

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

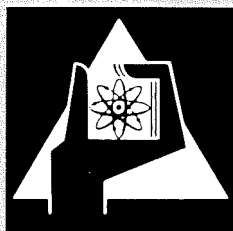
April 1971

KFK 1398

Institut für Material- und Festkörperforschung

FR 2-Bestrahlungskapsel
zur Untersuchung des Brennstoffschwellens

H. Häfner, K. Philipp



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

April 1971

KFK 1398

Institut für Material- und Festkörperforschung

FR2-Bestrahlungskapsel zur Untersuchung
des Brennstoffschwellens

H.Häfner

K.Philipp

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Auslegung von Brennstäben für fortschrittliche Kernreaktoren erfordert eine genauere Kenntnis des Brennstoffschwell- bzw. -kriechverhaltens.

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurden Bestrahlungskapseln entwickelt, in denen das Schwellen bzw. Kriechen von Brennstoffen unter Druckbelastung direkt gemessen werden kann. Über eine sog. Brennstoffkriechkapsel, die es erlaubt, bei axialer pneumatischer Druckbelastung der Proben in pile deren Längenänderungen mittels strahlenbeständiger induktiver Verlagerungsaufnehmer (Differentialtransformatoren) kontinuierlich zu messen, wird an anderer Stelle berichtet.

Gegenstand dieser Veröffentlichung sind einfachere, sogenannte Brennstoffschwellkapseln, in denen die Parameter Leistungsdichte, mechanische Probenbelastung, Temperatur und Temperaturgradient von Fall zu Fall einstellbar sind und in denen der Schwellbetrag nach einem gewünschten Abbrand integral gemessen werden kann.

Neben der Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes enthält dieser Aufsatz vor allem Auslegungsgesichtspunkte und sicherheitstechnische Hinweise für den Bestrahlungsbetrieb im Karlsruher Forschungsreaktor FR2.

Summary

The design of fuel pins for advanced nuclear reactors calls for a more accurate knowledge of the swelling and creeping behavior, respectively, of nuclear fuel.

At the Karlsruhe Nuclear Research Center irradiation capsules were developed in which swelling and creeping, respectively, under pneumatic load of nuclear fuels can be measured directly. It is reported elsewhere on a so-called fuel creeping capsule which allows continuous in-pile measurement of the longitudinal variation of specimens under axial, pneumatic compressive load by means of irradiation-resistant inductive displacement pickups (differential transformer).

This publication deals with simpler capsules, the so-called fuel swelling capsules, in which the parameters power density, sample loading, temperature, and temperature gradient can be set for each individual case and the amount of swelling measured integrally after a desired burnup.

Apart from the description of the capsule test rig, this article contains mainly design aspects and indications relating to safety for irradiations at the Karlsruhe FR2 reactor.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung und Allgemeines
2. Beschreibung des Kapsel-Versuchseinsatzes
 - 2.1 Allgemeiner Aufbau des KVE
 - 2.2 Die Bestrahlungsproben
3. Thermodynamische Auslegung
 - 3.1 Kühlung der Kapsel
 - 3.2 Temperaturverlauf in der Kapsel
 - 3.3 Änderung der Proben­temperatur durch Spaltgasfreisetzung
4. Pneumatische Belastung der Proben
5. Spannungsbeanspruchungen im Bestrahlungseinsatz
 - 5.1 Spannungen in der Brennstoffhülle
 - 5.2 Spannungen in den Kapselwänden
6. Sicherheitsfragen
 - 6.1 Allgemeines
 - 6.2 Temperaturmessung
 - 6.3 Spaltproduktinventar

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 FR2-Bestrahlungskapsel (Typ 9)
Zusammenstellungszeichnung IMF-06-4-4053
- Abb. 2 Schwellprobeneinsatz, Zeichnung IMF-06-3-4054
- Abb. 3 UN-Kapsel
Temperaturdifferenzen in den einzelnen Kapsel-
schichten - Brennstoffhüllentemperatur in
Abhängigkeit von der Gasspaltbreite
- Abb. 4 UO₂-Kapsel
Temperaturdifferenzen in den einzelnen Kapsel-
schichten - Brennstoffhüllentemperatur in
Abhängigkeit von der Gasspaltbreite
- Abb. 5 UN-Kapsel
Temperaturverlauf in einem Schwellprobeneinsatz
- Abb. 6 UO₂-Kapsel
Temperaturverlauf in einem Schwellprobeneinsatz

1. Aufgabenstellung und Allgemeines

Neben den seit einiger Zeit laufenden Bestrahlungsversuchen zum Problem Brennstoffkriechen sind nun im IMF auch Bestrahlungseinrichtungen zur Messung des Brennstoffschwellens vorgesehen.

Konkrete Aufgabe einer ersten Bestrahlungskapsel für den FR2 ist die Messung der Schwellrate keramischer Kernbrennstoffe (zunächst UO_2 und UN) bei verschiedenen Leistungsdichten, mechanischen Belastungen, Temperaturen und Temperaturgradienten in Abhängigkeit vom Abbrand.

Es ist zunächst an folgende Bestrahlungsbedingungen gedacht:

Tabelle 1

Brennstoff	UO_2	UN
Anreicherung	10 bis 20 %	8%
Dichte	ca. 95% T.D. =ca.10,4 gr/cm ³	ca. 95% T.D. = ca.13,4 gr/cm ³
Pelletdurchmesser	3,0 bis 3,5 mm	6,2 mm
Brennstoffsäulenhöhe	40 mm	40 mm
Stableistung	um 170 W/cm	um 450 W/cm
Brennstoffzentraltemperatur	800 bis 1800 °C in Stufen	800 bis 1800 °C in Stufen
Genauigkeit	ca. ± 50 °C	
Druckbelastung der Probe	0 bis 5 kp/mm ²	
Genauigkeit	± 10%	
Abbrandziel	50000 bis 80000 MWd/tM	

Später sollen auch UC und Pu-Mischbrennstoffe zum Einsatz kommen.

Auf eine kontinuierliche Messung des Schwellbetrages und auf eine Regelung der Probertemperatur soll wegen der damit verbundenen bekannten Schwierigkeiten und wegen des doch recht großen Aufwandes verzichtet werden.

Der Schwellbetrag soll nach der Bestrahlung aus dem Meßwert der Gesamtlängenänderung der Brennstoffsäule und durch Dichtemessung ermittelt werden.

Die Brennstofftemperatur soll über eine längere Bestrahlungszeit, wenn auch nicht konstant, so doch in hinreichend engen Grenzen gehalten werden können. Auf eine direkte Messung der Brennstofftemperatur soll verzichtet werden, weil dies nicht ohne Störung des gesamten Temperaturverlaufs möglich ist.

Aus den vorhandenen experimentellen Werten für Wärmeübergangszahlen zwischen Brennstoff und Hülle hofft man, durch die Messung der Hüllrohrtemperatur hinreichend genau die Brennstofftemperatur ermitteln zu können.

Die Gesamtzahl der zu bestrahlenden Proben liegt nach vorläufigen Schätzungen bei 25. Da in jedem Kapselversuchseinsatz (KVE) jeweils 3 Proben eingesetzt werden sollen, handelt es sich also um ca. 8 Einsätze, die im Laufe von etwa 2 Jahren zu montieren und zu bestrahlen sind.

Wesentliche Teile der bisherigen KVE, wie Oberteile, Wasserführungsrohre und Wasserrückführungen können verwendet werden. Ein Teil der vorhandenen Temperaturmeß- und Überwachungseinrichtungen müssen lediglich für die höheren Temperaturen umgerüstet werden.

Die Bestrahlung eines ersten Einsatzes ist im Sommer 1971 vorgesehen.

2. Beschreibung des Kapsel-Versuchseinsatzes

2.1 Allgemeiner Aufbau des KVE

Der Kapselversuchseinsatz (KVE) ist für Isotopenkanalpositionen geplant und setzt sich wie üblich aus drei Einheiten zusammen: der Bestrahlungskapsel, dem Oberteil und der Kühlwasserrückführung.

Da der KVE auf relativ einfache Weise demontiert werden kann, sind Oberteil und Wasserrückführung wiederholt verwendbar, d.h. es kann auf bewährte Bauteile zurückgegriffen werden; das Wasserführungsrohr und die Bestrahlungskapsel werden nur einmal verwendet. Das Oberteil hat im wesentlichen die Aufgabe, als Abschirmstopfen zu dienen und die Meßleitungen aufzunehmen; es ist auch zur Canschädendetektion eingerichtet. In der Bestrahlungskapsel sind innerhalb dichter Probenkapseln die Bestrahlungsproben (max. 3 übereinander) angeordnet. Die Bestrahlungskapsel (Abb. 1) besteht in erster Linie aus einem nahtlos gezogenen Rohr, in welchem sich die einzelnen leicht verschiebbaren Probenkapseln befinden; das Kapselrohr ist nach unten durch einen Endstopfen mit aufgeschraubtem Strömungskörper abgeschlossen und nach oben über ein Trägerrohr mit dem Kapselkopf verbunden, dessen oberer Abschluß ein mehrpoliger dichter Stecker bildet. Durch den Kapselkopf ist die Bestrahlungskapsel mittels einer Schraubhülse mit dem Oberteil verbunden.

2.2 Die Bestrahlungsproben (Abb.2)

Der Kapseldurchmesser beträgt außen 34 mm, innen 30 mm. Demgemäß ist der äußerste Durchmesser der Probenkapsel festgelegt mit 30 mm. Diese Probenkapsel, in deren unterem Teil der Brennstoff dicht eingeschlossen ist, verändert ihre Länge im Maße des Brennstoff-Schwellbetrages; die Endstücke sind daher als Meßbolzen ausgeführt. Der Brennstoff, er hat an beiden Enden je ein Isolierpellet angeordnet, befindet sich in einer relativ dicken Hülle aus TZM, die von unten her vier achsparallele Bohrungen zur Aufnahme von Thermoelementen besitzt. Der untere Verschuß-Stempel ist zur Sicherung gegen ein Verschieben der TZM-Hülle mit dieser verschweißt. Über den oberen Stempel - wie der untere ebenfalls aus TZM - sollen verschieden große Belastungen auf die Brennstoffsäule aufgebracht werden.

