

KfK 2948  
Mai 1980

**Abschlußbericht über  
Entwicklung und Betrieb von  
Hochdruck-  
Bestrahlungskapseln zur  
Ermittlung des  
Kernbrennstoffschwellens im  
FR2**

H. E. Häfner, K. Philipp, G. Sebold  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Hauptabteilung Ingenieurtechnik  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Projekt Schneller Brüter

KfK 2948

Abschlußbericht über Entwicklung und Betrieb von Hochdruck-  
Bestrahlungskapseln zur Ermittlung des Kernbrennstoffschwellens im FR2

---

H.E. Häfner, K. Philipp, G. Sebold

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 :

Für die Auslegung fortschrittlicher Brennelement-Konzepte für Schnelle Brutreaktoren und die modellmäßige Beurteilung des Brennstabverhaltens über die vorgesehene Standzeit ist unter anderem die Kenntnis von Kriech- bzw. Schwellvorgängen in den vorgesehenen Kernbrennstoffen unter Bestrahlung unerlässlich. Im IMF sind deshalb in den letzten Jahren eine Reihe von Bestrahlungseinrichtungen eingesetzt worden, die die Ermittlung solcher Materialdaten unter verschiedenen Bedingungen ermöglichen.

In einer neuerdings entwickelten Bestrahlungskapsel konnten an Brennstoffproben in Form von dünnen Ringtabletten bei Temperaturen bis maximal  $1.750^{\circ}\text{C}$  allseitige Probenbelastungen bis zu  $45 \text{ N/mm}^2$  durch einen aerostatischen Gasdruck von maximal 450 bar (45 MPa) aufgebracht werden. Wegen der außergewöhnlichen Beanspruchung dieser Hochdruckkapseln unter Bestrahlung sind umfangreiche Vorversuche und Erprobungen notwendig gewesen.

Dieser Abschlußbericht gibt neben der Beschreibung der Versuchseinrichtung und einer kurzen Darstellung der zu lösenden umfangreichen Probleme einen Überblick über die Montage und Betriebserfahrungen an den bestrahlten drei Kapselversuchseinsätzen mit je zwei Probenpaketen.

Final Report on the Development and Operation of High Pressure Irradiation  
Capsules for Determination of Nuclear Fuel Swelling in FR2

---

A b s t r a c t :

The design of advanced fuel element concepts for fast breeder reactors and the evaluation through models of fuel rod behavior during the planned service life call inter alia for knowledge of creep and swelling processes taking place in the selected fuels exposed to irradiation. Therefore, quite a number of irradiation facilities have been operated at the IMF in recent years, which allow to assess the required material data under varying conditions.

In a recently developed irradiation capsule omnilateral loads of up to  $45 \text{ N/mm}^2$  were applied, at temperatures up to  $1750^\circ\text{C}$  at the maximum, to thin ring pellet fuel specimens, using an aerostatic gas pressure of 450 bar (45 MPa) at the maximum. Extensive preliminary experiments and testing had been necessary because of the extremely high stress to which these high pressure capsules had been exposed under irradiation.

In addition to the description of the test facility and a short outline of the many problems to be solved, this final report gives a survey of the assembly work done on the three capsule test rigs containing two sample packages each and of the operating experience gathered during irradiation.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung und Allgemeines
2. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes
  - 2.1 Allgemeiner Aufbau
  - 2.2 Die Bestrahlungsprobeneinsätze
3. Thermodynamische Auslegung der Kapsel
4. Besonderheiten des Konzeptes
5. Vorversuche zur Auslegung der Kapsel
6. Montage- und Prüfplan
7. Betriebserfahrungen und -ergebnisse
8. Veröffentlichungen
9. Abbildungen

## 1. Aufgabenstellung und Allgemeines

In Schnellen Brutreaktoren ist das Kriech- und Schwellverhalten der Kernbrennstoffe für die mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle und damit für das gesamte Brennstabverhalten über die vorgesehene Standzeit von ausschlaggebender Bedeutung.

Da es aber nicht möglich ist, das Stabverhalten an ganzen Schnellbrüterbrennstäben mit Originalabmessungen unter realistischen und definierten Bedingungen über die Bestrahlungszeit kontinuierlich zu erfassen, müssen die entsprechenden Daten aus Einzelparameter-tests gewonnen werden. Abgesehen von den Brennstoffeigenschaften selbst, wie vor allem der Art des Brennstoffs und seiner Dichte, hängen diese Daten im wesentlichen von den Parametern Proben-temperatur, Probenbelastung und Abbrand ab.

Die so gewonnenen Daten sind dann eine wichtige Voraussetzung für die Rechenmodelle, die zur Auslegung von Schnellbrüter-Brennstäben und die Beurteilung ihres Betriebsverhaltens angewandt werden.

Seit dem Jahre 1968 sind im IMF mehrere Bestrahlungseinrichtungen für den Einsatz im FR2 entwickelt worden, die es erlauben, Kriech- bzw. Schwellbeträge an Kernbrennstoffproben unter verschiedenen Bedingungen kontinuierlich zu messen / 1, 2, 3 /. Zwei weitere Bestrahlungseinrichtungen, CONFLUENT und VADIA, wurden im Auftrag des IMF vom CEN Grenoble für den Belgischen Reaktor BR2 entwickelt / 4, 5 /. Mit Ausnahme von VADIA arbeiten all diese Bestrahlungskapseln, über deren anerkannte Ergebnisse z.B. in / 6, 7 / berichtet wurde, bei axialer Druckbelastung des Brennstoffes. VADIA ist eine Kapsel, bei der die radiale Aufweitung der Hülle eines Brennstabes kontinuierlich gemessen wird.

Für die Fälle, in denen die Kriechgeschwindigkeit des Brennstoffes nicht wesentlich größer ist als seine Schwellgeschwindigkeit ist es vor allem wegen der schwer erfaßbaren Reibungskräfte zwischen Brennstoff und Hülle schwierig, die bei axialer Belastung gemessenen Werte für allseitige Belastung des Brennstoffs umzurechnen. Aus diesem Grunde wurde 1972 begonnen, eine Bestrahlungskapsel für den FR2 zu entwickeln, in der der Brennstoff unter einem allseitigen ( aerostatischen ) Gasdruck von bis zu ca. 500 bar ( 50 MPa ) stehen sollte, entsprechend einer Probenbelastung von maximal  $50 \text{ N/mm}^2$ . In dieser sogenannten Hochdruck-Schwell-



kapsel (interne Bezeichnung: FR2-Kapseltyp 10)/8, 9/ sollten an kleinen Tablettenstapeln von ca. 6 mm Durchmesser und 100 bis 200 Watt Leistung Brennstofftemperaturen zwischen 1.000 und 1.500°C eingestellt werden können.

Da bei karbidischem Brennstoff - mehr als bei Oxid - das Schwellverhalten ein Standzeit-begrenzender Faktor sein kann, sollte der Schwerpunkt der Versuche auf der Untersuchung dieses potentiellen Schnellbrüterbrennstoffs liegen. Die Probenbelastung ist vom realistischen Brennstab her gegeben durch den Kontaktdruck des schwellenden Brennstoffs, der an der Stabhülle unter den Betriebsbedingungen noch keine unzulässigen Aufweitungen verursacht ( restraint der Hülle ). Dieser zulässige Kontaktdruck dürfte im allgemeinen unter 300 bar. ( 30 MPa ) liegen.

Mit der zu entwickelnden Kapsel sollten die Proben Temperaturen und die durch Gasdruckeinspeisung eingestellten Probenbelastungen mittels geeigneter Meßeinrichtungen während des Betriebes gemessen und kontinuierlich registriert und überwacht werden können.

Bei dem gewünschten Kapseldruck von maximal 500 bar und der in Aussicht genommenen Brennstoffproben Temperatur von maximal 1.800°C waren enorme konstruktive Material- und Montageprobleme zu erwarten. Unter diesen Bedingungen war an eine kontinuierliche Kontrolle der Brennstoffabmessungen nicht mehr zu denken. Der Schwellbetrag des Brennstoffs sollte deshalb bei der Nachuntersuchung in den Heißen Zellen durch genaueste Dichtebestimmung an den einzelnen Tabletten bzw. Tablettenbruchstücken ermittelt werden.

Wegen der massiven Bauweise der Probenkapseln war es bei den geringen Leistungen schwierig, die gewünschten hohen Temperaturen zu erreichen, da relativ viel Wärme axial abfließt. Vorteilhaft wirkte sich allerdings bei dieser Bauweise die relativ hohe Freisetzung von Gamma-Wärme aus. Die Wärmeleistung durch Gamma-Heizung einer Probenkapsel lag mit ca. 300-400 W etwa 2,5-4 mal höher als die eigentliche Probenleistung. Die Gesamtleistung einer Probenkapsel betrug also ca. 400-500 W.

Leider war es bei der gewählten Kapselkonstruktion wegen der Gegebenheiten am FR2 nicht möglich, die Belastungen des Brennstoffs im Betrieb zu verändern; der an einer Probe einmal durch Gaseinfüllung eingestellte Druck konnte im Betrieb nicht mehr verändert werden. Auch eine Temperaturregelung war nicht vorgesehen.

Mit einem Kapselversuchseinsatz (KVE) konnten aber immerhin zwei Proben bei verschiedenen Temperaturen und verschiedener Belastung bestrahlt werden. Eine Begrenzung war hierbei durch die 26 elektrischen Kontakte der vom IMF entwickelten Standard-Oberteile für Brennstoffbestrahlungseinsätze gegeben. Die Versuchseinsätze wurden im FR2 auf Zwischengitterpositionen anstelle von Isotopenkanälen eingesetzt, können aber vom Aufbau her auch eine Brennelement-Position einnehmen.

Die hier behandelte Bestrahlungseinrichtung ist im IMF III konzipiert und ausgelegt worden. Bei ihrer Entwicklung war aber von Anfang an in sehr starkem Maße die Abteilung IT/M-V durch eine Reihe von begleitenden Versuchen, vor allem im Hinblick auf Fragen der Sicherheit, beteiligt. Dort wurden auch die äußerst schwierigen Montage- und Prüfverfahren erarbeitet und an einer Attrappe erprobt. Die wissenschaftliche Betreuung der Versuche liegt beim IMF I.

## 2. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes

### 2.1 Allgemeiner Aufbau

Der gesamte Kapselversuchseinsatz ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und setzt sich wie bisher standardmäßig aus den drei Haupt-Baueinheiten Bestrahlungskapsel, Oberteil und Kühlwasserführung zusammen.

Die eigentliche Bestrahlungskapsel mit einer Länge von ca. 3 m enthält in ihrem unteren Teil im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums zwei sogenannte Probeneinsätze (siehe Abbildung 2). Das äußere Kapselrohr schließt oben standardmäßig mit einer 26-poligen druckfesten und gasdichten Steckerdurchführung ab, über die die Verbindung zum Oberteil hergestellt wird. Die äußere Kapsel ist durchweg aus dem austenitischen Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4571 gefertigt. Die beiden Probekapseln werden mit Thermoelementen und je einem strahlenbeständigen Druckgeber ausgerüstet, der während der Bestrahlung die Druckbelastung der Proben anzeigt und auch Auskunft über ein eventuelles Leck im Probeneinsatz oder dessen Leitungssystem geben kann. Für die beiden Druckgeber werden sechs Anschlußkontakte belegt, so daß für Thermoelemente  $26 - 6 = 20$  Kontakte an der Steckerdurchführung verbleiben. Es stehen also für beide Proben zehn Thermoelemente zur Verfügung, drei bzw. vier Thermoelemente werden in das Innere jeder Probekapsel geführt und ein bis zwei TE werden zur Kontrolle der Wandtemperatur an entsprechenden Stellen auf der Druck-

kapsel befestigt. Bei Temperaturen unterhalb ca.  $1.100^{\circ}\text{C}$  werden Chromel/Alumel-Thermoelemente verwendet, und darüber Hochtemperatur-Thermoelemente des Typs W5Re/W26Re. Über eine Fülleitung von 1,2 mm Außendurchmesser x 0,4 mm Wand, verbunden mit einem Miniatur-Rückschlagventil, wird das Füllgas ( Argon + 10 % Helium ) bei der Endmontage mit einem entsprechenden Druck in das System bzw. den Probeneinsatz eingefüllt.

