

KfK 2882
Februar 1980

Abschlußbericht über Entwicklung und Betrieb von instrumentierten Bestrahlungskapseln für Kriechexperimente an Kernbrennstoffen im FR2

H. E. Häfner, K. Philipp, M. Blumhofer
Institut für Material- und Festkörperforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KfK 2882

Abschlußbericht über Entwicklung und Betrieb von instrumentierten
Bestrahlungskapseln für Kriechexperimente an Kernbrennstoffen im FR2

H.E. Häfner, K. Philipp, M. Blumhofer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Z u s a m m e n f a s s u n g :

Mit dem Kapselversuchseinsatz Nr. 154 ist im April 1979 der letzte Bestrahlungseinsatz einer langen Serie von Kriechexperimenten aus dem FR2 entladen worden. Das Ziel der genau zehn Jahre zuvor begonnenen Bestrahlungsversuche war die Untersuchung des Kriechverhaltens verschiedener keramischer Kernbrennstoffe bei unterschiedlichen Bedingungen unter Bestrahlung im Reaktor. Dafür war ein Bestrahlungseinsatz mit kontinuierlicher Messung der Längenänderungen von Brennstoffproben entwickelt worden.

Insgesamt sind im FR2 in diesen zehn Jahren 28 Kapselversuchseinsätze mit jeweils zwei Kriechprobenpaketen bestrahlt worden. Darunter waren

- 23 Probenstapel aus UO_2 ,
 - 16 Probenstapel aus UO_2 - PuO_2 ,
 - 4 Probenstapel aus UN,
 - 10 Probenstapel aus (U, Pu) C
- und 3 Vergleichsproben aus Molybdän.

Der Bericht gibt neben der Beschreibung der Versuchseinrichtung hauptsächlich einen Überblick über die Betriebsdaten der Proben und über die Betriebserfahrungen sowie über die Befunde der Nachbestrahlungsuntersuchungen.

S u m m a r y :

Final Report on Development and Operation of Instrumented Irradiation Capsules
for Creep Experiments on Nuclear Fuels at FR2

The capsule test rig No. 154 removed from FR2 in April 1979 was the last irradiation rig in a long series of creep experiments. The target of the irradiation tests, started exactly ten years ago, was to investigate the creep behavior of various ceramic nuclear fuels under different in-pile irradiation conditions. An irradiation test rig had been developed for this purpose which allowed the continuous measurement of changes in length of fuel specimens.

A total of 28 capsule test rigs each containing two packages of creep specimens have been irradiated in FR2 during this decade. They included

23 specimen stacks of UO_2 ,
16 specimen stacks of UO_2 - PuO_2 ,
4 specimen stacks of UN,
10 specimen stacks of (U, Pu) C,
and 3 reference specimens of molybdenum.

Besides the description of the test facility, the report provides above all a survey of the operation data applicable to the specimens and of the operating experience gathered as well as of the findings obtained in post-irradiation examinations.

Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabenstellung und Allgemeines
2. Kurze Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes
 - 2.1 Allgemeiner Aufbau
 - 2.2 Die Kriechprobenkapsel
3. Meßprinzip und Eichung der Verlagerungsaufnehmer
4. Montageplan für die Versuchseinsätze
5. Betriebserfahrungen und -ergebnisse
 - 5.1 Allgemeine Übersicht
 - 5.2 Betriebserfahrungen mit den Kriechprobenkapseln
 - 5.3 Erfahrungen mit den Verlagerungsaufnehmern
 - 5.4 Nachuntersuchungsbefunde an den Kriechprobenkapseln
6. Literatur
7. Abbildungen 1 bis 19

1. Aufgabenstellung und Allgemeines

Die Auslegung fortschrittlicher Brennelemente für schnelle Brutreaktoren mit hohen Abbränden verlangt ein vertieftes Verständnis der Kriech- bzw. Schwelleigenschaften der Kernbrennstoffe. Aus diesem Grund wurde im Institut für Material- und Festkörperforschung im Jahre 1968 nach einer Analyse der verfügbaren Literatur die Untersuchung des Kriechens potentieller Kernbrennstoffe aufgenommen. Es wurde ein Bestrahlungsprogramm erstellt, das neben einfachen Versuchen zur halbquantitativen Bestimmung der Kriechraten an kleinen Brennstoffproben in damals schon verfügbaren Kapseln die Entwicklung einer Einrichtung zur kontinuierlichen Messung des Brennstoffkriechens vorsah. Dabei wurde dem Umstand Rechnung getragen, daß in-pile-Versuche gerade bei Temperaturen unter 1.200°C wichtig sind, weil hier bei höheren Spaltungsraten ein überwiegender strahlungsinduzierter Anteil des Kriechens zu erwarten war.

Das Ergebnis der Entwicklung war ein Versuchseinsatz für den FR2, der es gestattet, bei axialer pneumatischer Druckbelastung an zwei Probenpaketen in-pile deren Längenänderungen mittels strahlenbeständiger induktiver Verlagerungsaufnehmer (Differentialtransformatoren) kontinuierlich zu messen /1, 2/. Eine erste sogenannte "Instrumentierte Brennstoffkriechkapsel" (interne Bezeichnung: FR2-Kapseltyp 8) ging als Kapselversuchseinsatz (KVE) 54 im Mai 1969 in Betrieb. Die FR2-Bestrahlungen wurden später ergänzt durch einige weitere Bestrahlungen im SILOE-Grenoble und BR2-Mol /3/.

Die wesentlichen Anforderungen an diese Versuchseinrichtung sollen hier noch einmal genannt werden:

- Bestrahlung auf BE- und Zwischengitterpositionen im FR2
- Zwei instrumentierte Proben in einer Kapsel
- Leistungsdichte im Brennstoff bis 4.500 W/cm^3
- Brennstofftemperatur 200 bis 1.000°C
- Probenbelastung bis $50 \text{ N/mm}^2 \pm 10 \%$
- Bestrahlungszeit zunächst vorgesehen 1.000 bis 2.500 h
später erreicht bis 9.200 h
- Zerbröckeln der Brennstofftabletten möglichst vermeiden
- Längenänderungen in-pile mit hoher Genauigkeit messen
- Funktionstüchtigkeit des Meßsystems bis zu thermischen Dosen von mindestens 10^{21} cm^{-2}

- Temperaturen und Längenänderungen kontinuierlich messen und registrieren
- Parameter von Kapsel zu Kapsel veränderlich

Eine Veränderung bzw. Regelung der Probertemperatur und der Probenbelastung während des Betriebs war zum Zeitpunkt der Planung dieses Experiments noch nicht vorgesehen. Damit hätte ein größeres Parameterfeld mit einem Bestrahlungseinsatz abgedeckt werden können. Es hätten aber entsprechende Gasleitungen von einer out-of-pile-Einrichtung in die Bestrahlungseinsätze geführt werden müssen. Das war jedoch bei den beengten Platzverhältnissen im Deckelzwischenraum zwischen den Brennelementköpfen am FR2 äußerst schwierig. Dieser Mangel konnte aber dadurch gemildert werden, daß in einem KVE zwei Proben untergebracht werden konnten und eine größere Zahl von Bestrahlungseinsätzen dieser Art zu vertreten war, weil wesentliche Teile wiederverwendbar waren. Außerdem ist in dem großen Core des FR2 eine gewisse Flexibilität in der Einstellung der Probertemperatur über die Leistung durch Wahl der Bestrahlungspositionen gegeben.

Als dann schließlich doch eine temperatur- und druckgeregelte Bestrahlungskapsel in Angriff genommen wurde (Abb. 1), kam der Verwirklichung der Stilllegungsbeschuß für den FR2 zuvor. Die Arbeiten zu diesem Vorhaben sind in einer internen Notiz vom Februar 1976 festgehalten.

2. Kurze Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes

2.1 Allgemeiner Aufbau

Der allgemeine Aufbau ist bei allen FR2-Kapseltypen gleich. Ein KVE setzt sich zusammen aus der ca. 3 m langen Bestrahlungskapsel, die im unteren Teil die Proben enthält, dem wiederverwendbaren Oberteil und einer Kühlwasserföhrungseinheit.

Der KVE hat eine Gesamtlänge von ca. 6,5 m und an seiner dicksten Stelle - im Bereich des Oberteils, das im wesentlichen zur oberen Coreabschirmung und zur Durchföhrung der Meßleitungen dient - einen Durchmesser von ca. 70 mm (Abb. 2).

Das Kühlmittel (D_2O) strömt unten aus dem Doppelboden des Reaktors in das Wasserföhrungsrohr ein, entlang der Kapsel nach oben, wird dort umgelenkt und läuft in den Moderatorraum zurück (Abb. 3).

Wie die Abbildung 4 zeigt sind jeweils zwei Kriechprobeneinsätze mit einer Gesamtlänge von ca. 40 cm im unteren Teil der Bestrahlungskapsel im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums angeordnet. Von hier aus werden im Kapselrohr von 30/34 mm \varnothing die Thermoelemente und sonstigen Leitungen zur Steckerdurchführung am oberen Ende der Bestrahlungskapsel geführt, wo der Anschluß zum Oberteil über eine Schraubhülse hergestellt wird.

Von den Steckern am Einsatzkopf gehen die Meßleitungen zum Meßschrank in der Reaktorhalle.

Außer den Meßwerten für Temperatur und Längenänderungen der Proben wird auch die Kühlmittelaustrittstemperatur überwacht. Darüber hinaus ist im KVE wie in jedem BE eine Aktivitätsüberwachung eingebaut. Über das sogenannte Canschädenrohr werden in einem 25-minütigen Rhythmus Proben entnommen und auf Aktivität untersucht.

2.2 Kriechprobenkapsel

Die Kriechprobenkapsel ist stark schematisiert in Abbildung 5 dargestellt:

Die eigentliche Kriechprobe ist ein Stapel von etwa 20 mm Höhe aus abwechselnd Brennstoffringen und Molybdänringen von je ca. 1 bis 5 mm Höhe und ca. 5 mm Durchmesser, die auf einem zentralen Thermoelement aufgefädelt sind (siehe auch Modell in Abb. 6 und 7). Durch diese abwechselnde Stapelung kann der Temperaturgradient im Brennstoff flach gehalten und ein Zerbröckeln des Brennstoffs weitgehend vermieden werden. Die Druckbelastung des Probenstapels erfolgt in axialer Richtung. Sie wird durch einen entsprechenden Gasdruck in der äußeren Kapsel (maximal 35 bar) eingestellt, die die beiden gasdichten Probenkapseln umgibt. Um eine möglichst gleichmäßige Probentemperatur zu erreichen, sind die Probenkapseln mit Natrium oder Natrium-Kalium gefüllt. Das Flüssigmetall wird durch einen Einfüllstutzen in die Probenkapsel gedrückt, der auf dem Druckübertragungstück sitzt. Nach dem Einfüllvorgang wird dieser Stutzen durch Schweißung dicht verschlossen.

Die Probentemperatur kann durch Änderung der Breite der Gasspalte bzw. durch Wahl des Gases eingestellt werden. Es liegt jeweils ein Gasspalt definierter Breite zwischen Probenkapsel und Formkörper sowie zwischen dem Formkörper und dem äußeren Kapselrohr. Übrigens wird der Gasdruck in der äußeren Druckkapsel über ein normales Autoschlauchventil in die Kapsel eingespeist, das danach dicht verschlossen wird.

In den Boden der Probenkapsel sind vier einseitig geschlossene Tauchröhrchen von 2 mm Außendurchmesser eingeschweißt, die die Thermoelemente zur Messung der Temperaturen im Flüssigmetall und im Brennstoffzentrum aufnehmen. Die Proben-temperatur kann durch diese Thermoelemente hinreichend genau ermittelt und verfolgt werden.

Unmittelbar oberhalb des Probenstapels ist im Druckstempel eine winzige Cobalt-Sonde zur nachträglichen integralen Bestimmung des Neutronenflusses bzw. Abbrandes untergebracht.

Der induktive Wegaufnehmer ist in den sogenannten Formkörper eingepreßt, der seinerseits gut im äußeren Kapselrohr eingepaßt ist, so daß die Temperatur der Spulen nur wenig über der Kühlwassertemperatur ($< 100^{\circ}\text{C}$) liegt. In den Nuten des Formkörpers werden die Anschlußleitungen und Thermoelemente verlegt.

Der sogenannte Wegaufnehmerkern im Zentrum der Wegaufnehmerspule steht über das Druckübertragungsstück und den Faltenbalg mit dem Probenstapel in Verbindung und macht jede Längenänderung mit. Da die Temperatur des verschiebbaren Kerns für die Genauigkeit der Längenänderungsmessung entscheidend ist, wird auch hier ein Thermoelement angebracht. Die Temperatur des Kerns kann bis zu 300°C betragen.

Das besondere an dieser Einrichtung liegt einmal darin, daß das Meßsystem unmittelbar an der Probe sitzt. Dadurch treten nur relativ geringe Beträge thermischer Dehnungen an den einzelnen Komponenten auf und die Meßgenauigkeit wird besonders gut. Zum anderen ist es mit diesem Meßsystem möglich, zwei Proben in einer Kapsel unterzubringen.

Eine ausführlichere Beschreibung der Bestrahlungseinrichtung ist in einer internen Notiz (IRE-Notiz Nr. 25/1968) enthalten.

3. Meßprinzip und Eichung der Verlagerungsaufnehmer

Im Jahr 1968 wurden zunächst in einem Auswahlverfahren mögliche in-pile-Dehnungsmeßmethoden auf ihre Tauglichkeit für die beabsichtigten Kriechexperimente im FR2 überprüft. Die Entscheidung ist zugunsten der sogenannten Differentialtrafos gefallen /4/. Dabei schienen sich von Anfang an die LVDT (Linear Variable Differential Transducer) der Firma Schaevitz, USA, in strahlenbeständiger Ausführung zu eignen. Das Meßprinzip dieser Differentialtrafos sei im folgenden noch einmal genannt (Abb. 8):

An die Primärspule wird eine frequente Spannung V_1 angelegt, die in den beiden Sekundärspulen eine von der Stellung des Kerns abhängige Spannung induziert. Wenn sich z.B. der Kern nach links bewegt, wird die magnetische Kopplung von der Primärspannung zur Sekundärspannung V_2 verbessert und im gleichen Maße V_3 verschlechtert. Durch Gegeneinanderschaltung von V_2 und V_3 entsteht ein linearer Zusammenhang zwischen ΔV und der Stellung des Kerns. Die Summe $V_2 + V_3$ ist dagegen konstant, solange man sich im linearen Bereich bewegt, und solange kein Temperatur- oder Strahleneinfluß vorliegt. Durch Messen und Kontrollieren der Summenspannung läßt sich also die Betriebsbereitschaft des Meßwertgebers überprüfen.

