

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

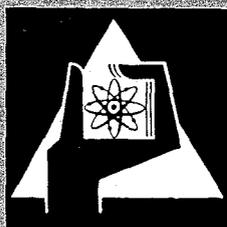
Mai/Juni 1970

KFK 1259

Institut für Reaktorentwicklung

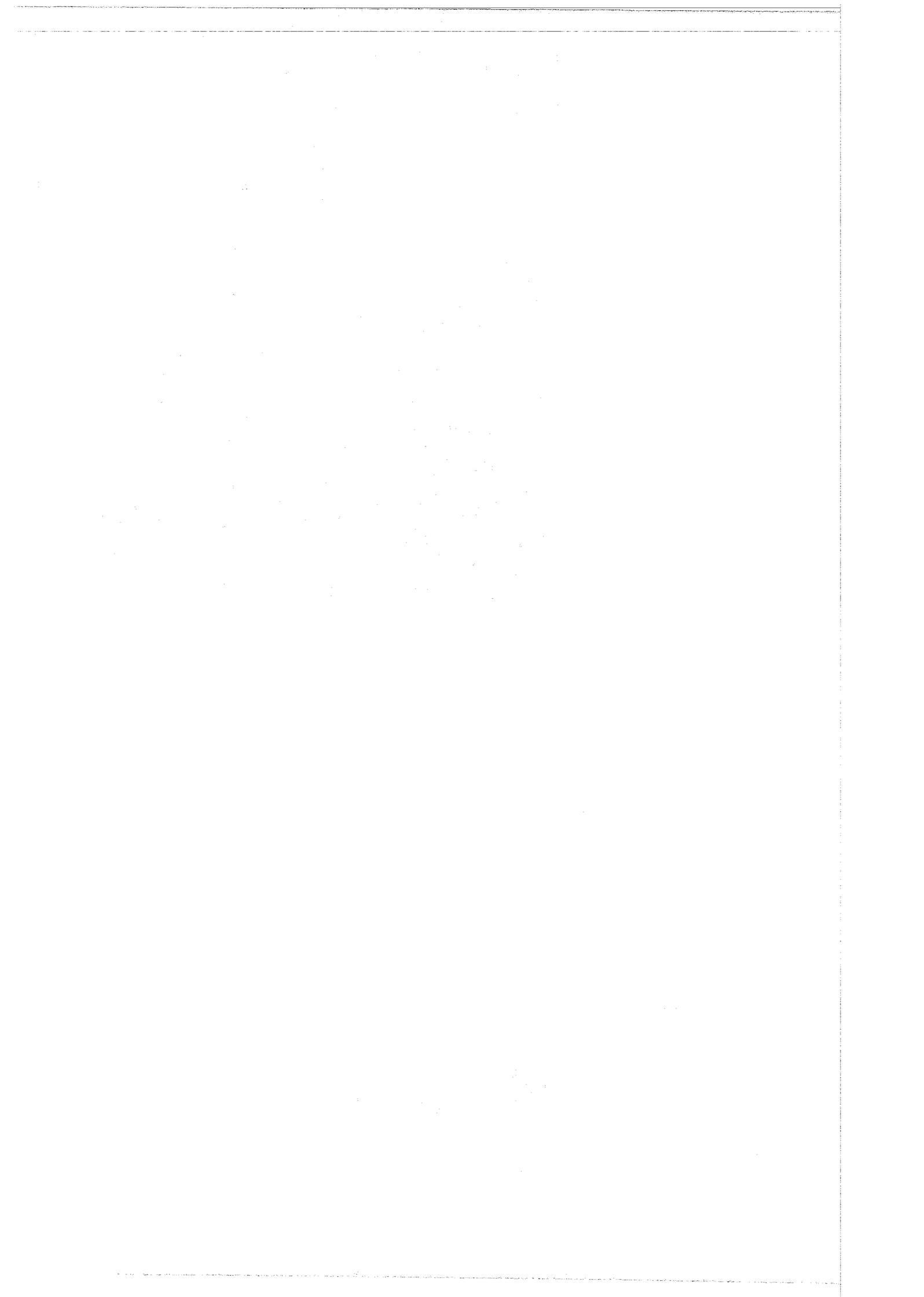
Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten
Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln

H. E. Häfner



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln* Irradiation of fuel pins in instrument-equipped double capsules with sodium and lead-bismuth*

H. E. Häfner Institut für Reaktorentwicklung, Kernforschungszentrum Karlsruhe

1. Einleitung

Brennstabexperimente mit Hilfe von Bestrahlungskapseln im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 gehören zum langfristigen Brennelement-Entwicklungsprogramm des Karlsruher Projektes Schneller Brüter [1].