Die Einfülldrücke hängen vom gewünschten Betriebsdruck und der gewünschten Probentemperatur ( thermische Ausdehnung ) ab; sie wurden für die gegebenen Umstände gerechnet und im Versuch bestätigt. Die Zusammenhänge sind für die eingesetzten Proben in Abbildung 3 dargestellt. Die Gasfülleitung wird nach der Druckeinspeisung vor dem Rückschlagventil dicht verschweißt. Eine zweite Gasleitung der gleichen Abmessung stellt über ein Dreiwegestück die Verbindung zwischen Probeneinsatz und Druckgeber her.

## 2.2 Die Bestrahlungsprobeneinsätze

Zwei voneinander unabhängige Probeneinsätze nach Abbildung 4 liegen übereinander knapp unter Coremitte im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums und sind über jeweils acht Distanznocken im äußeren Kapselrohr zentriert. Beide Probenkapseln können getrennt mit Druckgas gespeist und bei verschiedenen Drücken und Temperaturen gefahren werden. Der Auswahl des Konzeptes für die eigentlichen Probeneinsätze sind umfangreiche Konzeptstudien und Vorversuche vorausgegangen. Danach wurde z.B. aus Festigkeitsgründen die eigentliche Druckkapsel eines Probeneinsatzes aus dem Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4988 gefertigt; sie hat einen Innendurchmesser von 20 mm. Die Wanddicke liegt zwischen 5 und 6 mm je nach der erforderlichen Breite des Gasspaltes zwischen Druckkapsel und äußerem Kapselrohr.

Durch vier Bohrungen im Boden der Druckkapsel sind Tauchrohre aus Wolfram lose hindurchgeführt, die zur Aufnahme und zum Schutz von Thermoelementen dienen. Auf dem zentralen Thermoelementenschutzrohr ( Messung der Brennstoff-Zentraltemperatur ) ist der Probenstapel - z.B. abwechselnd fünf Brennstoffringe von 1,5 mm Dicke und sechs Ringe aus Wolfram - aufgefädelt. Diese abwechselnde Stapelung von Brennstoffringen und gut wärmeleitenden Metallringen wurde gewählt, um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung des Probenstapels zu erreichen und ein

Zerbröckeln der Brennstofftabletten unter Bestrahlung zu vermeiden. Nach dem Befüllen der Druckkapsel mit dem Druckgas stehen die einzelnen Brennstoffringe des Probenstapels unter einer allseitig wirkenden Belastung, die zwischen 0 und  $50 \text{ N/mm}^2$  betragen kann.

Die im Probenstapel erzeugte Wärmemenge wird hauptsächlich durch Wärmeleitung und Abstrahlung an das Mo-Zwischenrohr und von dort über die innere Druckkapsel an das äußere Kapselrohr abgegeben. Die Probertemperatur kann durch Veränderung des Durchmessers der Zwischenringe ( von 6 bis 9,5 mm ) bzw. der verschiedenen Gasspaltbreiten und/oder durch Wahl des Füllgases eingestellt werden. In der äußeren Kapsel ist Helium und in der inneren Kapsel Argon als Füllgas vorgesehen. Da die Wärme möglichst radial nach außen abgegeben werden soll, werden die axialen Anteile durch keramische Isolierkörper klein gehalten.

Die vorgesehenen Hochtemperatur-Thermoelemente haben eine Länge von ca. 50 mm und tragen eine sogenannte Kupplungshülse aus Edelstahl, die die Übergangsstelle auf eine edelstahlummantelte Ausgleichsleitung umgibt. Diese Edelstahlhülsen sind ihrerseits mit der sogenannten Druckhülse dicht verlötet, die nach Verschweißung eine Einheit mit der Druckkapsel darstellt. Der Druckhülsenraum ist zur Vermeidung eines großen Totvolumens weitgehend mit einem keramischen Formkörper ausgefüllt. Mit dem oberen Endstopfen der Druckkapsel ist über eine Hülse eine Druckkapillare dicht verschweißt, die weiter oben ( siehe Abbildung 2 ) in einem Dreiwegestück endet, von dem zwei Anschlüsse weiterlaufen. Der eine Anschluß führt zum Druckgeber, der andere zum Rückschlagventil, das während der Montage Evakuieren und Füllen des Drucksystems auf den gewünschten Druck erlaubt.

In der Anschlußbohrung des oberen Endstopfens ist ein kleines Filterpaket eingebracht, mit dem Brennstoffstaub zurückgehalten werden soll, wenn z.B. bei der Montage nach dem Einfüllen des Gases infolge eines Defektes der Druck wieder abgelassen werden muß. Die gefundene Filteranordnung aus kleinen Sintermetalltabletten und Glasfaserzwischenlagen erlaubt die Handhabung als "geschlossene Pu-haltige Probe" und war damit erst die Voraussetzung für die Montage der Probeneinsätze, weil sie einen Gasdurchtritt ( Evakuieren und Druckeinspeisung ) gestattet, ein Austreten von Pu jedoch nachweislich sicher ausschließt. Eine kleine Druckfeder, die im oberen Endstopfen geführt ist, dient zur Niederhaltung des Probenstapels und der Isolierkörper.

Das Molybdän-Zwischenrohr hat bei einer Länge von 30 mm einen Innendurchmesser von 10 mm. Der Außendurchmesser kann je nach der gewünschten Proben-temperatur bzw. dem erforderlichen Gasspalt zwischen Druckkapselrohr und Zwischenrohr zwischen ca. 17 und 19 mm betragen. In drei achsenparallelen Bohrungen des kurzen Zwischenrohres sind die Thermoelemente mit ihren Schutzrohren zur Messung der Umgebungstemperatur des Probenstapels untergebracht.

Die Bestimmung der Brennstoffprobentemperatur erfolgt durch ein zentrales Thermo-element im Probenzentrum (Anzeige maximal  $1550^{\circ}\text{C}$ ) und drei weitere Thermo-elemente in der Probenumgebung (Anzeige maximal  $1200^{\circ}\text{C}$ ) zur Kontrolle des heißen Zentral-Thermo-elementes.

### 3. Thermodynamische Auslegung der Kapsel

Bei der thermodynamischen Auslegung der Hochdruck-Schwellkapsel wurde zugrunde-gelegt, daß im Probenstapel 100 bis 200 W an Spaltungswärme frei werden. Hinzu kommt die in den einzelnen Schichten durch Einfang von Gamma-Quanten frei werdende sogenannte Gamma-Wärme von 0,5 W/g im FR2, die bei den relativ großen Massen dieser Kapsel mit maximal ca. 400 W in die Berechnungen eingeht.

Die Wandmittentemperatur der eigentlichen Druckkapsel soll aus Festigkeitsgründen unter  $565^{\circ}\text{C}$  liegen. Damit ergibt sich ein zulässiger Gasspalt zwischen Druckkapsel und äußerem Kapselrohr von maximal 2 mm bei Helium-Füllung.

Die inneren Gasräume werden mit dem weniger gut wärmeleitenden Argon gefüllt, weil sonst die gewünschten hohen Proben-temperaturen nicht zu erreichen sind. Wegen den notwendigen Dichtheitsprüfungen (He-Leckkontrolle) werden ca. 10 % Helium beige-mischt. Die thermodynamische Durchrechnung der Kapsel erfolgte mit dem Fortran-Rechenprogramm "WIROCO", das auf dem Relaxationsverfahren der Thermodynamik zur Lösung der Fourier-Gleichung des Wärmeübergangs für den mehrdimensionalen Fall in beliebigen Körpern beruht und auch Wärmestrahlung berücksichtigen kann /10/. Diese Rechnungen zeigen unter anderem auch, daß die Temperaturverteilung in den einzelnen Brennstoffringen bei der gewünschten Konstruktion sehr gleichmäßig ist, insbeson-dere bei karbidischem Brennstoff wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit. Die Tempera-turen der verschiedenen Ringe eines Probenstapels sind untereinander nur um maximal 200 K verschieden. Wegen der besonderen Wärmeableitungsverhältnisse liegt die höchste Temperatur weder in der Achse des Probenstapels noch an der inneren Wand der Ringtabletten, sondern ringförmig im Innern des Brennstoffquerschnitts

jeder Tablette; d.h. die maximale Brennstofftemperatur liegt höher als die gemessene Zentraltemperatur. Die höchste Brennstofftemperatur lag bei den Versuchen mit maximal  $1750^{\circ}\text{C}$  um ca. 200 K über der höchsten Thermoelementanzeige von ca.  $1550^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. Besonderheiten des Konzeptes

Die gesamte Entwicklung dieser anspruchsvollen Einrichtung bis hin zur Endmontage war begleitet von der Bewältigung einer Vielzahl schwieriger Details. Kurz zusammengefaßt liegen die Besonderheiten:

- darin, eine Geometrie zu finden, die bei der geringen Leistung der Proben hohe Temperaturen ermöglicht, sowie die damit verbundene Auswahl der Konstruktions-Werkstoffe,
- als Voraussetzung zur Montage eine Probenkapsel zu entwickeln, die einen Gasdurchtritt (Evakuieren und Druckeinspeisung) gestattet, ein Austreten von Pu jedoch nachweislich sicher ausschließt,  
(Die gefundene Filteranordnung aus kleinen Sintermetalltabletten und Glasfaserzwischenlagen erlaubt die Handhabung als geschlossene Pu-haltige Probe)
- in der konstruktiven Bewältigung der Probleme, die an Miniaturdruckbehältern, insbesondere durch die Herausführung von Meßleitungen auftreten,
- in der Lösung der Löt- und Schweißprobleme bei den verschiedenen Materialpaarungen (umfangreiche Druck- und Berstversuche),
- in der Erarbeitung von äußerst komplizierten Montage- und Prüftechniken für das reaktionsfreudige Karbid unter Plutoniumbedingungen,
- schließlich in der Tatsache, daß diese kleinen Hochdruckkapseln bei hohen Temperaturen über längere Zeit unter Bestrahlung im Reaktor mit hinreichender Sicherheit betrieben werden können.

#### 5. Vorversuche zur Auslegung der Kapsel

Wegen der hohen Innendrucke kommt der festigkeitsmäßigen Beurteilung der eigentlichen Druckkapsel besondere Bedeutung zu. Aus diesem Grunde waren vor allem Vorversuche durchzuführen, die Aussagen über die Betriebssicherheit dieser Kapsel

besonders auch im Hinblick auf Schweißnähte und Lötverbindungen erlauben sollten. Daneben waren noch eine Reihe weiterer Versuche notwendig, um die unter Abschnitt 4 genannten Probleme zu lösen.

Die wichtigsten Versuche und ihre Ergebnisse werden im folgenden kurz behandelt:

#### Werkstoffwahl und Schweißtechnik

Zur Fertigung der druckhaltenden Kapselteile wurden vier Werkstoffe in die Auswahl genommen /11, 12/: Werkstoff-Nr. 1.4571, 1.4988, Niob-1% Zr und Nb 17W 3,5 Hf

Als Verbindungstechniken wurden erprobt:

Elektronenstrahlschweißung

WIG-Schweißung

Hochtemperaturlötung

Zur Beurteilung der Materialien und Verbindungen dienten Wasserdruckproben bis 1000 bar, Dichtheitsprüfungen mit dem He-Massenspektrometer, Röntgenprüfungen, Berstversuche unter Variation von Druck und Temperatur, Gefüge-Schliffbilder.