Da der Wegaufnehmer direkt an der Probe im Core sitzt, ist zumindest der Kern starken Temperatureinflüssen ausgesetzt. Deshalb muß vor dem Einbau jeder Aufnehmer individuell einer eingehenden Untersuchung unterzogen werden, um die optimalen Betriebsparameter, Primärspannung V_1 und Speisefrequenz, festzulegen. So ergibt sich z.B. eine Speisefrequenz, bei der der Einfluß der Kerntemperatur auf das Meßergebnis ein Minimum darstellt. Außerdem wird durch Verwendung eines speziellen Kernwerkstoffes (1.4724) der Temperatureinfluß auf die Permeabilität und damit auf das Meßsignal klein gehalten. Die Eichung des Verlagerungsaufnehmers wird bei verschiedenen Kerntemperaturen in Stufen zwischen Raumtemperatur und ca. 250°C durchgeführt. Die Temperatur der Wicklungen selbst wird durch die beschriebene Anordnung des Aufnehmers niedrig gehalten. Die zulässige Temperatur für die Drahtwicklungen des Differentialtrafos beträgt ca. 250°C . Die verwendeten induktiven Verlagerungsaufnehmer weisen einen Längenänderungs-Meßbereich von $\pm 0,5$ bis $1,0$ mm auf, in dem die Meßspannung um höchstens $0,2\%$ von der Proportionalität mit der Längenänderung abweicht. Um ähnliche Temperaturverteilungen wie im Bestrahlungsversuch zu erhalten, werden bei der Eichung Kern und Spulenkörper des Verlagerungsaufnehmers durch eine geeignete Heizvorrichtung auf verschiedenen Temperaturen gehalten. Die Prüfvorrichtung läßt die Verschiebung des Kerns mit einer Genauigkeit von $\pm 2\ \mu\text{m}$ zu.

Im unteren Teil der Abbildung 8 ist als Beispiel ein aufgenommenes Eich-Diagramm mit der Kerntemperatur als Parameter dargestellt. Die Genauigkeit des Meßsystems wird trotz allen Optimierungsversuchen durch den Temperaturgang bestimmt und beträgt etwa $\pm 5\ \mu\text{m}$. Abbildung 9 zeigt den out-of-pile-Meßschrank im FR2-Reaktor-gebäude, mit dem sowohl die Thermoelementanzeigen als auch die Verlagerungen für gleichzeitig vier Kriechprobeneinsätze kontinuierlich registriert werden können.

Auf nähere Einzelheiten über die out-pile-Anlage soll hier nicht eingegangen werden. Sie wurden ebenso wie eine Reihe von Einzelheiten über Eichversuche an den LVDT in verschiedenen internen Notizen von H. Will festgehalten.

4. Montageplan für die Versuchseinsätze

Bei der Montage der Probenkapseln ist zu unterscheiden, ob es sich um relativ einfach zu handhabende Brennstoffe handelt oder um plutoniumhaltige oder auch karbidische Brennstoffe. Wegen der bekannten Handhabungsprobleme mit Plutonium und der Notwendigkeit, Karbidbrennstoff unter Schutzgas zu handhaben, sind hier besondere Maßnahmen zu treffen und einzelne Montageschritte zu ändern. Plutoniumhaltige und karbidische Brennstoffe mußten in einer Box montiert und eingeschweißt werden, weshalb als Flüssigmetall das bei Raumtemperatur schon flüssige NaK verwendet werden mußte. Bei den einfacher zu handhabenden UO_2 - und UN-Proben konnte dagegen sowohl NaK als auch Na eingesetzt werden. In diesem Fall wird in einer speziellen Vorrichtung in einem Arbeitsgang das Flüssigmetall eingefüllt und die Probenkapsel induktiv zugeschmolzen /9/.

Im folgenden werden die einzelnen Schritte zur Montage der kompletten Bestrahlungskapsel kurz aufgelistet. Die Arbeitsschritte unter a) und d) sind bei jedem Brennstoff notwendig.

Bei der Montage mit nichtplutoniumhaltigen Brennstoffen kommt Abschnitt b) hinzu, der bei plutoniumhaltigen bzw. Karbidbrennstoffen durch Abschnitt c) ersetzt wird.

- a) 1) Einschweißen der Endstopfen in die Tauchrohre zur Thermoelementaufnahme.
- 2) Einschweißen der Tauchrohre in den Natriumbehälterboden.
- 3) Dichtheitsprüfung (Vorrichtung; Leckrate maximal 10^{-6} Torr·l/s).
- 4) Einschweißen des Faltenbalgs mit seinen Stutzen in das Führungsstück und die Natriumbehälterwand.
- 5) Dichtheitsprüfung (Vorrichtung; Leckrate maximal 10^{-6} Torr·l/s).
- 6) Schweißnaht Natriumbehälterwand/Natriumbehälterboden.
- 7) Dichtheitsprüfung (Vorrichtung; Leckrate maximal 10^{-6} Torr·l/s).

- b) 8) Einfüllen der Brennstofftabletten und der weiteren Innenteile mittels Hilfswerkzeugen in die Natriumbehälter-Baugruppe.
- 9) Einlegen der Kobalt-Sonde in den Druckendstopfen.
- 10) Einschrauben des Druckendstopfens bis zur Anlage an Brennstoffsäule, Einstellung der Vorspannung des Faltenbalgs und Durchführung der Lippenschweißung.
- 11) Gewichtskontrolle vor Flüssigmetallfüllung.
- 12) Flüssigmetallfüllung der Probenkapsel und zuschmelzen des Halses des Einfüllstopfens durch induktives Abschmelzen der Aufhängung am Gewinde.
- 13) Gewichtsbestimmung der Kapsel wegen Flüssigmetallmenge.
- 14) Mechanische Endbearbeitung des Einfüllstopfens am Gewinde M 6x0,5.
- 15) Dichtheitsprüfung, Röntgenprüfung.

- c) 8) Einschleusen der Einzelteile Natriumbehälter-Baugruppe, Druckendstopfen und Schutzkappe in die Inaktivbox, einschleusen von Auflagehülse, Brennstoff- und Zwischenplättchen sowie Druckstück in die Aktivbox im Pu-Labor.
- 9) Einbau der Innenteile mit Hilfe der Füllvorrichtung.
- 10) Einschrauben des Druckendstopfens bis zur Anlage an Brennstoffsäule, Einstellung des Vorspannung des Faltenbalgs, aufschrauben der Schutzkappe auf den Druckendstopfen in der Inaktivbox.
- 11) Ausschleusen aus der Inaktivbox, Kontaminationskontrolle.
- 12) Gewichtsbestimmung der Kapsel wegen Flüssigmetall-Menge.
- 13) Einschleusen der Behälterbaugruppe, des Verschlusstifts, des NaK-Vorratsbehälters und der Injektionsspritze in die Schweißkammer.
- 14) Schweißnaht Führungsstück/Druckendstopfen.
- 15) NaK-Füllung mittels Injektionsspritze in der Schweißkammer.
- 16) Verschluss des Einfüllstopfens mit kegeligem Verschlusstift.
- 17) Dichtschweißung des Druckendstopfen-Halses (Füllhals).
- 18) Ausschleusen der Brennstoffkapsel aus der Schweißkammer, Kontaminationskontrolle.
- 19) Gewichtskontrolle (Nachprüfung der eingefüllten NaK-Menge).
- 20) Dichtheitsprüfung, Röntgenprüfung. +)

- d) 21) Verlöten von Verbindungsstück, Wegaufnehmerkern und Thermoelement.
- 22) Einbringen der Wegaufnehmer-Spule in den Formkörper.
- 23) Einführen der Steckmuffe, befestigen mit Schrauben.
- 24) Einschrauben der Druckhülse, fest anziehen.

- 25) Zusammenbau von Zwischenstück und Kabel-Durchführungsrohr.
- 26) Kabel des oberen Wegaufnehmers durch Kabel-Durchführungsrohr hindurchführen, Zwischenstück fest aufchieben und Kabel zurechtbiegen, Widerstände messen.
- 27) Distanzhülse auf unteren Wegaufnehmer aufsetzen.
- 28) Kabel des unteren Wegaufnehmers durch Kabel-Durchführungsrohr führen und in entsprechender Länge zurechtbiegen, Widerstände messen.
- 29) Nach Kabelträgerrohr alle Kabel auf Länge abschneiden.
- 30) Zusammengebaute Körper wieder trennen, oberen Wegaufnehmerkern mit dem TE voran durch den oberen Aufnehmer führen.
- 31) Auf obere Brennstoffkapsel Kontermutter und Wegaufnehmerkern aufschrauben, Länge 143 mm von OK Kern bis Planfläche Natriumbehälterboden.
- 32) Obere Brennstoffkapsel in Formkörper einführen und festschrauben, Kernstellung kontrollieren und eventuell berichtigen.
- 33) Unteren Wegaufnehmerkern mit dem TE voran durch den unteren Aufnehmer führen.
- 34) Auf untere Brennstoffkapsel Kontermutter und Wegaufnehmerkern aufschrauben, Länge 143 von OK Kern bis Planfläche Natriumbehälterboden.
- 35) Untere Brennstoffkapsel in Formkörper einführen und festschrauben, Kernstellung kontrollieren und eventuell berichtigen.
- 36) TE des unteren Wegaufnehmerkerns durch Kabel-Durchführungsrohr durchführen.
- 37) Sechs TE durch Kabel-Durchführungsrohr hindurchführen.
- 38) Obere Na-Kapsel mit drei TE versehen (Zeichnung: Montageplan), weich einlöten, am Ende bezeichnen.
- 39) Unteren Formkörper mit Distanzhülse aufstecken, Kabel und TE am oberen Formkörper fixieren.
- 40) Untere Kapsel mit drei TE versehen (Zeichnung: Montageplan), weich einlöten, am Ende bezeichnen.
- 41) Kabel und TE ausrichten und sichern.
- 42) Schweißnaht Verbindungsrohr/Verbindungsmuffe.
- 43) Schweißnaht Kapselrohr/Verbindungsmuffe.
- 44) Schweißnaht Kapselrohr-Baugruppe/Verbindungskonus.
- 45) Dichtheitsprüfung der Baugruppe.
- 46) Schweißnaht Kapselendstopfen/Zwischenröhrchen.
- 47) Einlöten des Rückschlagventilkörpers in das Ventilrohr.
- 48) Dichtheitsprüfung bei eingeschraubtem Ventileinsatz.

- 49) Einschweißen der Ventilrohr-Baugruppe in die Kapselendstopfen-Baugruppe.
 - 50) Dichtheitsprüfung.
 - 51) Einführen aller Kabel und TE von unten in die Kapselrohr-Baugruppe.
 - 52) Einreiben der Formkörper mit Molykote Paste "G".
 - 53) Einschieben der beiden Formkörper, nachdem auf den unteren eine Distanzhülse und der Kapselendstopfen aufgesetzt wurde, bis zum Anschlag des Kapselendstopfens.
 - 54) Aufsetzen des Kabelträgerrohres, verstiften, befestigen der Kabel und TE besonders bei den Rippen des Kabelträgerrohres.
 - 55) Schweißnaht Kapselträgerrohr/Zentrierring.
 - 56) Zusammenstecken von Kapselrohr-Baugruppe und Kapselträgerrohr-Baugruppe.
 - 57) Schweißnähte Kapselträgerrohr/Verbindungskonus und Kapselrohr/Kapselendstopfen.
 - 58) Wendeln der Kabelenden für den Anschluß am druckdichten Stecker.
 - 59) Verschweißen von Kapselkopf und Verlängerungsrohr.
 - 60) Dichtheitsprüfung der Baugruppe.
 - 61) Befestigen der Schraubhülse auf dem Kapselkopf.
 - 62) Vorsichtiges Zusammenschweißen von Verlängerungsrohr und Kapselträgerrohr.
 - 63) Aufsetzen der Vergußhülse, anlöten der Kabelanschlüsse am Stecker nach Zeichnung IRE2-06-2-2672, elektrische Prüfungen, Aralditausguß, erneute elektrische Prüfungen
 - 64) Anschweißen der Steckertülle, elektrische Prüfungen.
 - 65) Evakuieren und Spülen der Kapsel mit Helium.
 - 66) Kapsel mit Gewindestopfen verschließen und zuschweißen, elektrische Prüfungen.
 - 67) Dichtheitsprüfung bei Atmosphärendruck.
 - 68) Heliumfüllung bis zum Maximaldruck, nicht darüber !
 - 69) Abquetschen und verschweißen des Einfüllstutzens.
 - 70) Letzte Dichtheitsprüfung unter Innendruck und elektrische Prüfungen.
 - 71) Anbringen der letzten Teile (Dichtringe, Schraubhülse, Strömungskörper).
 - 72) Verpackung der Bestrahlungskapsel in Kunststoffschlauch.
- +) Gelegentlich gab es Schwierigkeiten bei der Montage, weil die dünnen Brennstofftabletten schon beim Einbringen zu zerbrechen drohten. Abbildung 10 zeigt als Beispiel eine Röntgenaufnahme von einer Probenkapsel, bei der schon bei der Montage einzelne Brennstofftabletten zerbrochen waren.

5. Betriebserfahrungen und -ergebnisse

5.1 Allgemeine Übersicht

In genau zehn Jahren sind im FR2 28 Kapselversuchseinsätze vom Typ 8 mit jeweils zwei Kriechprobeneinsätzen bestrahlt worden. Vier davon unter der Federführung der KWU. Von den insgesamt also 56 Probenpaketen waren

- 23 Proben aus UO_2 ,
 - 16 Proben aus UO_2 - PuO_2 ,
 - 4 Proben aus UN,
 - 10 Proben aus (U, Pu) C
- und 3 Vergleichsproben (Attrappen) aus Molybdän.

Bei Leistungen der einzelnen Probenpakete zwischen 240 und 1200 W und axialen Probenbelastungen bis 40 N/mm^2 wurden Probentemperaturen zwischen 200 und 1.000°C erreicht.

Die maximale Bestrahlungszeit eines Kriecheinsatzes betrug 9.200 h, entsprechend einem Abbrand von ca. 62000 MWd/tM. Die durchschnittliche Bestrahlungszeit dieser KVE lag bei 2.673 h. Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die 56 bestrahlten Proben und ihre Betriebsdaten. Tabelle 2 ergänzt einige technische Daten der einzelnen Kriechkapseln wie z.B. die verschiedenen Gasspaltbreiten. Alles in allem waren die Erfahrungen mit dieser Bestrahlungseinrichtung sehr positiv, wenngleich eine Reihe von Problemen zu überwinden waren, über die im folgenden noch kurz berichtet wird und vor allem durch den vorzeitigen Ausfall vieler Verlagerungsaufnehmer Bestrahlungseinsätze nicht immer bis zur vorgesehenen Standzeit betrieben werden konnten. Dabei muß allerdings festgestellt werden, daß die diesbezüglichen Ansprüche im Laufe der Experimente ständig stiegen und es nicht bei den ursprünglich ins Auge gefaßten Standzeiten von 1.000 bis 2.500 h blieb.