In einer früheren Veröffentlichung [2] wurde über die Aufgabenstellung und die in einer ersten Versuchsphase benutzten einfachen Blei-Wismut-Kapseln für relativ dicke Brennstäbe von 10 bis 12 mm Hüllrohraußendurchmesser berichtet. Für diese ersten 55 Brennstäbe waren seinerzeit relativ niedrige Leistungsdichten von maximal 850 W/cm^3 und mäßige spezifische Abbrände bis maximal $17\,000 \text{ MWd/t}$ vorgesehen. In einer weiteren Versuchsphase sollten Testbrennstäbe mit »echten Brüterdurchmessern« von 6,0 bis 7,4 mm bei Stableistungen bis 700 W/cm und Hüllrohroberflächentemperaturen von maximal 700°C bis zu hohen Abbränden bestrahlt werden. Diese Testreihe ist Anfang 1967 mit der Bestrahlung von UO_2 angelaufen. Anfang 1968 wurde auf das Brüterbrennstoffgemisch $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ übergegangen. Hier wird über den für die Bestrahlungen eingesetzten Kapseltyp und über die Betriebserfahrungen berichtet.

2. Kapselprinzip

Der hier vorgestellte Typ einer Na/PbBi- bzw. NaK/PbBi-Doppelkapsel ist eine für höhere Anforderungen notwendige Weiterentwicklung der früher eingesetzten einfachen PbBi-Kapsel. Bei der Entwicklung dieses neuen Kapseltyps

* Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

1. Introduction

Fuel pin experiments by means of irradiation capsules in the Karlsruhe research reactor FR 2 are part of the long-term fuel element development programme of the Karlsruhe Fast Breeder Project [1].

A previous publication [2] reported on the problems and the lead-bismuth capsules for relatively thick fuel pins of 10 to 12 mm o.d. of the cladding tube used in a first test series. For these first 55 fuel pins relatively low power densities of a maximum of 850 W/cm and moderate burnups of a maximum of $17\,000 \text{ MWd/t}$ had then been intended.

In a further test series test fuel pins with "genuine breeder diameters" of 6,0 to 7,4 mm at pin powers of up to 700 W/cm and cladding-tube surface temperatures of a maximum of 700°C were to be irradiated to high burnups. This test series was started at the beginning of 1967 with the irradiation of UO_2 . Since the beginning of 1968 a breeder fuel mixture of $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ is being used. This report deals with the capsule type used for the irradiation and the operational results.

2. Capsule principle

The type of Na/PbBi and NaK/PbBi double capsule presented here is an advanced development, necessary for greater requirements, of the previously used single PbBi capsule. In the

* This work was performed within the framework of the association in the fast reactor field between the European Atomic Energy Community and Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe.

waren außer den bereits früher in [2, 3] genannten Anforderungen insbesondere folgende Gesichtspunkte bestimmend:

1. Es lagen Erfahrungen mit PbBi-Kapseln, also allgemein mit dem Wärmeübertragungsmedium PbBi vor, und es stand vor allem eine erprobte Einfüllapparatur für dieses Kühlmittel zur Verfügung.
2. Aus dem Wunsch nach höheren Leistungsdichten und höheren Brennstaboberflächentemperaturen ergab sich, wegen der relativ schlechten Wärmeleitfähigkeit des PbBi und wegen der geringen Korrosionsbeständigkeit von Brennstabhüllmaterialien in PbBi bei relativ hohen Temperaturen, die Notwendigkeit, wenigstens unmittelbar am Brennstab ein geeignetes Kühlmittel einzusetzen.
3. Besonders für lange Brennstäbe erwies sich nach den gewonnenen Erfahrungen ein auch bei abgeschaltetem Reaktor flüssiges Kühlmittel als notwendig, wenn lokale Überhitzungen der Brennstabhüllen infolge Lunker beim Anfahren des Reaktors nach einem Scram vermieden werden sollen.
4. Die Forderungen nach besserer Wärmeleitfähigkeit des Brennstabkühlmittels und besserer Korrosionsbeständigkeit der Strukturmaterialien werden am besten von Na und NaK erfüllt.
5. Nach wie vor war eine möglichst hohe Sicherheit gegen eine chemische Reaktion des Kühlmediums in der Kapsel mit dem Reaktorwasser anzustreben.
6. Um Spaltproduktfreisetzung aus der Kapsel mit hoher Sicherheit zu vermeiden, sollten die hochbelasteten Brennstäbe, für die im Verlaufe der langen Betriebszeit ein Hüllschaden nicht ausgeschlossen werden kann, mit zwei dichten Hüllen umgeben werden.

Aus diesen Gesichtspunkten heraus wurde das im folgenden näher beschriebene Doppelkapselprinzip gewählt, bei dem der Brennstab, je nach Leistungsdichte, Länge und Oberflächentemperatur von Na oder NaK umgeben, in einer inneren Kapsel angeordnet ist und diese von einer äußeren Kapsel unter Zwischenschaltung einer PbBi-Schicht umschlossen ist. Eine chemische Reaktion des Alkalimetalls mit dem Reaktor-Kühlwasser ist also äußerst unwahrscheinlich. Dieses Doppelkapselprinzip hat auch noch den Vorteil, daß ein Lunker in der äußeren Metallfüllung sich nicht sehr stark auf die Brennstabtemperatur auswirkt.

3. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes

Die Kapselversuchseinsätze (KVE) des neuen Typs wurden so konstruiert und gebaut, daß sie sowohl auf Isotopenkanalpositionen als auch auf normalen Brennelementpositionen im FR 2 eingesetzt werden können. Ein KVE setzt sich aus drei Hauptbaueinheiten zusammen: der eigentlichen auswechselbaren Bestrahlungskapsel, der Kühlwasserführung und dem tragenden Oberteil (Fig. 1). Die leichte Montier- und Demontierbarkeit gestattet die wiederholte Verwendung des Oberteils und auch der Kühlwasserführung.

Das Oberteil stellt im wesentlichen einen Abschirmstopfen dar, durch den die Meßleitungen aus dem Reaktor herausgeführt werden. Als Abschirmmaterialien dienen Bleischrot, Stahlshrot, Polyäthylengranulat, Borkarbidpulver und Sand, die in bestimmter Mischung in das Oberteil eingefüllt werden. Am unteren Ende des Oberteils, dem Umkehrstück, sind ein Thermoelement zur Messung der Kühlmittelaustrittstemperatur und ein Kühlmittelprobenentnahmerohr für die Spaltproduktdetektion untergebracht.

Das Mittelstück mit einem störanfälligen Woltmannflügel und dem elektromagnetischen Impulsgeber zur Messung der Kühl-

entwicklung of this new capsule the following factors were important in addition to the requirements stated earlier [2, 3]:

1. Experience was available with PbBi capsules, i.e., generally with PbBi as heat transfer medium, and a well tested filling apparatus was available for this cooling medium.
2. The desire for higher power densities and higher fuel surface temperatures resulted in the necessity, because of the relatively low thermal conductivity of PbBi and the low corrosion resistance of fuel pin cladding materials in PbBi at relatively high temperatures, to use a more suitable coolant, at least directly at the fuel pin.
3. Experience showed a coolant to be necessary for long fuel pins which was liquid even with the reactor shutdown to prevent local excess temperatures of the fuel pin cladding tube due to cavities during reactor startup after a scram.
4. The requirements for higher thermal conductivity of the fuel pin coolant and improved corrosion resistance of the structural material can best be satisfied by Na and NaK.
5. To aim, as previously, at greatest safety against a chemical reaction of the coolant in the capsule with the reactor water.
6. To avoid releases of fission products from the capsule with the highest safety the highly loaded fuel pins, for which in the course of a long operational period a can damage could not be excluded, should be surrounded by two leak-proof cans.

These factors led to the selection of the double capsule principle, to be described in detail later on, in which the fuel pin surrounded by Na or NaK depending on power density, length and surface temperature is arranged in an inner capsule and this enclosed in an outer capsule with an intermediary layer of PbBi. A chemical reaction of the alkali metal with the reactor water is thus highly improbable. This double capsule principle has the further advantage of a cavity in the outer metal filling having only a small effect on the fuel pin temperature.

3. Description of the experimental capsule rig

The capsule irradiation rigs (KVE) of the new type were so designed and made that they can be used in the FR 2 both at isotope channel positions and at fuel element positions. A KVE has three main parts: the exchangeable irradiation capsule proper, the cooling water duct and the supporting upper part (Fig. 1). The easy mountability and demountability permit repeated use of the upper part and the cooling water duct.

The *upper part* is mainly a shielding plug through which the measuring leads from the reactor are passed. Shielding materials are lead shot, steel shot, granulated polyethylene, powdered boron carbide and sand filled in certain proportions into the upper part. At the lower end of the upper part, the return piece, a thermocouple for measuring the coolant outlet temperature and a coolant sampling tube for fission product detection are installed.

Experience had shown that the central part with a Woltmann blade liable to be troublesome and the electromagnetic pulse generator for measuring the coolant mass flow which had been part of the first design of the KVE was no longer required.

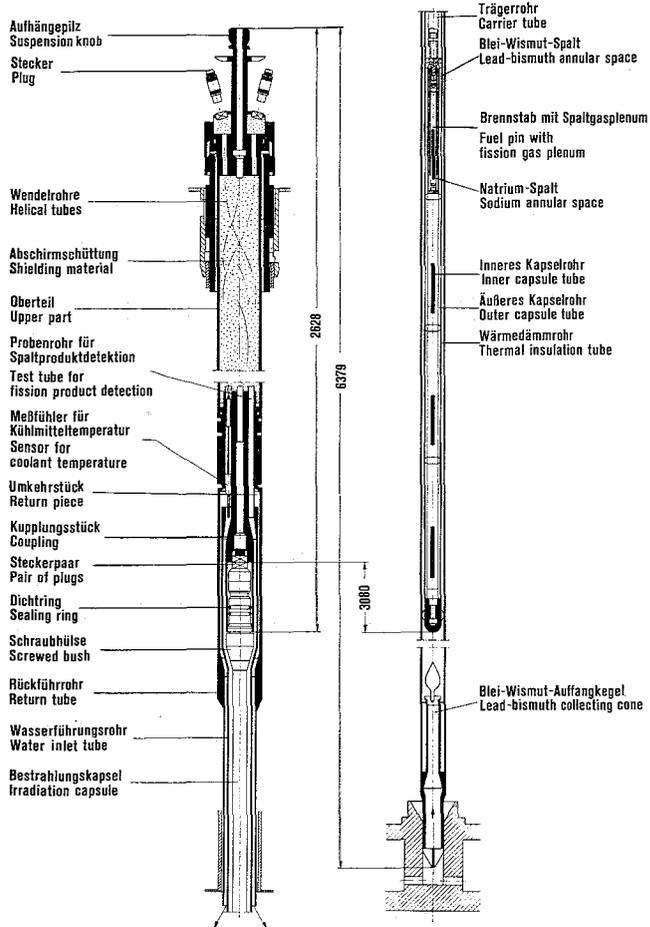


Fig. 1: Schematische Darstellung des Kapselversuchseinsatzes
Fig. 1: Schematic representation of the FR2 fuel-pin irradiation rig