Der untere, dichte Teil der Probenkapsel besteht aus dem Hüllrohr, verschweißt mit einer Führungshülse und einem Abschlußstopfen, in den die Thermoelemente mit ihrer Verbindungshülse gelötet sind. Diese werden später in Nuten an den Probenkapseln entlang nach oben zum Kapselstecker geführt. Der den Stempel tragende Stempelhalter ist in der Führungshülse gelagert, beide sind über einen Faltenbalg zur Aufnahme der Längsbewegungen dicht miteinander verbunden. Die Probenbelastung wird über den Stempelhalter durch einen in die äußere Bestrahlungskapsel eingebrachten Gasdruck aufgebracht (siehe Abschnitt 4). In einer Bestrahlungskapsel können max. 3 Probenkapseln übereinander angeordnet sein. Wie schon beim Kapseltyp 8 (instrumentierte Brennstoff-Kriechkapsel) wird der gewünschte Gasdruck über ein geeignetes Autoschlauchventil in die äußere Kapsel eingefüllt. Füllgas in der inneren Kapsel ist Helium, in der äußeren Kapsel Helium oder Neon, je nach der gewünschten Proben temperatur. Bei der gewählten Konzeption (Doppelwandigkeit) ist gewährleistet, daß der Brennstoff bzw. die Spaltprodukte durch zwei gasdichte und druckfeste Wände vom Kühlsystem des FR2 getrennt sind.

3. Thermodynamische Auslegung

3.1 Kühlung der Kapsel

Die FR2-Kühlverhältnisse wurden für Bestrahlungskapseln schon so oft einer genaueren Betrachtung unterzogen, daß eine solche in diesem Fall nicht wiederholt werden soll. Nach den bisherigen Erfahrungen (Druckverlust, Durchflußmenge) wird deshalb die Wärmeübergangszahl einfach zu $\alpha = 2 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ eingesetzt. Für die beiden Fälle der UN-Kapsel (450 W/cm Stabileistung = 1800 W Gesamtleistung) und der UO_2 -Kapsel (170 W Stabileistung = 680 W Gesamtleistung) ergeben sich Wärmestromdichten an der Kapseloberfläche von nur

$$17 \text{ W/cm}^2 \quad \text{bzw.} \\ 6,5 \text{ W/cm}^2,$$

unter der Voraussetzung, daß der Kapseldurchmesser 34 mm beträgt und die Gesamtwärmemenge auf einer Kapsellänge von 10 cm an das Kühlwasser abgegeben wird.

Bei diesen geringen Wärmestromdichten fällt es nicht ins Gewicht, wenn die Annahmen mit einem gewissen Fehler behaftet sind.

Die Temperaturdifferenz in der Kühlmittelgrenzschicht errechnet sich also zu

$$\Delta t = \frac{q}{\alpha} = \frac{17}{2} = 8,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{bzw. } \frac{6,5}{2} \approx 3 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Die Kapseloberflächentemperatur ergibt sich bei einer Kühlmittelintrittstemperatur von 50°C somit zu

$$t_w \approx 60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ bzw. } 55 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

3.2 Temperaturverlauf in der Kapsel

In den einzelnen Kapselschichten ergeben sich die im folgenden berechneten Temperaturdifferenzen. Dabei werden jeweils die beiden Stableistungen für UN und UO_2 eingesetzt.

1. Äußeres Kapselrohr (Edelstahl, 2mm dick)

$$t_m \approx 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,16 \text{ W/cm grad}$$

$$\Delta t_1 = \frac{\chi'}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_a}{d_i},$$

wobei die effektive Stableistung

$$\chi' = \frac{\text{Gesamtwärmeleistung}}{\text{effektive Kapsellänge}}$$

beträgt.

Für UN gilt: $\chi^i = \frac{450 \text{ W/cm} \cdot 4 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 180 \text{ W/cm}$ und

für UO_2 gilt: $\chi^i = \frac{170 \cdot 4}{10} \approx 70 \text{ W/cm}$

Somit ergibt sich die Temperaturdifferenz in der äußeren Kapselwand

für UN zu $\Delta t_1 = \frac{180}{2\pi \cdot 0,16} \ln \frac{34}{30} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$

und für UO_2 zu $\Delta t_1 = \frac{70}{2\pi \cdot 0,16} \ln \frac{34}{30} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Äußerer Gasspalt (0,5 mm breit im Betrieb)

Der Wärmedurchgangswiderstand im äußeren Gasspalt wird so gewählt, daß sich in diesem Spalt bei den gegebenen Wärmeleistungen bereits ein beträchtlicher Temperaturabfall einstellt. Dadurch wird erreicht, daß der innere Gasspalt bei den gewünschten Brennstofftemperaturen nicht zu dick wird. Das hat den Vorteil, daß das im Ausgangszustand mit He gefüllte Kapselvolumen in Grenzen bleibt, so daß durch Beimischung schon relativ geringer Mengen schlechter wärmeleitender Spaltgase eine nennenswerte Temperaturveränderung eintritt (siehe Abschn. 3.3). Die Breite des äußeren Gasspaltes wird aus praktischen Gründen unabhängig von der Stabileistung und der gewünschten Probestemperatur für alle Kapseln gleich gewählt. Es wird also immer nur der innere Gasspalt den jeweiligen Erfordernissen angepaßt. Entsprechend der thermischen Ausdehnung des inneren und äußeren Kapselrohres bei Betriebstemperatur muß der Gasspalt um 0,25 mm dicker gefertigt werden als er im Betrieb sein soll; die Fertigungsspaltbreite beträgt also 0,75 mm.

Um im Falle des UO_2 mit der geringeren Stableistung trotzdem auf den gewünschten Temperaturabfall zu kommen, wird der äußere Gasspalt anstatt mit Helium mit Neon gefüllt.

Es ergeben sich somit folgende Temperaturdifferenzen:

UN	UO_2
Gas: Helium	Neon
$t_m : \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$
$\lambda : 0,0023 \text{ W/cm grad}$	$0,00075 \text{ W/cm grad}$
$\Delta t_2 = \frac{180}{2\pi \cdot 0,0023} \ln \frac{30}{29} = 415^\circ\text{C}$	$\frac{70}{2\pi \cdot 0,00075} \ln \frac{30}{29} = 500^\circ\text{C}$

3. Inneres Kapselrohr (Edelstahl)

UN	UO_2
$\delta = 1,75 \text{ mm dick}$	$1,75 \text{ mm dick}$
$t_m \approx 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$570 \text{ }^\circ\text{C}$
$\lambda = 0,22 \text{ W/cm grad}$	$0,23 \text{ W/cm grad}$
$\Delta t_3 = \frac{180}{2\pi \cdot 0,22} \ln \frac{28,5}{25} \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$\frac{70}{2\pi \cdot 0,23} \ln \frac{28,5}{25} \approx 10^\circ\text{C}$

Der Wärmeübergang über die zur Zentrierung im äußeren Kapselrohr auf der Innenkapsel stehenden Nocken kann so gering gehalten werden, daß er im Fehlerbereich der Berechnung liegt und deshalb vernachlässigt werden kann.

4. Innerer Gasspalt (Helium)

Der innere Gasspalt, zwischen Mo-Hülle und innerer Kapselwand, ist im Ausgangszustand mit reinem He gefüllt. Die Breite dieses Spaltes ist je nach der gewünschten Probertemperatur veränderlich.

Sie berechnet sich zu

$$\delta = r_i \left(e^{\frac{2\pi\lambda \cdot \Delta t}{\chi'}} - 1 \right)$$

Es sei angenommen, daß die gesamte Wärmemenge auf der Länge des Gasspaltes von 7 cm gleichmäßig abgegeben wird.

Somit wird die effektive Stableistung

$$\text{für UN} \quad : \quad \chi' = \frac{450 \text{ W/cm} \cdot 4 \text{ cm}}{7} \approx 260 \text{ W/cm}$$

$$\text{und für UO}_2: \quad \chi' = \frac{170 \cdot 4}{7} \approx 100 \text{ W/cm.}$$

In den beiden Abbildungen 3 und 4 sind die Temperaturdifferenzen Δt_4 in den Gasspalten in Abhängigkeit von der Spaltbreite für die beiden Versionen der UN-Kapsel und der UO₂-Kapsel aufgetragen.

5. Molybdän-Hülle

Wegen der sehr guten Wärmeleitfähigkeit des Molybdäns und der Dickwandigkeit der Hülle kann angenommen werden, daß die Wärme gleichmäßig über die ganze Länge der Hülle von 7 cm nach außen abfließt. Die effektiven Stableistungen sind deshalb die gleichen wie oben:

$$\chi' \approx 260 \text{ W/cm für die UN-Kapsel und}$$

$$\chi' \approx 100 \text{ W/cm für die UO}_2\text{-Kapsel.}$$

Die mittlere Temperatur der Mo-Hülle schwankt je nach der gewünschten Proben­temperatur etwa zwischen 700°C und 1400°C. Die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Mo-Legierung ist in diesem Bereich jedoch nahezu konstant und kann zu $\lambda = 1,05 \text{ W/cm grd}$ eingesetzt werden [17].

Demnach ergibt sich die Temperaturdifferenz in der Mo-Hülle

$$\text{für UN zu } \Delta t_5 \approx \frac{260}{2\pi \cdot 1,05} \ln \frac{23,5}{6,2} \approx 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{und für UO}_2 \text{ zu } \Delta t_5 \approx \frac{100}{2\pi \cdot 1,05} \ln \frac{22}{3,5} \approx 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

In dieser Rechnung ist eine mittlere Dicke der Mo-Hülle eingesetzt, entsprechend einer mittleren Breite des inneren He-Spaltes. Kleine Änderungen der Mo-Hüllendicke fallen hier nicht ins Gewicht, da der Temperaturgradient wegen der guten Wärmeleitfähigkeit bei den zur Diskussion stehenden Stabileistungen nur ca. 3 bis 6°C/mm beträgt.

Der Wärmeübergang über die Zentriernocken zwischen Mo-Hülle und innerem Kapselrohr kann - wie eine Rechnung zeigt - durch künstliche Oberflächenrauigkeit so klein gehalten werden, daß er ebenfalls vernachlässigt werden kann. Die Kontaktfläche eines Nockens muß jedoch unter 1 mm² liegen.

In den beiden Diagrammen, Abbildung 3 und 4, sind neben den Temperaturdifferenzen in den einzelnen Schichten der UN- bzw. UO₂-Kapsel die Innentemperaturen der Brennstoffhülle aufgetragen. Für eine gewünschte Hüllrohrinnentemperatur der UO₂-Kapsel (Abb. 4) von z.B. 1400°C, was einer Brennstoffzentraltemperatur von ca. 2000°C zu Bestrahlungsbeginn entspricht, beträgt der Temperaturabfall im inneren Gasspalt ca. 800°C und die Spaltbreite 2,12 mm. Im kalten Zustand (bei Raumtemperatur) ist die Spaltbreite 2,08 mm (Fertigungsspaltbreite), was ebenfalls aus dem Diagramm zu entnehmen ist.