Betriebsstörungen am Reaktor hat es nicht gegeben, abgesehen davon, daß einige KVE zur Änderung der Leistung umgesetzt werden mußten. Die beiden KVE 124 und 129 wurden bei erkannter Überhitzung vorzeitig ausgebaut.

Über die wissenschaftliche Auswertung dieser Versuche ist in mehreren Veröffentlichungen von W. Dienst und D. Brucklacher berichtet worden, z.B. in /5, 6, 7, 8/; auf sie soll hier nicht eingegangen werden.

Tabelle 1: Überblick über die im FR2 bestrahlten Brennstoff-Kriechkapseln, Typ 8 (Betriebsparameter)

| KVE | Proben-Nr. 1) | Brennstoff % th. Dichte | Probenform | Bestr.-dauer Tage | Abbrand MWd/tM | Lebensdauer der LVDT Tage | Proben-temp. °C | Probenleistung W (ca.) | Probenbelastg. N/mm ² | Zahl der Reaktorab-schaltungen |
|-----|---------------|------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 54 | E 0 | Attrappe | TZM 2,2/5,10x19 | 54 | ca. 11000 | > 54 | 100 | - | ca. 20 | 14 |
| | E 1 | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | (planmäßig) | | 0 | 200 | 350 | | |
| 60 | E 3 | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | 37 | ca. 8000 | | 25 | 250 | ca. 20 | 5 |
| | E 2 | Attrappe | TZM 2,2/5,10x19 | | | > 38 | 100 | - | | |
| 66 | E 4 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 53 | ca. 11000 | | 39 ? | 400 | ca. 2 | 12 |
| | E 5 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | (planmäßig) | | | 39 ? | 450 | 325 | |
| 68 | E 6 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 79 | ca. 15000 | > 79 | 350 | 300 | ca. 20 | 22 |
| | E 7 | Attrappe | Mo 2,2/5,10x19 | (planmäßig) | | 0 | 100 | - | | |
| 70 | E 8 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | 93 | 19000 | > 98 | 380 | 300 | ca. 30 | 15 |
| | E 9 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | (planmäßig) | | > 98 | 400 | 300 | 0 | |
| 78 | E 10 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | 60 | 11000 | | 28 | 450 | ca. 40 | 5 |
| | E 11 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | (planmäßig) | | | 39 | 450 | 300 | |
| 85 | E 13 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | 243 | ca. 55000 | | 75 | 570 | | 35 |
| | E 12 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | (planmäßig) | | > 272 | 300 | 300 | ca. 40 | |
| 89 | E 14 | UN, 87,5 | 8 Tabl. 2/5,10x1,5 | 237 | ca. 47000 | 166 2) | 420/720 3) | 215/265 | ca. 40 | 31 |
| | E 15 | UN, 86,5 | 8 Tabl. 2/5,10x1,5 | | | 166 | 400/680 | 200/250 | 0 | |
| 95 | E 16 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | 143 | 28500 | | 16 | 720 | 250 | ca. 20 |
| | E 17 | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | (planmäßig) | | | 21 | 630 | 290 | |
| 96 | E 18 | UO ₂ /PuO ₂ , 86,5 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 117 | ca. 34000 | > 125 | 780 | 300 | ca. 40 | 11 |
| | E 19 | UO ₂ /PuO ₂ , 95,5 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | (planmäßig) | | > 125 | 540 | 250 | | |
| 98 | E 20 | UO ₂ /PuO ₂ , 86,5 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 23 | ca. 6500 | > 24 | 950 | > 350 | ca. 40 | 1 |
| | E 21 | UO ₂ /PuO ₂ , 95,5 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | | | > 24 | 750 | > 300 | | |
| 100 | E 24 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 30 | ca. 8500 | | 23 | 485/935 | 350/*500 | ca. 15 |
| | E 25 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | | | > 31 | 465/985 | 250/*365 | | |
| 101 | E 27 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 49 | ca. 13000 | 19 4) | 430/810 | 205/250 | ca. 15 | 7 |
| | E 26 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | | | 21 | 300/610 | 220/310 | | |
| 105 | E 28 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 38 | ca. 10000 | 15 4) | 655/585 | 430/400 | ca. 15 | 7 |
| | E 29 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | | | 19 | 665/605 | 390/360 | | |
| 107 | EE-a | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2/5,10x1 | 26 | ca. 6000 | | 5 | 850 | 250 | ca. 40 |
| | EE-b | UN, 90 | 17 Tabl. 2/5,10x1,5 | | | 14 | 700 | 200 | | |
| 112 | EE-e | UO ₂ , 93 | 10 Tabl. 2,1/5,10x1 | 39 | ca. 9000 | 5 4) | 900/800 | 300/? | ca. 40 | 2 |
| | EE-d | UN, 90 | 8 Tabl. 2,1/5,10x1,5 | | | 9 | 720/ 6) | 210/? | | |
| 113 | E 31 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,1 | 112 | ca. 22000 | | 105 | 660/600 | 220/210 | ca. 25 |
| | E 30 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,1 | | | > 118 | 470/460 | 360/350 | | |
| 119 | E 33 | UO ₂ /PuO ₂ , 86 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,2 | 73 | ca. 15000 | | 33 | 660/780 | 310/370 | ca. 25 |
| | E 34 | UO ₂ /PuO ₂ , 93,5 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,2 | | | > 80 | 440/560 | 310/370 | | |
| 124 | E 37 | UO ₂ /PuO ₂ , 93,5 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,2 | 46 5) | ca. 8500 | | 9 | 1000 | ? | ca. 15 |
| | E 38 | UO ₂ /PuO ₂ , 93,5 | 10 Tabl. 2,1/5,40x1,2 | | | > 46 | 650 | ? | | |
| 129 | E 39 | UC/PuC, 83 | 4 Tabl. 2,1/5,10x4,3 | 94 5) | 21000 | | 5 | 850/660 | 1050 | ca. 40 |
| | E 40 | UC/PuC, 95,5 | 4 Tabl. 2/5,10x4,1 | | | 65 | 750/ 6) | 1200 | | |
| 134 | E 41 | UC/PuC, 83 | 4 Tabl. 2,1/5,10x4,3 | 38 | 10000 | | 8 | 820 | 1200 | ca. 40 |
| | E 42 | UC/PuC, 95,5 | 4 Tabl. 2/5,10x4,1 | | | | 29 | 800 | 1200 | |
| 137 | A 90 I | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | 218 | ca. 32500 | | 14 | 780 | 240 | 0 |
| | P 90 I | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | (planmäßig) | | > 220 | 730 | 240 | | |
| 138 | A 90 II | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | 39 | ca. 11000 | | 3 | 800 | 420 | 0 |
| | P 90 II | UO ₂ , 90 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | | | | 18 | 680 | 420 | |
| 147 | S 90 II | UO ₂ , 91 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | 158 | ca. 26500 | | 150 | 450 | 280 | 0 |
| | S 90 I | UO ₂ , 91 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | (planmäßig) | | | 0 | 450 | 280 | |
| 152 | A90SpII | UO ₂ , 89 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | 160 | ca. 30000 | > 162 | 450 | 270 | 0 | 19 |
| | A90SpI | UO ₂ , 89 | 10 Tabl. 2,2/5,10x1 | (planmäßig) | | 13 | 550 | 270 | | |
| 153 | E 43 | (U,Pu)C, 85 | 7 Tabl. 2,1/5,10x1,5 | 317 | ca. 53000 | | 104 | 280/320 | 400 | ca. 40 |
| | E 44 | (U,Pu)C, 94 | 7 Tabl. 2,5/5,10x1,5 | (planmäßig) | | > 340 | 250/300 | 400 | | |
| 154 | E 45 | (U,Pu)C, 85 | 7 Tabl. 2,1/5,10x1,5 | 383 | ca. 62000 | > 408 | 225/300 | 230/300 | ca. 40 | 59 |
| | E 46 | (U,Pu)C, 94 | 7 Tabl. 2/5,10x1,5 | (planmäßig) | | > 408 | 225/300 | 230/300 | | |
| 157 | E 47 | (U,Pu)C, 94 | 7 Tabl. 2,1/5,10x1,5 | 166 | ca. 25000 | | 3 | 500 | 350 | ca. 40 |
| | E 48 | (U,Pu)C, 94 | 7 Tabl. 2,1/5,10x1,5 | (planmäßig) | | > 178 | 350 | 350 | | |

1) Jeweils die erstgenannte Probe innerhalb eines KVE unten.

2) Nach 166 Tagen ohne Meßschrank-Aufschaltung weiterbestrahlt.

3) Nach Umsetzen.

4) Meßbereich ausgeschöpft.

5) Wegen Überhitzung Bestrahlung abgebrochen.

6) Thermoelementausfall

Tabelle 2: Überblick über die im FR2 bestrahlten Brennstoff-Kriechkapseln, Typ 8 (technische Daten)

| KVE | Proben-Nr. 1) | Probentemperatur °C | | Flüssigmetall | Innerer Gasspalt mm | Formkörper-Werkstoff | Äußerer Gasspalt mm | Füllgas und Druck bar | Bestrahlungszeit | | Reaktor-Position |
|-----|---------------|---------------------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------|------------------|
| | | erwartet | erreicht | | | | | | Woche/Jahr Einsatz | Ausbau | |
| 54 | E 0 | 100 | 100 | Na | 0,1 | AlMg3 | 0,1 | He 15,0 | 27/69 | 34/69 | 57/13 |
| | E 1 | 450 | 200 | Na | 0,1 | AlMg3 | 0,1 | | | | |
| 60 | E 3 | 450 | 250 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,1 | He 15,0 | 36/69 | 40/69 | 57/13 |
| | E 2 | 100 | 100 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,1 | | | | |
| 66 | E 4 | 600 | 400 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,1 | He 7,0 | 48/69 | 2/70 | 41/23 |
| | E 5 | 600 | 450 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,7 | | | | |
| 68 | E 6 | 600 | 350 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,7 | He 15,0 | 52/69 | 11/70 | 57/13 |
| | E 7 | 100 | 100 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,7 | | | | |
| 70 | E 8 | 600 | 380 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,7 | He 23,0 | 13/70 | 28/70 | 57/13 |
| | E 9 | 600 | 400 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,7 | | | | |
| 78 | E 10 | 900 | 450 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | He 28,0 | 30/70 | 38/70 | 57/13 |
| | E 11 | 900 | 450 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | | | | |
| 85 | E 13 | 750 | 570 | Na | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | He 28,0 | 47/70 | 42/71 | 57/13 |
| | E 12 | 250 | 300 | Na | 0,5 | AlMg3 | 0,1 | | | | |
| 89 | E 14 | 850 | 420/720 ³⁾ | Na | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | He 28,0 ²⁾ | 6/71 | 50/71 | 37/21; 53/29 |
| | E 15 | 850 | 400/680 | Na | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | | | | |
| 95 | E 16 | 800 | 720 | Na | 0,5 | 1.4541 | 1,8 | He 14,0 ²⁾ | 36/71 | 11/72 | 57/23 |
| | E 17 | 600 | 630 | Na | 0,5 | 1.4541 | 1,2 | | | | |
| 96 | E 18 | 600 | 780 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | He 28,0 | 42/71 | 11/72 | 56/32 |
| | E 19 | 600 | 540 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | | | | |
| 98 | E 20 | 600 | 950 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | He 28,0 | 5/72 | 8/72 | 49/07 |
| | E 21 | 600 | 750 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | | | | |
| 100 | E 24 | 600 | 485/935 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,5 | He 11,0 | 12/72 | 16/72 | 56/32; 53/11 |
| | E 25 | 800 | 465/985 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,5 | | | | |
| 101 | E 27 | 950 | 430/810 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | He 11,0 | 22/72 | 31/72 | 56/32; 57/23 |
| | E 26 | 800 | 300/610 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,0 | | | | |
| 105 | E 28 | 600 | 655/585 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,3 | He 11,0 | 32/72 | 36/72 | 48/24 |
| | E 29 | 800 | 665/605 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,5 | | | | |
| 107 | EE-a | 800 | 850 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | He 28,0 ²⁾ | 34/72 | 37/72 | 49/07 |
| | EE-b | 800 | 700 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,0 | | | | |
| 112 | EE-e | 800 | 900/800 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,8 | He 28,0 ²⁾ | 6/73 | 11/73 | 45/07 |
| | EE-d | 800 | 720/ 4) | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | | | | |
| 113 | E 31 | 500 | 660/600 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | He 16,5 | 13/73 | 32/73 | 42/04; 37/25 |
| | E 30 | 350 | 470/460 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | | | | |
| 119 | E 33 | 500 | 660/780 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 1,2 | He 16,5 | 27/73 | 39/73 | 42/04; 49/07 |
| | E 34 | 500 | 440/560 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,7 | | | | |
| 124 | E 37 | 800 | 1000 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | He 12,0 ²⁾ | 5/74 | 11/74 | 49/05 |
| | E 38 | 300 | 650 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0,3 | | | | |
| 129 | E 39 | 350 | 850/660 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0 | He 28,0 | 34/74 | 43/74 | 41/23; 45/07 |
| | E 40 | 350 | 750/ 4) | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0 | | | | |
| 134 | E 41 | 350 | 820 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0 | He 28,0 | 6/75 | 11/75 | 41/23 |
| | E 42 | 350 | 800 | NaK | 0,5 | 1.4541 | 0 | | | | |
| 137 | A 90 I | 800 | 780 | Na | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | He 3,0 ²⁾ | 22/75 | 11/76 | 49/33 |
| | P 90 I | 800 | 730 | Na | 0,5 | 1.4541 | 2,2 | | | | |
| 138 | A 90 II | 800 | 800 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,8 | He 3,0 ²⁾ | 22/75 | 27/75 | 41/23 |
| | P 90 II | 800 | 680 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,8 | | | | |
| 147 | S 90 II | 450 | 450 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,15 | He 3,0 ²⁾ | 21/76 | 2/77 | 49/07; 49/33 |
| | S 90 I | 690 | 450 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,8 | | | | |
| 152 | A 90 Sp II | 450 | 450 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,15 | He 3,0 ²⁾ | 4/77 | 38/77 | 49/33 |
| | A 90 Sp I | 500 | 550 | Na | 0,5 | 1.4541 | 0,8 | | | | |
| 153 | E 43 | <650 | 280/320 | NaK | 0 | 1.4541 | 0 | He 28,0 | 12/77 | 37/78 | 41/33; 57/13 |
| | E 44 | <650 | 250/300 | NaK | 0 | 1.4541 | 0 | | | | |
| 154 | E 45 | 450 | 225/300 | NaK | 0 | 1.4541 | 0 | He 28,0 | 22/77 | 16/79 | 53/09 |
| | E 46 | 450 | 225/300 | NaK | 0 | 1.4541 | 0 | | | | |
| 157 | E 47 | 600 | 500 | NaK | 0 | 1.4541 | 0,7 | He 28,0 | 48/77 | 37/78 | 49/33 |
| | E 48 | 350 | 350 | NaK | 0 | 1.4541 | 0,2 | | | | |

1) Jeweils die erstgenannte Probe innerhalb eines KVE unten.

