

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

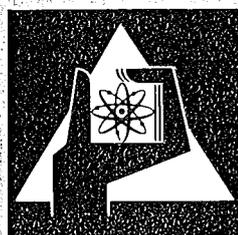
Mai 1974

KFK 1985

Institut für Material- und Festkörperforschung

**Bestrahlungseinrichtungen  
für Brennstoff und Strukturmaterial**

, Arbeitsgruppe Bestrahlungstechnik ,



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1985

Institut für Material- und Festkörperforschung

Bestrahlungseinrichtungen  
für Brennstoff und Strukturmaterial

Arbeitsgruppe Bestrahlungstechnik

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Vorbemerkung

Vom Kernforschungszentrum Karlsruhe sind für verschiedene Forschungsvorhaben, insbesondere im Rahmen der Brennelemententwicklung für das Projekt Schneller Brüter (PSB), Bestrahlungsversuche an Brennstoff- und Strukturmaterialproben sowie an Testbrennstäben durchzuführen. Dafür werden Bestrahlungseinrichtungen benötigt, die den je nach der Aufgabenstellung sehr speziellen und verschiedenartigen Anforderungen gerecht werden müssen und den Gegebenheiten der einzelnen Forschungsreaktoren anzupassen sind. Solche Bestrahlungsexperimente werden hauptsächlich in den Reaktoren FR2 in Karlsruhe und BR2 in Mol durchgeführt. Aber auch die Reaktoren HFR in Petten und SILOE in Grenoble werden - wenn auch in geringerem Umfang - genutzt.

Dieser Bericht enthält die Kurzbeschreibungen von Bestrahlungseinrichtungen, die zum überwiegenden Teil von der Arbeitsgruppe Bestrahlungstechnik im Institut für Material- und Festkörperforschung entwickelt und gebaut wurden. Aber auch von GEX/Mol, CEN/Grenoble und anderen Arbeitsgruppen wurde eine Reihe der zum Teil sehr speziellen Anlagen bereitgestellt.

In den Einzelbeiträgen wird, soweit möglich, auch auf Erfahrungen bei Herstellung und Betrieb der Bestrahlungseinrichtungen kurz eingegangen.

## Preliminary remark

### Irradiation Facilities for Reactor Fuel and Structural Materials

Various research projects carried out by the Karlsruhe Nuclear Research Center, especially in the field of fuel element development for the Fast Breeder Project (PSB) require in-pile experiments on fuel and structural material samples and fuel test pins. Irradiation facilities are used for this work which must satisfy the very specific and diverse requirements resulting from the respective problems at hand and which must be adapted to the conditions imposed by the respective research reactors. Such in-pile experiments are performed mainly in the FR2 reactor at Karlsruhe and the BR2 reactor at Mol. However, to a lesser extent also the HFR reactor at Petten and the SILOE reactor at Grenoble are being employed.

This report contains brief descriptions of irradiation facilities most of which were designed and built by the working group Irradiation Technology in the Institute of Materials and Solid State Research (IMF). Also GEX/Mol, CEN/Grenoble and other groups supplied a number of highly specialized systems.

The individual contributions contain as many references as possible to the experience gathered in building and operating the in-pile facilities.

## Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Hüll- und Strukturmaterial-Bestrahlungen	
1.1	Nicht-instrumentierter Bestrahlungseinsatz für Materialproben bei niedrigen Temperaturen (TYP MOL 1)	3
1.2	Bestrahlungseinrichtung für Hüllrohrproben unter Innendruck und bei höheren Temperaturen (TYP MOL 2)	6
1.3	Bestrahlungseinrichtung für Hüllrohrproben unter thermischer und mechanischer Wechselbeanspruchung (TYP MOL 4)	12
1.4	Bestrahlungseinrichtung für unbelastete Materialproben bei höheren Temperaturen (TYP MOL 3)	21
1.5	Bestrahlungseinrichtungen für in pile-Dehnungsmessungen an Materialproben (TYP MOL 5)	29
1.6	Bestrahlungsexperiment im Reaktor HFR, Petten, zur Untersuchung der strahlungsinduzierten Aufnitrierung an Reaktortankwänden	40
2.	Brennstoff-Bestrahlungen in Kapseln	
2.1	Einwandige Blei-Wismut-Kapseln zur Bestrahlung von Testbrennstäben im FR2 (interne Bezeichnung Typ 1, 2 u. 3)	45
2.2	Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln zur Bestrahlung von Schnellbrüter-Testbrennstäben im FR2 (Typ 4 und 5)	49
2.3	Gasspalt-Doppelkapsel zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstoffen (Typ 6)	53
2.4	Einwandige NaK-Kapsel zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben im FR2 (Typ 7)	56
2.5	Instrumentierte Brennstoff-Kriechkapsel im FR2	59
2.6	Druckschwellkapsel mit kontinuierlicher Dehnungsmessung (Typ 9)	63
2.7	Hochdruckkapsel zur Bestrahlung von Brennstoff-Schwellproben im FR2 (Typ 10)	67
2.8	FAFNIR, eine Kapsel zur Bestrahlung von oxidischen Schnellbrüter-Brennstäben im BR2 (Typ Mol 8)	71

	Seite
2.9 VADIA, eine Bestrahlungskapsel zur Mes- sung von Hüllrohraufweitungen im Siloe	74
2.10 FASOLD, eine Karbidstab-Bestrahlungs- kapsel mit Cd-Abschirmung im BR2 (Typ Mol 11)	77
2.11 CONFLUENT, eine Bestrahlungskapsel zur kontinuierlichen Kriechdehnungsmessung an Brennstoffproben im Reaktor BR2 (Typ Mol 12)	80
2.12 CFC, eine Bestrahlungseinrichtung mit Unterdruckregelung für in pile-Verträg- lichkeitstests Brennstoff/Hülle im BR2 (Typ Mol 16)	83
2.13 Bestrahlungseinrichtungen zur Erzeugung von technisch nutzbaren Transuranen	86
 3. Brennstoff-Bestrahlungen in Loops	
3.1 Helium-Testloop im FR2	99
3.2 Versuchseinrichtung für Kurzzeitbestrah- lung von Brennstäben im FR2	102
3.3 Einrichtung zur Vermessung von Brennstab- proben zwischen Bestrahlungszyklen (FR2-Versuchsgruppe 5)	113
3.4 Hochdruckbestrahlungseinrichtung	117
3.5 MZFR-Druckwasser-Loop für Kapselbestrah- lungen	122

1. HÜLL- UND STRUKTURMATERIAL-BESTRAHLUNGEN



## 1.1 Nicht-instrumentierter Bestrahlungseinsatz für Materialproben bei niedrigen Temperaturen (TYP MOL 1)

L.Schmidt

Bestrahlungen von unbelasteten Materialproben bei niedrigen Temperaturen - im allgemeinen unter 100 °C - werden im Reaktor BR2, Mol, in relativ einfachen nicht-instrumentierten Einsätzen - TYP MOL 1 - durchgeführt [17]. Der Einsatz besteht aus einem Oberteil, der mit dem Reaktordeckel verschraubt ist und einem Unterteil, dem Probenträger. Der offene Probenträger ist mit einer Vielzahl von ungekapselten oder bei Korrosionsgefahr gekapselten Proben beladen, die vom Primärkühlwasser umspült und gekühlt werden. In der Abbildung ist ein Probenträger mit gekapselten Rundproben dargestellt.

Durch Anordnung eines Gasspaltes in den Probenkapseln können auch höhere Bestrahlungstemperaturen erzeugt werden. In diese Kapseln eingebaute Temperaturmonitore (Metalle mit unterschiedlichen Schmelzpunkten) geben nach der Bestrahlung Aufschluß über das tatsächliche Temperaturniveau. Es ist außerdem möglich, die Probenkapseln mit Cd-Schilden zur Abschirmung von thermischen Neutronen auszurüsten.

Zur Ermittlung der Neutronendosis sind die Probenträger mit mehreren Detektoren bestückt.

Infolge des unkomplizierten Aufbaues ist die Herstellung der Einsätze mit relativ geringen Kosten verbunden und kann kurzfristig durchgeführt werden.

Die Bestrahlungen laufen seit 1964. Bisher wurden ca. 20 Einsätze mit Erfolg bestrahlt.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige charakteristische Angaben gemacht.

---

### Literatur:

[17] Kramer, W.: Bestrahlungseinrichtungen für Hüll- und Strukturmaterialien, Kerntechnik 13, 331 (1971)

Tabelle:

Durchmesser des Bestrahlungseinsatzes	17,4 und 25,4 mm
beladbare Länge des Einsatzes	max. 790 mm
Proben	FlachzerreiBproben RundzerreiBproben Kerbschlagproben Folien Thermoelemente
Anzahl der Proben	max. 163 FlachzerreiBproben
Neutronendetektoren	gekapselte Co- und Fe-Detektoren
Bestrahlungstemperaturen ungekapselte Proben gekapselte Proben	< 100 °C max. 450°C
NeutronenfluB (max.) thermisch schnell (E>0,1 MeV)	4,5 · 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> sec 6,5 · 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> sec
Neutronendosis (max.) schnell	1 · 10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup>

# PROBENTRÄGER

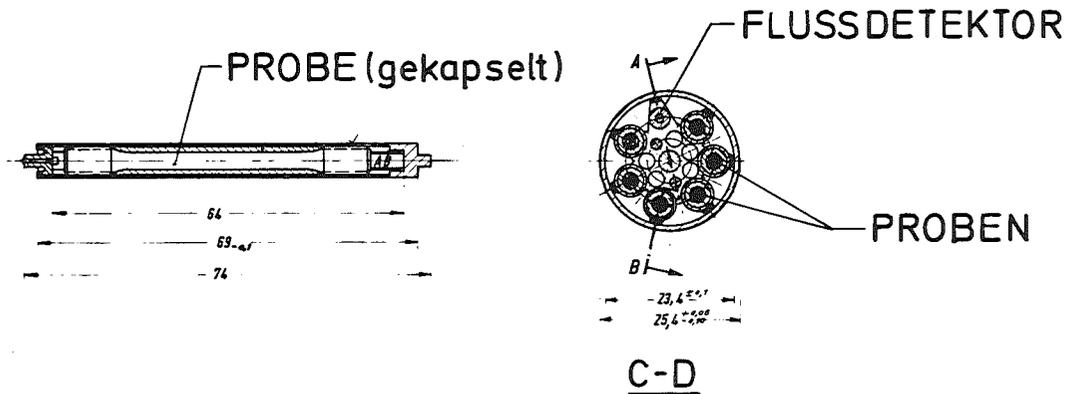
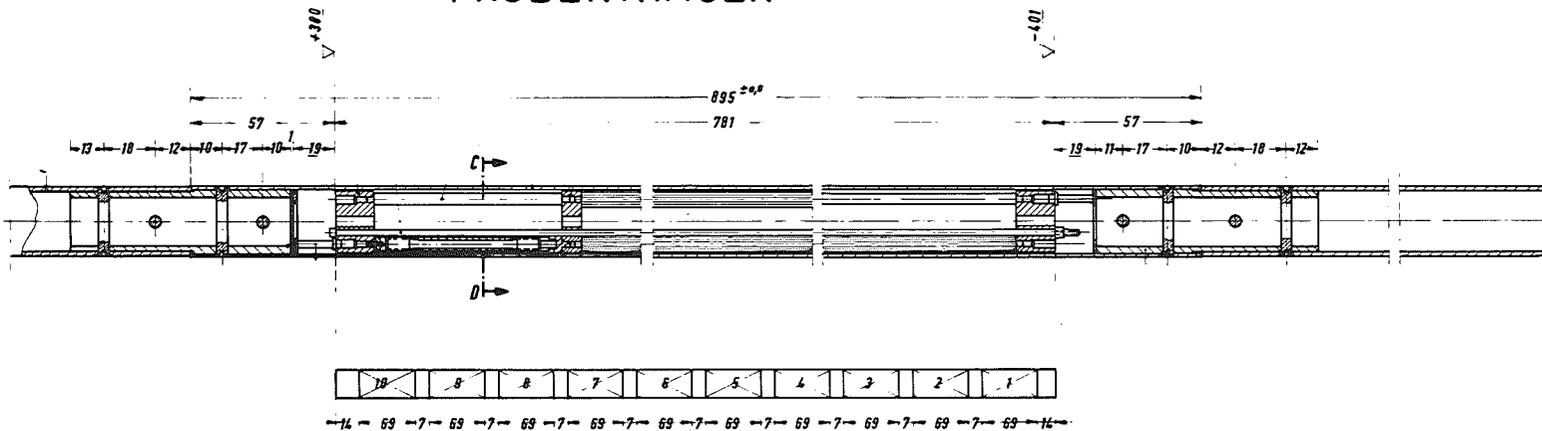


ABB.	PROBENTRÄGER MOL 1
------	-----------------------

## 1.2 Bestrahlungseinrichtung für Hüllrohrproben unter Innendruck und bei höheren Temperaturen (TYP MOL 2)

L. Schmidt

In der Bestrahlungseinrichtung - TYP MOL 2 - werden Brennstab-Hüllwerkstoffe in Form von kleinen Röhrrchen bei höheren Temperaturen und unter mechanischer Belastung durch Innendruck im Reaktor BR2, Mol, bestrahlt. Die Versuche dienen zur Ermittlung der in pile-Zeitstandfestigkeit, wobei als Parameter die Belastung und Temperatur für jeden Prüfling individuell variiert werden können [17].

Die komplette Bestrahlungseinrichtung besteht aus dem Bestrahlungseinsatz, der Temperaturregelanlage und der Druckversorgungsanlage (Abb. 1). Die Versorgungs- und Regelanlagen sind für den parallelen Betrieb zweier Einsätze ausgelegt. Die Einsätze werden in einem durchgehenden Kanal im Innern eines 6-schaligen BR2-Brennelementes mit einem nutzbaren Durchmesser von 17,4 mm bestrahlt. Die Instrumentierung der Einsätze erfolgt von unten, d.h. die Anschlüsse für elektrische Leitungen (Thermoelemente, Heizleiter) und Gasleitungen befinden sich in "trockener Umgebung" im sub pile room unterhalb des Reaktorkessels.

In einem Bestrahlungseinsatz sind 8 Prüflinge (Abb. 2) übereinander angeordnet, von denen jeder über Thermoelementleitungen, eine Heizstromleitung und ein Druckkapillarrohr mit den Regel- und Steuereinrichtungen im Reaktorgebäude verbunden ist. Die Prüflingstemperatur wird mit jeweils 3 Thermoelementen gemessen, deren Adern direkt auf die Oberfläche der Druckröhrrchen aufgeschweißt sind. Die Röhrrchen sind mit Endstopfen verschlossen, in welche auf der einen Seite der Heizleiter und auf der anderen Seite das Kapillarrohr für die Druckeinspeisung eingeschweißt sind. Der gewendelte Heizleiter ist eng an die Innenwand des Röhrrchens angelegt. Die beiden Endstopfen übernehmen gleichzeitig durch Rippen die Zentrierung des Prüflings in dem Aluminiumprobenträger, wobei die axiale Dehnung nicht behindert wird. Die radiale Dehnung des Prüflings kann infolge

eines Spaltes zwischen Prüfling und Probenträger bis zu 14 % betragen.

Im Einsatz sind zwischen den einzelnen Prüflingen Co- und Fe-Detektoren zur Ermittlung der Neutronendosis angeordnet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Einsatzdaten zusammengefaßt.

Die Prüflingstemperatur kann mit einer Präzisionsregelanlage sehr genau ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) auf einen vorgegebenen Wert eingeregelt werden. Als Istwert für den Regelvorgang dient die Spannung eines der Thermoelemente des Prüflings. Dieser Thermospannung wird die Spannung eines Sollwertgebers entgegengeschaltet. Die Differenzspannung wird über einen Nullverstärker dem PID-Regler zugeführt. Dieser steuert einen Transduktor, der über einen Trenn- und Anpassungstransformator den Strom für den Heizer im Prüfling liefert.

Die Druckversorgung der Hüllröhrchen erfolgt aus einem Druckbehälter über ein Drosselventil und eine Verteilerstrecke. Der Druckbehälter wird von einem Membrankompressor mit ölfreiem Helium aufgeladen. Jeder Prüfling kann mit unterschiedlichem Druck beaufschlagt werden.

Nähere Einzelheiten über die Bestrahlungseinrichtung können aus 2\_7 und 3\_7 entnommen werden.

Die Anlage ist seit Mitte 1966 in Betrieb. Es wurden bisher 37 Einsätze mit 296 Prüflingen bestrahlt.

### Literatur

- 1\_7 Closs, K.D., Laue, H.J.: Ergebnisse der Mol 2-Versuche, Bericht KFK 1152 (1969)
- 2\_7 Kramer, W., Will, H.: Brüter-Versuchshüllrohre für Bestrahlungsexperimente; meß- und fertigungstechnische Probleme, Kerntechnik 9 (285), 1967.
- 3\_7 Kramer, W., Schmidt, L., Will, H.: Bestrahlungseinrichtung zur Hüllmaterialuntersuchung für schnelle Brutreaktoren, Kerntechnik 9 (499) 1967.



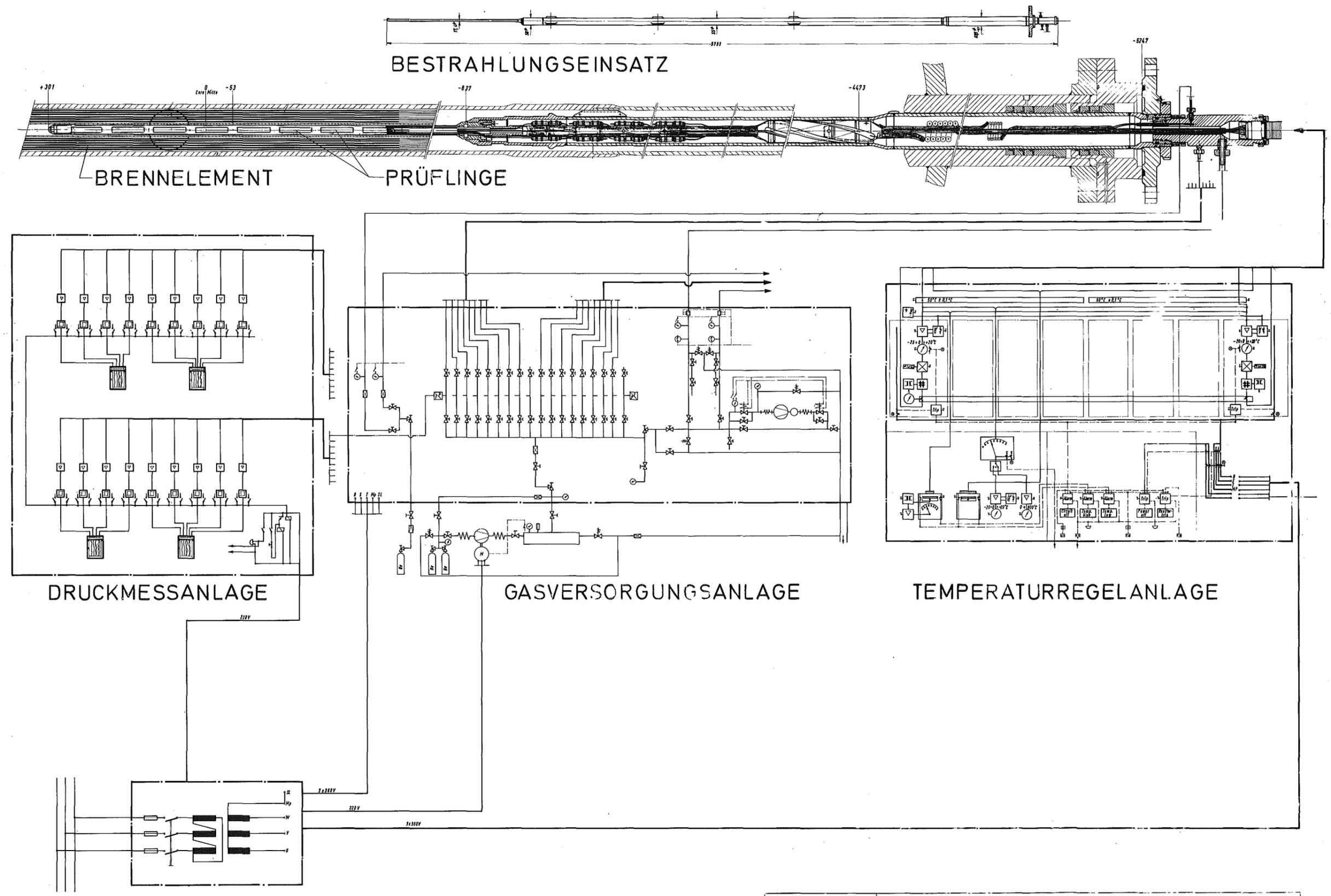
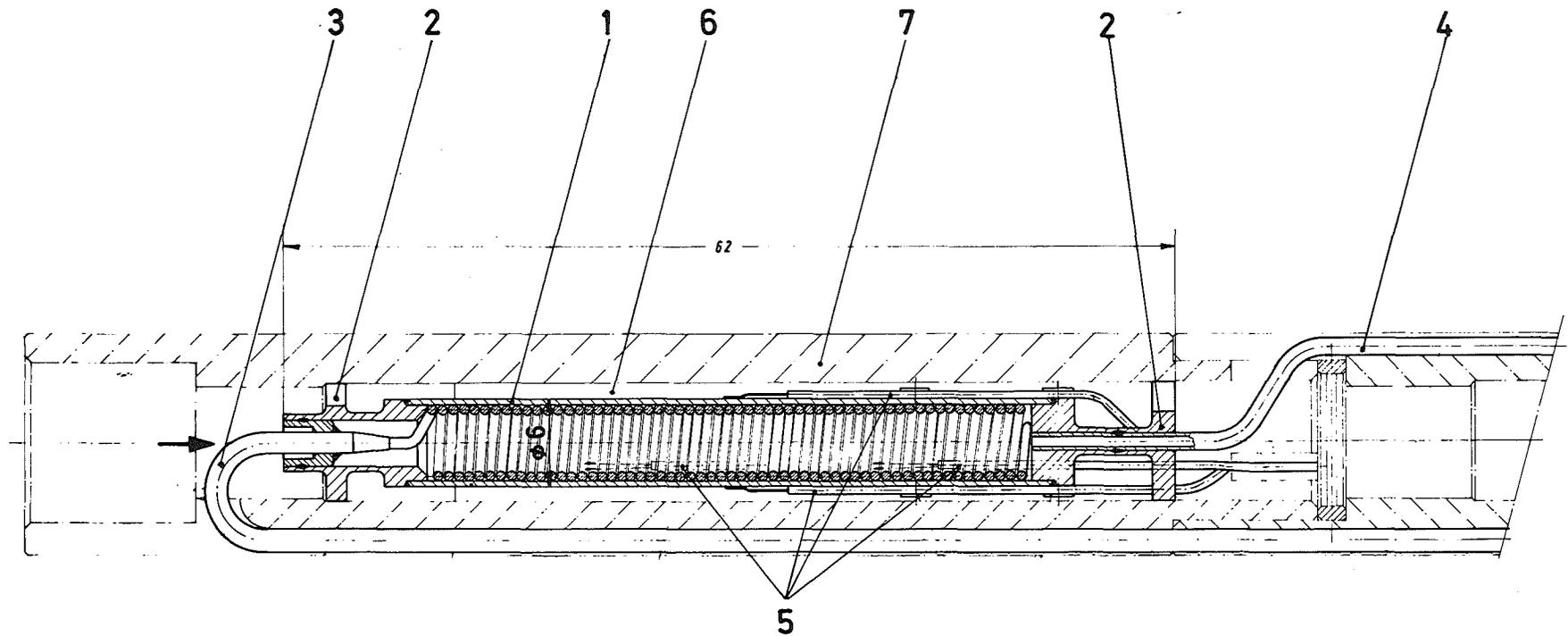


ABB. 1: BESTRAHLUNGSEINRICHTUNG  
MOL 2





1. HÜLLROHRPROBE, CLADDING TUBE SPECIMEN
2. ENDSTOPFEN, PLUG
3. HEIZLEITER, HEATER
4. DRUCKGASROHR, PRESSURE GAS TUBE
5. THERMOELEMENTE, THERMOCOUPLES
6. GASSPALT, GAS GAP
7. AL-PROBENHALTER, SPECIMEN HOLDER

ABB.2:	PRÜFLING MOL 2
--------	-------------------

### 1.3 Bestrahlungseinrichtung für Hüllrohrproben unter thermischer und mechanischer Wechselbeanspruchung (TYP MOL 4)

L. Schmidt

Diese Bestrahlungseinrichtung ist eine Weiterentwicklung der Mol 2-Anlage. Es sollen hier Hüllrohre auf ihr in pile-Zeitstandverhalten bei wechselnden Temperaturen und wechselnder mechanischer Belastung getestet werden. Diese Belastungsarten treten in Leistungsreaktoren bei An- und Abschaltvorgängen sowie bei Lastwechseln auf.

Die mechanischen Belastungen werden durch Innen- und Außen- druck, bis maximal  $500 \text{ kp/cm}^2$ , auf die Hüllrohrprüflinge aufgebracht. Beim Zyklieren können Bereiche von  $40$  bis  $200 \text{ kp/cm}^2$  durchfahren werden. Als Druckmedium ist Helium vorgesehen.

Die Zeiten für den Druckanstieg und die Druckentlastung sind jeweils gleich und können  $10$  Sekunden bis  $166,5$  Minuten betragen. Die Haltezeiten im Belastungsmaximum und -minimum können im Bereich von  $0$  bis  $999$  Minuten eingestellt werden. Im Diagramm, Fig. 1, ist eine Belastungskurve dargestellt.

Die Prüflingstemperaturen haben in ihrem zeitlichen Verlauf - d.h. Aufheizzeit, Haltezeit bei maximaler und minimaler Temperatur, Abkühlzeit - die gleiche Charakteristik wie die Druckbeanspruchungen. Die minimalen Temperaturen sind einstellbar von  $300$  bis  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  und die maximalen Temperaturen von  $600$  bis  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Es ist weiterhin möglich, einen Temperaturgradienten von  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  in  $10 \text{ sec}$  zu fahren (Scram-Situation beim SNR).

Folgende Versuchsreihen sind geplant:

#### Versuchsreihe 1:

Konstanter Innendruck, wechselnde Temperatur (Fig. 2)

#### Versuchsreihe 2:

Konstante Temperatur, wechselnder Innendruck (Fig. 3)

#### Versuchsreihe 3:

Wechselnde Temperatur, wechselnder Innendruck (Fig. 4).

Versuchsreihe 4:

Konstante Temperatur, wechselnder Innen- und Außendruck (Fig.5).

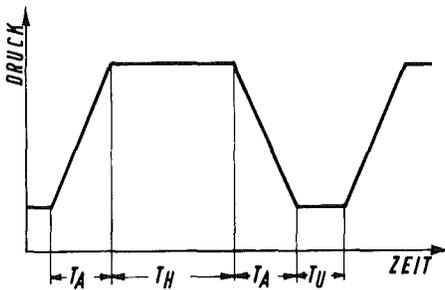


Fig. 1

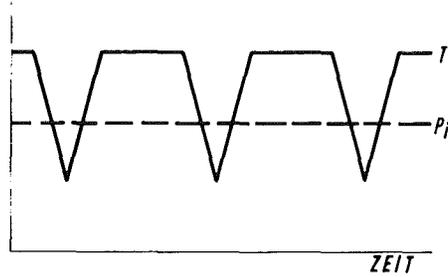


Fig. 2

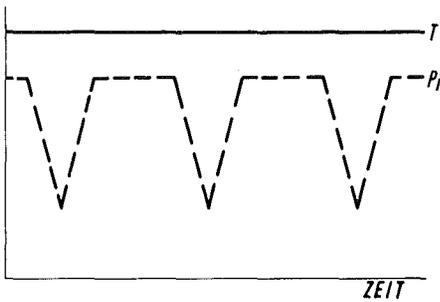


Fig. 3

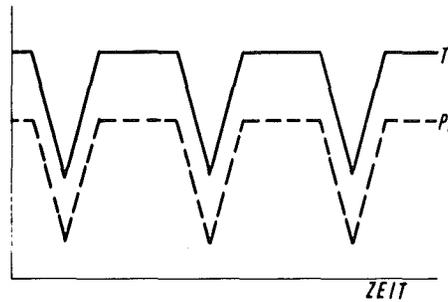


Fig. 4

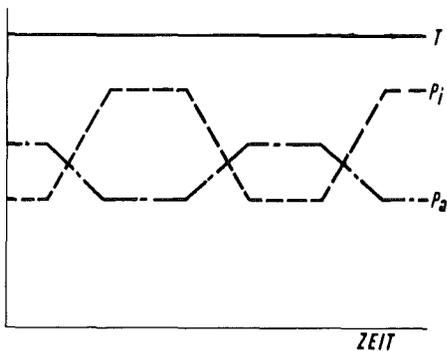


Fig. 5

- $T_A$  Druckerstiegs- bzw. Druckerlastungszeit
- $T_H$  Haltezeit im Belastungsmaximum
- $T_U$  Haltezeit im Belastungsminimum
- $T$  Temperatur
- $P_i$  Innendruck
- $P_a$  Außendruck

Die Bestrahlungseinrichtung gliedert sich auf in den in pile-Teil, das ist der Bestrahlungseinsatz mit den Prüflingen, und den out of pile-Teil, das sind die Temperaturregelanlage und die Druckversorgungsanlage mit der Leckmeßeinrichtung.

Der Bestrahlungseinsatz mit den Prüflingen unterscheidet sich im wesentlichen nicht von dem der Mol 2-Anlage und soll deshalb hier nicht näher beschrieben werden.

Ausführliche out of pile- und in pile-Messungen der axialen Temperaturverteilung an den Mol 2-Prüflingen zeigten, wie aus Abb.1 zu ersehen ist, nicht sehr günstige Werte. Dies ist zurückzuführen auf die Prüflingszentrierung und die Anordnung der elektrischen Heizung im Prüfling. Eine Neuentwicklung für Mol 4 mit geänderten Zentrierungen und einer Vergrößerung der beheizten Prüflingslänge zeigte bei Vorversuchen ein wesentlich besseres Temperaturprofil (s. Abb.2). Diese Prüflingsform wird seit einiger Zeit auch in Mol 2 eingesetzt.

Mit dieser Prüflingsanordnung können allerdings nur die ersten drei Versuchsreihen (Beaufschlagung mit Innendruck) gefahren werden. Für die Versuchsreihe 4 (Außen- und Innendruck) ist eine Änderung der Prüflingsform erforderlich.

Die Druckversorgungsanlage gliedert sich in die Regelstrecken zur Druckbeaufschlagung der Hüllröhrchen, die Einsatzversorgung, die Evakuierungsanlage und die Leckmeßanlage (Abb.3).

Aus Synchronisationsgründen liefert ein gemeinsamer Sollwertgeber (Programmgeber) die Führungsgrößen für die Druck- und Temperaturregelanlage.

Im Regler des Druckregelkreises werden Soll- und Istwert zu einem Regelsignal verarbeitet, welches Magnetventile steuert, über die die Prüflinge schrittweise belastet bzw. entlastet werden.

Die Leckmessung zur Ermittlung der Standzeit des Prüflings basiert auf einer Vergleichsmessung der Drücke von zwei definierten Kammern. Eine Kammer wird vom Prüfling gebildet, die andere, die den Referenzdruck liefert, von einer abgesperrten Rohrstrecke.

Mit der Temperaturregelanlage werden die Oberflächentemperaturen der Prüflinge nach einem vorgegebenen Programm zyklisch geändert oder konstant gefahren.

Jedem Prüfling bzw. jeder Prüflingsheizung ist ein Regelkreis zugeordnet. Die Regelkreise sind in digital-analoger Bauweise ausgeführt. In Abb.4 ist ein Prüflingsregelkreis schematisch dargestellt.

Der Istwert wird in dem auf die Prüflingsoberfläche aufgeschweißten Thermoelement gebildet und im PID-Regler mit dem Sollwert verglichen. Stellglied ist eine Thyristoreinheit, die über einen nachgeschalteten Trenntransformator die Prüflingsheizung versorgt. Die max. Heizleistung pro Regelkreis beträgt ca. 450 W.

Der Sollwert wird im Sollwertgeberprogramm gebildet, der mit einem Programmsteuergerät zur automatischen Führung der Temperatur und zur Vorgabe des zeitlichen Ablaufes des Prozesses ausgerüstet ist. Das Programmsteuergerät arbeitet mit elektronischen Vor- und Rückwärts-Zählketten, die ihre Impulse von der Netzfrequenz erhalten.

Detaillierte Beschreibungen der Anlage können aus [1] und [2] entnommen werden.

Zur Zeit werden mit der Anlage out of pile-Versuche gefahren, bei denen in speziellen Vorrichtungen die Dehnung der Prüflinge mit jeweils 2 induktiven Wegaufnehmern kontinuierlich gemessen wird (Abb. 5). Die Wegaufnehmer sind um  $180^\circ$  versetzt in Prüflingsmitte angeordnet und parallel auf einen Meßverstärker geschaltet. Das Ausgangssignal wird auf einem Linienschreiber

registriert. Bisher wurden 80 Prüflinge bis zu Standzeiten von 1200 h getestet, wobei allerdings bei konstantem Innendruck nur thermische Zyklen gefahren wurden. Beim Probetrieb mit zyklischen Innendrücken ergaben sich Dichtprobleme an den Magnetventilen, so daß diese Versuchsreihen vorerst zurückgestellt worden sind.

#### Literatur

[<sup>-1</sup> ] L.Schmidt und H.Will:

Facility for in pile creep experiments on cladding tubes under thermal and stress cycling.

Nuclear Engineering and Design 14 (1970)

[<sup>-2</sup> ] L.Schmidt:

Breeder fuel rod can testing - a novel measurement and control system.

Nucl. Engineering International 17 (1972).

