aufgetragen. Dabei ist besonders bemerkenswert, daß der Druck mit zunehmender Entfernung von der Leckstelle abgebaut wird. Hinter der Kühlmittelumlenkung treten praktisch nur noch unbedeutende Druckspitzen auf.

Zum Vergleich ist auf Abb. 7 der Druckverlauf aufgetragen, wie er für ein Leck im Gaspuffer typisch ist. Man beachte den anderen Zeitmaßstab. Hier treten über lange Zeit hinweg z.T. relativ schwache Druckspitzen im Abstand von ca. 1 s auf. Auch hier wird der Abbau des Druckes besonders hinter der Kühlmittelumlenkung (P5 und P6) deutlich.

Tabelle 3: Versuchsbedingungen und Ergebnisse der Interatom-Versuche (Testreihe FR2)

Versuch Nr.	NaK-Menge cm <sup>3</sup>	Leckgröße F <sub>L</sub>	Leckanordng. Innendruck	H <sub>2</sub> O-Temp °C	p <sub>max</sub> ata <sup>3)</sup>	t <sub>RE</sub> sec. <sup>4)</sup>	f Hz <sup>5)</sup>	Bemerkungen
1	400 94% <sup>1)</sup>	7 Bohrungen 10 ∅ 110% <sup>2)</sup>	Leck im NaK 3,8 ata	45	70-100	6,5	6-8	Kapsel an der Leckstelle wegen der dünnen Stege (≈2mm breit) abgerissen
2	250 58%	4 Bohrg. 2 ∅ 2,5%	Leck im NaK 3,8 ata	40	50-70	118	3	Infolge des kleinen Lecks 3 Teilreaktionen nach 0/50/107 sec, Dauer 3,5/2/11 sec. Dazwischen Leck"zu-auf". Kapsel o.B.
3	250	1 Bohrg. 6 ∅ 1 Querschlitzz 6x21 43%	Leck im NaK 1,1 ata	55	60-70	4	6	Kapsel verbogen (Querschlitzz)
4	250	7 Bohrgn. 10∅ 110%	Leck im NaK 3,8 ata	50	65-75	4	3	Kapsel an den dünnen Stegen fast abgerissen
5	400	3 Bohrgn. 6 ∅ 17%	Leck im Gas 3,8 ata	45	20-25	225	1-2	langsam ablaufende, ungleichmäßige Reaktion (relativ kleines Leck). Kapsel o.B.
6	400	7 Bohrgn.10 ∅ 110%	Leck im Gas 3,8 ata	60	55-65	56	1-2	Kapsel an den dünnen Stegen abgerissen.
7	≈ 423 > 99%	3 Bohrgn. 6∅ 17%	Leck im NaK >10 ata	25	50-80	(1,72)	5-10	Wasserführungsrohr aus AlMg3 nach 1,72 sec aufgeplatzt. Kapsel o.B.
8	400	8 Bohrgn. 6∅ 46%	Leck im NaK 3,8 ata	30	44-55	4,8	3	Kapsel o.B.
9	200 47%	7 Bohrgn. 8∅ 70%	Leck im NaK 3,8 ata	15	44-55	3,4	5	Reaktionsbeginn erst 0,5 sec nach Leckfreigabe, Kapsel o.B.
10	400	7 Bohrgn. 8∅ 70%	Leck im Gas 3,8 ata	15	50-65	46	2-10	Reaktionsbeginn erst 0,5 sec nach Leckfreigabe, Kapsel o.B.

1) 400 cm<sup>3</sup> ≅ 94% des Kapselvolumens, 2) 110% des Kapselquerschnitts, 3) p<sub>max</sub> = Maximalwert der Druckspitzen im Verlauf der Reaktionszeit.

4) t<sub>RE</sub> = Reaktionszeit, 5) f = Pulsationsfrequenz der Druckstöße.

Übrigens sind bei einigen Versuchen an verschiedenen Druckmeßstellen durch plötzliche Temperaturänderungen deutliche Temperatureffekte aufgetreten, z.B. Nullpunktverschiebungen in positiver Richtung. Das bedeutet, daß die angezeigten quasistatischen Drücke wesentlich höher sein können (bei Versuch 1 ca.  $25 \text{ kp/cm}^2$ ) als die tatsächlich aufgetretenen.

Gefahren durch die Lauge: Das Auftreten schon geringer Mengen Natron- bzw. Kalilauge führt im Primärkühlsystem bereits zu einem deutlichen Anstieg des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit. Es sei hier darauf hingewiesen, daß im  $\text{D}_2\text{O}$  der neutrale pH-Wert (genauer gesagt pD-Wert), bezogen auf  $25^\circ\text{C}$ , bei 7,6 liegt.

Im El 3 reichen 0,5 g NaK aus, um einen Wert von 8 zu erreichen und somit definitionsgemäß für einen pH-Wert von 9 5 g und für  $\text{pH} = 10$  50 g. Örtlich, z.B. unmittelbar an der Leckstelle kann der pH-Wert sehr hoch sein, doch ist im scharfen Kühlstrom bis zum Eintritt des Kühlmittels in den Moderatorraum eine gute Durchmischung gewährleistet. Auch im Moderator herrscht eine gewisse Wassergeschwindigkeit, so daß eine rasche weitere Verdünnung erwartet werden kann.

Hinsichtlich der Al-Korrosion wurden in [16] für  $80^\circ\text{C}$  folgende Abtragungen festgestellt:

pH = 10,65	:	75 $\mu$ /Tag
pH = 10,1	:	30 $\mu$ /Tag
pH = 9,55	:	10 $\mu$ /Tag.

Es wurde noch darauf hingewiesen, daß in diesen Korrosionsversuchen das Verhältnis untersuchte Metalloberfläche/korrodiertes Lösungsvolumen ungünstiger war als im Falle des Reaktors.

Beim Austreten des gesamten NaK-Volumens aus einer Kapsel im FR2 ist nach einer ersten Abschätzung ein pD-Wert von 10,5, bezogen auf Raumtemperatur, bzw. unter 10 bei Betriebstemperatur zu erwarten.

Der pD-Wert sinkt dann allmählich ab, da die  $\text{Na}^+$ - bzw.  $\text{K}^+$ -Ionen im Austauscherharz der Reinigungsanlage des FR2 wirksam gebunden werden. Über

diesen Reinigungskreislauf fließt ständig ein Teilstrom von ca.  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Unter Zugrundelegung dieses Teilstroms im Reinigungskreislauf und einer ständigen Durchmischung kann man abschätzen, daß der pD-Wert innerhalb 12 h auf ca. 9,0, bzw. nach 24 h auf ca. 8,5 und nach 36 h auf ca. 8,0, jeweils bezogen auf die Betriebstemperatur, absinkt [30].

Eine Versuchsreihe in der Abteilung Reaktorbetrieb ergab bei einem pD-Wert von 10,5 eine Korrosionsrate von  $0,6 \mu/\text{Tag}$  [31].

Bei den relativ großen, vom  $\text{D}_2\text{O}$  umspülten Al-Flächen von ca.  $30 \text{ m}^2$  würde dadurch eine Menge von ca. 50 g an gelöstem Al pro Tag im Kreislauf auftreten. Eine solche Menge führt noch nicht zum Verstopfen der Ionenaustauscher. Berücksichtigt man die Wirkung des Reinigungskreislaufes, der den pD-Wert laufend absenkt, so ergibt sich daraus, daß die tatsächlich abgetragene Menge noch erheblich geringer ist.

Der pD-Wert bzw. die Leitfähigkeit des Primärkühlwassers werden im FR2 über besagte Meßstellen betriebsmäßig kontinuierlich registriert und eine Änderung wird normalerweise innerhalb einer Stunde zur Kenntnis genommen. Um eine Änderung nun sofort erfassen und evtl. bei einem Kapselleck den Reaktor von Hand abschalten zu können, schlagen wir vor, zumindest für die Meßstellen am Reaktorausstritt zusätzlich eine Grenzwerteinheit einzubauen, die z.B. bei  $\text{pD} = 8$  bzw. Leitfähigkeit =  $0,5 \mu \text{ S/cm}$  ein Alarmsignal auslöst. Übrigens ist am El 3 die schnelle Neutralisierung des laugehaltigen Kühlwassers durch Einspritzen von Salpetersäure (von Hand, nicht automatisch) vorgesehen. Durch eine solche Maßnahme, die bei entsprechender Vorbereitung z.B. innerhalb einer Stunde nach Auslösen eines Signals getroffen werden könnte, wäre es möglich, den Korrosionsabtrag am Al-Tank und damit auch die Ionenaustauscherverschmutzung um fast eine Größenordnung zu verringern.