3) Nach Umsetzen.

2) Die Neonfüllung schließt grundsätzlich 1 bar Helium Grundpegel mit ein.

4) Thermoelement-Ausfall

5.2 Betriebserfahrungen mit den Kriechprobenkapseln

Bei den geringen Probenabmessungen und der Kompliziertheit der Geometrie der Probeneinsätze war es außerordentlich schwierig abzuschätzen, wie die erzeugte Wärme radial bzw. axial vom Probenstapel abfließt. Aus diesem Grunde war die Vorausberechnung der Probentemperatur auch mit dem Einsatz des zweidimensionalen Rechenprogramms WIROCO auf der Basis von RELAX nicht immer mit hinreichender Genauigkeit gelungen. Erschwerend kam noch hinzu, daß die Leistungsvorhersage für die Proben damals sehr ungenau war und offenbar die beiden Proben innerhalb eines KVE infolge des axialen Flußprofils im FR2 deutlich unterschiedliche Leistungen hatten. Vor allem auch die Flußdepressionsfaktoren für die Kapsel und die Probe selbst waren lange Zeit mit großer Ungenauigkeit behaftet. So konnten vor allem bei den ersten Kapseln mit relativ niedrigen Probenleistungen die gewünschten Probentemperaturen noch nicht erreicht werden. Erst nach verschiedenen konstruktiven Änderungen konnten die Probentemperaturen schrittweise von 200°C über 450°C auf 800°C gesteigert werden. Solche Änderungsmaßnahmen waren:

- Einsatz eines Formkörpers aus Edelstahl anstatt aus besser wärmeleitendem AlMg3, was auch im Hinblick auf spätere höhere Temperaturen nötig war.
- Zentrierung der Probenkapsel im Formkörper nur über Nocken mit kleinsten Anlageflächen.
- Vergrößerung der Gasspalte zwischen Probenkapsel und Formkörper einerseits sowie zwischen Formkörper und äußerem Kapselrohr andererseits.
- Reduzierung der axial abfließenden Wärmeanteile durch geänderte Formgebung von Boden und Druckübertragungsstück der Probenkapsel sowie des Formkörpers.
- Zeitweise wurde auch Neon statt Helium als Füllgas in der Druckkapsel eingesetzt.

Als dann später mit dem karbidischen Brennstoff zu teilweise fünfmal höheren Leistungen übergegangen wurde, gab es wieder Schwierigkeiten, die obere Temperaturgrenze von 1.000°C nicht zu überschreiten. Es sind in drei Fällen Kapseldefekte durch Überhitzungen aufgetreten.

Eine Erkenntnis aus den ersten Bestrahlungsversuchen war auch, daß durch die abwechselnde Stapelung von Brennstofftabletten und gut wärmeleitenden Mo-Zwischenplättchen die Temperaturgradienten im Probenstapel noch wesentlich flacher sind als

angenommen. Demzufolge ist die Brennstofftemperatur im Inneren nur wenig höher als am Außenrand.

Nach all diesen Erkenntnissen aus den ersten Bestrahlungen ist es dann zunehmend besser gelungen, die gewünschten Temperaturen im Reaktor einzustellen. Aus den Erfahrungen konnte mehr und mehr ein Parameterfeld (Abb. 11 und 12) erstellt werden, wenngleich es auch immer wieder sogenannte Ausreißer gegeben hat.

Die Tabelle 2 zeigt u.a. in einem Soll/Ist-Vergleich, wie die erreichten Proben-temperaturen von den gewünschten abweichen.

In einigen Fällen war der Meßbereich der LVDT vorzeitig ausgeschöpft, sodaß eine weitere Messung nicht mehr möglich war. Eine Weiterbestrahlung konnte jedoch u.U. noch sinnvoll sein, weil es an den einzelnen Brennstofftabletten oder sogar an kleinen Fragmenten in den Heißen Zellen noch möglich ist, Kriechbeträge durch genaueste Dichtebestimmung zu ermitteln. Auf diese Weise können auch gemessene Werte integral überprüft werden.

5.3 Erfahrungen mit den Verlagerungsaufnehmern

Vor allem zu Beginn der Arbeiten bereitete die hohe Ausfallquote von ca. 30 % der Aufnehmer schon beim Auspacken aus der Transportkiste bzw. beim Eichen und während der Montage große Sorgen. Häufig kam es dabei zu einem Abreißen der Verbindungsstellen zwischen Spulen und den Zuleitungen am Eintritt in das Gehäuse des Aufnehmers, dessen äußere Abmessungen 25,4 mm \varnothing x 44,4 mm Länge betragen. Die Innenbohrung für die Kerndurchführung hat 6,8 mm Durchmesser. Abbildung 13 zeigt einen derartigen Wegaufnehmer mit seinen 3 zweiadrigen Zuleitungen von 1 mm Manteldurchmesser.

Durch die von uns bei der Herstellerfirma geforderten konstruktiven Verbesserungen an den Wegaufnehmern (Zugentlastung der Drähte, stabilere Durchführung der Leitungen in das Gehäuse) konnten in einem längeren Prozeß diese Schwierigkeiten weitgehend überwunden werden, doch sind bis zum Ende der Versuche immer wieder Verlagerungsaufnehmer während des Betriebs vorzeitig ausgefallen. Aus diesem Grund ist auch in den Jahren 1970/71 eine erfolversprechende Eigenentwicklung von verbesserten Differentialtransformatoren für den in-pile-Betrieb angegangen worden, deren Ergebnisse in einer internen Notiz von H. Grass niedergelegt sind, die dann aber wegen Personalknappheit aufgegeben werden mußte.

Die Abbildung 14 gibt einen Überblick über die in-pile-Funktionsdauer der eingesetzten Verlagerungsaufnehmer. In 20 von 56 Fällen haben die Aufnehmer die jeweils vorgesehene Bestrahlungszeit voll durchgehalten (siehe Tabelle 1); d.h. sie hätten u.U. auch eine längere Lebensdauer gehabt, weshalb zwischen Funktionsdauer und Lebensdauer zu unterscheiden ist.

Zwei Aufnehmer haben die maximale Funktionsdauer von 408 Tagen erreicht, was einer Fluenz an thermischen Neutronen von $\phi_t \sim 2,5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ und an schnellen Neutronen (FR2: $\phi_f \approx 0,06 \cdot \phi_{th}$) von ca. $1,5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ entsprechen dürfte. Vom Hersteller garantiert war volle Funktionstüchtigkeit bis zu einer schnellen Fluenz von $3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$.

Rund die Hälfte der Aufnehmer wurde schon nach weniger als 30 Tagen defekt; drei Aufnehmer bereits beim ersten Anfahren des Reaktors. Die mittlere Funktionsdauer aller Aufnehmer lag bei 70 Tagen.

Der Grund für den Ausfall der Aufnehmer während der Bestrahlung konnte nicht ganz geklärt werden. Vieles deutet auf ein Abreißen der dünnen Spulendrähte durch thermische Dehnungen hin, die infolge des diskontinuierlichen Reaktorbetriebes nicht zu vermeiden sind. Es scheint also nicht der Einfluß der Bestrahlung zu sein, der zum Ausfall der Aufnehmer führt. Eine eindeutige Abhängigkeit der Funktionsdauer von der Zahl der thermischen Zyklen (Reaktorabschaltungen und Wiederanfahren) konnte jedoch auch nicht gefunden werden; eine mangelhaft zugentlastete Leitung kann ebensogut bei der ersten wie bei der zehnten Zugbelastung abreißen.

Bei einer Reihe von Aufnehmern wurde nach der Bestrahlung in den Heißen Zellen bei unveränderter Isolation eine Zunahme der Schleifenwiderstände von bis zu 120 % gemessen. Eine Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit bzw. der Neutronenfluenz ist aber nicht feststellbar.

Durch die Möglichkeit, während der Bestrahlung die Summenspannung zu kontrollieren und nachzustellen, können Defekte erkannt und Änderungen der Betriebsdaten, im besonderen durch Bestrahlungseinflüsse, korrigiert werden.

Zur Erfassung von Bestrahlungseinflüssen in der Meßanzeige der Verlagerungsaufnehmer wurden gelegentlich auch unbelastete Proben (Schwellproben) und Blindproben aus Molybdän als zweite Probe jeweils neben einer echten Kriechprobe innerhalb einer Kapsel eingesetzt.

Bei der Ermittlung der Kriech- bzw. Schwellkurven müssen die registrierten Meßkurven der Längenänderungen dahingehend korrigiert werden, daß Längenänderungen durch thermische Ausdehnungen der Probe und der Proben- und Meßsystem-Halterung berücksichtigt werden. Die Korrekturbeträge können z.B. aus dem Meßkurvenverlauf während des Aufheizvorganges bei Bestrahlungsbeginn ermittelt werden.

5.4 Nachuntersuchungsbefunde an den Kriechprobenkapseln

Die visuelle Untersuchung nach der Bestrahlung ergab an keinem der 28 KVE eine Beschädigung des ca. 3 m langen äußeren Kapselrohres. Dieses Rohr war in allen Fällen dicht. Eine genauere Vermessung der Kapsel und eine Überprüfung der Thermoelemente und der Wegaufnehmer wurde anfangs sehr umfassend, später weniger und in den letzten drei Jahren wegen Überlastung der Heißen Zellen gar nicht mehr durchgeführt. Maßlich ergaben sich an den äußeren Kapselrohren keine Veränderungen. An den Wegaufnehmern wurden neben den üblichen Adernbrüchen häufiger die schon unter 5.3 genannten Zunahmen der Schleifenwiderstände bis zu 120 % bei gleichgebliebener Isolation festgestellt. Auch die Mantelthermoelemente von 1 mm \emptyset (Adernmaterial: Nickelchrom/Nickel) wiesen häufiger eine Erhöhung der Schleifenwiderstände auf, die allerdings mit maximal 6 % deutlich geringer war. Bei den Thermoelementen wurde teilweise nach längeren Standzeiten eine Abnahme der Isolationswiderstände festgestellt.

Etwas rätselhaft blieb die Tatsache, daß beim Anbohren der KVE in den Heißen Zellen häufig ein wesentlich höherer Gasdruck gemessen wurde als er bei der Kapselmontage eingefüllt worden war. In einigen Fällen wurde auch weniger gemessen, obwohl die Kapsel nach wie vor dicht war. Auch gründliche Nachforschungen konnten diesen Umstand nicht aufklären. Es wird aber davon ausgegangen, daß die Probenbelastung entsprechend dem Einfülldruck verbindlich ist, bis auf den KVE 66, in dem der Druck fehlte, weil offensichtlich das Einlaßventil (Autoschlauchventil) bei der Kapselmontage nicht geöffnet hatte.

Was die eigentlichen Probenkapseln betrifft, so wurden vor allem in den ersten Jahren umfangreiche Nachuntersuchungen angestellt. Auf diese Weise wurden 42 von 56 bestrahlten Proben erfaßt. Bei den restlichen 14 Probenkapseln wurde auf eine aufwendige Untersuchung verzichtet, weil neue Erkenntnisse nicht mehr zu erwarten

und die eigentlichen Kriechdaten ja bereits im Betrieb durch kontinuierliche Messung angefallen waren. Die Abbildung 15 zeigt einen 243 Tage lang bei 500-570°C bestrahlten völlig intakten Tablettenstapel und die Abbildung 16 zeigt ein Schliffbild eines Brennstofftablettenstapels auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr. Die in den Heißen Zellen hauptsächlich festgestellten Befunde, abgesehen von einzelnen Thermoelementdefekten und den genannten Wegaufnehmer-schäden waren folgende:

17 der untersuchten 42 Probenkapseln waren bei ihrer Zerlegung in den Heißen Zellen ohne jegliche Mängel. Bei einer größeren Zahl von Probenkapseln waren einzelne Brennstofftabletten zerbrochen (Gamma-Scanning) und bei den meisten Kapseln sind sie beim Herausnehmen zerbröckelt (Abb. 17). Zwei Probenkapseln (E 14/KVE 89 und E 18/KVE 96) hatten einen Riß im Faltenbalg (Abb. 18) und bei sechs weiteren Proben wurde NaK-Verlust durch kleine Lecks am Probenbehälter festgestellt (E 16/KVE 95, E 21/KVE 98, EE-a und EE-b aus KVE 107, E 31/KVE 113 und E 33/KVE 119). Eine Probenkapsel (E 16/KVE 95) zeigte deutliche Korrosionserscheinungen an den Thermoelementschutzrohren (Abb. 19) und bei fünf Probenstapeln waren durch Versprödung einzelne Mo-Zwischenplättchen zerbrochen (E 15/KVE 89, E 28 und E 29 aus KVE 105 sowie EE-e und EE-d aus KVE 112). Innerhalb fünf Probenkapseln waren die jeweils zehn oxidischen Brennstofftabletten nahezu völlig pulverisiert (E 20 und E 21 in KVE 98, E 28 und E 29 in KVE 105 sowie EE-a in KVE 107).

Drei Probenkapseln - jeweils eine mit UN-, UO_2 - PuO_2 - und (U, Pu)C-Tabletten - wiesen eine weitergehende Zerstörung auf (EE-d/KVE 112, E 37/KVE 124 und E 40/KVE 129). Bei diesen Proben war es wohl infolge einer Überhitzung zur Zerstörung der Thermoelementschutzrohre und damit zum Auslaufen des Flüssigmetalls zur Kühlung der Proben gekommen. Dies mußte zu einer weitergehenden Überhitzung und schließlich zu einem Niederschmelzen der Tauchrohre, der Mo-Plättchen und des Brennstoffs führen. Die Schmelze, deren Volumen nur in der Größenordnung von 1 cm^3 liegen kann - kam dann auf dem Behälterboden der inneren Probenkapsel zum Erstarren. Eine Gefahr für die äußere, gut gekühlte Kapselwand war dadurch nicht gegeben.