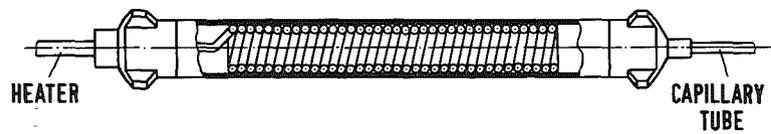
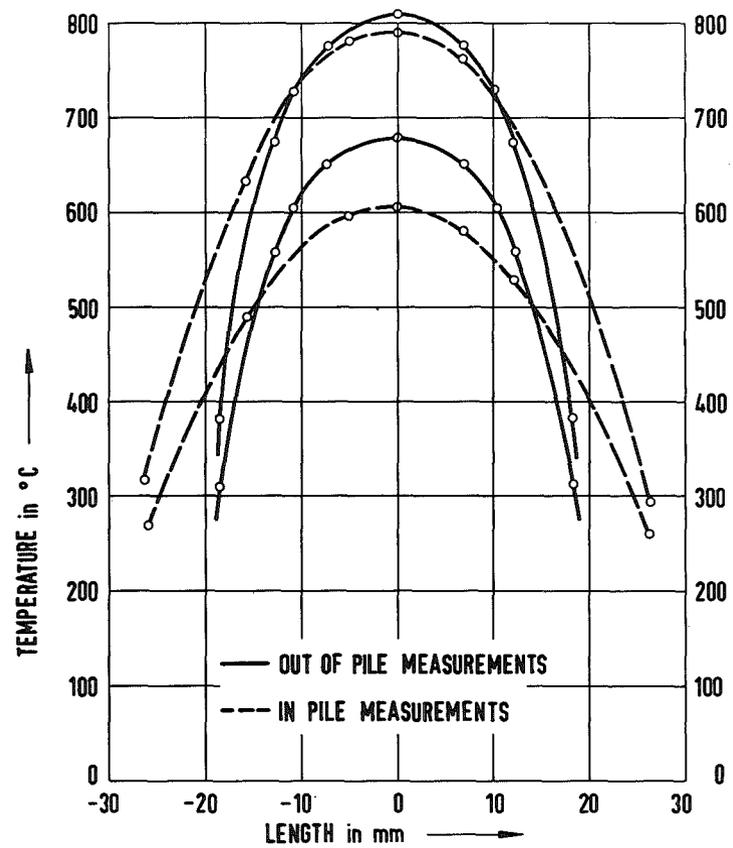


Abb. 1

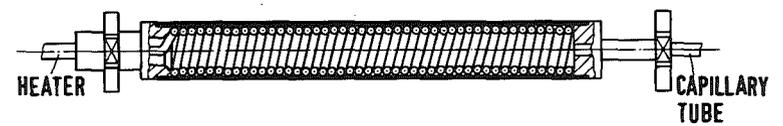
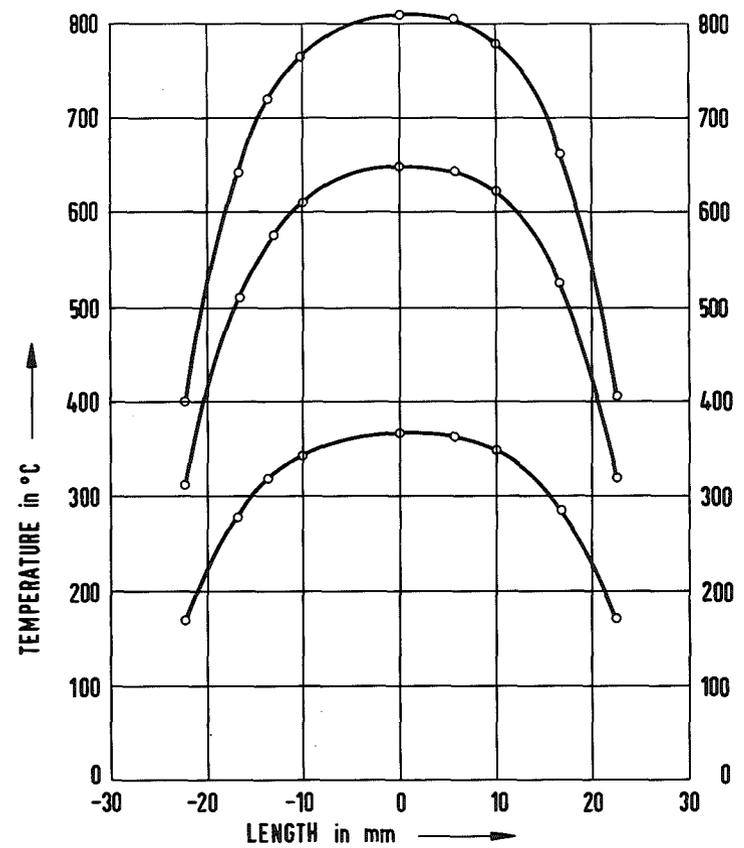
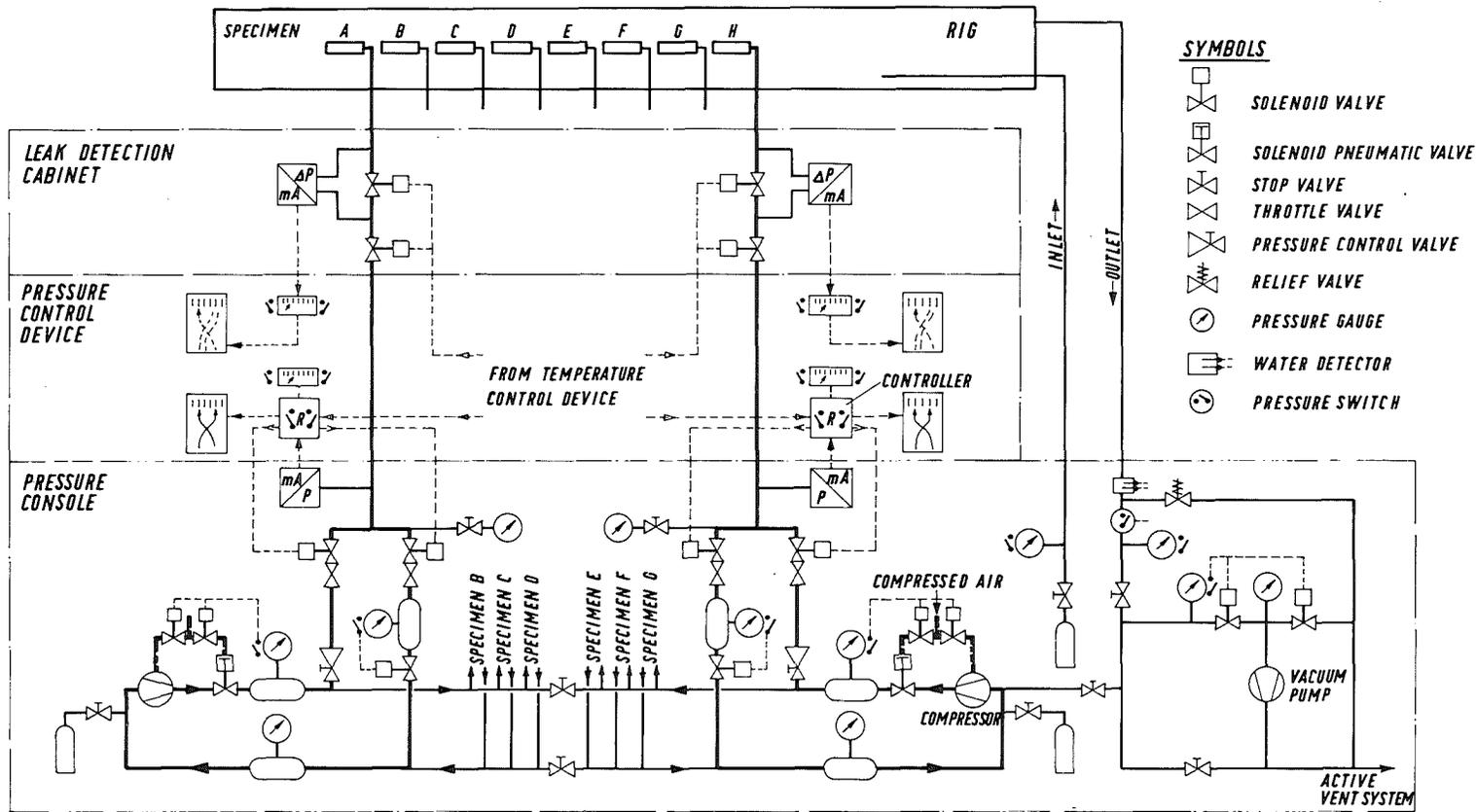
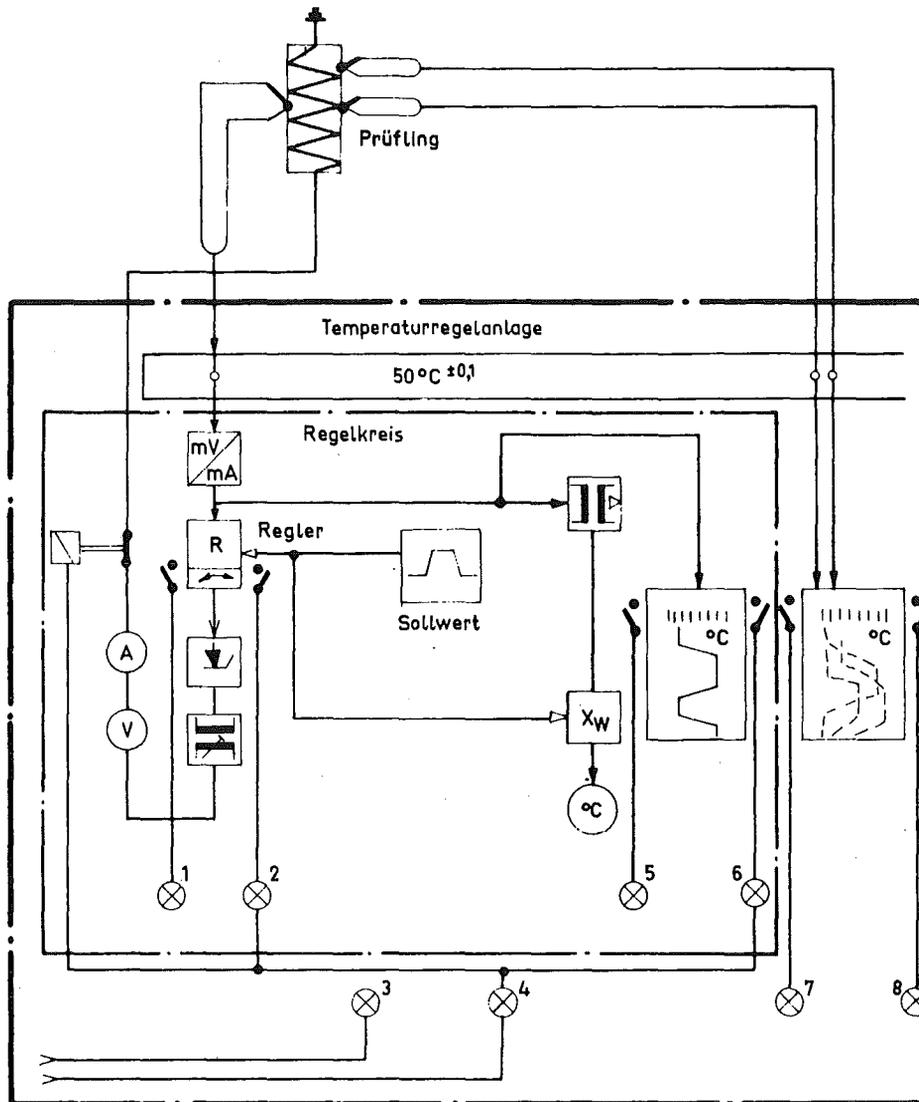


Abb. 2



**ABB. 3: DRUCKREGELANLAGE MOL 4**



⊗ Alarm

- 1 Sollwertveringerung
  - 2 Sollwertvergrößerung
  - 3 Stromversorgung abgeschaltet
  - 4 Reaktor Leistung abgeschaltet
  - 5 Thermoelement-Fehler
  - 6 Temperatur angestiegen
  - 7 Thermoelement-Fehler
  - 8 Temperatur angestiegen
- } Regelung Thermoelement
- } Zweit- und Dritt- Thermoelemente

Abb. 4: Temperaturregelkreis

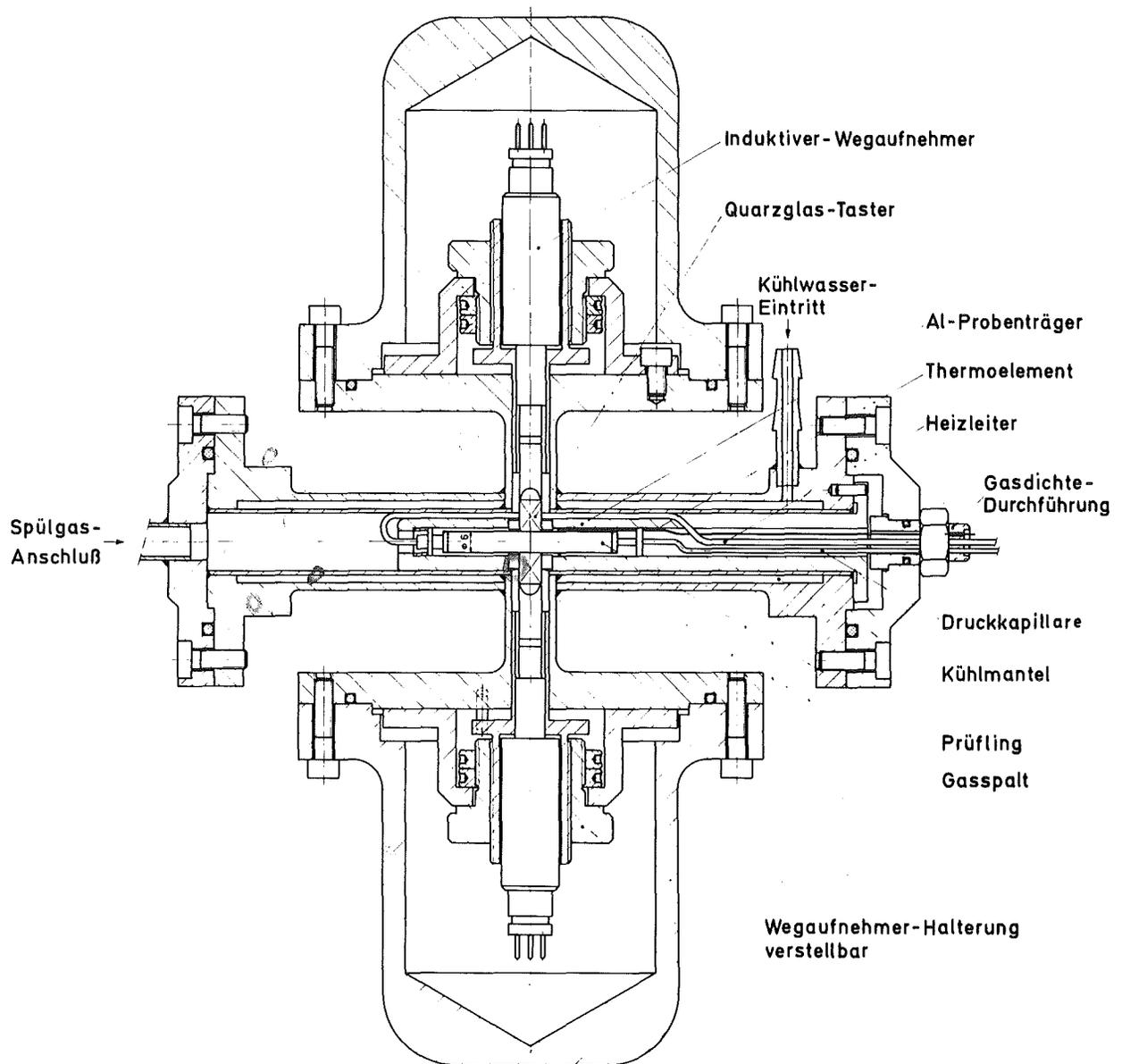


Abb. 5: Dehnungsmeßvorrichtung Mol 4

#### 1.4 Bestrahlungseinrichtung für unbelastete Materialproben bei höheren Temperaturen (TYP MOL 3)

---

L. Schmidt

In der Bestrahlungseinrichtung - TYP MOL 3 - werden unbelastete Materialproben bei höheren Temperaturen im Reaktor BR2, Mol, bestrahlt. Die anschließenden Nachuntersuchungen sollen Aufschluß geben über die Veränderung der Materialeigenschaften durch Neutronenbestrahlung.

Die Bestrahlungseinrichtung gliedert sich in den in pile-Teil, das ist der Bestrahlungseinsatz mit den Proben und die out of pile-Anlage, bestehend aus dem Gasversorgungssystem und der Temperaturmeßanlage.

Es gibt verschiedene Einsatztypen, die alle instrumentiert sind. Ein Einsatz besteht aus dem Einsatzkopf mit den Anschlüssen für Gasleitungen und elektrische Kabel - wie z.B. Thermoelementleitungen - und dem Einsatzunterteil mit den Proben. Der Einsatzkopf ist mit dem Reaktortankdeckel verschraubt und je nach Typ mit einem Verschiebemechanismus zum axialen Verfahren des Einsatzes im Core ausgestattet. Beim Brennelementwechsel müssen die einzelnen Leitungen abgetrennt und der Einsatz, der im zentralen Brennelementkanal positioniert ist, entladen werden.

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal für die einzelnen Einsatztypen ist das Umgebungsmedium der Probe. Diese können z.B. in Form von Probenpaketen in verchromte Cu-Matrizen eingebettet und von Inertgas umspült werden oder sind in Probenketten zusammengefaßt in geschlossenen Na-Kapseln angeordnet. Mehrere Probenpakete übereinander ergeben eine Probenkapsel, deren Durchmesser aus thermischen Gründen kleiner sein muß als der der Na-Kapsel. Infolgedessen steht in den Na-Kapseln ein größerer Bestrahlungsraum zur Verfügung.

Die Aufheizung der Proben erfolgt ausschließlich durch Absorption von  $\gamma$ -Strahlung ( $\gamma$ -Heizung). Die Cu-Matrizen bzw. das Natrium dienen zum Temperatenausgleich bei unterschiedlichen Massenanhäufungen. Die Temperaturen werden mit Thermoelementen

gemessen, die bei den Na-Kapseln unmittelbar auf den Proben befestigt sind. Im anderen Fall sind die Meßstellen in den Matrizen angeordnet, so daß hier die Proben-temperaturen nur indirekt gemessen werden können. Zusätzliche Meßstellen in zentralen Dummies geben bessere Informationen, gehen allerdings zu Lasten kostbaren Bestrahlungsraumes.

Die Temperaturen werden geregelt über die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in einem zwischen Probenkapsel und Einsatzhülle angeordneten Gasspalt, der von einem in der Zusammensetzung variablen Gasgemisch (Helium + Neon) durchströmt wird.

Das axiale Flußprofil im BR2 ist relativ steil, so daß bei höheren Anforderungen an die Temperaturkonstanz nur Na-Kapseln eingesetzt werden, bei denen die axiale Gasspaltbreite der Energieerzeugung weitgehend angepaßt ist. Zusätzlich sind diese Einsätze mit einem eingangs erwähnten Verschiebemechanismus ausgerüstet, der es erlaubt, die Na-Kapsel der abbrandbedingten Verschiebung des Flußprofils nachzufahren. In der Abbildung 1 ist ein Einsatz mit Na-Kapsel und Verschiebemechanismus dargestellt.

Die Neutronendosen werden mit mehreren gekapselten Co- und Fe-Detektoren, die im Bereich der Proben angeordnet sind, erfaßt. Sollen thermische Neutronen abgeschirmt werden, so kann außen um den Einsatz herum ein auswechselbarer Cd-Schirm angeordnet werden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Daten der Einsätze zusammengefaßt.

Experimente mit Einsätzen, bei denen die Proben in Matrizen eingebettet waren, zeigten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die geforderte Gasreinheit konnte nicht mit einem vertretbaren apparativen Aufwand erreicht werden, so daß die Proben im Laufe der Bestrahlung stark oxidierten (Abb. 2). Daneben war die eingangs erwähnte indirekte Temperaturmessung zur Bestimmung der Proben-temperaturen zu ungenau. Außerdem war es infolge des konstruktiven Aufbaues nicht möglich, die Temperaturen innerhalb der geforderten Grenzen zu halten (Abb. 3).

Mit Proben in Na-Kapseln wurden bessere Erfahrungen gemacht. Durch spezielle Einfüllverfahren ist es möglich, den O<sub>2</sub>-Gehalt im Natrium unter 10 ppm zu halten. Die Probertemperaturen können mit Hilfe des dem Flußprofil angeglichenen Gasspalt und dem Verschiebemechanismus in engen Grenzen konstant gehalten werden (Abb. 3).

Die out of pile-Anlage zeigt einen relativ einfachen Aufbau. In der Druckversorgungsanlage wird das von Hand einstellbare Gasgemisch mit einem Membran-Kompressor über Pufferbehälter und Filter durch den Bestrahlungseinsatz gepumpt. Über Tiefkühlfallen kann das Gas gereinigt werden. Eine Vakuumanlage dient zur Evakuierung des Einsatzes vor der Inbetriebnahme. Beim Ausfall des Kompressors treten infolge Entmischung im Gasspalt Übertemperaturen an den Proben auf, die signalisiert werden und eine automatische He-Injektion auslösen.

Tabelle:

Durchmesser des Einsatzes im Core-Bereich Proben in Matrizen Proben in Na-Kapseln	17,4 mm 25,4 und 34,0 mm
beladbare Länge des Einsatzes	ca. 400 mm
Proben	Flachproben Rundproben Rohrproben induktive Durchflußwächter Thermoelemente Permanentmagnete Lithium-Niobat-Kristalle
Anzahl der Proben (max.)	84 Flachproben oder 48 Rundproben oder 36 Rohrproben usw. je nach Größe der Proben
Umgebungsmedium der Proben	Natrium Inertgas
regelbare Probentemperaturen	450 bis 750 °C
Temperaturregelung	Gasgemischregelung (Helium-Neon)
Temperaturmessung	NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Ø 1 mm mit TI-Meßstelle
Anzahl der Thermoelemente	ca. 20
γ-Heizung (max.)	15 W/g Al
Neutronenfluß (max.) thermisch schnell (E > 0,1 MeV)	3 · 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> sec 5 · 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> sec
Neutronendosis (max.) schnell (E > 0,1 MeV)	1 · 10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup>
Neutronendetektoren	gekapselte Co- u. Fe-Detektoren
Anzahl der Neutronendetektoren	ca. 7

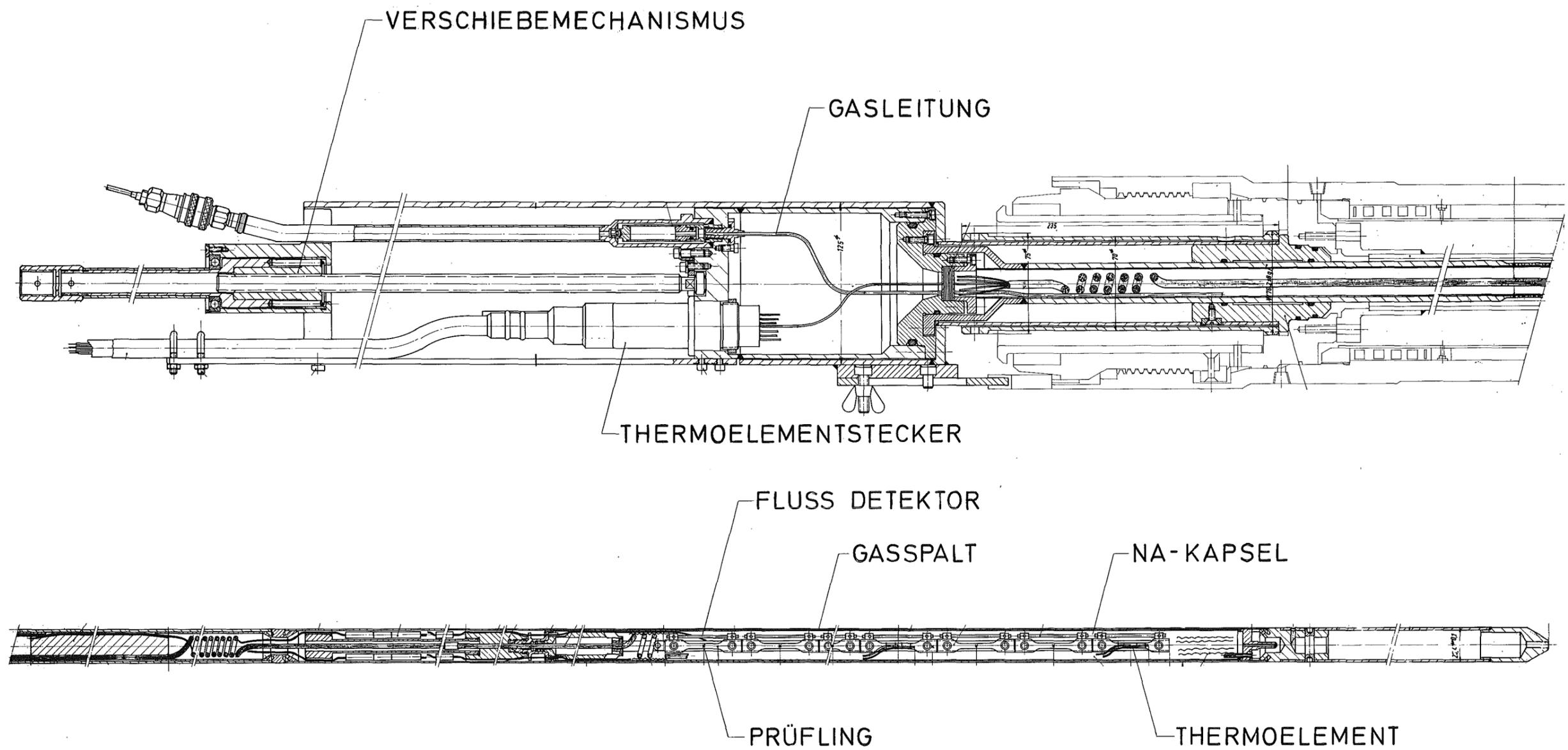
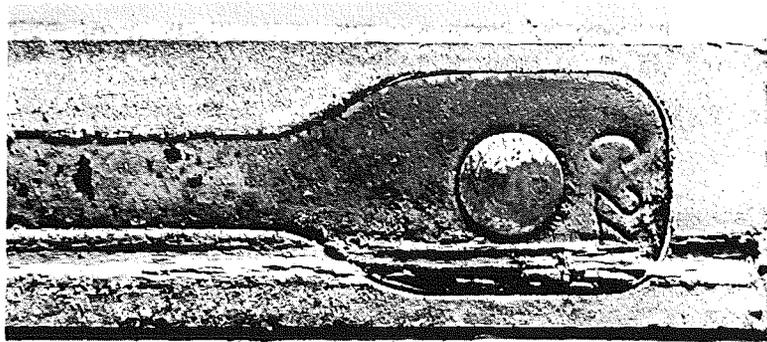
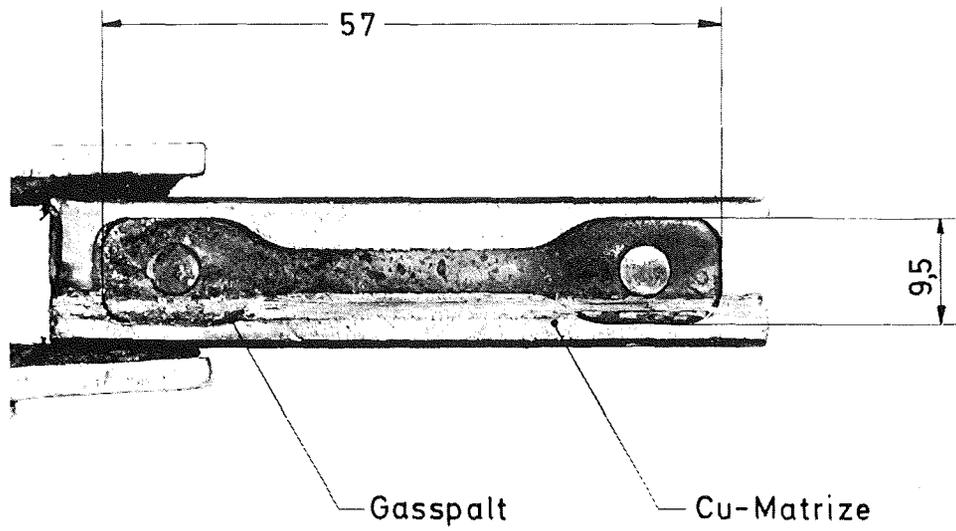
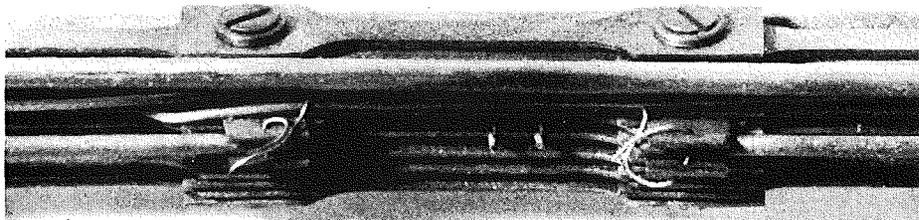


ABB. 1:	BESTRAHLUNGSEINSATZ MOL 3
---------	------------------------------





Proben in Cu-Matrizen



Proben aus Na-Kapsel

ABB.2 : BESTRAHLTE MOL 3-PROBEN

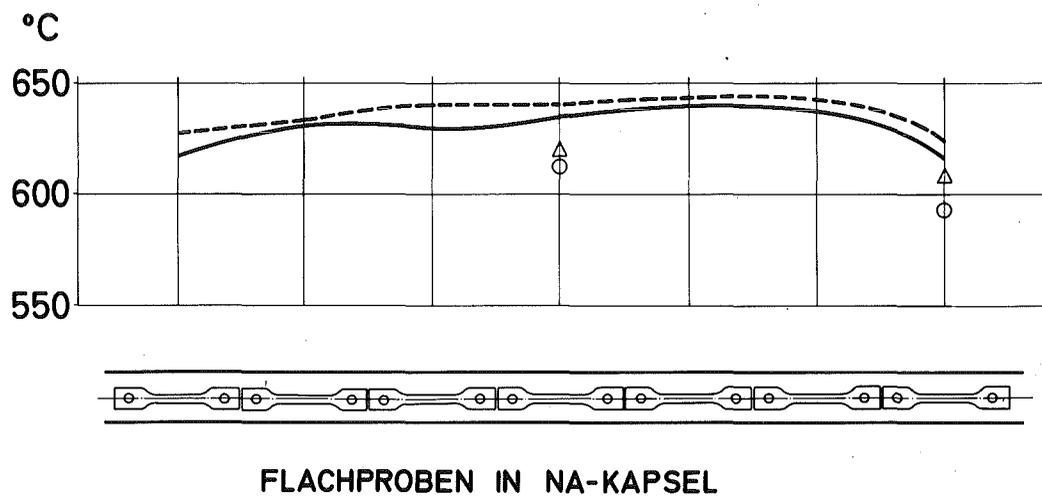
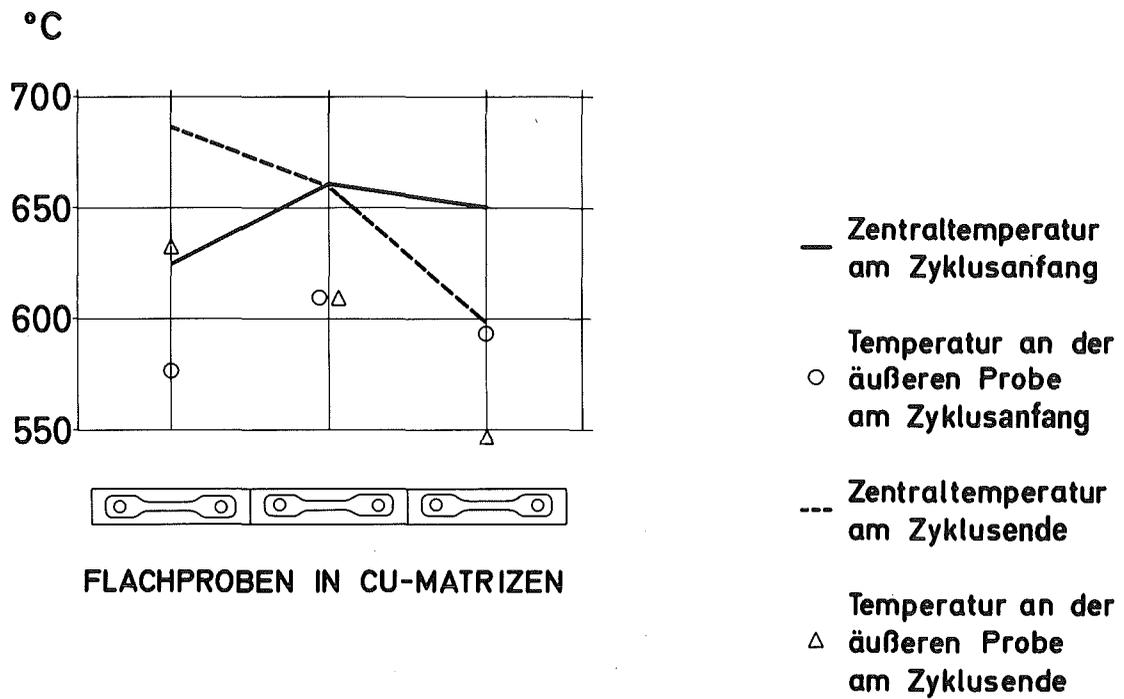


ABB.: 3

TEMPERATURVERTEILUNG IN BESTRAHLUNGSKAPSELN MOL 3

## 1.5 Bestrahlungseinrichtungen für in pile-Dehnungsmessungen an Materialproben (TYP MOL 5)

L.Schmidt

Das in pile-Kriechverhalten von Materialproben unter einachsiger Beanspruchung wird in Bestrahlungseinrichtungen - TYP MOL 5 - im Reaktor BR2 untersucht. Hierbei soll geklärt werden ob unter Neutronenbestrahlung bei Temperaturen im Bereich von 400 bis 700°C eine Veränderung der Kriechgeschwindigkeit gegenüber unbestrahlten Materialien zu erwarten ist [1]. Als Parameter können Belastung und Temperatur variiert werden. Die Belastung kann als Zugspannung über mechanische, pneumatische oder hydraulische Systeme auf die Probe aufgebracht werden.

Das Messen von Kriechgeschwindigkeiten in der Größenordnung von  $10^{-3}$  mm/h und kleiner ist außerordentlich schwierig und nur mit komplizierten Meßanordnungen möglich [2]. Von entscheidender Bedeutung ist die Temperaturverteilung über die Meßlänge des Prüflings. Eine Abweichung von 5°C kann bei bestimmten Materialien eine 100%ige Änderung der Kriechgeschwindigkeit zur Folge haben.

Kriechexperimente wurden in drei verschiedenen Bestrahlungseinrichtungen durchgeführt, die nachfolgend kurz beschrieben werden sollen.

### Mol 5A

Bei dieser Einrichtung, einer englischen Entwicklung, wird die Dehnung des Prüflings pneumatisch nach dem gas-gauging-Prinzip - genannt auch Solex-Verfahren - gemessen (Abb.1). Das Meßgas durchströmt in definierter Menge eine Düse, in der eine mit dem Prüfling verbundene verschiebbare Nadel angeordnet ist. Der Druckabfall über dieses System ist ein Maß für die Dehnung, vorausgesetzt, daß Meßanordnung und Meßgas bei konstanten Temperaturen gefahren werden.

Der Einsatz ist mit einem Prüfling von 3 mm Durchmesser und 30 mm Meßlänge beladen, der in verchromte Kupferhalbschalen eingebettet ist. Außen herum ist eine elektrische Heizung angeordnet. Ebenfalls elektrisch beheizt wird das unterhalb des Prüflings angeordnete Dehnungsmeßsystem. In Abb. 2 ist der Prüflingsbereich vereinfacht dargestellt. Die Temperaturverteilung im Prüflingsbereich wird mit 5 Thermoelementen gemessen, von denen 2 auf die Oberfläche der Probe aufgeschweißt und 3 in den Cu-Halbschalen angebracht sind.

Das hydraulische Belastungssystem befindet sich außerhalb des Reaktordruckbehälters im sogenannten sub pile room. Die Zugkraft wird über eine 6 m lange Stange in den Prüfling eingeleitet. Die Kapsel ist ausgelegt für eine Probertemperatur von 600 bis 650 °C und eine max. Belastung von 42 kp/mm<sup>2</sup>. Der mögliche Meßweg beträgt 3 mm, in Laborversuchen wurde eine Meßgenauigkeit von  $\pm 3\mu\text{m}$  erreicht.

Bei der Bestrahlung von zwei Einsätzen konnten wegen einer Reihe von Schwierigkeiten keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden.

#### Mol 5B

Diese vom CEN Grenoble entwickelte Einrichtung benutzt das Hohlraum-Resonanzverfahren zur Längenänderungsmessung (Abb.3). Dabei wird eine hochfrequente elektromagnetische Welle im Gigahertzbereich durch einen Hohlleiter in einen Zylinder eingeleitet. In dem Zylinder ist ein Kolben angeordnet, der über ein kurzes Gestänge mit dem Prüfling verbunden ist. Längenänderungen der Probe verändern das Volumen des Zylinders und damit die für ein bestimmtes Zylindervolumen charakteristische Resonanzfrequenz. Erfolgt eine Änderung am Prüfling, wird durch eine elektrische Regeleinrichtung die Frequenz der Welle so geändert, daß wieder Resonanz auftritt. Eine 2. Regelstrecke ändert danach in einem außerhalb des Reaktors angeordneten Vergleichshohlraum solange das Volumen, bis dort bei der Meßfrequenz auch Resonanz eintritt. An dem Stellglied, einer Mikrometerschraube, ist dann die Längenänderung des Prüflings

ablesbar, die im Meßschrank digital angezeigt wird. Die Genauigkeit dieser Meßmethode liegt bei  $\pm 2 \mu\text{m}$  und wird im wesentlichen bestimmt durch die Genauigkeit der out of pile-Vergleichsanordnung.

Der Bestrahlungseinsatz ist mit einer Probe beladen, die sich in einer mit NaK gefüllten Kapsel befindet. In Abb.4 ist die schematische Darstellung des Prüflingsbereiches wiedergegeben. Um die Probe herum ist in der NaK-Kapsel ein elektrischer Dreizonenheizer angeordnet, mit dessen Hilfe der axiale Temperaturgradient über die Meßlänge unter  $3^{\circ}\text{C}$  gehalten wird. Über die Breite eines Gasspaltes zwischen NaK-Kapsel und Einsatzhülle kann das Temperaturniveau eingestellt werden. Die Probentemperatur wird mit 6 Thermoelementen gemessen, die paarweise in 3 Ebenen in unmittelbarer Prüflingsnähe angeordnet sind. Die Belastung wird über einen Faltenbalg und ein Gestänge pneumatisch auf den Prüfling aufgebracht. Die Längenänderung der Probe wird über ein Tastgestänge auf den Kolben im Resonanzhohlraum übertragen. Je nach Beaufschlagung des Faltenbalgsystems legt sich der Taster zur kontinuierlichen Dehnungsmessung an die obere Schulter des Prüflings an oder wird für Kontrollmessungen gegen einen unteren Anschlag gefahren.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Einsatzdaten zusammengestellt. Bisher wurden mehrere Proben erfolgreich bestrahlt [1]. Zur Zeit werden zwei Einrichtungen parallel betrieben. Die Versuche werden sich voraussichtlich noch über einige Jahre erstrecken.

#### Mol 5C

In der GfK wurde eine Kapsel entwickelt, in der die Dehnungen induktiv gemessen werden können [3]. Verwendet wird hierbei ein sogenannter Differential-Trafo in strahlenbeständiger Ausführung. In Abb. 5 ist das Meßprinzip dargestellt. Durch die an die Primärspule angelegte frequente Spannung wird eine von der Stellung eines magnetischen Kerns abhängige Spannung in den beiden Sekundärspulen induziert. Der Kern ist direkt mit dem Prüfling verbunden.

Der Prüfling ist in Halbschalen eingebettet und von elektrischen Heizungen umhüllt (Abb. 6). Die Temperaturen werden direkt am Prüfling gemessen. Das Belastungssystem arbeitet pneumatisch; es können Zugspannungen in der Probe bis zu  $40 \text{ kp/mm}^2$  erzeugt werden. Durch die kompakte Ausführung - Prüfling, Belastungssystem, Meßsystem - können 2 Prüflinge in einem Bestrahlungseinsatz untergebracht werden. In Tabelle 2 sind die charakteristischen Einsatzdaten zusammengestellt.

Die Tauglichkeit des Systems wurde mit einem Simulationsrig nachgewiesen.

Tabelle 1: Mol 5B-Bestrahlungseinsatz

Durchmesser des Einsatzes im Core-Bereich	25,4 mm
<u>Prüfling</u> (Rundprobe)	
Durchmesser	3,0 mm
Meßlänge	43,0 mm
Material	austenitische Werkstoffe
Prüflingsumgebung	NaK
Prüflingstemperatur	elektrisch regelbar von 400 bis $700^{\circ}\text{C}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 2^{\circ}\text{C}$
Thermoelemente	6 NiCr-Ni-Mantelthermoelemente mit TI-Meßstelle
Belastungssystem	pneumatisch mit He-Gas
Belastung	bis $25 \text{ kp/mm}^2$ einstellbar mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \text{ kp/mm}^2$ .
Meßsystem	Hohlraumresonanzverfahren mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$
max. Prüflingsdehnung	20 %

Tabelle 2: Mol 5C-Bestrahlungseinsatz

Meßbereich Dehnungsmessung	$\pm 0,5$ mm kontinuierlich
Genauigkeit der Dehnungsmessung	$\pm 3$ $\mu$ m
kleinste meßbare Dehnung	1 $\mu$ m
Probentemperatur	400 bis 800 °C
Temperaturkonstanz	$\pm 2$ °C
axiale Temperaturdifferenz über die Probe	$< 3$ °C
Prüflingsbelastung	max. 40 kp/mm <sup>2</sup>
Genauigkeit des Belastungssystems	$\pm 1\%$
Probenform	Rundprobe
Probendurchmesser	2 bis 3 mm
Meßlänge	40 mm

Literatur:

- /1\_7 K.D.Closs: Untersuchungen an einem 15Cr 15NiTiB-Stahl zum Kriechen unter Neutronenbestrahlung bei 550°C. Atomwirtschaft, April 1973, S.173.
- /2\_7 H.Will: In pile-Einrichtungen für Dehnungsmessungen an Kernbrennstoffen und Strukturmaterialien, KFK 1281.
- /3\_7 H.Häfner, W.Neumann: Kriechkapseln für Brennstoff und Hüllmaterial KFK 1571.

