

KfK 2989  
August 1980

# **Abschlußbericht über Entwicklung und Betrieb von Einwandigen NaK-Kapseln zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben im FR2**

H. E. Häfner, K.-D. Philipp  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M   K A R L S R U H E

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KfK 2989

Abschlußbericht über Entwicklung und Betrieb von Einwandigen NaK-  
Kapseln zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben im FR2

---

H.E. Häfner

K-D. Philipp

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003**

### Zusammenfassung:

Im Oktober 1979 ist die seit 1971 im FR2 laufende Serie von Karbidstabbestrahlungen der Versuchsgruppe 6 abgeschlossen worden. Diese Bestrahlungsexperimente waren als Parametertests angelegt und führten zusammen mit der BR2-Versuchsserie Mol 11 zu dem Karlsruher Karbid-Referenzkonzept.

Insgesamt sind im FR2 19 Karbidbrennstäbe von 475 mm Länge mit einem Hüllrohr aus dem Werkstoff 1.4988 von 10 mm  $\varnothing$  x 0,55 mm Wand eingesetzt worden. Dabei wurden Stableistungen von maximal 1230 W/cm bei Hüllrohroberflächentemperaturen bis zu 675°C gefahren. Der maximale Abbrand von 10 % wurde nach 856 Volllast-Tagen Bestrahlungsdauer erreicht.

Die Brennstäbe sind einzeln in sogenannten Einwandigen NaK-Kapseln bestrahlt worden, d.h. das hochreaktive Flüssigmetall war nur durch eine Wand vom Reaktorkühlwasser getrennt. Wegen des vermuteten Sicherheitsrisikos sind daher bei der Entwicklung dieser Bestrahlungseinrichtung ausgedehnte Sicherheitsüberlegungen angestellt worden.

Die Hüllrohrtemperatur wurde an jedem Brennstab durch sechs auf der Hülle befestigte Chromel/Alumel-Thermoelemente gemessen. An sechs Stäben mit Argonbindung ist die Brennstoffzentraltemperatur mittels W5%Re / W26%Re-Thermoelementen gemessen worden; sie lag zu Beginn der Bestrahlung bei ca. 1500°C und sank im Verlaufe der Bestrahlung auf 1000°C und zum Teil darunter ab.

Das Kapselkonzept hat sich außerordentlich gut bewährt. Trotz der langen Standzeiten ist es zu keiner nennenswerten Beeinträchtigung des Reaktorbetriebes gekommen. Den ursprünglichen Bedenken, mit der Legierung Niob-1% Zr ein relativ exotisches Material für eine Einwandige NaK-Kapsel zu verwenden, war durch umfangreiche Voruntersuchungen Rechnung getragen worden. Die visuelle Untersuchung nach der Bestrahlung ergab an keiner der 19 zum Teil sehr lang bestrahlten Kapseln eine Beschädigung irgend eines Kapselteils. Die Kapsel blieb in allen Fällen dicht.

In dem vorliegenden Abschlußbericht werden nach der Aufgabenstellung und der Begründung der Konzeptwahl die Bestrahlungseinrichtung und ihre Montage beschrieben. Danach wird auf die Betriebserfahrungen und -ergebnisse mit den Bestrahlungseinsätzen eingegangen sowie auf die Nachuntersuchungsbefunde an den Kapseln.

Final Report on Development and Operation of Single Walled NaK Capsules  
for Irradiation of High Capacity Fuel Rods in FR2

---

S u m m a r y :

In October 1979 the series of carbide rod irradiations of test group 6 was terminated which had been carried out in FR2 since 1971. These irradiation tests had been designed as parameter tests and together with the BR2 test series Mol 11 they yielded the Karlsruhe Carbide Reference Concept.

In FR2 a total of 19 carbide fuel rods of 475 mm length were irradiated whose cladding tubes were made of material 1.4988 of 10 mm diameter x 0.55 mm wall thickness. Maximum rod powers of 1230 W/cm were attained at cladding tube surface temperatures of up to 675°C. The maximum burnup of 10 % was attained after 856 days irradiation at full load.

The fuel rods were irradiated individually in so-called single walled NaK capsules, which means that the highly reactive liquid metal is isolated from the reactor cooling water by a single wall only. On account of the expected safety hazard extensive safety considerations were therefore made in developing this irradiation facility.

The cladding tube temperature was measured on each fuel rod by six chromel/alumel thermocouples attached to the cladding. On six rods with argon bonding the central fuel temperature was measured by means of W5%Re/W26%Re thermocouples. It was about 1500°C at the beginning of irradiation and decreased during irradiation down to 1000°C and partly below.

The capsule concept proved to perform extremely well. Despite the long service lives there was no noticeable impairment of reactor operation. The original doubts to the effect that the niobium-1 % Zr alloy is a relatively exotic material for use in a single walled NaK capsule was taken into account by comprehensive preliminary investigations. Visual inspection after irradiation showed that no damage at all had occurred on any of the elements making up to the 19 capsules, part of them subjected to very long irradiations. The capsules remained tight in all cases.

In this final report the tasks pursued are outlined and the concept chosen for the irradiation facility is justified and assembly work described. This is followed by a presentation of operating experience and results derived from the irradiation rigs and by indication of the post-examination findings for the capsules.

## Zusammenfassung:

Im Oktober 1979 ist die seit 1971 im FR2 laufende Serie von Karbidstabbestrahlungen der Versuchsgruppe 6 abgeschlossen worden. Diese Bestrahlungsexperimente waren als Parametertests angelegt und führten zusammen mit der BR2-Versuchsserie Mol 11 zu dem Karlsruher Karbid-Referenzkonzept.

Insgesamt sind im FR2 19 Karbidbrennstäbe von 475 mm Länge mit einem Hüllrohr aus dem Werkstoff 1.4988 von 10 mm  $\varnothing$  x 0,55 mm Wand eingesetzt worden. Dabei wurden Stableistungen von maximal 1230 W/cm bei Hüllrohroberflächentemperaturen bis zu 675°C gefahren. Der maximale Abbrand von 10 % wurde nach 856 Volllast-Tagen Bestrahlungsdauer erreicht.

Die Brennstäbe sind einzeln in sogenannten Einwandigen NaK-Kapseln bestrahlt worden, d.h. das hochreaktive Flüssigmetall war nur durch eine Wand vom Reaktorkühlwasser getrennt. Wegen des vermuteten Sicherheitsrisikos sind daher bei der Entwicklung dieser Bestrahlungseinrichtung ausgedehnte Sicherheitsüberlegungen angestellt worden.

Die Hüllrohrtemperatur wurde an jedem Brennstab durch sechs auf der Hülle befestigte Chromel/Alumel-Thermoelemente gemessen. An sechs Stäben mit Argonbindung ist die Brennstoffzentraltemperatur mittels W5%Re / W26%Re-Thermoelementen gemessen worden; sie lag zu Beginn der Bestrahlung bei ca. 1500°C und sank im Verlaufe der Bestrahlung auf 1000°C und zum Teil darunter ab.

Das Kapselkonzept hat sich außerordentlich gut bewährt. Trotz der langen Standzeiten ist es zu keiner nennenswerten Beeinträchtigung des Reaktorbetriebes gekommen. Den ursprünglichen Bedenken, mit der Legierung Niob-1% Zr ein relativ exotisches Material für eine Einwandige NaK-Kapsel zu verwenden, war durch umfangreiche Voruntersuchungen Rechnung getragen worden. Die visuelle Untersuchung nach der Bestrahlung ergab an keiner der 19 zum Teil sehr lang bestrahlten Kapseln eine Beschädigung irgend eines Kapselteils. Die Kapsel blieb in allen Fällen dicht.

In dem vorliegenden Abschlußbericht werden nach der Aufgabenstellung und der Begründung der Konzeptwahl die Bestrahlungseinrichtung und ihre Montage beschrieben. Danach wird auf die Betriebserfahrungen und -ergebnisse mit den Bestrahlungseinsätzen eingegangen sowie auf die Nachuntersuchungsbefunde an den Kapseln.

Final Report on Development and Operation of Single Walled NaK Capsules  
for Irradiation of High Capacity Fuel Rods in FR2

---

S u m m a r y :

In October 1979 the series of carbide rod irradiations of test group 6 was terminated which had been carried out in FR2 since 1971. These irradiation tests had been designed as parameter tests and together with the BR2 test series Mol 11 they yielded the Karlsruhe Carbide Reference Concept.

In FR2 a total of 19 carbide fuel rods of 475 mm length were irradiated whose cladding tubes were made of material 1.4988 of 10 mm diameter x 0.55 mm wall thickness. Maximum rod powers of 1230 W/cm were attained at cladding tube surface temperatures of up to 675°C. The maximum burnup of 10 % was attained after 856 days irradiation at full load.

The fuel rods were irradiated individually in so-called single walled NaK capsules, which means that the highly reactive liquid metal is isolated from the reactor cooling water by a single wall only. On account of the expected safety hazard extensive safety considerations were therefore made in developing this irradiation facility.

The cladding tube temperature was measured on each fuel rod by six chromel/alumel thermocouples attached to the cladding. On six rods with argon bonding the central fuel temperature was measured by means of W5%Re/W26%Re thermocouples. It was about 1500°C at the beginning of irradiation and decreased during irradiation down to 1000°C and partly below.

The capsule concept proved to perform extremely well. Despite the long service lives there was no noticeable impairment of reactor operation. The original doubts to the effect that the niobium-1 % Zr alloy is a relatively exotic material for use in a single walled NaK capsule was taken into account by comprehensive preliminary investigations. Visual inspection after irradiation showed that no damage at all had occurred on any of the elements making up to the 19 capsules, part of them subjected to very long irradiations. The capsules remained tight in all cases.

In this final report the tasks pursued are outlined and the concept chosen for the irradiation facility is justified and assembly work described. This is followed by a presentation of operating experience and results derived from the irradiation rigs and by indication of the post-examination findings for the capsules.

Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabenstellung und Allgemeines
2. Grundsätzliche Überlegungen zum Kapselkonzept
3. Beschreibung der Bestrahlungskapsel
4. Kurze Montagebeschreibung
5. Betriebserfahrungen und -ergebnisse
6. Nachuntersuchungsbefunde an den Bestrahlungskapseln
7. Literatur
8. Tabellen und Abbildungen

## 1. Aufgabenstellung und Allgemeines

In die Strategieüberlegungen zur Einführung fortgeschrittener Schnellbrutreaktoren wurde etwa seit 1968 im KfK auch das Konzept des Hochleistungsbrüters mit karbidischem Brennstoff einbezogen. In der ersten Stufe eines entsprechenden Karbidelemententwicklungsprogrammes wurden dann unter der Bezeichnung Versuchsgruppe (Vg) 6 Bestrahlungstests an Einzelstäben mit nachfolgenden Auslegungsdaten im thermischen Fluß des FR2 vorgesehen:

- Stablänge	475 mm
- Hüllrohr, Werkstoff-Nr. 1.4988	10 mm $\varnothing$ x 0,55 mm Wand
- Brennstoff	(85 % U, 15 % Pu) C
- Stableistung	max. 1150 W/cm
über Bestr.-zeit gemittelt	1000 W/cm
- Zielabbrand	max. 75000 MWd/tM
- Hüllrohroberflächentemperatur	max. 635°C
- Teststäbe	7 St. mit Helium-Bindung 50 $\mu$ m Spalt (Vg6A) 6 St. mit Argon-Bindung 90 $\mu$ m Spalt (Vg6C) 3 St. mit Helium-Bindung 500 $\mu$ m Spalt (Vg6D) 3 St. mit Natrium-Bindung 500 $\mu$ m Spalt (Vg6E)

In den Stäben mit Argon-Bindung sollte die Brennstoffzentraltemperatur gemessen werden. Den Stabaufbau für Vg6A und Vg6C zeigt Abbildung 1.

Für diese Anforderungen ist im Institut für Material- und Festkörperforschung eine sogenannte Einwandige NaK-Kapsel entwickelt worden /1, 2/, die sich in der Zwischenzeit ausgezeichnet bewährt hat und mit der insofern auch eine äußerst flexible Bestrahlungskapsel zur Verfügung steht, als damit bei nur geringen Modifikationen Stäbe der verschiedensten Abmessungen bei sehr unterschiedlichen Bedingungen bestrahlt werden können.

Die Kapselbestrahlungen begannen im FR2 im Jahre 1971 und wurden im Spätjahr 1979 abgeschlossen. Eine weitere Serie von Einzelstabbestrahlungen lief im FR2-Helium-Loop und im epithermischen Fluß des BR2 in Mol. Im schnellen Fluß des DFR wurden außerdem drei Kleinbündel bestrahlt. Insgesamt handelt es sich um ca. 80 Karbidstäbe, über die im Rahmen des Karlsruher Projektes Schneller Brüter Bestrahlungserfahrungen vorliegen.

Begleitet wurden diese Stabparameter-tests durch ausgedehnte spezielle Kriech- und Schwelluntersuchungen an Karbidbrennstoffen.

Über die Auslegung der Karbidstäbe und ihre wissenschaftliche Auswertung bzw. die Nachuntersuchungsergebnisse wird an anderer Stelle berichtet /3,4,5/, der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Bestrahlungseinrichtung für diese Experimente im FR2.

## 2. Grundsätzliche Überlegungen zum Kapselkonzept

Für die konstruktive und thermodynamische Auslegung der 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 Stabileistung 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 Wärmeübergangsmittel zwischen Brennstab und Kapselwand sind gut wärmeleitende Flüssigmetalle besonders geeignet, die den Vorteil haben, daß keine allzu engen Maßtoleranzen für die Kapseldimensionierung gefordert zu werden brauchen. Hier bietet sich natürlich zuallererst das Reaktorkühlmittel Natrium an. Prinzipiell sind bei hohen Stabileistungen Kapselschichtmaterialien mit außergewöhnlich guten Wärmeleiteigenschaften notwendig, wenn man auf den gewünschten Kapseldurchmesser kommen will. Die eutektische NaK-Legierung stellt hier bereits einen Kompromiß dar. 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 Leistung der Testbrennstäbe durch die Kapselmaterialien möglichst wenig beeinflußt werden.

Als Anfang der Sechziger Jahre die ersten Brennstabbestrahlungen im FR2 geplant wurden, war aber an eine einwandige Kapsel mit einem Alkalimetall als Wärmeübertragungsmittel nicht zu denken. Es schien bei dem damaligen Kenntnisstand sicherheitstechnisch nicht vertretbar, solche reaktiven Flüssigmetalle nur durch eine Wand vom Reaktorkühlwasser getrennt zu halten. Aus diesem Grund wurde in den

ersten Jahren das eutektische Blei-Wismut mit einem Schmelzpunkt von  $125^{\circ}\text{C}$  als Wärmeübertragungsmittel in den FR2-Kapseln verwendet. Mit zunehmender Erfahrung im Zuge der Schnellbrüterentwicklung wagte man dann in einer zweiten Stufe zwar die Brennstäbe mit Natrium zu umgeben, man trennte es aber durch eine zweite Wand unter Zwischenschaltung einer Blei-Wismut-Schicht oder eines Gasspaltens gewissermaßen doppelt vom Reaktorkühlwasser ab. Nach diesen Prinzipien wurden über 100 Kapselversuchseinsätze bestrahlt. Dabei hat sich gezeigt, daß eine über lange Zeit sichere Bestrahlung von längeren Brennstäben in Kapseln nicht ohne weiteres möglich ist, solange man als Wärmeübertragungsmedien Flüssigmetalle verwendet, die beim Reaktorabschalten erstarren.

Entsprechend dem axialen Neutronenflußdichte- und Leistungsverlauf über die Reaktorhöhe ist die maximale Leistung und Hülltemperatur des Teststabes etwa in Coremitte zu erwarten. Bei längeren Stäben liegt dann die Leistung bzw. Hülltemperatur an den oberen und unteren Stabenden i. a. deutlich unter den Maximalwerten.

Das hat zur Folge, daß beim Reaktorstart das wärmeübertragende Medium (z.B. Blei-Wismut oder Natrium) innerhalb der Kapsel etwa im Bereich der 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 unter Umständen beim darauffolgenden Anfahren des Reaktors Burnouts der Brennstabhülle verursachen. Außerdem kann es beim ersten Anfahren in Stabmitte infolge der Schmelzexpansion der Flüssigmetalle zu unzulässigen Beanspruchungen von Brennstabhülle und Kapselrohr kommen. Bei Reaktorschnellabschaltungen 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 geringer, weil hier durch geeignete Wärmedämmung ein "gezieltes" Erstarren erreicht werden kann, so daß Erstarrungslunker vor allem an bestimmten ungefährlichen Stellen auftreten.

Bei Langproben ist dagegen aus diesen Erwägungen heraus die Verwendung der eutektischen Natrium-Kalium-Legierung (22 % Na, 78 % K) als Wärmeübertragungsmedium innerhalb der Kapsel vorteilhaft, die zwar eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Natrium hat, aber bereits bei  $-11^{\circ}\text{C}$  flüssig ist.

Wegen der schlechteren Wärmeleitfähigkeit des NaK gegenüber dem Na (nahezu Faktor 3) sind aus thermodynamischen Gründen vor allem bei höheren Stabileistungen doppelwandige Sicherheitskapselkonzepte nicht mehr möglich. Auch die Einwandige NaK-Kapsel ist bei hohen Leistungen nur durch einen "Trick" möglich:

Der sich im NaK-Spalt bei der hohen Stabileistung einstellende Temperaturgradient ist so steil, daß der Kapseldurchmesser bei der gewünschten Can-Temperatur 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 Einfangsquerschnittes für thermische Neutronen, am besten Al geeignet; aber auch Nb ist noch gut brauchbar.

Im vorliegenden Fall ist ein Zwischenrohr von 21 mm  $\varnothing$  x 3 mm Wand aus Niob-1 % Zr gewählt worden. Dadurch wird ein Kühlwassersieden an der Kapseloberfläche vermieden und gleichzeitig einer Konvektion im NaK-Spalt entgegengewirkt.

Bei höheren Stabileistungen, z.B. 1300 W/cm, müßte das Zwischenrohr aus Al gefertigt werden, wenn man die gegebene Brennstabtemperatur nicht überschreiten wollte.

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

Das aus all den genannten Gründen gewählte 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 Can-Temperatur ein weiter Bereich überdeckt werden.

Das Konzept ist später auch am BR2 in Mol in der FASOLD-Kapsel für die Mol 11-Experimente eingesetzt worden und hat sich auch hier voll bewährt.

Als Kapselwandmaterial wird ebenfalls die hochwarmfeste Niob-Legierung mit 1 % Zr eingesetzt. Dieses Material ist gut schweißbar und hat neben den Vorteilen von Zircaloy-2 (geringe thermische Ausdehnung und damit geringe Wärmespannungen) vor allem den entscheidenden Vorteil einer gegenüber Zry-2 fünfmal besseren

Wärmeleitfähigkeit. Auch bei relativ dickwandigen Kapselrohren ergeben sich trotz der hohen Stabileistungen kaum nennenswerte Spannungen; zudem besitzt das Material außergewöhnlich gute Festigkeitseigenschaften, auch nach Bestrahlung. Die über diese Legierung verfügbaren Daten wurden in /6/ zusammengestellt. Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit diesem Material durchgeführt, deren Ergebnisse in /7/ enthalten sind.

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

Zu dem Schritt zur Einwandigkeit des gewählten Kapselkonzepts haben letztlich erst die vorausgegangenen jahrelangen guten Erfahrungen und das bei der Bestrahlung von 90 Vorgängerkapseln erworbene knowhow ermutigt.

Allerdings war dieser Schritt nur unter besonders sorgfältiger Berücksichtigung vieler sicherheitstechnischer Aspekte möglich, die dann vor der Betriebsgenehmigung für die Experimente einen breiten Raum eingenommen haben.

So sind z.B. die Auswirkungen von NaK/Wasser-Reaktionen im Falle eines Kapsellecks in mehreren Versuchsreihen studiert worden, angefangen von ersten tastenden Versuchen in offenen Wasserbecken über einfache Modellversuche bis hin zu Versuchen in einem instrumentierten Wasserkreislauf, der die Verhältnisse im FR2 recht realistisch erfaßte /8/.

Den von den für die Sicherheit des FR2 Zuständigen geäußerten Bedenken gegen eine Einwandige NaK-Kapsel und auch speziell gegen das relativ exotische Kapselmaterial Nb-1 % Zr konnte so schließlich durch verhältnismäßig umfangreiche Voruntersuchungen und Sicherheitsbetrachtungen Rechnung getragen werden.

Einzelheiten zu den sicherheitstechnischen Überlegungen sind aus /1, 2/ zu entnehmen.

### 3. Beschreibung der Bestrahlungskapsel

Die eigentliche Bestrahlungskapsel hängt mit ihrer Länge von ca. 3 m an einem etwa ebenso langen Oberteil und ist von einer Kühlwasserführungseinheit umgeben.

Zum Verständnis der folgenden Kapselbeschreibung dienen die Abbildungen 2, 3 und 4.