Die Versuche ergaben für den hochwarmfesten, legierten Stahl Werkstoff 1.4988 vergleichsweise gute Ergebnisse, so daß die hochbeanspruchten Teile wie Kapselkörper, Druckhülse und Kapselendstopfen letztlich aus diesem Material gefertigt wurden. Allerdings ist seine Schweißbarkeit nur bedingt gut. In den Schliffbildern wurden Mikrorisse im Gefüge nachgewiesen, und mittels Röntgenbild konnten Einschlüsse und Schweißnahtwurzelfehler erkannt und beurteilt werden.

Für die weniger beanspruchten Bauteile wie Kapillarrohre, Schweißmuffen, Verteilerbaugruppen etc. wurde der Werkstoff 1.4571 ausgewählt, der sich mit dem Werkstoff 1.4988 verschweißen läßt.

Als druckdichte Verbindung der Thermoelemente mit der Druckhülse eignet sich sowohl das Einschweißen nach der WIG-Methode, als auch eine induktive Hochtemperaturlötung mit dem Nickelbasislot NICROBRAZ 30 im Hochvakuum. Die Lötung ist vorzuziehen, da bei der gedrängten Anordnung Schäden durch Schweißstromüberschläge nicht auszuschließen sind, und die Teile in einem Arbeitsgang verbunden werden können.

Die druckdichte Verbindung der Wolframschutzrohre für die Thermoelemente mit dem Kapselkörper aus Edelstahl mußte aufgegeben werden, da die Lötstellen offenbar so versprödeten, daß schon geringe mechanische Beanspruchungen zum Bruch der Wörhrchen an der Lötstelle führten.

Die Schutzrohre werden daher nur lose in die Verbindungsbohrungen des Kapselkörpers eingeschoben, so daß Druckhülse und Kapselkörper einen gemeinsamen Druckraum bilden.

#### Druck- und Berstversuche

Zur Überprüfung, ob der Kapselkörper den geforderten Bedingungen von ca. 500 bar bei 500°C ohne Schaden standhält bzw. um die Belastungsgrenzen abzustecken, wurde eine Reihe von Probe-Kapselkörpern aus den eingangs genannten Materialien Druck- und Berstversuchen unterworfen. Strahleneinflüsse im Reaktor konnten dabei allerdings nicht simuliert werden.

Zur Prüfung wurden die mit einer Druckaufgabekapillare verschweißten Kapselkörper in eine Vakuumkammer eingebaut, durch deren Wand die Kapillare dicht hindurchgeführt wurde. Um die Kapselkörper wurde konzentrisch die Heizspule eines Hochfrequenzgenerators als Wärmequelle angeordnet und die Kapselkörpertemperatur mittels zweier Thermoelemente überwacht. Das Volumen der Kammer wurde über ein He-Massenspektrometer evakuiert, so daß während der Versuche auftretende Undichtheiten am Kapselkörper sofort erkannt werden können, da die Innendruckbelastung des Kapselkörpers durch einen He-gespeisten Membranverdichter erzeugt wurde.

Die Prüflinge wurden einer Vielzahl verschiedener Druck-/Temperatur-Kombinationen unterworfen, wobei in einem Falle der Druck mit 750 bar, in einem anderen Falle die Temperatur mit ca. 1200°C ein Maximum erreichten. Die relativ hohen Temperaturen waren bei den Nb-Legierungen möglich. In sechs Fällen wurden die Druck- und Temperatur-Werte soweit gesteigert, daß es zum Bersten der Probekapseln gekommen ist. Drei dieser sechs Berstproben sind in Abbildung 5 abgebildet. Das unterschiedliche Rißverhalten der verschiedenen Materialien ist daraus deutlich zu erkennen.

Im einzelnen wurden die Druck- und Berstversuche in /8/ ausführlicher beschrieben; ihre Ergebnisse sind in der Abbildung 6 zusammengestellt. Insgesamt wurden 29 Parameterpaare gefahren, wobei die Druck- und Temperaturwerte zum Teil weit über den geforderten Betriebsbedingungen lagen. Das Endergebnis der Versuche war schließlich, daß der Werkstoff 1.4988 bei der vorliegenden Geometrie im Versuch 500°C bei 500 bar innerem Überdruck sicher standhält.

Bei 625 bar/700°C betrug z.B. die bleibende Verformung nach 18 h Belastung am kritischen Durchmesser  $\delta = 0,1 \%$  und bei 750 bar/600°C nach 3,5 h  $\delta = 0,2 \%$ .



### Ventile zur Druckeinspeisung

Um den Vorgabedruck (Einfülldruck) ins Kapselsystem eingeben zu können - der Enddruck wird dann im Reaktor durch Temperatursteigerung erreicht - bedarf es der engen Geometrie wegen eines möglichst kleinen Ventils, das ca. 350-400 bar sicher abdichtet. Und zwar zumindest solange, bis am Ende der Montage das Drucksystem hinter dem Ventil dicht verschweißt werden kann.

Zur Auswahl standen zwei auf dem deutschen Markt zu erwerbende Autoschlauchventile in normaler bzw. verstärkter Ausführung und ein amerikanisches Spezial-Rückschlagventil. Alle drei Typen erwiesen sich als geeignet. Die Ausgangsleckrate von  $< 10^{-8}$  mbar·l/s stieg unter einem Druck von 600 bar bei keinem der drei Ventile über  $10^{-6}$  mbar·l/s an.

Der günstigen Baumaße wegen wurde dem verstärkten Autoschlauchventil der Vorzug gegeben.

### Niederhaltefeder für den Brennstoffprobenstapel

Zur Niederhaltung des Tablettenstapels in der Probenkapsel ist eine Feder notwendig, die auch nach der Bestrahlung bei Transport und Demontage zumindest eine gewisse Formstabilität haben sollte, um ein Zerbröckeln des Brennstoffs zu vermeiden. Es war deshalb zu prüfen, wie sich diese Feder bei den zu erwartenden hohen Temperaturen oberhalb des Tablettenstapels (maximal  $1500^{\circ}\text{C}$ ) verhalten würde. Als Federwerkstoff stand Tantal- und Molybdändraht zur Auswahl. Die Testfedern wurden in ein rohrförmiges Prüfgehäuse aus Niob eingebracht und mittels eines Kolbens auf ein bestimmtes Maß vorgespannt. Dieses Gehäuse wurde konzentrisch in der Heizspule eines Hochfrequenzgenerators angeordnet, welche in eine Vakuumkammer eingebaut war. Zur Temperaturüberwachung diente ein Thermoelement an der Feder.

Die Federn beider Materialien blieben formstabil bis  $1500^{\circ}\text{C}$ . Allerdings waren sie nach dem Versuch auf die eingespannte Länge kalibriert. Ein Vergleich der Federaten vor und nach dem Glühen ergab ähnliche Werte, jedoch trat bei den geglühten Federn viel früher bleibende Verformung ein. Federn aus beiden Materialien sind aber für den gewünschten Zweck einsetzbar.

### Filterpaket für Plutoniumstaub

Eine wesentliche Voraussetzung, die Gesamtkonzeption überhaupt verwirklichen zu können, war, die noch nicht dicht verschweißte Pu enthaltende Kapsel während der

Montage als "Probe mit umschlossenem radioaktivem Material" deklarieren zu können. Dabei muß gewährleistet sein, daß trotz atmosphärischer Verbindung des Kapselinnenraumes mit der Umgebung kein Pu austreten kann. Auch dann nicht, wenn das System bereits unter Vordruck stünde und dieser wieder abgeblasen werden müßte. Es war also ein Filter bzw. Filtersystem zu entwickeln, das dem Kapselinnenraum vorgeschaltet wird.

Geprüft wurde eine Edelstahl-Sinterfritte von 8 mm  $\emptyset$ , 10 mm Dicke, Filterfeinheit 10  $\mu\text{m}$ , und eine Filterpackung aus drei Edelstahl-Sinterfritten von 8 mm  $\emptyset$  und je 3 mm Dicke, Filterfeinheit 10  $\mu\text{m}$ , mit zwei Zwischenlagen von Schwebestoff-Filtermatten von je 0,5 mm Dicke mit einem Pu-Abscheidegrad von 99,97 % bezogen auf 0,03  $\mu\text{m}$  Staubkorngröße. Die Filter wurden in ein Prüfgehäuse eingesetzt, welches durch zwei druckdicht verschraubte Flansche gebildet wurde, deren einer eine den Filtern entsprechende Aufnahme hatte und deren anderer eine kleine Kammer enthielt, in welche etwas Pu-Staub eingegeben wurde. Sowohl von der Filteraufnahme als auch von der Kammer führte je eine Bohrung durch die Flanschstützen nach außen, so daß die Flanschverbindung über die Filter Durchlaß hatte.

An den Stützen des Flansches mit der Pu-Kammer wurde nun das Drucksystem mit Membranverdichter angeschlossen. Dadurch war es möglich, verschiedene im System anstehende He-Drücke über die Pu-Kammer und die Filter abzublasen. Die Prüfanordnung war in einer Pu-Arbeitsbox im Pu-Labor des KfK installiert.

Bei der Sinterfritte wurde bereits nach Abblasen von 50 bar He Pu hinter dem Filter eindeutig nachgewiesen.

Bei der Filterpackung wurden nacheinander 50, 150 und 350 bar abgeblasen, ohne daß Pu-Kontamination hinter dem Filter nachgewiesen werden konnte.

Die Evakuierbarkeit des Kapselinnenraumes über die Packung ist allerdings sehr schlecht (Abbildung 7). Nach 42 h Pumpzeit wurde immer noch ein Innendruck von 5 mbar gemessen. Die weitere  $\text{O}_2$ -Reduzierung im Kapselinnenraum mußte daher durch mehrfaches Spülen mit einem inerten Gas bewirkt werden.

#### Füllkörper zur Vermeidung eines großen Totvolumens

Aus Sicherheitsgründen empfahl es sich, den Gasinhalt (p.V) im Drucksystem, vor allem auch schon während der Montage möglichst gering zu halten. Deshalb wurde es notwendig, das freie (unbeheizte) Totvolumen im Drucksystem durch Füllkörper im Kapselraum zu reduzieren. Von diesen Füllkörpern war zu fordern, daß sie gute Wärmeisoliereigenschaften und eine gute Formbeständigkeit bei hohen Temperaturen

bzw. steilen Temperaturgradienten besitzen. Daneben sollte das Material möglichst geringe Auswirkung auf die Evakuierbarkeit des Kapselinnenraumes haben und bei einem eventuell während der Montage notwendigen Ablassen des Einfülldruckes nicht zerplatzen. Das seiner guten Bearbeitbarkeit wegen gewählte keramische Material KER 240 DIN 40685 hatte diesbezüglich ausreichend gute Eigenschaften. Es bestand sowohl Glühungen bei 1200°C im Vakuum, als auch starke örtliche Wärmebelastungen z.B. beim Verschweißen der Kapselteile absolut formbeständig. Nach längerem Ausheizen und Ausgasen in einem Vakuumofen bei ca. 1000°C lag die Evakuierungszeit einer mit diesen Füllkörpern bestückten Kapsel nur doppelt so hoch wie die der leeren Kapsel, um einen Druck von  $1,5 \cdot 10^{-5}$  mbar zu erreichen. Ein Verhalten, das durchaus akzeptiert werden konnte.

#### Eichung der Druckaufnehmer

Zur Überwachung der Kapselinnendrucke im Betrieb werden sogenannte Druckaufnehmer eingesetzt, die zu eichen und deren Reproduzierbarkeit der Meßanzeige bzw. Hysterese des Meßsystems zu ermitteln waren. Die hier verwendeten Druckaufnehmer haben ein mechanisch-elektrisches Meßsystem folgender Wirkungsweise:

Eine starke Metallmembran im Gehäuse des Druckaufnehmers steht über eine Kapillare mit der Druckkapsel in Verbindung und wird je nach Höhe des Druckes verschieden stark aus ihrer Ausgangslage ausgelenkt. Mit der Membran verbunden ist ein magnetischer Anker, der entsprechend der Membranbewegung in dem elektrischen Feld eines kleinen Differentialtransformators verschoben wird und dadurch Spannungsdifferenzen hervorruft, die nach Eichung ein Maß für die anstehenden Drücke sind.