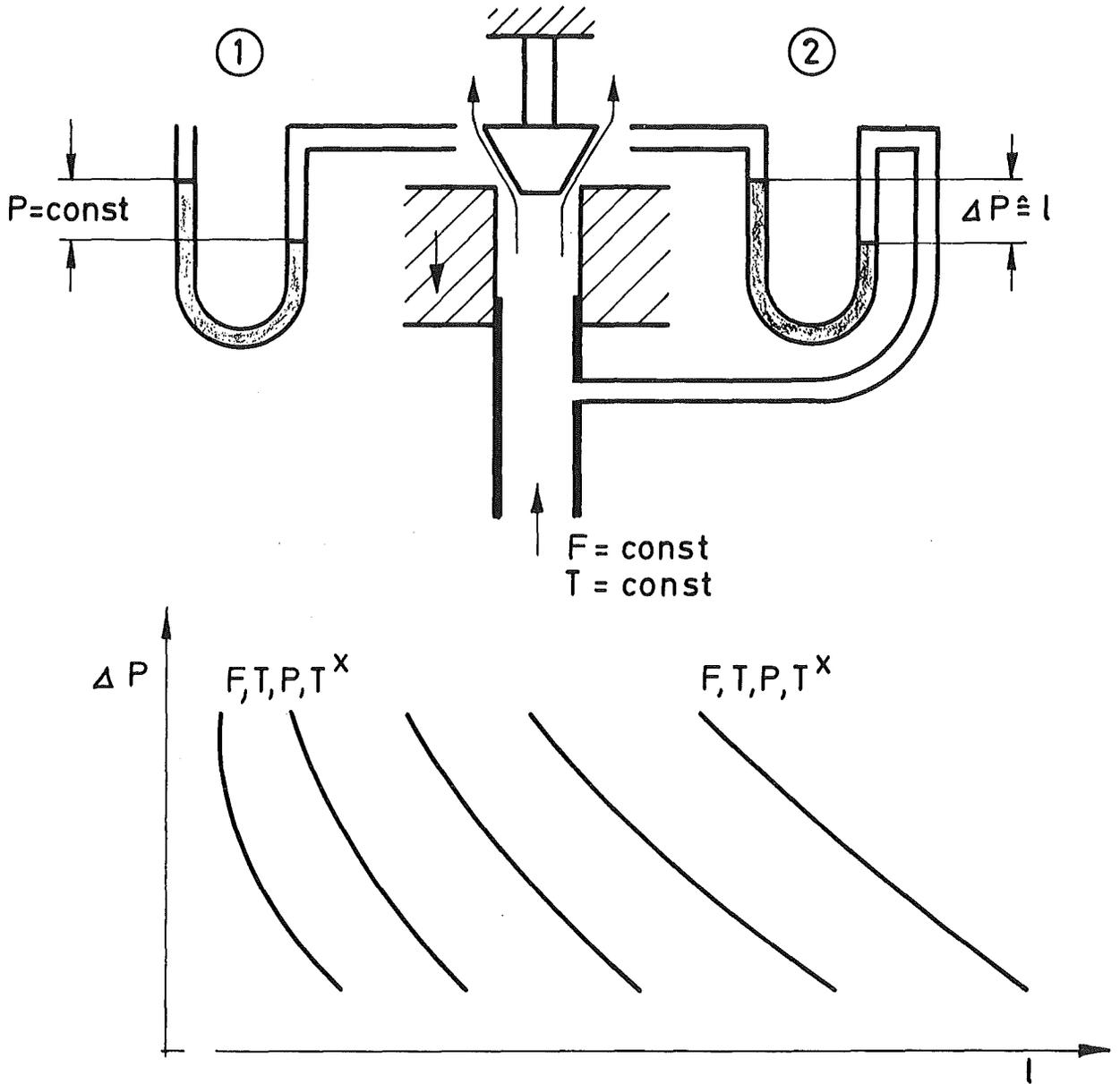


Abb. 1: Solex - Verfahren

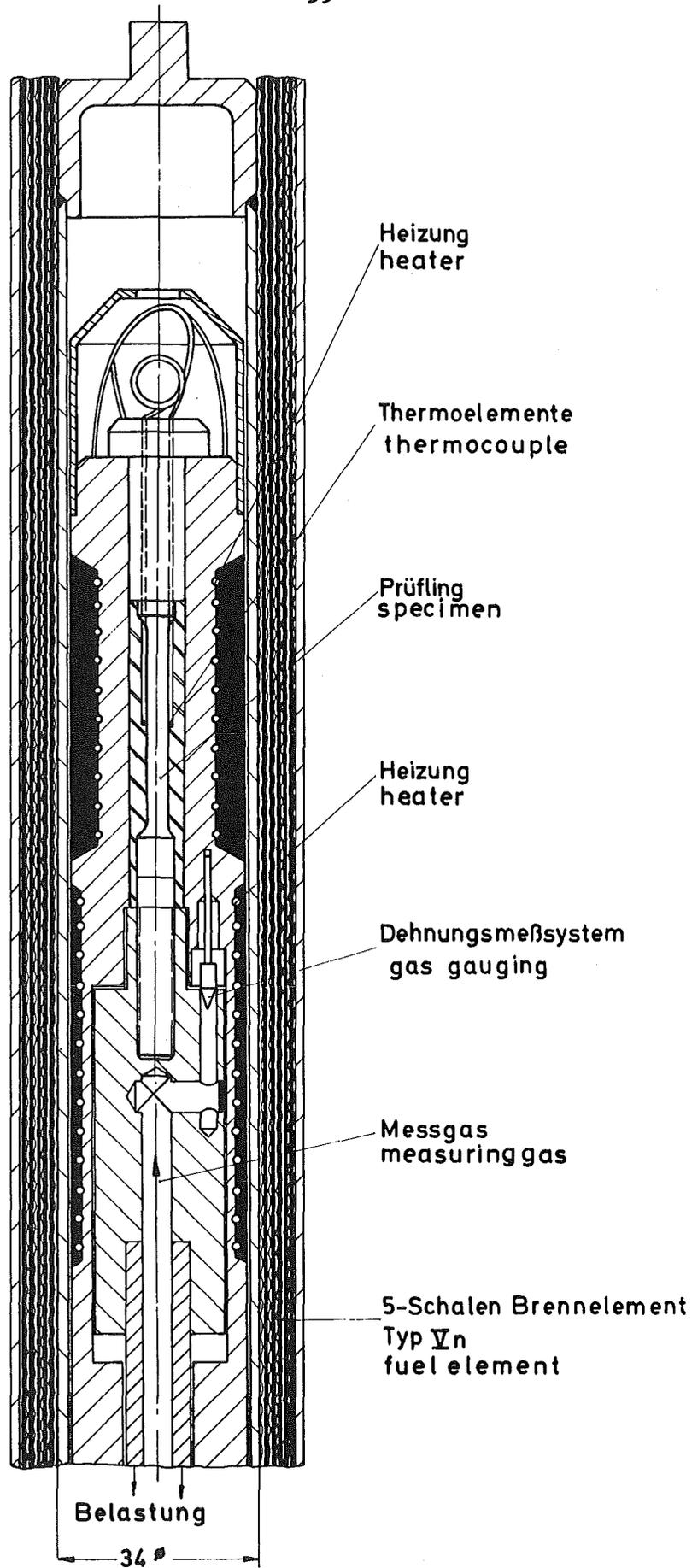


Abb.2: Einsatz MOL 5A

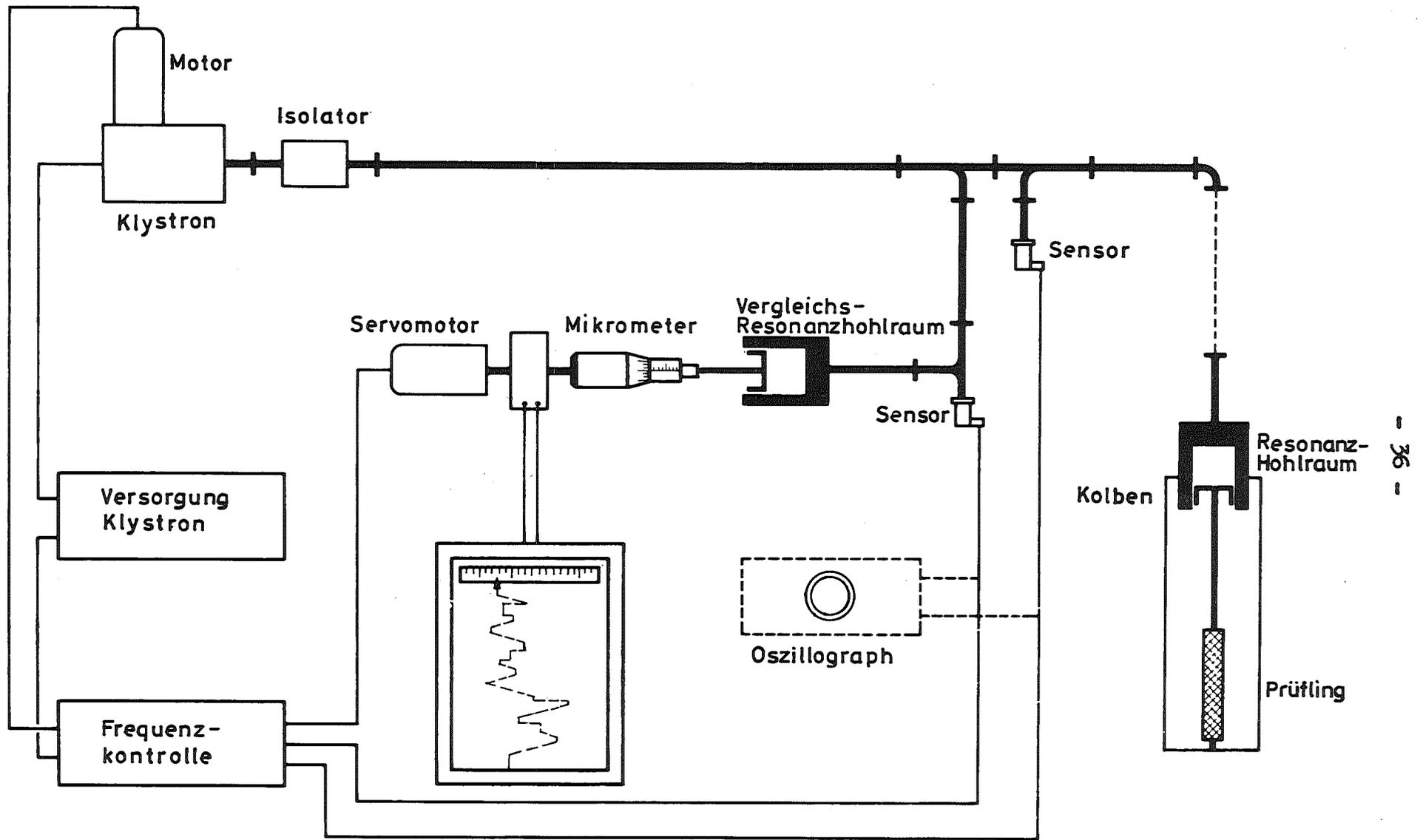


Abb.3 : Hohlraum - Resonanzmessung

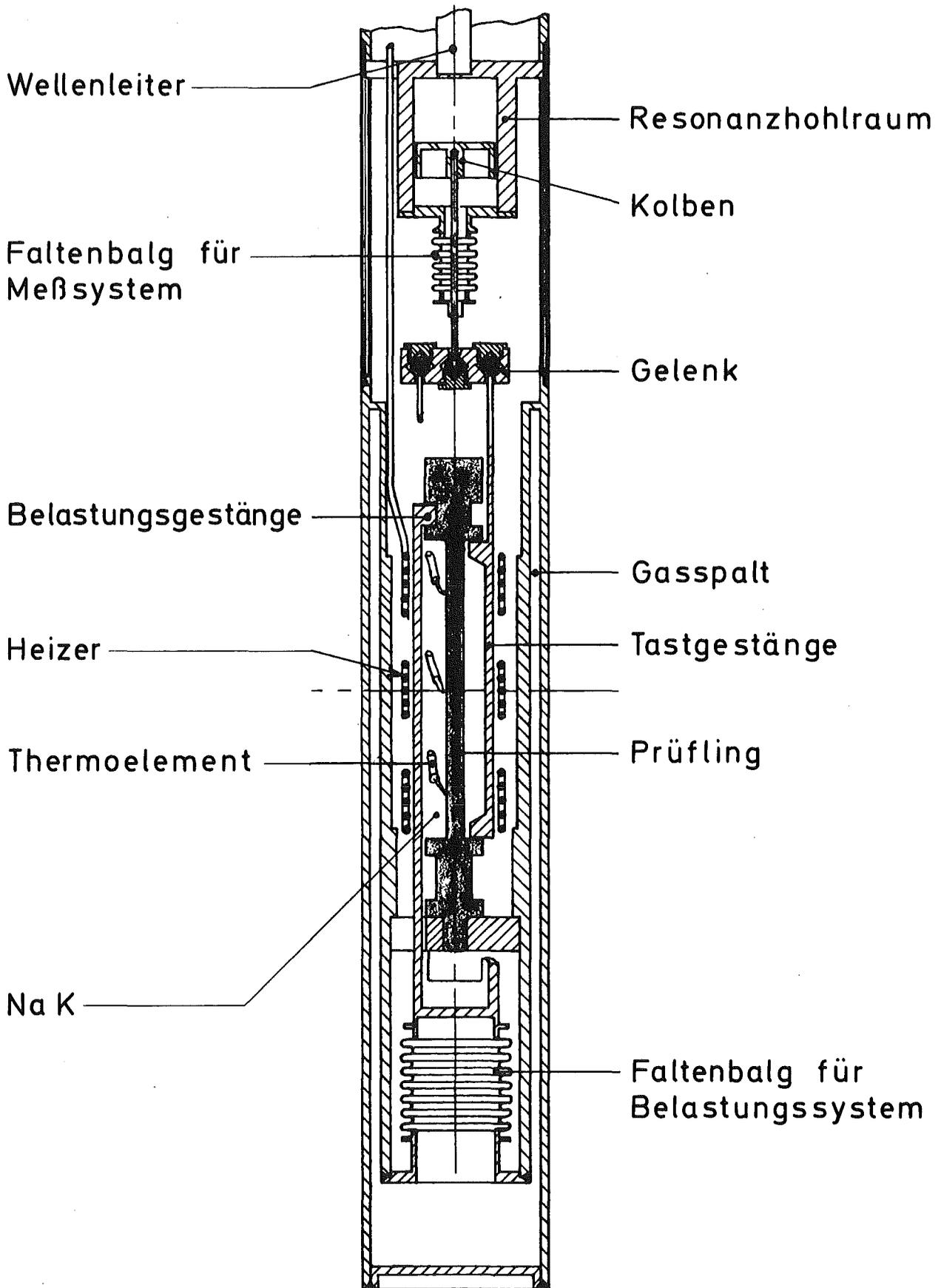


Abb.4: Einsatz MOL 5 B

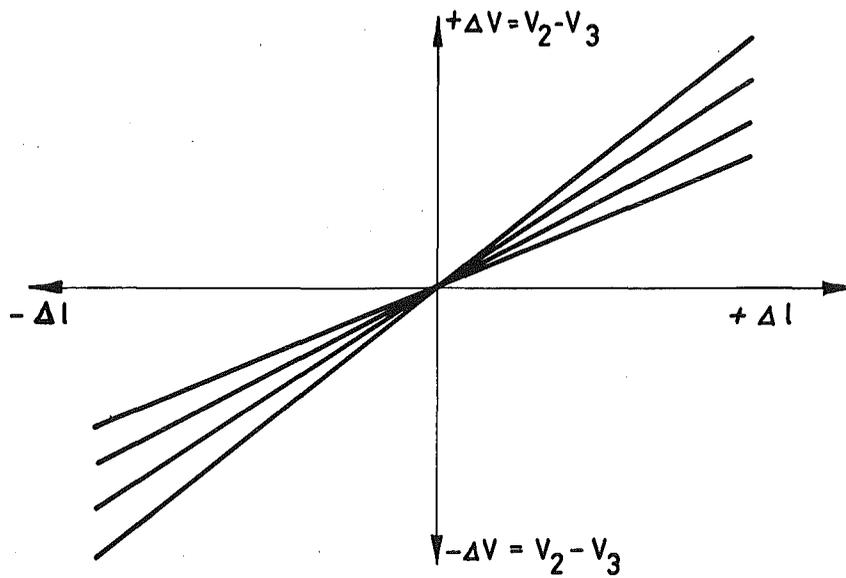
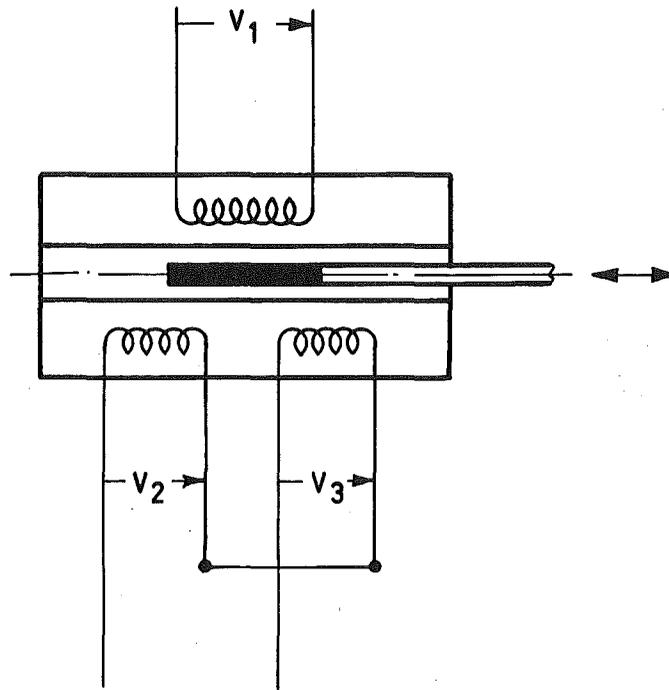


Abb.5: Differentialtrafo

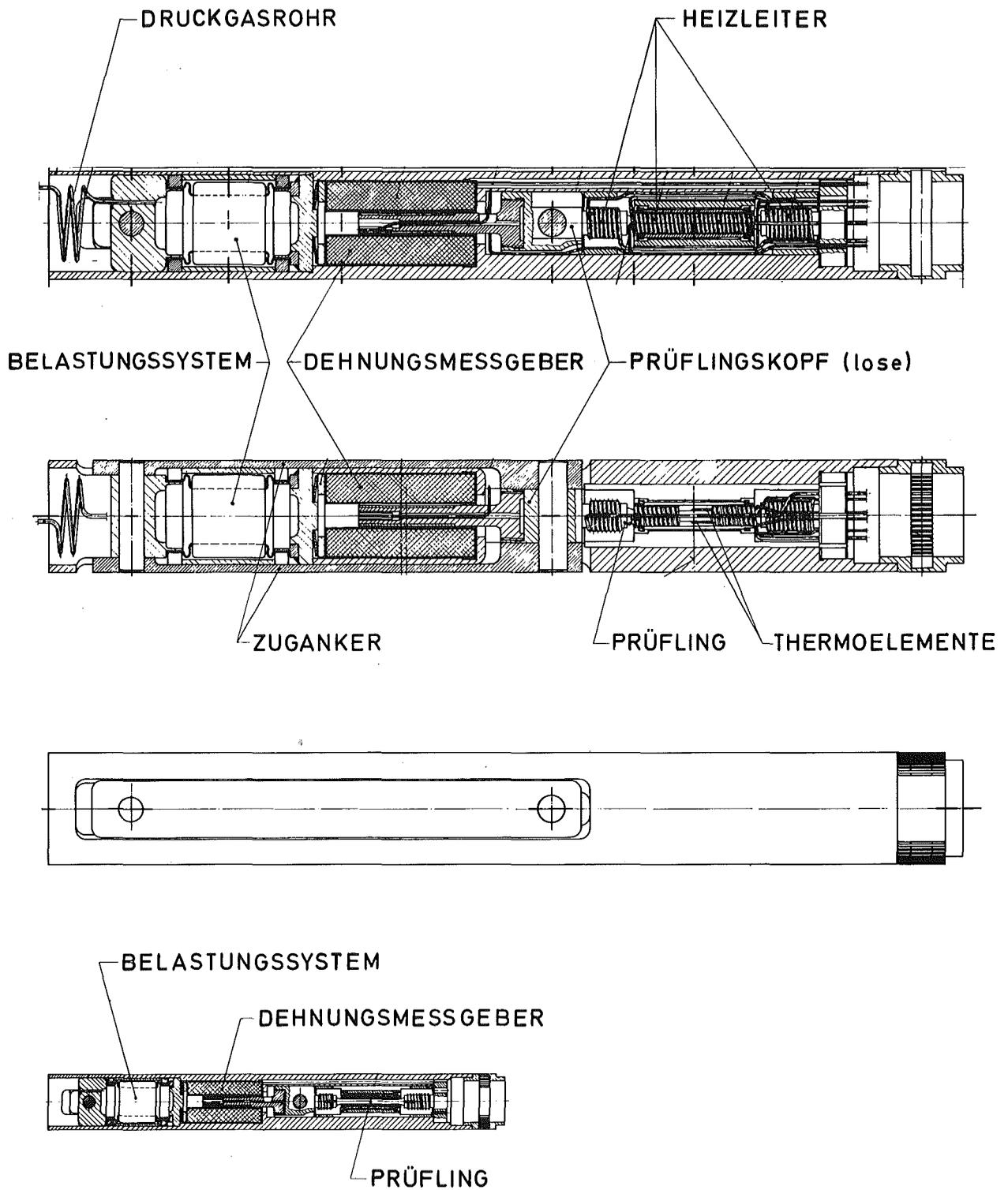


ABB. 6: KRIECHVORRICHTUNG  
MOL 5

## 1.6 Bestrahlungsexperiment im Reaktor HFR, Petten, zur Untersuchung der strahlungsinduzierten Aufnitrierung an Reaktortankmaterialien

L. Schmidt

Im Reaktor HFR in Petten wurde zur Untersuchung der Möglichkeit einer strahlungsinduzierten Aufnitrierung an stickstoffinertisierten Reaktortankwänden ein Bestrahlungsexperiment an zwei Stahlproben bei höheren Temperaturen und unter  $N_2$ -Atmosphäre durchgeführt. Der HFR wurde gewählt, da hier kurzfristig eine geeignete wiederbeladbare Kapsel zur Verfügung stand.

Die Materialproben, je eine Folie aus SNR- und KNK-Tankmaterial, Werkstoff-Nr. 1.4948 bzw. 1.6770, mit den Abmessungen 150mm x 20mm und ca. 0,2 mm Dicke waren in einen speziell angefertigten gasdichten Probenhalter (s. Abb.) eingebaut /<sup>-</sup>1\_7. Der Probenhalter wurde in die Kapsel, Typ TRIO, eingesetzt, die mit einem Verschiebemechanismus zum axialen Verfahren des Probenhalters im Core ausgerüstet ist.

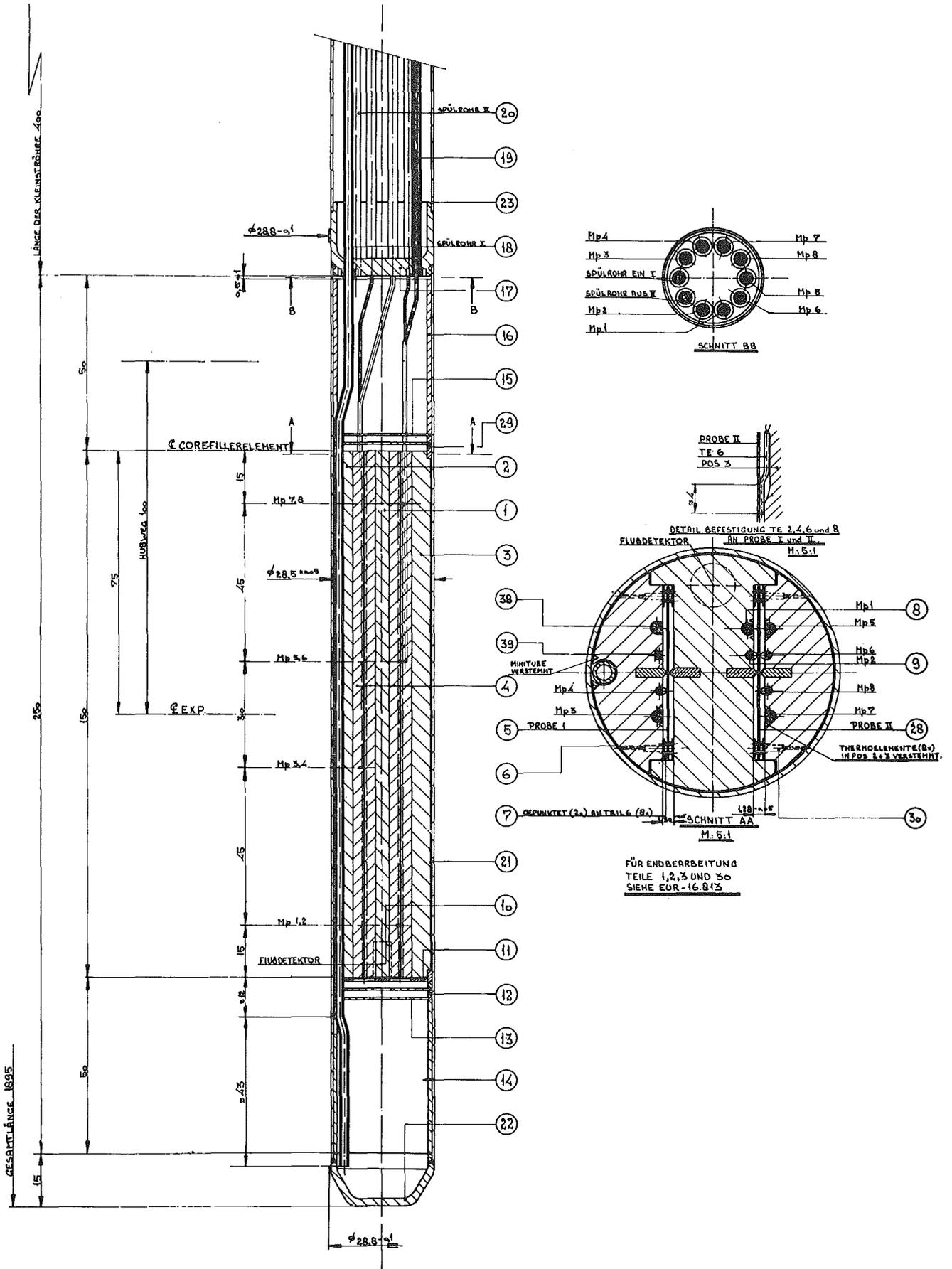
Die Proben wurden ausschließlich durch Absorption von  $\gamma$ -Strahlung ( $\gamma$ -Heizung) aufgeheizt. Die Bestrahlungstemperatur von 560 °C wurde geregelt über die Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Gasspalt zwischen Probenhalter und Kapselrohr mit einem in der Zusammensetzung variablen He/ $N_2$ -Gasgemisch sowie durch entsprechende Positionierung des Probenhalters mittels des Verschiebemechanismus im Flußmaximum der Bestrahlungsposition. Im Gegensatz zu unseren Mol 3-Experimenten ist es bei den HFR-Bestrahlungseinsätzen nicht üblich und auch nicht notwendig das Gasgemisch umzuwälzen, da Entmischungerscheinungen offensichtlich wegen einer speziellen konstruktiven Ausbildung des Gasraumes nicht auftreten. Die Temperaturen wurden mit NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen, die an verschiedenen Stellen im Probenhalter positioniert waren. Um die Folien herum waren Gasspalte angeordnet, durch die Stickstoff mit einem  $O_2$ -Gehalt von ca. 0,9 v/o zirkulierte. Zur Ermittlung der Neutronendosen waren gekapselte Fe-, Co- und Ni-Detektoren in den Probenhalter eingebaut.

Nachfolgend sind die Bestrahlungsdaten tabellarisch zusammengefaßt:

Bestrahlungszeit	816 h
Neutronendosis	
E < 1 eV	$5 \cdot 10^{20}$ n/cm <sup>2</sup>
E > 0,1 MeV	$1 \cdot 10^{21}$ n/cm <sup>2</sup>
E > 1 MeV	$5 \cdot 10^{20}$ n/cm <sup>2</sup>
Bestrahlungstemperatur über die Zeit gemittelt	563 °C
O <sub>2</sub> -Gehalt im N <sub>2</sub> -Spülgas	0,875 bis 0,96 v/o

Literatur:

- [17] R. Conrad:  
A Sample Holder for Steel Foil Irradiation  
PK-01 in the Rig TRIO-129  
PET/SAFREP 640



Probenhalter mit Stahlfolien für Bestrahlungskapsel TRIO

## 2. BRENNSTOFF-BESTRAHLUNGEN IN KAPSELN



2.1 Einwandige Blei-Wismut-Kapseln zur Bestrahlung von Testbrennstäben im FR2 (interne Bezeichnung Typ 1, 2 und 3)

Heinz E. Häfner

In der ersten Phase der Brennelemententwicklung für das Karlsruher Projekt Schneller Brüter, als der Reaktortyp noch nicht definiert war und noch von Pindurchmessern zwischen 10 bis 12 mm gesprochen wurde, ist eine einwandige Blei-Wismut-Kapsel zur Bestrahlung solcher Testbrennstäbe im FR2 entwickelt worden. Die Aufgabenstellung war in diesem frühen Stadium (1962) etwa folgende:

Hüllrohr	12 $\emptyset$ x 1 mm Wand bzw. 10 $\emptyset$ x 0,7 mm aus Edelstahl
Stableistung	bis 500 W/cm
Hüllrohroberflächentemperatur	um 500 °C
Brennstoff	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -CeO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -Mo; Tabletten und vibriert
Abbrand	etwa 2 %
4 Pins von ca. 250 mm Länge in einer Kapsel	
Bestrahlung auf Brennelement- und Isotopenkanalpositionen.	

Hinzu kam damals eine Reihe von Forderungen von Seiten des Reaktorbetriebs:

Die Kapselversuchseinsätze (KVE) sollten wie normale Brennelemente gekühlt, gehandhabt und auch sicherheitstechnisch wie diese betrachtet werden können. Die KVE sollten also eine Kühlmitteldurchflußmengenmessung, eine Kühlmittelaustrittstemperaturmessung und eine Kapselschädendetektion haben. Insbesondere bestand damals die Forderung nach größtmöglicher Sicherheit gegen chemische Reaktionen zwischen dem Reaktorkühlmittel D<sub>2</sub>O und dem Wärmeübertragungsmedium in der Kapsel bei einem eventuellen Kapselriß. Aus diesem Grund wurde die eutektische PbBi-Legierung mit einem Schmelzpunkt von 125 °C als Wärmeübertragungsmedium gewählt.

### Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes (siehe Abb.)

Ein FR2-Kapselversuchseinsatz setzt sich standardmäßig aus drei Hauptbaueinheiten zusammen: Oberteil, Kühlwasserführung und Bestrahlungskapsel. Die leichte Demontierbarkeit gestattet die wiederholte Verwendung des Oberteils, das im wesentlichen zur oberen Coreabschirmung und zur Übertragung der Meßleitungen dient.

Die Bestrahlungskapsel besteht im wesentlichen aus einem ca. 3 m langen Rohr aus Zircaloy 2, in dessen unterem Ende, im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums, bis zu 4 Brennstabprüflinge übereinander und von PbBi umgeben angeordnet sind. Bis zu 10 Thermoelemente können zur Oberflächentemperaturmessung auf den Brennstabhüllen befestigt werden. An ihrem oberen Ende, dem Kapselkopf, ist die Kapsel durch einen temperaturbeständigen, gasdichten und druckfesten 26-poligen Edelstahl-Keramikstecker von 1 Zoll Durchmesser verschlossen, über den die Meßleitungen aus der Kapsel herausgeführt werden. Über diesen Stecker wird mittels einer Schraubhülse die Verbindung zum Oberteil hergestellt. Um zu gewährleisten, daß während des Betriebs die PbBi-Säule auch zwischen den Brennstoffzonen flüssig wird, sind auf dem Kapselrohr Wärmedämmrohre aufgeschweißt worden.

Die internen Bezeichnungen Typ 2 und 3 stehen für gewisse Modifikationen des Grundtyps 1.

### Erfahrungen

Die bei diesem Kapseltyp aufgetretenen Schwierigkeiten waren anfangs erheblich; sie konnten aber durch gezielte und intensive Analyse und entsprechende Gegenmaßnahmen doch noch so weitgehend überwunden werden, daß die ursprüngliche Aufgabenstellung mit relativ gutem Erfolg bewältigt wurde. Es kam niemals zu einem Kapselleck bzw. zu einer ernsthaften Störung des Reaktorbetriebs. In 17 derartigen KVE wurden insgesamt 55 Prüflinge bestrahlt. Die max. Betriebszeit eines KVE dieses Typs betrug 6000 h.

Die Hauptprobleme seien hier kurz genannt:

- Burnout an 4 Prüflingen infolge Lunker bzw. Korrosionsproduktanhäufungen im PbBi.

- Defekte an einigen Stäben und Abreißen von Thermoelementbefestigungen infolge starker Spannungen beim ungleichmäßigen Schmelzen und Erstarren der ca. 1 m hohen PbBi-Säule.
- Z.T. starker Korrosionsangriff an der Zircaloy-2-Kapsel durch das PbBi unterhalb der Wärmedämmungen.
- Z.T. starke Versprödung der Thermoelemente im PbBi-Bad und zeitweise Temperaturschwankungen um  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ .

#### Literatur

- H.E.Häfner: Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Blei-Wismut-Kapseln  
Kerntechnik 10 (1968), Heft 3, S. 136-141  
KFK-Bericht Nr. 780 (Mätz 1968)

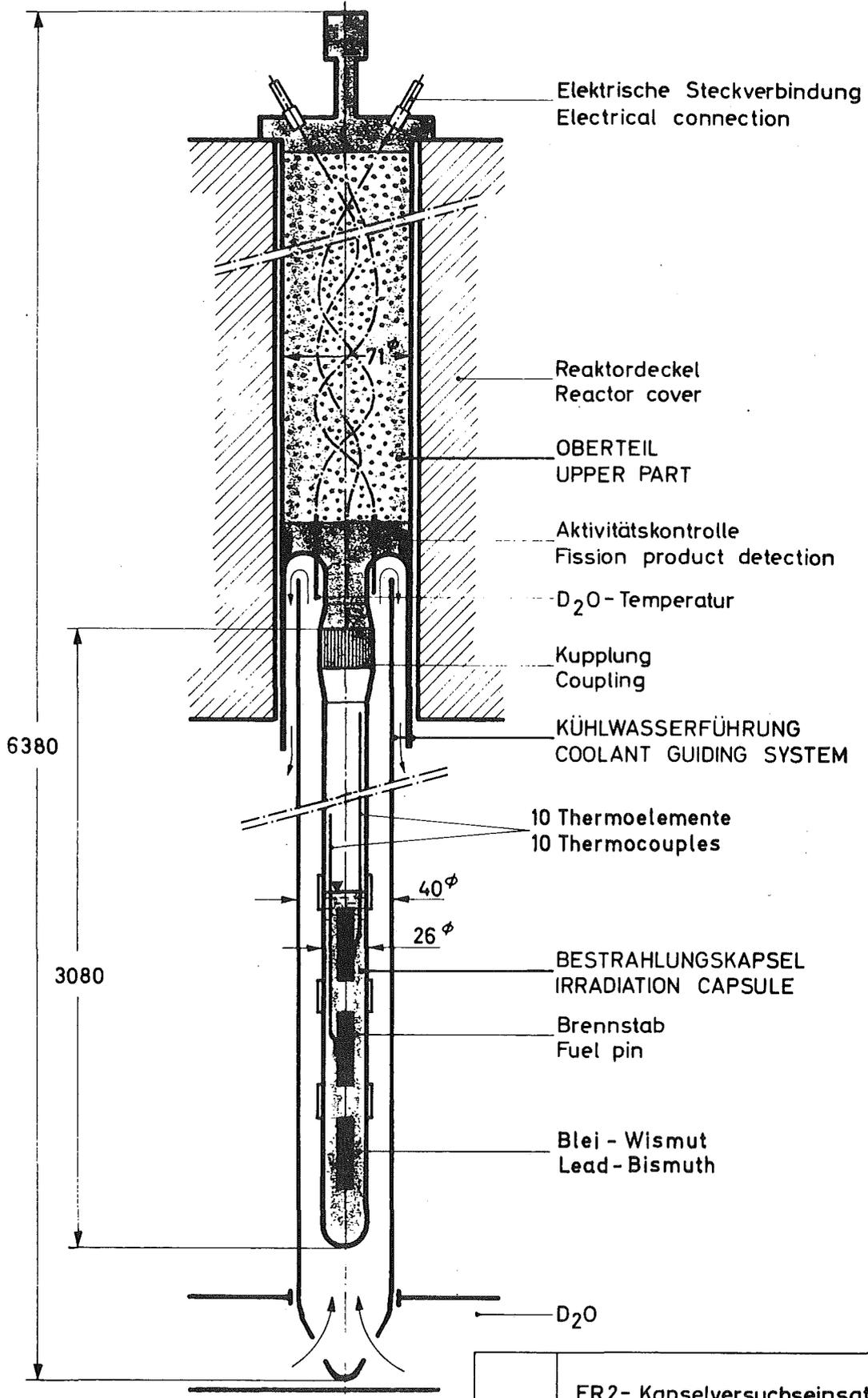


Abb.	FR2- Kapselversuchseinsatz FR2 Fuel Pin Irradiation Rig
------	--

2.2 Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln zur Bestrahlung von  
Schnellbrüter-Testbrennstäben im FR2  
(interne Bezeichnung Typ 4 und 5)

---

Heinz E. Häfner

Als in den Jahren 1965/66 die Brennelemententwicklung für das Projekt Schneller Brüter das klare Ziel, dünnere Stäbe und Natriumkühlung, definiert hatte, wurde ein neuer Kapseltyp entwickelt, die Natrium-Bleiwismut-Doppelkapsel 17. Insofern als die Erfahrungen mit der einwandigen PbBi-Kapsel und die Sicherheitsanforderungen von Seiten des Reaktorbetriebs hierbei eingeflossen sind, war das eine logische Weiterentwicklung des ersten Typs.