mitteldurchflußmenge, das Bestandteil des KVE der ersten Ausführung war, konnte nach den gesammelten Erfahrungen entfallen.

Die Kühlwasserführung ist gegenüber der ersten Ausführung nahezu gleich geblieben und besteht aus dem Wasserführungsrohr, das den Kühlkanal um die Kapsel bildet, und dem Rückführrohr. Das Wasserführungsrohr endet unten mit einem Fußrohr, das in jede Hülse im Kühlmittelverteilerboden des Reaktortanks hineinpaßt. Über die Hülse wird der KVE an den Kühlmittelkreislauf des Reaktors angeschlossen. Der KVE wird bei seiner freien Ausdehnung nach unten in der Hülse gut geführt. Nach oben schließt sich an das Wasserführungsrohr über eine Schraubverbindung das Wasserrückführrohr an, das seinerseits mit dem Oberteil über ein leicht lösbares Rundgewinde verschraubt ist. Das Kühlmittel tritt also unten aus dem Kühlmittelverteilerboden über die Hülse in den Kühlkanal ein, strömt entlang der Kapsel bis zum Oberteil, wird hier am Umkehrstück umgelenkt und fließt im Rückführrohr in den Moderatorraum des Reaktors zurück.

Bestrahlungskapsel: Jeder Brennstab sitzt einzeln in der gasdichten und druckfesten inneren Edelstahlkapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wanddicke und ist von Natrium (Schmelzpunkt 98 °C) oder der eutektischen Natrium-Kalium-Legierung (Schmelzpunkt -11 °C) umgeben. Maximal vier solcher Na- bzw. NaK-Kapseln sind im unteren Teil der etwa 3 m langen äußeren Kapsel übereinander angeordnet. Das äußere Kapselrohr besteht aus Zircaloy-2 und hat bei 26 mm Außendurchmesser 1,5 mm Wanddicke. Der Ringraum zwischen den inneren Kapseln und dem äußeren Kapselrohr von 1,5 mm Breite ist von der eutektischen Blei-Wismut-Legierung

The cooling water duct is almost the same as in the first design and consists of a water inlet tube forming the cooling channel around the capsule and the return tube. The water inlet tube ends in a bottom tube which fits into every bush in the coolant distributor bottom of the reactor. Through the bush the KVE is connected to the coolant circuit of the reactor. The free expansion of the KVE downwards is well guided in the bush. The water inlet tube is connected upwards by a screwed joint to the water return tube which in its turn is screwed to the upper part with an easily disconnected knuckle thread. The coolant thus enters at the lower end from the coolant distribution bottom through the bush into the cooling channel; flows along the capsule to the upper part where its direction of flow is reversed and flows through the return tube to the moderator space of the reactor.

Irradiation capsule: each fuel pin is separately enclosed in a gastight and pressure-resistant inner capsule of stainless steel of 20 mm o.d. and 1 mm wall thickness and surrounded by sodium (m.p. 98 °C) or the eutectic sodium-potassium alloy (m.p. -11 °C). A maximum of four such Na or NaK capsules are arranged on top of each other in the lower part of the outer capsule of about 3 m length. The outer capsule tube is made of Zircaloy-2 and has an o.d. of 26 mm and a wall thickness of 1,5 mm. The annular space between the inner capsules and the outer capsule tube of 1,5 mm width is filled with the eutectic lead-bismuth alloy (m.p. 125 °C). The outer capsule, too, is gastight and pressure-resistant. By this means the Na or NaK and also the fuel pin itself are separated from the cooling water by two relatively safe walls.

The inner capsule (Fig. 2) consists of a tube closed at both ends by plugs centering the fuel pin. At the lower end plug the fuel pin is fixed by a thread and guided in the upper one so that it can expand freely. Up to now mainly short fuel pins of the following dimensions have been irradiated in this capsule type: cladding tube o.d. 6,0 to 7,4 mm, cladding tube wall thickness 0,38 to 0,5 mm and fuel pin length 172 mm. In some cases the fuel pin length was 450 mm. The lower end plug of the inner capsule is designed as filling plug; it is welded inductively after filling in the liquid metal [4]. Through the upper end plug up to 6 immersion tubes are passed and welded to take thermocouples. The immersion tubes with the thermocouples in the Na or NaK space are radially well held by several spacers. This defines relatively accurately the position of the temperature measuring points. The temperature is thus not measured directly at the fuel pin but at some distance in the liquid metal. Calibration tests determined the difference between the actual fuel pin surface temperature and the measured liquid metal temperature. Good agreement was obtained with the calculated difference.