#### 6.5 Reaktionen zwischen Karbidbrennstoff und $\text{D}_2\text{O}$

Beim Zusammentreffen von UC mit Wasser bzw. Wasserdampf kann es zu Reaktionen kommen, deren Endprodukte Gase und kristallwasserhaltige Oxide sind.

Bei Temperaturen unter 100°C (Hydrolyse) treten als Gase

- ca. 86 Vol.-% C H<sub>4</sub> (Methan),
- ca. 11 Vol.-% H<sub>2</sub> (Wasserstoff) und
- ca. 3 Vol.-% höhere Kohlenwasserstoffe (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

auf. Der gesamte Karbidkohlenstoff wird hierbei in gasförmige Reaktionsprodukte umgesetzt. Anteile an UC<sub>2</sub> im Brennstoff erzeugen höhere Kohlenwasserstoffe und einige nichtflüchtige, wachsähnliche Verbindungen [22, 23]. Für unbestrahltes UC wird in [28] bei 65° ein Abtrag von 600 mg/cm<sup>2</sup>h angegeben; das entspricht einer Schichtdicke von ca. 600 μ/h. Bei 50°C soll dagegen noch keine Reaktion sichtbar sein.

Versuche mit bestrahltem UC zeigten, daß die Reaktionsgeschwindigkeit in Wasser durch die Bestrahlung wesentlich vermindert wird [22, 24, 25]. Mit steigendem Abbrand der Carbide tritt eine zunehmende Passivierung ein; die nachfolgende Tabelle macht das deutlich. Die Gründe für diese Passivierung sind bisher noch nicht bekannt.

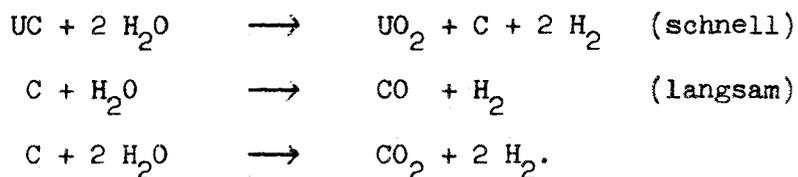
Tabelle 4: Einfluß der Neutronenbestrahlung auf die Hydrolyse von UC in Wasser bei 80°C [22]

Abbrand Mwd/t	Reaktionszeit h	Umgesetzte Menge %
0	6	90
600	22	96
5700	23	< 1
6500	336	61
16000	21	< 1

Bei Reaktionen mit Wasserdampf (Pyrohydrolyse) von 700 bis 750°C haben die gasförmigen Reaktionsprodukte ungefähr folgende Zusammensetzung [22]:

- ca. 80 Vol.-% H<sub>2</sub>,
- ca. 15 Vol.-% CO<sub>2</sub> und
- ca. 5 Vol.-% CO.

Sowohl bestrahlte als auch unbestrahlte Karbide des Urans als auch Mischkarbide mit 20 % PuC - 80 % UC reagieren mit Wasserdampf bei 750°C unter Ausschluß von Luft zu den entsprechenden Oxiden und gasförmigen Produkten nach folgendem Reaktionsmechanismus [22]:



Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu. In [26] wird angegeben, daß an erschmolzenen unbestrahlten 5 g- bzw. 10 g-Proben die Reaktion in Wasserdampf bei 750°C nach 1 Stunde, bei 700°C nach 3 Stunden abgeschlossen, aber bei 650°C nach 6 Stunden noch nicht beendet war. Bei 400°C soll die Reaktion extrem langsam und bei 150°C fast völlig erloschen sein. Bei den höheren Temperaturen ist kein Unterschied zwischen bestrahltem und unbestrahltem Material festzustellen; auch nicht zwischen UC und PuC oder Gemischen.

In [27] wurden Reaktionen an unbestrahlten UC-Kleinproben von ca. 1 g Gewicht in Wasserdampf bei niedrigem Druck studiert. Dabei wurden folgende Abtragungen gefunden:

bei 400°C	3 mg/g h,
bei 460°C	26 mg/g h und
bei 600°C	108 mg/g h.

Bei einer Brennstoffmenge von 210 g in der Kapsel werden ungefähr 20 l an Gasen entstehen. Diese Gasmenge ist etwa so groß wie die aus der NaK/D<sub>2</sub>O-Reaktion. Die gesamte Brennstoffmenge innerhalb einer Kapsel wird nach einem Hillrohr- und Kapselschaden jedoch nur relativ langsam durchreagieren, zumal der Reaktor zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschaltet ist und die Temperaturen allmählich absinken.

Wir nehmen aus Sicherheitsgründen nun an, daß die gesamte Brennstoffmenge einer Kapsel innerhalb einer Stunde durchreagiert. Das ist nach dem vorher Gesagten äußerst pessimistisch, zumal auch nach einem burnout der

Brennstabhille noch ein großer Teil des Brennstoffs fest umhüllt sein dürfte. Unter obiger Annahme würden somit 20 l Gase innerhalb einer Stunde entstehen; das sind ca.  $6 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Die Gesamtmenge von 20 l aus der UC/Wasser-Reaktion würde also um mindestens zwei Größenordnungen langsamer entstehen als die 20 l  $\text{H}_2$  von der NaK/Wasser-Reaktion bei großen Lecks, wie sie bei den Interatom-Versuchen simuliert wurden. Deshalb sind die zusätzlichen Druckstöße weitaus harmloser als die von der NaK/Wasser-Reaktion.

#### 6.6 Auswirkungen großer Kapsellecks (max. Störfall)

Bei einem großen Leck in der Kapselwand ist der Verlust der gesamten NaK-Menge wahrscheinlich und trotz Reaktorschnellschluß ein Brennstabdefekt, verbunden mit beträchtlichem Aktivitätsaustritt aus der Kapsel in das Primärsystem des FR2, nicht auszuschließen. Dieser Vorfall ist wegen dem gleichzeitigen Auftreten von Druckstößen infolge der heftigen NaK/ $\text{D}_2\text{O}$ -Reaktion und von Aktivitäten im Kühlkreislauf als max. Störfall zu bezeichnen, insbesondere wenn die Leckstelle am unteren Kapselende auftritt; er ist jedoch nach menschlichem Ermessen wegen der geringen Kapselbeanspruchung äußerst unwahrscheinlich.

Der Ablauf des max. Störfalls wäre etwa folgender:

Nach dem Auftreten des Lecks würde das NaK in einigen Sekunden völlig auslaufen und es käme neben der pH-Wert-Erhöhung zu den erwarteten Druckstößen und der entsprechenden Belastung des Wasserführungsrohres. Mit dem Auslaufen des NaK ginge ein burnout der Brennstabhille einher, nach dem dann auch Spaltprodukte und Brennstoffpartikel in das Primärsystem gelangen könnten. Damit verbunden wäre u.U. eine Reaktion des UC-PuC mit  $\text{D}_2\text{O}$  bzw.  $\text{D}_2\text{O}$ -Dampf.

Die Auswirkungen der Druckstöße auf das Wasserführungsrohr, auf benachbarte Brennelemente und Abschaltstäbe sowie auf die Wand des Al-Tanks und auf den Kühlmittelverteilerboden werden in den nachfolgenden Abschnitten 6.6.1 bis 6.6.3 abgeschätzt. Dabei werden aus Sicherheitsgründen stets die bei den Versuchsreihen aufgetretenen Maximalwerte eingesetzt.