Anforderungen:

Pindurchmesser	4,7 bis 7,4 mm
Stableistungen	bis 770 W/cm
Hüllrohroberflächentemperaturen	bis 700 °C
Brennstoff	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> ; Tabletten und vibriert
Stablänge	100 bis 500 mm
Abbrand	bis 120 000 MWd/tM

Beschreibung der Kapsel (siehe Abb.)

Jeder Brennstab sitzt i.a. 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 Bleiwismut-Legierung (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 Temperatur wird nicht direkt auf der Brennstabhülle sondern in einiger Entfernung im Flüssigmetall gemessen. Durch den oberen Endstopfen der inneren Kapsel werden bis zu 6 Tauchröhrchen hindurchgeführt, die zur Aufnahme der Thermoelemente dienen. Der untere Endstopfen ist als Einfüllstutzen ausgebildet; er wird nach dem Einfüllen des Flüssigmetalls induktiv verschweißt /27. Anstelle mehrerer kurzer Brennstäbe kann in einer inneren Kapsel auch ein längerer Stab bis zu ca. 1 m Länge eingesetzt werden (Typ 5).

### Erfahrungen

Seit Anfang 1967 sind von diesem Typ 60 KVE mit insgesamt 220 Brennstabproben bestrahlt worden. Dabei wurden Standzeiten von 1500 Betriebsstunden und Abbrände von 130 000 MWd/tM erreicht. Die integrierte Bestrahlungszeit aller Kapseln dieses Typs beträgt über 50 Jahre. Der Kapseltyp hat sich bestens bewährt; es sind kaum nennenswerte Störungen des Betriebs aufgetreten. Die Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen ergaben im wesentlichen folgendes:

- . Nur 4 mit vibriertem  $UO_2$ - $PuO_2$  gefüllte Teststäbe zeigten einen Schaden, und zwar sehr ungleichmäßige Brennstoff-Verteilung, verbunden mit Hüllrohraufblähungen und kleinen Längsrissen. Ein Burnout ist an keinem der Stäbe aufgetreten.
- . Bei fast allen KVE zeigt sich an der äußeren 1,5 mm dicken Kapselwand aus Zircaloy-2 eine lokal begrenzte Korrosionsstelle unter den Wärmedämmungen, also oberhalb des Brennstoffbereichs. Diese Korrosionsstelle findet sich immer dann, wenn hier die Temperatur im Betrieb  $400^{\circ}C$  überschritten hatte. In allen Fällen blieb jedoch die äußere Kapsel dicht.
- . Sehr häufig waren die inneren Kapselrohre durch Spannungen, die beim ungleichmäßigen Schmelzen und Erstarren der PbBi-Säule auftreten, eingebeult. Das führte jedoch zu keiner nennenswerten Beeinträchtigung.

- In den 60 KVE waren insgesamt ca. 600 Chromel/Alumel-Thermoelemente von 1 mm Manteldurchmesser eingesetzt. Etwa 90 % haben über die gesamte Betriebszeit einwandfrei funktioniert.

Literatur:

- [-1\_7 H.E.Häfner:  
Bestrahlung von Brennstäben mit instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln;  
Kerntechnik 12, Heft 5/6, S. 248-253,  
KFK-Bericht Nr. 1259 (Mai/Juni 1970)
- [-2\_7 S.Dorner, H.Katheder:  
Einfüllverfahren für Alkalimetalle in Bestrahlungskapseln;  
Kerntechnik 12, Heft 7, S. 273 - 279.

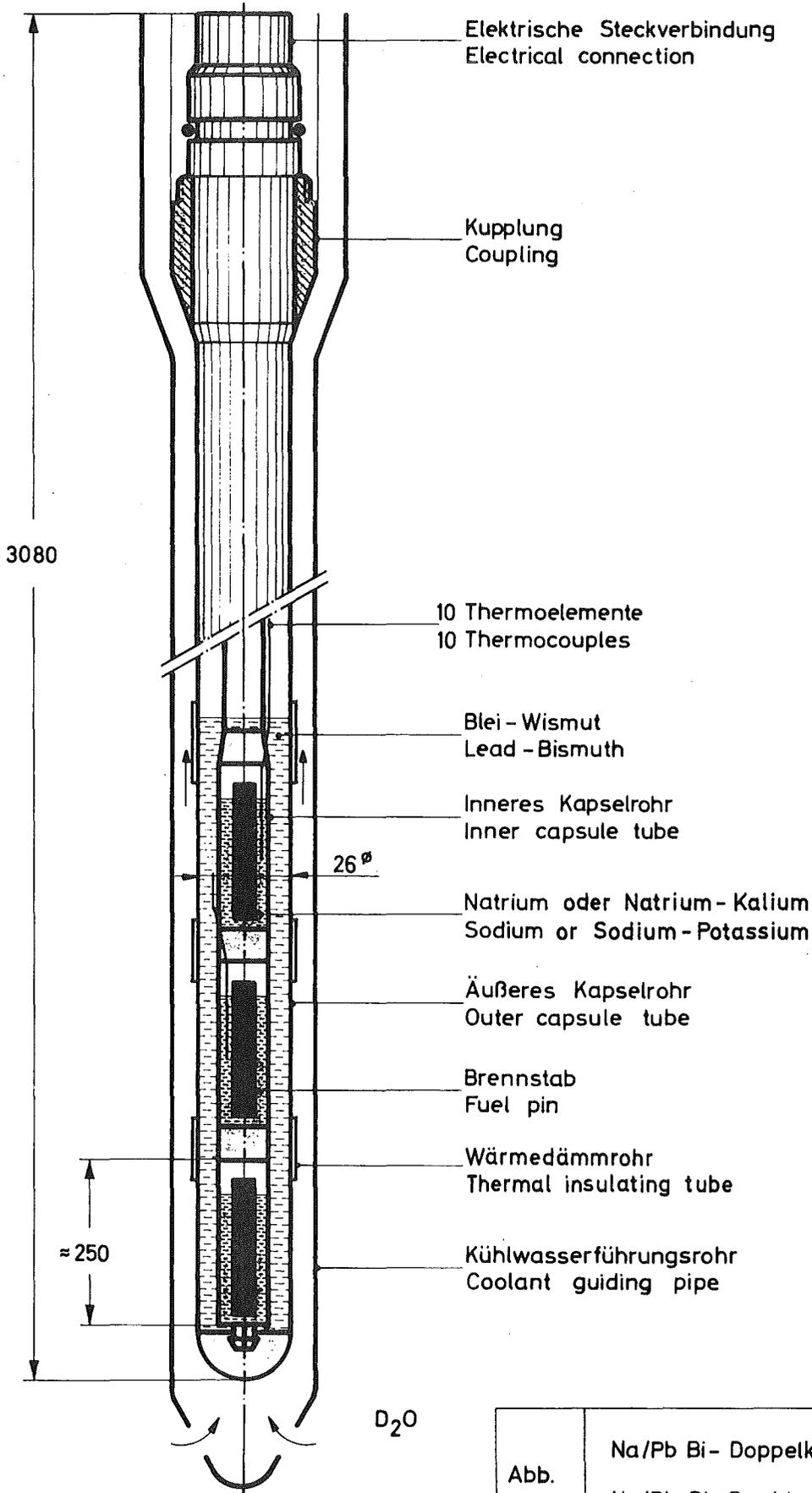


Abb.	Na/Pb Bi - Doppelkapsel Na/Pb Bi Double Capsule
------	--

## 2.3 Gasspalt-Doppelkapsel zur Bestrahlung von Hochleistungs- brennstoffen (Typ 6)

Heinz E. Häfner

Für die Bestrahlung von Hochleistungsbrennstoffen, Nitriden und Karbiden, im FR2 wurde 1967/68 eine sog. Gasspalt-Doppelkapsel entwickelt, die auch für relativ hohe Temperaturen geeignet ist. Zur damaligen Zeit lagen nämlich praktisch keine Untersuchungen über das Bestrahlungsverhalten dieser Kernbrennstoffe bei Temperaturen über 1200 °C vor.

### Aufgabenstellung:

Brennstoffdurchmesser	um 10 mm
Stableistung	um 1000 W/cm
Brennstoffzentraltemperatur	um 1500 °C
Stablänge	ca. 100 mm
Abbrand	max. 5 %
Messung der Brennstoffzentraltemperatur	

### Beschreibung der Kapsel (siehe Abbildung)

Diese Doppelkapsel hat folgenden Aufbau:

Der Brennstoff ist von einer dickwandigen Hülle aus einer hochtemperaturbeständigen Molybdänlegierung umgeben. Zwischen der dickwandigen Hülle und der äußeren Kapsel aus Edelstahl ist ein definierter Gasspalt vorhanden. Bei einer Stableistung von z.B. 1000 W/cm und einer gewünschten Brennstoffoberflächentemperatur von 1300 °C beträgt der Temperaturabfall in diesem Gasspalt ca. 800 °C. Das ca. 5 mm dicke Hüllrohr hat von oben her 3 achsenparallele Bohrungen, in denen Thermoelemente zur Messung der Hüllrohrmittentemperatur untergebracht sind. Da außerdem im Brennstoffzentrum ein Hochtemperatur-Thermoelement, geschützt durch ein Mo-Tauchrohr, sitzt, ist diese Kapsel auch besonders für die Ermittlung der Veränderung der Temperaturdifferenz zwischen Brennstoffhülle und Brennstoffzentrum geeignet. Das heißt, man kann damit auch sehr gut Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffs während der Bestrahlung erfassen.

### Erfahrungen

Es wurden bisher drei Kapseln dieses Typs mit UN erfolgreich im FR2 bestrahlt, wobei die Zentraltemperaturmessung (max. 1800°C) über mehrere Monate einwandfrei funktionierte. Gewisse Schwierigkeiten brachte bei dieser Konzeption die dichte Lötverbindung der Edelstahl-Kupplungshülse des H.T.-Thermoelements mit dem oberen Prüflingsendstopfen aus Molybdän.

Die Nachuntersuchung in den Heißen Zellen ergab Undichtheiten an dieser Lötstelle und starke Reaktionen am Mo-Schutzrohr des W5Re/W26Re-Thermoelements, ausgelöst durch das Re des Thermoelementmantels und durch den Brennstoff.

### Literatur:

H.E.Häfner, G.Pinter-Kovats:

Kapsel zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstoffen;  
"Kerntechnik" 14 Jgg. (1972), Heft 2, Seite 72-74.

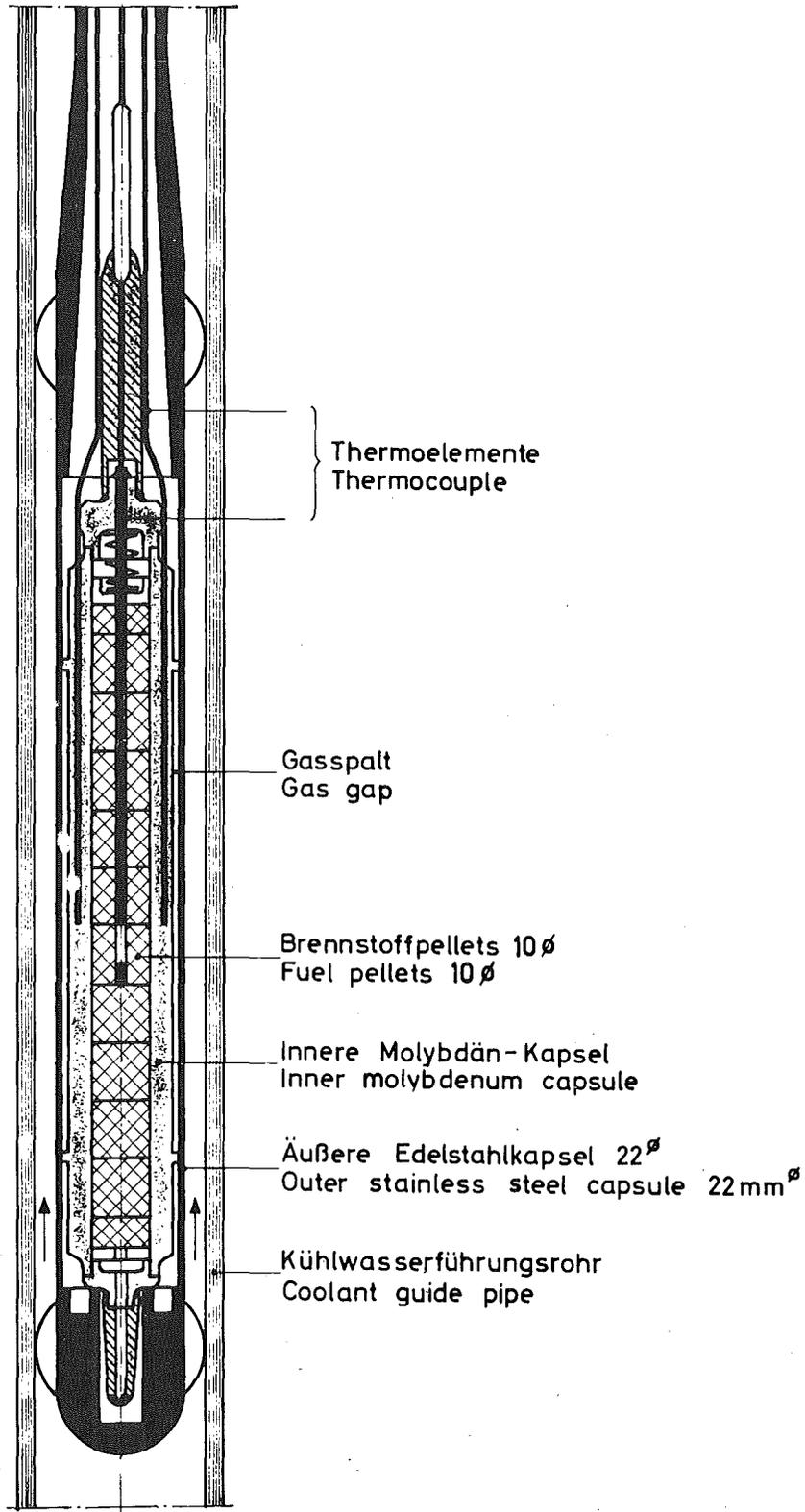


Abb.	Gasspalt-Doppelkapsel Gas Gap Double Capsule
------	---

## 2.4 Einwandige NaK-Kapsel zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben im FR2 (Typ 7)

Heinz E. Häfner

Für Stabileistungen über 1000 W/cm, wie sie z.B. für Karbid-Brennstäbe in Betracht kommen, und Hüllrohroberflächentemperaturen um 650 °C wurde 1969/70 im IMF eine einwandige NaK-Kapsel entwickelt [1, 2]. Wegen der möglichen Gefahren durch eine NaK/Wasser-Reaktion im Falle eines Kapsellecks kommt bei diesem einwandigen Kapseltyp den Sicherheitsbetrachtungen besondere Bedeutung zu.

### Abmessungen und Betriebsdaten der ersten Karbidbrennstäbe des Karlsruher Karbid-Bestrahlungsprogramms

Stablänge	475 mm
Hüllrohr	10 mm $\varnothing$ x 0,55 mm Wand
Brennstoff	UC-PuC (15% Pu)
Stabileistung	1150 W/cm
Hüllrohroberflächentemperatur	630 °C
Zielabbrand	45000 MWd/t M

Die Stäbe hatten verschiedene Bindungen (He-, Ar- und Na-Bindung) zwischen Brennstoff und Hülle.

### Beschreibung der Kapsel (Abb.)

Der Brennstab sitzt, von eutektischem NaK (Schmelzpunkt -11°C) umgeben, in einem Kapselrohr von 27 mm Außendurchmesser und 1,5 mm Wanddicke aus der Legierung Niob-1% Zirkon. Im NaK Raum befindet sich ein Zwischenrohr, das zwei Funktionen hat. Einmal wird dadurch eine nennenswerte Konvektion im NaK vermieden, zum anderen ist durch Veränderung des Materials für das Zwischenrohr und dessen Wanddicke die Brennstabtemperatur in relativ weiten Grenzen einstellbar.

So ist z.B. für 1150 W/cm Stabileistung und 630°C Hüllrohroberflächentemperatur das Zwischenrohr ebenfalls aus der Nb-1% Zr-Legierung und hat 3 mm Dicke. Bei 1300 W/cm kann ein Zwischenrohr gleicher Dicke aus Al eingesetzt werden, wenn die Hüllrohrtemperatur beibehalten werden soll. Bei niedrigen Stabileistungen können Zwischenrohre aus schlecht wärmeleitenden

Materialien, z.B. Zircaloy, eingesetzt werden. Dieser Kapseltyp ist also recht universell für verschiedene Stabdurchmesser, Stableistungen und Hüllrohrtemperaturen einsetzbar.

Die Temperaturmessung erfolgt durch sechs bis acht Miniatur-Mantelthermoelemente, die im oberen Endstopfen dicht verlötet und mit ihrer Meßstelle direkt auf der Brennstabhülle befestigt sind. Außerdem wird an einen Teil der Stäbe mit H.T.-Thermoelementen die Zentraltemperatur im Brennstoff gemessen.

#### 4. Erfahrungen

Seit Mitte 1971 sind im FR2 13 einwandige NaK-Kapseln mit Karbidbrennstäben verschiedener Spezifikationen bestrahlt worden bzw. befinden sich z.Zt. im Reaktor. An zwei Einsätzen ist der Zielabbrand von knapp 5% erreicht. Die Kapseln arbeiteten zur vollsten Zufriedenheit; nennenswerte Störungen des Reaktorbetriebs gab es bisher nicht. Schwierigkeiten bereiteten anfangs die relativ starken Temperaturschwankungen infolge zu starker Konvektion im NaK. Durch den Einbau eines zusätzlichen Antikonvektionsrohres wurde dieser Mangel weitgehend behoben. Weitere Schwierigkeiten traten mit der Lötverbindung zwischen der Kapsel aus Nb-1%Zr und einem Edelstahlträgerrohr (siehe Abb.) auf; hier zeigten sich häufiger Undichtheiten.

#### Literatur:

- /-1\_7 H.E.Häfner: Sicherheitsbericht für FR2-Kapselversuchseinsätze mit einwandigen NaK-Kapseln zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben; KFK-Bericht Nr. 1143 (1970)
- /-2\_7 H.E.Häfner: Einwandige NaK-Kapsel zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben; "Atomwirtschaft, Atomtechnik", Vol.16, Heft 12, Dez. 1971.

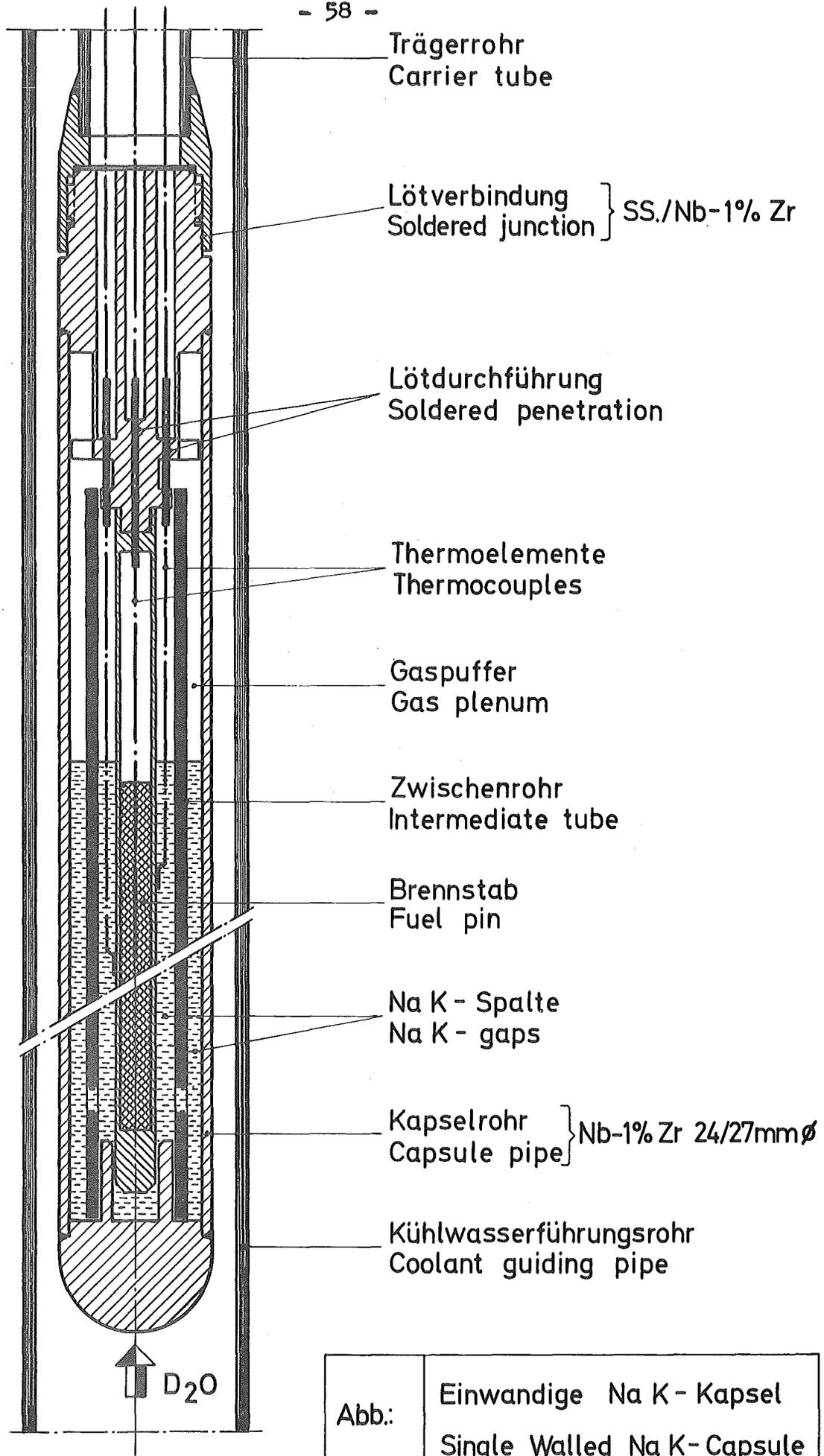


Abb.:

Einwandige Na K - Kapsel  
Single Walled Na K - Capsule

## 2.5 Instrumentierte Brennstoff-Kriechkapsel im FR2 (Typ 8)

Heinz E. Häfner und K. Philipp

Die Auslegung eines Brennstabes für fortschrittliche Kernreaktoren macht eine genauere Kenntnis des Brennstoffschwälens bzw. des Brennstoffkriechens erforderlich. Aus diesem Grunde wurde ab 1968 u.a. eine Bestrahlungskapsel entwickelt, in der das Brennstoffkriechen unter Belastung direkt gemessen werden kann. Es handelt sich dabei um einen Versuchseinsatz, der es gestattet, bei axialer Druckbelastung der Proben in pile deren Längenänderungen mittels strahlenbeständiger induktiver Verlagerungsaufnehmer (Differentialtransformatoren) kontinuierlich zu messen.

An den Versucheinsatz waren bei der Konzipierung im wesentlichen folgende Forderungen gestellt worden:

- a) Die Bestrahlungen sollten auf normalen Brennelement- bzw. Isotopenkanal-Positionen im FR2 durchgeführt werden.
- b) Der Brennstoff sollte bei einer Leistungsdichte von max.  $4000 \text{ W/cm}^3$  und einer Temperatur zwischen  $300$  und  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  einer Druckbelastung bis zu  $5 \text{ kp/mm}^2$  ausgesetzt werden.
- c) Die Brennstofftabletten ( $\text{UO}_2$ ,  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ , UN oder UC) sollten dabei möglichst nicht zerbröckeln.
- d) Die Meßgenauigkeit für die Erfassung der Längenänderungen des Brennstoffs sollte möglichst hoch sein.
- e) Die Druckbelastung sollte genauer als auf  $\pm 10\%$  eingestellt werden können.
- f) Die Bestrahlungszeit sollte 1000 bis 2500 Stunden betragen.
- g) Temperaturen und Längenänderungen der Proben sollten möglichst kontinuierlich gemessen und registriert werden können.
- h) Leistungsdichte, Probentemperatur und Probenbelastung sollten von Kapsel zu Kapsel veränderlich sein.

Die Kapsel hat folgenden Aufbau (siehe Abb.):

In einer inneren Kapsel, die über Distanznocken in einem sogenannten Formkörper zentriert ist, befindet sich, von Na oder NaK umgeben und auf einem Thermoelement-Hüllrohr aufgefädelt, das eigentliche Kriechprobenpaket. Um steile Temperaturgradienten und ein Zerbröckeln des Brennstoffs zu vermeiden wird das Probenpaket durch abwechselndes Übereinanderstapeln von ca. 1 mm dicken Brennstoff- und Molybdänringen zusammengesetzt. Die Probenbelastung erfolgt in axialer Richtung durch ein Druckübertragungsstück, auf das der Gasdruck in der äußeren Kapsel wirkt. Je nach gewünschter Probenbelastung (max. 5 kp/mm<sup>2</sup>) wird der Gasdruck in der äußeren Kapsel (max. 35 ata) eingestellt. Im unteren Endboden der Probenkapsel sind einseitig verschlossene Röhrchen eingeschweißt, die zur Aufnahme von Thermoelementen dienen. Mit diesen Thermoelementen können die Proben- bzw. Flüssigmetalltemperaturen (max. ca. 1000°C) auf  $\pm 10^\circ\text{C}$  genau gemessen werden. Auf dem Druckübertragungsstück ist der sogenannte Wegaufnehmerkern befestigt, der über den Faltenbalg jede Längenänderung der Probe mitmacht. Die an der Primärspule des Differentialtrafos angelegte Spannung  $V_1$  induziert in den beiden Sekundärspulen Spannungen  $V_2$  und  $V_3$ , die von der Stellung des magnetischen Kerns abhängen. Durch Gegeneinschaltung von  $V_2$  und  $V_3$  entsteht ein linearer Zusammenhang zwischen  $\Delta V$  und der Stellung des Kerns (siehe S.38). Vor dem Einbau wird jeder Wegaufnehmer einer eingehenden Untersuchung unterzogen, um die optimalen Betriebsparameter festzulegen. Die Genauigkeit des Meßsystems kann dadurch auf ca.  $\pm 3 \mu\text{m}$  gesteigert werden.

#### Betriebserfahrungen und Ergebnisse

Insgesamt sind von dem hier besprochenen Typ bislang 19 Kapselversuchseinsätze bestrahlt worden, also insgesamt 38 Proben, da in jedem Versuchseinsatz 2 Proben angeordnet sind. Dabei wurden die Proben Temperaturen zwischen 250 und 1000°C variiert und Druckbelastungen bis 4 kp/mm<sup>2</sup> gefahren. Die maximale Bestrahlungszeit eines Einsatzes beträgt bisher 5000 Vollast-Betriebsstunden, was einem spezifischen Abbrand von etwa 60 000 MWd/t

entspricht. Nach dieser Bestrahlungszeit war bisher nur noch ein Verlagerungsaufnehmer intakt. Der Grund für den Ausfall der Aufnehmer während der Bestrahlung ist noch nicht geklärt. Vieles deutet auf ein Abreißen der dünnen Spulendrähte infolge thermischer Dehnungen hin, die bei dem diskontinuierlichen Reaktorbetrieb nicht zu vermeiden sind. Häufig ist unter Bestrahlung auch eine deutliche Zunahme des Schleifenwiderstandes der Meßspulen nachzuweisen. Sorgen bereitete anfangs die hohe Ausfallquote von etwa 30 % der Wegaufnehmer schon bei der Montage durch das Abreißen der Verbindungsstellen zwischen Spulen und Zuleitungen. Hier konnten zusammen mit der Herstellerfirma wesentliche Verbesserungen geschaffen werden.

Veröffentlichungen:

- /1\_7 D.Brucklacher, W.Dienst:  
Kontinuierliche Messung des Kriechens von  $UO_2$  unter Bestrahlung  
Journal of Nuclear Materials 36 (1970) 244-247.
- /2\_7 D.Brucklacher, W.Dienst, F.Thümmeler:  
Untersuchungen über das Kriechen keramischer Kernbrennstoffe unter Neutronenbestrahlung  
ANS-KTG Sept. 1970, Karlsruhe
- /3\_7 H.E.Häfner, H.Will:  
Instrumentierte Brennstoffkriechkapsel  
Kerntechnik 13 Jgg. 1971, Heft 10, S. 454-457.

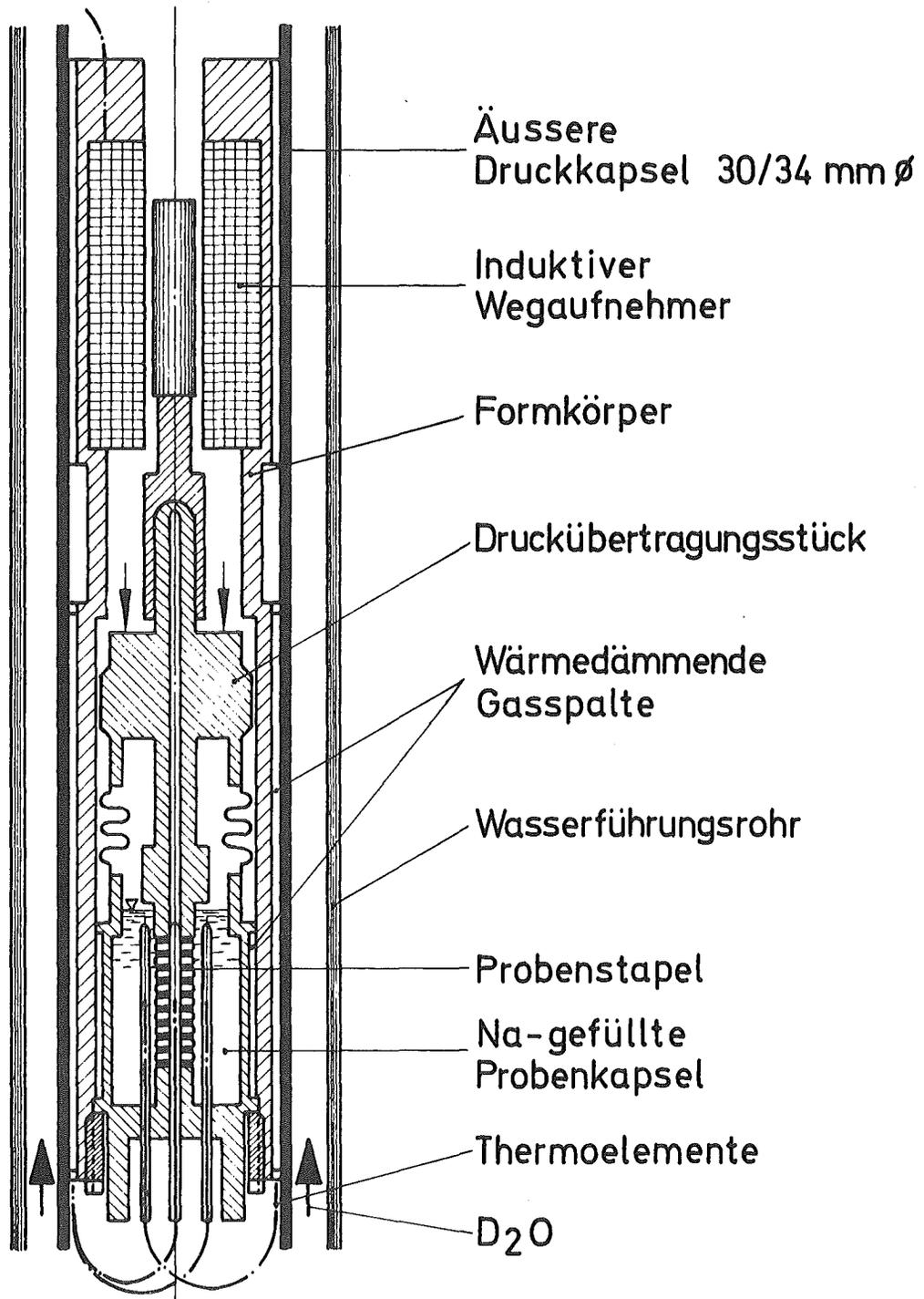


Abb.: Brennstoff - Kriechprobeneinsatz

## 2.6 Druckschwellkapsel mit kontinuierlicher Dehnungsmessung (Typ 9)

Heinz E. Häfner, K. Philipp

Nach der Bestrahlung mehrerer Kriechkapseln, die es erlauben, das "Tieftemperaturkriechen" von Kernbrennstoffen im Karlsruher Reaktor FR2 kontinuierlich unter Bestrahlung zu messen, wurde eine sog. Brennstoffschwellkapsel entwickelt. Mit einer solchen Kapsel ist es möglich, an zwei Proben bei einer bestimmten mechanischen Belastung, aber bei verschiedenen Temperaturen, jeweils den axialen Schwellbetrag direkt kontinuierlich zu messen. Die Kapsel ist für Temperaturen bis 2000 °C geeignet.

### Anforderungen an die FR2-Druckschwellkapsel

Brennstoff	UO <sub>2</sub> , UN, UC und deren Pu-Varianten
Pellet-Durchmesser	3 bis 6,5 mm
Brennstoffsäulenhöhe	40 mm
Stableistung	150 bis 500 W/cm
Leistungsdichte	um 200 W/gr
Brennstoffzentraltemperatur	800 bis 1800 °C in Stufen
Genauigkeit	ca. ± 50 °C
Druckbelastung der Proben	0 bis 5 kp/mm <sup>2</sup>
Genauigkeit	± 10 %
Abbrandziel	50 000 bis 80 000 MWd/t

### Kurze Beschreibung des Versuchseinsatzes (siehe Abb.)

Eine Brennstoffsäule von z.B. 4 mm Ø und 40 mm Höhe ist in eine dickwandige Molybdänhülle eingeschlossen. Diese Mo-Hülle sitzt, über Distanznocken zentriert, in einer inneren Kapsel, durch deren Boden Thermolemente zur Bestimmung der Proben temperatur hindurchgeführt werden. Die Probenbelastung wird über einen entsprechenden Gasdruck in der äußeren Kapsel

erreicht, der über Druckübertragungsstück und Druckstempel auf die Probe wirkt. Knapp über der Probe ist der induktive Wegaufnehmer angeordnet, dessen Kern auf dem Druckübertragungsstück fixiert ist.

Längenänderungen des Brennstoffs werden von einem Faltenbalg aufgenommen und direkt auf den Kern übertragen. Mit dem induktiven Wegaufnehmer können Längenänderungen von  $< 1 \mu\text{m}$  bei einer absoluten Genauigkeit von ca.  $\pm 3 \mu\text{m}$  erfaßt werden. Der Gesamtschwellbetrag kann außerdem nach Ende der Bestrahlung über Meßbolzen (Kontrollmaß) in den Heißen Zellen nachgemessen werden. Zwei solche innere Probenkapseln sitzen, ebenfalls über Distanznocken zentriert, übereinander in der äußeren Druckkapsel. Über die Breite der Gasspalte zwischen Mo-Hülle und Innenkapsel sowie zwischen Innenkapsel und Außenkapsel können die gewünschten Probertemperaturen eingestellt werden. So ist es möglich, die beiden Proben bei verschiedenen Temperaturen zu fahren. Bei Probertemperaturen unterhalb  $1100^{\circ}\text{C}$  werden normale Chromel/Alumel-Thermoelemente von  $1 \text{ mm } \varnothing$  verwendet, darüber müssen Hochtemperatur-Thermoelemente z.B. mit W5Re/W26Re-Adern eingesetzt werden.

### Bisherige Erfahrungen

Bisher wurden zunächst 3 Kapselversuchseinsätze dieses Typs ohne kontinuierliche Messung des Schwellbetrags mit insgesamt 9 Schwellproben zur Bestrahlung eingesetzt. Bei diesen Proben, die bei Temperaturen zwischen  $900$  und  $1400^{\circ}\text{C}$  und Probenbelastungen von  $3$  bzw.  $5 \text{ kp/mm}^2$  laufen und z.T. schon Abbrände von  $5\%$  erreicht haben, kann lediglich der integrale Schwellbetrag nach der Bestrahlung in den Heißen Zellen über Meßbolzen ausgemessen werden.

Eine erste Kapsel mit kontinuierlicher Messung ist seit Dezember 1973 mit 2  $\text{UO}_2$ -Proben in Betrieb. Die Temperaturen betragen  $800$  und  $1200^{\circ}\text{C}$  und die Probenbelastung ist  $3 \text{ kp/mm}^2$ .

Literatur

/1\_7 H.E.Häfner, K.Philipp:

FR2-Bestrahlungskapsel zur Untersuchung des Brennstoffschwelligens;

KFK-Bericht 1398 (1971)

/2\_7 H.E.Häfner:

Bestrahlungskapsel zur Untersuchung des Brennstoffschwelligens;

Atomwirtschaft, Atomtechnik 2, S. 76 (1973).