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 Durchmesser sechs Thermoelemente von 1 mm Durchmesser zur Messung der Brennstaboberflächentemperatur hindurchgeführt und hart eingelötet.

An ihrem oberen Ende ist die Nb-Kapsel mit einem Trägerrohr aus Edelstahl verschraubt, durch das die Thermoelemente bis an die Trennstelle zum Oberteil (26-polige Steckverbindung) geführt werden. Bei einem Teil der Kapseln wurde diese Schraubverbindung zwischen Edelstahl und Niob durch Hartlötung und bei einem anderen Teil durch Al-Ring abgedichtet. 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 Na-Kapsel ("Durchführungsstopfen") hindurchgeführt. Die Abdichtung wird dadurch erreicht, daß der Gewindeendstopfen des Brennstabes mit dem oberen Kapselendstopfen fest verlötet wird.

Aus Gründen der Betriebssicherheit wurde der guten und sicheren Ausführung der Kapsel besonderes Augenmerk geschenkt. So wurden 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 erfolgte nach einem detaillierten Plan und wurde sorgfältig überwacht (Abschnitt 4). Nach jedem Montageschritt wurde eine Prüfung, Reinigung und Dichtheitsprüfung (Druckprobe) durchgeführt.

Um eine größtmögliche Sicherheit der Schweißnähte zu erreichen, wurde zunächst eine Reihe von Probeschweißungen durchgeführt, die metallographisch untersucht wurden. Jede Schweißnaht an der eigentlichen Bestrahlungskapsel wurde mehrfach

geröntgt, um Fehlstellen (Poren, Risse) ausfindig zu machen. Es wurde 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  $\varnothing$  x 3,0 ) ist so gewählt, daß man auf den gewünschten Kapseldurchmesser bzw. die ohne Sieden noch abführbare Wärmestromdichte kommt.

Um eine NaK-Konvektion und damit eine Verfälschung der Hüllrohrtemperaturen sicher auszuschließen ist innerhalb des Zwischenrohres noch zusätzlich ein dünnwandiges sogenanntes Antikonvektionsrohr aus Edelstahl eingebracht.

Über den unteren Endstopfen wird nach weitgehender Assemblierung das flüssige NaK eingefüllt. Solche Montagetechniken wurden z.B. in /9/ eingehend beschrieben.

Die sechs Thermoelemente zur Messung der Canteperatur in jeder Kapsel wurden unterhalb des oberen Endstopfens, in dem sie hart eingelötet sind, durch eine Wendel zugentlastet und an der Meßstelle durch aufgepunktete dünne Blechstreifen fest auf die Brennstabhülle aufgepreßt (Abbildung 7). Anfangs (KVE 91-94) sind Thermoelemente mit am Meßende von 1 mm auf 0,5 mm verjüngtem Manteldurchmesser eingesetzt worden, später (ab KVE 99) glatte Thermoelemente von 1 mm  $\varnothing$ .

In Abbildung 5 sind die Hüllrohrtemperaturen und Stableistungen in Abhängigkeit von den angezeigten Temperaturen für beide Thermoelementversionen aufgetragen. Abbildung 6 zeigt den Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel für eine Stableistung von 1150 W/cm.

#### 4. Kurze Montagebeschreibung (Abbildung 4)

##### Vorbereitungen:

1. Anfertigung aller Einzelteile.
2. Prüfung der Teile auf Maßhaltigkeit und zum Teil auf Dichtheit.
3. Schweißung von Kapselkopf, Verlängerungsrohr, Trägerrohr und Übergangskonus sowie Kapselrohr und Einfüllendstopfen.
4. Prüfung dieser Arbeiten (Röntgen, Dichtheit).
5. Bereitstellung von geprüftem Oberteil, Wasserführungsrohr, Rückführrohr-Oberteil und Rückführrohr-Auslaufteil.

Montage der Brennstab-Baugruppe:

1. Verlöten der Thermoelemente (Einlöten in die Schutzhülsen) nach besonderen Verdrahtungs- und Arbeitsplänen.
2. Einschrauben des Brennstabes mit seinem zentralen Thermoelement.
3. Einlöten von Brennstab und Thermoelementen mit Schutzhülsen in dem Verbindungsstopfen nach den Arbeitsplänen von IT/M-V.
4. Dichtheitsprüfungen und elektrische Prüfung der Thermoelemente.
5. Befestigung der Thermoelemente auf dem Brennstab nach Verdrahtungsplan (Aufpunkten der Befestigungsbügel).
6. Aufschieben aller Einbauteile (entsprechend Zeichnung) auf den Brennstab, überschieben der Kapselrohr-Baugruppe.
7. Verschweißung von Kapselrohr und Verbindungsstopfen.
8. Elektrische Prüfung der Thermoelemente, Röntgen und Dichtheitsprüfung der gesamten Baugruppe unter Innendruck (90 bar).

Montage der restlichen Kapsel:

1. Einfüllen des Flüssigmetalls in der Box nach Inertgasspülung und Ausheizen nach besonderem Plan.
2. Verschließen des Einfüllendstopfens durch induktives Abschmelzen des Füllhalses.
3. Dichtheitsprüfung und Röntgenkontrolle, aufschrauben des Einführstücks, sichern mit der Sicherungsscheibe.
4. Anschrauben des Zwischenbolzens, anbringen des Halterohres mittels Stift, Festlegung der Thermoelemente bzw. der Ausgleichsleitung des Zentral-Thermoelements auf dem Halterohr, wendeln am oberen Ende.
5. Überschieben der Trägerrohr-Baugruppe, aufschrauben mit Ringdichtung auf den Verbindungsstopfen.
6. Anlöten der Thermoelemente an den Stecker nach besonderem Verdrahtungsplan; elektrische Prüfungen der Thermoelemente.
7. Ausguß des Steckers mit Araldit.
8. Anschweißen der Steckergruppe an den Kapselkopf.
9. Heliumfüllung und Zuschweißen der Kapsel, Kennzeichnung mit Elektroschreiber.
10. Dichtheits- und elektrische Prüfungen.
11. Anbringen der Dichtringe und der Schraubhülse.

Montage zum Kapselversuchseinsatz :

1. Anschrauben der Kapsel an das Oberteil.
2. Anschrauben des Rückführrohr-Oberteils an das Oberteil.
3. Aufschieben des Wasserführungsrohres auf die Kapsel.
4. Anschrauben des Rückführrohr-Auslaufteils zur Kühlwasserführung.
5. Prüfung der elektrischen Anschlüsse.
6. Geradheitsprüfung.
7. Prüfung des Wasser-Durchflusses, Druckverlustes und des Notkühlsystems.
8. Trocknen des Kapselversuchseinsatzes im FR2-Trockenofen.
9. Prüfung der elektrischen Anschlüsse vor dem Transport in den Reaktor.

5. Betriebserfahrungen und -ergebnisse

Seit Juni 1971 sind im FR2 19 sogenannte Einwandige NaK-Kapseln mit je einem Karbidbrennstab von ca. 0,5 m Länge bestrahlt worden. Acht weitere Kapselversuchseinsätze dieser Art befinden sich derzeit mit jeweils drei übereinander liegenden Oxidstäben mit ca. 0,75 m Gesamtlänge im Reaktor bzw. sind in Vorbereitung (Versuchsgruppe 7).

Mit den bestrahlten Karbidstäben wurden Stableistungen von maximal 1230 W/cm bei Hüllrohroberflächentemperaturen bis 675°C erreicht. Die maximale Bestrahlungszeit eines KVE dieser Art betrug 856 Vollasttage ( $\approx 20.500$  h); das ist die längste Standzeit aller KVE im FR2 überhaupt. Der entsprechende Abbrand beträgt 99.000 MWd/tM, berechnet aus den gemessenen Hüllrohrtemperaturen.

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Betriebsdaten der 19 Karbidstäbe in dem beschriebenen Kapseltyp und deutet kurz die betrieblichen Vorkommnisse und Nachuntersuchungsergebnisse einer ersten visuellen Inspektion an. Über die eigentliche wissenschaftliche Auswertung der Brennstabbestrahlungen wurde anderweitig berichtet.

Die Erfahrungen mit dieser Bestrahlungseinrichtung sind, abgesehen von kleineren Anfangsschwierigkeiten, sehr positiv. Wenn man davon absieht, daß die ersten vier KVE wegen Unregelmäßigkeiten in der Anzeige der Hüllrohrtemperaturen vorzeitig aus dem Reaktor genommen werden mußten, hat es keine Betriebsstörungen am FR2 durch diese Experimente gegeben.

Bei den ersten vier KVE 91 bis 94 waren zur Messung der Hüllrohrtemperatur Chromel/Alumel-Thermoelemente von 0,5 mm Manteldurchmesser verwendet worden. Bei zwei dieser vier KVE (91 und 93) waren die Schwankungen in der Temperaturanzeige so stark, daß die Bestrahlung schon frühzeitig abgebrochen wurde. Bei KVE 94 wurde aus gleichem Grund die Bestrahlung nach 106 Tagen vorzeitig beendet. Da zum damaligen Zeitpunkt eine entsprechende Nachuntersuchung nicht möglich war, konnte nicht ausgeschlossen werden, daß die Temperaturschwankungen von Stabdefekten herrührten oder solche zur Folge haben könnten. Hinzu kam, daß sich die dünnen Thermoelemente als relativ störanfällig erwiesen. Eine Weiterbestrahlung dieser Kapseln schien deshalb damals nicht vertretbar. Heute ist ziemlich sicher, daß diese Temperaturschwankungen durch Konvektionsbewegung im NaK-Spalt ausgelöst wurden. Mit dem Einbau eines zusätzlichen dünnwandigen Antikonvektionsrohres und der Verwendung von 1 mm dicken Thermoelementen ab KVE 99 waren diese Anfangsschwierigkeiten überwunden. Danach fiel im Durchschnitt während der langen Bestrahlungszeiten nur noch ein Thermoelement von sechs pro Kapsel aus.

Bei KVE 92 wurde versehentlich zu wenig NaK eingefüllt, weshalb die Thermoelemente am oberen Brennstoffende (Füllstandsdetektion !) sofort beim Reaktorstart eine starke Überhitzung anzeigten. Der Einsatz mußte aus dem Reaktor genommen werden.

Die darauffolgenden 15 Bestrahlungseinsätze dieses Typs (ab KVE 99) arbeiteten zur vollsten Zufriedenheit, und es gab keinerlei Betriebsstörungen mehr.

Bei den ersten KVE wurde durch ein Thermoelement die Betriebstemperatur der Löt durchführung der Thermoelemente durch den Kapselstopfen kontrolliert. Es wurden keine kritischen Werte erreicht.