Auch das Kapselvolumen ist für die jeweilige Spaltbreite diesen Diagrammen zu entnehmen. Dieses Kapselvolumen ist entscheidend für die Wirksamkeit der "Temperatursteuerung" durch Spaltgasbeimischung. In zwei weiteren Diagrammen (Abb. 5 und 6) ist der radiale Temperaturverlauf in der UN- bzw. UO₂-Kapsel für verschiedene Breiten des inneren He-Spaltes aufgetragen.

3.3 Änderung der Probertemperatur durch Spaltgasfreisetzung

Wie schon eingangs erwähnt, ist es erwünscht, die zu Beginn der Bestrahlung erreichte Brennstofftemperatur über längere Betriebszeiten möglichst zu halten. Eine Temperaturkonstanz kann nur über eine aufwendige Temperaturregelung, entweder über elektrische Heizung oder Gasmischung erreicht werden. Beide Methoden bieten erhebliche Schwierigkeiten. Die erste erfordert eine starke Heizung, für die im direkten Strahlenfeld über lange Zeit keine Betriebssicherheit garantiert werden kann. Die zweite erfordert Gaszuführ- und absaugleitungen (evtl. abgeschirmt), für die im Reaktordeckelzwischenraum des FR2 kaum Platz zur Verfügung steht. Beide Methoden erfordern darüber hinaus eine völlige Neukonstruktion der Oberteile der KVE und sind wegen der zusätzlich noch erforderlichen out pile-Einrichtungen mit erheblichem Aufwand verbunden und nicht kurzfristig zu verwirklichen. Es wird deshalb auf folgende einfache Weise versucht, dem naturgemäß durch abnehmende Leistungsdichte (Abbrand und Vergiftung) sowie durch das Schließen des Spaltes zwischen Brennstoff und Hülle auftretenden Abfall der Brennstoffzentraltemperatur entgegenzutreten: Man läßt die während der Bestrahlung aus dem Brennstoff freiwerdenden Spaltgase einfach in den im Ausgangszustand mit reinem Helium gefüllten Spalt zwischen Brennstoffhülle und Kapselrohr entweichen. Mit zunehmenden Anteilen an Krypton und Xenon im Helium wird dann der Wärmeübergang in diesem Gasspalt verschlechtert. Mit den nachfolgenden Abschätzungen soll gezeigt werden, inwieweit auf diese Weise Einfluß auf die Brennstofftemperatur genommen werden kann. Dabei werden untere Werte für die Spaltgasfreisetzungsraten angesetzt, weil ein eventueller Temperaturanstieg infolge wider Erwarten höherer Freisetzung im Sinne der Versuchsdurchführung angenehmer ist als ein Temperaturabfall. Außerdem kann die Bestrahlungskapsel bei zu starkem Temperaturanstieg auf eine Reaktorposition mit niedrigerem Neutronenfluß versetzt werden.

Im folgenden sollen die insgesamt in einer Probenkapsel entstehenden Spaltgasmengen angegeben werden. Sie wurden aus der Zahl der Spaltungen abgeschätzt:

Eine Gesamt-Wärmemenge von 1800 W durch Spaltungen für die UN-Kapsel entspricht z. B. einer Zahl von

$$\frac{1800 \text{ W} \cdot 1 \text{ MeV} \cdot 1 \text{ Spaltung}}{4,45 \cdot 10^{-17} \text{ Wh} \cdot 200 \text{ MeV}} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ Spaltungen/h.}$$

Für die UO_2 -Kapsel mit nur 680 W Gesamt-Wärmeleistung sind es entsprechend nur ca. $7,65 \cdot 10^{16}$ Spaltungen pro Stunde.

Pro 10^{20} Spaltungen werden ca. 1 N cm^3 Spaltgase erzeugt. Demzufolge entstehen in der UN-Kapsel etwa alle 500 h (21 Betriebstage) bzw. in der UO_2 -Kapsel etwa alle 1300 h (55 Betriebstage) 1 N cm^3 Spaltgase.

Also nach

	<u>UO_2 - Kapsel</u>	<u>UN - Kapsel</u>
einem FR2-Zyklus	ca. $0,55 \text{ N cm}^3$	ca. $1,5 \text{ N cm}^3$
zwei FR2-Zyklen	ca. $1,1 \text{ N cm}^3$	ca. 3 N cm^3
vier FR2-Zyklen	ca. $2,2 \text{ N cm}^3$	ca. 6 N cm^3
acht FR2-Zyklen	ca. $4,4 \text{ N cm}^3$	ca. 12 N cm^3

In den nachfolgenden Tabellen sind Spaltgasfreisetzungswerte zusammengestellt, wie sie in die Berechnungen eingesetzt werden.

Die Spaltgasfreisetzungsraten für das später einzusetzende UC werden in der einschlägigen Literatur wie für UN angegeben.

Tabelle 2: Spaltgasfreisetzungswerte für UN

Abbrand MWd/t	Freigesetzte Spaltgasmenge in Atome bzw. Ncm^3 je cm^3 UN *)							
	Brennstoffzentraltemperatur							
	1000°C		1250°C		1500°C		1750°C	
	Xe	Kr	Xe	Kr	Xe	Kr	Xe	Kr
5000	$8,5 \cdot 10^{16}$ $3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{16}$ $0,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{17}$ $7,9 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{16}$ $1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{17}$ $1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{16}$ $2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{17}$ $1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{16}$ $2,7 \cdot 10^{-3}$
10000	$1,7 \cdot 10^{17}$ $6,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{17}$ $1,1 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^{17}$ $1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{16}$ $2,7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{18}$ $3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{17}$ $6,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{18}$ $4,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{17}$ $8,1 \cdot 10^{-3}$
15000	$3,2 \cdot 10^{17}$ $1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{16}$ $2 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{17}$ $3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{17}$ $6 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{18}$ $8,5 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{17}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{18}$ 0,12	$5,4 \cdot 10^{17}$ $2 \cdot 10^{-2}$
20000	$5,1 \cdot 10^{17}$ $1,9 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{16}$ $3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{18}$ $6,3 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{17}$ $1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{18}$ 0,16	$7,3 \cdot 10^{17}$ $2,7 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{18}$ 0,25	$1,2 \cdot 10^{18}$ $4,3 \cdot 10^{-2}$
25000	$8,5 \cdot 10^{17}$ $3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{17}$ $5,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{18}$ 0,12	$5,4 \cdot 10^{17}$ $2 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{18}$ 0,28	$1,3 \cdot 10^{18}$ $4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{19}$ 0,47	$2,2 \cdot 10^{18}$ $8,1 \cdot 10^{-2}$
30000	$1,3 \cdot 10^{18}$ $4,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{17}$ $8 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{18}$ 0,19	$8,7 \cdot 10^{17}$ $3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{18}$ 0,47	$2,2 \cdot 10^{18}$ $8,1 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{19}$ 0,95	$4,4 \cdot 10^{18}$ 0,16

*) bezogen auf 95% dichtes Material.

Tabelle 3: Spaltgasfreisetzungswerte für UO₂

Abbrand MWd/t	Freigesetzte Spaltgasmenge in Atome bzw. Ncm ³ je cm ³ UO ₂ *)									
	Brennstoffzentraltemperatur									
	1000°C		1250°C		1500 °C		1750°C		2000°C	
	Xe	Kr	Xe	Kr	Xe	Kr	Xe	Kr	Xe	Kr
5000	1,3·10 ¹⁶	2,2·10 ¹⁵	2,5·10 ¹⁶	4,3·10 ¹⁵	6,4·10 ¹⁶	1,1·10 ¹⁶	5,7·10 ¹⁷	9,8·10 ¹⁶	1,9·10 ¹⁸	3,3·10 ¹⁷
	4,8·10 ⁻⁴	8,1·10 ⁻⁵	9,3·10 ⁻⁴	1,6·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻³	4,1·10 ⁻⁴	0,02	3,6·10 ⁻³	0,07	1,2·10 ⁻²
10000	2,6·10 ¹⁶	4,3·10 ¹⁵	5,1·10 ¹⁶	8,7·10 ¹⁵	3,2·10 ¹⁷	5,4·10 ¹⁶	2,7·10 ¹⁸	4,6·10 ¹⁷	7,7·10 ¹⁸	1,3·10 ¹⁸
	9,6·10 ⁻⁴	1,6·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻³	3,2·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻²	2,0·10 ⁻³	0,1	1,7·10 ⁻²	0,28	4,8·10 ⁻²
15000	3,8·10 ¹⁶	6,5·10 ¹⁵	9,6·10 ¹⁶	1,6·10 ¹⁶	9,6·10 ¹⁷	1,6·10 ¹⁷	6,7·10 ¹⁸	1,1·10 ¹⁸	1,7·10 ¹⁹	2,9·10 ¹⁸
	1,4·10 ⁻³	2,4·10 ⁻⁴	3,5·10 ⁻³	5,9·10 ⁻⁴	3,5·10 ⁻²	5,9·10 ⁻³	0,25	4,1·10 ⁻²	0,63	0,11
20000	5,1·10 ¹⁶	8,7·10 ¹⁵	1,9·10 ¹⁷	3,3·10 ¹⁶	3,2·10 ¹⁸	5,4·10 ¹⁷	1,5·10 ¹⁹	2,5·10 ¹⁸	3,1·10 ¹⁹	5,2·10 ¹⁸
	1,9·10 ⁻³	3,2·10 ⁻⁴	7,0·10 ⁻³	1,2·10 ⁻³	0,12	2,0·10 ⁻²	0,56	9,2·10 ⁻²	1,15	0,19
25000	6,4·10 ¹⁶	1,1·10 ¹⁶	6,4·10 ¹⁷	1,1·10 ¹⁷	6,7·10 ¹⁸	1,1·10 ¹⁸	2,3·10 ¹⁹	4,0·10 ¹⁸	4,8·10 ¹⁹	8,2·10 ¹⁸
	2,4·10 ⁻³	4,1·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻²	4,1·10 ⁻³	0,25	4,1·10 ⁻²	0,85	0,15	1,78	0,3
30000	9,6·10 ¹⁶	1,6·10 ¹⁶	2,3·10 ¹⁸	3,9·10 ¹⁷	1,3·10 ¹⁹	2,2·10 ¹⁸	3,7·10 ¹⁹	6,2·10 ¹⁸	6,9·10 ¹⁹	1,2·10 ¹⁹
	3,5·10 ⁻³	5,9·10 ⁻⁴	8,5·10 ⁻²	1,4·10 ⁻²	0,48	8,2·10 ⁻²	1,37	0,23	2,55	0,44
35000	1,2·10 ¹⁷	2,1·10 ¹⁶	5,8·10 ¹⁸	9,9·10 ¹⁷	2,3·10 ¹⁹	3,9·10 ¹⁸	5,3·10 ¹⁹	9,1·10 ¹⁸	9,4·10 ¹⁹	1,6·10 ¹⁹
	4,5·10 ⁻³	7,8·10 ⁻⁴	0,21	3,6·10 ⁻²	0,85	0,14	1,96	0,34	3,48	0,59
40000	1,5·10 ¹⁷	2,6·10 ¹⁶	1,1·10 ¹⁹	2,0·10 ¹⁸	3,7·10 ¹⁹	6,3·10 ¹⁸	7,4·10 ¹⁹	1,3·10 ¹⁹	1,2·10 ²⁰	2,1·10 ¹⁹
	5,5·10 ⁻³	9,6·10 ⁻⁴	0,41	7,4·10 ⁻²	1,37	0,23	2,74	0,48	4,45	0,78

*) bezogen auf 95% T.D.