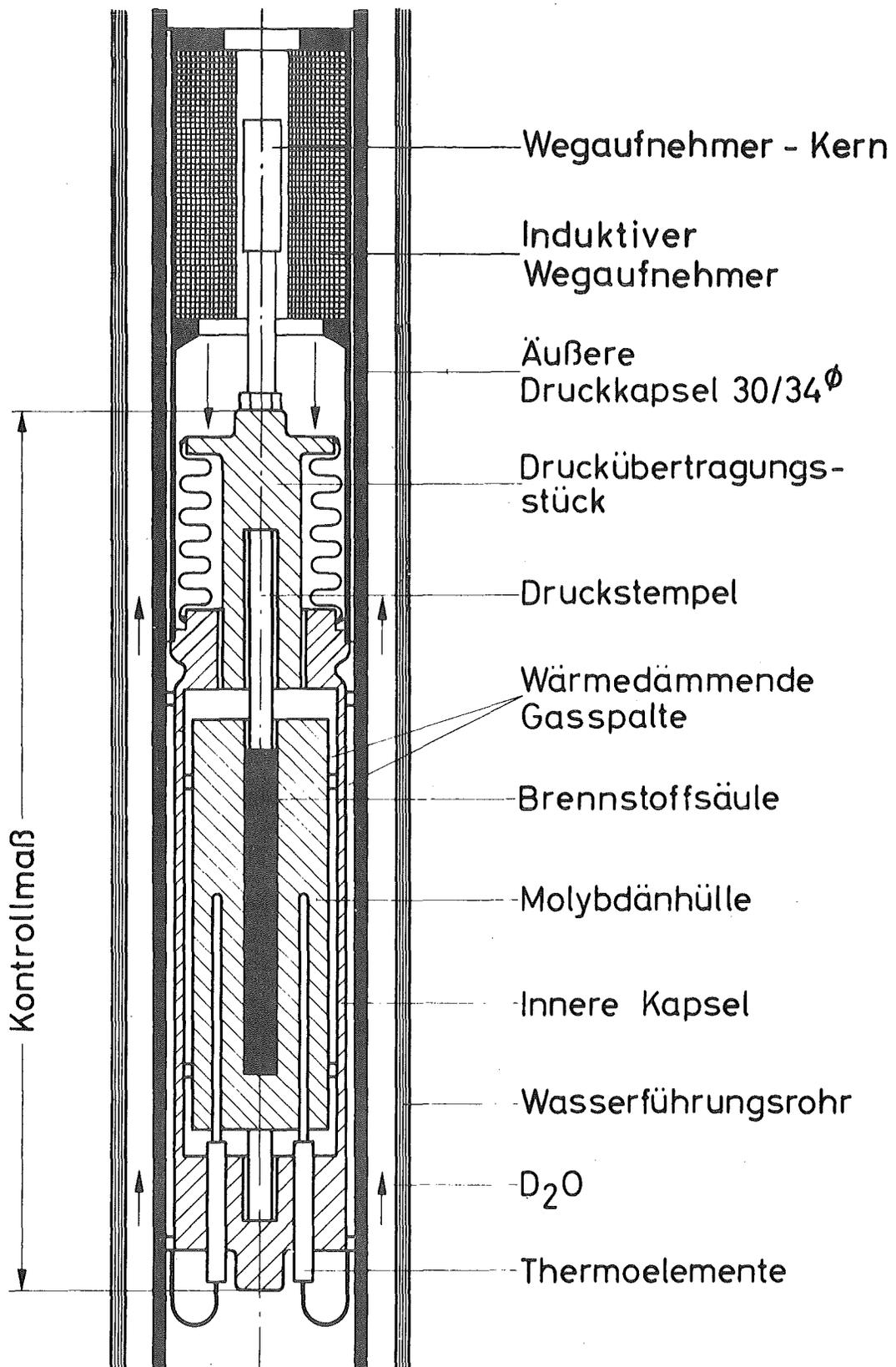


Abb.: Schematische Darstellung einer Druckschwellkapsel mit kontinuierlicher Dehnungsmessung.

## 2.7 Hochdruckkapsel zur Bestrahlung von Brennstoff- Schwellproben im FR2 (Typ 10)

Heinz E. Häfner, I. Kimmer

Mit den unter 2.5 und 2.6 beschriebenen instrumentierten Kriech- bzw. Schwellkapseln zur kontinuierlichen Messung der axialen Längenänderungen wurden z.T. recht beachtliche Erfolge erzielt. Schwierigkeiten treten aber auf, wenn man die für den einachsigen Spannungszustand gemessenen Werte für allseitige Belastungen umrechnen will, vor allem wegen der schwer erfaßbaren Reibungskräfte zwischen Brennstoff und Hülle. Es besteht deshalb nach wie vor der Wunsch, das Brennstoffschwellen unter mehr realistischen Belastungen, also allseitigen Druckbelastungen, zu ermitteln.

Einleitende Untersuchungen zu einer entsprechenden Kapsel wurden im Frühjahr 1972 angestellt. Sie führten zu einer Hochdruckkapsel, in der die Probenbelastung allseitig durch einen äußeren Gasdruck (max. 500 bar!) aufgebracht wird.

Seit Ende 1972 sind eine Durchführbarkeitsstudie mit einem Entwurf erstellt und eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt worden. Die Detailkonstruktion und der Bau einer Prototypkapsel ist in Angriff genommen worden. Z.Zt. werden an einer Attrappe Montage- und Prüftechniken erprobt. Mit der Bestrahlung der ersten Kapsel wird Mitte 1974 gerechnet.

### Aufgabenstellung

In dieser Kapsel sollen an kleinen Tablettenstapeln (ca. 6mm Ø) Brennstoffoberflächentemperaturen zwischen 1000 und 1500 °C und Probenbelastungen bis 5 kp/mm<sup>2</sup> eingestellt werden können. Die Probertemperatur ist durch eine geeignete Meßeinrichtung zu messen und kontinuierlich zu registrieren. Die durch Gasdruckeinfüllung eingestellte Probenbelastung soll während des Betriebs durch geeignete Druckmeßgeber überwacht werden. Der Schwellbetrag des Brennstoffs wird bei der Nachuntersuchung

in den Heißen Zellen durch Dichtebestimmung an den einzelnen Pellets ermittelt.

### Beschreibung des Versuchseinsatzes (siehe Abb.)

Zwei Proben liegen übereinander knapp unter Coremitte im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums und sind über jeweils 8 Distanznocken im äußeren Kapselrohr zentriert. Durch vier Bohrungen im Boden der Probenkapsel sind Tauchrohre aus Wolfram oder Molybdän lose hindurchgeführt, die zur Aufnahme von Thermoelementen dienen. Auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr zur Messung der Brennstoff-Zentraltemperatur ist der Probenstapel - 5 Brennstoffringe und 6 Ringe aus W oder Mo - aufgefädelt. Die im Probenstapel erzeugte Wärmemenge wird hauptsächlich durch Wärmeleitung und Abstrahlung an das Mo-Zwischenrohr und von dort über das innere Kapselrohr an das äußere Kapselrohr abgegeben. Die Proben temperatur wird durch Verändern des Durchmessers der Zwischenringe ( 6 bis 9 mm ) bzw. der verschiedenen Gasspaltbreiten eingestellt. Da die Wärme auf möglichst definierter Länge radial nach außen abgegeben werden soll, werden die axialen Anteile durch keramische Isolierkörper kleingehalten.

Die vorgesehenen Hochtemperatur-Thermoelemente haben eine Länge von ca. 5 cm und tragen eine sog. Kupplungshülse aus Edelstahl, die die Übergangsstelle auf eine edelstahlummantelte Ausgleichsleitung umgibt. Diese Edelstahlhülsen sind ihrerseits mit der sog. Druckhülse dicht verlötet, die nach Verschweißung eine Einheit mit der Probenkapsel darstellt. Mit dem oberen Endstopfen der Probenkapsel sind zwei Druckkapillaren dicht verschweißt. Eine davon dient als Evakuierungsleitung und die andere führt zu einem Dreiwegestück, von dem aus zwei Anschlüsse zum Druckgeber bzw. zum Einfüllstutzen mit einem Rückschlagventil führen. Über diesen Einfüllstutzen wird bei der Montage je nach der gewünschten Probenbelastung ein Gasdruck von max. 500 bar aufgebracht. In der Anschlußbohrung des oberen Endstopfens ist ein Sintermetallfilter eingebracht, mit dem während der Montage Brennstoffstaub zurückgehalten werden soll.

Eine kleine Druckfeder, die im oberen Endstopfen geführt ist, dient zur Fixierung des Probenstapels und der Isolierkörper. In drei achsenparallelen Bohrungen des kurzen Mo-Zwischenrohres sind die Thermoelemente mit ihren Schutzrohren zur Messung der Umgebungstemperatur des Probenstapels untergebracht.

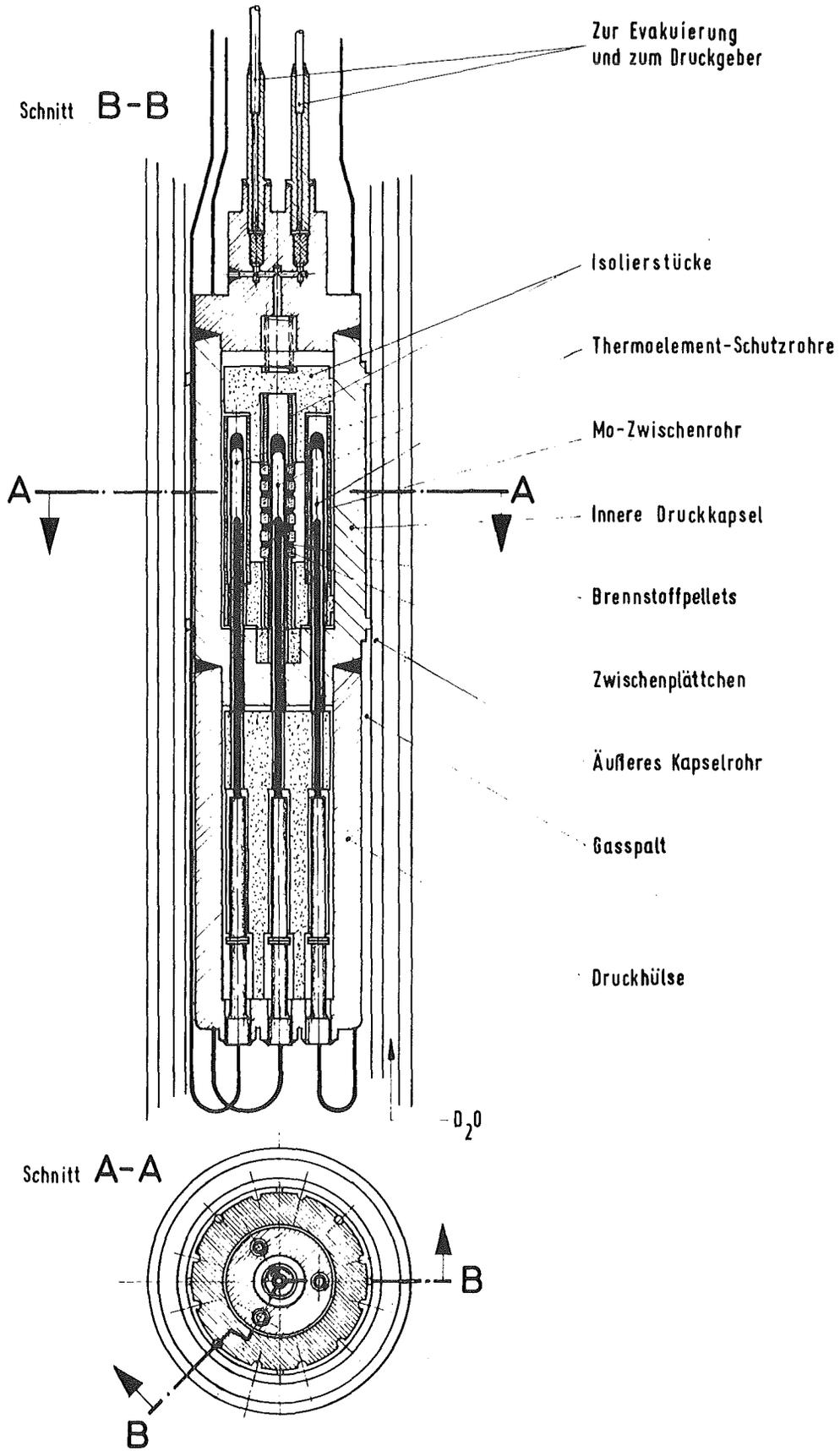


Abb. : Hochdruck-Schwellkapsel

## 2.8 FAFNIR, eine Kapsel zur Bestrahlung von oxidischen Schnellbrüter-Brennstäben im BR2 ( Typ Mol 8 )

H. van den Boorn,\* Heinz E. Häfner

Für den Reaktor BR2 wurde von GEX in Mol eine Kapsel für Stabbestrahlungen entwickelt, bei der durch eine Cadmium-Abschirmung der thermische Neutronenfluß abgeschirmt wird.

### Aufgabenstellung

Brennstäbe	6 $\emptyset$ x 0,38 mm Wand x 1025 mm lang
Brennstoff	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>
Stableistung	max. 550 W/cm
Hüllrohrinnentemperatur	max. 680 °C
durch Gasgemischregelung konstant gehalten	
Zielabbrand	100 000 MWd/tM
Abschirmung des thermischen Neutronenflusses.	

An einem Teil der Stäbe wird der Spaltgasdruck kontinuierlich gemessen und registriert (Mol 8B/C).

### Kurze Beschreibung der Kapsel

Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, sitzt der Brennstab von NaK umgeben in einer inneren Kapsel aus Edelstahl. Diese innere Kapsel ist umgeben von einem Cadmium-Schirm in Sandwichbauweise (Cd-Schicht mit innerer und äußerer Edelmetallumhüllung). Zwischen innerer Kapsel und Cd-Schirm, der als äußere Kapsel anzusehen ist, befindet sich ein Gasspalt von ca. 30 bis 50  $\mu$ m Breite. Durch Gasgemischregelung kann damit auch bei abfallender Leistung die Hüllrohrtemperatur konstant gehalten werden.

### Erfahrungen

Bisher sind 14 Einsätze dieser Art, z.T. bis zu Abbränden von 120 000 MWd/tM bestrahlt worden. Nachdem bei den ersten beiden Einsätzen (Mol 8A) nach relativ kurzer Zeit nacheinander alle Thermoelemente ausgefallen sind, liegt die Ausfallquote heute bei 3 TE (von 12) pro Einsatz nach etwa 10% Abbrand.

\*Arbeitsgruppe Mol des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Die Bestimmung der Stableistung aus der registrierten Hüllwandaußentemperatur oder aus dem für die Bestrahlungsposition vorausberechneten Neutronenfluß konnte während der Bestrahlung dieser Einsätze verbessert werden.

Hierzu trugen bei:

- weniger Ausfälle bei den Thermoelementen,
- regelmäßige Kalibration des "heißen" Gasspaltes durch He-Ne-Gasaustausch während der Bestrahlung,
- bessere Einschätzung des Beitrages der NaK-Konvektion auf das Temperaturprofil in der Kapsel,
- Vergleichswerte aus chemischer Abbrandbestimmung nach der Bestrahlung.

Im allgemeinen hatten die FAFNIR-Einsätze bei Bestrahlungsbeginn einen zu großen Gasspalt, so daß bei der zulässigen Hüllwandaußentemperatur nicht die Sollstableistung erreicht werden konnte. Die Kalibration des heißen Gasspaltes zeigte aber bei allen Einsätzen eine fast lineare Abnahme der Spaltbreite mit Zunahme des Abbrandes. Hierdurch wird bei derselben Hüllwandtemperatur eine höhere Stableistung und eine abbrandabhängige Korrektur der Berechnung der Stableistung möglich.

Problematisch waren:

- die gasdichten Durchgänge der Thermoelemente aus der NaK-Kapsel (Hochtemperaturlötung) sowie die gasdichte Trennung zwischen Einsatzkopf und Einsatzunterteil (Stopfbuchse).
- die gasdichte Thermoelementdurchführung zwischen Einsatzkopf und Reaktorbeckenrand.

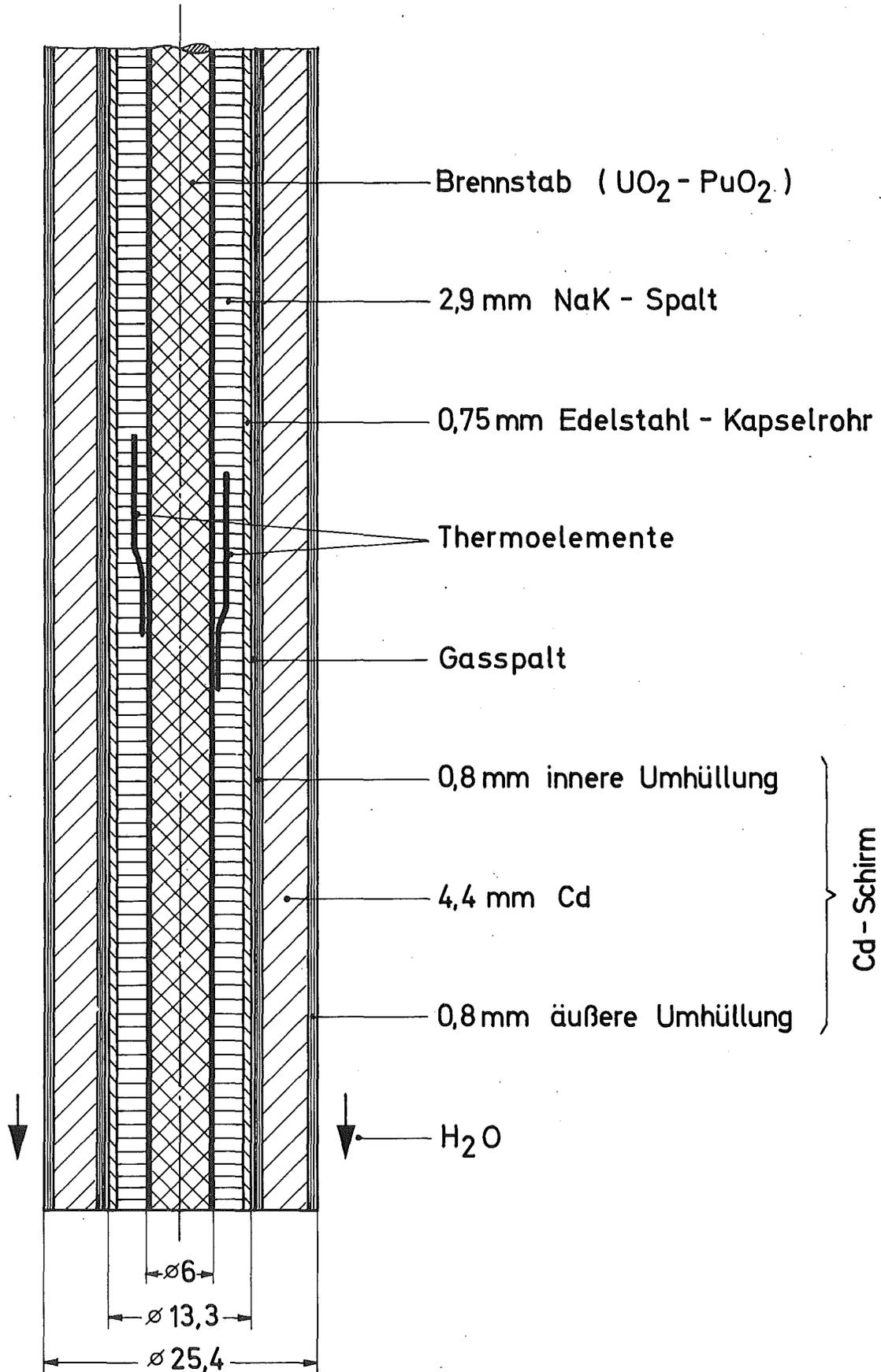


Abb.: FAFNIR - Brennstab - Bestrahlungskapsel ( Mol 8 )

## 2.9 VADIA, eine Bestrahlungskapsel zur Messung von Hüllrohraufweitungen im Siloe

Heinz E. Häfner

Für den französischen Reaktor Siloe wurde von CEN-Grenoble ein Bestrahlungseinsatz entwickelt, der mittels eines Tastersystems die radiale Aufweitung eines Brennstabprüflings unter isostatischer Druckbelastung bis 150 bar während des Betriebs zu messen gestattet. Bisher sind zwei Einsätze mit je einer Probe von 7 mm Hüllrohrdurchmesser und ca. 100 mm Länge bei ca. 500 W/cm Stabileistung und Hüllrohrtemperaturen zwischen 600 und 700 °C bestrahlt worden. Das Abtastsystem ist beim zweiten Einsatz gegenüber dem ersten wesentlich verbessert worden. Das Kapselkonzept soll nun im Auftrag des PSB für den belgischen Reaktor BR2 modifiziert werden (Projekt Mol 10).

### Kurze Beschreibung der Probenkapsel (siehe Abb.)

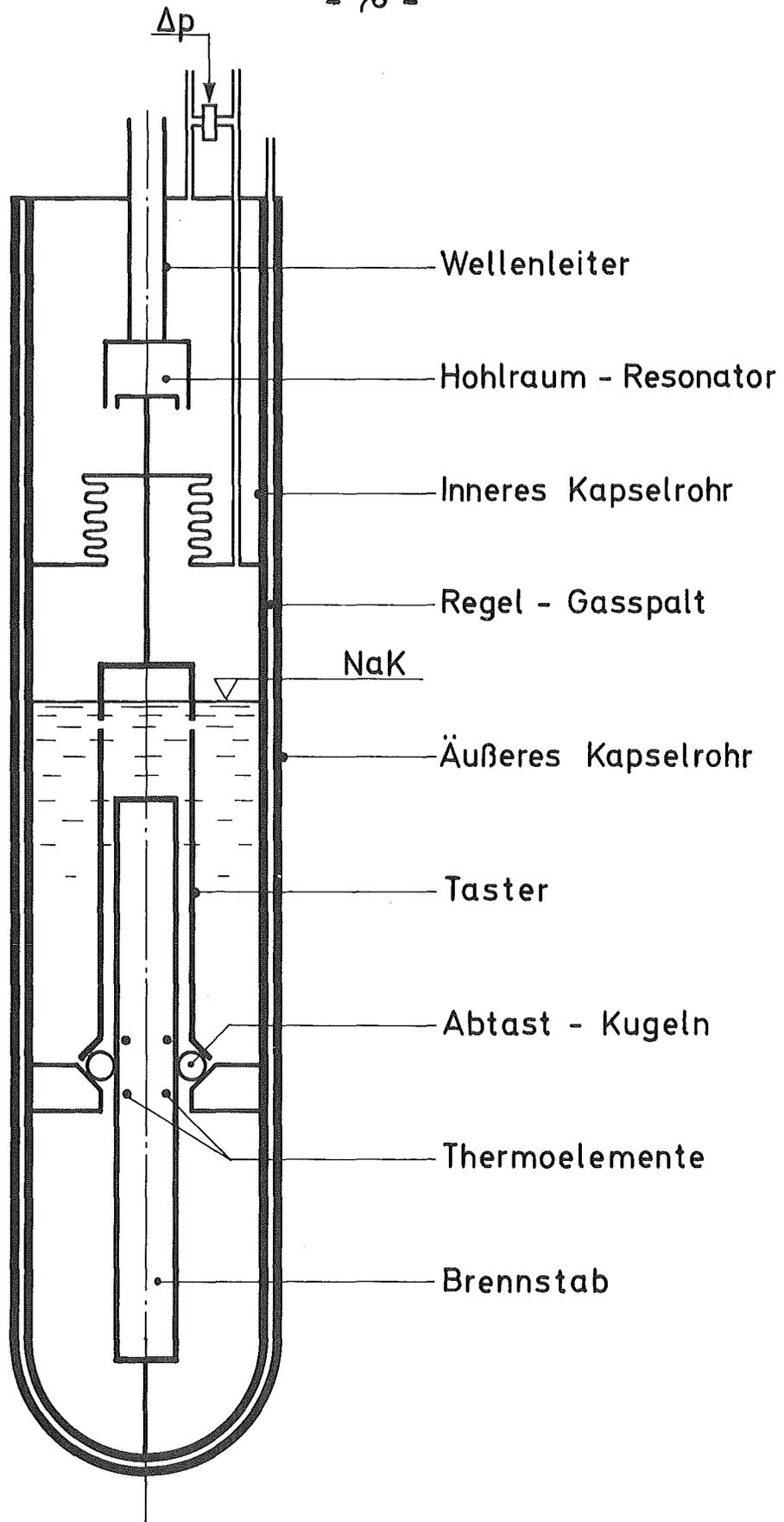
Die Brennstabprobe sitzt, von NaK umgeben, in einer inneren Kapsel und kann durch Gaseinspeisung mit variablen Außen- drücken beaufschlagt werden. Über ein besonderes Abtastsystem werden radiale Aufweitungen der Brennstabhülle in eine axiale Verschiebung des Kolbens innerhalb des Resonanzhohlraums umgesetzt und können so mit dem Hohlraumresonator erfaßt werden. Die Hüllrohrtemperatur wird durch direkt angelegte Thermoelemente gemessen und kann durch Änderung der Gaszusammensetzung im Gasspalt zwischen innerer und äußerer Kapsel geregelt werden.

### Bisherige Erfahrungen

Der erste Bestrahlungseinsatz dieser Art, der über 3 Reaktorzyklen im großen und ganzen zufriedenstellend lief, hatte ein Zweipunkt-Schneiden-Abtastsystem mit einer festen und einer beweglichen Schneide. Damit konnten Hüllrohraufweitungen nur in einer Winkellage erfaßt werden. Das hatte den Nachteil, daß man bei ungleichmäßiger Aufweitung der Hülle u.U. gerade die Winkellage mit minimaler Aufweitung erfaßte. Außerdem hatte

dieses System ein relativ stör anfälliges Hebelsystem zur Übertragung der Durchmesseränderung in eine Längenänderung.

Durch das jetzt verwendete Abtastsystem mit 3 um  $120^{\circ}$  versetzten Kugeln ist eine bessere Erfassung der Durchmesseränderungen möglich; auch ist hierbei das Umsetzen in eine axiale Bewegung einfacher. Mit dem zweiten Bestrahlungseinsatz wurden insbesondere Temperaturzyklen gefahren; er arbeitete ebenfalls über 3 Reaktorzyklen zufriedenstellend.



: "VADIA" Brennstoffschwellkapsel

2.10 FASOLD, eine Karbidstab-Bestrahlungskapsel mit  
Cd-Abschirmung im BR2 (Typ Mol 11)

Heinz E. Häfner, H. van den Boorn\*

Für den BR2 wurde von GEX, Mol, eine einwandige NaK-Kapsel ähnlich der in Karlsruhe entwickelten FR2-Kapsel vom Typ 7, gebaut, die sich für hohe Stableistungen eignet und von einem auswechselbaren Cadmiumschild zur Abschirmung thermischer Neutronen umgeben ist. Der prinzipielle Aufbau der Kapsel ist sehr einfach und unmittelbar aus der Abbildung zu entnehmen. Bei einem Teil der Stäbe wird der Spaltgasdruck gemessen. Die Nuten auf der Kapsel sind zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche erforderlich, da sonst bei maximaler Stableistung und bestimmten Notkühlfällen die kritische Wärmestromdichte (burnout) erreicht würde. Es wird unterschieden nach Experimenten mit (Mol 11A) und ohne Spaltgasdruckmessung (Mol 11B).

Anforderungen:

Stababmessungen	8 mm $\varnothing$ x 1022 mm lang
Brennstoff	Mischkarbide mit 15 % Pu und 93 % U235-Anreicherung
Stableistung	1000 bis 1500 W/cm
Hüllrohroberflächentemperatur	max. 550 °C
Zielabbrand	max. 70 000 MWd/tM
Ein Teil der Stäbe hat Na-Bonding.	

Bisherige Erfahrungen

Bis jetzt kamen drei Einsätze zur Bestrahlung. Der erste Einsatz (11A1) enthielt als Prototypausführung einen Brennstab aus UC. Bei maximalen Stableistungen zwischen 1400 und 1500 W/cm trat etwa nach 40 000 MWd/tM ein Hüllschaden auf und das Experiment wurde ausgebaut.

Der zweite Einsatz (11A2) erreichte bei einer Stableistung von 1200 W/cm den gewünschten Abbrand von ca. 35 000 MWd/tM.

---

\*Arbeitsgruppe Mol des Kernforschungszentrums Karlsruhe.

Der dritte Einsatz (11B2) erreichte bis jetzt einen Abbrand von etwa 65 000 MWd/tM bei einer Stableistung von 1200 W/cm und ergab, daß der Spaltgasdruckaufbau unbedeutend ist.

Als negative Erfahrung sind die in unregelmäßigen Abständen auftretenden Temperaturschwankungen über die Brennstablänge zu betrachten. Alles spricht dafür, daß diese Temperatursprünge durch plötzliche Änderungen in der Wärmeabfuhr infolge Geometrieänderung ("Exzentrizitätssprünge" des Stabes) verursacht werden.

Konstruktive Probleme bringen auch hier die gasdichten TE-Durchführungen durch die Niobkapsel.

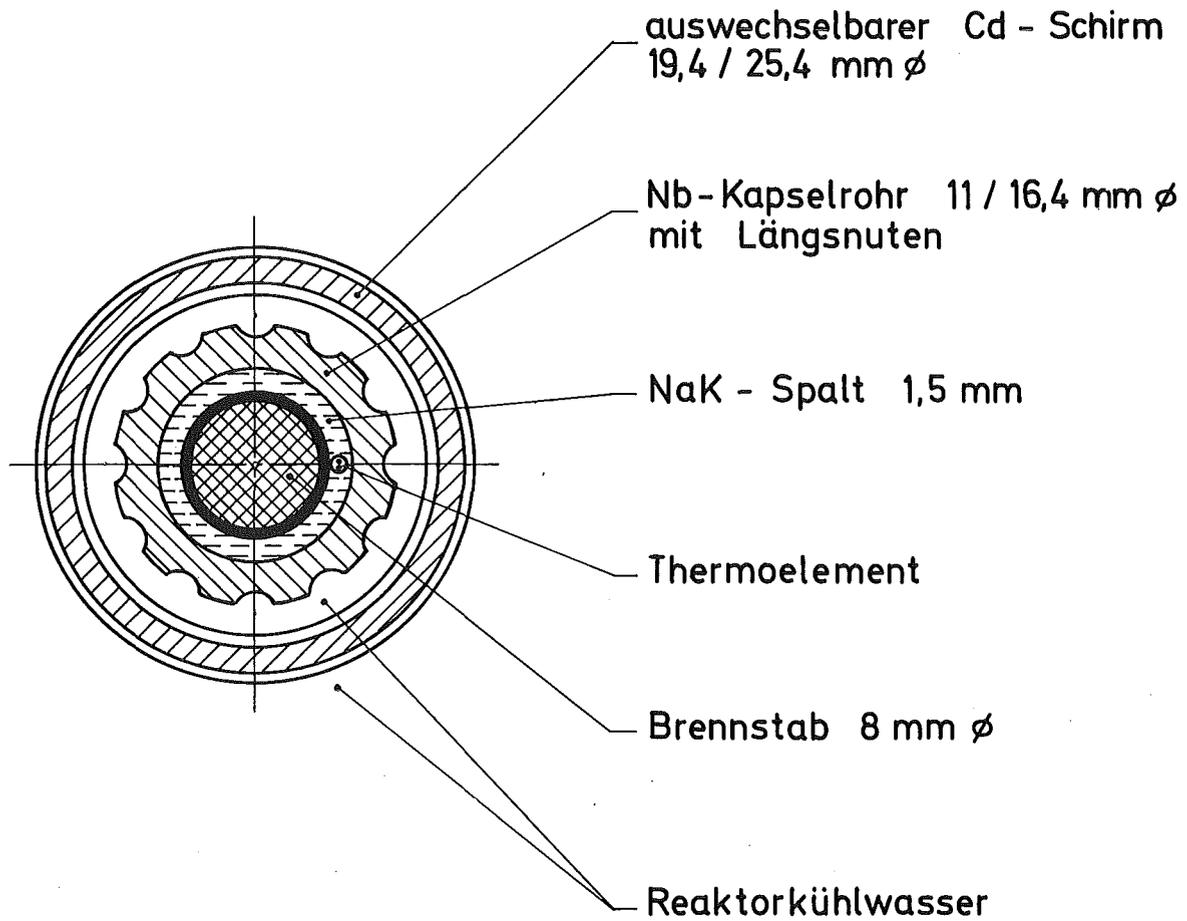


Abb.: "FASOLD" Karbidstab - Bestrahlungskapsel  
mit Cd - Abschirmung

2.11 CONFLUENT, eine Bestrahlungskapsel zur kontinuierlichen Kriechdehnungsmessung an Brennstoffproben im Reaktor BR2  
(Typ Mol 12)

Heinz E. Häfner, H. van den Boorn \*

Vom CEN Grenoble wurde im Auftrag des IMF eine Kriechkapsel für den BR2 entwickelt. Hier werden Längenänderungen an einer Brennstoffprobe während des Betriebs bei veränderlicher Temperatur zwischen 600 und 1000 °C und zwischen 0,5 und 5 kp/mm<sup>2</sup> veränderlicher axialer Druckbelastung kontinuierlich gemessen. Die maximale Spaltungsrate beträgt  $4 \cdot 10^{14}$  Spaltungen/cm<sup>3</sup>s. Es gibt zwei Versionen von Kapseln dieses Typs:

Mol 12A für UO<sub>2</sub> ohne Pu

Mol 12B für Mischoxid.

Für die Mol 12B-Variante wurde wegen des Plutoniums ein lückenloses doppeltes Containment für den Kapselversuchseinsatz mit allen Verbindungsleitungen und das out of pile-System gefordert.

Kapselaufbau (siehe Abb.)

Auf den Brennstoff-Probenstapel, dessen Aufbau dem in der FR2-Kriechkapsel entspricht, wird über ein pneumatisches Belastungssystem eine Druckspannung aufgebracht. Um die Beanspruchung des Faltenbalges im Belastungssystem möglichst klein zu halten, wird der für die maximale Prüflingsbelastung erforderliche Wirkdruck in zwei Stufen von 70 auf 35 bar und von 35 auf ca. 1 bar abgebaut. Die Faltenbälge sind Außendruckbeaufschlagt. Durch Druckumkehr im Belastungssystem können Eichkurven aufgenommen werden, die eine Erfassung des Einflusses der Reibung, des Systemgewichtes und der Federsteifigkeit erlauben [ 1\_7. Die Konstruktion der Kapsel ist so, daß der Pu-haltige Probenstapel erst zum Schluß der Montage eingeführt werden kann. Oberhalb des Probenstapels befindet sich

---

\* Arbeitsgruppe Mol des Kernforschungszentrums Karlsruhe

der Hohlraumresonator zur Messung der axialen Längenänderung des Probenstapels und das Belastungssystem. Der obere Prüflingsteil ist über ein Gestänge fest mit dem Kolben des Meßsystems verbunden. Die Messung der Oberflächentemperatur des Probenstapels erfolgt durch zwei Thermoelemente, die sich im NaK-Spalt befinden. Ein Thermoelement zur Messung der Zentraltemperatur ist in das Molybdänröhrchen eingeführt, auf welches abwechselnd Brennstofftabletten und Mo-Scheibchen aufgefädelt sind.

Sämtliche Teile des Meßsystems, des Prüflingsbereiches und des Belastungssystems sind in der sogenannten Kriechzelle in NaK eingebettet. Zwischen Kriechzelle und äußerem Hüllrohr befindet sich ein Spalt, die sogenannte Thermische Barriere, der entsprechend der geforderten Prüflingstemperatur ausgelegt wird. Außerdem kann durch die Wahl des Gases im Spalt (He, Ne, N<sub>2</sub>) auf die Prüflingstemperatur Einfluß genommen werden.

Im Kopf des Einsatzes befinden sich die Kupplungen für die elektrischen und pneumatischen Leitungen. Der Hohlleiter des Dehnungsmeßsystems wird über einen Flansch mit dem Kopf verbunden.

### Bisherige Erfahrungen

Bis jetzt kamen drei Einsätze zur Bestrahlung. Der erste wurde nach 1270 Stunden Bestrahlungszeit wegen Ausfall der Dehnungsmessung ausgebaut. Eine Neutrografie-Aufnahme zeigte, daß der Wellenleiter defekt war. Dieser erste Einsatz erreichte im Bereich der Referenzkammer eine zu hohe Temperatur. Bei dem nachfolgenden Einsatz wurde die Referenzkammer deshalb außerhalb des BR2-Brennelementbereichs eingebaut. Dieser Einsatz wurde nach 4800 Stunden Bestrahlungszeit wegen Ausfalls der Thermoelemente und gestörtem Dehnungsmeßsignal ausgebaut. Der dritte Einsatz ist seit einiger Zeit in Betrieb.

Die bisherigen Erfahrungen mit Confluent-Einsätzen sind insgesamt positiv zu bewerten.