The liquid is subdivided by one or two intermediate tubes of 0,1 mm wall thickness to prevent excessive convection in the Na or NaK and consequently non-reproducible temperature conditions.

The outer capsule is closed at its upper end, the so-called capsule head, as in the earlier design by a heat-resistant, gas-tight and pressure-resistant stainless steel-ceramic plug of 1 inch dia. and 26 pins through which the measuring leads are passed from the capsule. A screwed bush fixes the irradiation capsule to the upper part. The irradiation capsule can freely expand downwards in the water duct. Along the outer capsule tube so-called thermal insulation tubes welded in areas of reduced heat generation, i.e. at the level of the fission gas plenum and connecting plugs, maintain the heat transfer media Na and PbBi in the liquid state and limit cavity formation and stresses on the inner capsules.

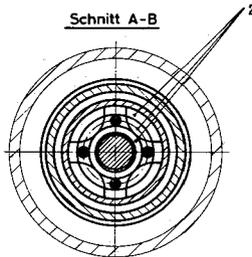
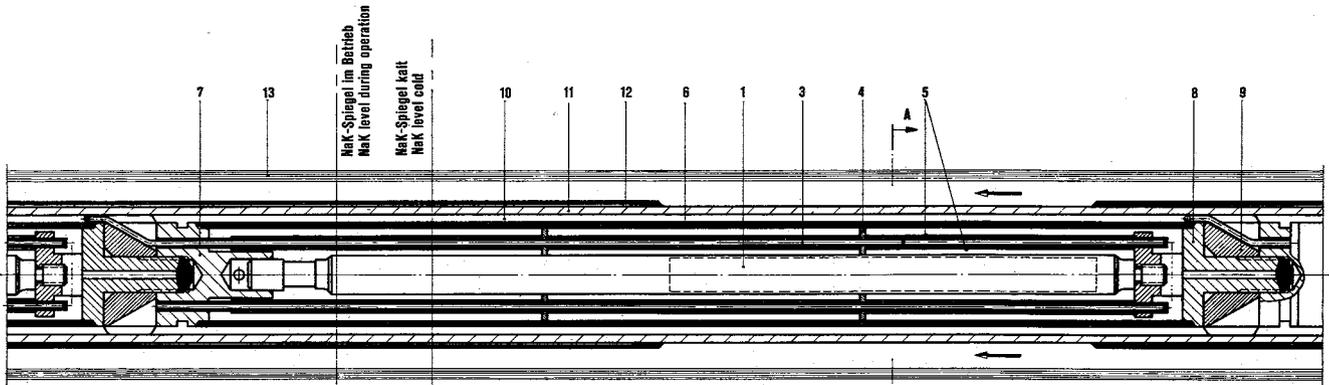


Fig. 2: Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel

(Schmelzpunkt 125 °C) ausgefüllt. Auch die äußere Kapsel ist gasdicht und druckfest ausgeführt. Dadurch ist erreicht, daß das Na bzw. NaK wie auch der Brennstab selbst durch zwei relativ sichere Wände vom Reaktor-Kühlwasser getrennt sind.

Die innere Kapsel (Fig. 2) besteht aus einem Rohr, das an beiden Enden durch Endstopfen verschlossen ist, durch die der Brennstab zentriert wird. Am unteren Endstopfen ist der Brennstab durch Gewinde fest fixiert und im oberen so geführt, daß er sich frei ausdehnen kann. Bisher wurden in diesem Kapseltyp im wesentlichen kurze Brennstäbe mit folgenden Abmessungen bestrahlt: Hüllrohraußendurchmesser 6,0 bis 7,4 mm bei 0,38 bis 0,5 mm Hüllrohrwanddicke und Brennstablänge 172 mm. In einigen Fällen betrug die Brennstablänge auch 450 mm. Der untere Endstopfen der inneren Kapsel ist als Einfüllstopfen ausgebildet; er wird nach dem Einfüllen des Flüssigmetalls induktiv verschweißt [4]. Durch den oberen Endstopfen der inneren Kapsel werden, bis zu 6 Tauchröhrchen hindurchgeführt und eingeschweißt, die zur Aufnahme von Thermoelementen dienen. Durch mehrere Abstandhalter sind die Tauchröhrchen mit den Thermoelementen im Na- bzw. NaK-Raum radial gut fixiert. Dadurch ist die Lage der Temperatur-Meßstellen relativ genau definiert. Die Temperatur wird also nicht direkt am Brennstab, sondern in einiger Entfernung im Flüssigmetall gemessen. In Eichversuchen wurde die Abweichung der tatsächlichen Brennstaboberflächentemperatur zur gemessenen Flüssigmetalltemperatur ermittelt. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung mit der rechnerischen Abweichung.

Um eine zu starke Konvektion im Na bzw. NaK und damit nicht reproduzierbare Temperaturverhältnisse zu vermeiden, wird die Flüssigkeit durch ein bzw. zwei Zwischenrohre von 0,1 mm Wanddicke aufgeteilt.