### 6.6.1 Verhalten des Wasserföhrungsrohres

Die Bewegungsgleichung des Wasserföhrungsrohres bei dynamischem Innendruck und ohne Behinderung von auöen lautet

$$\ddot{u} + \omega^2 \cdot u = \frac{p_i(t)}{\rho \cdot s}$$

Es bedeuten:

Radiale Aufweitung

$u$

Eigenfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot r_m^2}} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ sec}^{-1}$$

Innendruck

$p_i(t)$

Dichte des Zircaloy-2

$$\rho = 6,5 \text{ g/cm}^3 = 6,625 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kp s}^2}{\text{cm}^4}$$

Wandstärkte

$$s = 2 \text{ mm}$$

Mittlerer Radius

$$r_m = 19 \text{ mm}$$

Elastizitätsmodul

$$E = 9300 \text{ kp/mm}^2 \text{ bei } 80^\circ\text{C}$$

Da die Frequenz des Rohres sehr viel größer ist als die der Druckpulse, kann man konservativerweise  $p_i$  als Sprungfunktion annehmen. Dann lautet die Lösung obiger Gleichung mit den Anfangsbedingungen  $u = \dot{u} = 0$

$$u = \frac{p}{\rho s \omega^2} (1 - \cos \omega t),$$
$$\dot{u} = \frac{p}{\rho s \omega} \sin \omega t.$$

Die maximale Aufweitung ist für  $p = 100 \text{ kp/cm}^2$

$$u_{\max} = \frac{2 \cdot p}{\rho s \omega^2} = \frac{2 p r_m^2}{E s} = 0,039 \text{ mm},$$

so daß die maximale Dehnung

$$\epsilon_{\max} = \frac{u_{\max}}{r_m} \cdot 100 = 0,2 \% \ll \sigma \approx 35 \%,$$

die maximale Spannung

$$\sigma_{\max} = E \epsilon_{\max} = 18,6 \text{ kp/mm}^2 < \sigma_{0,2} \approx 25 \text{ kp/mm}^2$$

und die maximale Geschwindigkeit

$$\dot{u}_{\max} = \frac{p}{\rho s \omega} = 3,78 \text{ m/sec}$$

beträgt.

Demnach ist also das Wasserführungsrohr nicht gefährdet.

### 6.6.2 Belastung der benachbarten Brennelemente bzw. Abschaltstäbe und des Al-Tanks

Geht man davon aus, daß das Wasserführungsrohr außen direkt mit dem Moderator in Berührung steht, dann wird die Bewegung des Wasserführungsrohrs an den Moderator übertragen. Man hat dann mit hochfrequenten, aber gedämpften Druckpulsen im Moderator zu rechnen. Setzt man eine zylindrische Wellenausbreitung voraus, dann fällt der Druck in größerem Abstand R vom Wasserführungsrohr mit  $R^{-1/2}$  ab (Abfall schwächer als beim kugelsymmetrischen Fall).

Eine konservative Abschätzung der Druckspitzen im Moderator unmittelbar am Wasserführungsrohr ergibt

$$p = (\rho c)_{D_2O} \dot{u}_{\max} = 59,3 \text{ kp/cm}^2$$

mit

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 1,1 \text{ g/cm}^3 = 1,122 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kp sec}^2}{\text{cm}^4} \\ c &= 1400 \text{ m/sec (Schallgeschwindigkeit)} \\ \rho c &= 0,157 \frac{\text{kp sec}}{\text{cm}^3} \end{aligned} \right\} \text{ für } D_2O$$

Dieser Wert ist in zweifacher Hinsicht konservativ. Einerseits wird wegen der Dämpfung durch den Moderator die Maximalgeschwindigkeit des

Wasserführungsrohres kleiner als 3,78 m/sec sein. Andererseits gilt die Beziehung  $p = c \rho v$  nur bei ebener Wellenausbreitung; bei Zylinderwellen sind Druck und Geschwindigkeit nicht mehr in Phase, wie man für den einfachen Fall des harmonisch schwingenden Zylinders in einem akustischen Medium zeigen kann [29]; man kann hier aber abschätzen, daß für die Maximalwerte  $p_{\max}$  und  $v_{\max}$

$$p_{\max} < \rho c v_{\max}$$

gilt.

Befindet sich das Wasserführungsrohr in der Nähe der Tankwand, dann ist unmittelbar klar, daß die Druckwellen infolge der exzentrischen Lage und der Reflektionen an den Brennelementen und der Tankinnenseite zu einer unsymmetrischen, sehr komplexen Belastung der Tankwand führen; es ist denkbar, daß starke lokale Biegungen auftreten.

Ähnliches gilt für die Brennelemente und Abschaltstäbe. Bei dieser Konstruktion wäre es also schließlich erforderlich gewesen, den Sicherheitsnachweis durch Versuche zu erbringen.

Dieser Problematik kann aus dem Wege gegangen werden, indem das kühlwasserführende Rohr vom Moderator durch einen Gasspalt getrennt, also ein doppelwandiges Rohr verwendet wird.

Als Gas ist Argon mit geringen Zusätzen von Helium vorgesehen, dessen Einfluß in den folgenden Abschätzungen außer acht gelassen werden soll. Die Schallgeschwindigkeit im Argon errechnet sich zu

$$c_A = \sqrt{\kappa R T} = 339 \text{ m/sec}$$

mit

Verhältnis der spez. Wärme

$$\kappa = 1,66$$

Gaskonstante

$$R = \frac{\text{kp m}}{\text{kg grd}}$$

Mittlere Gastemperatur

$$T = 333^\circ \text{K.}$$

Vernachlässigt man die differentielle thermische Ausdehnung des Kühl- und Mantelrohres, dann ist die Dichte

$$\rho_A = 1,783 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,1818 \frac{\text{kp sec}^2}{\text{m}^4}$$

und die akustische Impedanz ergibt sich zu

$$c_A \rho_A = 61,6 \frac{\text{kp sec}}{\text{m}^3} .$$

Als maximalen Überdruck der Druckwelle erhält man dann

$$\Delta p_A = c_A \rho_A \dot{u}_{\text{max}} = 0,0233 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} .$$

Errechnet man den Druck im Gasspalt bei der maximalen Aufweitung, dann ergibt sich bei einer Ausgangsspaltbreite von 1 mm ein ähnlich kleiner, völlig vernachlässigbarer Wert von ca. 1,05 ata.

Es bedarf keiner weiterer Rechnungen um einzusehen, daß derart geringe Druckänderungen weder dem Gasführungsrohr gefährlich werden können noch Druckwellen im Moderator erzeugen, die die Funktionsfähigkeit und Sicherheit der Brennelemente der Abschaltstäbe und des Al-Tanks beeinträchtigen.

### 6.6.3 Die Sicherheit des Tankdoppelbodens

Bei der NaK-Wasser-Reaktion laufen die Druckwellen nicht nur radial nach außen, sondern auch im Wasserführungsrohr nach unten und können so in den Tankdoppelboden gelangen.

Nun ist zu bemerken, daß auf diesem Wege mehrere Querschnittsänderungen vorhanden sind, die zu einer starken Drosselung führen:

- am Ende der Brennstoffkapsel
- am Fuß des Wasserführungsrohres
- in der Gewindehilfe
- und schließlich an den Austrittsöffnungen des sog. Trichterbolzens im Doppelboden.

Da der Weg vom Ende der Kapsel bis zum Fuß ca. 600 mm beträgt, wird der Druckwelle auch hier durch elastische Deformation des wasserführenden Rohres Energie entzogen.

Die von der Führungshülse schließlich ausgehenden Druckwellen werden sich radial nach allen Seiten ausbreiten, wobei sie an Intensität abnehmen.

Die untere und obere Platte des Einsatzbodens sind dickwandig ausgeführt, durch Trichterbolzen und Schrauben miteinander verspannt und schließlich allseitig von  $D_2O$  umgeben.

Es ist deshalb nicht zu befürchten, daß der Einsatzboden irgendwelche merkbaren Verformungen und Spannungen erfährt, zumal das umgebende  $D_2O$  bei dynamischer Belastung des Unter- und Oberteils dämpfend wirkt.