### Literatur:

/17 H.E.Häfner, W.Neumann:  
Kriechkapseln für Brennstoff und Hüllmaterial  
KFK-Bericht Nr. 1571 (März 1972)

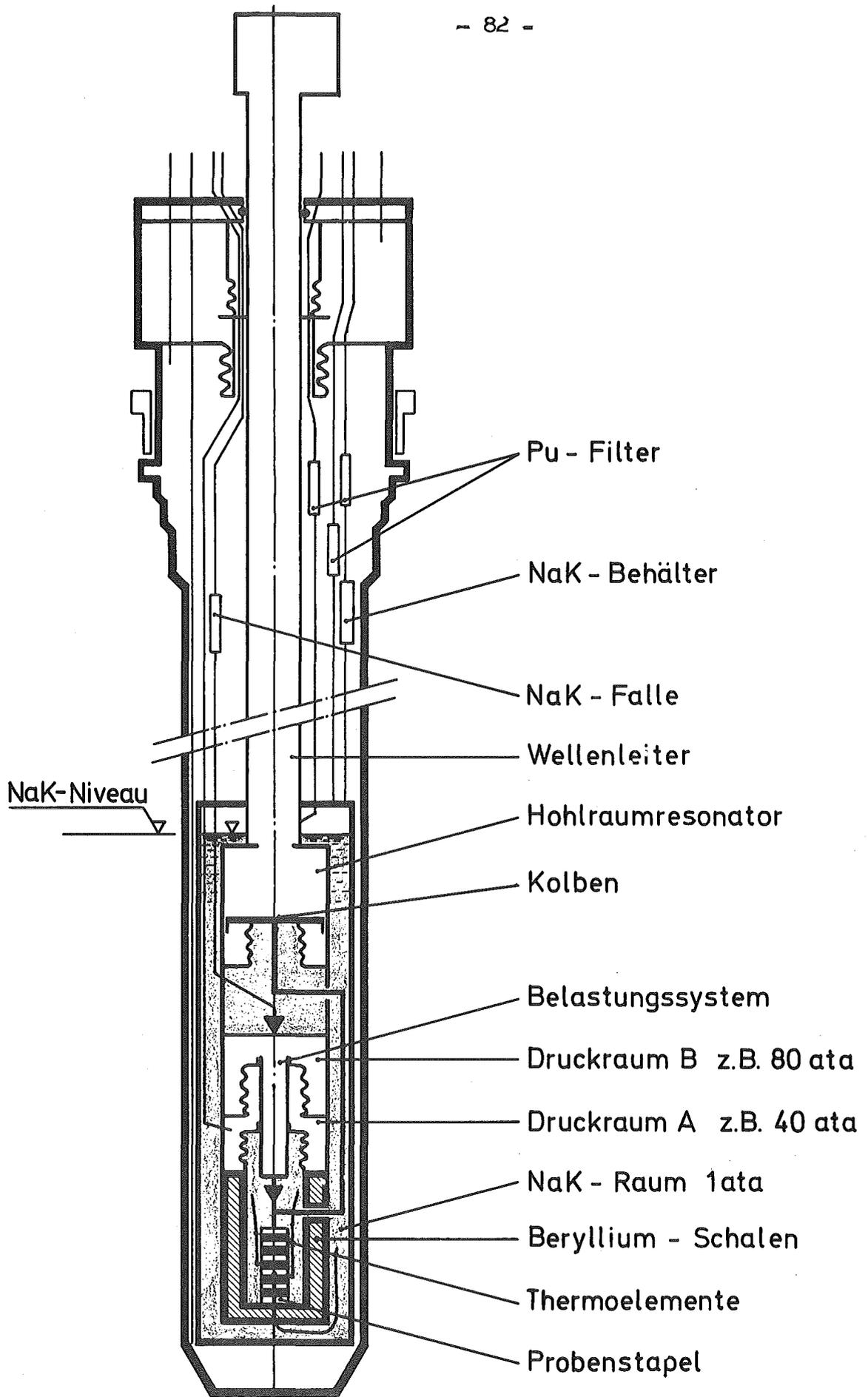


Abb.: Brennstoffkriechkapsel „CONFLUENT“ ( Mol 12 )

2.12 CFC, eine Bestrahlungseinrichtung mit Unterdruckregelung  
für in pile-Verträglichkeitstests Brennstoff/Hülle im BR2  
(Typ Mol 16)

---

Heinz E. Häfner

Von GEX/Mol wurde eine Bestrahlungseinrichtung, die sog. Kupferkreuzkapsel mit Unterdruckregelung, entwickelt, die sich besonders für Verträglichkeitstests mit möglichst gut definierter Probertemperatur eignet. Bestrahlungskapseln des gleichen Aufbaus, jedoch ohne Temperaturregelung wurden auch schon mit neuartigen Brennstabkonzepten (Mol 13) und Karbidstäben (Mol 15) eingesetzt. Bei diesem Kapseltyp ist eine Canschadendetektion möglich.

Aufgabenstellung:

Stableistung	500 W/cm $\pm$ 30 %
Hüllrohrinnentemperatur	530, 590, 650 und 720 $\pm$ 10°C konstant geregelt,
Kurzproben	6 mm Hüllrohr- $\emptyset$ x 90 bzw. 180mm lang
Brennstoff	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>
Zielabbrand	max. 120 000 MWd/tM

Beschreibung des Kapselkonzeptes (siehe Abb.)

Jeweils zwei bzw. vier Brennstabproben sind in einer mit NaK-gefüllten Kupferkapsel von kreuzförmigem Querschnitt übereinander angeordnet. Bei den Versionen mit den hohen Hüllrohrtemperaturen von 650 bzw. 720°C ist auf der Innenseite des Kupferkreuzes aus Korrosionsgründen ein dünnwandiges Edelstahlschutzrohr eingezogen. Zwischen den vier Flügeln des Kupferkreuzes und dem äußeren Kapselrohr befindet sich ein dünner Gasspalt (He), dessen Wärmeübertragungswiderstand durch Druckabsenkung (10 bis 100 Torr) erhöht werden kann. Dadurch ist eine Temperaturregelung bzw. Temperaturkonstanthaltung auch bei abfallender Stableistung möglich. Um eine möglichst gleichmäßige axiale Temperaturverteilung entlang der Brennstäbe zu erreichen, ist der Gasspalt zwischen den Brennstoffzonen wesentlich dicker ausgeführt als im Brennstoffbereich. Mittels

Thermoelementpaaren auf verschiedenen Radien der Kupferkreuzflügel können Temperaturdifferenzen gemessen werden, die ein Maß für die Stableistung sind. Außerdem sind Thermoelemente zur Erfassung der Hüllrohrtemperatur direkt auf der Hüllrohroberfläche befestigt. Die 4 längslaufenden Aussparungen im Kupferkreuz dienen einmal zur Durchführung der Thermoelemente und zum anderen ermöglichen sie eine schnelle und gleichmäßige Druckregelung.

Bisherige Erfahrungen:

Das Projekt Mol 16 läuft erst Mitte 1974 an. Es sind allerdings mit Mol 13 einige gleichartige Vorläufer-Kapseln jedoch ohne Temperaturregelung durch Unterdruckeinstellung bestrahlt worden. Dabei traten hauptsächlich Schwierigkeiten in der Zentrierung des Kupferkreuzes im äußeren Kapselrohr auf. Bei schlechter Zentrierung fließen über die vier Flügel des Kupferkreuzes verschiedene Wärmemengen, die auch verschiedene  $\Delta t$  erzeugen, so daß letztlich nur die Mittelwerte der  $\Delta t$  ein Maß für die Stableistung sind. In den Fällen, wo in das Kupferkreuz ein dünnes Edelstahlrohr eingezogen werden muß, ist es auch nicht ganz einfach, dieses vollkommen zur Anlage zu bringen.

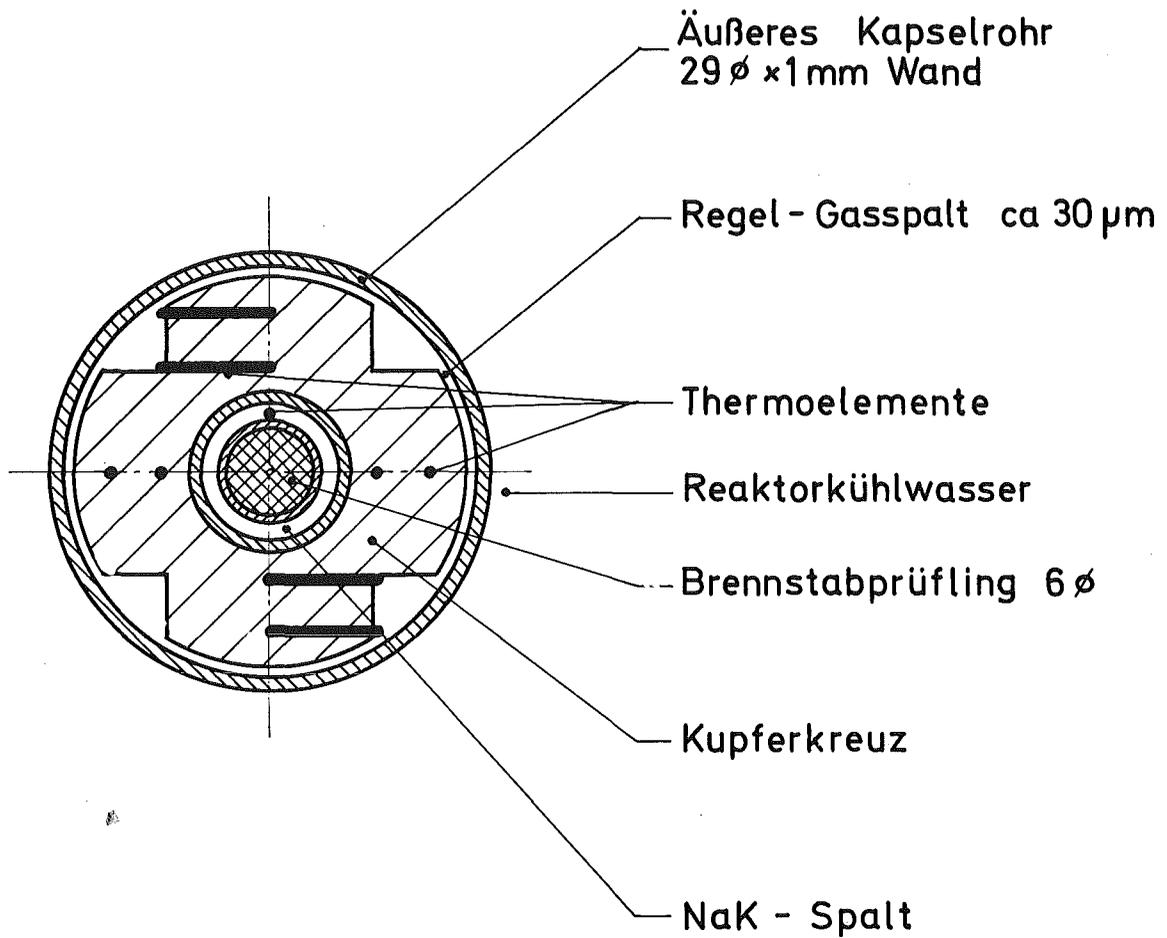


Abb.: CFC Kupferkreuzkapsel  
mit Unterdruckregelung ( Mol 16 )

## 2.13 Bestrahlungseinrichtungen zur Erzeugung von technisch nutzbaren Transuranen

L.Schmidt

Die Herstellung technisch einsetzbarer Transurane - wie z.B.  $^{238}\text{Pu}$  und  $^{244}\text{Cm}$  für Energiequellen sowie  $^{252}\text{Cf}$  für Neutronenquellen - kann, mit Ausnahme des  $^{244}\text{Cm}$ , nur über Bestrahlung in Reaktoren erfolgen. Besonderes Interesse gilt dabei dem  $^{238}\text{Pu}$  als Energiequelle hoher spezifischer Leistung, das vor allem im medizinischen Bereich - z.B. in Herzschrittmachern - Anwendung findet [17].

Als Ausgangsmaterial werden  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$  eingesetzt. Letzteres insbesondere zur Erzeugung von isotopenreinem  $^{238}\text{Pu}$ . Die Startnuklide können zum Teil aus den Wiederaufarbeitungsanlagen für Kernbrennstoffe gewonnen werden. Die hohe spezifische  $\alpha$ -Aktivität des eingesetzten, wie des im Reaktor gebildeten Materials erfordert wegen des Kontaminationsrisikos für den Reaktor und der damit verbundenen Gefährdung des Bedienungspersonals ausreichend sichere Bestrahlungsstäbe bzw. Bestrahlungskapseln. Durch entsprechende Auslegung und Materialauswahl sowie durch umfangreiche Kontrollen beim Herstellungsprozeß wird dies weitgehend gewährleistet. Daneben werden während der Bestrahlung Überwachungseinrichtungen eingesetzt, die Schäden frühzeitig detektieren und damit einen gefahrlosen Abbruch des Bestrahlungsvorhabens erlauben.

Bestrahlungsexperimente werden durchgeführt in den Reaktoren BR2 Mol, HFR Petten und FR2 Karlsruhe. Das Bestrahlungsgut wird in zwei Konfigurationen eingesetzt:

- Pellets aus Actiniden/Al-Cermets, einer gepreßten und gesinterten Mischung von Al- und Actinidenoxid-Pulvern
- Zylindern aus im Gießverfahren hergestellter Actiniden/Al-Legierung.

### Bestrahlungen im BR2

Im BR2 wurden bisher 21 Stäbe mit Pu/Al-Legierungszyclindern mit max. 2,5 wt.% Kernbrennstoffplutonium bis zu einer max. thermischen Neutronendosis von  $2,3 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2$  erfolgreich bestrahlt (Projekt Mol 6A-1 und 2). Die Zylinder waren von einer Hülle aus Zircaloy 2 umgeben und direkt vom Primärkühlwasser des Reaktors umströmt. In Abb. 1 ist ein Bestrahlungsstab dargestellt.

Stäbe mit Pellets aus  $^{241}\text{AmO}_2/\text{Al}$ -Cermets (Abb. 2) und  $^{241}\text{Am}/\text{Al}$ -Legierungszyclindern mit einer Umhüllung aus Edelstahl, Werkstoff Nr. 1.4306, wurden in Reflektor- und Brennelement-Positionen bestrahlt (Projekt Mol 14-1 und 2) /27. Der Am- bzw.  $\text{AmO}_2$ -Gehalt lag bei 10 wt.%. Die Stäbe waren in einen speziell entwickelten Bestrahlungskorb eingebaut (Abb. 3). Geplant ist, noch weitere Legierungs- und Cermet-Stäbe (Projekt Mol 14-3 und 4) zu bestrahlen. Die Cermetstäbe sind gegenüber Mol 14-1/2 geringfügig modifiziert und haben neben dem Verzicht auf den Al-Liner einen  $\text{AmO}_2$ -Gehalt von 13,6 wt.%. Dadurch wird zu exakteren Vergleichszwecken pro Legierungs- und Cermetstab jeweils die gleiche Menge von  $^{241}\text{Am}$  eingesetzt, nämlich 3,077 g/Stub.

Für orientierende Arbeiten mit Bestrahlungsproben kleiner Wärmeentwicklung wurden Kapseln entwickelt, die in Reflektor- und Brennelementpositionen des BR2 (Abb. 4) und in modifizierter Form auch in Isotopen-Kanälen des FR2 eingesetzt werden können /17. Es handelt sich hier um doppelwandige Kapseln mit Pellets aus Actiniden/Al-Cermets, bei denen die innere Zircaloy-Kapsel verschraubt und die äußere Al-Kapsel verschweißt ist. Für die Bestrahlungsexperimente Mol 6B und Mol 6C (Bestimmung der effektiven Bildungsraten von höheren Actiniden) wurden die Kapseln hergestellt und nach entsprechenden Prüfungen in wiederbeladbare Bestrahlungskörbe eingebaut und im BR2 eingesetzt.

### Bestrahlungen im HFR

Im Hochdruck-Loop des HFR wurden bisher bei einer Kühlwassertemperatur von 180 bis 280°C und einem Kühlmitteldruck von 120 atm 3 Einsätze mit je 9 Stäben bestrahlt. Diese Versuche sollen zeigen, inwieweit Aluminium als Verdünnungsmatrix zum Einsatz in Leistungsreaktoren wegen der dort herrschenden hohen Kühlmitteltemperaturen noch geeignet ist [3\_7].

Jeweils 3 Stäbe pro Einsatz, die im Neutronenflußmaximum angeordnet waren, hatten Zentraltemperaturmeßstellen (Abb.5). Der AmO<sub>2</sub>-Gehalt betrug max. 25 wt.%. Der Bestrahlungseinsatz ist in Abb. 6 dargestellt.

### Bestrahlungen im FR2

Im FR2 wurden 4 Bündelelemente mit insgesamt 140 Brennstäben über einen längeren Zeitraum bestrahlt [1\_7]. Es wurden Pu/Al-Legierungszylinder mit 6 wt.% Pu und einer Umhüllung aus Zircaloy 2 eingesetzt (Abb. 7).

Im Rahmen des Programmes zur Herstellung von <sup>238</sup>Pu durch Bestrahlung von <sup>237</sup>Np-Bündelelementen im FR2 wurden Bestrahlungen von <sup>237</sup>Np-Kapseln bei gestaffeltem n-Fluß und -Spektrum im FR2 durchgeführt [4\_7]. Jeweils 4 Kapseln sind in einen wiederbeladbaren Einsatz eingebaut, der in Zwischengitter- und Brennelementpositionen eingesetzt werden kann.

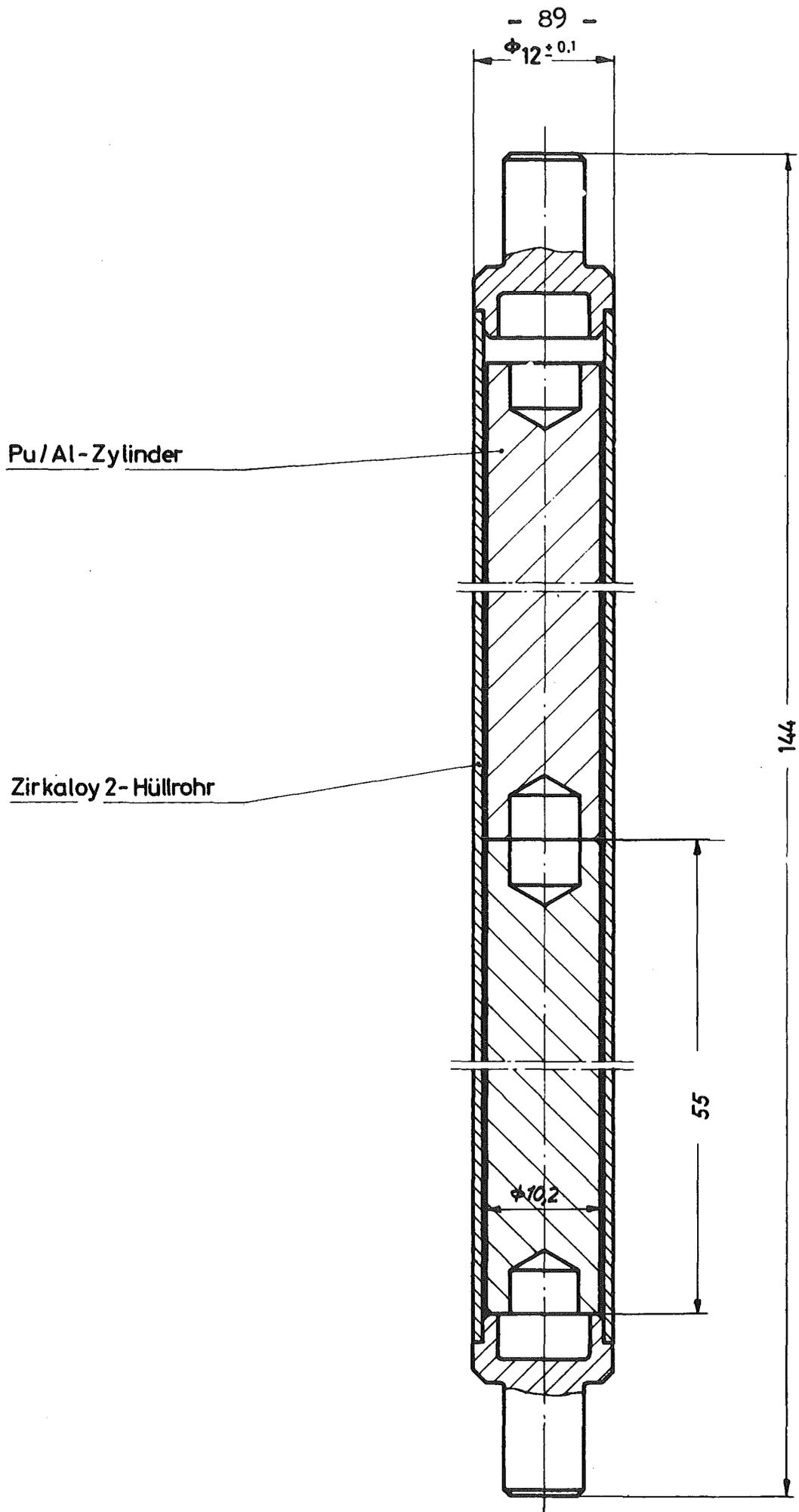
### Literatur:

[1\_7] PACT, 1. Halbjahresbericht 1971, KFK 1456

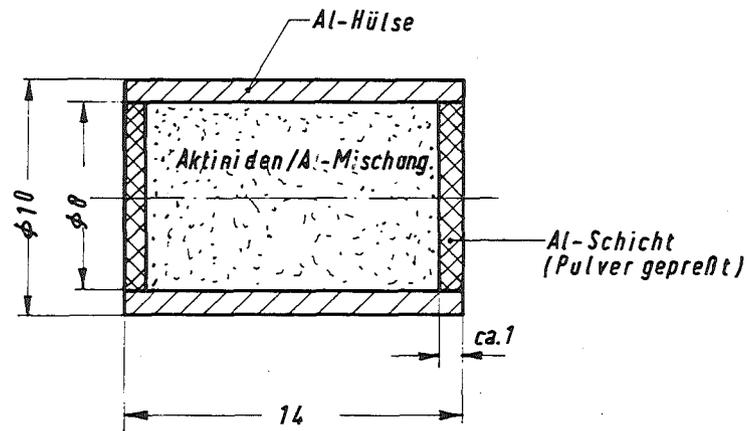
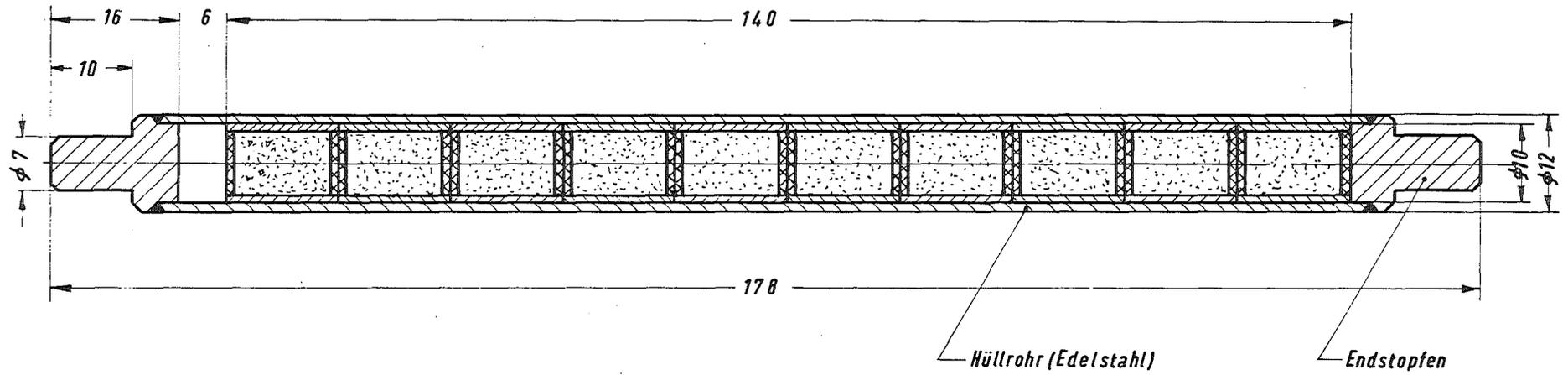
[2\_7] PACT, 2. Halbjahresbericht 1972, KFK 1799

[3\_7] PACT, 2. Halbjahresbericht 1971, KFK 1544

[4\_7] PACT, 1. Halbjahresbericht 1972, KFK 1656.



**Abb. 1 :** BR2-Bestrahlungsstab für Pu/Al-Legierung



**Brennstoffpellet**  
M.: 5:1

**Abb. 2:** \_\_\_\_\_ Brutstab auf Cermet-  
basis zum Einsatz im BR2

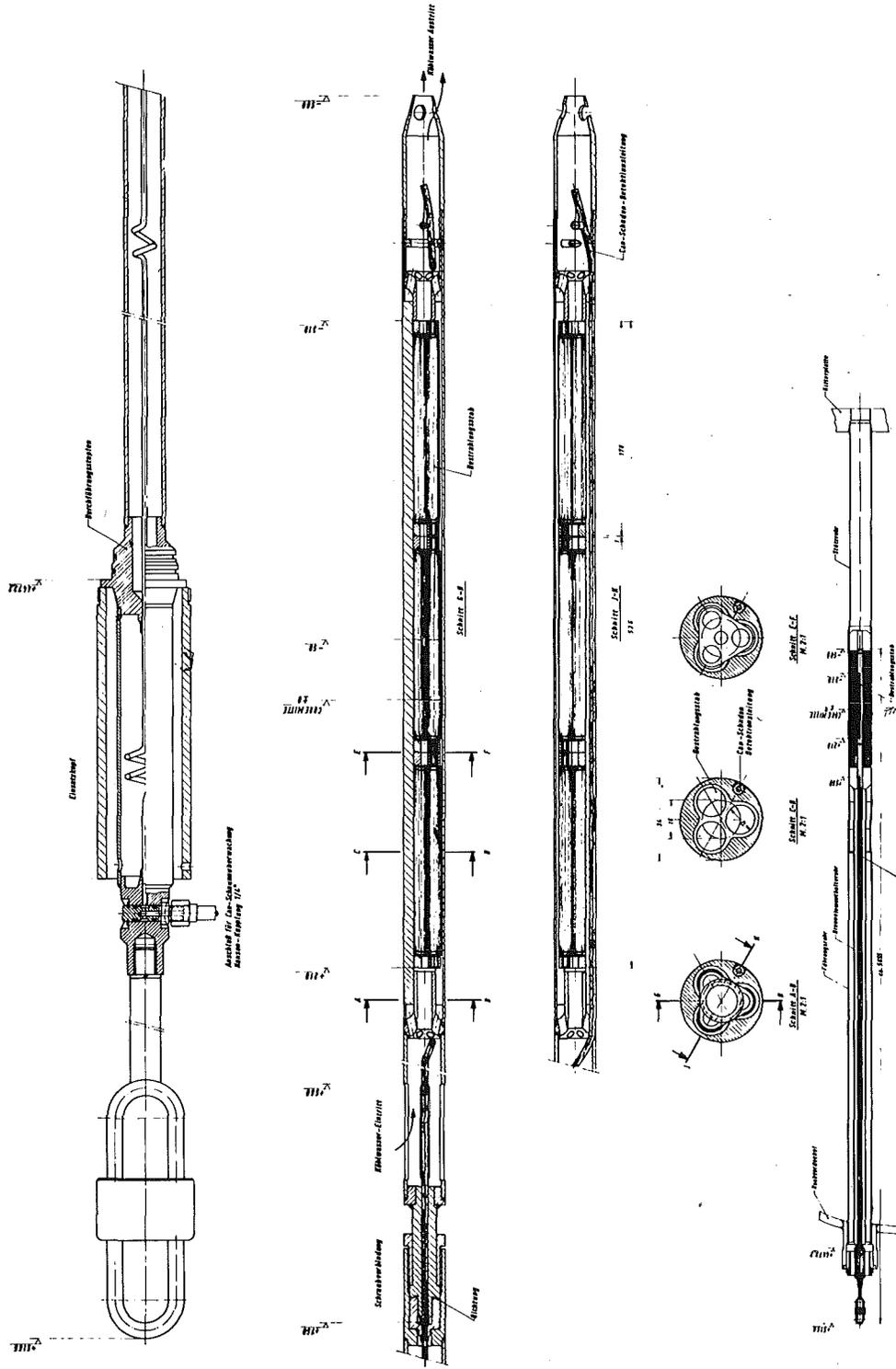


Abb.3: Bestrahlungseinsatz Mol14

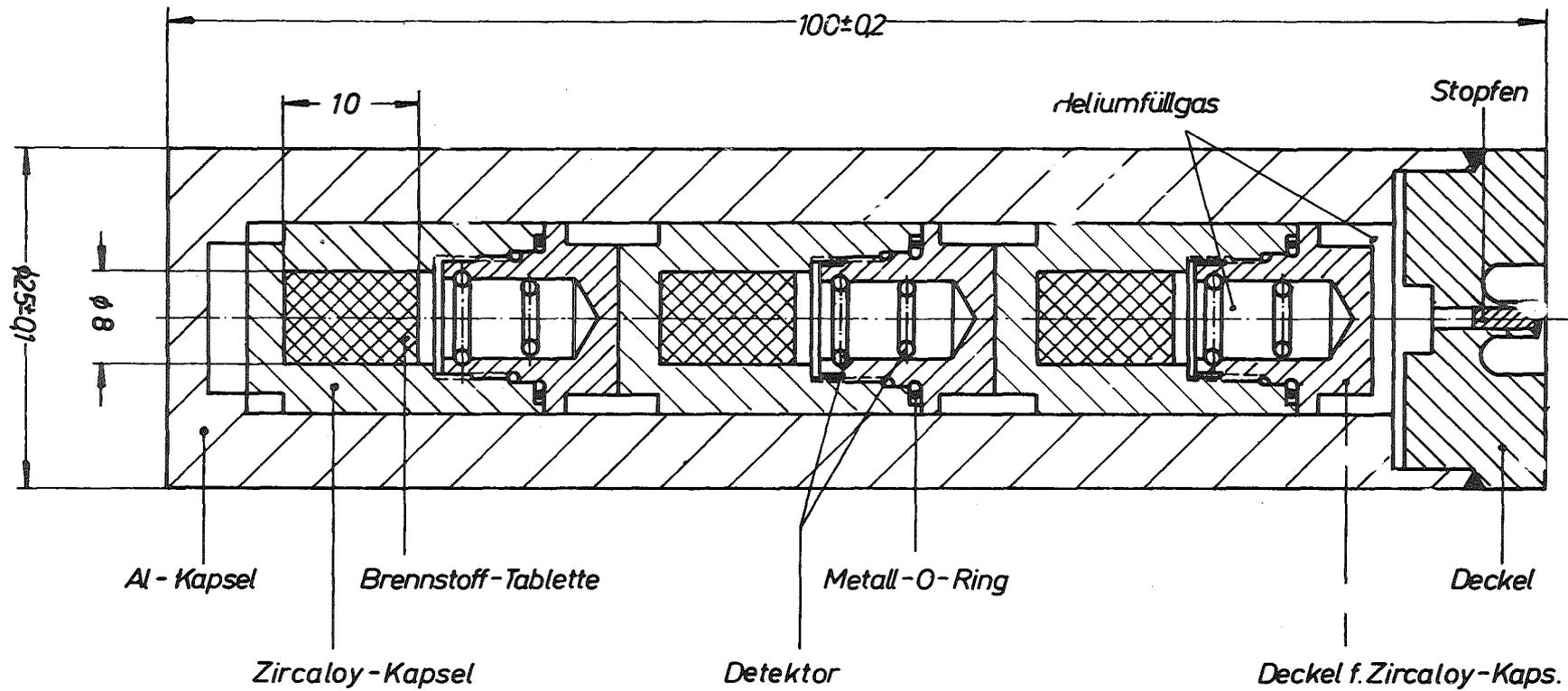


Abb. 4:

Kleinprobenbestrahlungskapsel zum Einsatz im BR2

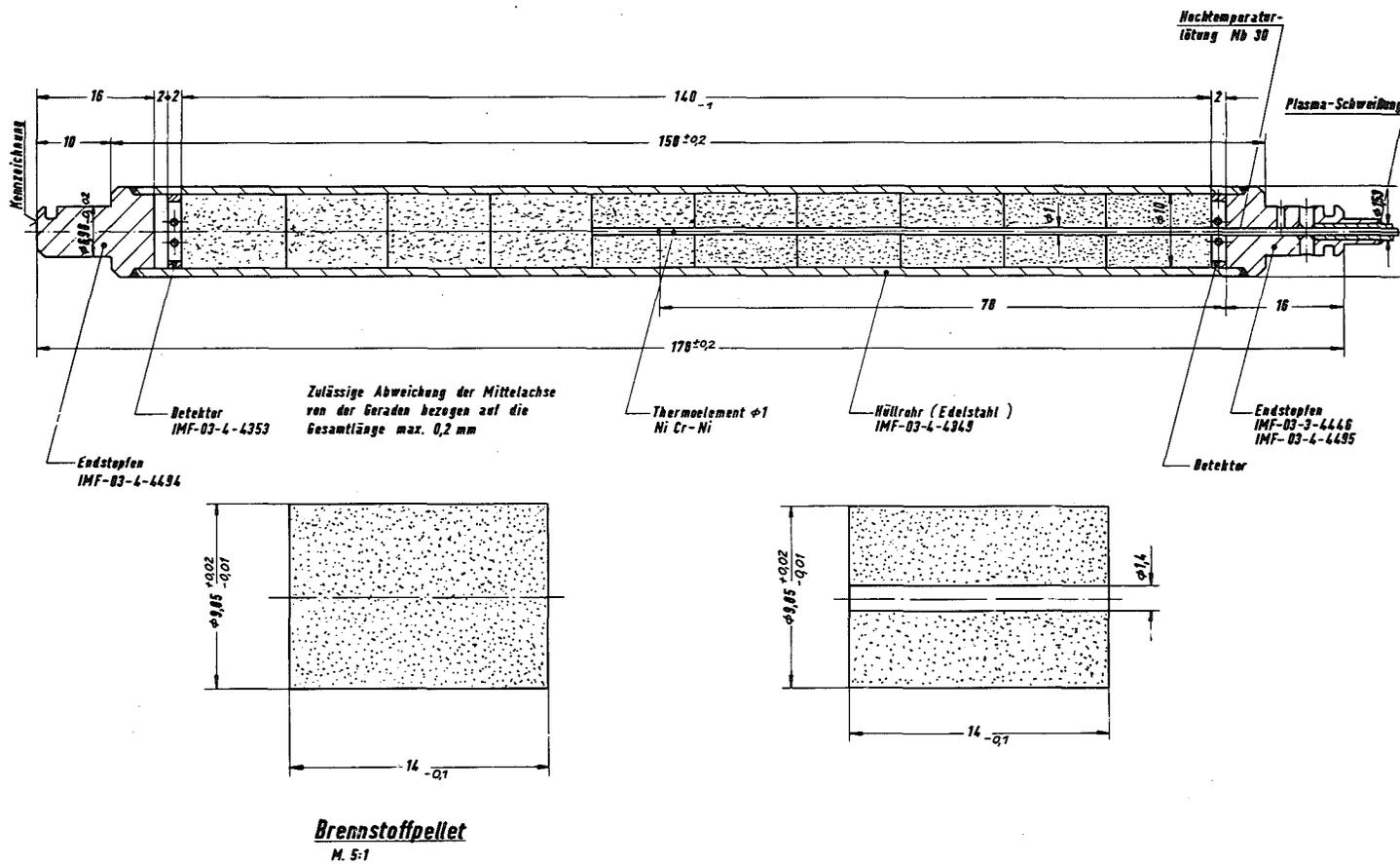


Abb.5: Bestrahlungsstab mit Zentraltemperaturmeßstelle für HFR



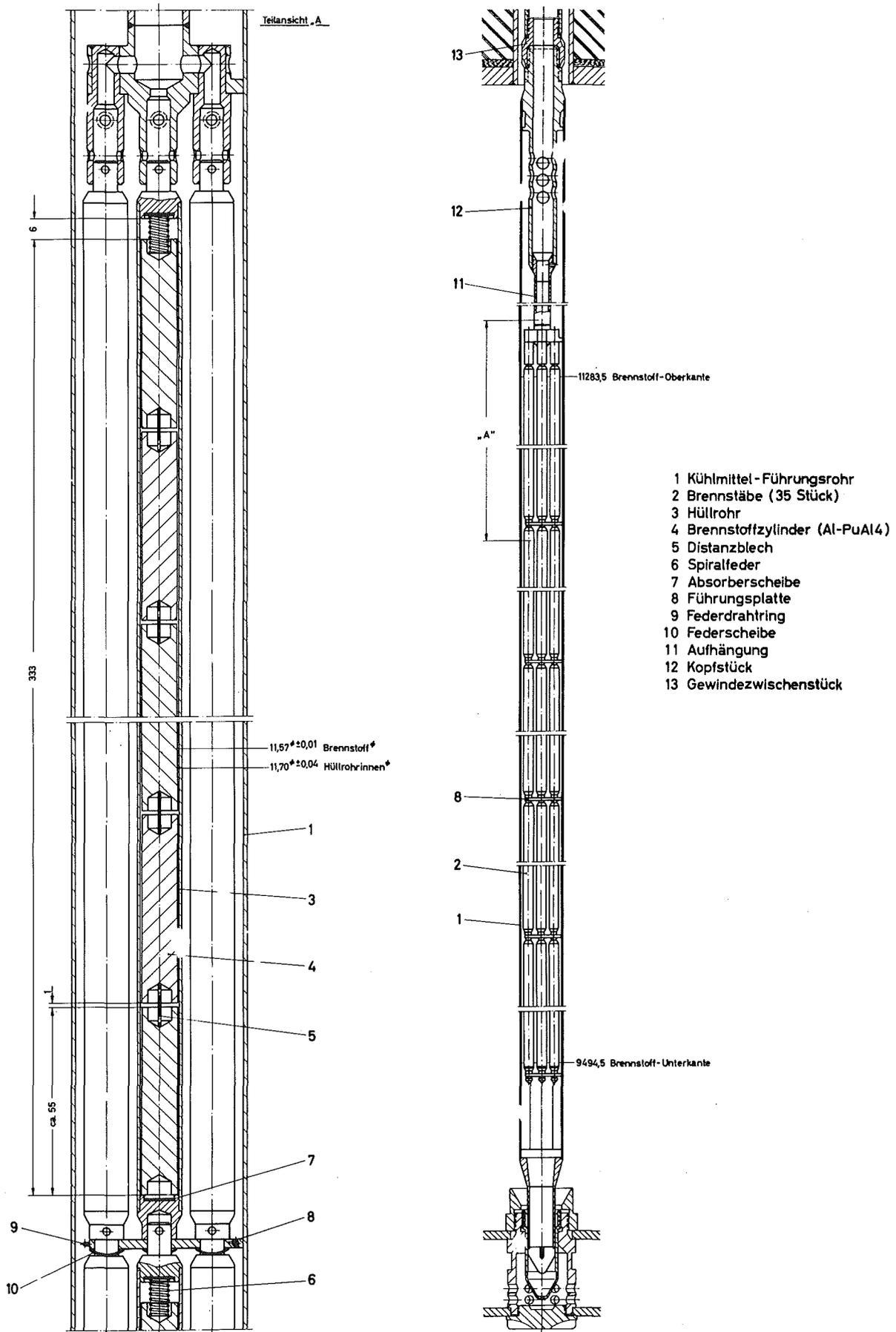


Abb. 7: FR2-Bestrahlungseinsatz für Pu/Al-Legierung

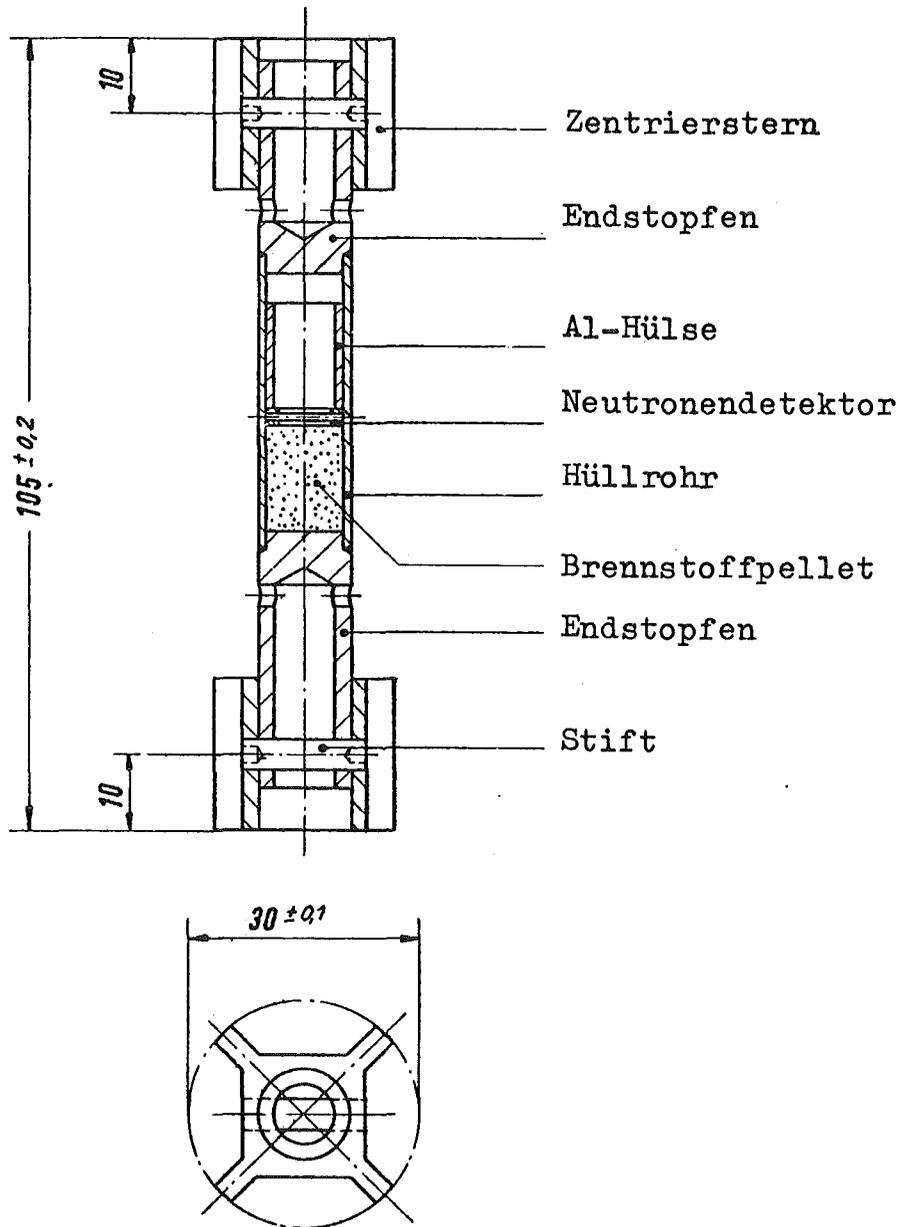


Abb.8: FR2-Bestrahlungskapsel zur Erprobung von Actiniden-Targets

3. BRENNSTOFF-BESTRAHLUNGEN IN LOOPS



### 3.1 Helium-Testloop im FR2

H.Reiser

Der Helium-Testloop im FR2 (Abb. 1) ist als feste Grundversorgungseinrichtung für den der jeweiligen Aufgabenstellung angepaßten Bestrahlungseinsatz zu verstehen.