Eine gewisse Unregelmäßigkeit in der Temperaturanzeige trat bei dem relativ lang bestrahlten KVE 145 auf. Mit zunehmender Laufzeit zeigten die drei oberen Thermoelemente 8, 9 und 10 auf dem Hüllrohr, die auch die Funktion einer NaK-Füllstandsdetektion haben, unnatürlich unterschiedliche Werte an. Und zwar lag die Anzeige von TE 9 ca. 20 K über der von TE 8 und ca. 50 K über der von TE 10. Die Nachuntersuchung wird zeigen müssen, ob sich in diesem Bereich eine Störung der Wärmeabfuhr eventuell durch angelagerte Schlacken, Korrosionsprodukte, Oxide oder gar Gasblasen aus einem Brennstabdefekt ergeben hat. Im Gegensatz

zu KVE 145 ist bei KVE 144 die Anzeige von TE 9 um 20-30 K zu niedrig. Hier könnte sich u.U. das TE mit seinen Haltebügeln von der Stabhülle abgelöst haben. Möglicherweise war aber auch die exzentrische Lage von Brennstofftabletten für diese Unregelmäßigkeiten verantwortlich.

Ein unvorhergesehener Zwischenfall ereignete sich mit KVE 115 in der Heißen Zelle des FR2. Bei diesem KVE war vor der Bestrahlung eine undichte Lötnaht am Thermoelement-Durchführungsstopfen mit einem Antimonausguß abgedichtet worden. Beim Versuch, das zentrale Hochtemperatur-Thermoelement im Karbidbrennstab nach der Bestrahlung zu eichen, und dem damit verbundenen Aufheizen der Kapsel in einem Rohrofen ist die Aluminium-Dichtung zwischen Kapsel und Trägerrohr abgeschmolzen, so daß radioaktive Folgeprodukte aus der Antimonbestrahlung austreten konnten. Gleichzeitig hat sich beim Aufheizen ein Eutektikum zwischen der Edelstahlhülle und dem Karbidbrennstoff gebildet, weshalb es zu einem teilweisen Abschmelzen des Brennstabes kam. Nun ist die FR2-Zelle zwar für solche heißen Arbeiten ausgerüstet, doch verursachte die notwendige Dekontamination der Zelle einigen Aufwand.

Bei der Montage der Kapseln hatte es anfangs Schwierigkeiten gegeben, die sehr heikle Lötverbindung zwischen dem Kapseldurchführungsstopfen aus Nb-1 % Zr und dem Edelstahlträgerrohr dicht zu bekommen. Aus diesem Grund wurde auf eine Al-Dichtung übergegangen.

Bei den sechs KVE zwischen 104-115 der Versuchsgruppe 6C waren zur Messung der Brennstoffzentraltemperatur Hochtemperaturthermoelemente aus W5%Re/W26%Re von 1,6 mm Manteldurchmesser eingesetzt. Die Brennstoffzentraltemperatur lag im allgemeinen bei Bestrahlungsbeginn bei 1500°C. Durch Einflüsse wie z.B. zunehmend besseren Wärmeübergang zwischen Brennstoff und Hülle und abnehmende Stableistung fiel die Temperaturanzeige im Laufe der Zeit z.T. auf unter 1000°C zurück. Es ist allerdings nicht ganz geklärt, ob dieser starke Temperaturabfall echt ist oder durch Thermoelementdefekte verfälscht wurde.

Eines der eingesetzten Hochtemperatur-Thermoelemente wurde bereits bei der Montage defekt, drei der fünf übrigen blieben über 240 bis 270 Tage lang intakt, die restlichen beiden funktionierten 20 bzw. 80 Tage lang.

Da mit zunehmendem Abbrand die Leistung der Stäbe abnimmt, wurden einzelne KVE im Reaktor gelegentlich auf Positionen höherer Neutronenflußdichte umgesetzt,

um möglichst lange Zeit bei einer mittleren Stableistung (Zeitmittel) um 1.000 W/cm zu bleiben. Bei sehr langen Standzeiten war jedoch ein Absinken der Stableistung auf deutlich niedrigere Mittelwerte nicht mehr zu vermeiden.

## 6. Nachuntersuchungsbefunde an den Bestrahlungskapseln

Da der Bestrahlung der hier behandelten Versuchseinrichtung bereits 90 im Aufbau ähnliche Kapselversuchseinsätze vorausgegangen sind, waren die unkomplizierten und somit nicht störanfälligen Kapselkomponenten (z.B. Kapselkopf, Steckverbindung, Trägerteile) bereits soweit bekannt, daß sich die Nachuntersuchung auf die eigentliche den Brennstab aufnehmende NaK-Kapsel beschränken konnte. Diese war aber umso interessanter, als dafür erstmals die nicht ganz problemlose Legierung Niob-1 % Zr verwendet wurde. Vor allem mit der Herstellung spezifikationsgerechter Rohre und der Lötverbindung zwischen diesem Kapselmaterial und dem Trägerrohr aus Edelstahl hatte es anfangs Schwierigkeiten gegeben.

Die visuelle Untersuchung nach der Bestrahlung ergab nun an keiner der 19 z.T. sehr lang bestrahlten Kapseln eine Beschädigung irgend eines Kapselteils. Die Kapsel blieb in allen Fällen dicht. Auch die ab KVE 115 anstatt der Lötverbindung zwischen Kapsel und Trägerrohr eingesetzte Al-Dichtung führte zu keiner Beanstandung. Eine genauere Vermessung der Kapsel wurde nur anfangs durchgeführt. Es kam zu keinen nennenswerten Verformungen. Wegen Überlastung der Heißen Zellen, aber auch weil die visuelle Inspektion dies nicht mehr für notwendig erscheinen ließ, hat man dann auf die Nachvermessung verzichtet. Auch die Überprüfung der elektrischen Werte der Thermolemente zur Messung der Hüllrohrtemperatur wurde an den letzten sieben Kapseln nicht mehr durchgeführt. In den meisten Fällen waren Thermolemente durch Bruch der Schleifen ausgefallen. In wenigen Fällen war auch die Isolation defekt. Insgesamt waren es 16 der 114 eingesetzten Chromel/Alumel-Thermolemente (14 %), die im Betrieb ausgefallen sind. 24 von 114 hatten 0,5 mm Durchmesser; davon waren sechs ausgefallen, also 25 %. Nach dem Übergang auf 1 mm Durchmesser waren die Ausfälle seltener (10 von 90 = 11 %). Die Schleifen- und Isolationswiderstände der Chromel/Alumel-Thermolemente, die intakt blieben, haben sich während der Bestrahlung (maximale Fluenz =  $7 \cdot 10^{21}$  therm. Neutronen/cm<sup>2</sup>) kaum verändert. Die maximal gemessene Zunahme der Schleifenwiderstände betrug ca. 2 %.

In Tabelle 2 sind stichwortartig die Befunde der visuellen Nachuntersuchung an den Bestrahlungskapseln mit den Brennstäben und Thermoelementen angegeben. Dazu noch einige Erläuterungen:

Von den 19 bestrahlten KVE dieser Art sind bisher 15 nach der Bestrahlung untersucht. Die KVE 143, 144 und 145 mit sehr hohen Abbränden stehen noch aus. KVE 92 ist wegen eines Montagefehlers (zu wenig NaK eingefüllt) schon nach Minuten aus dem Reaktor genommen worden; auf eine Nachuntersuchung wurde verzichtet. Die Kapsel war aber ohne Schaden und dicht wie alle anderen auch.

Aus 12 der 15 demontierten Kapseln ließen sich der Brennstab und die Kapseleinbauten ohne Schwierigkeiten herausziehen. Bei KVE 130 war der Prüfling infolge zahlreicher Hüllrohrrisse zerbrochen, bei KVE 104 war eine planmäßige Zerlegung wegen der Hüllrohrrisse und bei KVE 115 wegen der geschilderten Kapselbeschädigung beim TE-Eichversuch in der Zerlegezelle des FR2 nicht möglich. Abbildung 8 zeigt einen Querschnitt durch den KVE 115 mit dem beim Erhitzen der Kapsel auf ca.  $1000^{\circ}\text{C}$  abgeschmolzenen Brennstab. Ursache für das Schmelzen war die eutektische Reaktion zwischen dem Edelstahl 1.4988 der Hülle und dem Urkarbid im Brennstoff, die um  $1000^{\circ}\text{C}$  eintritt. Die Brennstabhülle ist fast völlig weggeschmolzen, auf einem Teil des Umfangs steht nur noch ein dünner Ring. Die Abbildung 9 zeigt, wie die Schmelze am Stab entlang nach unten geflossen ist und auf der Hülle schweißraupenförmige Ablagerungen hinterlassen hat.

Bei KVE 99 hatte der Brennstab einen im Betrieb unbemerkt gebliebenen burn-out erlitten. Wie entsprechende Untersuchungen ergeben haben, waren einzelne Brennstofftabletten wohl bei der Montage entgegen der Kraft einer Niederhaltefeder im Spaltgasplenum des Stabes nach oben gewandert. Somit waren diese Tabletten in der Kapsel nicht mehr vollständig vom Flüssigmetall umgeben, so daß es vermutlich schon beim ersten Anfahren des Reaktors zum burn-out kam, der in Abbildung 10 gezeigt wird.

Nach Abzug der drei Stabschädigungen durch solche äußeren Einflüsse (KVE 92, 99, 115) verbleiben sechs Stäbe aus den KVE 104, 108, 110, 127, 128 und 130 mit echten auslegungsbedingten Schäden. Alle sechs Stäbe weisen z.T. zahlreiche Längsrisse in der Brennstabhülle auf, deren Ursache wohl im relativ starken Schwellen des Karbidbrennstoffs bei hohen Abbränden liegt. Die Abbildung 11 zeigt einen dieser typischen Längsrisse in der Stabhülle aus KVE 104, die bevorzugt unter den Thermoelementen im Bereich ihrer Befestigungsbügel aufgetreten sind.

Wie ebenfalls aus der Tabelle 2 zu ersehen ist, sind in 11 der 15 untersuchten Kapseln die Bügel zur Befestigung der Thermoelemente auf der Stabhülle (aufgepunktete dünne Blechstreifen) auch nach der Bestrahlung in einwandfreiem Zustand. In vier Kapseln hatten sich einzelne Bügel gelöst. Meist handelte es sich um die längsten Thermoelemente Nr. 5 und 6. Der Grund für das Lösen dieser Bügel ist nicht befriedigend geklärt. Es läge nahe, diesen Umstand mit der größten thermischen Differenzdehnung zu erklären, doch wurde in allen Fällen genügend Spiel für thermische Dehnungen vorgesehen.