#### 6.7 Auswirkungen kleiner Kapsellecks

Bei einem relativ kleinen Leck in der Kapselwand wäre folgender Ablauf denkbar: Je nachdem ob das Leck im NaK- oder im Gasraum liegt, wird so lange NaK oder Gas aus der Kapsel austreten, bis Druckgleichheit herrscht. Diese feine NaK-Injektion ruft eine kontinuierliche Reaktion an der Einspritzöffnung hervor, die zu keinen nennenswerten Druckstößen führt [16]. Bei Druckgleichheit kann dann auch eine geringe Menge an  $D_2O$  (wenige Tropfen) in das Kapselinnere gelangen. Da NaK in der Kapsel im Überschuß vorhanden ist, bilden sich Natrium-Oxid ( $NaO$ ) und Kalium-Oxid ( $KO$ ) und freier Wasserstoff, der sich im Gaspuffer ansammelt. Die Wasserstoffmenge ist bei dieser Oxidation mit ca. 0,6 l je g NaK bzw. auch etwa je g  $D_2O$  relativ groß und führt wegen des kleinen Puffervolumens in der Kapsel zu einer starken Druckerhöhung. Gerade deshalb können jeweils nur wenige Tropfen Wasser ins Kapselinnere eintreten. Die Druckerhöhung führt sofort wieder zum Austreten eines dünnen NaK-Stromes aus der Kapsel in das Wasserführungsrohr. Dieser Vorgang wird sich so oft wiederholen, bis die gesamte NaK-Menge verbraucht ist.

Das gebildete Oxid schwimmt infolge Oberflächenspannung trotz größeren spezifischen Gewichtes im NaK auf und bildet am Füllstand eine Schicht. Erst wenn das NaK innerhalb der Kapsel zu Ende geht und gegenüber dem  $D_2O$  nicht mehr im Überschuß vorhanden ist, bildet sich bei der Reaktion nicht mehr Oxid, sondern Lauge.

Der Reaktionsablauf wird also bei kleinen Leckstellen in der Kapsel außerordentlich langsam sein und es kann Stunden dauern, bis die gesamte NaK-Menge durchreagiert hat. Dementsprechend werden die auftretenden Druckstöße kaum wahrnehmbar sein.

### 6.8 Möglichkeiten der Schädendetektion

Die vorgesehene NaK-Füllstandsdetektion über 3 Thermoelemente (2 v 3-Sicherheitssystem) macht zusammen mit den im FR2 installierten Detektionsmöglichkeiten

Canschädendetektion	}	im Primärsystem
Aktivitätsmessung		
pH-Wert-Messung		
Leitfähigkeitsmessung		

die Detektion eines jeden Schadens möglich. Bereits kleine NaK-Mengen von weniger als 1 g, auf die gesamte  $D_2O$ -Menge im Kühlkreislauf verteilt, ergeben eine deutliche Erhöhung der Leitfähigkeit und des pH-Wertes. Außerdem würden in diesem Fall Na- bzw. K-Aktivitäten im  $D_2O$  auftreten, die über die Aktivitätsmeßstellen im Primärsystem erfaßt werden können. Deshalb ist sowohl ein großer als auch ein kleiner Kapselschaden zu detektieren. Ein Anstieg über bestimmte Grenzwerte des pH-Wertes (z.B. pH = 8) und der Leitfähigkeit (z.B. 0,5  $\mu S/cm$ ) sollte einen Alarm auslösen, so daß der Reaktor von Hand abgeschaltet werden kann. Diese Art Detektion ist relativ langsam; sie kann u.U. erst eine Minute nach dem Auftreten des Kapsellecks erfolgen.

Bei einem großen Kapselleck würde das NaK in wenigen Sekunden verlorengehen, so daß schon innerhalb dieser Zeit über die Füllstandsdetektion Reaktorschnellschluß ausgelöst werden würde. Ein burnout der Brennstabhille wäre aber wegen der noch erheblichen Nachwärme auch bei abgeschaltetem Reaktor nicht auszuschließen. Auf jeden Fall würde ein burnout innerhalb einer Minute zusätzlich einen Alarm von der Aktivitätsmessung im Hauptkreislauf und schließlich von der Canschädendetektion auslösen.

Die Signale würden in diesem Fall etwa in folgender Reihenfolge kommen:

Schnellschluß über die Füllstandsdetektion	}	innerhalb ca. 1 bis 3 sec
Aktivität (Spaltprodukte + NaK)		im Primärsystem
pH-Wert		innerhalb einer Minute
Leitfähigkeit		
Canschädenddetektion bei Abfrage		

All diese Signale haben aber bei einem großen Leck kaum noch einen Einfluß auf den Ablauf des Geschehens.

Bei einem kleinen Kapselleck läuft die NaK/Wasser-Reaktion sehr langsam ab, so daß erst nach Minuten die Füllstandsdetektion ansprechen würde. In der Zwischenzeit würde aber sicherlich ein Alarm von der pH-Wert-Messung und der Leitfähigkeitsmessung herkommen. Der Reaktor kann also von Hand abgeschaltet werden. Er würde aber auch über die Füllstandsdetektion automatisch abgeschaltet werden, sowie genug NaK verlorengegangen ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit geht das NaK bei kleinen Lecks so langsam verloren, daß ein burnout infolge Nachwärme nicht mehr zu befürchten ist.

Bei kleinen Lecks sprechen also vermutlich zunächst die

pH-Wert-Messung	}	im Primärsystem
Leitfähigkeitsmessung und		
Aktivitätsmessung (NaK)		
und später die Füllstandsdetektion an, wenn der Reaktor nicht zuvor von Hand abgeschaltet wurde.		

Ist einem kleinen Kapselleck bereits ein Hüllrohrdefekt vorausgegangen, so kommen die Signale etwa in folgender Reihenfolge:

Aktivität (Spaltprodukte + NaK)	}	im Primärsystem
pH-Wert		innerhalb einer Minute
Leitfähigkeit		
evtl. später Schnellschluß, wenn nicht inzwischen von Hand abgeschaltet wurde.		
Canschädenddetektion bei Abfrage.		

Die NaK/Wasser-Reaktion läuft selbstverständlich auch bei abgeschaltetem Reaktor weiter, bis entweder das Leck durch Oxide verstopft (bei sehr kleinen Lecks) oder kein NaK mehr vorhanden ist.

Es wird deshalb auch längere Zeit nach Abschalten des Reaktors noch zu einem spürbaren Ansteigen der Temperaturen am betreffenden KVE infolge der Nachwärme kommen, so daß dessen Lokalisierung auch bei sehr kleinen Kapsellecks ohne Brennstabdefekt möglich ist. Dadurch, daß die Miniaturthermoelemente direkt auf der Brennstabhülle befestigt werden, ist eine fast trägheitslose und wirklich empfindliche Temperatur-Messung zu erwarten; so daß eine Detektion auch kleiner Temperaturänderungen zuverlässig möglich ist.

Im Falle eines gleichzeitigen Hüllrohrdefektes liegen hinsichtlich der Lokalisierung die gleichen Verhältnisse wie beim maximalen Störfall vor.

#### 6.9 Maßnahmen bei Störfällen

Zu den Maßnahmen, die während des Betriebs bei Störfällen an den Kapseln getroffen werden, gehören natürlich Abschaltungen des Reaktors bei Überschreiten verschiedener Grenzwerte von Hand oder automatisch, wie sie im vorangehenden Abschnitt erläutert wurden. Darüber hinaus sind Maßnahmen im Hinblick auf eine Gefährdung des Betriebspersonals durch den verseuchten Reaktor und auf das Ziehen des defekten Einsatzes und dessen Transport zu treffen.

Die Aktivitäten, die beim maximalen Störfall in das Primärsystem des FR2 gelangen können, sind hauptsächlich flüchtiger Natur. Nimmt man für den ungünstigsten Fall der Stäbe mit Ar-Bonding eine Spaltgasfreisetzungsrate von 50% über den ganzen Stab gemittelt (sehr pessimistische Annahme), dann gelangen ca. 4000 Ci an flüchtigen Spaltprodukten in das Primärsystem. Die 55% Edelgase werden sich überwiegend in der Schutzgasatmosphäre ansammeln und können dosiert über den Schornstein abgeblasen werden. Die Halogene (45%) sind überwiegend im NaK bzw.  $D_2O$  gelöst und werden in den Filtern und Ionenaustauschern festgehalten. Hier sammeln sich auch feste Brennstoffpartikel an, die u.U. aus dem defekten Brennstab ausgespült werden.