Das Meßsignal beträgt bei 1 bar = 0,0 mV

550 bar = 100 mV

Zur Messung wurde ein hochempfindliches Digitalvoltmeter benutzt. Zur Druckerzeugung bei der Eichung wurde ein 2000 bar Membrankompressor eingesetzt, der über eine Kapillare den Druckaufnehmer mit Heliumgas beaufschlagte. Dabei wurden verschiedene Drücke zwischen 1 und 550 bar eingestellt, die Linearität

der dazu angezeigten mV geprüft und die Hysterese nach Entspannung auf 550 bzw. 1 bar ermittelt. Die Eichreihe wurde einmal bei Raumtemperatur (20°C) und je einmal bei 30°C, 50°C und 80°C am Druckaufnehmer gefahren.

Die bei allen Versuchen gefundenen Abweichungen von den Idealwerten überschritten dabei in keinem Fall den Wert von  $\pm 0,5 \%$  bezogen auf den Endwert von 550 bar, was akzeptiert werden konnte.

#### Hilfseinrichtungen für Prüfung, Montage und Transport

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß parallel zu den Versuchen eine Vielzahl von Hilfseinrichtungen konzipiert, gebaut und erprobt werden mußte.

Die wichtigsten waren:

Einrichtung zum Fixieren der vielen empfindlichen Komponenten und zum Schutz der druckhaltenden Teile bei Montage und Transport.

Mit Metallring gedichtete Druck-Prüfvorrichtung bis 600 bar.

Vakuunkessel zur integralen Dichtheitsprüfung des Drucksystems.

Vorrichtung zur Öffnung des Druckaufgabeventils während des Evakuierens und der Spülung des Systems mit Inertgas.

#### Zusammenfassung der Vorversuche zur Kapselauslegung

Zusammenfassend müssen drei Versuchsergebnisse als nicht voll den Erwartungen entsprechend gewertet werden.

1. Einschlüsse, Wurzelfehler und Mikrorisse in den Schweißnähten.  
Die Fehler können erkannt und beurteilt werden. Eine Auswirkung dieser Fehler auf das Festigkeitsverhalten konnte nicht nachgewiesen werden.
2. Die druckdichte Verbindung der W-Röhrchen mit der Kapsel aus Werkstoff-Nr. 1.4988 mußte aufgegeben werden. Druckhülse und Kapselkörper bilden einen einheitlichen Druckraum.
3. Das schlechte Evakuierverhalten der Filterpackung zwingt dazu, eine ausreichend hohe  $O_2$ -Verdünnung in der Kapsel durch mehrfache Spülvorgänge mit inerten Gasen zu erwirken.

Die übrigen Versuchsergebnisse und Funktionstests stellen durchweg technisch akzeptable Lösungen dar. Dies wurde durch den Betrieb von drei Versuchseinsätzen im FR2 bestätigt.

## 6. Montage- und Prüfplan

Im folgenden werden die einzelnen Montage- und Prüfschritte für die Bestrahlungskapsel aufgeführt, wobei die Bezeichnung der Einzelkomponente gemäß Abbildung 2 vorgenommen ist.

1. Reinigung aller Einzelteile kurz vor ihrer Verwendung entsprechend Spezifikation bzw. Entnahme der unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen aufbewahrten Teile je nach Arbeitsfortschritt unter Beachtung der Reinheits- und Dichtheitsvorschriften und der Nummern einander angepaßter Teile.
2. Einpassen der Thermoelemente (Teil 49) in die Druckhülse (36).
3. Einpassen der Wolfram-Schutzrohre (Teil 47) in den Kapselkörper (35).
4. Einführung des Füllkörpers (39) in die Druckhülse (36).
5. WIG-Schweißung Kapselkörper/Druckhülse (35/36) nach den in Vorversuchen ermittelten Schweißparametern (2 mm - Abstandslehre für den Nutgrund).
6. Röntgenprüfung der Schweißnaht.
7. WIG-Schweißung Thermoelemente/Druckhülse (36/49); messen der Thermoelemente, Protokoll.
8. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
9. Im Pu-Labor Tragstange, Schubstange, Wolfram-Plättchen und eine Abstandshülse in Aktivbox, Füllschuh, Verschlußstopfen mit einem Metallfilter (Festsitz) und Kapselkörper-Baugruppe in Inaktivbox einschleusen.
10. Kapselkörper-Baugruppe mit eingebauten Teilen (47) (Schutzrohre), 41 (Hülse), 42 (Isolierstück) und 46 (Zwischenrohr) in Inaktivbox aufsetzen auf Füllschuh.
11. Tragstange steht aus Schubstange um Stapellänge von 30 mm heraus; auf Tragstange aufschieben von links nach rechts in der Aktivbox:
  - a) Zwischenplättchen (Teil 48) rechts,
  - b) Brennstofftablette (Teil 53) usw. im Wechsel, siehe Plan mit Nummern der ausgewählten Komponenten,
  - c) letztes Zwischenplättchen (48),
  - d) Abstandshülse (Teil 43) links.
12. Alles in Füllschuh einschieben; wenn die linke Ringkerbe des Schubrohres im Füllschuh noch sichtbar ist, die Ringkerbe des Tragrohres ebenfalls noch sichtbar ist, sitzt der Zapfen des Tragrohres mit seiner Zentrierbohrung auf dem mittleren Schutzrohr (47) auf.
13. Mit dem Schubrohr wird der Stapel auf das mittlere Schutzrohr aufgeschoben; die rechte Ringkerbe des Schubrohres rückt dadurch nach links bis zum Verschwinden im Füllschuh.

14. Abnehmen der Kapselkörper-Baugruppe in der Inaktivbox vom Füllschuh, Einbau von Formkörper mit Abstandshülse und Feder.
15. Aufsetzen des Verschlusstopfens mit dem ersten Metallfilter auf den Kapselkörper.
16. Verschweißen des Verschlusstopfens (37) mit dem Kapselkörper (35), WIG-Methode in Schweißbox (2 mm-Abstandslehre).
17. Vervollständigung des Filterpakets, Einbau und Schweißung der Kopfhülse (WIG-Methode in der Schweißbox).
18. Röntgenprüfung aller zuletzt gelegten Schweißnähte und der kompletten Einsätze; Helium-Lecktest (Vakuum-Methode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s); messen der Thermoelemente, Protokoll.
19. Plasmaschweißung der Kupplungshülsen (31) mit den Kapillarrohren (32, 33, 34).
20. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
21. Einschweißen der Kapillarleitung (31/32) in die Kopfhülse (38), WIG-Schweißung in Schweißbox.
22. Dichtheitsprüfung (Vakuum-Methode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
23. Biegen der Thermoelemente (49) und Befestigung auf dem Kapselkörper (35); nachmessen der Thermoelemente, Protokoll.
24. Anschweißen der Kapillaren (31/33 und 31/34) an das Dreiwegstück (28), WIG-Schweißung.
25. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
26. Anschweißen der Kapillare (31/33) des Dreiwegstücks (28) an den Ventilkörper (29).
27. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
28. Einbau des Ventileinsatzes (50) in den Ventilkörper (29).
29. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
30. Anschweißen der Dreiwegstück-Gruppe (28/31/33/34/29) an die Kapselkörper-Baugruppe (35/36/37/38/31/32).
31. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
32. Anbau des Zwischenstücks (18) auf den unten im FR2 vorgesehenen Schwellprobeneinsatz, Ausbiegen der Kapillare, Befestigung beider Schwellprobeneinsätze und der angeschlossenen Baugruppen auf der Montageschiene.

33. Befestigen der Thermoelemente und Kapillaren an den dafür vorgesehenen Stellen der benachbarten Bauteile.
34. Überschieben des unteren Kabelführungsrohres (20) mit dem Ring (21) und sichern mit der Arretierschraube (19).
35. Schweißung von Kapselrohr (14), Erweiterungsstück (13), Zwischenrohr (11), Zentrierring (12) und Verjüngungsstück (10) mittels WIG-Schweißung.
36. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
37. Einschieben des unteren Kabelführungsrohres (20) samt Kapillaren, Thermo-elementen und den angebauten Schwellprobeneinsätzen (27) in die Kapselrohr-Baugruppe (14/13/11/12/10).
38. Oberes Kabelführungsrohr (24) über Thermoelemente und Kapillaren in das Untere Kabelführungsrohr auf etwa 150 mm Länge einschieben.
39. Unteren Druckaufnehmer (30) an untere Kapillare (31/34) anschweißen.
40. Schlitzrohr (26) über obere Kapillare schieben, oberen Druckaufnehmer anschweißen.
41. Elektrische Anschlüsse des unteren Druckaufnehmers (30) aus oberem Schlitz des Schlitzrohres (26) herausführen, Kabelanschlüsse beider Druckaufnehmer mit Araldit-Gießharz vergießen.
42. Elektrische Funktionsprüfungen der Thermoelemente und Druckaufnehmer; Protokoll.
43. Alle Teile auf Montageschiene in richtige Lage bringen, Kabelführungsrohre mit Schraube (23) und Mutter (22) verbinden, beide Ventilkörper aus dem Schlitz des unteren Kabelführungsrohres herausbiegen.
44. Evakuieren und Spülen beider Druckgassysteme, Druckbeaufschlagung mit den vorgesehenen Aufzeichnungen und Kontrollen.
45. Dichtheitsprüfung der Druckgas-Systeme.
46. Zuschweißen der Ventilkörper mit ihren Stopfen.
47. Dichtheitsprüfung der letzten Schweißnähte, einbiegen der Ventilkörper.
48. Schweißung von Kapselkopf (4) und Verlängerungsrohr (9), WIG-Schweißung; Schraubhülse (7) mit Gewindezapfen (8) ist bereits aufgeschraubt.
49. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-7}$  mbar·l/s).
50. Aufschieben von Verlängerungsrohr und Kapselkopf (4/9) auf Kabel und Thermo-elemente, beide Druckaufnehmer und Kabelführungsrohre bis über das Verjüngungsstück (10).

51. Wendeln der Thermoelemente und Kabel und Anschluß an die Stecker-Baugruppe (1/2) bei übergeschobener Vergußhülse (3).
52. Elektrische Funktionsprüfungen (Schleifen- und Isolationswiderstände), Protokoll
53. Ausguß der Kabelanschlüsse am Stecker.
54. Elektrische Funktionsprüfungen (Schleifen- und Isolationswiderstände), Protokoll
55. Verschweißen von Verlängerungsrohr (9) und Verjüngungsstück (10), WIG-Methode.
56. Verschweißen von Kapselrohr (14) und Kapselendstopfen (15), WIG-Methode.
57. Verschweißen von Steckerbaugruppe (1/2/3) und Kapselkopf (4), WIG-Methode.
58. Elektrische Funktionsprüfungen (Schleifen- und Isolationswiderstände), Protokoll.
59. Helium-Spülungen und Dichtheitsprüfung der Kapsel (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-6}$  mbar·l/s).
60. Zuschweißen der Stopfen (5 und 16), WIG-Methode, Kapselinhalt: He.
61. Dichtheitsprüfung der Kapsel (Vakuummethode, Leckrate maximal  $10^{-6}$  mbar·l/s).
62. Befestigen des Strömungskörpers (17, 5), Einbau der Dichtungsringe (6).
63. Wärmeprüfung (Aufheizen auf ca. 100°C) der Bestrahlungskapsel (Funktionsprüfung, Druckaufnehmer, Thermoelemente).
64. Messen der Thermoelemente, Protokoll.