Übrigens war bei allen untersuchten Proben wegen den unter 5.2 genannten Schwierigkeiten bei der Leistungsbestimmung der radiochemisch bestimmte Abbrand geringer als der zuvor aus den Probertemperaturen errechnete.

Anmerkung

Die Anregung zu den Kriechexperimenten ging vom IMF I aus, wo insbesondere den Herren Dienst, Brucklacher und Müller-Lyda die wissenschaftliche Betreuung und Auswertung oblag. Die Auslegung und Entwicklung der Bestrahlungseinrichtungen sowie die Koordination von Beschaffung, Fertigung, Montage und Bestrahlung lag in den Händen des IMF III. Alle mit der Meßtechnik zusammenhängenden Belange wurden maßgeblich von Herrn Will im IRE behandelt. Die Erprobung der Montagetechniken und die Montage des größten Teils der Bestrahlungseinsätze wurde wesentlich von den Herren Sebold und Stork bei IT/M-V vorgenommen. Die Montage der plutoniumhaltigen Proben erfolgte im Pu-Labor des IMF III. Ein Teil der Bestrahlungskapseln wurde bei der NTG in Gelnhausen montiert. Vier Bestrahlungseinsätze wurden unter der Federführung der KWU bestrahlt. Betreuer seitens des FR2 waren im wesentlichen die Herren Knappschneider und Vogel. Die Autoren danken allen an dem Projekt Beteiligten, insbesondere auch den mit der Nachuntersuchung in den Heißen Zellen befaßten Mitarbeitern.

6. Literatur

- /1/ H.E. Häfner, H. Will
Instrumentierte Brennstoff-Kriechkapsel
KERNTECHNIK 13 (1971), Heft 10, 454-457
- /2/ H.E. Häfner, W. Neumann
Kriechkapseln für Brennstoff und Hüllmaterial
KfK-Bericht 1571 (März 1972)
- /3/ H.E. Häfner
Irradiation Devices for the Study of Creep and Swelling in
Ceramic Fuels
Journal of Nuclear Materials 65 (1977), 65-71
- /4/ H. Will
In-pile-Einrichtungen für Dehnungsmessungen an Kernbrennstoffen
und Strukturmaterialien
KfK-Bericht 1281 (Oktober 1970)
- /5/ D. Brucklacher, W. Dienst
Creep Behavior of Ceramic Nuclear Fuels under Neutron Irradiation
Journal of Nuclear Materials 42 (1972), 285-296
- /6/ W. Dienst
Irradiation-Induced Creep of Mechanically Blended Porous UO_2 - PuO_2 Fuel
Journal of Nuclear Materials 61 (1976), 185-191
- /7/ W. Dienst
Irradiation Induced Creep of Ceramic Nuclear Fuels
Journal of Nuclear Materials 65 (1977), 1-8
- /8/ D. Brucklacher
Untersuchungen über das Kriechen von keramischen Kernbrennstoffen unter
Neutronenbestrahlung
Dissertation Februar 1978

/9/ H.E. Häfner, G. Sebold
Brennstoffbestrahlungskapseln und Fertigungstechniken am FR2
KERNTECHNIK 16 (1974), Heft 8/9, 393-400

7. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Fließschema für Gasversorgungsanlage mit Regelschrank für eine druck- und temperaturgeregelte Brennstoffkriechkapsel
- Abb. 2: Fertig montierter Kapselversuchseinsatz am Hallenkran des FR2
- Abb. 3: Schematischer Längsschnitt durch den FR2 mit Kapselversuchseinsatz
- Abb. 4: Schematischer Längsschnitt durch die Brennstoffkriechkapsel
- Abb. 5: Schematische Darstellung eines Kriechprobeneinsatzes
- Abb. 6: Modellschnitt durch einen Kriechprobeneinsatz mit induktivem Verlagerungsaufnehmer
- Abb. 7: Kriechprobenstapel mit zehn UO_2 - PuO_2 -Tabletten
- Abb. 8: Differentialtransformator mit Eichdiagramm
- Abb. 9: Meßschrank für Kriechexperimente
- Abb. 10: Röntgenaufnahme eines fehlerhaften Kriechprobeneinsatzes
- Abb. 11: Proben temperatur in Abhängigkeit von der Probenleistung in der Kriechkapsel
- Abb. 12: Proben temperatur in Abhängigkeit von der Breite des äußeren Gas- spaltes in der Kriechkapsel
- Abb. 13: Induktiver Verlagerungsaufnehmer mit Aufnehmerkern aufgeschraubt auf Probenkapsel und Formkörper
- Abb. 14: Lebensdauer der Verlagerungsaufnehmer

- Abb. 15: Völlig intakter bestrahlter Tablettenstapel mit zehn UO_2 -Tabletten
- Abb. 16: Schliffbild eines bestrahlten Tablettenstapels auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr
- Abb. 17: Bestrahlter Tablettenstapel mit zehn stark gerissenen UO_2 - PuO_2 -Tabletten
- Abb. 18: Riß im Faltenbalg einer Probenkapsel mit ausgetretenen NaK-Resten
- Abb. 19: Bestrahlter Tablettenstapel mit stark korrodierten Thermoelementschutzrohren

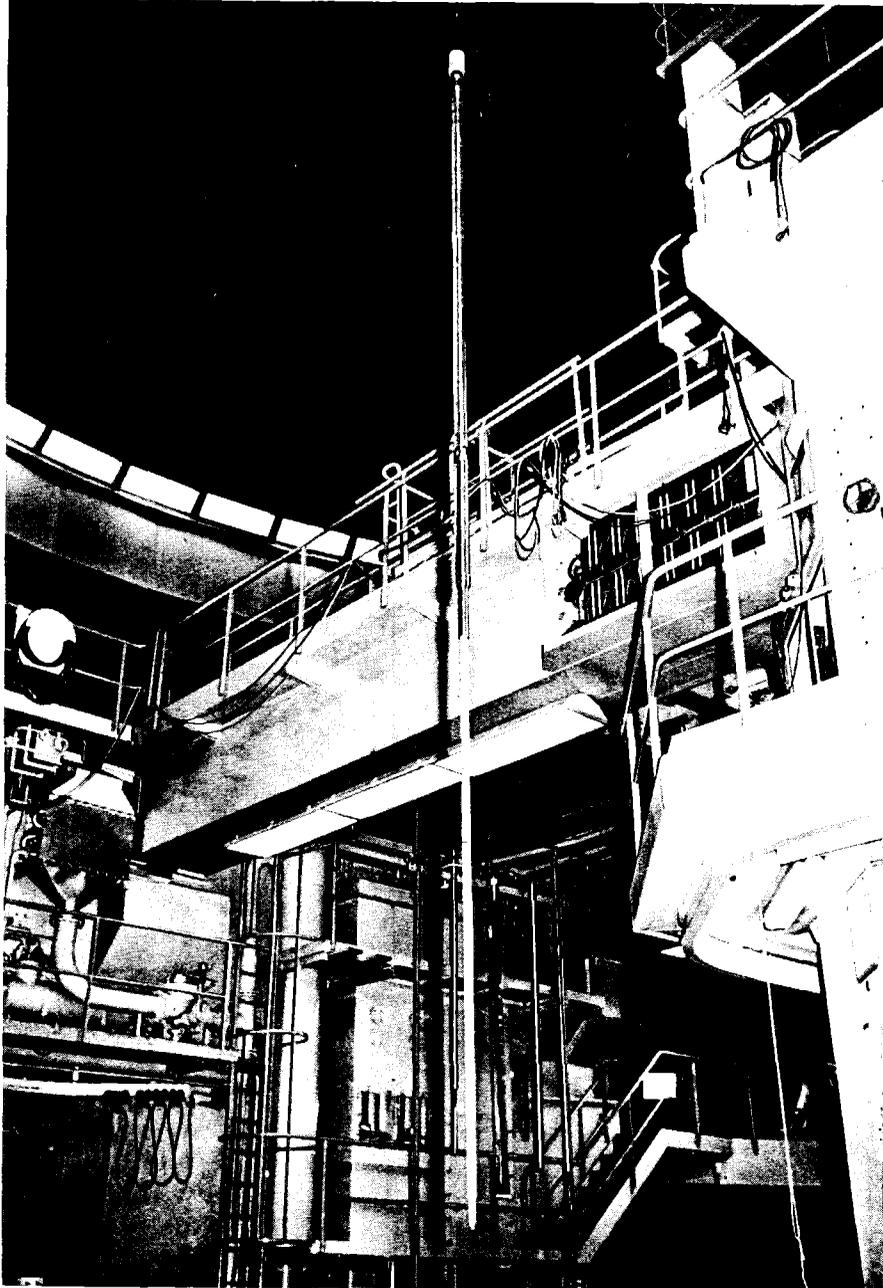
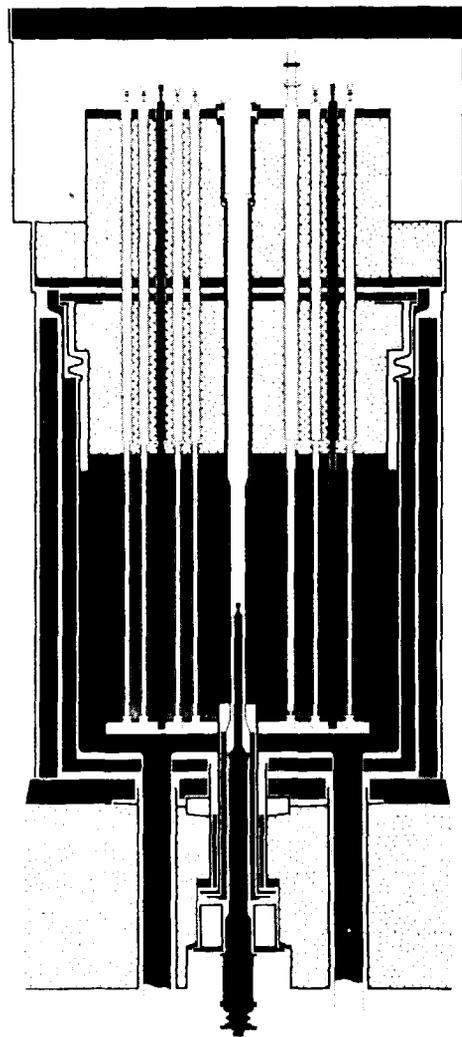


Abb. 2: Fertig montierter Kapselversuchseinsatz
am Hallenkran des FR2



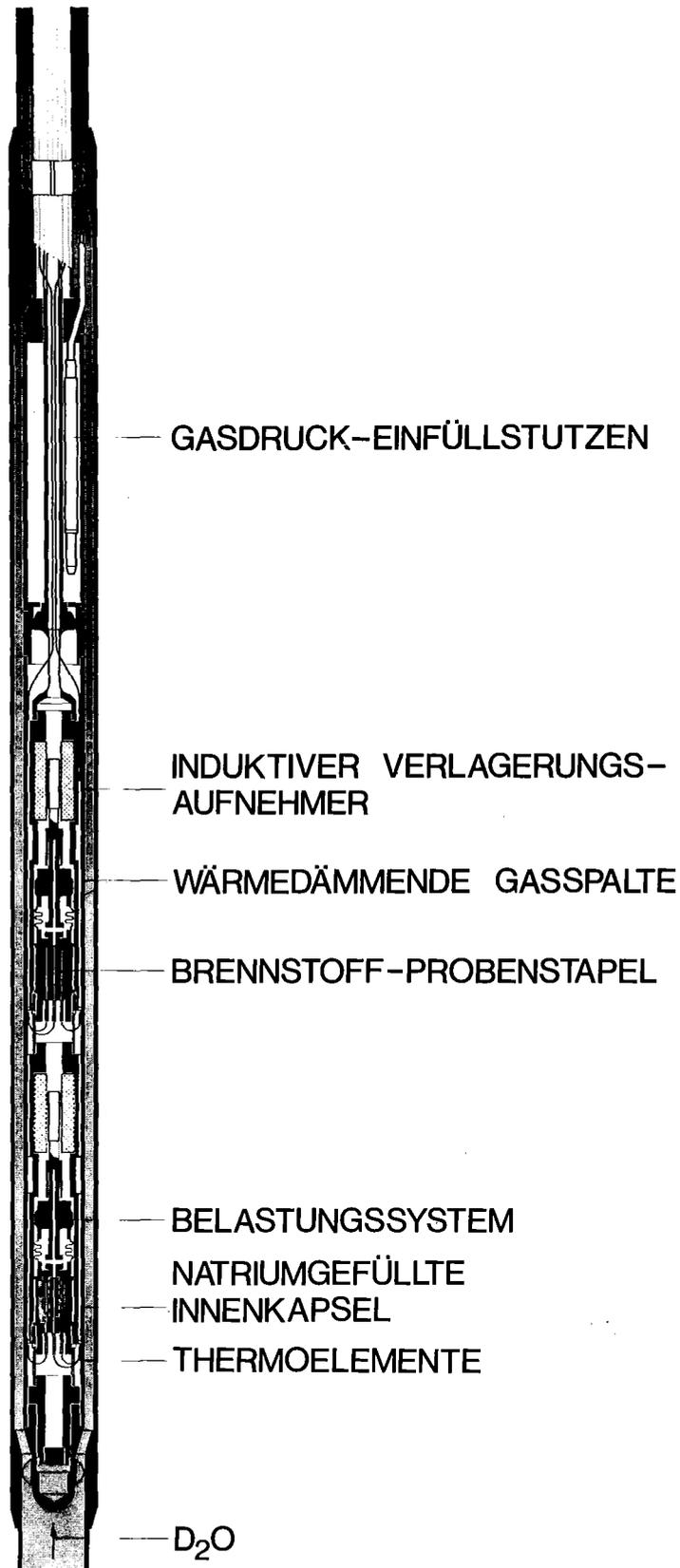
KAPSEL -
VERSUCHSEINSATZ

CORE
H=2160 mm
 $\varnothing = 2400$ mm
 $\Phi_{th \max} = 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$