Nach 8 Tagen Betriebsunterbrechung ist die Aktivität der Edelgase im Primärsystem auf ca. 170 Ci abgeklungen, wenn nichts über den Schornstein abgelassen wurde und die von Jd 131, die hauptsächlich in den Filtern bzw. Ionenaustauschern gebunden ist, auf ca. 70 Ci. Die Na- und K-Aktivitäten aus einer Kapsel sind bereits nach 3 Tagen auf 2 Ci abgeklungen.

Von den in Vg. 6 insgesamt vorgesehenen 25 Stäben haben nur 5 ein Ar-Bonding. Bei den 10 Stäben mit He-Bonding ist nur mit einer Spaltgasfreisetzungsrate von ca. 15 % und bei den 10 Stäben mit Na-Bonding von  $< 0,5\%$  (über die Stablänge gemittelt) zu rechnen. Dementsprechend betragen die max. freigesetzten flüchtigen Aktivitäten nur  $1/3$  bzw.  $1/10$  der oben genannten Werte.

Das Auftreten der Spaltprodukte im Primärsystem bedeutet noch keine Gefährdung des Reaktorpersonals und der Umgebung; solche Störfälle erfordern die gleichen Maßnahmen, wie sie beim Auftreten von Defekten an normalen Brennelementen zu treffen sind.

Wie in den vorangehenden Abschnitten gesagt, ist in keinem Fall mit einer Beschädigung des Wasserführungsrohres oder irgendwelcher Reaktorkomponenten zu rechnen, so daß der KVE auch nach dem maximalen Störfall ohne Schwierigkeiten mit der BE-Auswechselflasche aus dem Core gezogen werden kann. Um dabei einem Brand durch eventuell in der Kapsel verbliebene NaK-Reste vorzubeugen, sollte die Flasche z.B. mit Stickstoff anstatt mit Luft gekühlt werden. In der Heißen Zelle des FR2 sollte für diesen Störfall ein Schutzrohr eingebracht werden, das nach dem Lösen vom Oberteil und dem Einführen der defekten Kapsel dicht verschlossen werden kann. Dieses Schutzrohr kann dann mit der normalen Kapseltransportflasche zu den Heißen Zellen im Bau 701 zur Nachuntersuchung transportiert werden. Zu einem Austritt von Aktivitäten ins Freie kann es also nicht kommen.

#### 6.10 Zusammenfassung

Die wichtigsten sicherheitstechnischen Gesichtspunkte seien abschließend noch einmal zusammengefaßt:

1. Durch die Wahl von Nb-1 % Zr als Kapselmaterial ist ein Höchstmaß an Betriebssicherheit erreicht. Auch das Auftreten eines Risses

an einer der beiden Schweißnähte ist äußerst unwahrscheinlich, da diese weit oberhalb bzw. unterhalb der Brennstoffzone und damit im unbelasteten Bereich liegen.

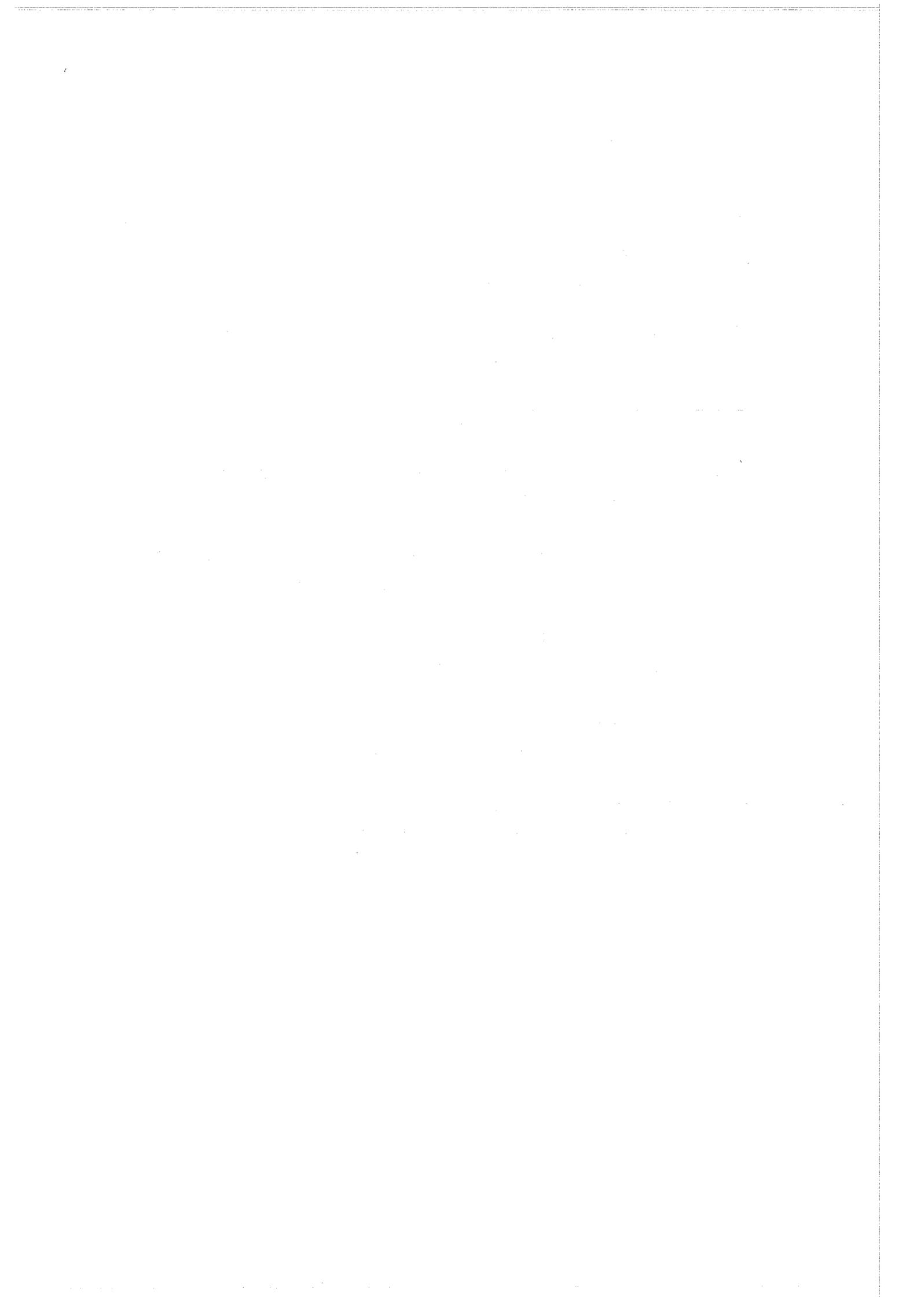
2. Obgleich ein Kapselleck praktisch nicht möglich ist, wurden die Gefahren eines solchen Lecks überdacht und entsprechende Maßnahmen vorgesehen: Wegen der Schwierigkeit, einen Nachweis für die Sicherheit des Reaktortanks und der benachbarten BE und TA-Stäbe zu führen, wurde ein doppelwandiges Wasserführungsrohr mit einem Gasspalt vorgeschlagen. Die Abschätzungen zeigen, daß das Wasserführungsrohr und wegen des Gasspaltes auch andere Reaktorkomponenten bei den max. zu erwartenden Druckstößen nicht gefährdet sind.
3. Sowohl große als auch kleine Lecks können über eine Füllstandsdetektion detektiert werden. Bei großen Lecks ist jedoch selbst bei unverzögertem Schnellschluß ein burnout der Brennstabhülle nicht auszuschließen, da u.U. das NaK sehr schnell ausläuft und die Nachwärme noch zu groß ist.
4. Mit dem maximalen Störfall können neben den kurzlebigen Na- und K-Aktivitäten auch größere Mengen an Spaltprodukten in das Primärsystem gelangen. Die Umgebung des Reaktors und das Betriebspersonal werden dadurch nicht gefährdet. Eine Betriebsunterbrechung bis zum Abklingen der Aktivitäten bzw. bis zum Herausfiltern wäre für diesen Fall jedoch in Kauf zu nehmen. Das Auswechseln und der Abtransport einer defekten Kapsel sind beherrschbar.
5. Die Erfahrungen am El 3 und auch an anderen Reaktoren (BR2, JRR 2 u. GETR) mit solchen einwandigen NaK-Kapseln im Primärkühlwassersystem sind für uns ermutigend. Insbesondere die El 3-Untersuchungen sind sehr wertvoll. Man hat dort nach einigen Jahren Betriebserfahrungen nicht mehr die Befürchtungen wie zu Beginn der Planungen. Maximal befanden sich im El 3 gleichzeitig 16 Kapseln mit insgesamt 800 g NaK im Einsatz.
6. Selbstverständlich werden wieder - wie bei allen bisherigen Kapseltypen - die ersten Einsätze relativ kurzzeitig bestrahlt, um Erfahrungen