131

Die Wirksamkeit dieser "Temperaturregelung" über Spaltgasbeimischung hängt nun von einer Reihe von Parametern ab: vom Brennstoff selbst, von der Brennstoffmenge, der Brennstofftemperatur, dem Abbrand sowie vom Gaspuffervolumen und damit von der Gasspaltbreite. Die Gasspaltbreite hängt wiederum von der gewünschten Stableistung und Brennstofftemperatur ab. Der Gasspalt wird dann besonders breit, wenn bei niedriger Stableistung eine hohe Brennstofftemperatur erwünscht ist (z.B. bei UO_2) und dann besonders dünn, wenn bei hoher Leistung eine niedrige Probertemperatur gefordert wird.

Es ist außerordentlich zeitraubend, für alle möglichen Fälle bzw. Parameteränderungen die entsprechenden Rechnungen durchzuführen. Um aber einen guten Überblick zu gewinnen, werden in der nachfolgenden Tabelle 4 die Ergebnisse für einige typische Fälle zusammengestellt. Fällt eine Bestrahlung einmal aus diesem Rahmen heraus, so wird eine besondere Berechnung nötig sein. Dabei werden neben den in der Einleitung angegebenen Stableistungen und den zuvor aufgeführten Spaltgasfreisetzungsraten die nachfolgenden Werte eingesetzt:

	UN	UO_2
Brennstoffmenge in der Kapsel	1,21 cm ³	0,385 cm ³
Brennstoffzentraltemperatur	1750 °C	2000 °C

Als Puffervolumen in der Kapsel wurden Werte entsprechend den variablen Gasspalten von 5, 10 und 15 N cm³ eingesetzt. Das Puffervolumen soll im Ausgangszustand reines Helium enthalten.

Die Veränderung der Gaszusammensetzung und damit der Wärmeübertragungsverhältnisse im Gasspalt ergibt sich dann wie folgt (siehe Tabelle 4):

Tabelle 4: Änderung des Wärmeübergangs im Gasspalt infolge Spaltproduktbeimischung für UN und UO₂

Abbrand MWd/t	Bestrah- lungszeit Tage *	Freigesetzte Spaltgasmenge N cm ³	Spaltgasanteil im He in % bei			$\lambda_{\text{He}}/\lambda_{\text{Gem}}$ bzw. $\Delta t_{\text{Gem}}/\Delta t_{\text{He}}$ im Spalt		
			V ₁ =5 Ncm ³ He	10 Ncm ³ He	15 Ncm ³ He	V ₁ =5Ncm ³ He	10 Ncm ³ He	15 Ncm ³ He
5000	UN 34	0,023	0,5	0,25	0,15	1,015	≈ 1,01	≈ 1,0
	UO ₂ 28	0,032	0,65	0,3	0,2	1,02	1,01	≈ 1,0
10000	UN 67	0,067	1,3	0,7	0,45	1,035	1,02	1,015
	UO ₂ 57	0,126	2,5	1,25	0,85	1,07	1,035	1,025
15000	UN 101	0,17	3,3	1,7	1,1	1,1	1,045	1,03
	UO ₂ 85	0,285	5,4	2,8	2,0	1,16	1,08	1,06
20000	UN 135	0,35	6,5	3,4	2,3	1,2	1,1	1,065
	UO ₂ 113	0,515	9,3	4,9	3,3	1,3	1,14	1,1
25000	UN 168	0,665	11,8	6,2	4,2	1,4	1,18	1,11
	UO ₂ 142	0,80	13,8	7,4	5,1	1,46	1,23	1,15
30000	UN 202	1,343	21,2	11,8	8,2	1,78	1,4	1,26
	UO ₂ 170	1,15	18,7	10,3	7,1	1,7	1,35	1,22
35000	UN 236							
	UO ₂ 198	1,565	23,8	13,5	9,5	1,9	1,45	1,31
40000	UN 269							
	UO ₂ 227	2,01	28,7	16,7	11,8	2,2	1,58	1,4

* bezogen auf konstante Stableistung von 450 bzw. 170 W/cm

Es ist schwierig, die Wärmeleitfähigkeit eines Gemisches aus mehreren Komponenten genau zu bestimmen, zumal wenn deren Wärmeleitfähigkeiten sehr verschieden sind. Mit der für diese Abschätzung nötigen Genauigkeit läßt sich jedoch die Wärmeleitfähigkeit des Gemisches, das im wesentlichen aus He, Xe und Kr besteht, angeben. Der weitaus größte Anteil der Spaltgase ist Xe; das Verhältnis Xe/Kr beträgt etwa 6/1.

Aus der Tabelle 4 ist zu entnehmen, daß die Temperaturdifferenz im Gasspalt zwischen Mo-Hülle und Kapselrohr erst nach Betriebszeiten ab etwa 3 FR2-Zyklen nennenswert ansteigt.

Nimmt man nun an, daß zwischen Brennstoff und Hülle zunächst ein Temperatursprung von 200°C herrschen soll, und im Spalt zwischen Hülle und Kapselrohr eine Temperaturdifferenz von ca. 1000°C , so müßte sich die Wärmeleitfähigkeit in diesem Spalt um ca. 20% verschlechtern, wollte man die Brennstofftemperatur beim Anlegen des Brennstoffs an die Hülle beibehalten. Das bedeutet, daß der Rückgang der Brennstofftemperatur durch relativ kurzfristiges Anlegen des Brennstoffs an die Hülle (innerhalb weniger Tage) nicht ausgeglichen werden kann. Dagegen können die langfristigen Leistungsreduktionen durch Spaltproduktvergiftung und Abbrand durchaus kompensiert werden. Vermutlich müssen nach Bestrahlungszeiten über 5 bis 7 FR2-Zyklen die KVE auf Positionen mit niedrigerem Neutronenfluß umgesetzt werden, je nachdem, wie groß das Puffervolumen bzw. die Gasspaltbreite ist.

4. Pneumatische Belastung der Proben

Der Brennstoff soll mit verschiedenen hohen Druckbelastungen zwischen 0 und max. 5 kp/mm^2 beaufschlagt werden. Dies wird bei der gewählten Konzeption dadurch erreicht, daß in die äußere Kapsel ein entsprechender Gasdruck (Helium oder Neon) eingefüllt wird. Dieser Gasdruck wirkt auf die geschlossene Endplatte des Faltenbalgs, den sog. Stempelhalter, und übt über den Stempel die entsprechende Druckbelastung auf den Brennstoff aus.

Im Betriebszustand wirkt der äußeren Kraft, gegeben durch den Gasdruck in der äußeren Kapsel, eine innere Druckkraft entgegen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden muß.

Diese innere Druckkraft ergibt sich aus dem Inertgasdruck in der Innenkapsel bei Betriebstemperatur und zusätzlich aus den freigesetzten Spaltgasen. Beide Kräfte, die innere wie die äußere, und somit ihre Differenz, die eigentliche Druckbelastung der Brennstoffprobe, sind im Betrieb gewissen Schwankungen unterworfen : Die innere Kraft durch Änderung des örtlichen Neutronenflusses und somit der Leistung und Temperatur und insbesondere durch Spaltgasfreisetzung. Die äußere Kraft durch Änderung der Kühlmitteltemperatur im FR2.

Wegen des großen Puffervolumens in der äußeren Kapsel ist die Schwankungsbreite des Gasdrucks und damit der äußeren Druckkraft infolge Temperaturänderung des Kühlmittels gering. Nimmt man an, daß die Kühlmitteleintrittstemperatur im Verlauf eines Jahres zwischen kältester Winternacht und heißstem Sommertag zwischen 36°C und 52°C schwankt und setzt man einen Mittelwert von 44°C ein, so errechnet sich daraus eine Schwankung des Gasdruckes in der äußeren Kapsel und damit der äußeren Druckkraft von $\pm 2,5\%$.

Der Gasdruck in der Innenkapsel läßt sich nur grob abschätzen, da einmal die Temperatur des Gases an jeder Stelle und zu jeder Zeit verschieden ist und zum anderen die Spaltgasfreisetzung in Abhängigkeit vom Abbrand nur ungenau bekannt sind.

Eine vorläufige Abschätzung ergibt, daß der Druck in der Innenkapsel zwischen 4 kp/cm^2 (zum Bestrahlungsbeginn und bei der niedrigsten Probenstemperatur) und max. 8 kp/cm^2 (nach 40000 MWd/t und der höchsten Probenstemperatur) liegen kann. Mit einem Mittelwert von 6 kp/cm^2 errechnet sich also eine recht große Schwankungsbreite der inneren Druckkraft von ca. $\pm 35\%$. Diese große Schwankungsbreite ergibt sich daraus, daß versucht wird, alle möglichen Probenparameter (von der höchstmöglichen bis zur niedrigsten Temperatur und Spaltgasfreisetzung) einzuschließen. Insofern ist dieser große Fehlerbereich nicht realistisch; es sollen mit dieser Annahme nur die Grenzen abgesteckt werden.

In der folgenden Tabelle sind unter Zugrundelegung dieser inneren Gegendruckkraft die für eine bestimmte Probenbelastung jeweils notwendigen Gasdrücke in der äußeren Kapsel und die dazugehörigen maximalen Unsicherheiten der Probenbelastung angegeben. Dabei ist ein effektiver Faltenbalgquerschnitt von $3,2 \text{ cm}^2$ eingesetzt.