Die äußere Kapsel ist an ihrem oberen Ende, dem sog. Kapselkopf, wie bei der früheren Ausführung, durch einen temperaturbeständigen, gasdichten und druckfesten 26poligen Edelstahl-Keramik-Stecker von 1 Zoll Durchmesser verschlossen, über den die Meßleitungen aus der Kapsel herausgeführt werden. Über eine Schraubhülse wird die Bestrahlungskapsel fest mit dem Oberteil verbunden, bevor die Kühlwasserführung ebenfalls am Oberteil befestigt wird. Die Bestrahlungs-

- | | |
|--|---|
| 1 Brennstabprüfung mit Spaltgasplenum | 1 Fuel pin specimen with fission gas plenum |
| 2 NaK-Spalte | 2 NaK annular space |
| 3 Tauchrohr mit Thermoelement 1mm ^ø | 3 Immersion tube with thermocouple 1 mm dia. |
| 4 Zentrierplatte | 4 Centering plate |
| 5 Zwischenrohre 0,1mm dick | 5 Intermediate tube 0,1 mm thick |
| 6 Edelstahlkapsel 20 mm ^ø ×1 mm Wand | 6 Stainless steel capsule 20 mm dia.×1 mm thick |
| 7 Endstopfen | 7 End plugs |
| 8 NaK-Einfüllstopfen | 8 NaK filling plug |
| 9 Zwischenstück | 9 Intermediate piece |
| 10 PbBi-Spalt 1,5 mm dñck | 10 PbBi annular space 1,5 mm wide |
| 11 Zirkaloy-2-Kapsel 26 mm ^ø ×1,5 mm Wand | 11 Zircaloy-2 capsule 26 mm dia.×1,5 mm thick |
| 12 Wärmedämmrohr | 12 Thermal insulation tube |
| 13 Wasserführungsrohr 40 mm ^ø ×2 mm Wand | 13 Water inlet tube 40 mm dia.×2 mm thick |

Fig. 2: Section of the NaK/PbBi double capsule

Fig. 3 shows the temperature profile within a NaK/PbBi double capsule at a pin power of 550 W/cm; the fuel pin diameter is 7 mm.

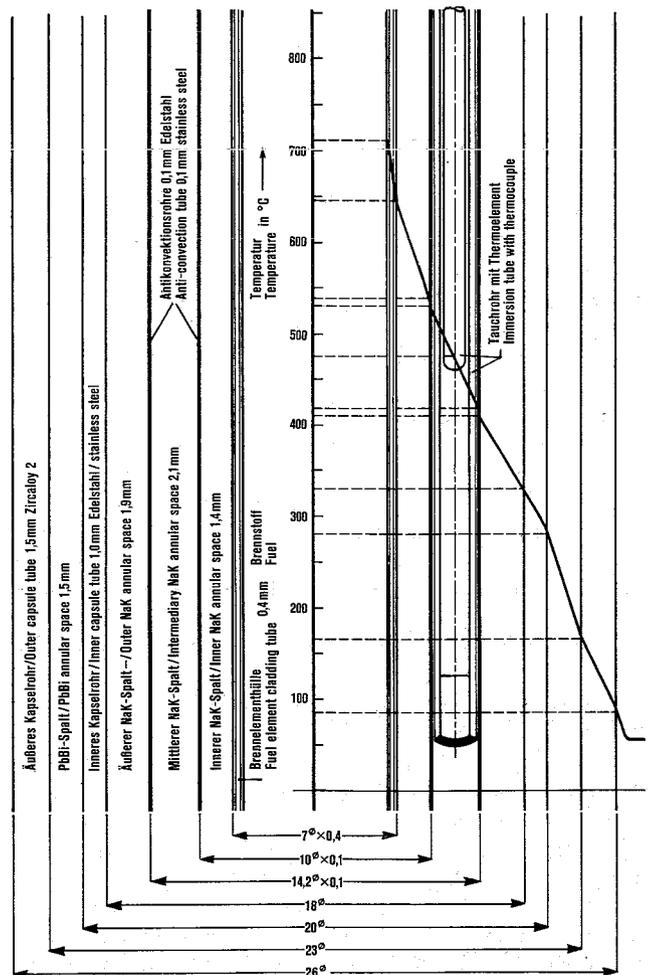


Fig. 3: Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung
Fig. 3: Temperature distribution within the irradiation capsule at 550 W/cm pin power

Tabelle: Übersicht über die seit 1967 im FR 2 in Na/PbBi – bzw. NaK/PbBi-Doppelkapseln bestrahlten Testbrennstäbe

Table: Survey of test fuel pins irradiated in Na/PbBi and NaK/PbBi double capsules since 1967 in the FR 2