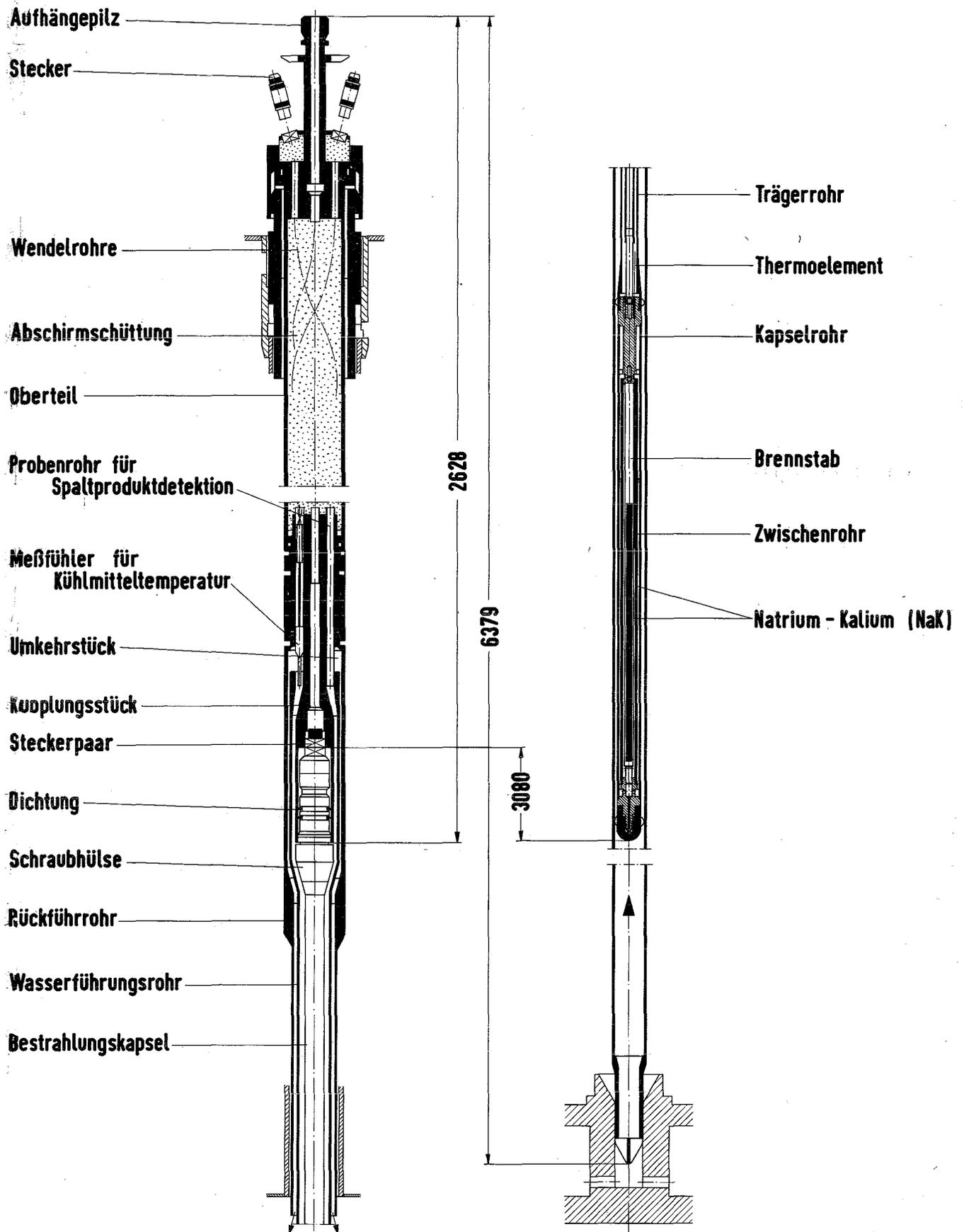
zu sammeln. Erst wenn aus den Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen an kurzzeitig bestrahlten KVE befriedigende Ergebnisse vorliegen, wird der Schritt zu längeren Einsatzzeiten getan.

## 7. Literaturhinweise

- [1] bis [6], [8], [12], [21], [30], [31] sind interne Notizen, die nicht veröffentlicht wurden.
- [7] CRASH, Computer-Program for the Analysis of Creep and Plasticity in Fuel Pin Sheets.  
M. Guyette, KFK-Bericht Nr.1050 (1969)
- [9] Strain-Cycle Phenomena in Thin-Wall Tubing.  
GEAP-4462 (1964)
- [10] Theory of Plates and Shells  
S.P.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger,  
Mc Graw Hill, 1959
- [11] Stresses in Shells  
W.Flügge, Springer-Verlag, New York, 1966
- [13] Inpile Experiments on Retention of Fission Products in 500°F Sodium.  
W.P.Kunkel, D.M.Elliot and A.S.Gibson, NAA-SR-9163
- [14] Demonstration of Fission Gas Venting from Fast Oxide-Reactor Fuel Elements.  
G.L.O'Neill, J.H.Davies and M.L.Johnson  
Transaction of ANS. Vol.7, No.1, p.92 (June 1964)
- [15] Tabelle zur Neutronenaktivierung.  
F.Baumgärtner, Kerntechnik 3. Jg.(1961) Heft 8
- [16] Gefahren einer Na-Wasser- oder NaK-Wasser-Reaktion im El 3 Core  
P.Bréaut, J.Lalère, P.Mitaut, DPE/SPE/67-224 (P 135)
- [17] TID - 7697, S.3.3.3
- [18] GEOR - 4651, Sept. 1964
- [19] Vergleich der Verträglichkeit der Kernbrennstoffe UN, UC und UO<sub>2</sub> mit Metallen.  
O.Götzmann, F.Thümmler, KFK-Bericht Nr.435

- [ 20 ] Liquid Metals Handbook.  
R.N.Lyon
- [ 22 ] Hot Cell Studies of Aqueous Dissolution, Process for Irradiated  
Carbide Reactor Fuels.  
J.R.Flanary et al. ORNL-3660, Sept.1964
- [ 23 ] Karbidische Kernbrennstoffe für Schnelle Brutreaktoren.  
KFK-Bericht Nr. 1111
- [ 24 ] M.J.Bradly et al., Inorg. Chem. 3, 454 (1964)
- [ 25 ] Hydrolysis of Uranium Carbides Between 25 and 100°C  
M.J.Bradly, et al.
- [ 26 ] Head-End Dissolution for UC Process and UC-PuC-Reactor Fuels  
J.R.Flanary, et al., Nucl.Appl., Vol.1, June 1965
- [ 27 ] E.W.Murbach, AEC R. and D.Rept.,  
NAA-SR-6331, July 15, 1961
- [ 28 ] Some Properties of Uranium Monocarbide  
A.Boettcher, G.Schneider, Genfer Konferenz 1958, P/964
- [ 29 ] Mathematics in Physics and Engineering  
J.Irving, N.Mullineux, Academic Press, 1959