Weitere Schäden an den Bestrahlungskapseln waren nicht feststellbar; weder ein Korrosionsabtrag an den NaK-benetzten Teilen, noch irgendwelche nennenswerten Reibspuren, Riefen oder Druckstellen von im Kühlwasserstrom vibrierenden Edelstahlteilen an den relativ weichen Rohren aus der Legierung Nb-1 % Zr, die bei so langen Standzeiten ursprünglich befürchtet worden waren.

Um einen groben qualitativen Eindruck von der etwaigen Strahlenversprödung des Kapselmaterials Nb-1 % Zr zu bekommen, wurde aus dem Kapselrohr des KVE 130 (676 Tage Bestrahlungszeit) eine Flachprobe für Biegeversuche herausgeschnitten. Die Dosis an thermischen Neutronen dieser Probe betrug ca.  $5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ . Die Probe brach nach 30-maliger Auslenkung um einen Winkel von  $60^\circ$ ; das Material war also noch recht duktil.

Im übrigen war bei fast allen Brennstäben der radiochemisch bestimmte Abbrand in außerordentlich guter Übereinstimmung mit den aus den Hüllrohrtemperaturen berechneten Werten.

#### Anmerkung:

Die Karbidexperimentserie Vg6 resultiert aus der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe unter der Federführung des IMF III. Hier lag sowohl die wissenschaftliche Betreuung als auch die Entwicklung dieses einwandigen Kapseltyps. Für die notwendigen umfangreichen Sicherheitsbetrachtungen im Hinblick auf mögliche NaK-Wasser-Reaktionen leistete das IRE wertvolle Hilfe. Einige unterstützende Versuche zur Druckausbreitung im Falle solcher Reaktionen wurden bei INTERATOM durchgeführt. Bei der Auswahl des Kapselmaterials Niob-1 % Zr war das IMF II behilflich. Die Erprobung der Löt- und Prüftechniken und die Montage der Bestrahlungseinsätze erfolgte bei IT/M-V. Die Autoren danken an dieser Stelle allen an dem Projekt Beteiligten, insbesondere auch dem Reaktorbetrieb und den mit der Nachuntersuchung in den heißen Zellen befaßten Mitarbeitern.

7. Literatur:

- /1/ H.E. Häfner  
Sicherheitsbericht für FR2-Kapselversuchseinsätze mit Einwandigen NaK-Kapseln zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben  
KfK 1143 (Januar 1970)
- /2/ H.E. Häfner  
Einwandige NaK-Kapseln zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben seit fünf Jahren in Betrieb  
Kerntechnik 18, Nr. 3/1976, S. 126-132
- /3/ H. Steiner, P. Weimar  
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U, Pu) C-Prüflinge der Kapselversuchsgruppen 6a und 6c  
KfK 2577 (März 1978)
- /4/ P. Weimar, H. Steiner  
Post irradiation examination and analysis of 13 (U, Pu) C-fuel pins irradiated in the thermal flux of FR2  
5. SMIRT-Konferenz, Berlin 1979
- /5/ H. Steiner  
Die Bestrahlungserfahrungen mit Karbid-Brennstäben im Rahmen des KfK-Karbid-Bestrahlungsprogramms  
Jahrestagung Kerntechnik, Berlin 1980, S. 543
- /6/ H.E. Häfner  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /7/ E. Starke, H.E. Häfner  
unveröffentlichte Ergebnisse

/8/ K. Förster, INTERATOM  
unveröffentlichte Ergebnisse

/9/ H.E. Häfner, G. Sebold  
Brennstoff-Bestrahlungskapseln und Fertigungstechniken am FR2  
Kerntechnik 16, Nr. 8/9-1974, S. 393-400

8. Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1 und 2

Abbildungen 1 bis 11

Tabelle 1:

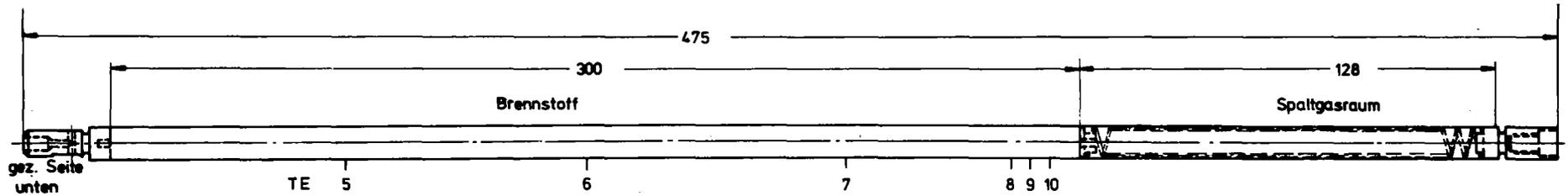
Übersicht über die im FR2 in Einwandigen NaK-Kapseln bestrahlten Karbidbrennstäbe der Versuchsgruppe 6

KVE-Nr.	Vg. Bonding	Bestr.zeit, Tage	err. Abbrand MWG/tM	Stableistung W/cm		Hüllrohrerfl.-temperatur, °C		Betrieb	Nachuntersuchung
				X <sub>max.</sub>	X <sub>mitt.</sub>	t <sub>max.</sub>	t <sub>mitt.</sub>		
91	6A He-Spalt 50 µm	13	1.850	1.040	980	580	555	1 von 6 Chromel/Alumel-TE (0,5 Ø) ausgefallen, starke Temperatur-Schwankungen.	Brennstab mit TE-Haltebügel und Kapsel unbeschädigt.
92		min.	0	< 100	-	-	-	zu wenig NaK eingefüllt, Überhitzung bei Inbetriebnahme.	Keine Nachuntersuchung.
93		16	2.100	1.120	860	620	490	3 von 6 TE (0,5 Ø) ausgefallen, starke Temperatur-Schwank.	Brennstab mit TE-Haltebügel und Kapsel unbeschädigt.
94		106	16.500	1.150	1.070	635	595	2 von 6 TE (0,5 Ø) ausgefallen, starke Temperatur-Schwank.	Brennstab mit TE-Haltebügel und Kapsel unbeschädigt.
99		174	26.000	1.120	1.020	620	570	1 von 6 TE (1,0 Ø) ausgefallen, keine Störungen.	Burnout der Hülle im Gasplenum: Tabletten wegen zu schwacher Niederhaltefeder hochgewandert. Haltebügel von TE 5 und 6 abgelöst, Kapsel unbeschädigt.
102		335	51.000	1.230	1.000	675	560	2 von 6 TE (1,0 Ø) defekt, keine Störungen.	Brennstab und Kapsel unbeschädigt, Haltebügel von TE 5 und 6 abgelöst.
103		372	49.000	1.000	900	560	510	1 von 6 TE (1,0 Ø) defekt, keine Störungen.	Brennstab und Kapsel unbeschädigt, Haltebügel von TE 5 und 6 abgelöst.
104	6C Ar-Spalt 90 µm	595	73.600	1.170	860	645	490	Zentr. Hochtemp.-TE bei Montage defekt, die übrigen 6 TE über die gesamte Betriebszeit einwandfrei, keine Störungen.	Längsrisse in der Brennstabhülle im TE-Haltebügelbereich. Haltebügel von TE 6 abgelöst, Kapsel unbeschädigt.
108		395	56.500	1.140	980	630	555	Zentr. HT-TE nach 270 Tagen ausgefallen, 1 von 6 Chr./Al.-TE defekt, keine Störungen.	Längsrisse in der Hülle im TE-Haltebügelbereich. Haltebügel einwandfrei, Kapsel unbesch.
110		540	72.000	1.185	920	650	520	Zentr. HT-TE nach ca. 20 Tagen ausgefallen, 2 von 6 Chr./Al.-TE defekt, keine Störungen.	Längsrisse in der Hülle im TE-Haltebügelbereich. Haltebügel einwandfrei, Kapsel unbesch.
111		273	36.000	1.070	910	595	515	Zentr. HT-TE gegen Ende der Bestr. ausgef., 1 von 6 Chr./Al.-TE defekt, keine Störungen.	Brennstab mit TE-Haltebügel und Kapsel unbeschädigt.
114		189	25.000	1.040	900	580	510	Zentr. HT-TE nach ca. 80 Tagen defekt, 1 von 6 Chr./Al.-TE defekt, keine Störungen.	Brennstab mit TE-Haltebügel und Kapsel unbeschädigt.
115		242	31.500	1.080	900	605	510	Zentr. HT-TE, bis zum Bestr.-Ende intakt, alle TE einwandfrei, keine Störungen.	Bei Versuch zur TE-Eichung Brennstab und Kapsel durch Überhitzung beschädigt, Kontamination der Heißen Zelle!
127	6D He-Spalt 500 µm	550	68.500	1.040	860	580	490	Keine Störungen, alle 6 TE einwandfrei.	Zahlreiche Risse in Brennstabhülle (Brennstoffschwellen im therm. Fluß) Kapsel unbesch.
128		635	75.000	1.070	810	595	465	Keine Störungen, alle 6 TE einwandfrei.	Zahlreiche Risse in Brennstabhülle (Brennstoffschwellen im therm. Fluß) Kapsel unbesch.
130		676	80.000	1.030	810	575	465	Keine Störungen, alle 6 TE einwandfrei.	Brennstab infolge zahlreicher Hüllrohrrisse beim Ausbau zerbrochen (Brennstoffschwellen im therm. Fluß). Kapsel unbesch.
143	6E Na-Spalt 500 µm	820	87.500	1.170	700	645	410	Keine Störungen, 1 von 6 TE ausgefallen.	Nachuntersuchung steht noch aus, Kapsel dicht.
144		856	99.000	1.170	760	645	440	Keine Störungen, alle 6 TE einwandfrei.	Nachuntersuchung steht noch aus, Kapsel dicht.
145		532	67.000	1.120	840	620	480	Keine Störungen, alle 6 TE einwandfrei.	Nachuntersuchung steht noch aus, Kapsel dicht.