Das Helium-Wärmeabfuhrsystem ist für die Übertragung von 45 kW Wärmeleistung ausgelegt. Das Primär-Kühlmittel Helium steht unter einem Druck von 30 at; es wird im Testeinsatz jeweils von ca. 50°C auf max. 200°C aufgeheizt. Bei den üblichen Brüterbrennstaboberflächentemperaturen von 500 bis 700°C kann eine Wärmestromdichte an der Brennstaboberfläche bis zu ca. 350 W/cm<sup>2</sup> beherrscht werden. Eine automatische Regelung des Heliumdurchsatzes ermöglicht es, die Brennstabtemperatur in einem weiten Leistungsbereich konstant zu halten. Zum Umwälzen des Kühlgases sind 2 gasgelagerte Verdichter in Reihe angeordnet. Bei einem Ansaugedruck von 30 ata beträgt ihre Förderhöhe jeweils 1,5 at und ihre Fördermenge 100 m<sup>3</sup>/h Helium. Die Verdichter arbeiteten trotz vieler Abschalt- und Anfahrvorgänge über annähernd 45000 Betriebsstunden wartungs- und störungsfrei.

Der Helium-Testloop ist für die Bestrahlung von Brennstäben mit geschlossener, dichter Hülle ausgelegt. Ein Sicherheitssystem soll bei Kühlungsstörungen eine Überhitzung des Brennstabes und damit eine Beschädigung oder gar Zerstörung der Hülle verhindern. Trotzdem wurde eine Reinigungsanlage vorgesehen, die sogar im Falle eines Abschmelzens des Brennstabes alle freiwerdenden flüchtigen Spaltprodukte und Pu-Stäube so schnell und sicher aufnimmt, daß keine unzulässige Gefährdung für die Umgebung auftritt.

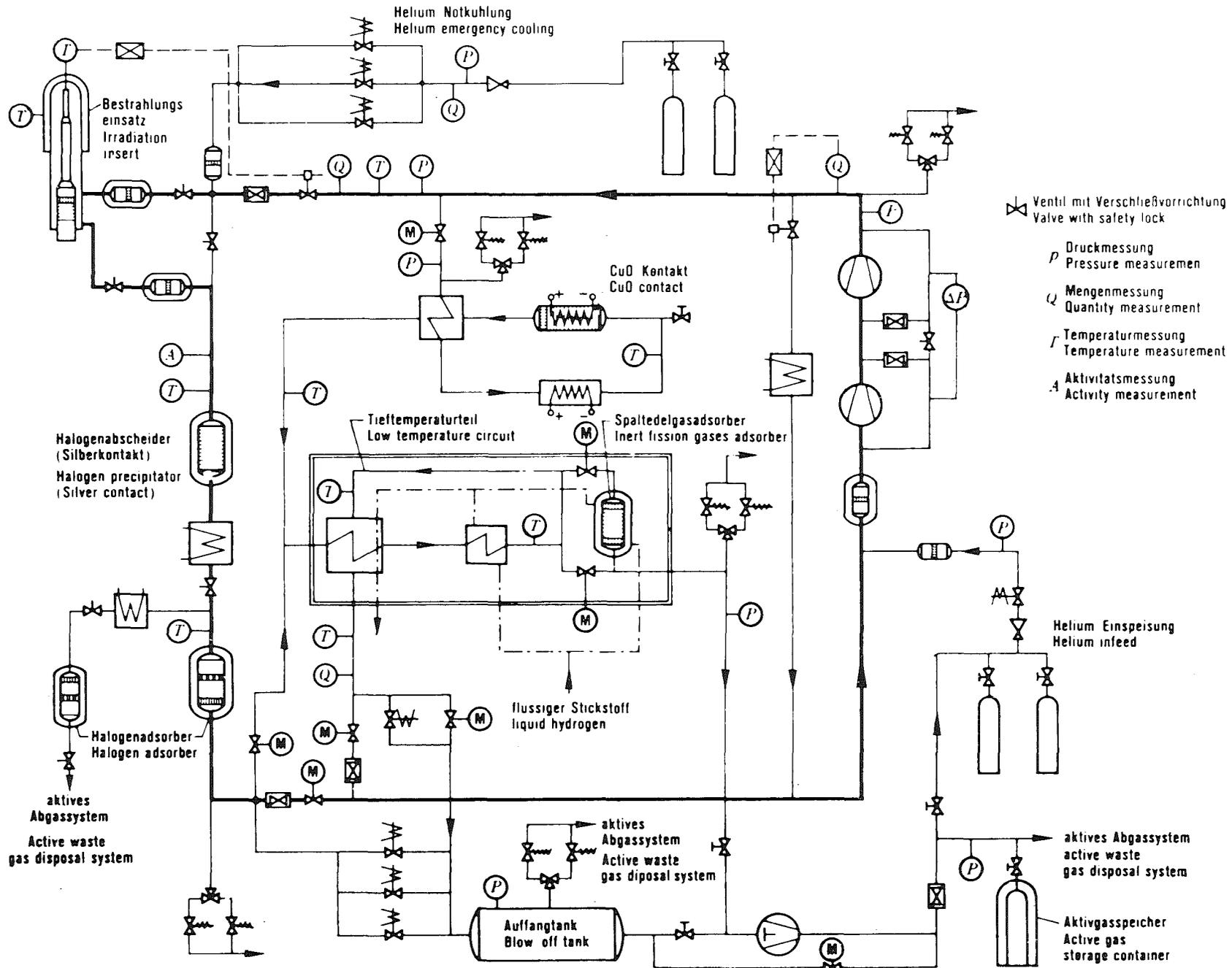
Die Reinigungsanlage besteht aus folgenden Teilen:

Unmittelbar hinter dem Bestrahlungseinsatz sind Abscheider für halogenförmige Spaltprodukte (ein Silberkatalysator und zusätzlich ein Aktiv-Kohle-Abscheider) und ein Schwebestoff-Feinstfilter angeordnet.

Im Bypass zur Teststrecke wird Tritium bei 350 °C in einem CuO-Bett oxidiert und anschließend bei N<sub>2</sub>-Temperatur ausgefroren. Nach einem Hüllenschaden wird zusätzlich ein Aktiv-Kohle-Bett zur Absorption edelgasförmiger Spaltprodukte durchfahren.

Literatur:

- E.Bojarsky: Helium-Kreislaufanlage für Bestrahlungsversuche mit Brennstoffstäben im FR2.  
Kerntechnik 10. Jahrgang (1968) Nr. 6
- H.Reiser : Sicherheitsbericht für FR2-Abbrandloop,  
KFK 397.



101

Abb. 1

### 3.2 Versuchseinrichtung für die Kurzzeitbestrahlung von Brennstäben im FR2

H.Deckers, H.Reiser

Die Kurzzeitbestrahlungseinrichtung wird in Verbindung mit dem FR2-Helium-Loop seit Jahren mit Erfolg betrieben.

Die wichtigsten Aufgaben für diese Bestrahlungseinrichtung sind:

- Untersuchung des Verhaltens verschiedenartiger Testbrennstäbe unter genau geregelten Betriebsbedingungen, auch bei zyklischen Lastwechseln, wobei auch insbesondere das Einfahrverhalten des Brennstoffs hinsichtlich Struktur und Wärmekontakt zur Hülle interessieren.
- Experimente zur Erfassung der oberen Leistungsgrenze von Brennstäben bei Variation der Parameter.

Die Einrichtung ist geeignet, Brennstabproben für einige Minuten bis mehrere Wochen auch bei sehr hoher Leistung zu bestrahlen. Der Brennstab kann bei vollem Reaktorbetrieb fernbetätigt in Bestrahlungsposition gebracht, innerhalb des Reaktorkerns - zum Zweck der Leistungsänderung - jederzeit verfahren und nach der Bestrahlung wieder aus dem Reaktor ausgeschleust werden. Während dieser Operation werden die interessierenden Meßwerte angezeigt bzw. registriert.

Das Grundkonzept der Einrichtung ist folgendes:

Der Bestrahlungseinsatz (Abb.1 und 2) ist stationär im Reaktor eingebaut und wird nur in besonderen Fällen mit Hilfe einer großen Transportflasche, die in einer verfahrbaren Wechselmaschine fixiert ist, ausgewechselt. Der Brennstab, der von einem konzentrischen Gasführungsrohr umgeben ist, wird auf eine ca. 3,6 m lange Brennstabhalterung montiert.

Diese wird von dem in der Transportflasche laufenden Hubwerk von unten in den unter Druck stehenden Bestrahlungseinsatz eingeschoben. Der Austritt von Kühlmittel in die Raumluft wird durch eine im Unterteil des Einsatzes eingebaute Kombination von Stopfbuchse und Schleusenkommer verhindert. Das Ein- und Ausschleusen des Brennstabes wird durch ein spezielles Wechselsystem gesteuert (Abb. 3). Dabei wird, um Fehlschaltungen auszuschließen, das Evakuieren der Schleusenkommer, die Versorgung der Stopfbuchse mit Sperrgas und die Sicherheitsabsaugung von einer selbsttätigen Folgeschaltung durchgeführt.

Beim Einschleusen fährt noch vor Erreichen des Corebereiches das Gasführungsrohr des Testbrennstabes in den konischen Einlauf eines Gasführungskolbens. Dieser Kolben läuft frei im inneren Gasführungskanal des Versuchseinsatzes und leitet während der Bestrahlung den gesamten Kühlmittelstrom in den Ringraum zwischen Gasführungsrohr und Brennstab (Abb. 2). Der Kolben folgt unter dem Einfluß des Differenzdruckes über dem Brennstab dem Gasführungsrohr ständig nach.

Nach Beendigung der Bestrahlung wird die Brennstabhalterung zunächst in die Transportflasche der Wechsellmaschine abgesenkt. Der Brennstab kann danach in kürzester Zeit in einen kleinen Spezialtransportbehälter übernommen und zur Heißen Zelle gebracht werden.

Die Abb. 4 und 5 zeigen u.a. die Funktion der Wechsellmaschine beim Auswechseln einer Brennstabhalterung im Reaktorgebäude bzw. in der Heißen Zelle. In Abb. 6 ist der Aufbau des speziellen Transportbehälters für die bestrahlten Brennstäbe dargestellt.

An der Bestrahlungsprobe können bis zu 10 Temperaturwerte - darunter auch die Zentraltemperatur - und der Innendruck gemessen werden. Die Meßleitungen verlaufen über Steckverbindungen zum Hubwerk der Wechsellmaschine und von dort zu den Meßschranken. Eine Kontrolle der Meßwerte ist also bis zum Einziehen des bestrahlten Brennstabes in den Transportbehälter möglich.

Die Bestimmung der Brennstableistung unter Bestrahlung ist so schnell, daß die Bestrahlungsprobe ohne Verzögerung direkt in die der gewünschten Leistung entsprechende Position des Reaktorkerns gefahren werden kann. Dazu wird in einem Rechengerät die Leistung aus dem bezüglich Gasdruck und Gas-temperatur korrigierten Durchflußmeßwert und der Kühlmittel-aufheizspanne berechnet und direkt geschrieben. Der Meßfehler bei der Leistungsbestimmung beträgt weniger als 5% des Meßwertes.

Bisher wurden mit der Kurzzeitbestrahlungseinrichtung über 120 Testbrennstäbe mit Oxid- und Karbidbrennstoff unter den verschiedensten Bedingungen bestrahlt. Nennenswerte Störungen sind weder während der Bestrahlung noch beim Brennstabwechsel aufgetreten.

Literatur:

H. Deckers: Sicherheitsbericht für Versuchseinrichtung für Kurzzeitbestrahlungen zum FR2-Abbrandloop. (1966)  
( unveröffentlicht)

H. Deckers, Versuchseinrichtung für die Kurzzeitbestrahlung von  
H. Reiser : Brutreaktor-Brennstäben im Reaktor FR2  
Kerntechnik 11. Jahrgang (1969) Nr. 7.

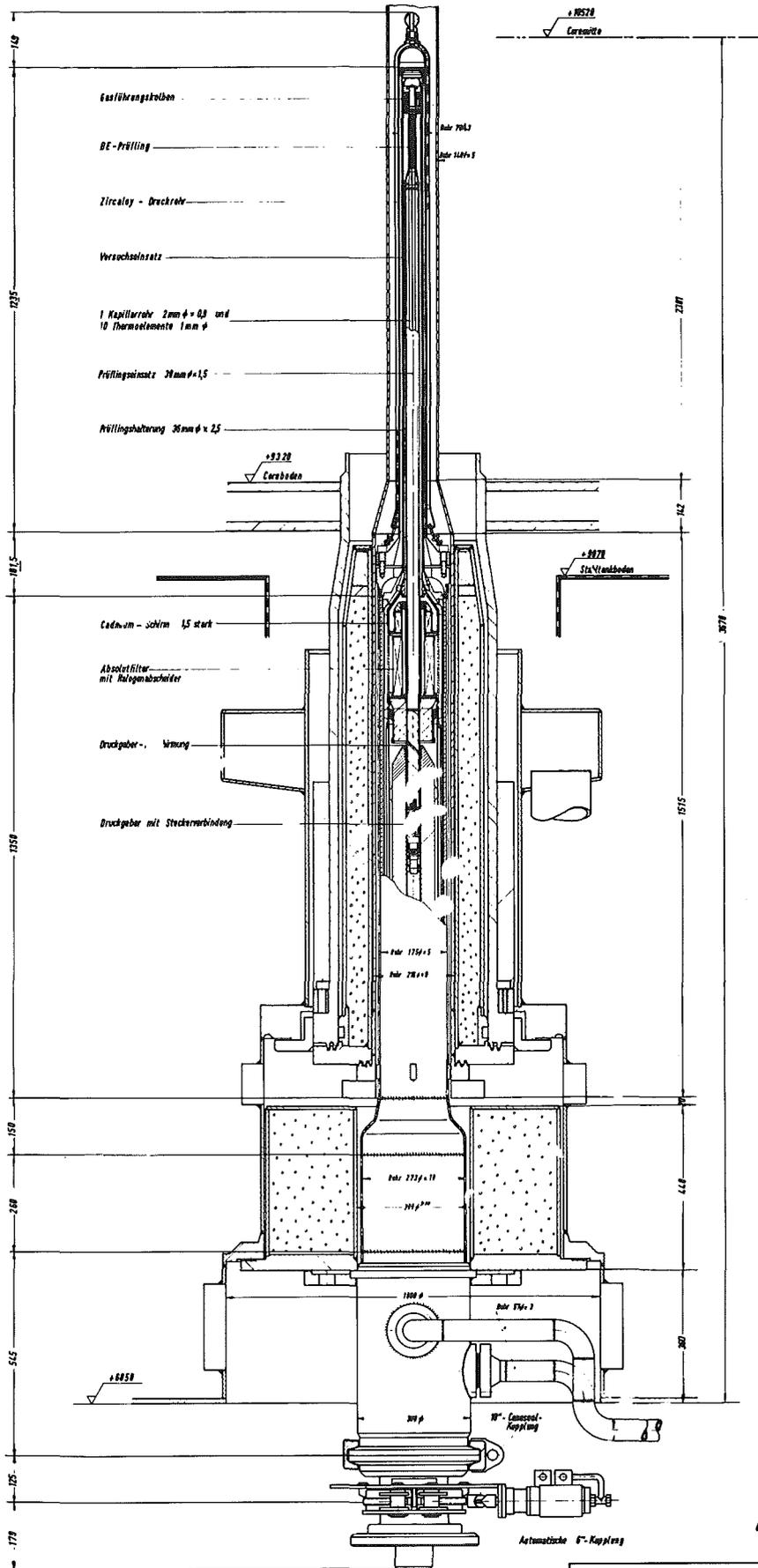


Abb. 1

Spezial - Verpackungsstanz i. FRZ - Zentral - Kanal  
 1A2-PSB-4402-1-414

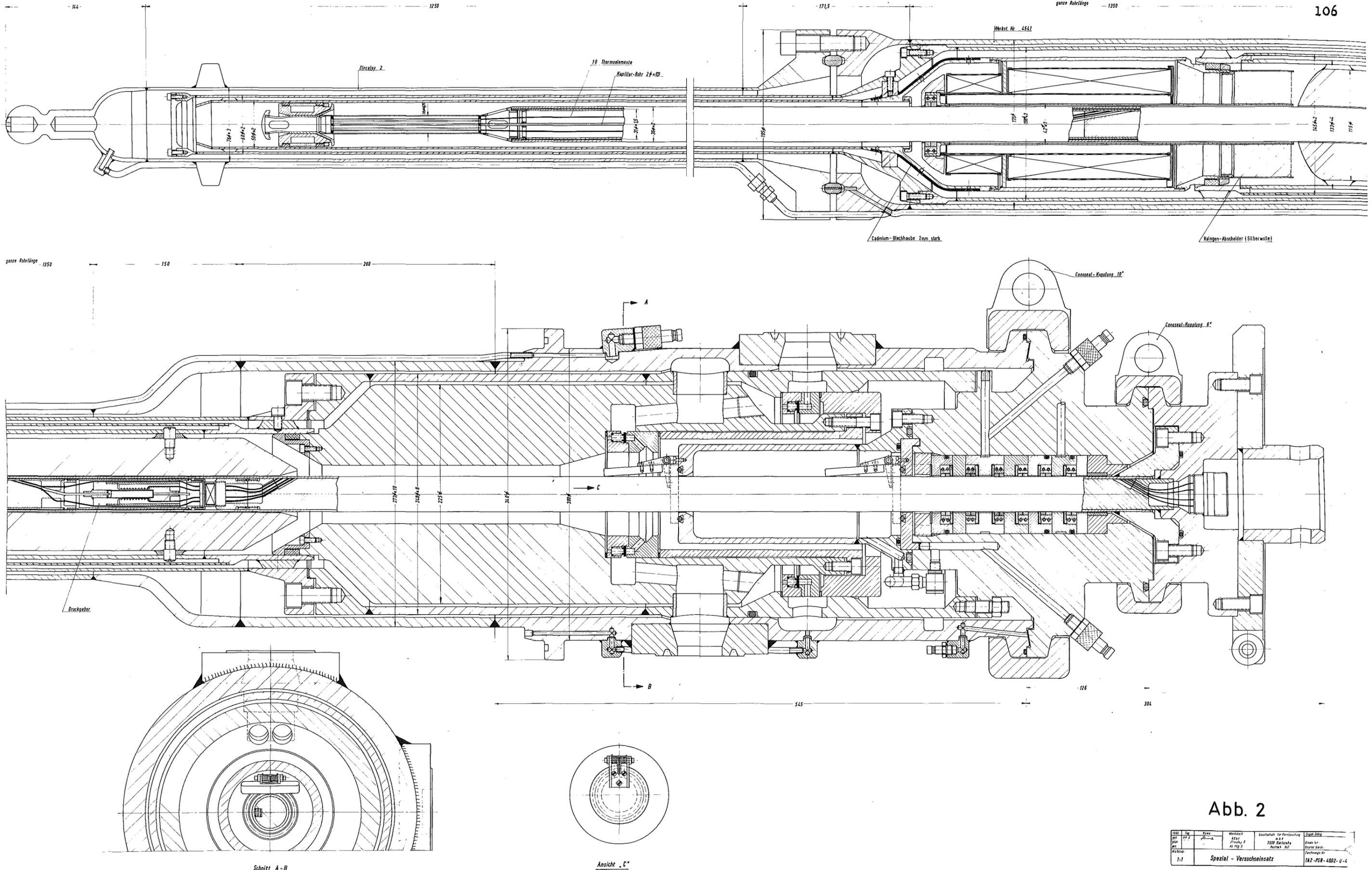
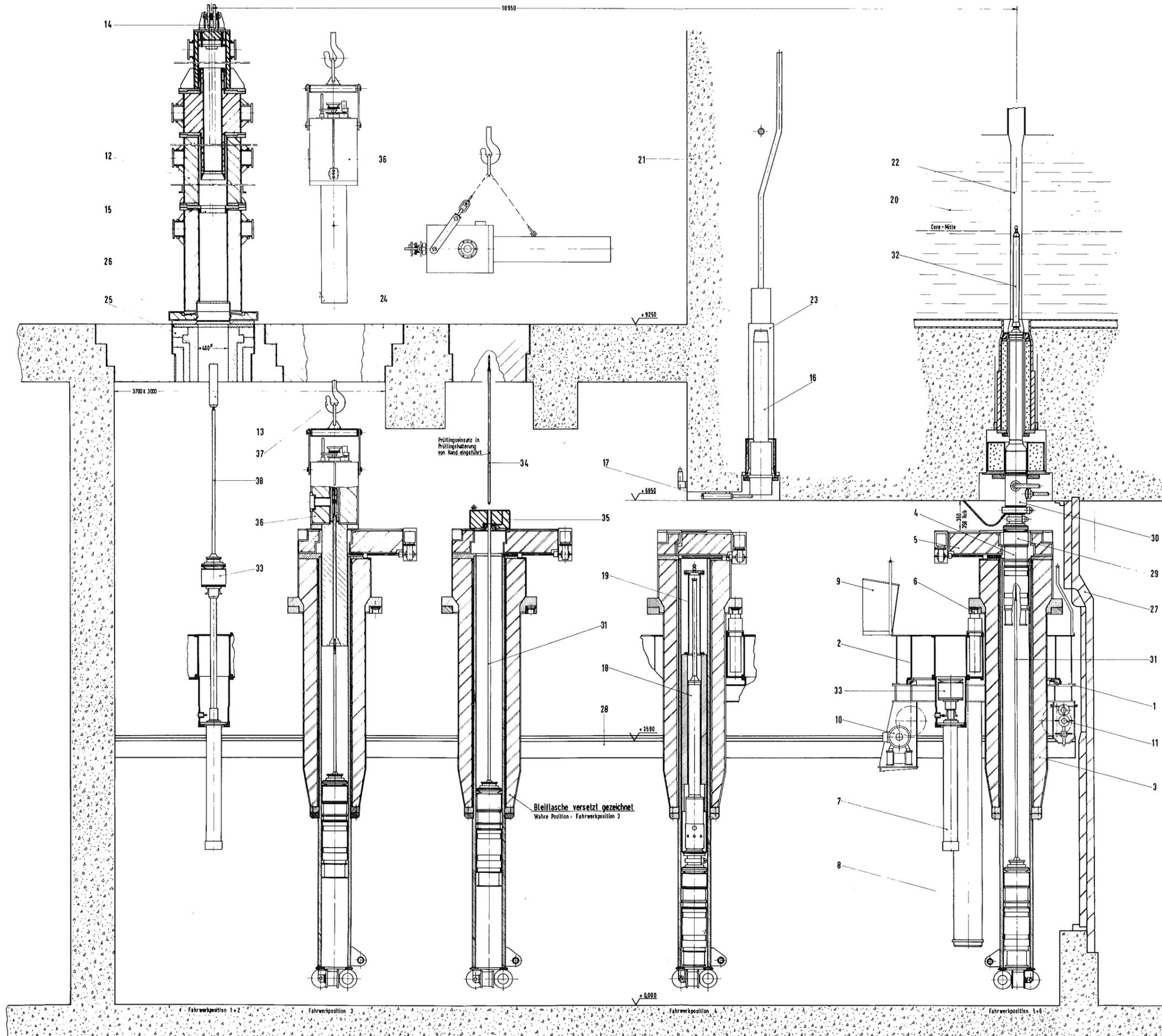


Abb. 2

Titel	Spez.	Werkz.	Werkstoff	Bestandteile zur Fertigung	Zeichn. Nr.
106	106-2	106-2	Al Mg 3	1100 Aluminium Nietmetall 102	106-2
Maßstab	1:1			Spezial - Versuchseinheit	FAZ-PSB-4002-U-6







- 1 Fahrwerk
- 2 Drehwerk (Drehplattform)
- 3 Bleiflasche
- 4 Hubgetriebe (Hubwerk III)
- 5 Bleischieber
- 6 Gleichlaufing mit Hubzylinder (Hubwerk II)
- 7 Gleichlaufzylinder (Hubwerk I)
- 8 Lagerposition für Schutzhemd
- 9 Steuerpult
- 10 Pumpenmotor
- 11 Fahrwerkgetriebe
- 12 Looprohrabschirmbehälter
- 13 Elektrom. Greifer
- 14 Greiferantrieb
- 15 Endabschalter
- 16 Looprohrstopfen
- 17 Pneumat. - Riegel
- 18 Versuchseinsatz
- 19 Schutzhemd (verkürzte Ausführung)
- 20 Reaktor - Core
- 21 Biolog. Schirm
- 22 Zentralloop
- 23 Stopfenlager
- 24 Lukendeckel
- 25 Runde Lucke
- 26 Stützring für Looprohrabschirmbehälter
- 27 Bleiabschirmwand
- 28 Fahrbahnschiene
- 29 Greiferzange (Hubwerk III)
- 30 Loopeinsatz für Kurzzeitbestrahlung (Druckrohr mit Versuchseinsatz)
- 31 Prüflingshalterung 36 \* x 2,5 x 3525
- 32 Wassergekühltes Druckrohr - Oberteil
- 33 Greiferzange (Hubwerk I)
- 34 Prüflingsersatz 30 \* x 1,5 x 2000
- 35 Vorrichtung zum Prüflingseinbau
- 36 Transportbehälter mit  $\gamma$  - Scanning
- 37 5 t Kran
- 38 Abschirmstange

Abb. 4

Blatt	Nr.	Titel	Verfasser	Gezeichnet	Geprüft
1-15		Auswechsellmaschine Aufbau III Versuchseinrichtung f. Kurzzeitbestrahlungen			







### 3.3 Einrichtung zur Vermessung von Brennstabproben zwischen Bestrahlungszyklen (FR2-Versuchsgruppe 5)

H. Deckers

In der Kurzzeitbestrahlungseinrichtung des FR2-Helium-Loops werden Experimente zur Ermittlung der mechanischen Wechselwirkung zwischen Brennstoff/Hülle durchgeführt. Voraussetzung für dieses Versuchsvorhaben ist, daß die Veränderungen des Brennstabdurchmessers, die während der einzelnen Leistungszyklen auftreten, gemessen werden. Die Vermessung eines Brennstabes innerhalb des Kurzzeit-Bestrahlungseinsatzes ist ohne weiteres nicht möglich. Auch die Möglichkeit, den Prüfling in der Heißen Zelle auszumessen und danach wieder zur weiteren Bestrahlung in den Reaktor einzusetzen, scheidet aus, da ein bestrahlter, instrumentierter Prüflingeinsatz nicht mehr mit der Prüflingshalterung verbunden werden kann. Aus diesen Gründen wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt, mit deren Hilfe der Brennstabdurchmesser zwischen den einzelnen Bestrahlungszyklen innerhalb der abgeschirmten Wechselmaschine direkt im Subpile-Raum des FR2 ausgemessen werden kann.

Zur Durchführung der Messung muß zunächst der Brennstab, der von seinem Gasführungsrohr umgeben ist (Abb. 1), aus dem Reaktor in die Wechselmaschine abgesenkt werden.

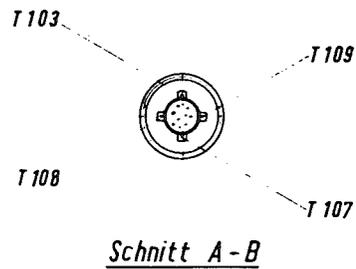
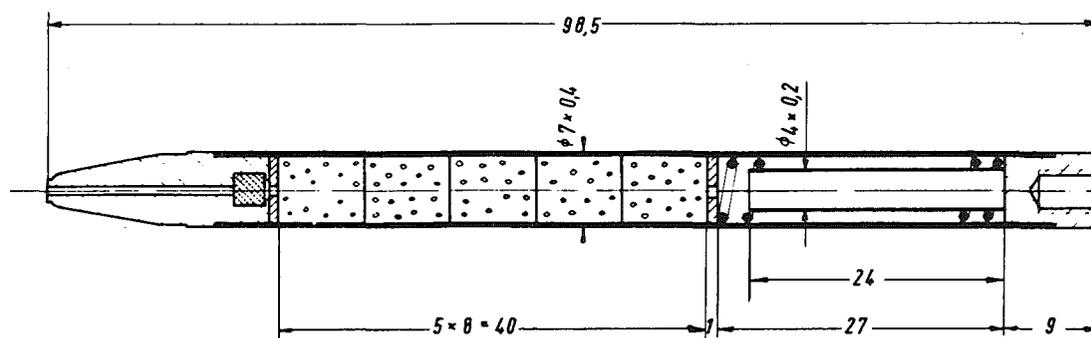
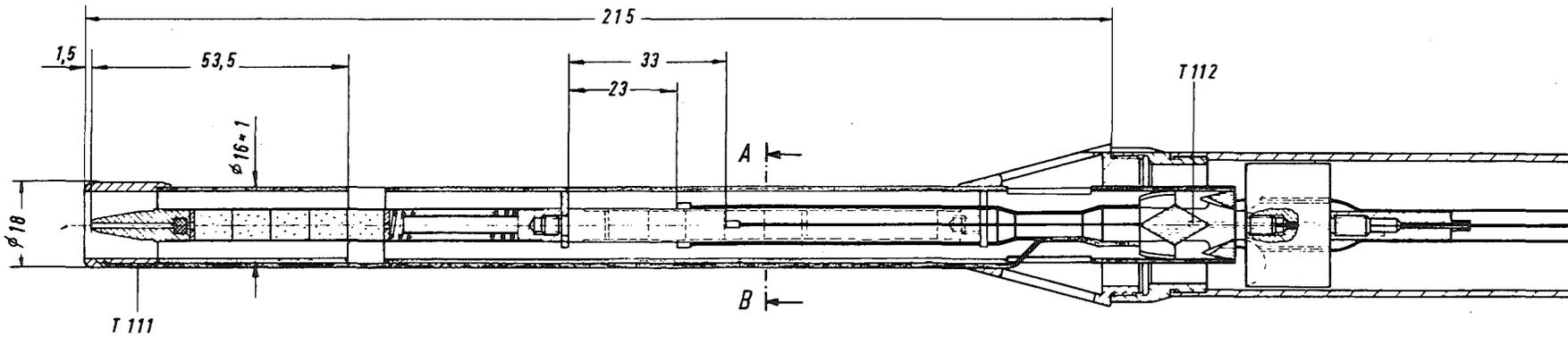
Die Meßvorrichtung (Abb. 2) wird auf die Maschine aufgesetzt und das Gasführungsrohr des Prüflings nach Öffnen des Schiebers in eine Zentrierung an der Meßvorrichtung eingefahren, und zwar so weit, bis beim Anheben der Zentrierung durch Endschalter das Hubwerk der Wechselmaschine abgeschaltet wird. Von Hand wird nun ein zentraler Zentrierstift abgesenkt, der den oberen Brennstab relativ zum eigentlichen Meßkopf genau fixiert. Der Zentrierstift ist während des Meßvorganges gegen Abheben gesichert. Die Messung erfolgt mit Hilfe von zwei Winkeltastern, von denen jeweils ein Schenkel den Brennstab (im Spalt zwischen Hüllrohr und Gasführungsrohr) abtastet; der andere Schenkel betätigt jeweils einen induktiven Weggeber. Winkeltaster und Weggeber sind auf einer zentralen Spindel gelagert.

Die Taster können von Hand sowohl vertikal entlang des Prüflings als auch um den Umfang des Hüllrohres geführt werden, wodurch auch Hüllrohr-Einbeulungen vermessen werden können. Der Hub reicht aus, um den oberen Brennstoffbereich abzutasten. Zur Vereinfachung des Meßvorganges wird in diesem Bereich auf Zentrierrippen und auf Instrumentierung verzichtet.

Der Meßvorgang kann, falls erforderlich, mittels eines Endoskopes, das durch die Abschirmung der Meßvorrichtung geführt ist, direkt beobachtet werden.

Die Meßanordnung wird jeweils vor Beginn der eigentlichen Messung geeicht, indem der Taster zunächst über 2 Eichflächen mit verschiedenen, genau bekannten Durchmessern am Kopf des Biennstabes entlanggleitet. Die Genauigkeit der Meßanordnung wird dann nur vom Spiel der Spindel- und Tasterlagerung bestimmt.

Bei der Erprobung der Einrichtung wurde eine Meßgenauigkeit von  $\pm 3\mu\text{m}$  festgestellt. Die Meßeinrichtung ist seit längerer Zeit mit Erfolg im FR2 in Betrieb.



**Abb. 1**

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung	
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freiabtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhiefe max. in μ		1000	40	10	4	1,5		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1972	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zugeh. Zchnng.					
gez.	24.7.	<i>Fester</i>				7500 Karlsruhe Postfach 3640		Ersatz für					
gepr.								Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs Nr.		IMF-02-3-4403			
Maßstab	Benennung												
1:1	<b>Brennstabeinsatz der Loop-Versuchsgruppe 5</b>												
2:1	<b>(FR 2 Proj. 26)</b>												



### 3.4 Hochdruckbestrahlungseinrichtung

H. Deckers, H. Reiser

Eine zweite Zusatzeinrichtung zum FR2-Helium-Loop ist die Hochdruckbestrahlungseinrichtung. Sie ermöglicht es, Brennstäbe unter einem Kühlmitteldruck im Bereich von 75 at bis 150 at zu betreiben, wobei mit ca.  $450 \text{ W/cm}^2$  max. erreichbarer Wärmestromdichte auch sehr gute Wärmeübergangsverhältnisse zwischen Brennstab und Kühlmittel erzielt werden können.