FR2 - Kapselversuchseinsatz Typ 7

IRE2-06-1-2556

Abb. 1

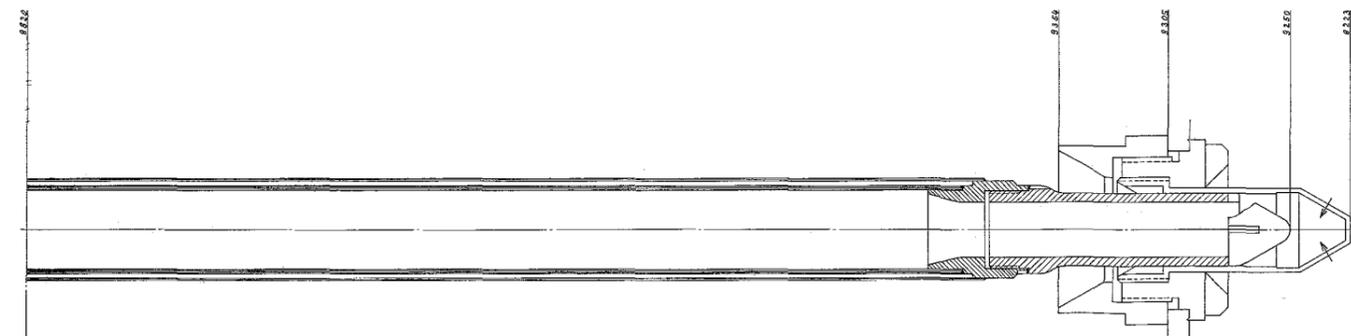
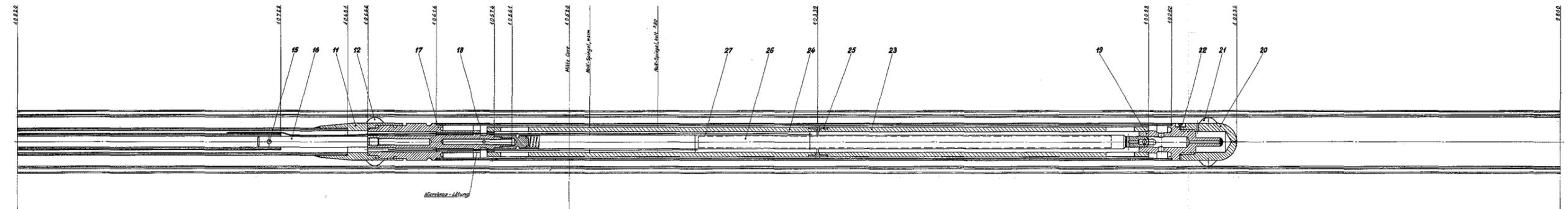
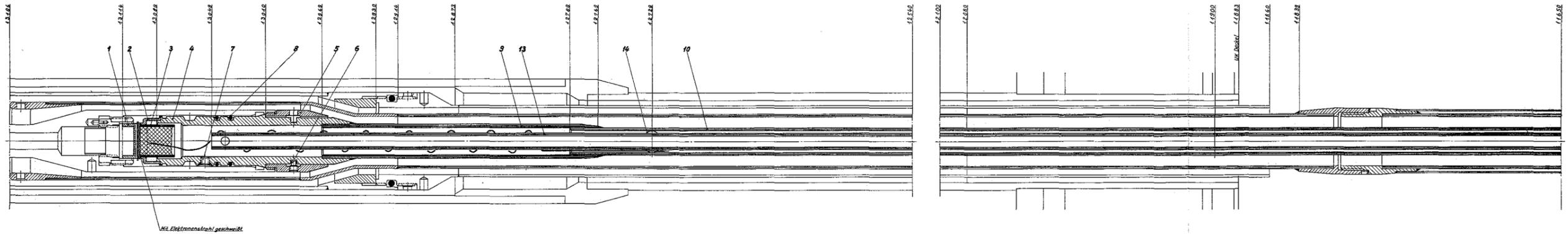
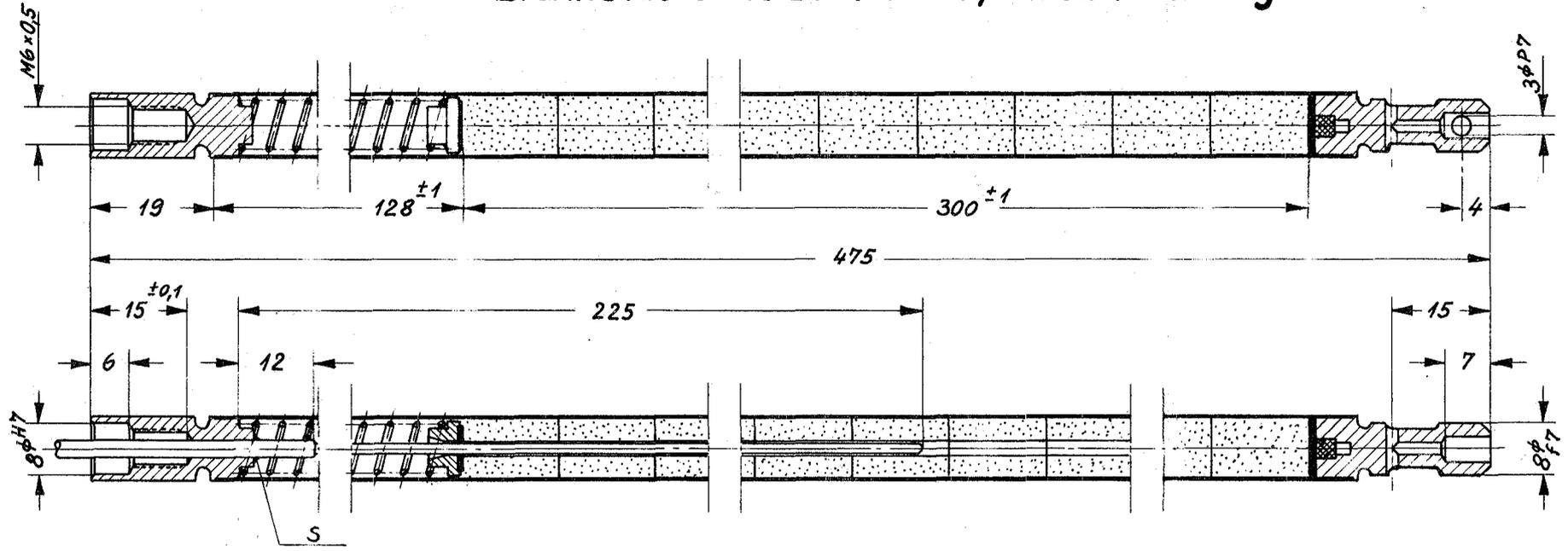


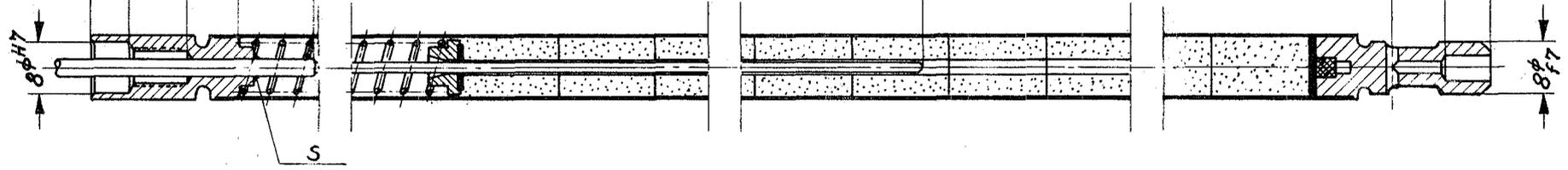
Abb. 2

Pos.	Bezeichnung	Material	Abmessung	Zeichn. Nr.	Norm	Größe	Stückzahl	Einheit
1	Thermoelement	—	—	—	—	—	1	Stück
2	Brünnchen-Drilling	—	—	—	—	—	1	Stück
3	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
4	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
5	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
6	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
7	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
8	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
9	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
10	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
11	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
12	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
13	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
14	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
15	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
16	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
17	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
18	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
19	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
20	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
21	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
22	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
23	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
24	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
25	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
26	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück
27	Druckring	VA	20x20	—	—	—	1	Stück