Zahl der Stäbe Number of pins	Abmessungen Dimensions	Stableistung Pin power W/cm	Hüllrohrflächen- temperatur Cladding tube surface temperature °C	Brennstoff Fuel	erreichter spezifischer Abbrand* Specific burnup attained MWd/t*
37	7,4 mm Außen- ϕ (o. d.) 172 mm lang (long)	max. 680	max. 535 (Na)	UO ₂	max. 85 000
93	6,0 und 7,0 mm ϕ 172 mm lang (long)	max. 600	max. 750 (NaK)	UO ₂ -PuO ₂	max. 85 000
32	Kurzproben 6,2 . . . 7,5 mm ϕ 62 bis 120 mm lang (long)	max. 600	max. 685 (NaK)	Cermets UO ₂ ; Coating Cr, Mo	max. 35 000
20	Kleinkriechproben 6,4 mm ϕ 35 mm lang (long)	max. 600	max. 400 (NaK)	UO ₂ UN UC	30 000

* bezogen auf U und Pu

* U and U + Pu, respectively

kapsel kann sich in der Wasserführung frei nach unten ausdehnen. Entlang des äußeren Kapselrohres sind an den Stellen geringer Wärmeerzeugung, also in Höhe der Spaltgasplena und Verbindungsstopfen, sog. Wärmedämmrohre aufgeschweißt, um auch hier die Wärmeübertragungsmedien Na und PbBi flüssig zu halten und damit Lunkerbildung und Spannungsbeanspruchungen an den Innenkapseln in Grenzen zu halten.

In Fig. 3 ist das Temperaturprofil innerhalb einer NaK/PbBi-Doppelkapsel für eine Stableistung von 550 W/cm aufgetragen; der Brennstabdurchmesser beträgt 7 mm.

4. Betriebserfahrungen und Nachuntersuchungen

Mit dem Abschluß der PbBi-Kapsel-Serie im Frühjahr 1967 ist die Bestrahlung der hier beschriebenen Doppelkapsel angefallen. Seitdem sind in 48 KVE dieses Typs die in der Tabelle angeführten Testbrennstäbe bestrahlt worden oder befinden sich noch im Einsatz.

Beim Betrieb dieser 48 Einsätze sind kaum nennenswerte Störungen aufgetreten. Nur vier Einsätze mußten wegen erhöhter Temperatur-Anzeige und der damit verbundenen Burnout- und Korrosionsgefahr vorzeitig aus dem Reaktor genommen werden. Zwei weitere Einsätze mußten wegen Ausfall von Thermoelementen des 2-von-3-Systems vorzeitig ausgebaut werden.

Die maximale Betriebsdauer eines KVE betrug 2¹/₂ Jahre, entsprechend 615 Vollasttagen oder etwa 15 000 Stunden.

Die Nachuntersuchungen in den heißen Zellen haben im wesentlichen folgendes ergeben:

1. Von den bisher nachuntersuchten 80 Testbrennstäben zeigen nur vier mit vibriertem UO₂-PuO₂ gefüllte Stäbe einen Schaden, und zwar sehr ungleichmäßige Brennstoffverteilung, verbunden mit Aufblähungen und kleinen Längsrisen. Die Ursache ist bisher ungeklärt. Ein Burnout ist an keinem der Stäbe festgestellt worden.

2. Bei fast allen KVE zeigt sich an der äußeren 1,5 mm dicken Kapselwand aus Zircaloy-2 eine lokal sehr begrenzte Korrosion unter den Wärmedämmrohren, also oberhalb des Brennstoffbereichs. Diese Korrosionsstelle findet sich immer dann, wenn hier die Temperatur im Betrieb 400 °C überschritten hatte.

Aus Korrosionsversuchen ist bekannt, daß Zircaloy-2 von PbBi bei 350 °C noch nicht, doch bei 450 °C schon recht beträchtlich angegriffen wird. In einigen Fällen war die äußere Kapsel nahezu durchkorrodiert.

4. Operational experience and subsequent investigations

After ending the PbBi capsule series in the spring of 1967 the irradiation of the above described double capsule started. Since then, the test fuel pins in 48 KVE of this type listed in the Table have been or are still being irradiated.

During the operation of these 48 rings no trouble worth mentioning occurred. Only 4 rigs had to be prematurely taken from the reactor because of increased temperature indications and the connected risk of burnout and corrosion. Two further rigs had to be withdrawn prematurely because of the breakdown of thermocouples of the 2 out of 3 system.

The maximum operational period of a KVE was 2¹/₂ years corresponding to 615 days at full load or about 15 000 h.

The subsequent investigations in the hot cells have shown:

1. Of the 80 test fuel pins investigated up to now only four filled with vibrated UO₂-PuO₂ showed damage, i.e. very inhomogeneous fuel distribution combined with swelling and small longitudinal cracks. The cause has remained unexplained so far. No burnout was found in any pin.

2. Almost all KVE showed locally very limited corrosion at the outer 1,5 mm thick capsule wall of Zircaloy-2 underneath the thermal insulation tubes, i.e. above the fuel region. This corrosion point is always found where the temperature during operation had exceeded 400 °C. It is known from corrosion tests that Zircaloy-2 is not attacked by PbBi at 350 °C but considerably at 450 °C. In some cases the outer capsule was almost completely corroded.

3. A further difficulty is caused – as earlier in the PbBi capsule series – by the non-uniform melting and solidification of the PbBi column corresponding to the axial neutron flux density or power curve during start-up and shutdown of the reactor.