## 7. Betriebserfahrungen und -ergebnisse

Die äußerst komplizierte Montage- und Prüftechnik wurde zunächst an einer Attrappe und anschließend an einem Prototyp-Einsatz erprobt, der mit  $\text{UO}_2$ -Probenstapeln dann zur Bestrahlung eingesetzt wurde. Bei den Druck- und Temperaturtests stellte sich u.a. erwartungsgemäß heraus, daß die Mäntel der Hochtemperaturthermoelemente unter den Betriebsbedingungen ( maximal 500 bar (50 MPa) und ca.  $1.600^\circ\text{C}$  ) nicht gasdicht sind. Was jedoch nicht von vornherein zu erwarten war, ist die daraus resultierende Tatsache, daß der Innendruck der Kapsel über die mehrere Meter langen Thermoelementleitungen relativ schnell abbläst, obwohl deren  $\text{MgO}$ -Isolation bis auf sehr hohe Dichte gehämmert ist. Der Gasaustritt konnte verhindert werden, in dem zusätzliche dichte Steckverbindungen in die Thermoelementleitungen eingebracht wurden bzw. der Verbindungsstecker dicht vergossen wurde.

Die wichtigsten Betriebsdaten der bestrahlten drei Kapselversuchseinsätze mit je zwei Brennstoffprobenkapseln sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

KVE 146: Der erste Versuchseinsatz dieser Art wurde als Prototyp mit zwei  $\text{UO}_2$ -Probenstapeln zu je fünf  $\text{UO}_2$ -Ringem eingesetzt. Die ersten Betriebserfahrungen sind mit der Bestrahlung dieses Prototypeinsatzes gesammelt worden, der erfolgreich vier Reaktorzyklen ( 165 Tage ) gelaufen ist. Das erste Ziel der Prototypbestrahlung, nämlich die Funktionstüchtigkeit des Kapselkonzeptes nachzuweisen, ist damit voll erreicht worden. Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, entsprachen jedoch bei Probe 1 die erreichten Probentemperaturen noch nicht ganz den erwarteten Werten. Bei der gleichen Probe war während der Montage wegen einer scheinbaren geringen Undichtheit, die sich später als Irrtum herausstellte ( He-Kontamination der Thermoelemente ! ), der Einfülldruck von 90 auf 16 bar abgesenkt worden, so daß die Probenbelastung bei Betriebstemperatur nicht den ursprünglich vorgesehenen Wert erreichen konnte. Bei Probe 2 konnten dagegen bereits im ersten Anlauf die gewünschten Temperaturen und der entsprechende Betriebsdruck hinreichend gut erreicht werden.

KVE 156: Leider ist auch der zweite Versuchseinsatz mit zwei (U, Pu) C-Probenstapeln Nr. 5 und 6 nur ein Teilerfolg. Die Temperaturen konnten zwar bei beiden Proben sehr gut eingestellt werden und bei Probe 6 auch die Probenbelastung, doch scheint bei Probe 5 nach kurzer Bestrahlungszeit

ein kleines Leck aufgetreten zu sein, weshalb zunächst der gewünschte Betriebsdruck nicht ganz erreicht wurde. Innerhalb von 12 Tagen ist der Druck von 360 auf ca. 300 bar abgesunken, d.h. es haben sich entsprechende Mengen Argon aus der Innenkapsel mit dem Helium in der Außenkapsel vermischt. Die daraus resultierende Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit machte sich in einem Anstieg aller Temperaturen an beiden Probenkapseln einschließlich der für die Festigkeit maßgebenden Kapselwandtemperaturen bemerkbar. Da bei Probe 6 bereits der Grenzwert von 565°C überschritten worden war, wurde die Bestrahlung zunächst nach 12 Tagen unterbrochen.

Entscheidend für den sicheren Betrieb dieser Kapselversuchseinsätze ist, daß sowohl Temperaturanstiege als auch Druckabfälle sicher detektiert worden sind. Es besteht also eine zweifache Möglichkeit der Leckdetektion.

Solche Überlegungen führten dann zu einem Weiterbetrieb des KVE auf einer Randposition bei etwa halber Leistung bis zu einem Abbrand von ca. 15.000 MWd/tM. Die Probertemperaturen lagen dabei um 1.000°C ( Probe 5 ) bzw. um 1.150°C ( Probe 6 ). Der Betriebsdruck bei Probe 6 lag bei 210 bar und der von der undichten Probe fiel weiter bis auf ca. 15 bar ab.

KVE 158: Gewarnt durch das Auftreten des Lecks bei KVE 156 wurde der letzte Versuchseinsatz mit zwei (U, Pu) C-Proben Nr. 8 und 10 bei nun 200 K niedrigeren Temperaturen als ursprünglich gewünscht gefahren. Die erwarteten Drücke wurden jedoch erreicht. Der KVE lief planmäßig über 93 Tage bis zu einem Abbrand von ca. 11.500 MWd/tM. Dann trat ein allmählicher Anstieg aller Temperaturen ein, ohne daß gleichzeitig eine Druckabsenkung an einer Probenkapsel feststellbar gewesen wäre. Es konnte sich also nicht um ein Leck einer inneren Druckkapsel, verbunden mit dem Austreten von Argon handeln. Vielmehr mußte ein Leck in der äußeren Kapselwand vermutet werden, demzufolge Kühlwasser in die Kapsel eintreten und beim Verdampfen die Wärmeleitung im Helium-Spalt verschlechtern würde. Die Bestrahlung wurde aus diesem Grund vorzeitig abgebrochen. Die Nachuntersuchung in den Heißen Zellen hat den Verdacht jedoch nicht bestätigt, so daß die Störungsursache nicht geklärt werden konnte.

Im übrigen hat die visuelle Nachuntersuchung bei keinem der drei Kapselversuchseinsätze einen sichtbaren Schaden gezeigt. Alle sechs Probeneinsätze waren einwandfrei und ließen lediglich vereinzelt Anlauffarben auf der Oberfläche erkennen (Abbildung 8). Die Brennstofftabletten, die zwischen Wolfram-Zwischenplättchen auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr aufgefädelt sind, waren allerdings nach der Zerlegung weitgehend zerbrochen (Abbildung 9). Zur nachträglichen Bestimmung der Schwellraten reichten jedoch die Tablettenbruchstücke aus.

Leider hat es während der Entwicklung der hier behandelten Versuchseinrichtungen und im Experimentablauf wegen der genannten Schwierigkeiten verschiedentlich Verzögerungen gegeben. Durch lange Lagerung ist deshalb auch der für zwei weitere Versuchseinsätze vorgesehene Karbidbrennstoff unbrauchbar geworden. Da in der Zwischenzeit die Karbidarbeiten im KfK reduziert worden waren und neuer Brennstoff nicht mehr gefertigt werden konnte, ist das Programm nicht mehr in vollem Umfang durchgeführt worden. Alles in allem ist aber das Experiment trotz aller Schwierigkeiten erfolgreich verlaufen. Mit dem Betrieb dieser Bestrahlungseinrichtung ist es erstmals gelungen, Schwellbeträge an Kernbrennstoffen im Versuch unter den definierten Bedingungen einer allseitigen Druckbelastung und bei definierten Temperaturen zu ermitteln.

Tabelle: Übersicht über die im FR2 bestrahlten Hochdruckschwellkapseln

	KVE 146 Prototyp		KVE 156		KVE 158	
	Probe 1	Probe 2	Probe 5	Probe 6	Probe 8	Probe 10
Brennstoff	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	(U,Pu) C	(U,Pu) C	(U,Pu) C	(U,Pu) C
Anreicherung	15% U-235	15% U-235	15% PuC	15% PuC	15% PuC	15% PuC
Erwartete Leistung						
Q <sub>fission</sub> Watt	ca. 100	ca. 100	ca. 120	ca. 120	ca. 150	ca. 150
Q <sub>γ</sub> Watt	ca. 400	ca. 400	ca. 300	ca. 300	ca. 350	ca. 350
Gaseinfüllung (Argon + 10% He) bei Raumtemperatur bar	(90) 16	180	160	150	180	140
Außenspalt (Helium) mm	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Mittlerer Spalt (Argon + 10% He) mm	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Innerer Spalt (Argon + 10% He) mm	1,5	1,5	0,3	1,5	0,3	0,3
Erwartete Probertemperatur °C	1400-1500	1000-1100	1150-1250	1350-1450	1200-1300	1400-1500
Erwartete Probenbelastung N/mm <sup>2</sup>	(20) 4	40-50	40-50	40-50	35-45	35-45
Erwarteter Betriebsdruck bar	(ca.220) 40	400-500	400-500	400-500	350-450	350-450
Erreichte Probertemperatur °C (Meßwerte)	1300	1000	1250	1550	1050	1220
Erreichte Temp. im Mo-Zwischenrohr °C	880	680	800	1000	700	800
Erreichte Kapselwandtemp. °C	520	390	440	590	400	550
Erreichter Betriebsdruck bar	35	450	360 kurzzeitig	435 kurzzeitig	400	350
Bestrahlungszeit Tage	165		205		93	
Abbrand MWD / tM	ca. 25000		ca. 15000		ca. 11500	

Die erreichten Werte sind Maximalwerte zu Beginn der Bestrahlung

8. Veröffentlichungen

- /1/ H.E. Häfner, H. Will  
Instrumentierte Brennstoffkriechkapsel  
Kerntechnik, Heft 12 (1970), S. 454
- /2/ H.E. Häfner, K. Philipp  
FR2-Bestrahlungskapsel zur Untersuchung des Brennstoffschwellens  
KFK-Bericht 1398 (1971)
- /3/ H.E. Häfner  
Irradiation Devices for the Study of Creep and Swelling in  
Ceramic Fuels  
Journal of Nuclear Materials, 65 (1977), S. 65-71
- /4/ H.E. Häfner  
CONFLUENT, eine Bestrahlungskapsel zur kontinuierlichen Brennstoff-  
Kriechdehnungsmessung  
Atomwirtschaft/Atomtechnik, 19, 2, 76 (1974)
- /5/ H.E. Häfner  
Instrumentierte Bestrahlungskapsel VADIA zur Messung von Hüllrohr-  
aufweitungen  
Atomwirtschaft/Atomtechnik, 19, 7, 359 (1974)
- /6/ D. Brucklacher, W. Dienst  
Kontinuierliche Messung des Kriechens von  $UO_2$  unter Bestrahlung  
Journal Nuclear Materials, 36, 244 (1972)
- /7/ D. Brucklacher, W. Dienst  
Creep Behavior of Ceramic Nuclear Fuels under Neutron Irradiation  
Journal Nuclear Materials, 42, 285 (1972)
- /8/ H.E. Häfner  
Hochdruckkapsel zur Bestrahlung von Brennstoffschwellproben im FR2  
KFK-Bericht 2068 (1974)

- /9/ H.E. Häfner  
High-Pressure Capsule for the Irradiation of Fuel Swelling Specimens  
in the FR2 Reactor  
Nuclear Technology, Vol. 34, June 1977
- /10/ H. Seitz  
WIROCO, Fortran-Rechenprogramm für radiale und axiale Wärmeübertragung,  
Strahlung und radiale Wärmeausdehnung in rotationssymmetrischen Systemen  
mit Hilfe der Relaxationsmethode  
KfK 2149 (1975)
- /11/ Unveröffentlichte Ergebnisse, H.E. Häfner
- /12/ Unveröffentlichte Ergebnisse, H.E. Häfner, I. Kimmer

## 9. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Schematische Darstellung des gesamten Kapselversuchseinsatzes bestehend aus Oberteil, Kühlwasserführung und Bestrahlungskapsel mit zwei Hochdruck-Schwellprobeneinsätzen
- Abb. 2: Bestrahlungskapsel mit zwei HD-Schwellprobeneinsätzen
- Abb. 3: Zusammenhang von Kapselinnendruck, Proben- und mittlerer Gastemperatur in der Probenkapsel
- Abb. 4: Schematische Darstellung des HD-Schwellprobeneinsatzes
- Abb. 5: Berstproben aus drei verschiedenen Werkstoffen (elektronenstrahlgeschweißt) und ihre Berstbedingungen
- Abb. 6: Ergebnisse der Druck- bzw. Berstversuche
- Abb. 7: Kapselinnendruck in Abhängigkeit von der Evakuierzeit für zwei Filtervarianten
- Abb. 8: Probeneinsatz I/1 aus KVE 146 mit elektronenstrahlgeschweißter Druckhülse und oberem Endstopfen (vergleiche Abbildung 4) nach der Demonstration in den Heißen Zellen
- Abb. 9: Probenstapel IV/10 aus KVE 158 mit weitgehend zerbrochenen Brennstofftabletten und W-Zwischenplättchen auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr nach der Zerlegung