He-LOOPEINSATZ

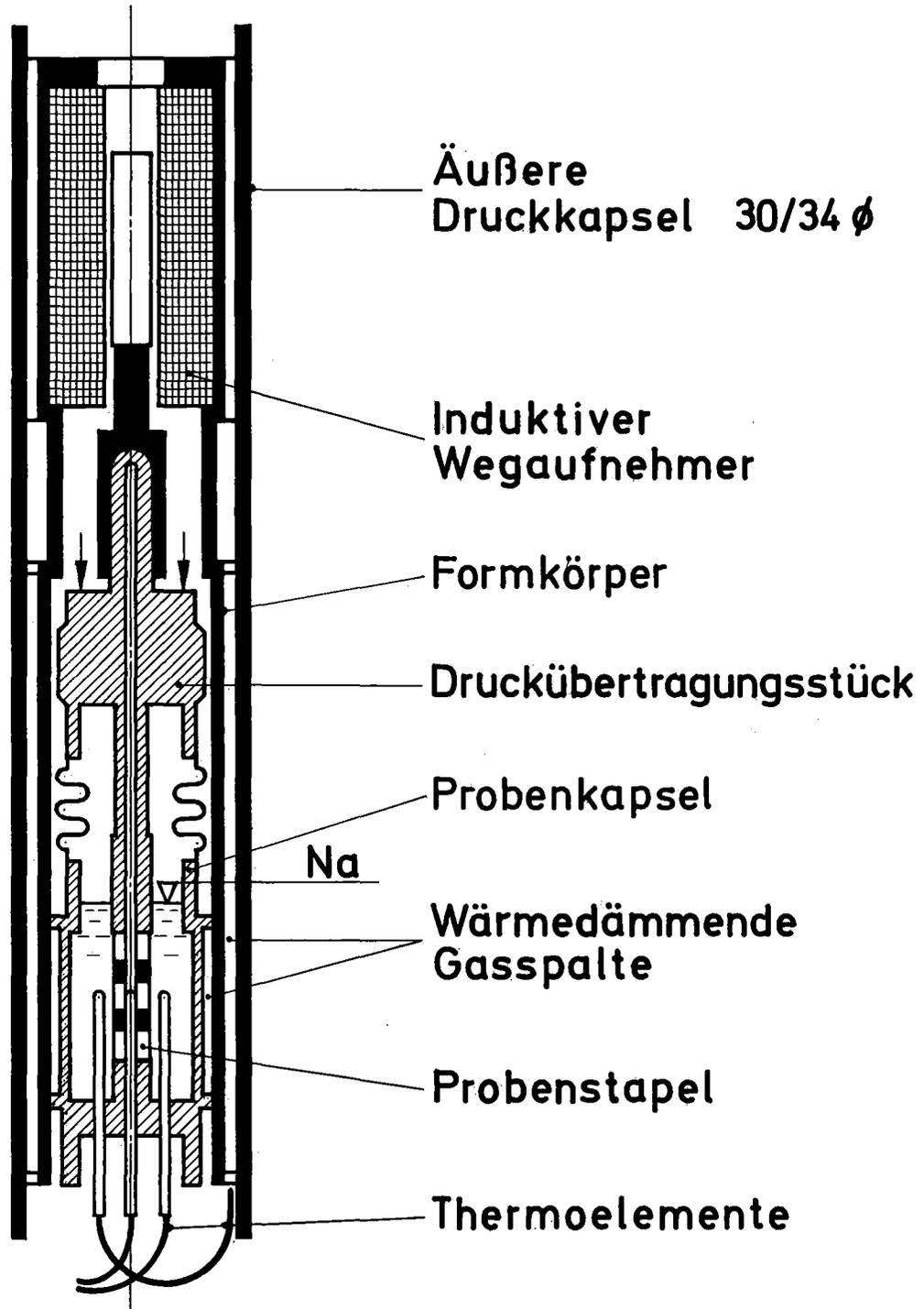
GfK FORSCHUNGS-
IMF REAKTOR FR2

Abb. 3: Schematischer Längsschnitt durch den FR2
mit Kapselversuchseinsatz



| | |
|-----|-----------------|
| GfK | BRENNSTOFF- |
| IMF | KRIECKAPSEL FR2 |

Abb. 4



| | | |
|-------|----------------------------------|------------|
| Abb.5 | FR 2 - Brennstoff - Kriechkapsel | GFK IMF |
|-------|----------------------------------|------------|

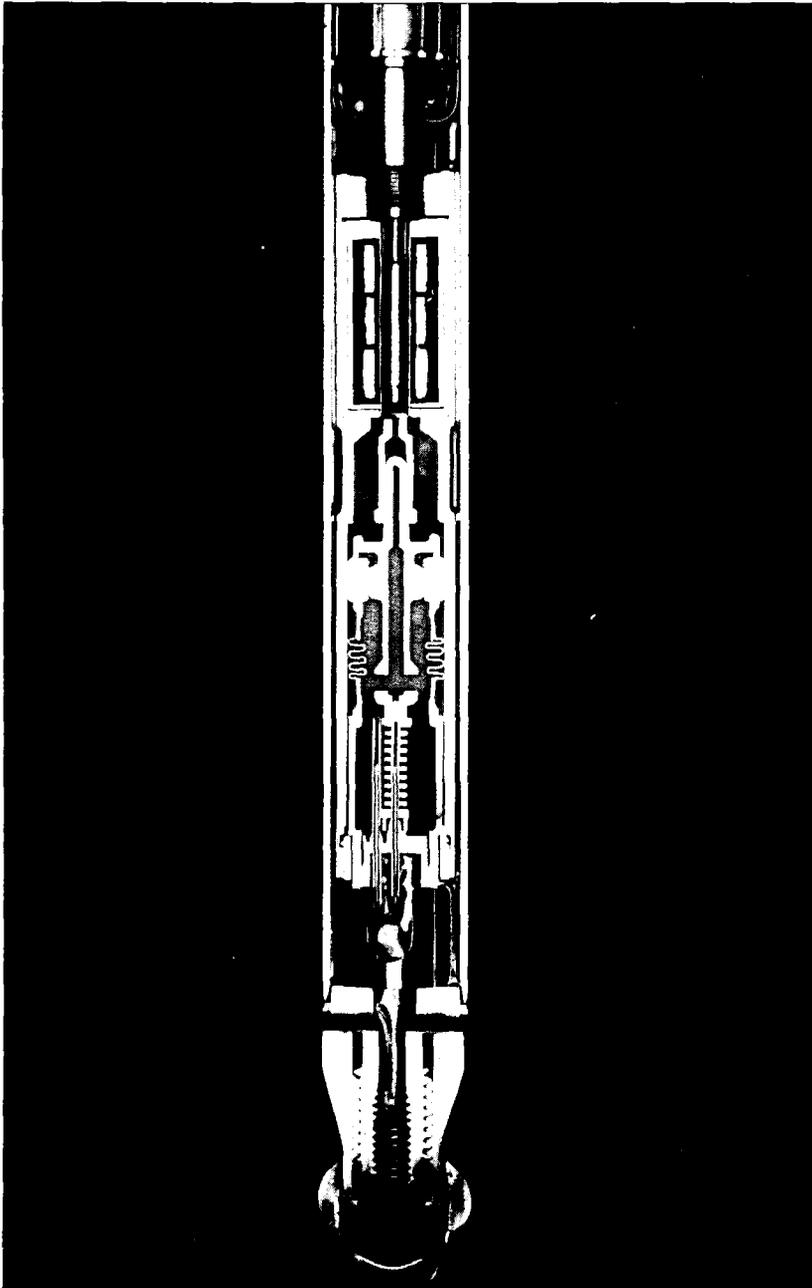


Abb. 6: Modellschnitt durch einen Kriechprobeneinsatz mit induktiven Verlagerungsaufnehmern

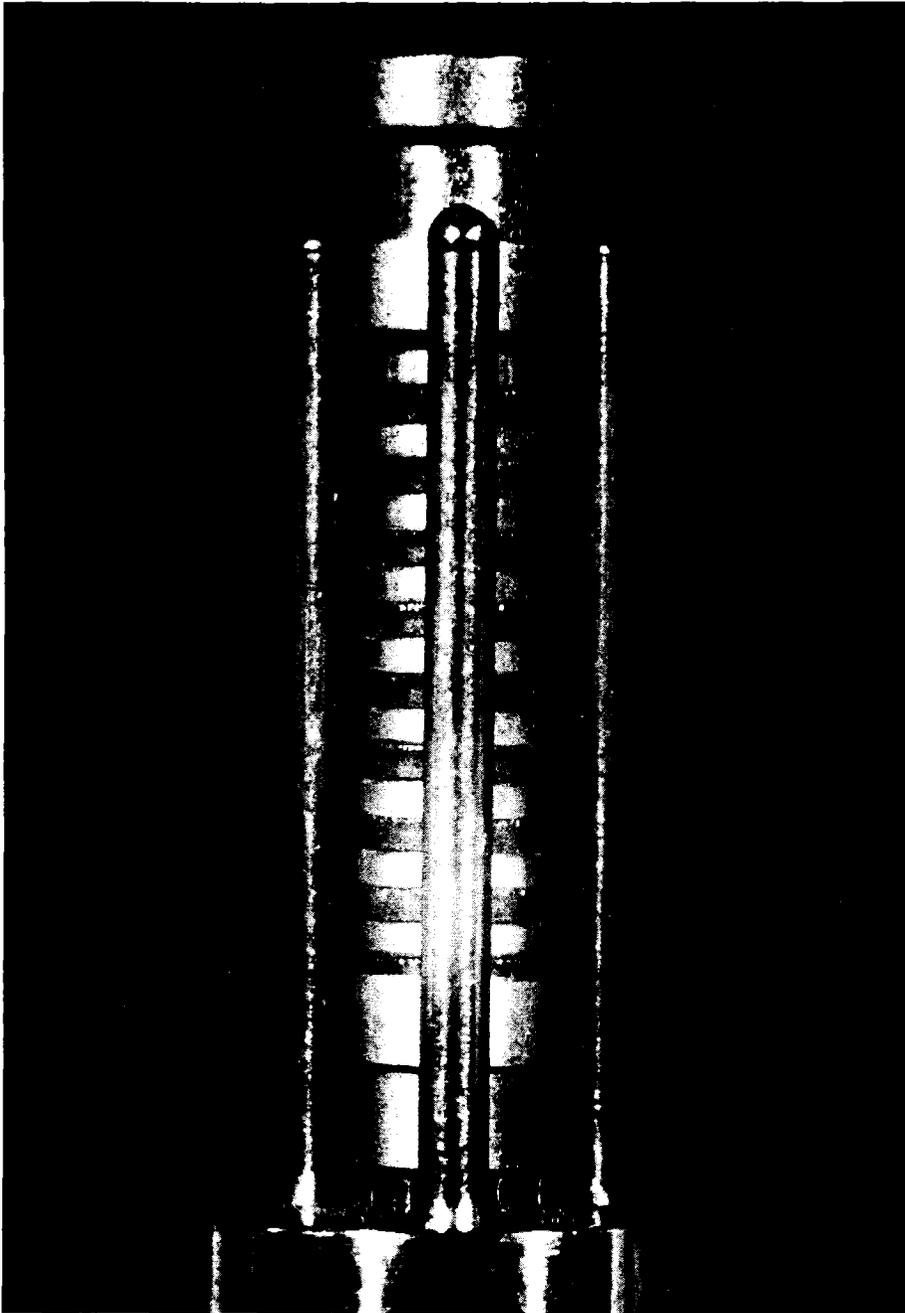
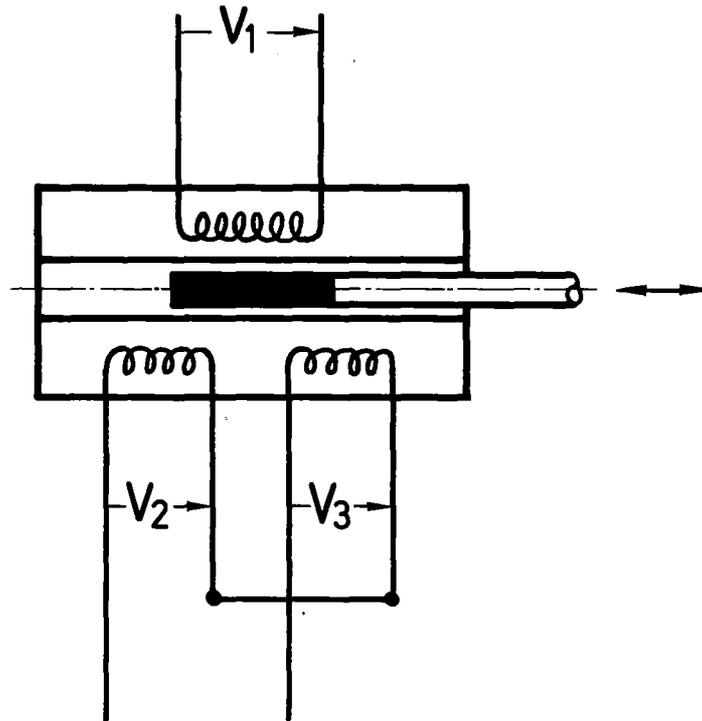
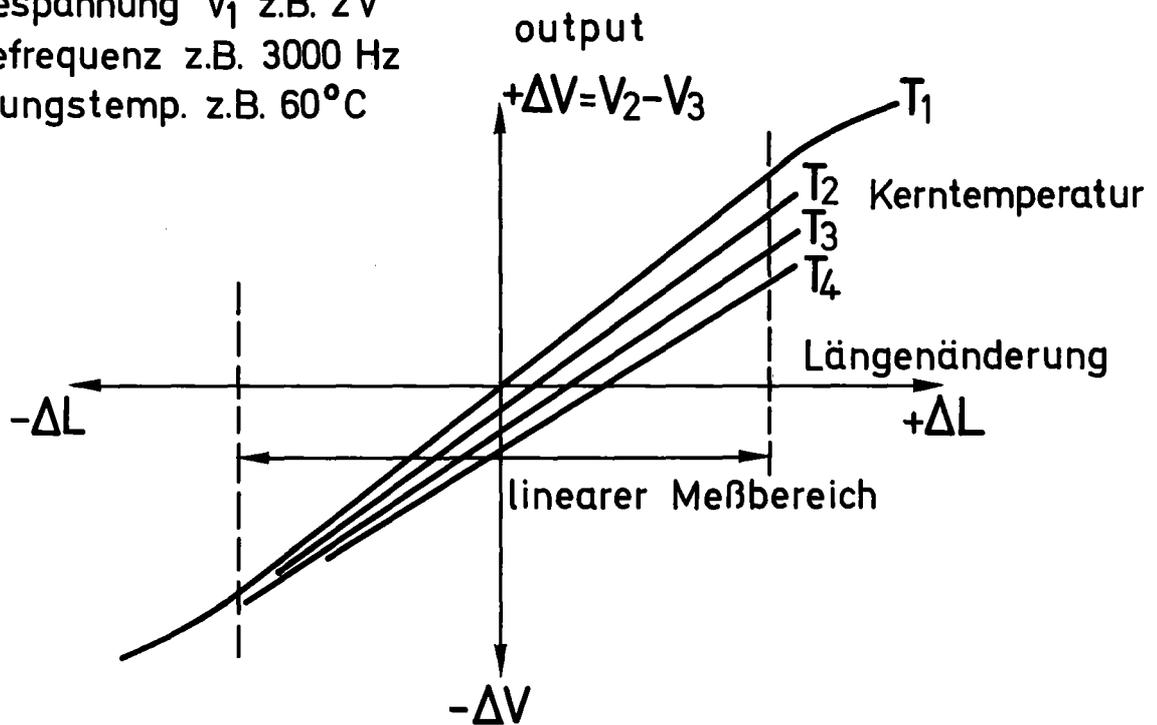