The melting, especially, results in high compressive forces due to the expansion of the PbBi (about 1,5%) causing in many cases a certain indentation of the inner capsule filled with Na or NaK of 20 mm o.d. and 1 mm wall thickness. This deficiency has not led to a restriction of the irradiation tests.

4. The same compressive forces caused, though in fewer cases, small longitudinal cracks in the immersion tubes of 2 mm o.d. and 0,4 mm wall thickness for the thermocouples. Each inner capsule carries four to six such immersion tubes though not each of them contains a thermocouple. Only those immersion tubes cracked which did not contain a

3. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich – wie auch schon früher bei der PbBi-Kapsel-Serie – durch das ungleichmäßige Aufschmelzen und Erstarren der PbBi-Säule, entsprechend dem axialen Neutronenflußdichte- bzw. Leistungsverlauf beim Anfahren und Abschalten des Reaktors.

Besonders beim Aufschmelzen kommt es infolge der Schmelzexpansion des PbBi (etwa 1,5%) zu starken Druckkräften, die in vielen Fällen ein gewisses Einbeulen der inneren Na- bzw. NaK-gefüllten Kapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wanddicke zur Folge hatten. Dieser Mangel führte aber bisher zu keiner Beeinträchtigung der Bestrahlungsversuche.

4. Die gleichen Druckkräfte führten auch, in allerdings wenigen Fällen, zu kleinen Längsrissen an den Tauchrohren von 2 mm Außendurchmesser und 0,4 mm Wanddicke zur Aufnahme der Thermoelemente. Jede innere Kapsel trägt vier bis sechs solcher Tauchrohre; aber nicht jedes beinhaltet ein Thermoelement. Gerissen sind nur immer solche Tauchrohre, die kein Thermoelement, also nur PbBi enthielten. Hier konnte einfach Abhilfe durch Einführen eines Edelstahlrahtes von 1 mm Durchmesser geschaffen werden.

5. Durch axiale Zugkräfte, wie sie beim Reaktorabschalten infolge ungleichmäßigen Erstarrens des PbBi an den dann im Außenrohr eingespannten Innenkapseln auftreten, ist an einer Na-Kapsel ein Verbindungszapfen abgerissen. Dadurch kam es, wie natürlich auch beim Reißen der Tauchrohre, zu einem Austausch zwischen Na und PbBi in allerdings geringen Mengen, so daß es zu keinerlei Störungen kam.

6. In den 48 KVE wurden 480 Chromel-Alumel-Thermoelemente von 1 mm Manteldurchmesser eingesetzt. Mehr als 90% haben über die gesamte Betriebszeit einwandfrei funktioniert. In einigen Fällen ist es zum Eindringen von PbBi durch den dünnen Thermoelementmantel gekommen.

5. Ausblick

Der beschriebene Doppelkapseltyp hat sich bei den gegebenen Anforderungen bewährt und wird auch künftig noch für verschiedenartige Bestrahlungsvorhaben eingesetzt. Vorgeesehen sind z. Z. noch etwa 20 Einsätze.

Für die Bestrahlung von kárbidischen Hochleistungsbrennstäben mit Stábleistungen bis zu 1300 W/cm bei maximal 10 mm Brennstabdurchmesser ist nun eine einwandige NaK-Kapsel entwickelt worden. Dieser Schritt erscheint nach den bisherigen Erfahrungen heute notwendig und möglich. Selbstverständlich kommt hierbei der Sicherheit der Kapselwand, als einziger Trennwand zwischen NaK und dem Reaktorkühlwasser, hauptsächlich bei langen Einsatzzeiten besondere Bedeutung zu.

(Eingegangen am 3. 11. 1969)

thermocouple but only PbBi. This could be counteracted by introducing a stainless steel wire of 1 mm dia.

5. During reactor shutdown occur axial tensile forces on the inner capsules held in the outer tube due to nonuniform solidification of the PbBi. In one case these forces caused the break of a connecting stud of a Na capsule.

This led to an exchange of small amounts of Na and PbBi which also occurred during cracking of the immersion tubes out did not cause trouble.

6. 480 chromium-alumel thermocouples of 1 mm housing diameter were used in the 48 KVE. More than 90% functioned properly during the whole operational period. In some cases PbBi penetrated through the thin thermocouple housing.

5. Prospects

The double capsule type described has satisfied the requirements and will be used in future also for different irradiation projects. At present about 20 further rigs are intended.

A single-wall NaK capsule has now been developed for the irradiation of carbide high power fuel pins with pin powers of 1300 W/cm at a maximum fuel pin diameter of 10 mm. Previous experience made this step necessary and possible. Of special importance, especially during long periods of operation, is the safety of the capsule wall, the only wall separating NaK and the reactor cooling water.

Literatur - References

- [1] Oehme, H., und W. Marth: Kerntechnik **8**, 253 (1966)
- [2] Häfner, H.: Kerntechnik **10**, 136 (1968). – Bericht KFK 780 (1968)
- [3] Bojarsky, E.: Symposium on Irradiation Experiments, European Atomic Energy Society, Den Haag, Sept. 1965
- [4] Dorner, St., und H. Katheder: Kerntechnik, im Druck