Tabelle 5: Gasdruck in der äußeren Kapsel und Ungenauigkeit der Probenbelastung

Probenbelastung kp/mm ²	Fehlerbereich		Gasdruck in der Kapsel ata im Betrieb ± 2,5 %	der Kapsel ata bei Raumtemp. (Einfülldruck) ¹⁾	
	kp/mm ²	%			
0	± 0,7		6	5,5	
UO ₂ ²⁾	1	± 0,7	± 70	9	8,3
	2	± 0,76	± 38	12	11,1
	3	± 0,78	± 26	15	13,9
	4	± 0,8	± 20	18	16,6
	5	± 0,85	± 17	21	19,4
UN ³⁾	1	± 0,25	± 25	15,4	14,2
	2	± 0,28	± 14	24,9	23,0
	3	± 0,3	± 10	34,3	31,5
	4	± 0,32	± 8	43,8	40,5
	5	± 0,35	± 7	53,2	49,2

1) ± 1% Manometergenauigkeit

2) 3,5 mm Brennstoffdurchmesser

3) 6,2 mm Brennstoffdurchmesser

Bei einem Brennstoffdurchmesser von z.B. 3,5 mm (UO_2) und einer Brennstoffbelastung von 5 kp/mm^2 ergibt sich der notwendige Gasdruck in der äußeren Kapsel zu 21 kp/cm^2 . Bei 6,2 mm Brennstoffdurchmesser (UN) und 3 bzw. 5 kp/mm^2 Probenbelastung ergibt sich der Gasdruck zu ca. 34 bzw. 53 kp/cm^2 .

Im allgemeinen wird die Probenbelastung zwischen 2 und 4 kp/mm^2 liegen und der Kapseldruck 44 kp/cm^2 nicht überschreiten. Lediglich für Vergleichsmessungen wird man auch einmal die Grenzwerte 0 und 5 kp/mm^2 fahren. Übrigens werden bei Kapseltyp 8 (gleicher Aufbau) auch Kapseldrücke von 35 kp/cm^2 erreicht.

Aus der Tabelle ist weiter zu entnehmen, daß unter Annahme des zuvor abgeschätzten Innenkapseldruckes von $6 \text{ kp/cm}^2 \pm 35\%$ erst bei großen Probenbelastungen die zulässige $\pm 10\%$ Fehlergrenze unterschritten wird. Bei kleinen Probenbelastungen ist die Unsicherheit unzulässig groß und eine belastungslose Probe (d.h. Probenbelastung = 0) ist nur rein zufällig zu erreichen.

Das bedeutet, daß vor allem bei kleinen Probenbelastungen die Annahmen nicht mehr so pauschal gemacht werden können, sondern, daß bei der Auslegung für jede Probe ganz konkrete Parameter in die Fehlerbetrachtung eingehen müssen. Dadurch kann man die Fehlergrenze auf den zulässigen Wert eingrenzen. Eine relativ genaue Bestimmung der Probenbelastung ist nach der Bestrahlung möglich, wenn Meßwerte für die Proben temperatur und die insgesamt freigesetzten Spaltgasmengen vorliegen.

5. Spannungsbeanspruchungen im Bestrahlungseinsatz

Für die sicherheitstechnische Beurteilung des Experiments und somit auch der Spannungsbeanspruchungen im Bestrahlungseinsatz werden jeweils die ungünstigsten Verhältnisse in Betracht gezogen. Diese liegen beim Einsatz von UN mit der gegenüber UO_2 höheren Stabileistung vor. Neben den höheren Wärmespannungen in den einzelnen Kapselwänden, treten in der UN-Kapsel auch die höheren Spaltproduktaktivitäten und die höheren Kapseldrücke auf.

5.1 Spannungen in der Brennstoffhülle

Da die dickwandige Hülle des Brennstoffs einseitig offen ist, treten keine Innendrucke, sondern nur Wärmespannungen auf. Die tangentialen Wärmespannungen berechnen sich an der Innenfaser zu

$$\sigma_{th,i} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2(1-\nu)} \cdot f_i$$

und an der Außenfaser zu

$$\sigma_{th,a} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2(1-\nu)} \cdot f_a$$

Hierin bedeuten:

E = Elastizitätsmodul

α = thermische Ausdehnungszahl

Δt = radialer Temperaturabfall in der Rohrwand

ν = Querdehnungszahl (Poisson-Zahl)

Die geometrischen Korrekturfaktoren für die Tangentialspannungen an der Innen- bzw. Außenfaser sind

$$f_i = \frac{2 r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad \text{und}$$

$$f_a = \frac{2 r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_i}} = f_i - 2$$

Nach Einsetzen der Werte für die Mo-Hülle:

$$\left. \begin{array}{l} E \approx 25000 \text{ kp/mm}^2 \\ \alpha \approx 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \text{ für } t_m \approx 1400^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 50 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\nu = 0,32$$

$$r_i = 3,1 \text{ mm}$$

$r_a = 11,5 \text{ mm}$ (Gasspalt 0,75 mm dick)

ergeben sich folgende Werte

$\sigma_{th,i} \approx 8,35 \text{ kp/mm}^2$ (Druckspannung) und

$\sigma_{th,a} \approx 3,6 \text{ kp/mm}^2$ (Zugspannung)

Die Geometriefaktoren errechnen sich zu

$f_i = 1,4$ und $f_a = 0,6$.

Die als Hüllmaterial in Frage kommende Legierung TZM (Mo-0,5 Ti-0,08 Zr) ist für den Einsatz bei hohen Temperaturen geeignet und hat dabei noch besonders gute Zeitstandfestigkeitseigenschaften. Andererseits ist das Material wenig duktil, so daß Streckgrenze und Bruchfestigkeit nahezu gleich sind.

Bei Zugversuchen im IMF sind für 650°C $\sigma_{0,2}$ - bzw. σ_B -Werte von 75 bis 78 kp/mm^2 gemessen worden. Für 1315°C werden in ORNL 3593 für die Zugfestigkeit mindestens 35 kp/mm^2 und für die 100h-Zeitstandfestigkeit mindestens 15 kp/mm^2 angegeben. Die Angaben stimmen auch mit anderen Literaturstellen in etwa überein.

Aus den verfügbaren Unterlagen für die Zeitstandfestigkeit läßt sich für eine max. Betriebszeit von 10.000 Stunden noch ein Wert extrapolieren, der noch über der im ungünstigsten Fall auftretenden Spannung liegt. Das Überschreiten der entsprechenden Festigkeitswerte ist jedoch kein sicherheitstechnisches Problem, da die Brennstoffhülle ohnehin offen ist und ein evtl. Defekt keine zusätzliche Gefahren bringt. Brennstoff und Spaltprodukte sind ja auf jeden Fall von 2 relativ sicheren Hüllen, der inneren und der äußeren Kapsel, umgeben.

5.2 Spannungen in den Kapselwänden

Inneres Kapselrohr: Das innere Kapselrohr ist aus Edelstahl (4541/50), hat 25 mm Innendurchmesser und ist über Nocken im äußeren Kapselrohr von 30 mm Innendurchmesser zentriert.

Die Innenkapsel ist einem Innendruck zwischen 4 und 8 ata und einem äußeren Druck von max. 53 ata ausgesetzt. Die Druckdifferenz beträgt also max. ca. 50 kp/cm^2 . Die Wärmespannungen sind gering.

Die Wanddicke des inneren Rohres beträgt bei der gewünschten Breite des äußeren Gasspaltes von 0,75 mm (0,5 mm bei Betriebstemperatur) 1,75 mm. Da diese Spaltbreite kleiner ist als der Thermoelementdurchmesser, müssen auf dem inneren Kapselrohr Nuten zur Durchführung der 1 mm dicken Mantelthermoelemente eingefräßt werden. Die verbleibende Restwanddicke des inneren Kapselrohres beträgt dann noch 1 mm und der Temperaturabfall ca. 10°C .

Die Wärmespannungen für das Innenrohr errechnen sich daraus zu

$$\sigma_{\text{th}} \approx 2 \text{ kp/mm}^2.$$

Hinsichtlich der Außendruckbeanspruchung ist das Innenkapselrohr als Rohr mit außenliegenden breiten Längsrippen zu betrachten. Eine genaue Berechnung dieses Rohres ist wegen der nicht genau bekannten Ovalitäten und der Kerbwirkungen durch die Längsnuten äußerst schwierig. Wegen des relativ geringen äußeren Überdruckes ist jedoch eine Abschätzung ausreichend.

Nach dem "AD-Merkblatt für die Berechnung von Rohren unter innerem und äußerem Überdruck" kann man für den vorliegenden Fall vereinfacht unter Vernachlässigung der äußeren Verstärkungsrippen folgende empirische Formel für die erforderliche Mindestwanddicke ansetzen:

$$s = \frac{d_a \cdot p}{200 \cdot \frac{\sigma}{S} + p}$$

Hierin bedeuten neben der Wanddicke s:

d_a = effektiver Rohraußendurchmesser = 27 mm

p = äußerer Überdruck 50 kp/cm^2

σ = Zeitstandfestigkeit $\sigma_B/10.000 \text{ h}/550^\circ\text{C} = 20 \text{ kp/mm}^2$
(für Edelstahl 4541/50 bei max. Betriebstemperatur)

S = Sicherheitsbeiwert bei äußerem Überdruck = 2.

Nach Einsetzen der Werte ergibt sich bei zweifacher Sicherheit die erforderliche Wanddicke zu

$$s = 0,66 \text{ mm.}$$

Die gewählte Wanddicke von 1 mm ist also völlig ausreichend und es besteht auch unter Berücksichtigung der geringen Wärmespannungen keine Gefahr für die Innenkapsel, zumal sie durch äußere Längsrippen zusätzlich versteift ist.

Auch einer in (2) genannten Formel für den kritischen Außendruck von Rohren

$$\Delta p_{\text{krit}} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{s}{R_m} \right)^3,$$

worin

$$E = \text{Elastizitätsmodul} = 16000 \text{ kp/mm}^2 \text{ (550}^\circ\text{C)}$$

$$\nu = \text{Querdehnzahl} = 0,3$$

$$S = \text{Wanddicke} = 1 \text{ mm}$$

$$R_m = \text{mittlerer Rohrradius} = 13 \text{ mm}$$

bedeuten, genügt das innere Kapselrohr vollkommen; hieraus ergibt sich ein kritischer Außendruck von ca. 200 kp/cm² (für glattes Rohr).