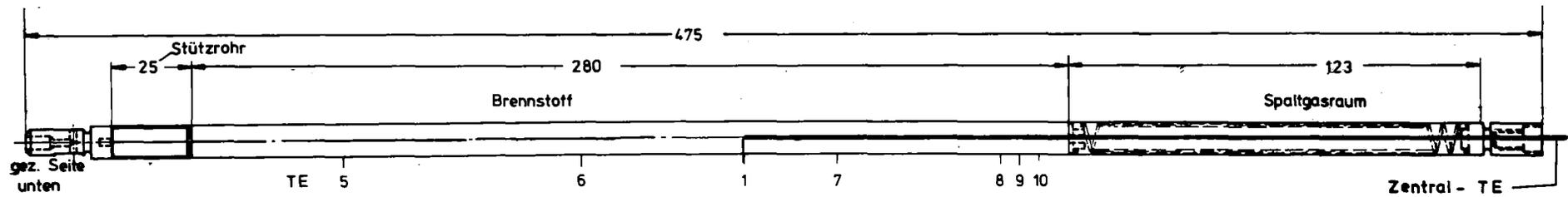
Anmerkung: Die hier angegebenen Maximal-Werte für Abbrand, Stableistung und Hüllrohrerflächentemperatur gelten für die heißeste Stelle des Stabes. Die Mittelwerte sind für die heißeste Stelle über die Bestrahlungszeit gemittelt. Stableistung und Abbrand sind aus den gemessenen Anfangs- und End-Temperaturen jedes Reaktorzyklus berechnet. Außer bei den KVE 91 bis 94, deren Bestrahlung durch Störungen vorzeitig abgebrochen werden mußte, wurden die vorgesehenen Abbrände planmäßig erreicht.

Tabelle 2: Übersicht über die Befunde der visuellen Nachuntersuchung der Bestrahlungskapseln vom Typ 7 mit Karbid-Stäben ( FR2/Vg6 )

KVE		91	92	93	94	99	102	103	104	108	110	111	114	115	127	128	130	143	144	145	
Befunde	Bestr.zeit, Tage	13	0	16	106	174	225	372	595	395	540	273	189	242	550	635	676	820	856	532	
Brennstab	noch nicht untersucht		X															X	X	X	
	einwandfrei	X		X	X		X	X				X	X								
	Risse in der Hülle								X	X	X				X	X	X				
	Burnout der Hülle					X								X							
Chromel/Alumel-TE	TE-Ausfälle im Betrieb (von 6)	1	0	3	2	1	2	1	0	1	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	
	Übrige Schleifen- und Isol.widerstände nicht oder kaum verändert	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	nicht gemessen							
	TE-Haltebügel einwandfrei	X		X	X					X	X	X	X	X	X	X	X				
	vereinzelt TE-Haltebügel abgelöst					X	X	X	X												
Kapsel	reibungsflos zerlegbar	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X				
	ohne Schäden und dicht	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X



Brennstab für Vg 6a



Brennstab für Vg 6c

Abb.1: Brennstababmessungen der Versuchsgruppe 6

Durchführungsstopfen zum Oberteil  
Penetration plug to the rig head

Thermoelemente  
Thermocouples

Gaspuffer  
Gas plenum

NaK - Niveau  
NaK - level

Zwischenrohr  
Intermediate tube

Brennstab  
Fuel pin

NaK - Spalte  
NaK - gaps

Kapselrohr z.B. 24/27 mm  $\phi$   
Capsule pipe

Einfüllendstopfen  
Filling end cap

Kühlwasserführungsrohr z.B. 36/40 mm  $\phi$   
Coolant guiding pipe

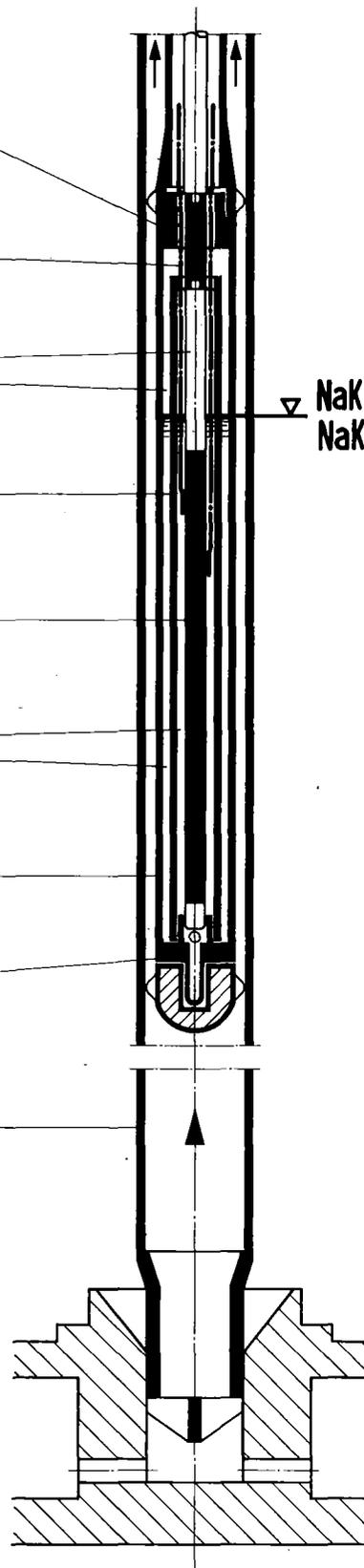


Abb. 2: Brennstoff - Bestrahlungseinsatz mit Einwandiger NaK - Kapsel für den FR 2  
Fuel - pin irradiation rig with single walled NaK capsule for the FR 2

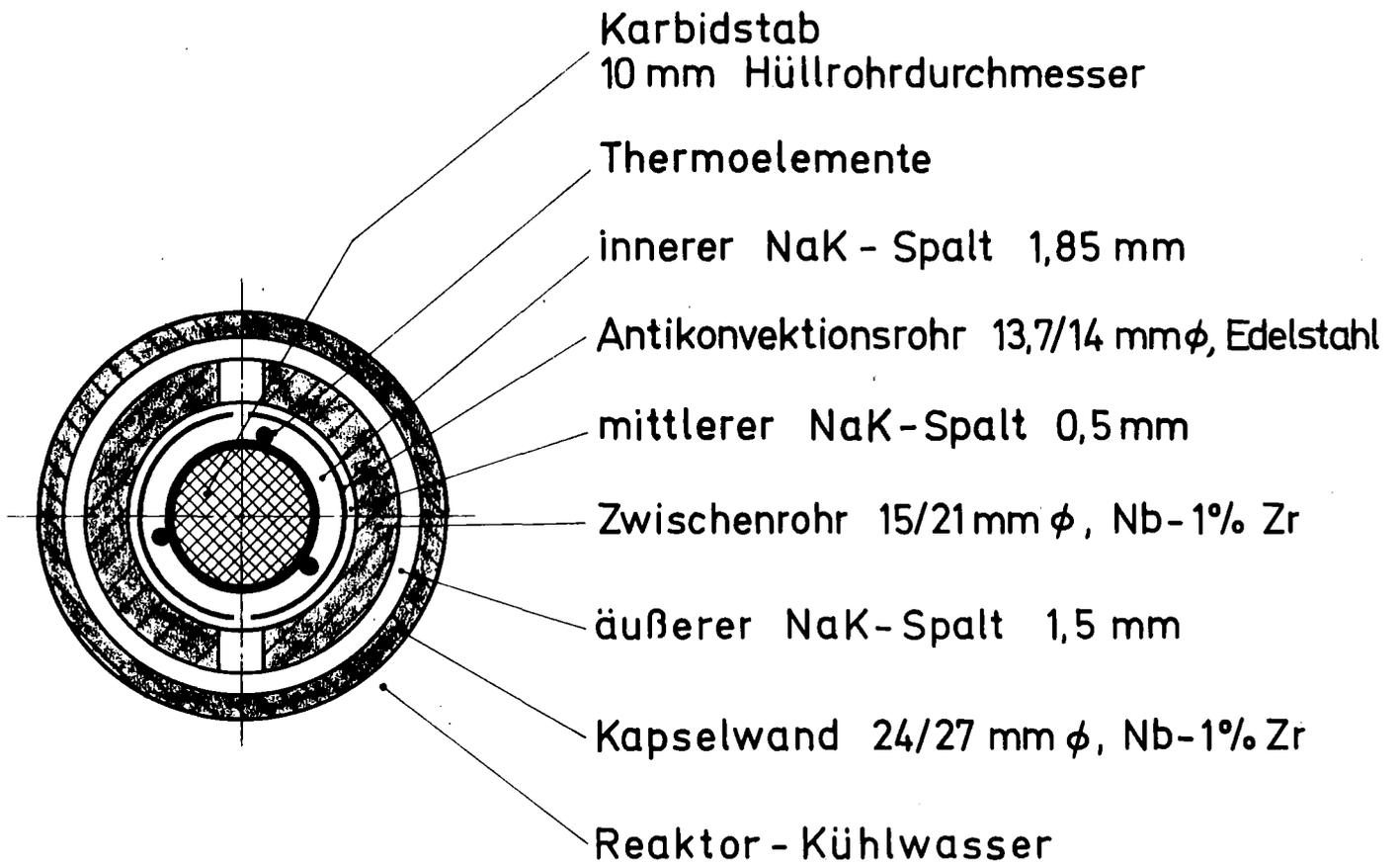
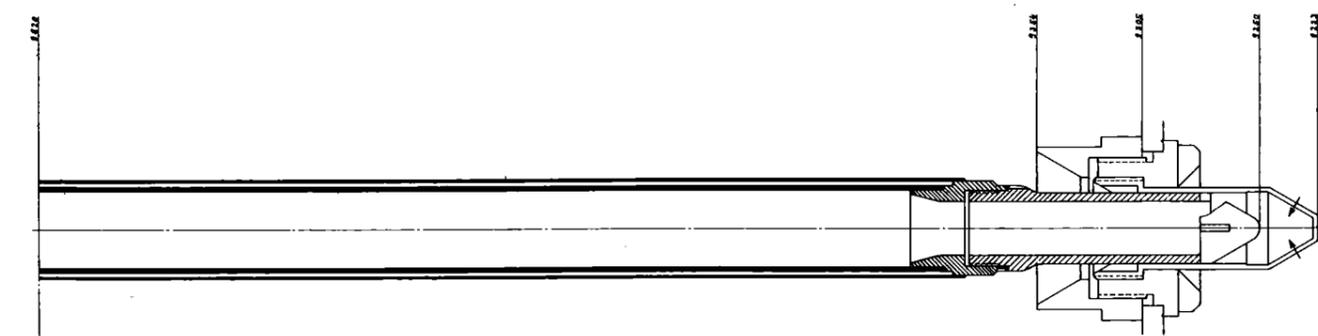
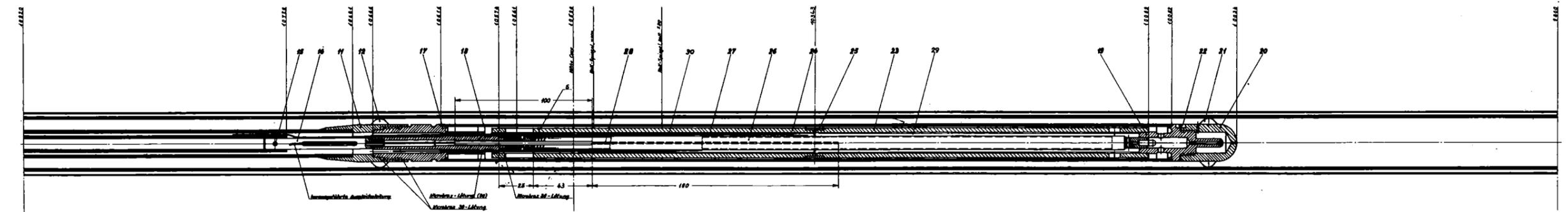
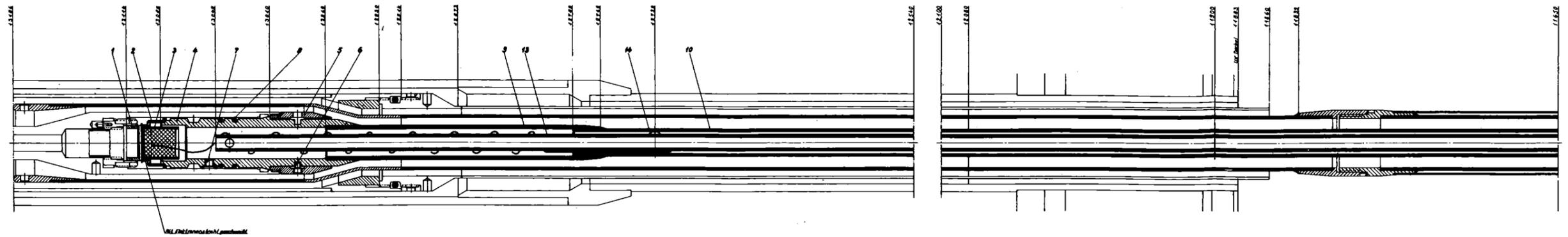