Abb. 7: Kriechprobenstapel mit zehn $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -Tabletten von 5,1 mm \varnothing x 1 mm Höhe mit Mo-Zwischenringen und Thermoelementschutzrohren eingeschweißt im Behälterboden



Parameter:

Speisespannung V_1 z.B. 2V
Speisefrequenz z.B. 3000 Hz
Wicklungstemp. z.B. 60°C



| | | |
|--------|---------------------------|------------|
| Abb. 8 | Differentialtransformator | GFK IMF |
|--------|---------------------------|------------|

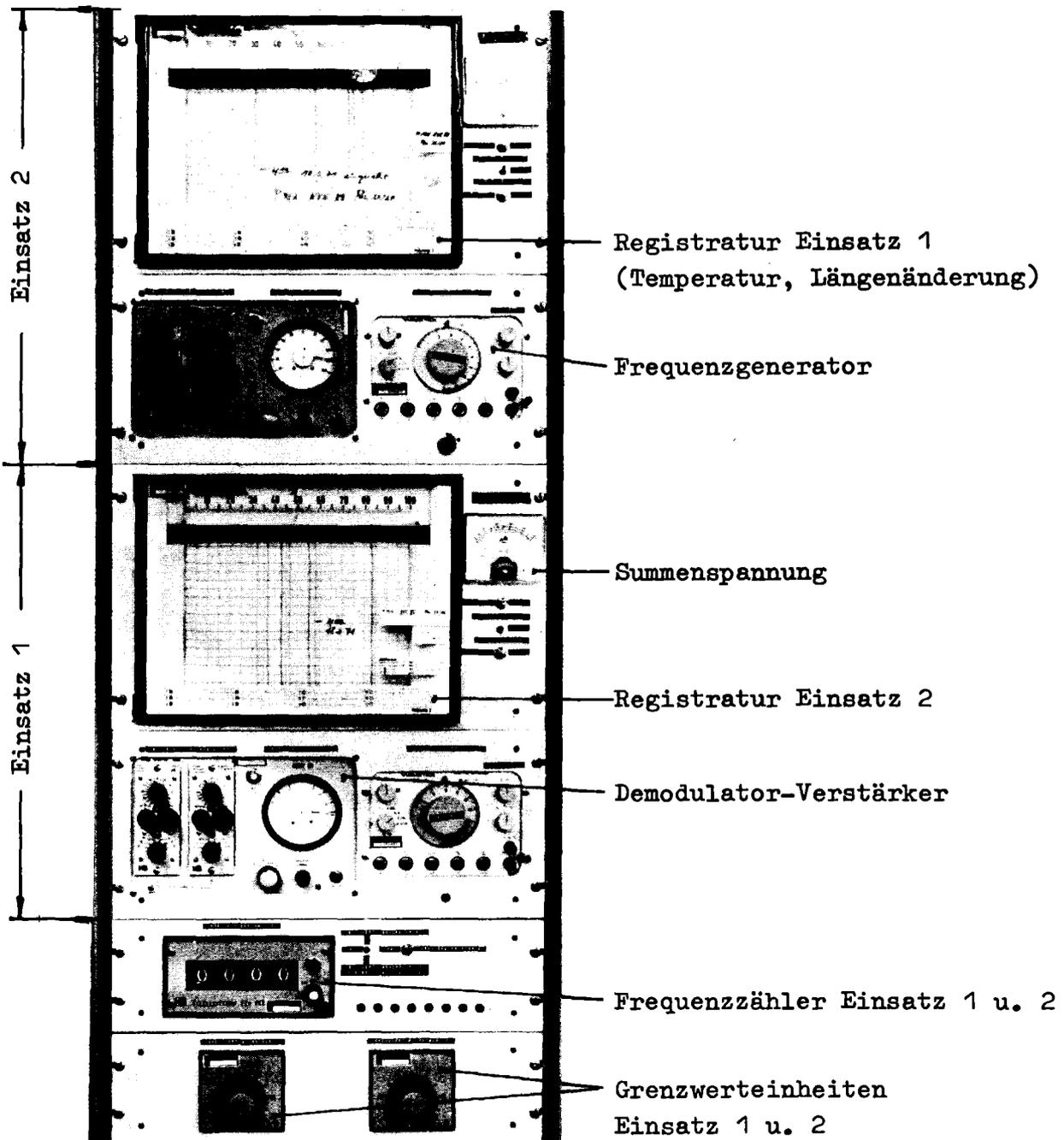


Abb. 9: Meßschrank für FR2-Kriechexperimente



Abb. 10: Röntgenaufnahme eines fehlerhaften Kriechprobeneinsatzes

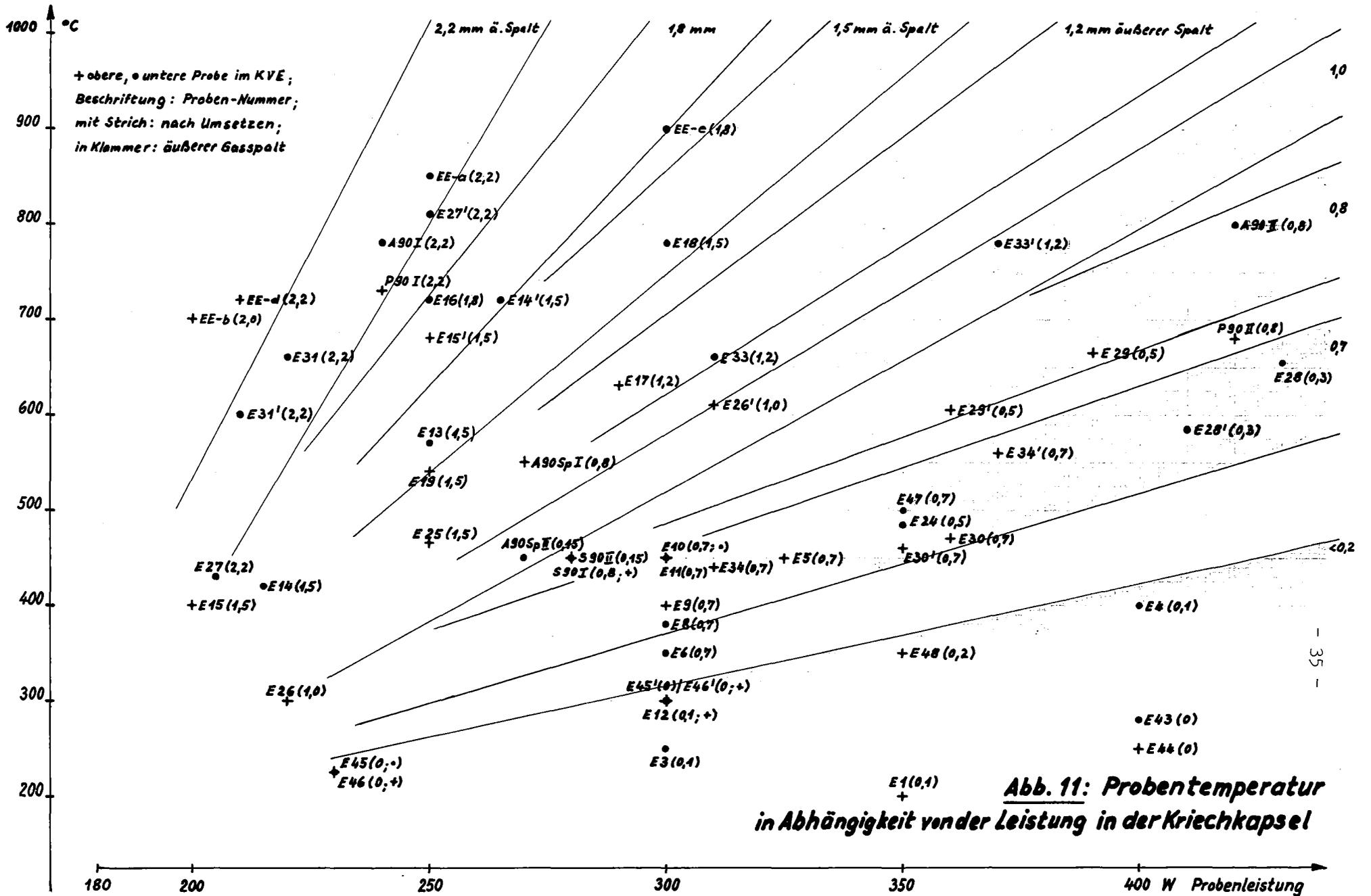


Abb. 11: Probentemperatur in Abhängigkeit von der Leistung in der Kriechkapsel

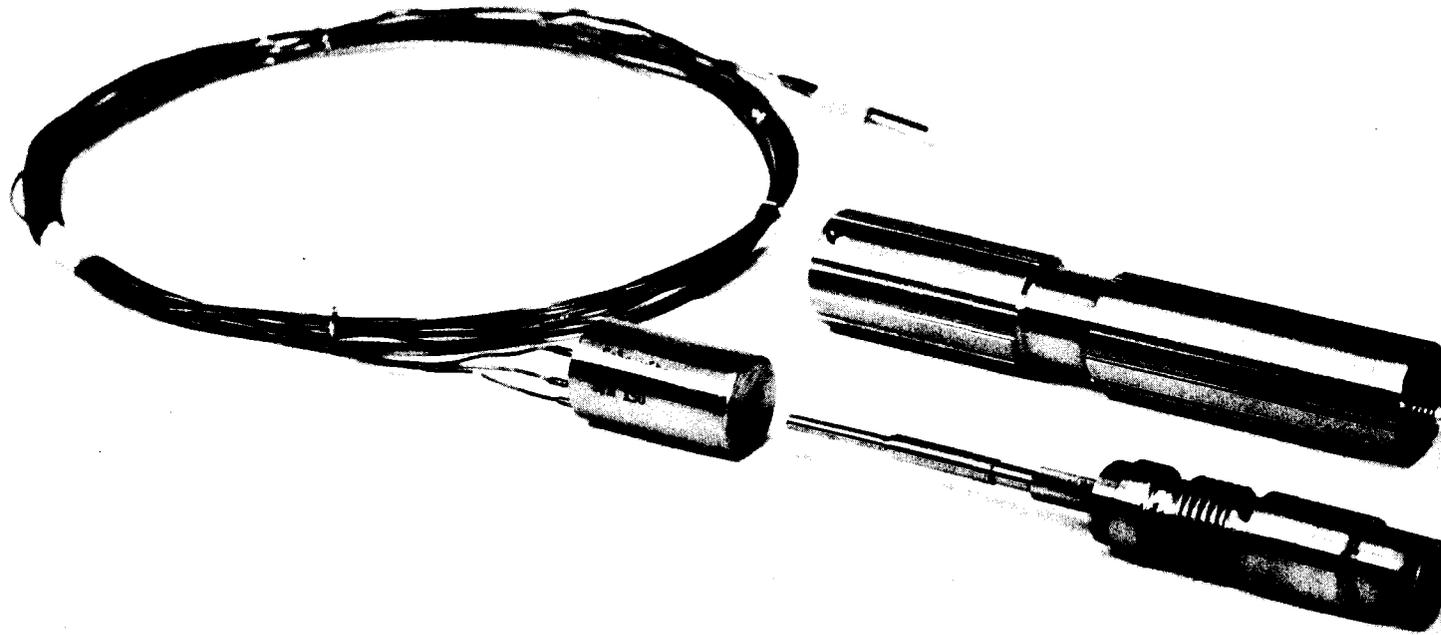
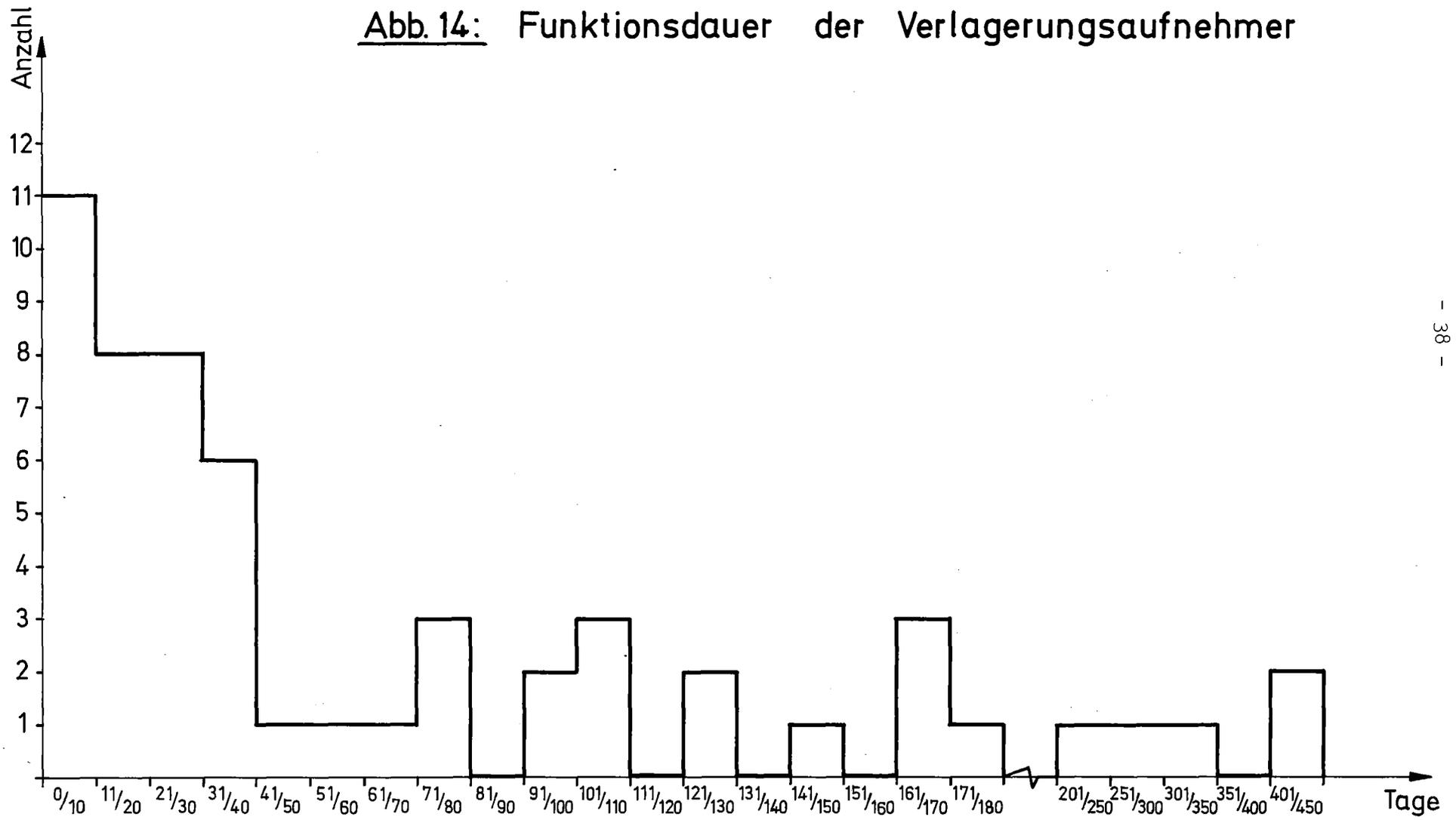