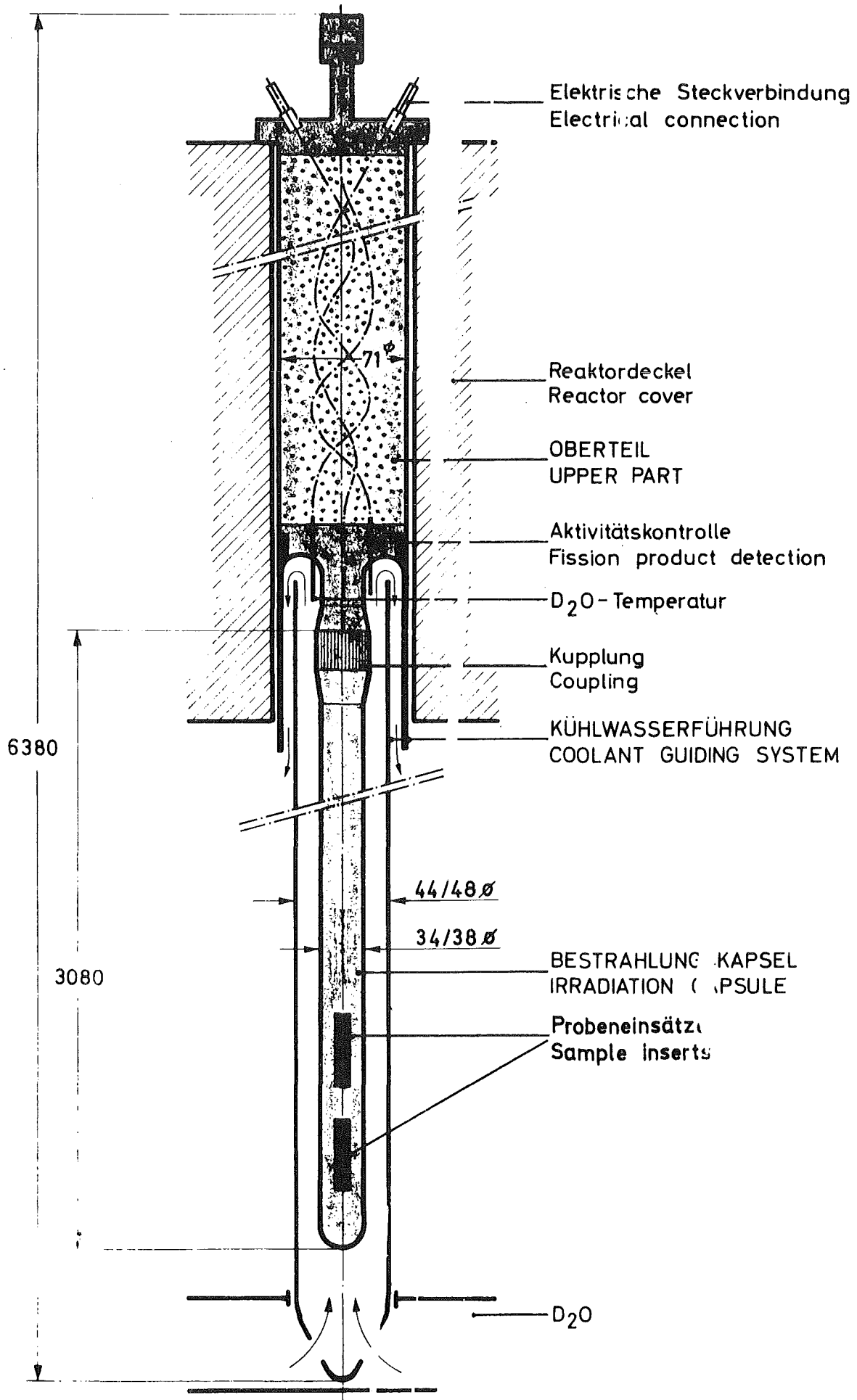


Abb.: 1 Schematische Darstellung der FR 2 - Kapselversuchseinsätze (Typ 10)  
Schematic representation of the FR 2 fuel irradiation rigs





# Zusammenhang von Kapselinnendruck, Proben­temperatur und mittlerer Gastemperatur in der Probenkapsel (Füllung Argon + 10% Helium)