Abb. 3: Querschnitt durch eine Einwandige FR 2 - Kapsel für Karbidstabbestrahlungen.

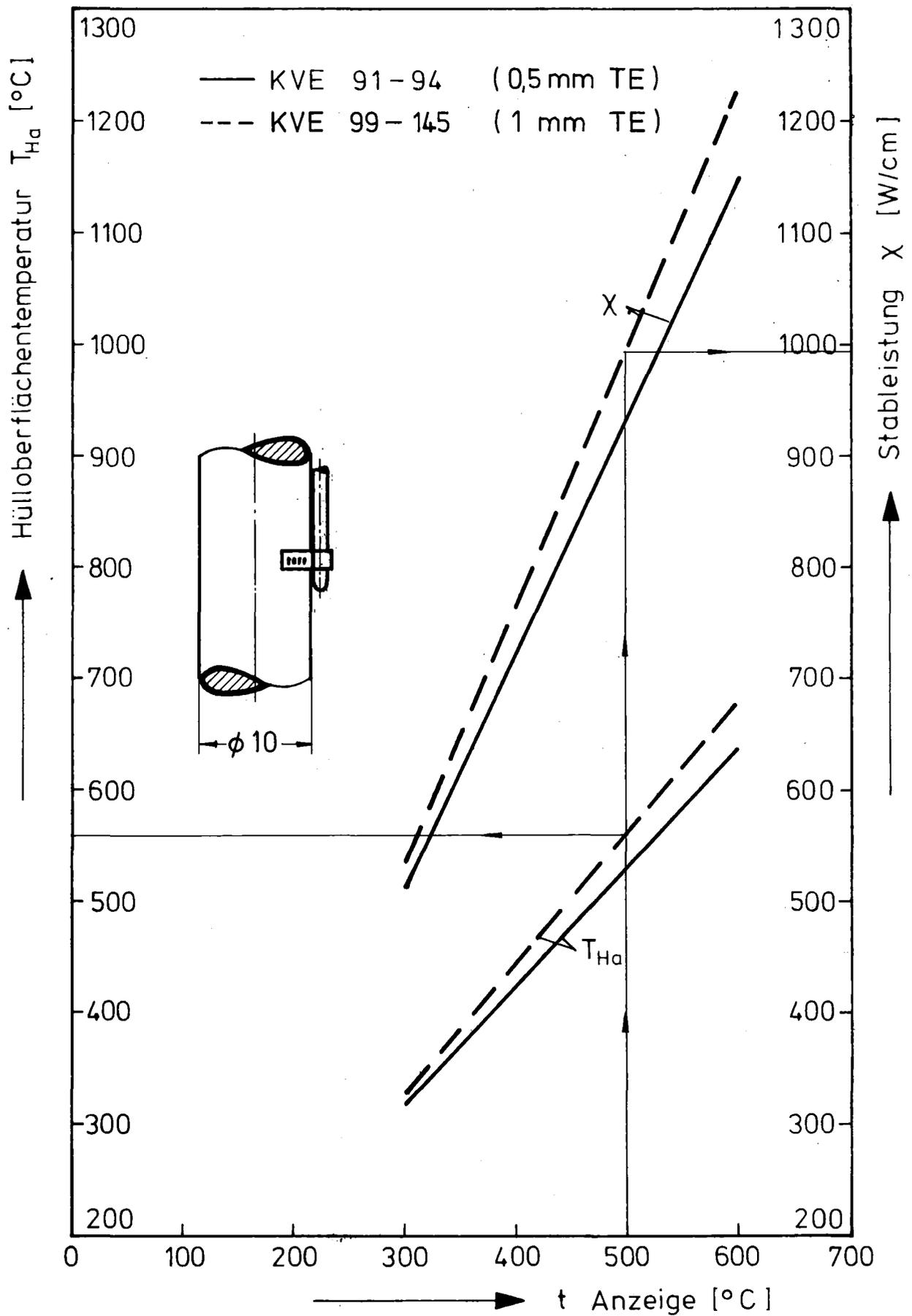


NaK-Füllung 47,5g ± 3,5g & 70,55 cm<sup>3</sup> ± 4,00 cm<sup>3</sup> bei 20°C

RWE: 400, 402, 406, 410, 414, 418

Pos.	Bezeichnung	Material	Norm	Stückzahl	Einheit	Größe	Größe	Größe	Größe
10	Druckbehälter, oben	V 2 A	Dr. 611-112	1	Stk	100	100	100	100
11	Druckbehälter, unten	V 2 A	Dr. 611-112	1	Stk	100	100	100	100
12	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
13	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
14	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
15	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
16	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
17	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
18	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
19	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
20	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
21	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
22	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
23	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
24	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
25	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
26	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
27	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
28	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
29	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100
30	Druckbehälter	—	—	1	Stk	100	100	100	100

Abb. 4



FR 2-Kapsel-Versuchsg. 6

Temperatur-Stableistungscharakteristik Kapseltyp. 7

Abb. 5

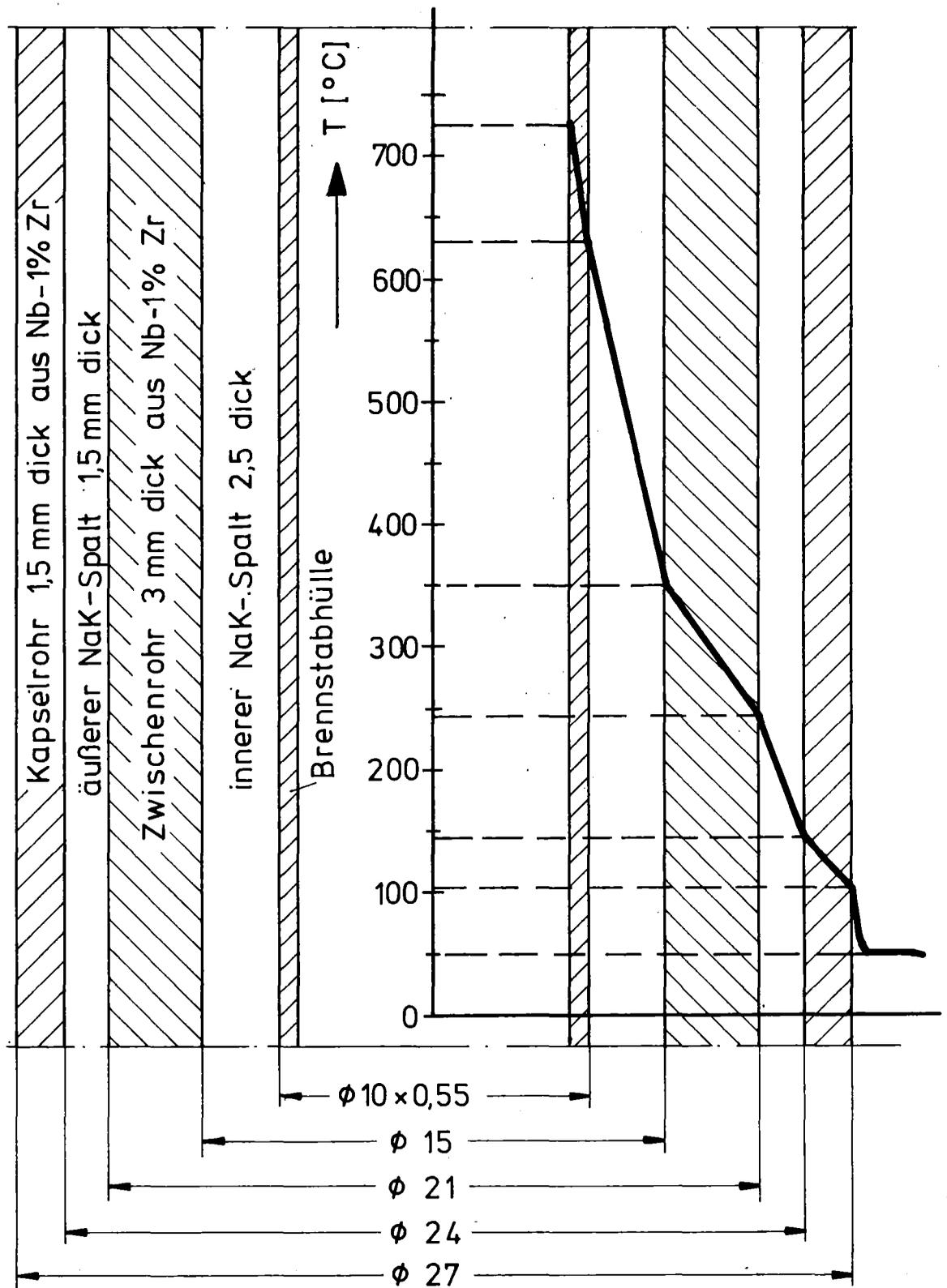


Abb. 6: Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel vom Typ 7 (Stableistung  $\chi = 1150 \text{ W/cm}$ )