Äußeres Kapselrohr

Das äußere Kapselrohr ist aus Edelstahl des Werkstoffes Nr. 4571/80 und hat bei 2 mm Wanddicke einen Außendurchmesser von 34 mm. Der Kapselinnendruck beträgt im Betrieb max. 55 ata und der Temperaturabfall im Rohr beträgt für den ungünstigsten Fall (UN) 25°C. Die mittlere Betriebstemperatur liegt bei 70°C.

Die Wärmespannungen errechnen sich daraus zu

$$\sigma_{\text{th}} \approx 6 \text{ kp/mm}^2.$$

Die Spannungen durch Innendruck ergeben sich zu

$$\sigma_p \approx 3,5 \text{ kp/mm}^2.$$

Die Gesamtbeanspruchung des äußeren Kapselrohres liegt also mit $9,5 \text{ kp/mm}^2$ um mindestens den Faktor 2 unterhalb der 0,2%-Dehngrenze für das Kapselmateriale bei Betriebstemperatur.

6. Sicherheitsfragen

6.1 Allgemeines

In sicherheitstechnischer Hinsicht ergeben sich aus diesem Experiment keine Probleme. Dadurch, daß der Brennstab doppelt umhüllt ist, wird das Experiment sicherer als bereits betriebene Bestrahlungsversuche. Die Doppelwandigkeit ist nicht aus Gründen der Sicherheit, sondern aus konstruktiven und praktischen Gründen notwendig. Bei den geringen Mengen an Spaltstoffen und Spaltprodukten in der Kapsel und ihrer geringen Belastung wäre Einwandigkeit vertretbar.

In einigen Fällen ist auch vorgesehen, wie schon bei Kapseltyp 8, innere Kapseln anzubohren, um das Schwellverhalten im unbelasteten Zustand studieren zu können.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, sind die Belastungen beider Kapselwände, der inneren wie auch der äußeren Kapselwand, so gering, daß mit einem Defekt während der Bestrahlung nicht gerechnet werden muß.

Auch von der Korrosion her sind keine Gefahren zu erwarten, da keine Flüssigmetalle, sondern nur Inertgase als Kühlmedien verwendet werden und die Temperaturen der beiden Kapselwände niedrig sind.

Ein Austreten von Spaltprodukten bzw. Brennstoffpartikeln aus dem Kapselversuchseinsatz in das Kühlsystem des Reaktors ist also praktisch auszuschließen; auch wenn die innere Kapsel schadhaft oder bewußt angebohrt sein sollte.

Im übrigen ist auch dieser KVE zu handhaben, auszuwechseln und zu transportieren wie alle früheren Typen, weshalb auch frühere Sicherheitsberichte (3, 4) Grundlage dieses Experimentes sind.

6.2 Temperaturmessung

Die Thermoelemente zur Messung der Probertemperaturen werden in entsprechenden Bohrungen im dickwandigen Mo-Hüllrohr untergebracht. Es wird also eine mittlere Hüllrohrtemperatur gemessen, aus der dann die Brennstofftemperatur ermittelt wird. Bei den gewünschten Brennstoffzentraltemperaturen von 1000 bis 2000°C, die in verschiedenen Kapseln stufenweise verwirklicht werden sollen, sind mittlere Hüllrohrtemperaturen zwischen 700 und 1400 °C zu erwarten. Solange die zu messenden Temperaturen unterhalb 1000 °C liegen, werden Chromel/Alumel-Thermoelemente verwendet, darüber sind Hochtemperatur-Thermoelemente (z.B. Pt/Pt 10 Rh) erforderlich. Entsprechend der gewünschten Temperatur wird jede Probe entweder mit 3 bis 4 Chromel/Alumel-Thermoelementen oder mit 2 bis 3 H.T.-Thermoelementen ausgerüstet. Der Manteldurchmesser der Thermoelemente beträgt max. 1,5 mm.

Bei 3 Probenkapseln je KVE sind 6 bis 10 Thermoelemente aus dem Einsatz herauszuführen. Die H.T.-Thermoelemente haben 4 cm hinter der Meßstelle eine Hülse zur Durchführung durch den Kapselboden. In dieser Hülse befindet sich der Übergang des H.T.-Thermoelements auf eine entsprechende Ausgleichsleitung mit Edelstahlmantel.

Die zu messenden Hüllrohrtemperaturen werden mit vorhandenen 12- bzw. 24-Punktdruckern mit entsprechendem Meßbereich registriert. Es wird empfohlen, dieses Experiment nur mit einem Temperaturgrenzwert zu versehen, nicht aber auf das Sicherheitssystem zu schalten. Einmal ist dies von der Sicherheit her nicht nötig und zum anderen ist gerade bei den H.T.-Thermoelementen u.U. häufiger mit einem Ausfall zu rechnen.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, daß bei thermischen Zyklen (z.B. Reaktorstart) spontan gewisse Mengen an Spaltgasen freigesetzt werden können, die zu einer entsprechenden Verschlechterung des Wärmeübergangs im inneren Gasspalt

und damit zu einer Erhöhung der Proben­temperatur führen. Es können also jeweils nach dem Reaktorstart höhere Temperaturen auftreten als vor der vorangegangenen Abschaltung.

6.3 Spaltproduktinventar

Angaben über die spezifischen Aktivitäten der Kapselmaterialien und Kernbrennstoffe nach Bestrahlung wurden bereits in den früheren Sicherheitsberichten zu Kapselexperimenten gemacht [3, 4, 7]. Die Brennstoffmengen einer Probe sind 16,2 g bei UN und 4 g bei UO_2 ; das eigentliche Spaltstoffgewicht (U 235) beträgt 0,4 g bei UO_2 bzw. 1,3 g bei UN.

Die Gesamt- γ -Aktivität einer UN-Probe errechnet sich für eine mittlere Stableistung von 450 W/cm nach einem Jahr Bestrahlungszeit und 2,4 h nach Abschalten des Reaktors zu ca. 1000 Curie. Das entspricht einer Linienquellstärke von ca. 250 Ci/cm.

Für die UO_2 -Probe mit 170 W/cm mittlere Stableistung ergibt sich nach einem Jahr Bestrahlungs- und 2,4 h Abklingzeit die Gesamt- γ -Aktivität zu ca. 400 Ci; was einer Linienquellstärke von ca. 100 Ci/cm entspricht.

Die Sättigungsaktivität der flüchtigen Spaltprodukte (Edelgase und Halogene) beträgt ca. 340 Ci/g spaltbares Material und ist nach 30 Tagen erreicht.

Eine Probenkapsel enthält also

bei UN ca. 440 Ci und

bei UO_2 ca. 140 Ci

an flüchtigen Spaltprodukten. Davon sind 55% Edelgase und Folgeprodukte und 45% Halogene und Folgeprodukte.

2,4 Stunden nach Abschalten des Reaktors sind je Probe

bei UN noch ca. 200 Ci und

bei UO_2 noch ca. 60 Ci

an flüchtigen Spaltprodukten vorhanden.

Nach 10 Tagen ist die Aktivität der flüchtigen Spaltprodukte auf ca. 10% der für 2,4 h Abklingzeit angegebenen Werte abgesunken.

Der Anteil an Jod 131 beträgt

	zum Zeitpunkt des Reaktorabschaltens	nach 8 Tagen
für eine UN-Probe	ca. 16 Ci	ca. 8 Ci
und für eine UO ₂ -Probe	ca. 5 Ci	ca. 2,5 Ci

Literatur

Bei den im Text aufgeführten Literaturstellen /⁻1_7
bis /⁻4_7 handelt es sich um interne Berichte.

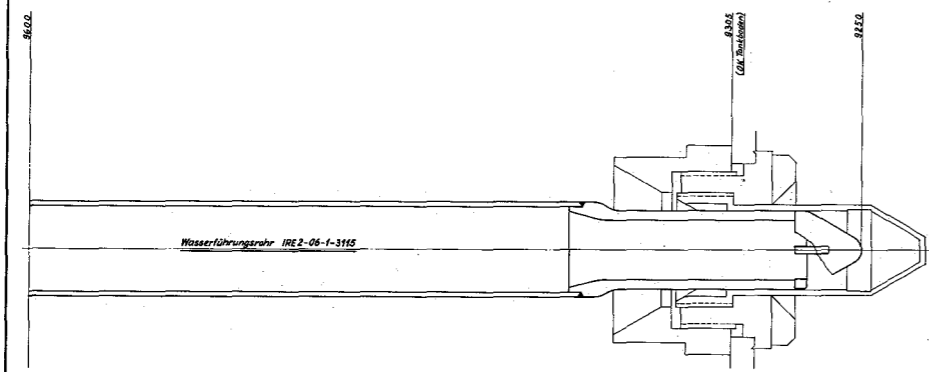
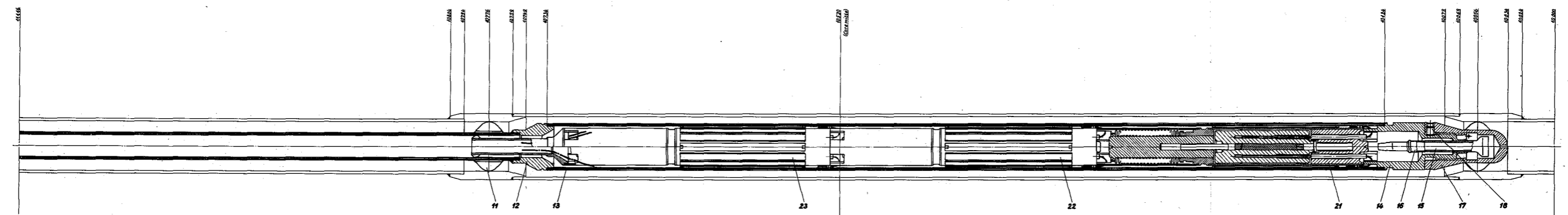
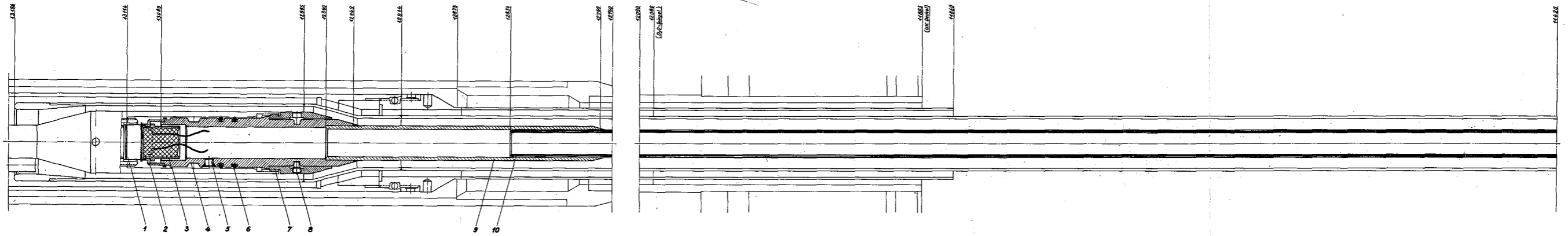


Abb. 1

Teil	Bezeichnung	Messstoff	Abmessung	Zeichn.-Pr. Num.	Bezeichnung	Material	Abmessung	Bezeichnung	Material
11	Schuttschirm	—	—	—	—	—	—	—	—
12	Schuttschirm	—	—	—	—	—	—	—	—
13	Schuttschirm	—	—	—	—	—	—	—	—
14	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
15	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
16	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
17	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
18	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
19	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
20	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
21	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
22	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—
23	Strahlungsquelle	Co-60	Ø 16 x 100	—	—	—	—	—	—

Achtung! Die Noten gelten für den kalten Zustand der Kapsel im FR 2!