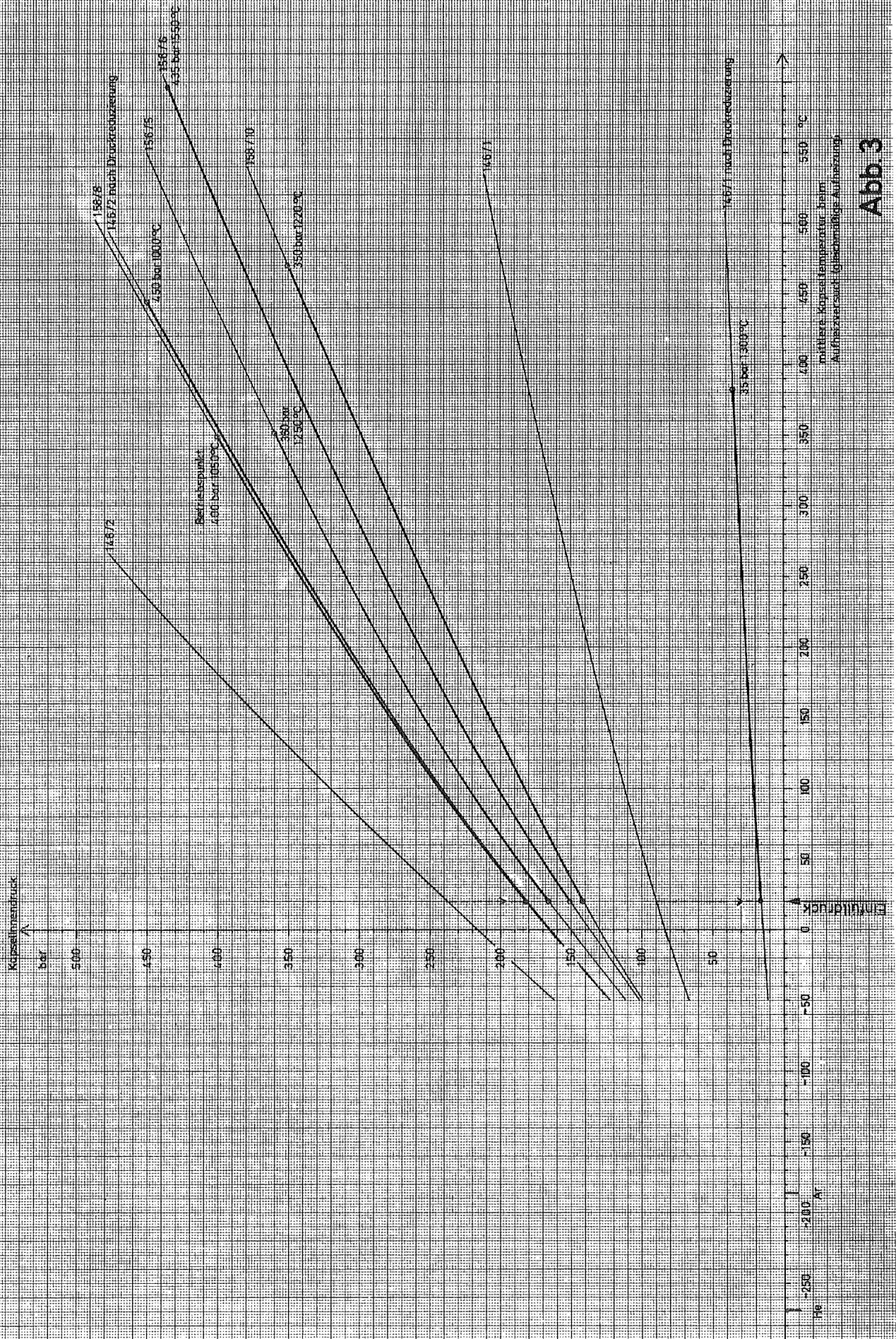


Abb 3

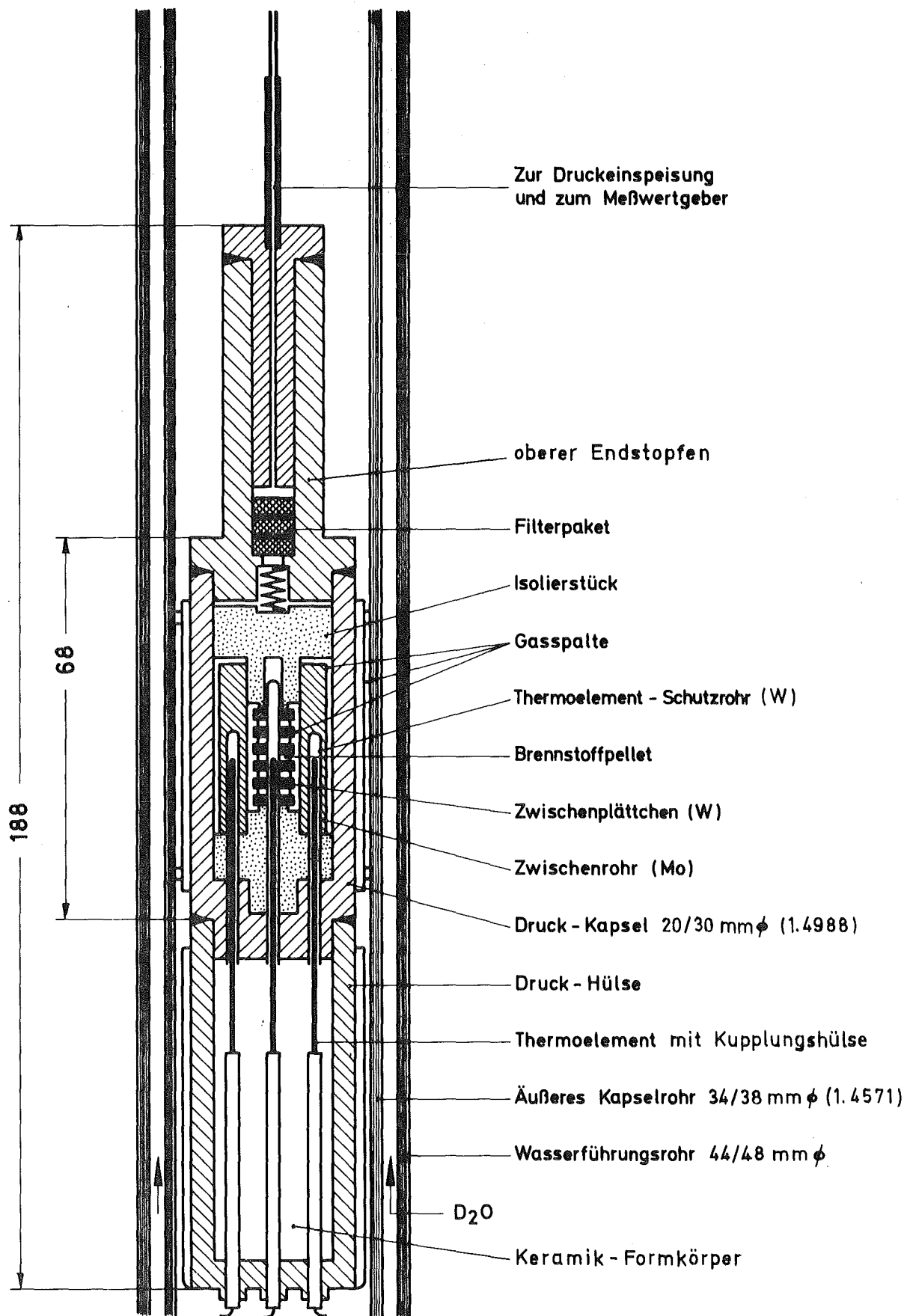
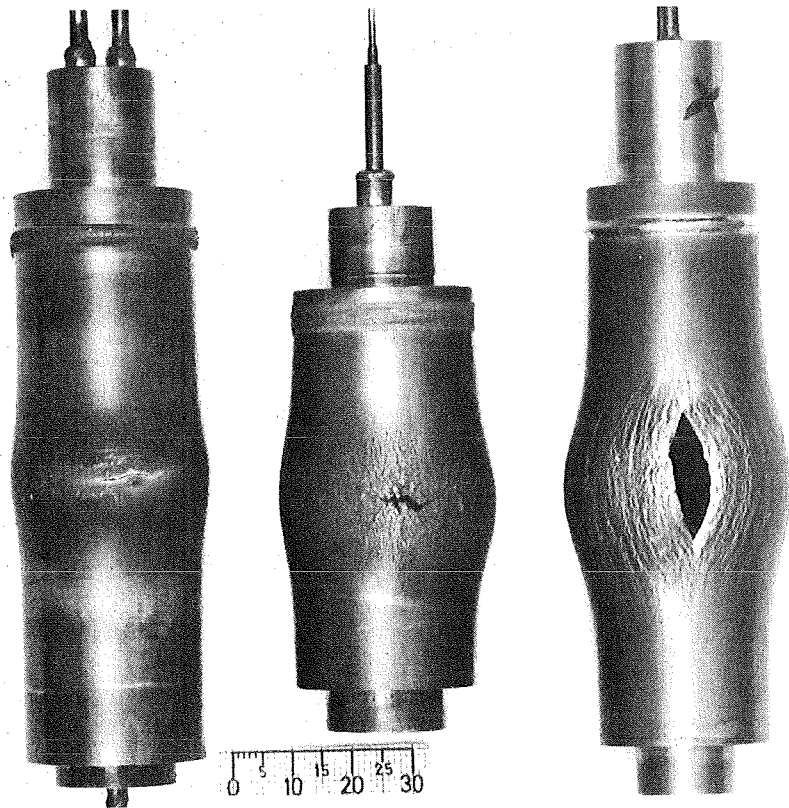
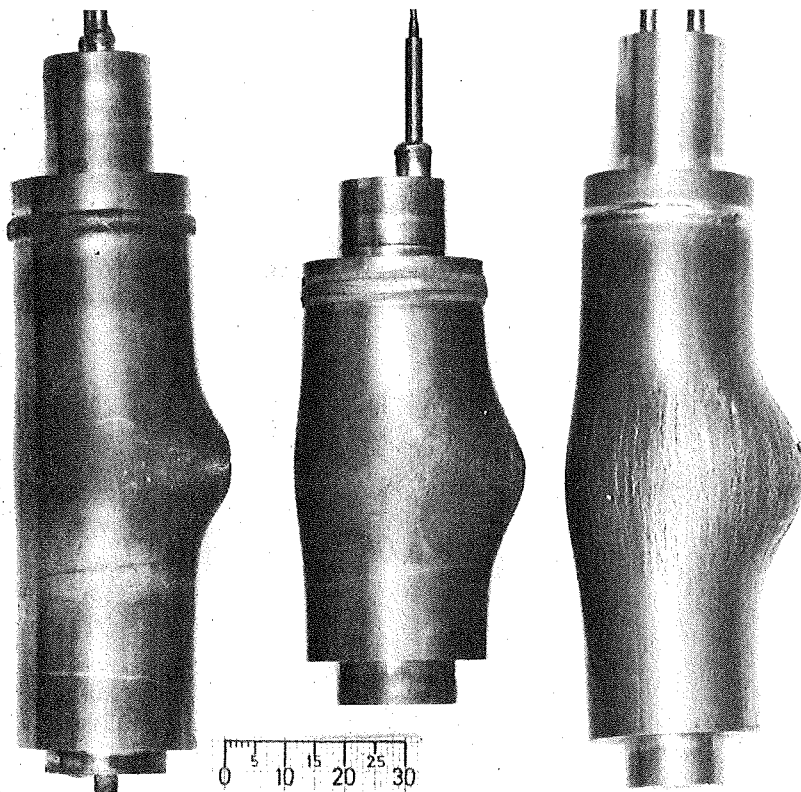


Abb. 4: Schematische Darstellung des HD - Schwellprobeneinsatzes



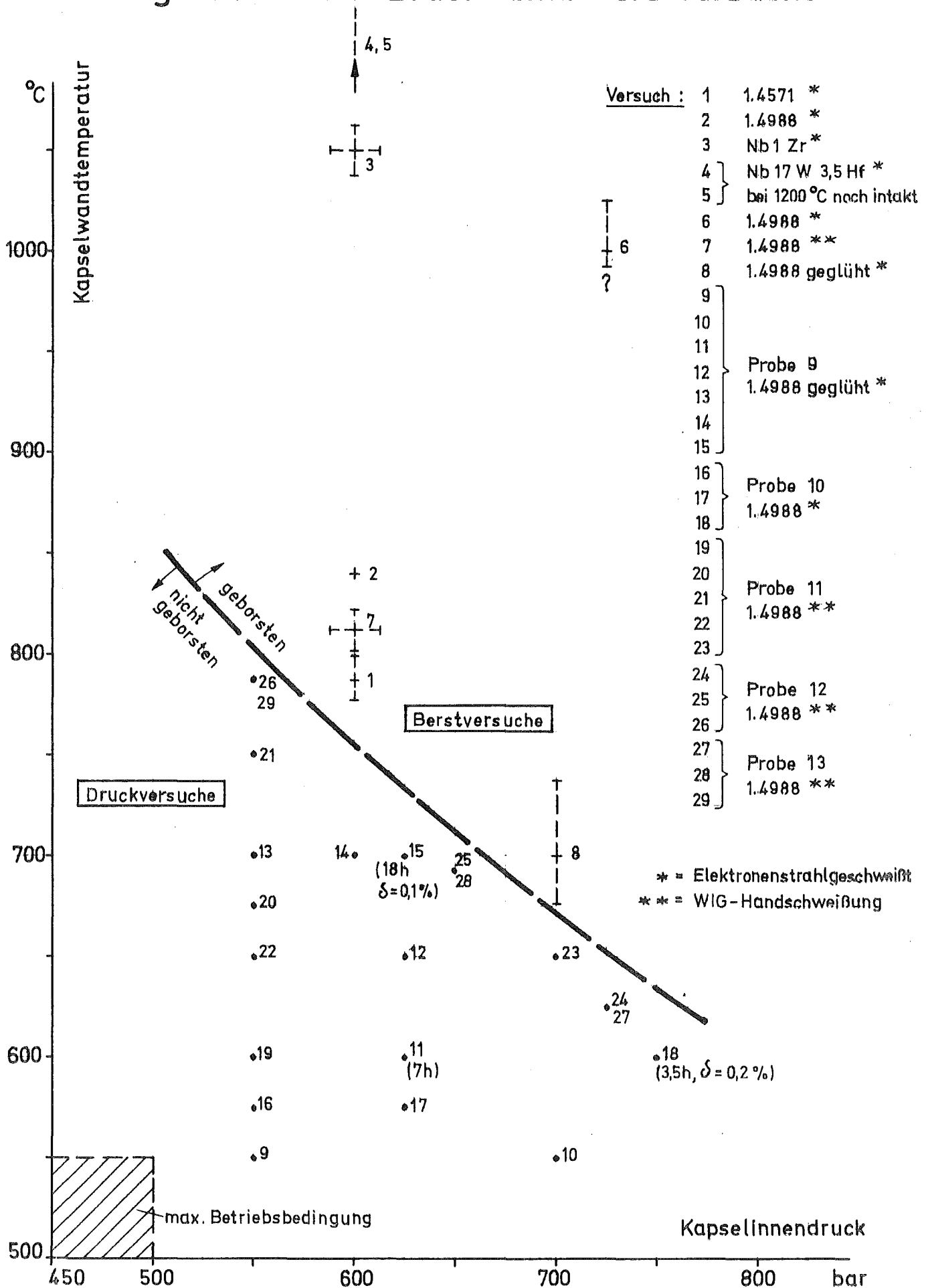
90° versetzt



Versuch-Nr. (Abb. 6)	1	2	3
Werkstoff	1.4571	1.4988	Nb-1% Zr
Bersttemperatur /°C/	ca. 800	840	ca. 1040
Berstdruck /bar/	600	600	600