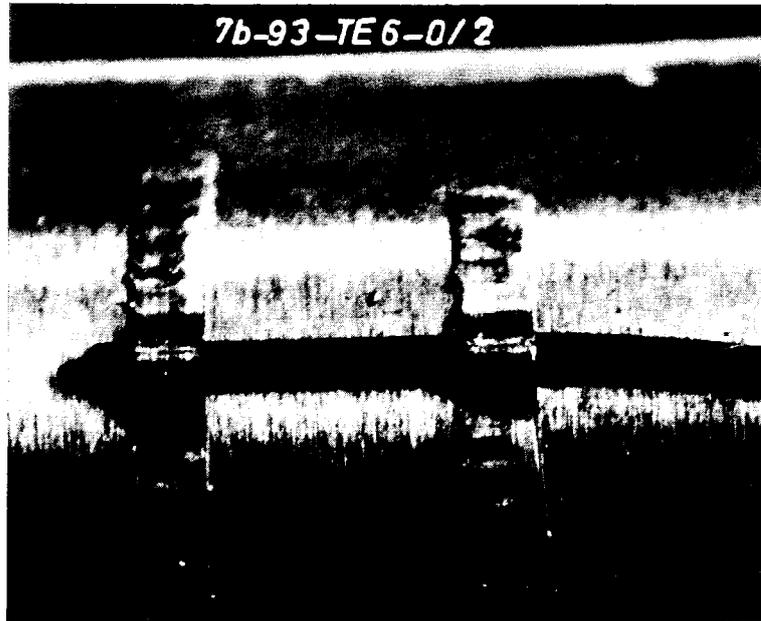
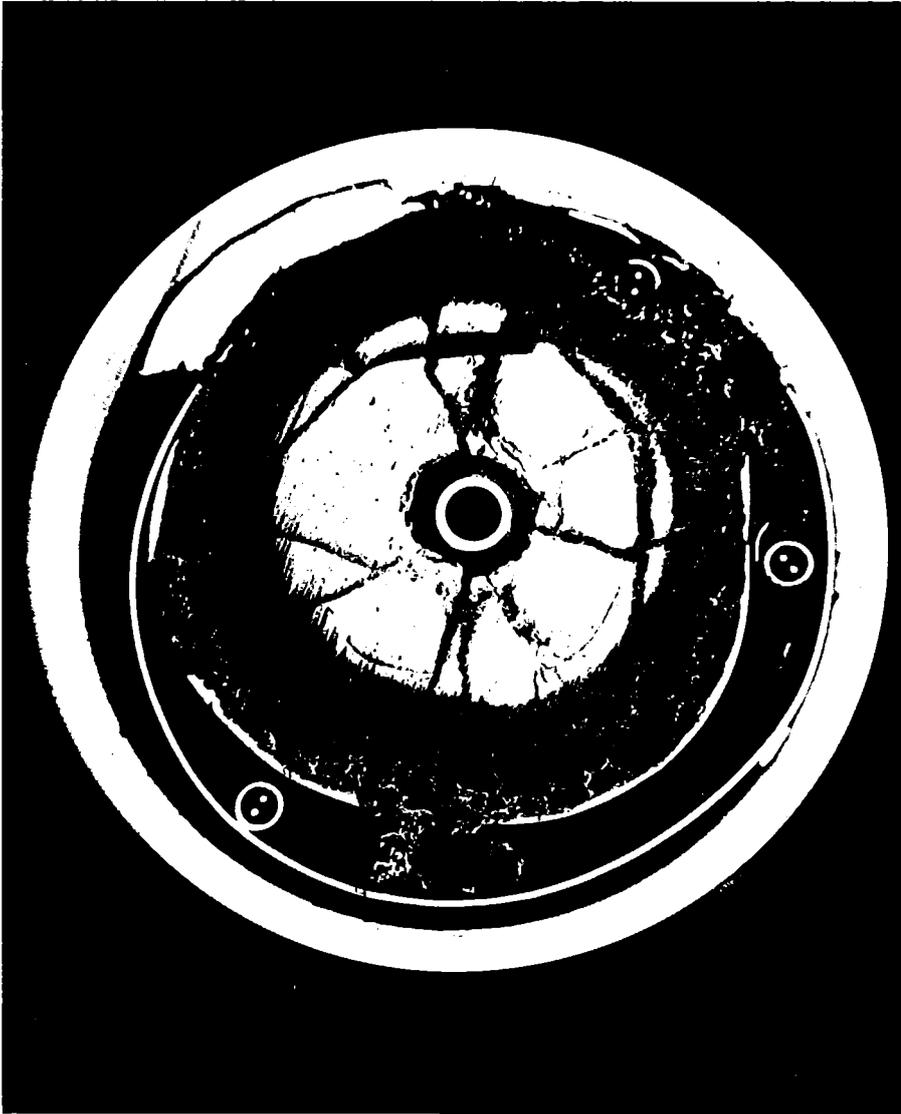


Abb. 7: Aufgepunktete Blechstreifen zur Befestigung der Thermoelemente auf den Stabhüllen



HZ-3B-115-6/31-1/1 6 x

Abb. 8: Querschnitt durch KVE 115

Brennstab mit zentralem Thermoelementschutzrohr, Hüllrohr (nahezu völlig weggeschmolzen) mit drei Thermoelementen 1 mm  $\varnothing$  und dünnwandigem Antikonvektionsrohr, umgeben von Zwischenrohr aus Nb-1 % Zr. Kapselrohr entfernt

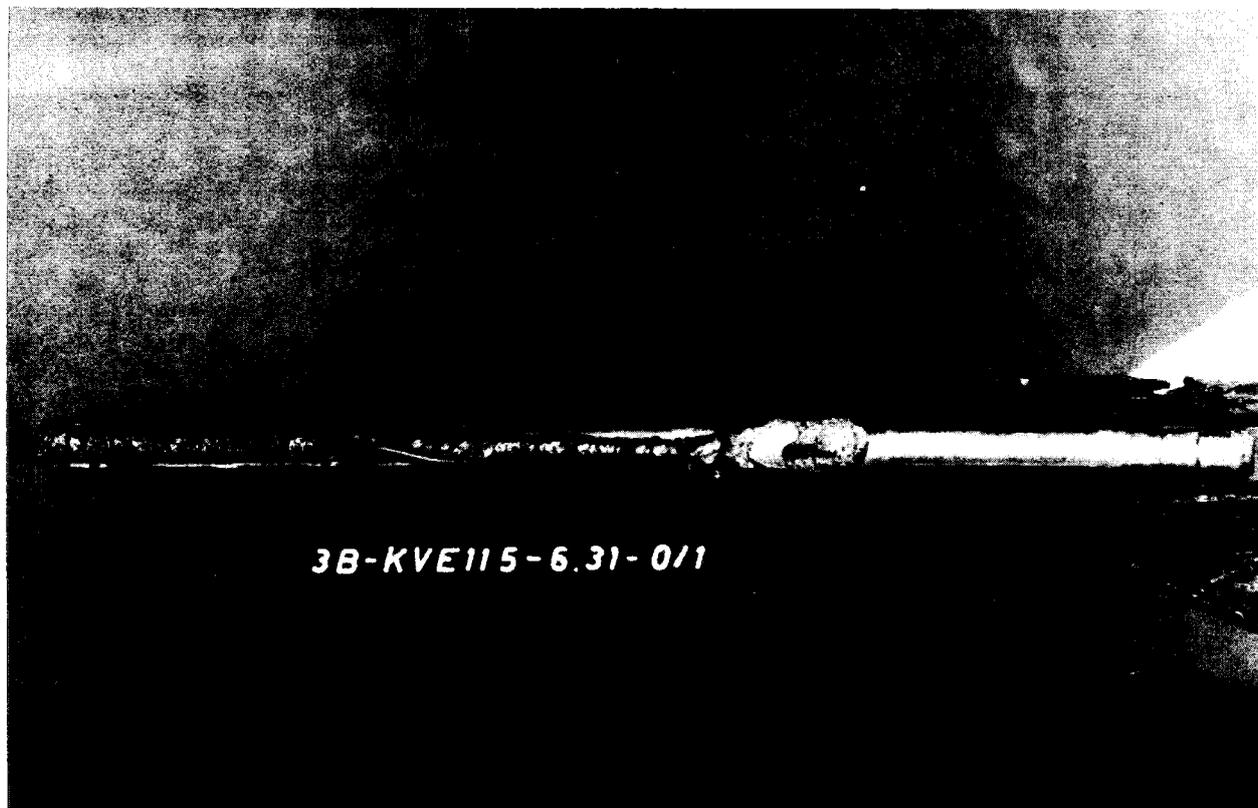


Abb. 9: KVE 115  
Schmelzraupe aus Hüllmaterial und Karbidbrennstoff auf  
der Brennstabhülle entlang eines Thermoelements

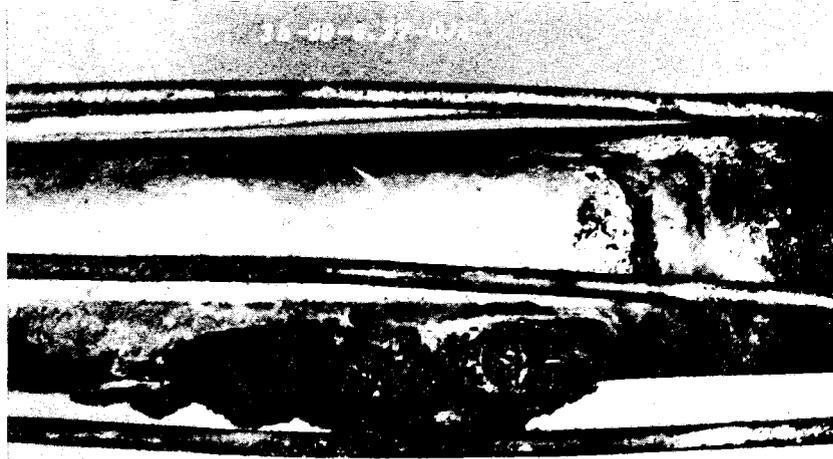


Abb. 10:

KVE 99

Burn-out des Brennstabes (von TE umgeben) im Bereich des Spaltgasplenums durch hochgewanderte Brennstofftabletten



Abb. 11: KVE 104  
Typischer Längsriß in der Brennstabhülle unter einem  
Thermoelement im Bereich seiner Befestigungsbügel