1:1 FR 2 - Bestrahlungskapsel Typ 9 INF-06-0-4053

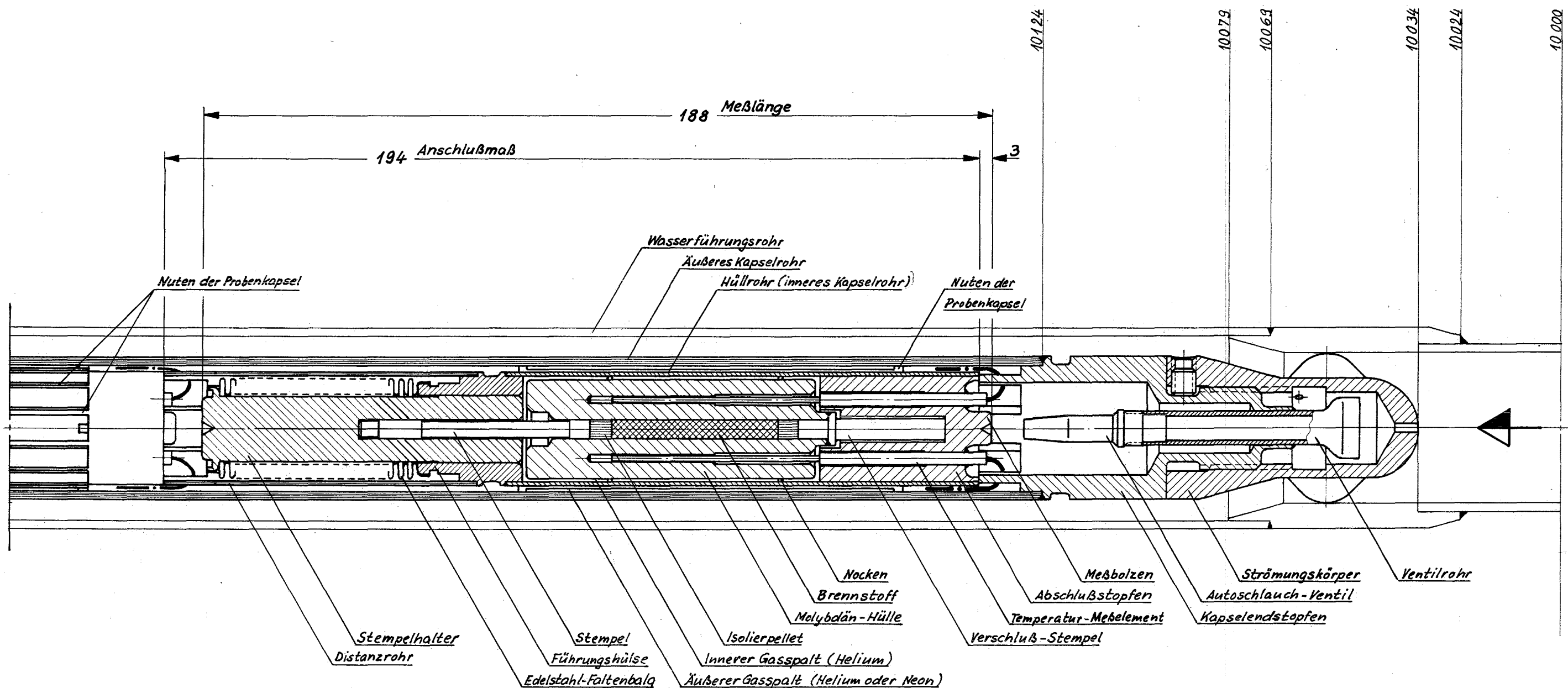


Abb. 2

1971	Tag	Name	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zchnng.
gez.	23. 3.	<i>W. Rätzky</i>		Ersatz für
gepr.				Ersetzt durch
ges.				Zeichnungs-Nr.
Maßstab	Benennung			
1:1	Schwellprobeneinsatz			IMF-06-3-4054

Temperaturdifferenzen in den einzelnen Kapselschichten Brennstoffhüllentemp. und Gasspaltvolumen in Ab- hängigkeit von der Gasspaltbreite

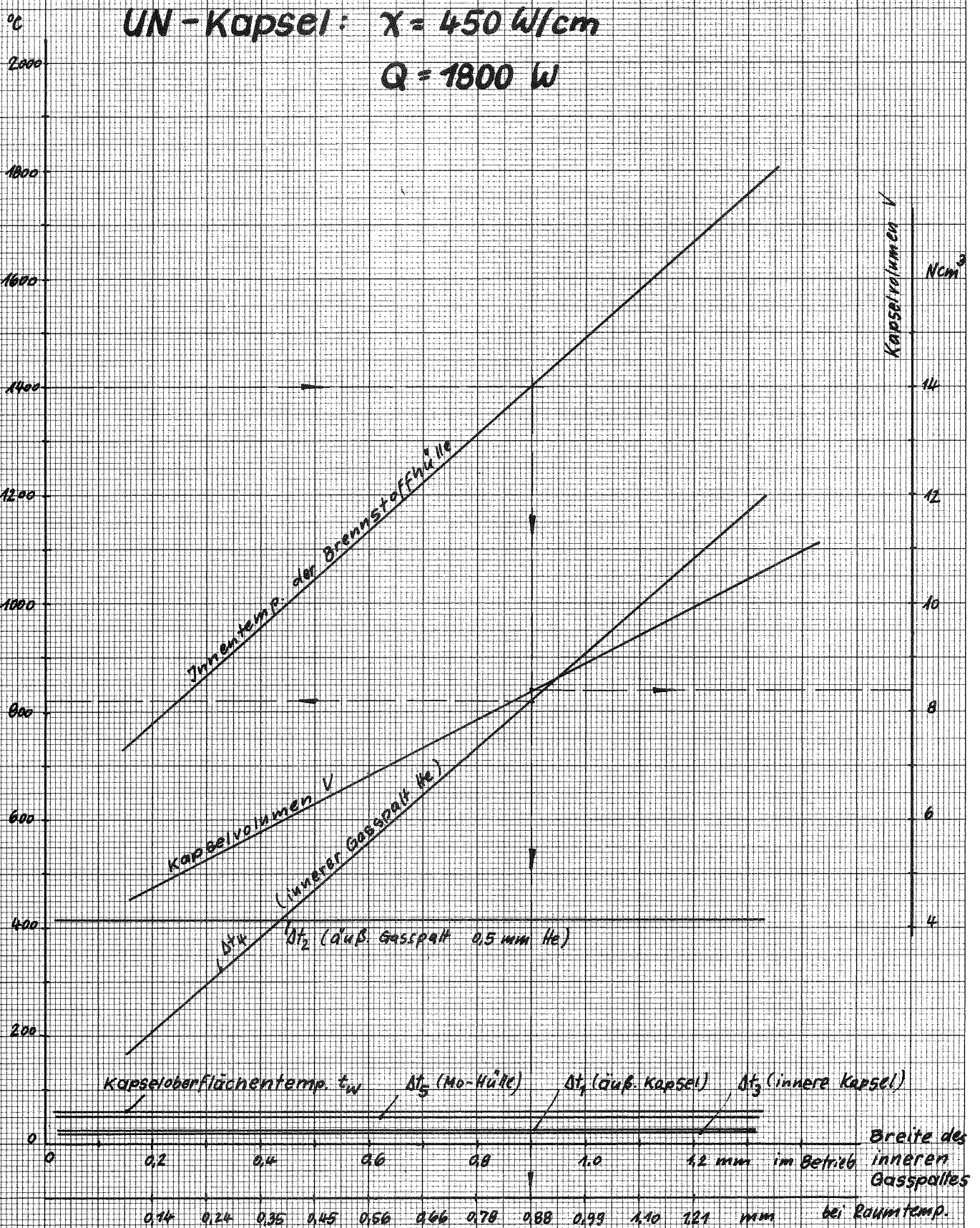


Abb. 3

Temperaturdifferenzen in den Kapselschichten Brennstoffhüllentemp. und Gasspaltvolumen in Ab- hängigkeit von der Gasspaltbreite