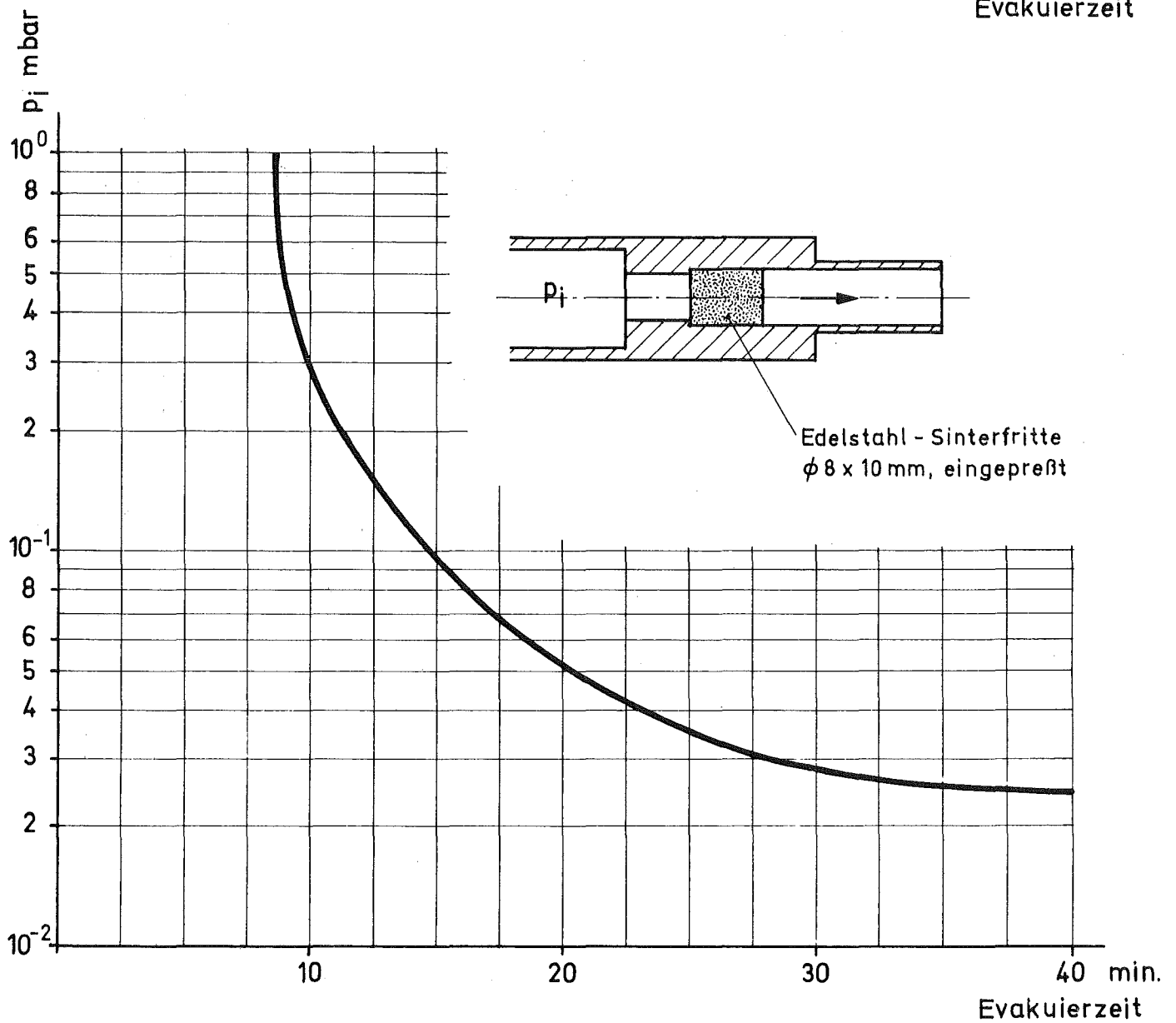
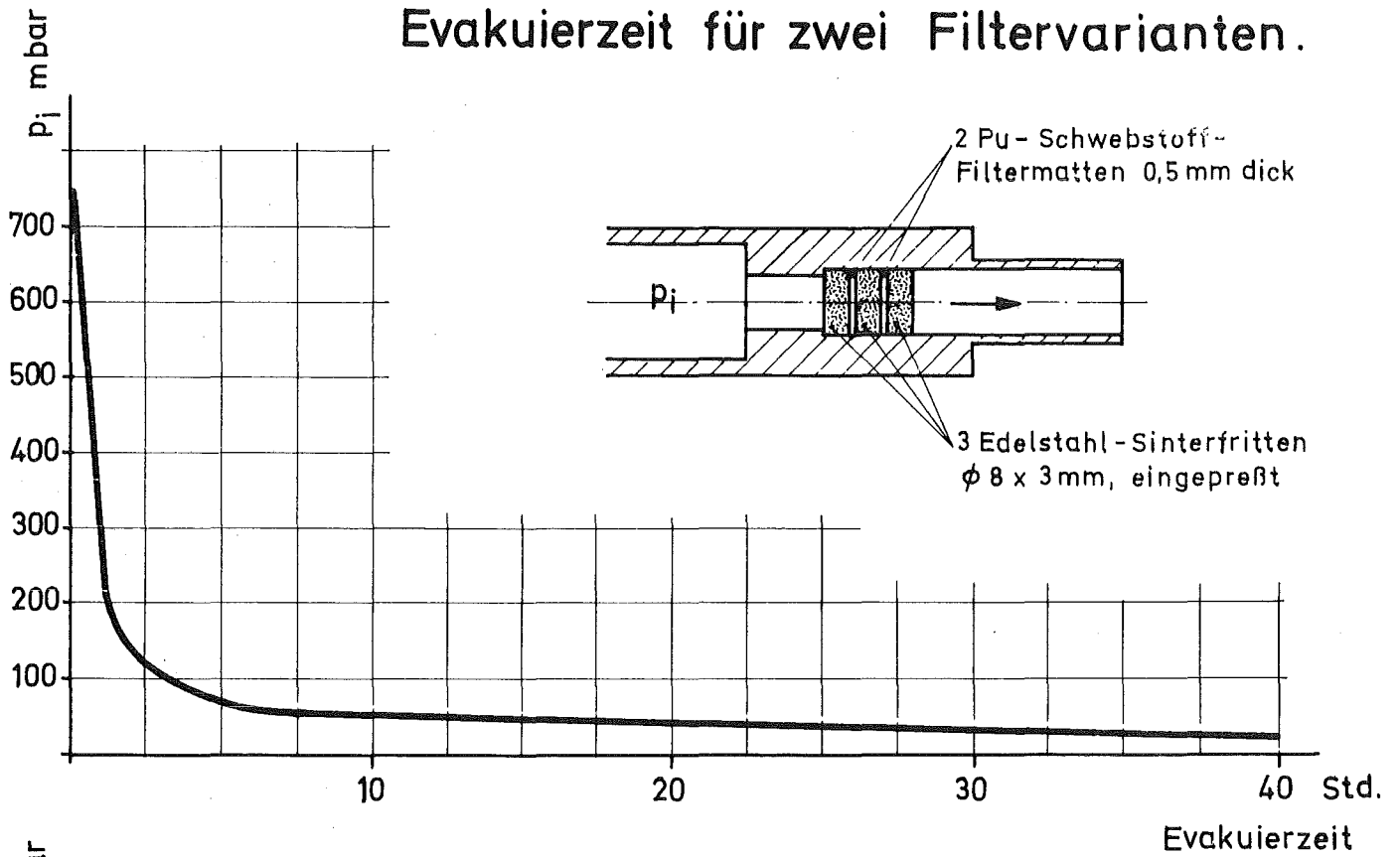
Abb. 5: Berstproben aus drei verschiedenen Werkstoffen (elektronenstrahlgeschweißt) und ihre Berstbedingungen

# Ergebnisse der Druck- bzw. Berstversuche



**Abb. 6**

**Abb. 7:** Kapselinnendruck in Abhängigkeit von der Evakuierzeit für zwei Filtervarianten.



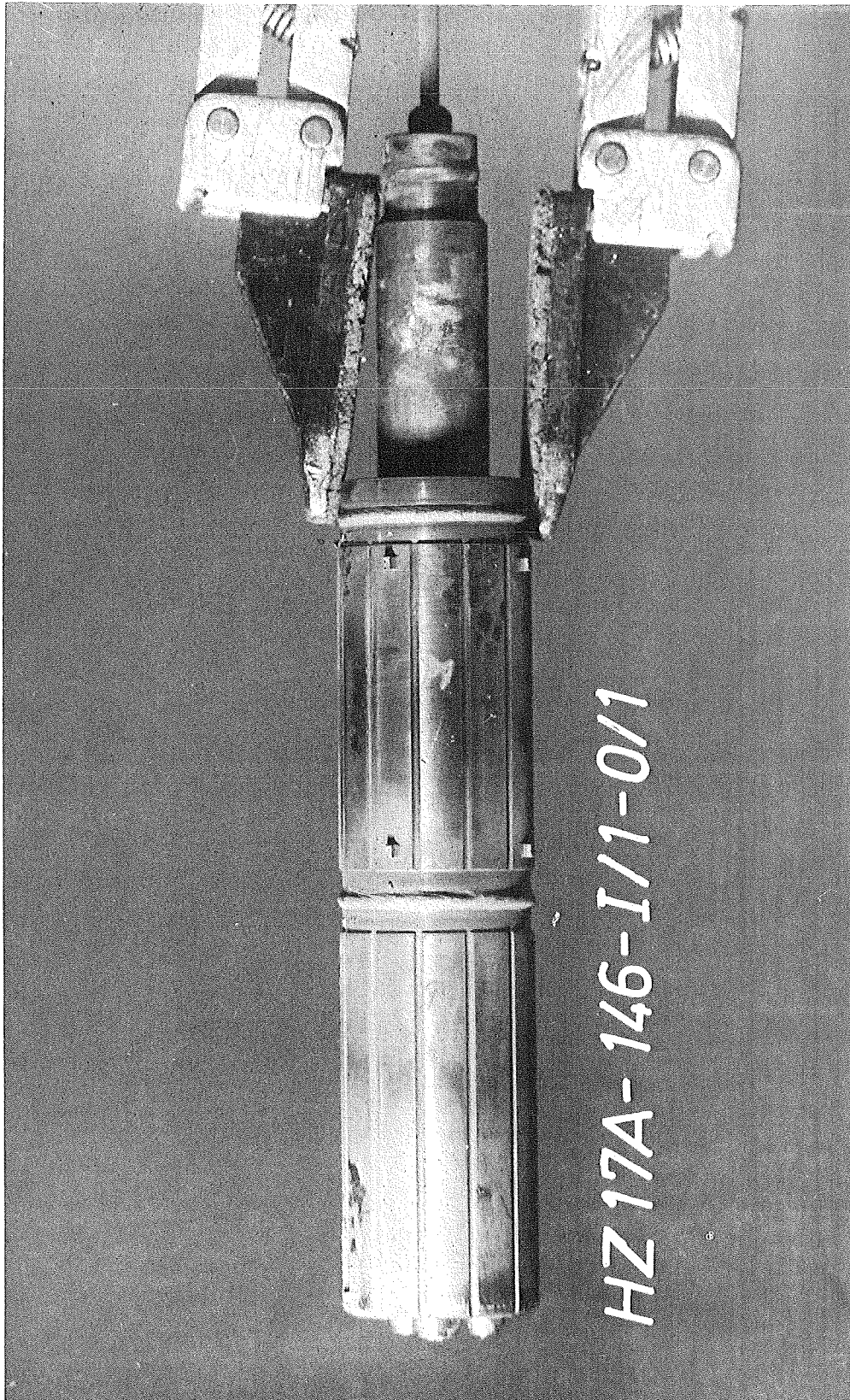


Abb. 8: Probeneinsatz I/1 aus KVE 146 mit elektronenstrahlgeschweißter Druckhülse und oberem Endstopfen (vergleiche Abbildung 4) nach der Demontage in den Heißen Zellen

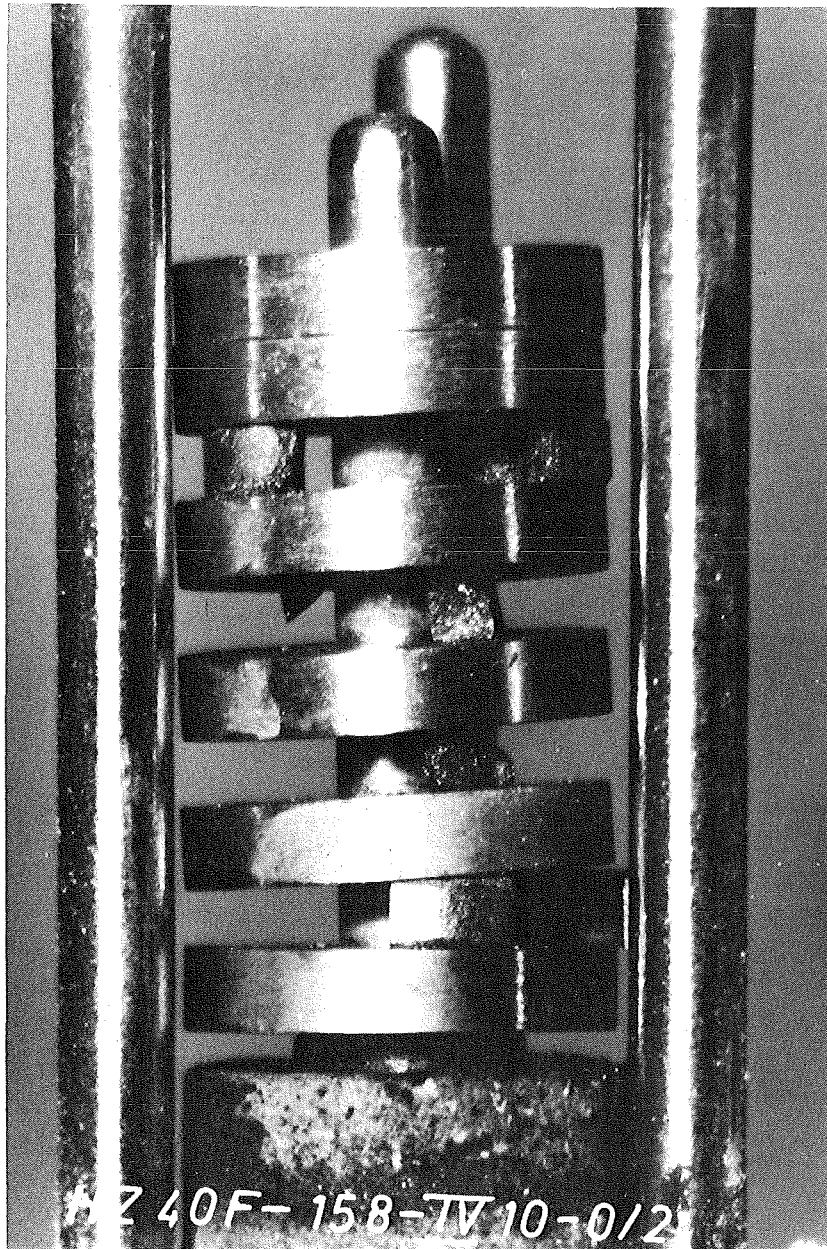


Abb. 9: Probenstapel IV/10 aus KVE 158 mit weitgehend zerbrochenen Brennstofftabletten und W-Zwischenplättchen auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr nach der Zerlegung