Die Hochdruckbestrahlungseinrichtung besteht im wesentlichen aus einem speziellen Bestrahlungseinsatz, der einen kompakten Helium-Hochdruckkühlkreislauf mit Filter, Wärmetauscher und Umwälzverdichter enthält (Abb. 1 und 2). Die maximale Länge des Testbrennstabes oder kleinerer Bündel beträgt ca. 70 cm, die max. Wärmeleistung ca. 40 kW. In der Teststrecke gemessen werden insbesondere die Brennstaboberflächentemperatur, die Kühlmittelaufheizspanne, die Kühlmitteldurchflußmenge und die Brennstableistung. Automatisch geregelt werden die Brennstabtemperatur und der Kühlmitteldruck.

Das vorhandene Helium-Kühlsystem dient als Sekundärkreislauf (Abb. 3). Alle vorhandenen Einrichtungen des Sicherheitssystems, wie Reinigungsanlage, Notkühlsystem usw. bleiben in ihrer Funktion erhalten. Das Hochdrucksystem ist im in pile-Bereich des Reaktors insgesamt vom Gas des Sekundärkreislaufes umgeben. Bei Störungen in der Wärmeabfuhr oder bei einem Brennstab-Hüllenschaden wird der Hochdruckteil automatisch in das vergleichsweise große 30 at-System entspannt und gleichzeitig das Notkühl- bzw. Reinigungsprogramm eingeleitet.

#### Literatur:

H. Deckers, H. Lehning, H. Reiser:

Helium High Pressure Irradiation Facility ;  
Nucl. Eng. and Design 14 (1970)

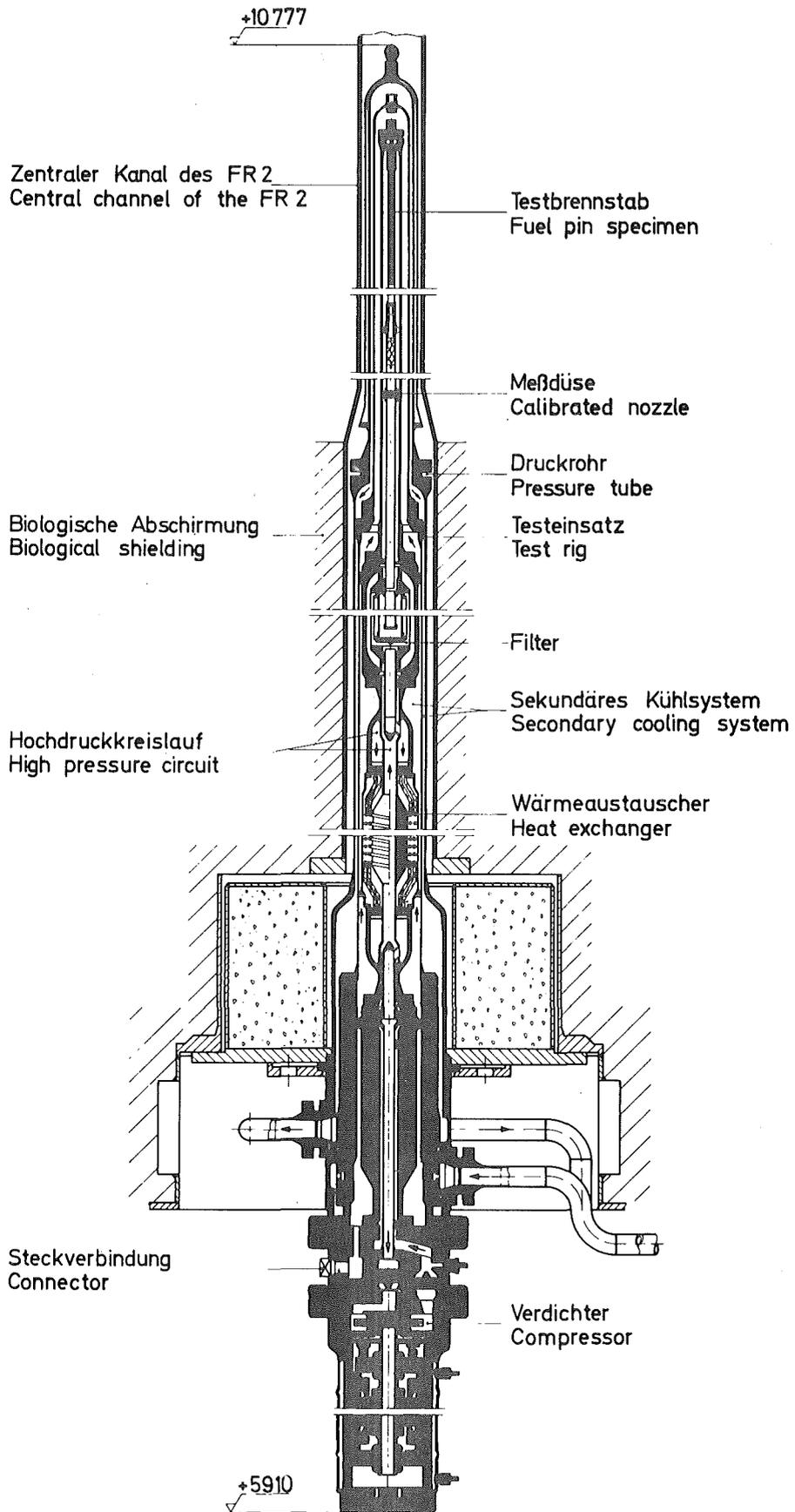
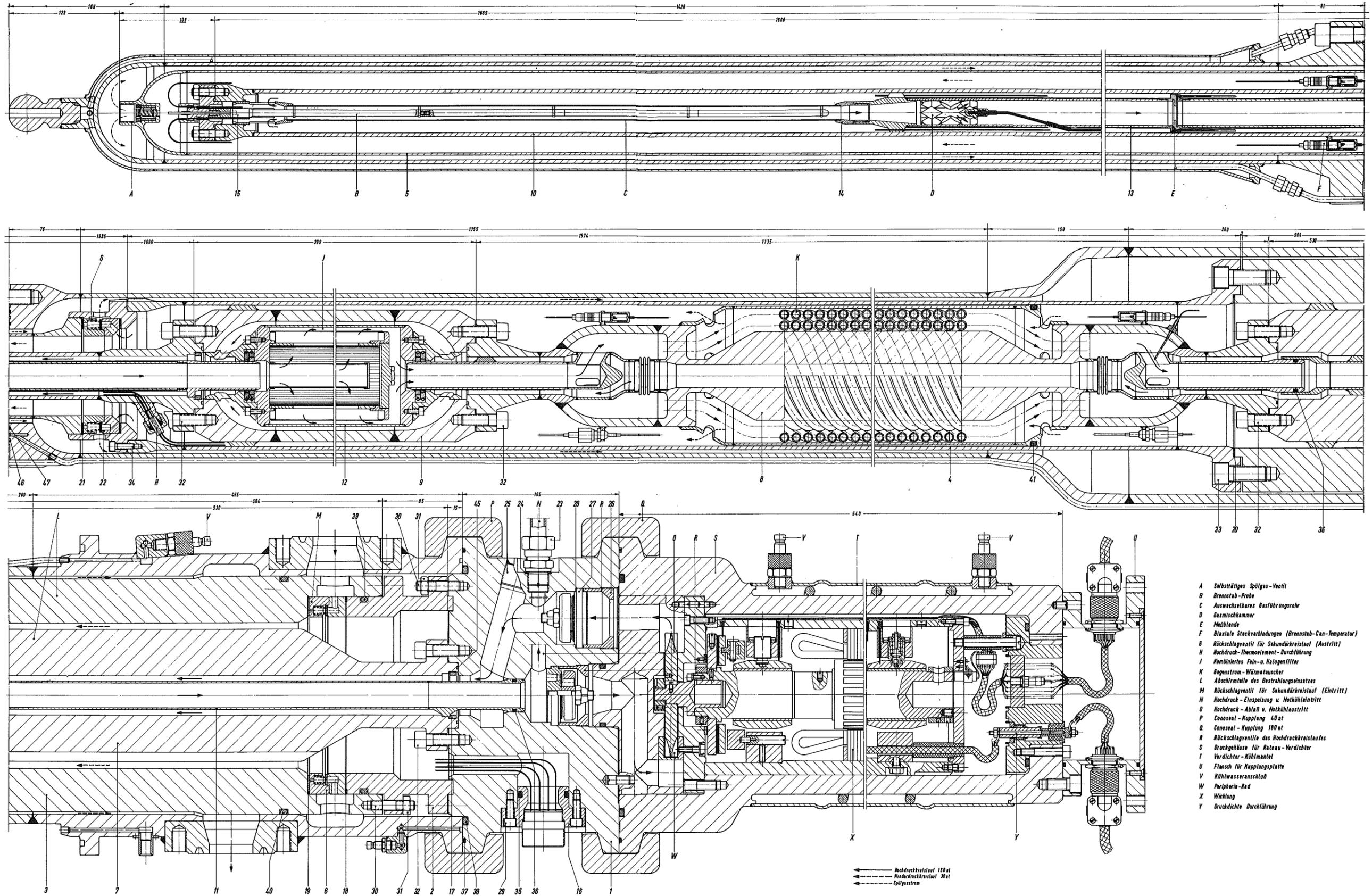


Abb. 1



- A Selbsttätiges Spülgas-Ventil
- B Brennstab - Probe
- C Auswechselbares Gasführungsrohr
- D Gasmischkammer
- E Halbleitende
- F Biaziale Steckverbindungen (Brennstab - Can - Temperatur)
- G Rückschlagventil für Sekundärkreislauf (Austritt)
- H Hochdruck - Thermoelement - Durchführung
- J Kombiniertes Fein- u. Halogenfilter
- K Gegenstrom - Wärmtauscher
- L Abschirmteile des Bestrahlungssatzes
- M Rückschlagventil für Sekundärkreislauf (Eintritt)
- N Hochdruck - Einspeisung u. Notkühlaustritt
- O Hochdruck - Abfluß u. Notkühlaustritt
- P Conoseal - Kupplung 40 at
- Q Conoseal - Kupplung 180 at
- R Rückschlagventile des Hochdruckkreislaufes
- S Druckgehäuse für Ratau - Verdichter
- T Verdichter - Kühlmantel
- U Flansch für Kupplungsplatte
- V Kühlwasseranschluß
- W Peripherie - Bad
- X Wicklung
- Y Druckdichte Durchführung

Abb. 2



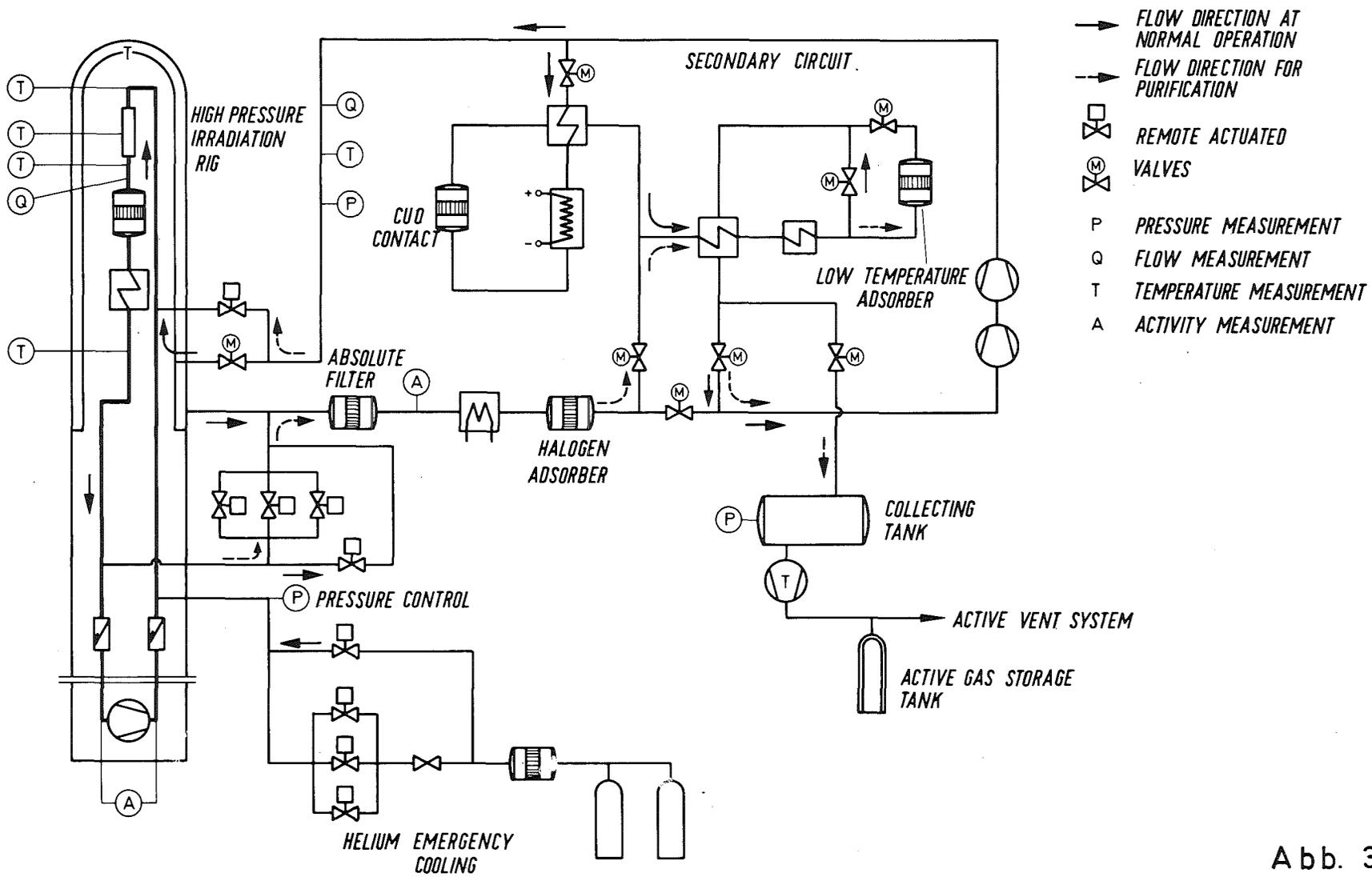


Abb. 3

### 3.5 MZFR-Druckwasser-Loop für Kapselbestrahlungen

#### D. Piel

Ursprünglich war auch eine Bestrahlung von gekapselten Brütterbrennstäben im Karlsruher Mehrzweckforschungsreaktor MZFR vorgesehen. Dazu wurde ein Druckwasserloop errichtet.

Folgende Daten wurden der Auslegung zugrunde gelegt:

Betriebsdruck	90 at
Zahl der Bestrahlungskapseln pro Einsatz	30
max. Wärmeleistung im Einsatz	2 MW
max. nom. Stableistung	1300 W/cm
Kühlmitteldurchsatzmenge im Einsatz	ca. 30 t/h
Kühlmitteltemperatur, Eintritt	min. 110 °C
Kühlmitteltemperatur, Austritt	max. 250 °C
Temperatur der Brennstabhülle, innen	650 °C

Die Aktivitäten des IMF beschränkten sich auf die Herstellung des Kapselversuchseinsatzes, die Konzipierung der Auswechsell-einrichtung sowie auf die Durchführung des Genehmigungsver-fahrens für den Kapsel Einsatz.

Der Bestrahlungseinsatz (Abb. 1) wird in ein etwa 6 m langes Druckrohr (Trennrohr) aus Zircaloy 2 eingesetzt und durch einen Hochdruckverschluß druckdicht verriegelt. Die Bestrah-lungskapseln enthalten jeweils einen Brennstab und sind auf einem Teilkreis um das Kapselträgerrohr angeordnet und an ihren Enden mit Abstandshaltern verschraubt. Sie stützen sich über die ganze Länge über Drahtwendel tangential gegeneinander und radial gegen Trennrohr und Trägerrohr ab. Die Zentrierung des kompletten Einsatz-Unterteils im Trennrohr erfolgt also durch die Drahtwendel-Abstandshalterung der Kapseln. Aus diesem Grun-de mußten für die Herstellung des Trennrohres und der Kapsel-bündel hohe Toleranzforderungen gestellt werden. Durch großen fertigungstechnischen Aufwand war es möglich, für den Corebe-reich eine Paßtoleranz von nur 0,2 mm zu erreichen. Das

theoretisch max. Spiel betrug 0,3 mm (heiß). Das Trennrohr wurde aus 3 Schüssen hergestellt und durch Elektronenstrahlschweißung verbunden. Zur Erzielung hoher Maßgenauigkeit, Geradheit und Oberflächengüte wurden zunächst die einzelnen Schüsse und zuletzt das komplette Rohr nach einem speziellen Verfahren gehont. Das Einsatz-Unterteil war bei der großen Länge elastisch genug, die geringe Geradheitsabweichung des Rohres aufzunehmen, so daß insgesamt eine vibrationsfreie Zentrierung erreicht wurde.

Ein weiteres Problem war die Instrumentierung des Teststrecke. Die Durchführung der Thermoelemente aus dem Bestrahlungseinsatz mußte innerhalb des Kühlkanalverschlusses erfolgen. Es war möglich, eine 48-polige temperatur- und strahlenbeständige Spezialsteckverbindung von 25 mm  $\varnothing$  unterzubringen, so daß max. 24 Thermoelemente zur Verfügung standen. Die Druckdurchführung erfolgt durch eine eingeschweißte Platte, mit der 12 4-adrige Thermoelementleitungen zusammen mit dünnwandigen Schutzrohren durch eine Hochtemperaturlötung dicht verbunden sind.

In eine Kapsel können max. 3 Thermoelemente (1 mm  $\varnothing$ ) eingeführt werden, und zwar durch den zentralen oberen Gewindezapfen, mit dem die Thermoelemente wie an der Durchführungsplatte im Kühlkanalverschluß verlötet sind. Die Schutzrohre dienen zur sicheren Verlegung der Thermoelemente im Kühlmittelstrom. Oberhalb des oberen Moderatorhalterbodens sind die Meßleitungen aus Montagegründen durch spezielle Steckverbindungen gekuppelt, die in einer Kammer druckdicht eingebaut sind. Außerdem erfolgt hier der Übergang von 4-adrigen auf 2-adrige Thermoelementleitungen.

Durch die Sicherheitsforderungen, die Kühlung der Kapseln weitgehend redundant auszuführen, ergab sich ein weiteres Problem. Das Kühlmittel wird im Störfall dem Einsatz durch zwei getrennte Leitungen zugeführt, und zwar einmal durch die Hauptleitung (Notkühlung), zum anderen durch eine spezielle Kühlleitung mit kleinerem Querschnitt, die direkt an den Verschlußkopf des Bestrahlungskanals angeschlossen ist (Sicherheitskühlung). Beim Einsetzen der Sicherheitskühlung

(Versagen der normalen Notkühlung) wird die Strömungsrichtung durch ein im oberen Teil des Bestrahlungseinsatzes eingebautes Rückschlagventil (Ringplattenventil) erzwungen. Dieses Ventil mußte in einem Durchmesser von 75 mm untergebracht werden, durfte der normalen Strömung keinen großen Widerstand entgegensetzen und mußte im Bedarfsfalle sicher funktionieren. Um diese Forderung optimal zu erfüllen, wurde ein Plexiglasmodell im Maßstab 1:1 gebaut und in Einzelversuchen erfolgreich getestet.

Durch die Forderung, beim Einsatz von karbidischem Brennstoff hohe Stableistungen zu verwirklichen, kam der Kapselauslegung besondere Bedeutung zu. Die Testbrennstäbe werden in einwandigen Na-Kapseln bestrahlt. Der Durchmesser der Kapseln und die Schichtung innerhalb des Kapselquerschnittes werden weitgehend durch die Thermodynamik bestimmt. Außerdem muß die Beanspruchung der Kapselwand durch thermische Spannungen und durch Innen- bzw. Außendruck in zulässigen Grenzen bleiben. Als Auslegungsgrenze ergab sich eine max. Stableistung von 1650 W/cm. Dieser Wert erlaubt auch unter Berücksichtigung aller Heißkanalfaktoren eine zulässige nominelle Stableistung von 1300 W/cm.

Durch die große Zahl der Parameter, die die Kapselauslegung beeinflussen, läßt sich die Kapselschichtung nur in einem iterativen Rechengang bestimmen. Beispielsweise ist die Stableistung und damit die Kapselschichtung von der Lage der Kapsel im axialen Flußprofil des Reaktors abhängig. Andererseits macht das für die thermische Ausdehnung des Na erforderliche Kapselplenum die Länge der einzelnen Kapseln - d.h. auch ihre axiale Position - von der Na-Füllmenge und damit wiederum von der Kapselschichtung abhängig.

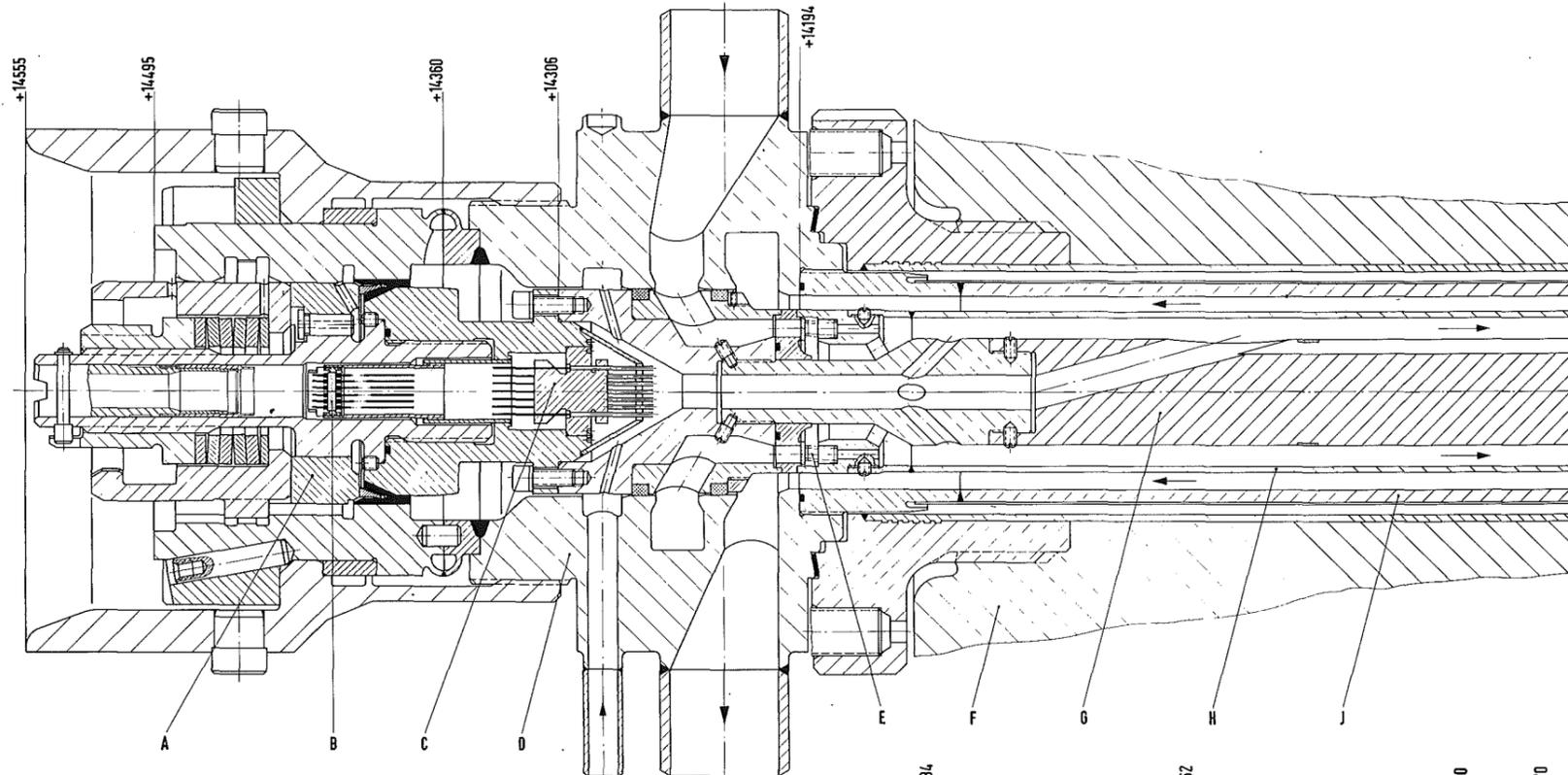
Insgesamt war es möglich, die geforderten Bestrahlungsbedingungen unter Beachtung der genannten Forderungen einzuhalten. Mit einer Standard-Kapsel 22  $\varnothing$  x 1 mm aus Werkstoff 4571 können Stableistungen von 1000 W/cm, 1100 W/cm und 1300 W/cm bei Hüllrohrinnentemperaturen von 650°C und 850°C realisiert werden.

In Abb. 2 ist die axiale Verteilung der Brennstoffzonen sowie der Leistungs- und Temperaturverlauf des Kapsel Einsatzes dargestellt.

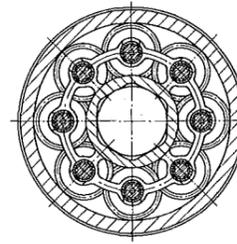
Im Rahmen der Störfallbetrachtungen wurde mit Hilfe eines Analogrechenmodells das dynamische Verhalten eines Bestrahlungseinsatzes mit Karbidbrennstoff-Stäben bei den wichtigsten möglichen Störfällen untersucht. Als Beispiel ist in Abb.3 der Temperaturverlauf in einer Kapsel des mittleren Ringes für einen Bestrahlungseinsatz mit Karbidbrennstäben bei einer Störung des Kühlmitteldurchsatzes durch Ausfall einer Pumpe mit anschließender Notkühlung dargestellt. Die getroffenen Annahmen sollten gegebenenfalls nach den Ergebnissen der out of pile-Versuche korrigiert werden, jedoch hat sich herausgestellt, daß insbesondere der Durchflußverlauf günstiger als angenommen war. Die dargestellten Temperaturverläufe zeigen, daß zwar an der Kapseloberfläche kurzzeitig mit unterkühltem Sieden gerechnet werden muß, die Kühlmittel-Austrittstemperatur aus dem Versuchseinsatz jedoch deutlich unter der Siedetemperatur des  $D_2O$  bleibt.

Literatur:

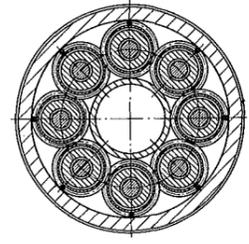
- A.Fiege: Störfallbetrachtungen zum MZFR- $D_2O$ -Loop  
Analog-Rechenmodell und Untersuchung des dynamischen  
Verhaltens eines Karbid-Bestrahlungseinsatzes im  
Notkühlfall.  
Externer Bericht 8/70-2.



Schnitt A-A



Schnitt B-B



- A Kühlkanalverschluß
- B 26-polige Steckverbindung
- C Thermoelementdurchführung
- D Anschlußkopf
- E Rückschlagventil
- F Reaktorkesseldeckel
- G Abschirmkörper
- H Wasserführungsrohr
- J Trennrohr
- K Wassermischstrecke
- L Oberer Moderator-Behälterboden
- M Verbindungsrohr
- N Kapsel-Thermoelementdurchführung
- O Oberes Kapselbündel (Edelstahl-Kapseln)
- P Kapselträgerrohr
- R Schraubkupplung
- S Unteres Kapselbündel (Zirkaloy-Kapseln)
- T Unterer Moderator-Behälterboden

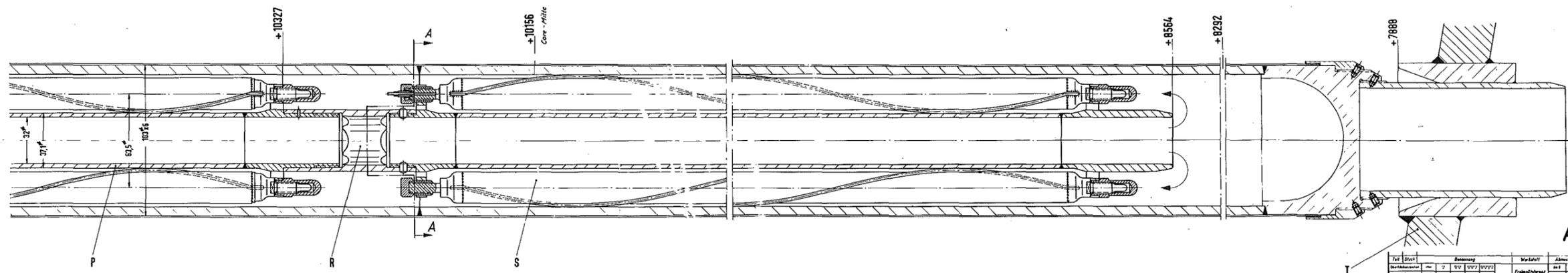
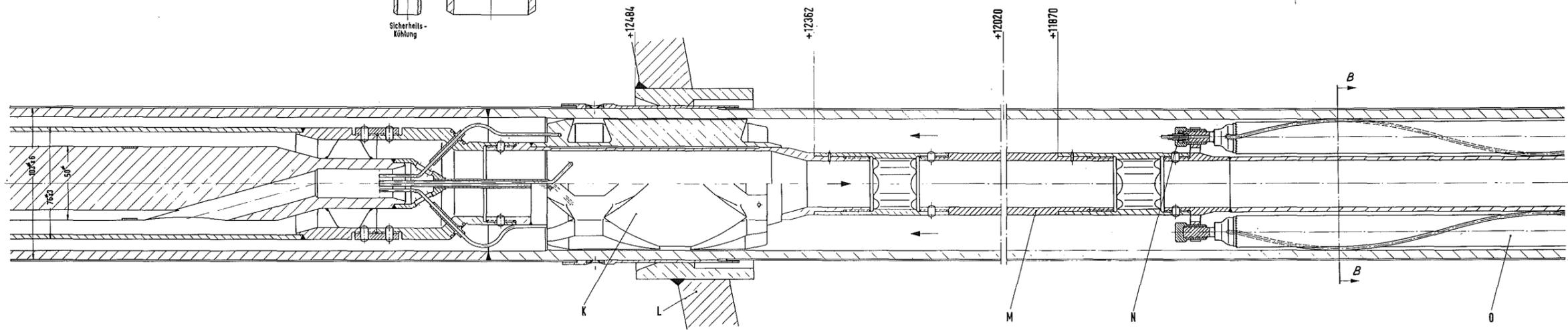


Abb. 1

Teil	Bezeichnung	Material	Abmessung	Zustand	Abmessung	Abmessung
1	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
2	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
3	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
4	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
5	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
6	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
7	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
8	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
9	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000
10	Reaktor	St 52	1000	1000	1000	1000

Prototyp - Bestrahlungseinheit  
im Versuchskanal - MZF - D-0 - Loop



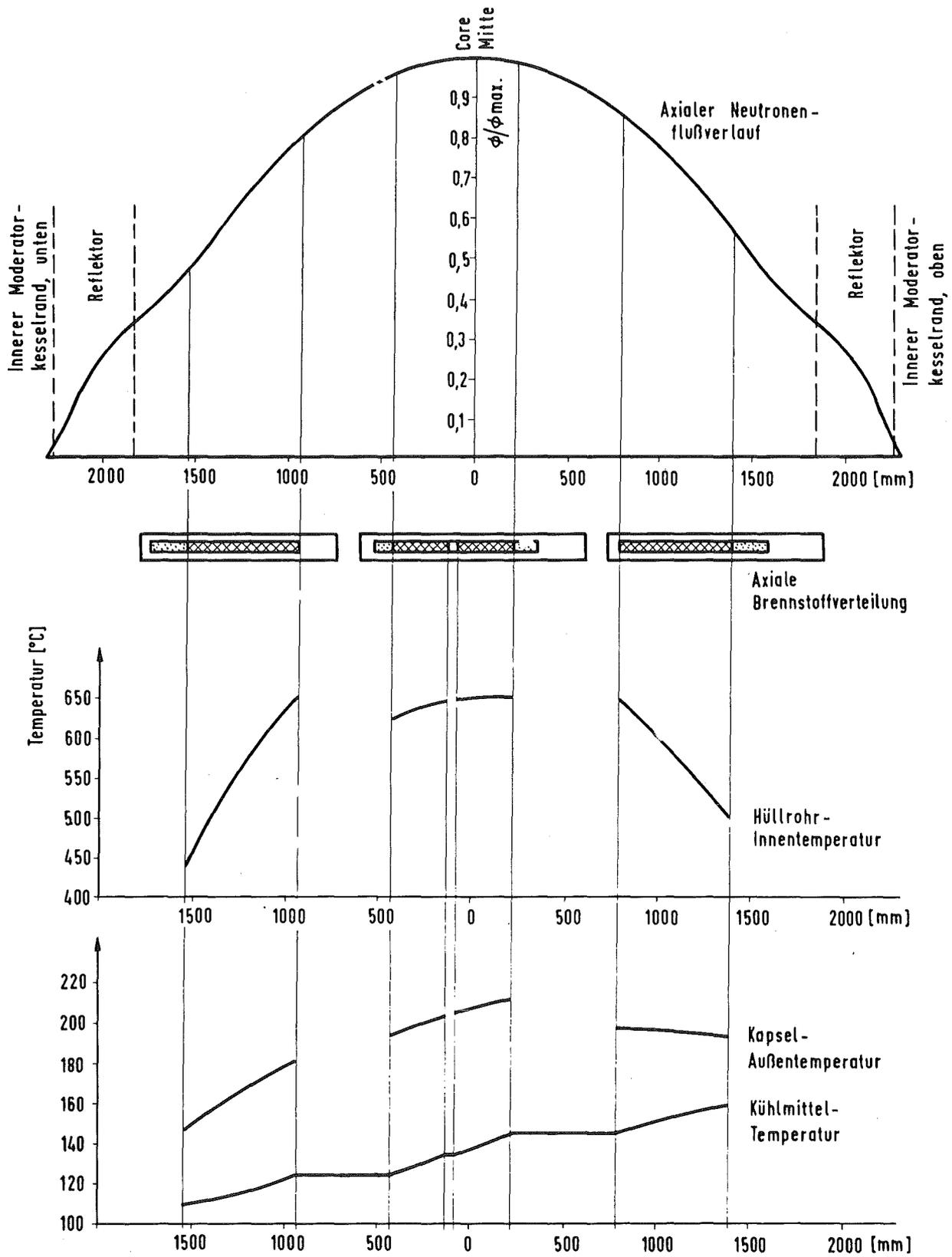


Abb.2: Axialer Leistungs- und Temperaturverlauf

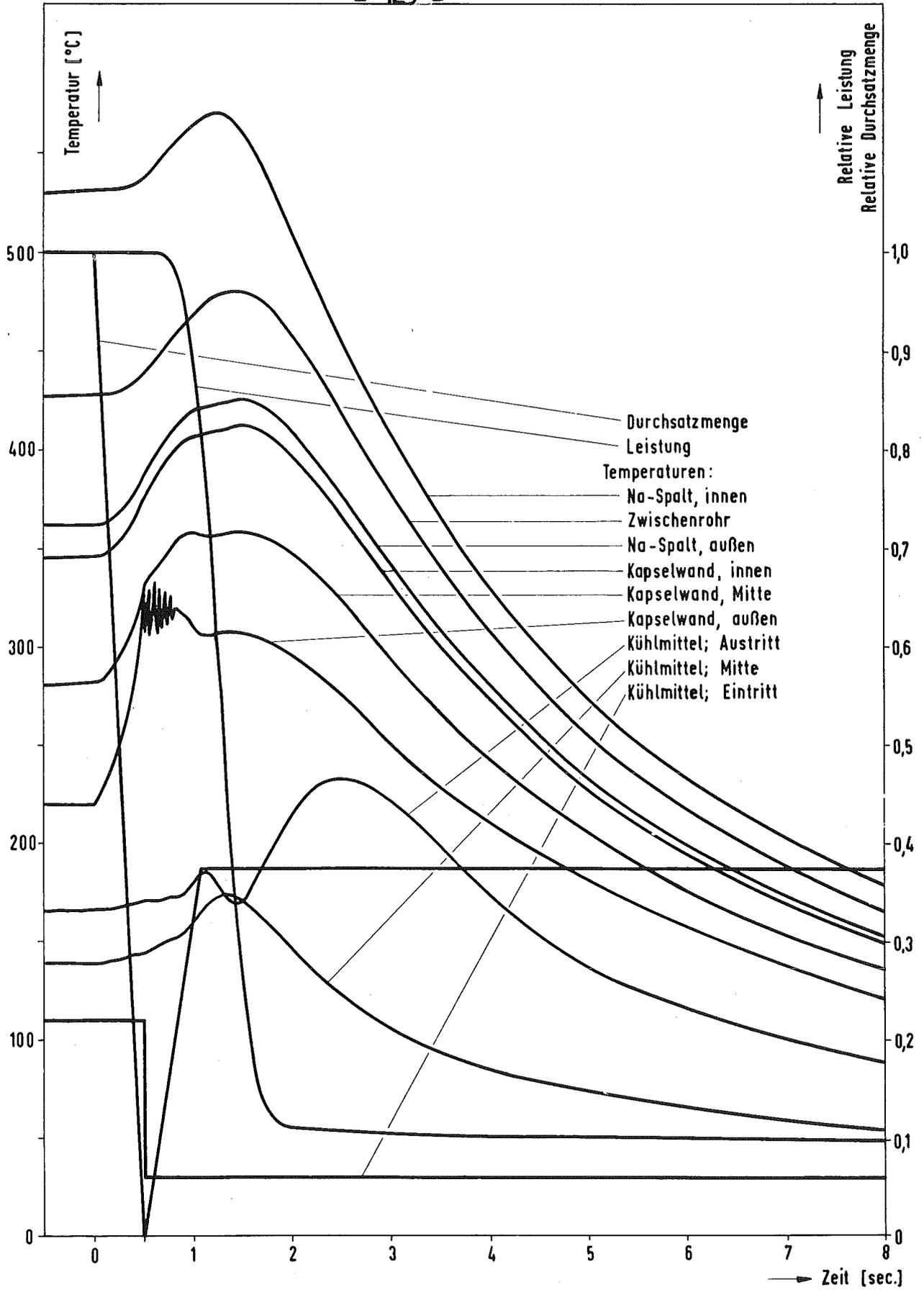


Abb.3: Temperaturverlauf in der Kapsel bei Pumpenausfall und Notkühlung