Abb. 13: Induktiver Verlagerungsaufnehmer 25,4 mm \varnothing x 44,4 mm Länge mit Aufnehmerkern 6,4 mm \varnothing , aufgeschraubt auf Probenkapsel und Formkörper

Abb. 14: Funktionsdauer der Verlagerungsaufnehmer



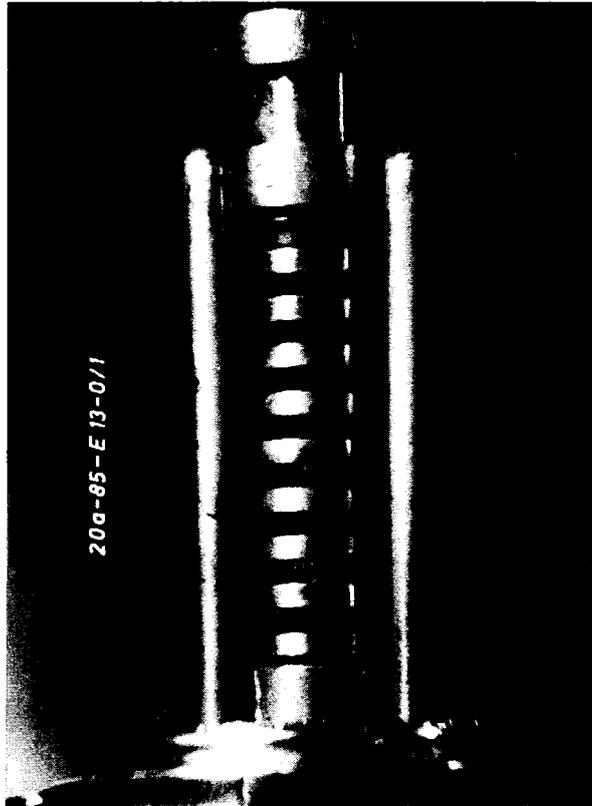


Abb. 15: Völlig intakter bestrahlter Tablettenstapel mit
zehn UO_2 -Tabletten (Probe E 13/KVE 85)
Bestrahlungszeit 243 Tage
Probentemperatur 500-570°C

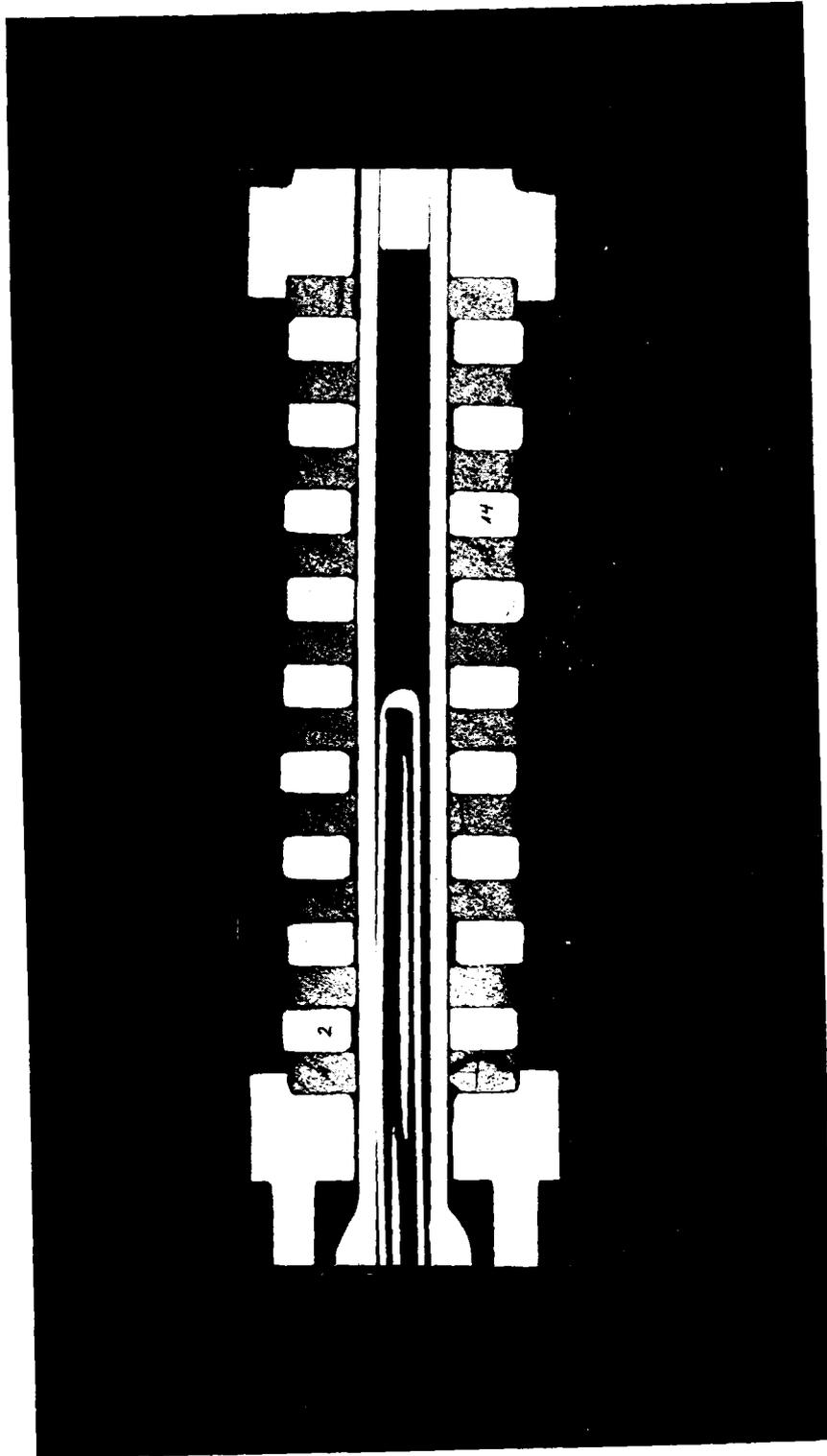


Abb. 16: Schliffbild eines bestrahlten Tablettenstapels auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr (sichtbar auch das zentrale Mantelthermoelement)

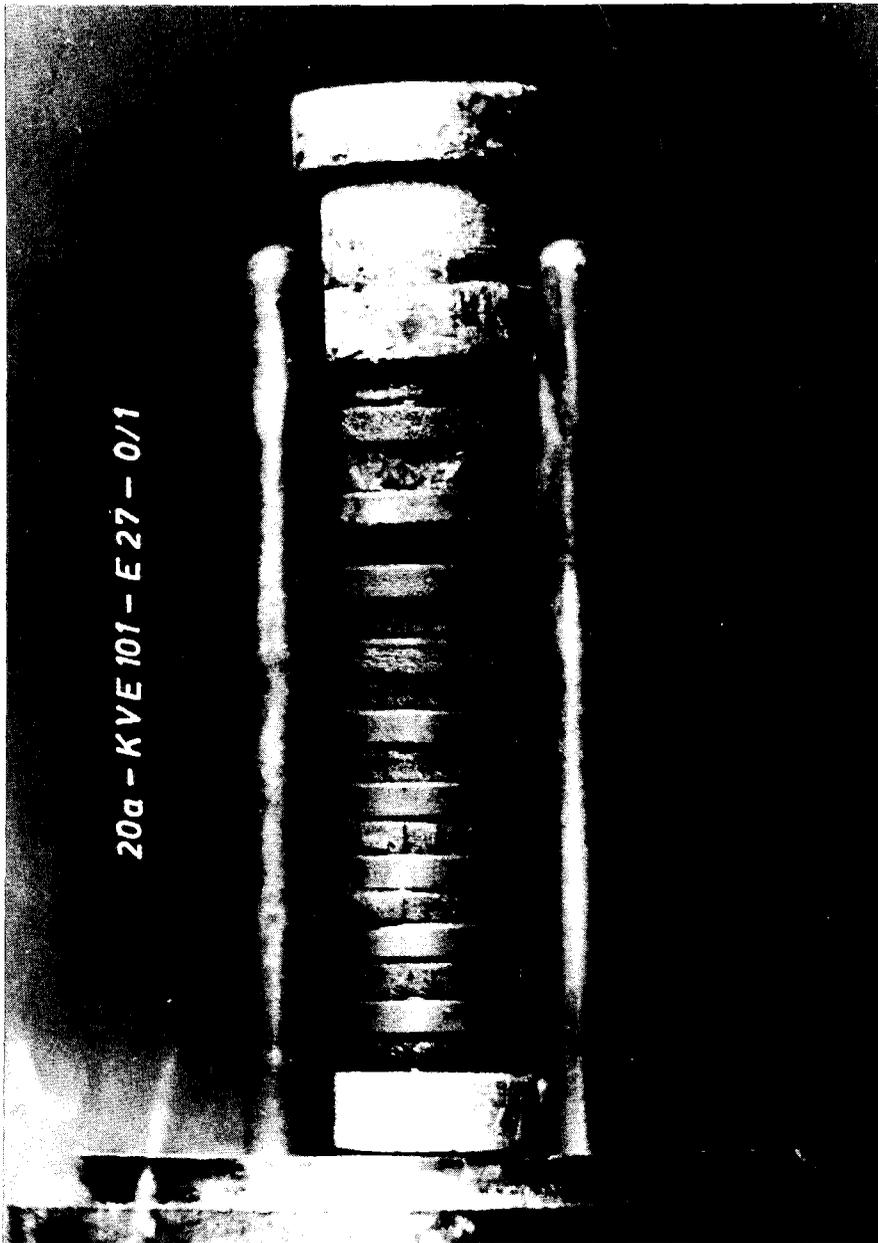


Abb. 17: Bestrahlter Tablettenstapel (Probe E 27/KVE 101) mit zehn stark gerissenen $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -Tabletten, die beim Herausnehmen völlig zerbrachen.

Bestrahlungsdauer 49 Tage

Probentemperatur maximal ca. 800°C



Abb. 18: Riß im Faltenbalg einer Probenkapsel mit ausgetretenen NaK-Resten (Probe E 14/KVE 89)
Bestrahlungsdauer 237 Tage

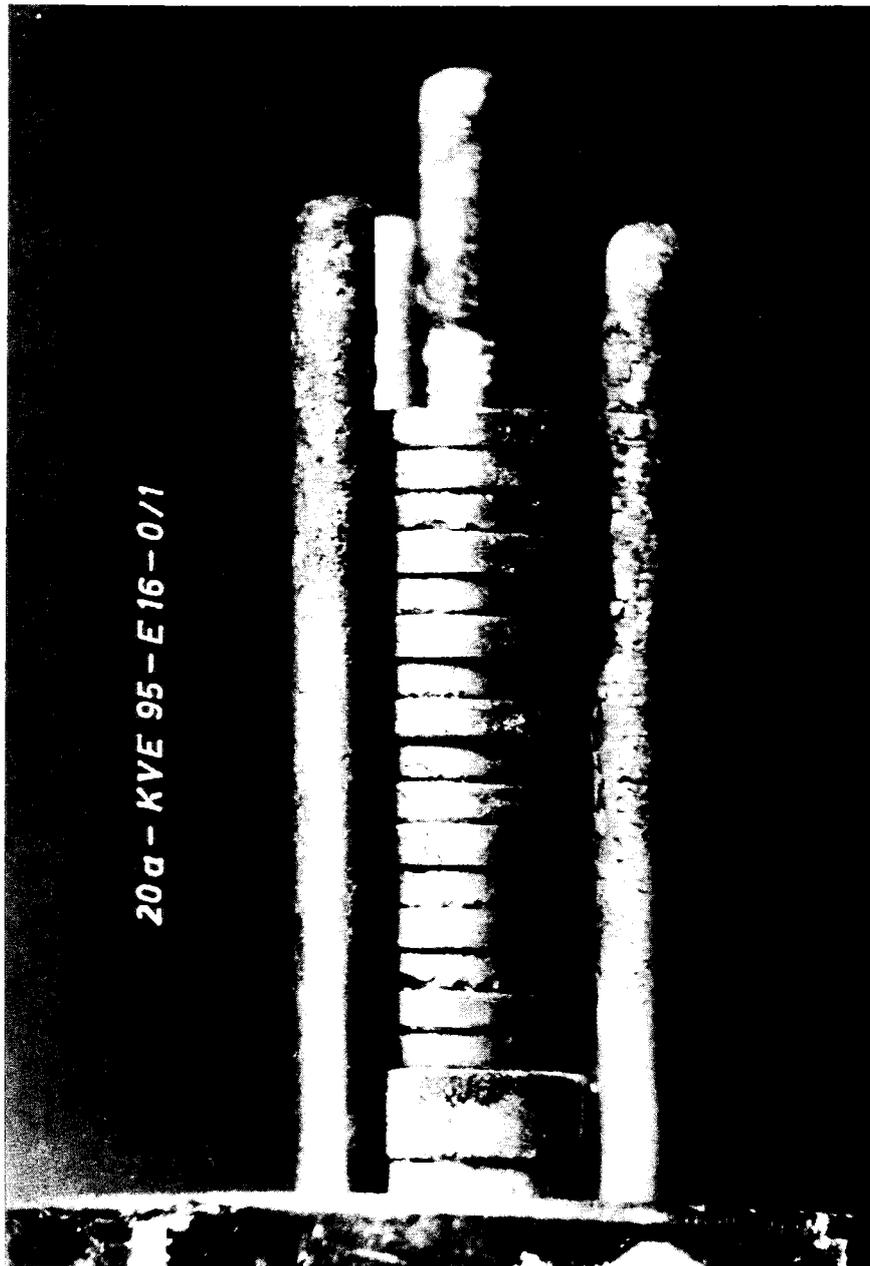


Abb. 19: Bestrahlter Tablettenstapel mit stark korrodierten
Thermoelementschutzrohren (Probe E 16/KVE 95)
Bestrahlungsdauer 143 Tage