*Brennstab ohne Zentraltemperaturmessung*

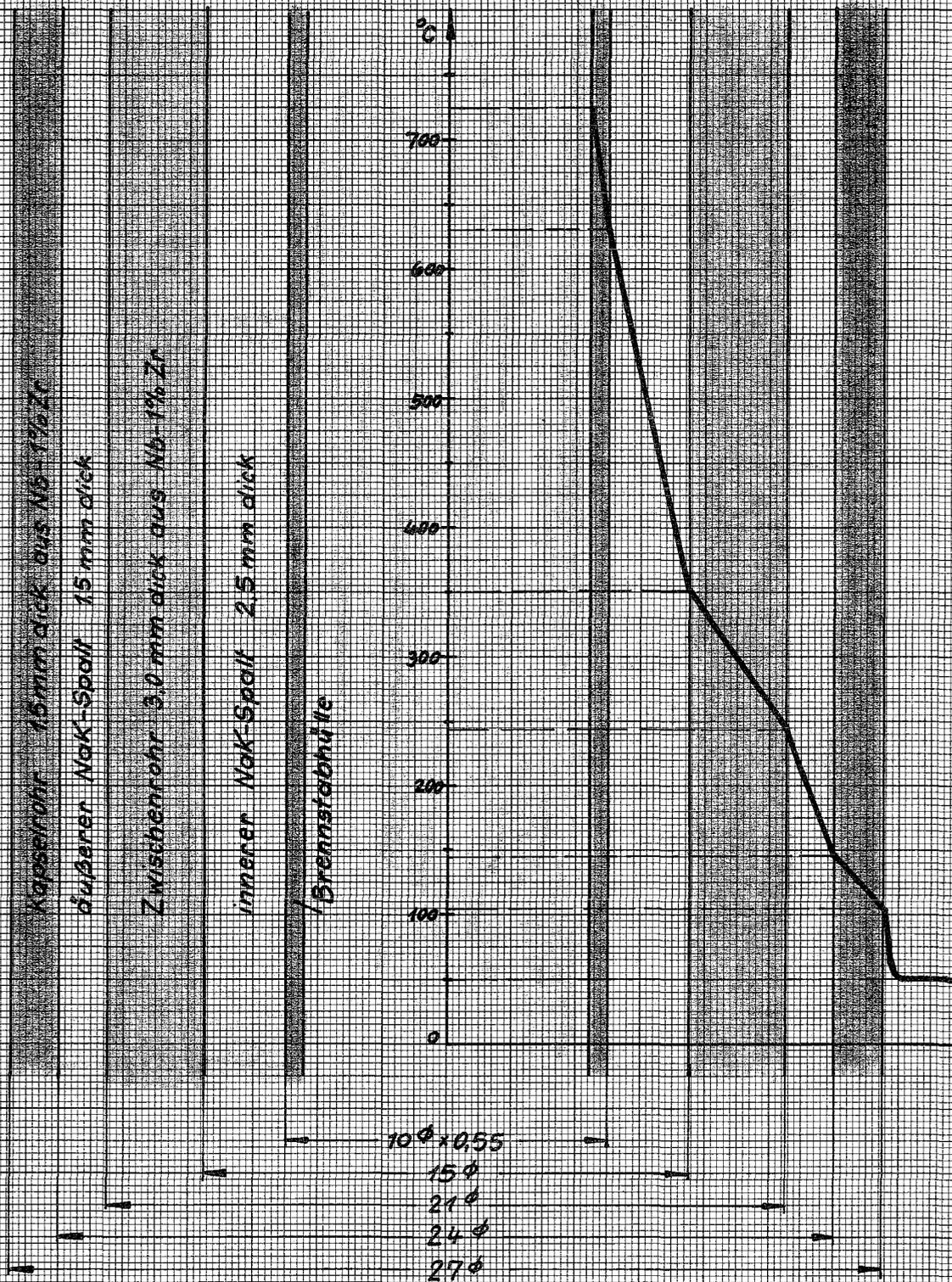


*Brennstab mit Zentraltemperaturmessung*



**Abb. 3**  
**Testbrennstab**

# Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel vom Typ 7 (Stableistung $\lambda = 1150 \text{ W/cm}$ )



**Abb. 4**

# NaK-Kapsel zur Bestrahlung von Karbid - Brennstäben (Typ 7)

## Can-temperatur als Funktion der Anzeige

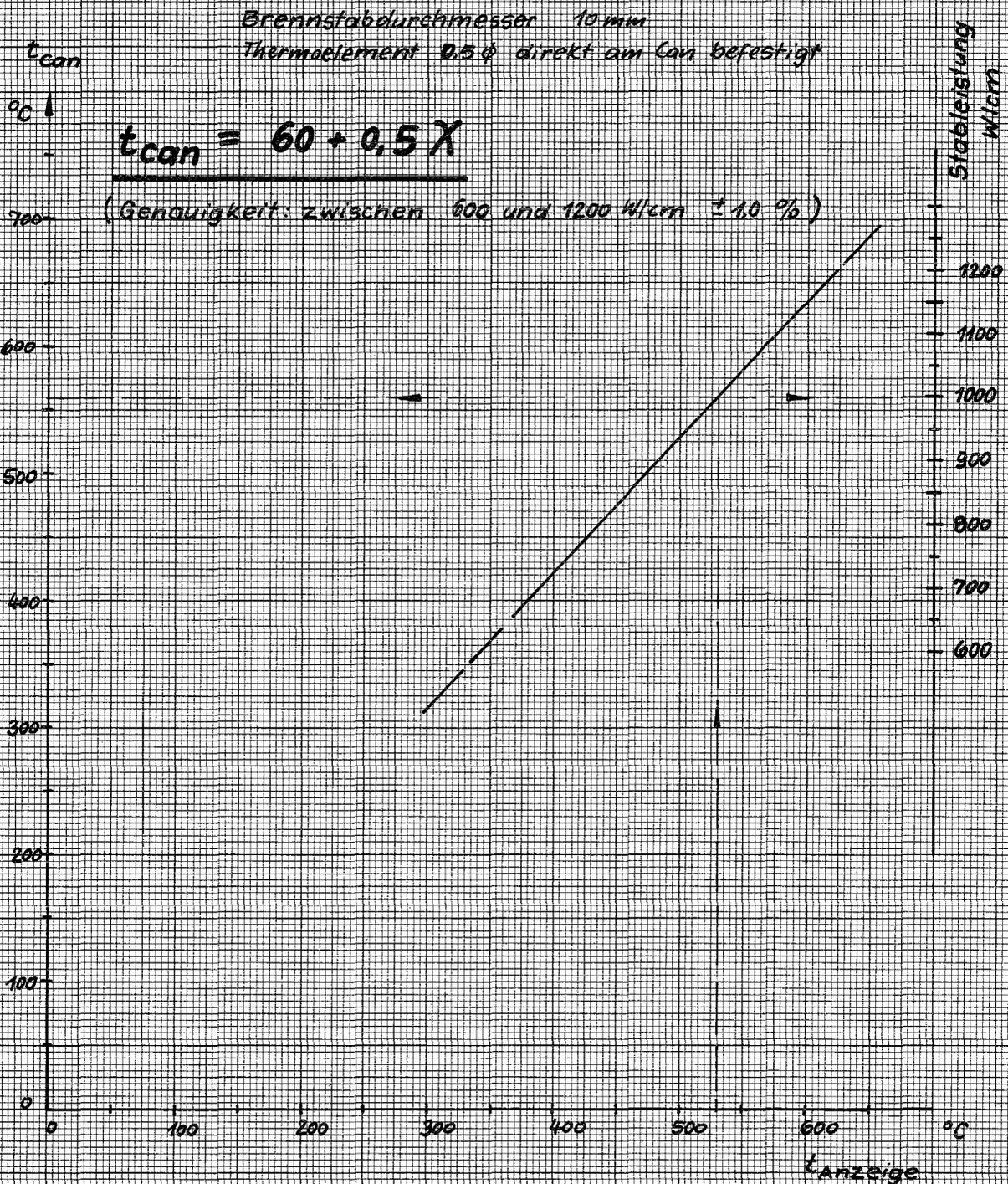


Abb. 5

**Zeitlicher Druckverlauf einer NAK-Wasser-Reaktion bei Leck am unteren Kapselende (Versuch Nr.3)**

$1 \text{ mm} \hat{=} 2 \text{ kpl/cm}^2$



**Abb. 6**