UO₂-Kapsel: $\chi = 170 \text{ W/cm}$

$Q = 680 \text{ W}$

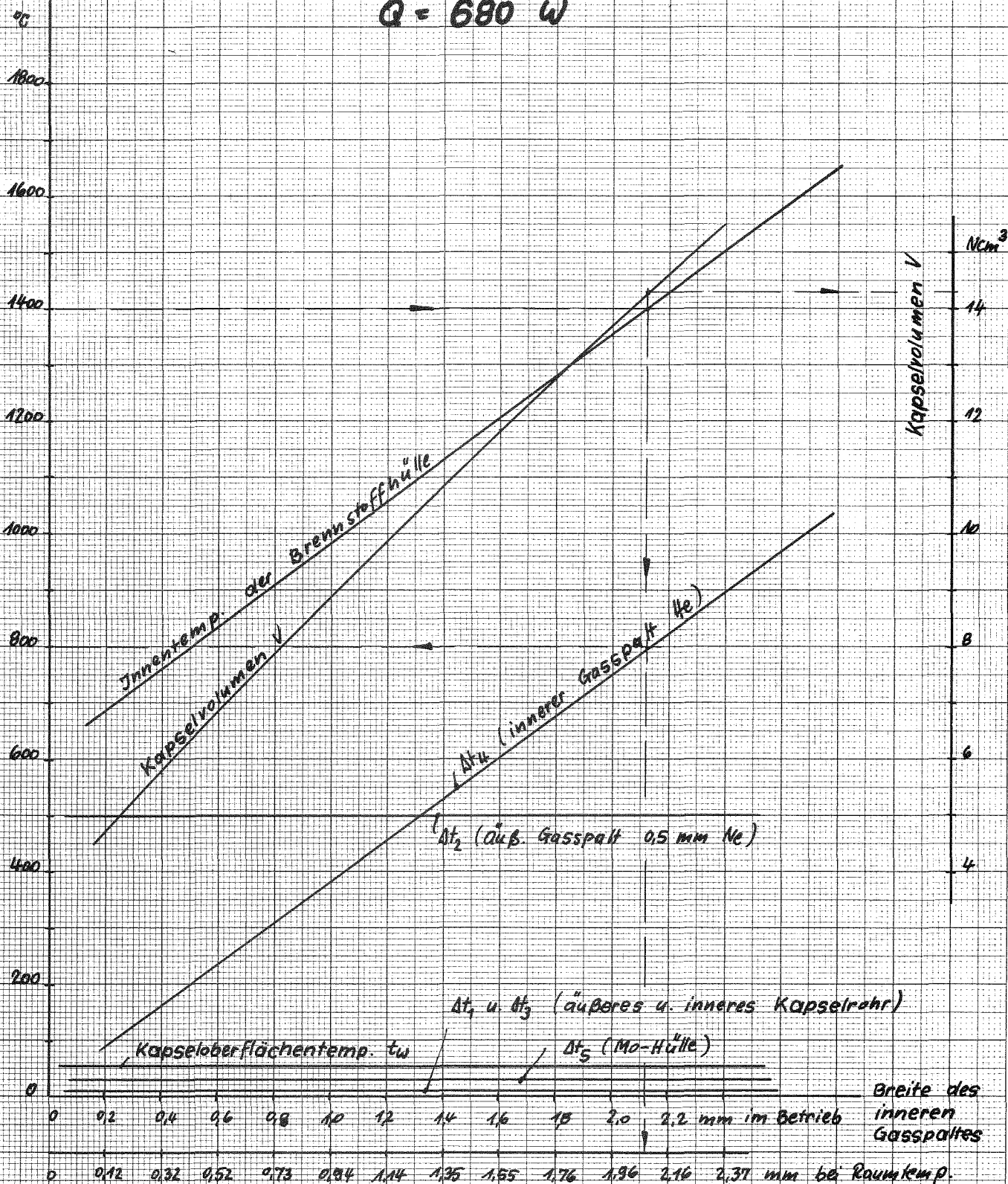


Abb. 4

Radialer Temperaturverlauf in einer UN-Schweil kapsel

$$\chi = 450 \text{ W/cm}$$

$$Q = 1800 \text{ W}$$

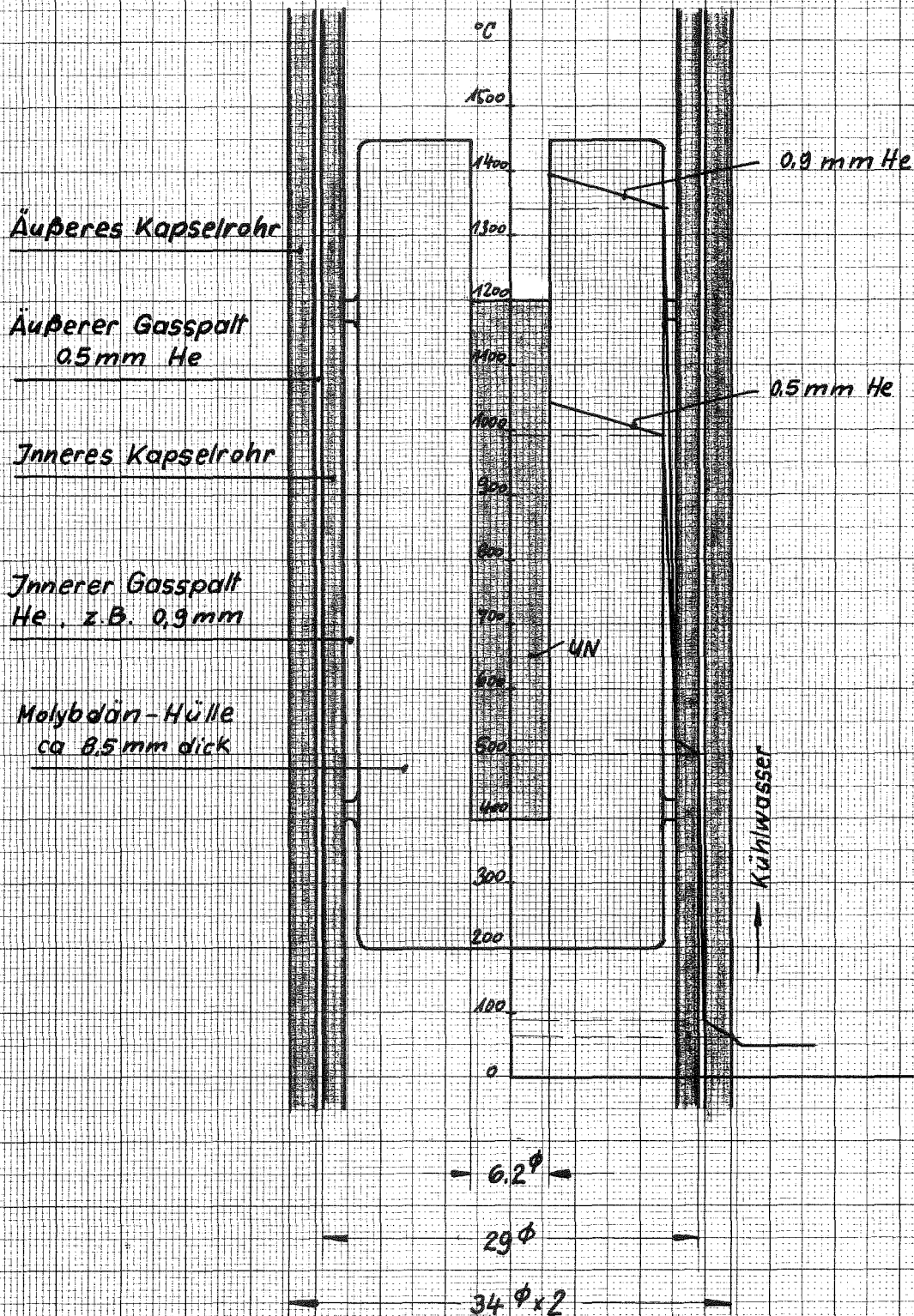


Abb. 5

Radialer Temperaturverlauf in einer UO_2 -Schwellkapsel

$\lambda = 170 \text{ W/cm}$

$Q = 680 \text{ W}$

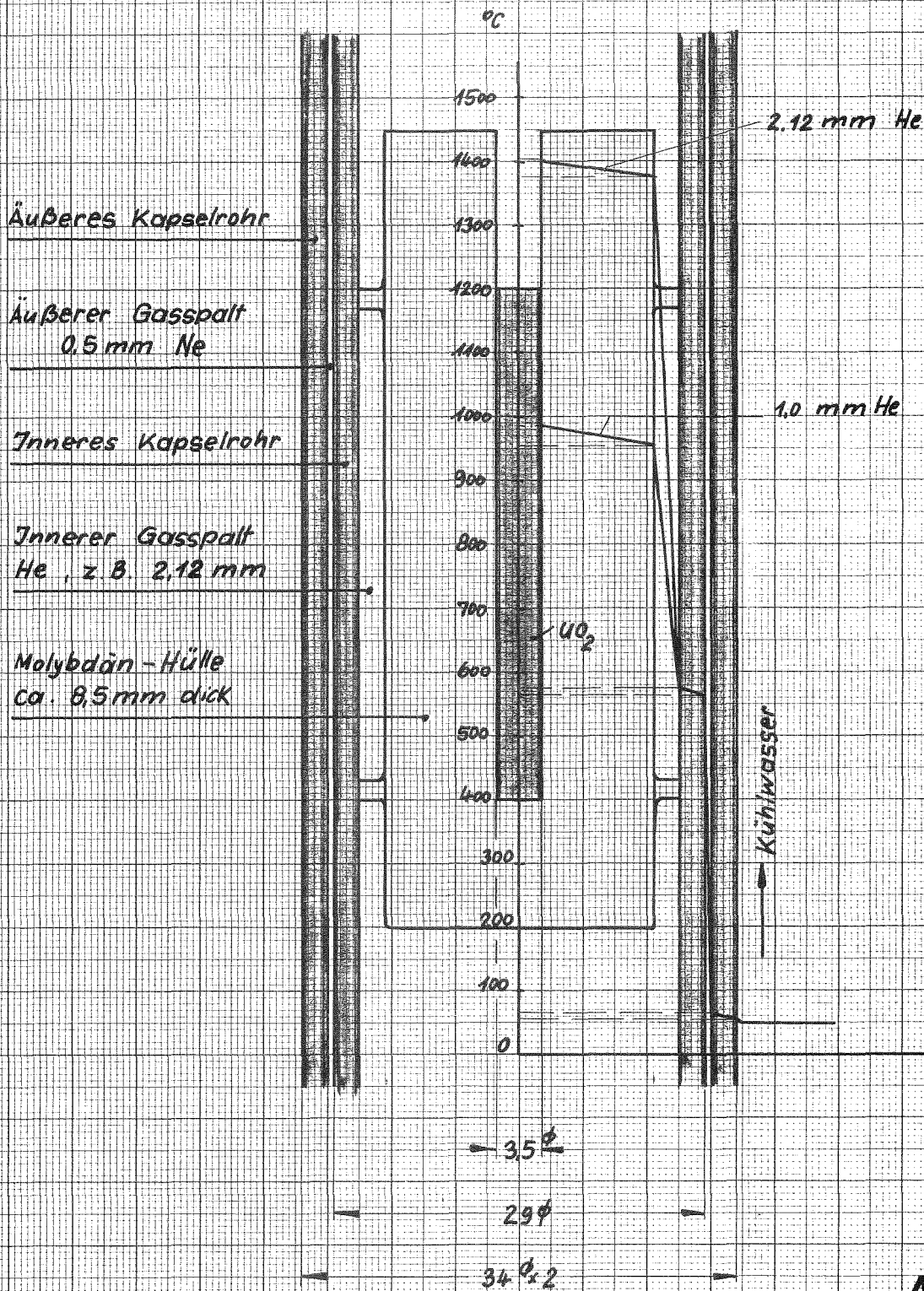


Abb. 6