

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

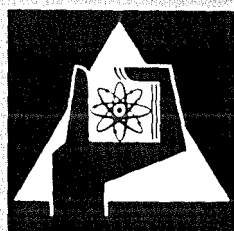
März 1972

KFK 1571

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kriechkapseln für Brennstoff und Hüllmaterial

H. Häfner, W. Neumann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

März 1972

KFK 1571

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kriechkapseln für Brennstoff und Hüllmaterial

H. Häfner

W. Neumann

Zusammenfassung

Für die Auslegung fortschrittlicher Brennelemente für Kernreaktoren sind Kriechdaten für Brennstoff und Hüllmaterial unerlässlich. Im Institut für Material- und Festkörperforschung des Kernforschungszentrums Karlsruhe wurden jeweils eine Bestrahlungskapsel für Hüll- bzw. Strukturmaterialien und für Brennstoffe entwickelt, die es erlauben, Längenänderungen der entsprechenden Proben bei axialer pneumatischer Belastung während des Betriebes in pile zu messen. Für beide Kapseltypen wurde ein induktives Meßsystem gewählt. Es können in jedem Einsatz mindestens zwei Proben gleichzeitig bestrahlt werden. Gegenüber vorhandenen Einrichtungen ergeben sich dadurch zeitliche und finanzielle Vorteile für derartige Bestrahlungsexperimente.

Der vorliegende Bericht beschreibt im Teil 1 neben den verschiedenen möglichen Meßsystemen eine Kriechkapsel zur Bestrahlung von Hüll- und Strukturmaterial im belgischen Reaktor BR2 in Mol.

Im Teil 2 wird eine Brennstoff-Kriechkapsel für den Forschungsreaktor FR2 in Karlsruhe vorgestellt. Außerdem wird über Betriebserfahrungen und Ergebnisse berichtet.

Abstract

Creep data of the fuel and cladding material are necessary prerequisites to the design of advanced fuel elements for nuclear reactors. One in-pile capsule each for cladding and structural materials, respectively, have been developed at the Institute of Materials and Solid Research of the Karlsruhe Nuclear Research Center which allow the in-pile measurement of elongations of the respective samples under axial pneumatic stress. An inductive measurement system was selected for both types of capsules. A minimum of two samples can be irradiated at a time in each rig. This results in advantages, both in terms of time and expense, of these in-pile experiments relative to existing facilities.

Part 1 of report describes the different system of measurement and a creep capsule for irradiation of cladding and structural materials in the Belgian BR2 reactor at Mol.

Part 2 introduces a fuel creep capsule for the FR2 research reactor at Karlsruhe. In addition, the report outlines operating experience and results.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1

Kriechkapsel für Struktur- und Hüllmaterial

W. Neumann

1. Allgemeine Gesichtspunkte
2. Meßsysteme zur Erfassung der Kriechdehnung
 - 2.1 Mechanisch
 - 2.2 Elektrischer Kontakt
 - 2.3 Kapazitiv
 - 2.4 Pneumatisch
 - 2.5 Hohlraum-Resonanzverfahren
 - 2.6 Induktiv
3. Auslegungsbedingungen für die Kriechvorrichtung Mol 5C
 - 3.1 Experimentelle Anforderungen
 - 3.2 Reaktortyp und Bestrahlungskanal
4. Entwicklung der Kriechvorrichtung Mol 5C
 - 4.1 Einsatz
 - 4.11 Prüflingsbereich
 - 4.12 Meßsystem
 - 4.13 Belastungssystem
 - 4.2 Verbindungsleitungen und out pile-Anlage
5. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

IV

Teil 2

Brennstoffkriech- bzw. schwellkapseln im FR2

H. Häfner

1. Aufgabenstellung und Allgemeines
2. Beschreibung des Versuchseinsatzes
3. Meßprinzip und Eichung der Wegaufnehmer
4. Betriebserfahrungen und Ergebnisse
5. Kurze Beschreibung der sog. Druckschwellkapsel

Teil 1Kriechkapsel für Struktur- und Hüllmaterial1. Allgemeine Gesichtspunkte

Für die Durchführung von Bestrahlungsexperimenten in Reaktoren werden Vorrichtungen benötigt, die das Ein- und Ausbringen von Proben in den Corebereich, die Einstellung bestimmter Versuchsbedingungen und die Erfassung von Meßdaten während der Bestrahlung erlauben. Solche Vorrichtungen können für bestimmte Bestrahlungsvorhaben auf dem internationalen Markt käuflich erworben werden. In den meisten Fällen wird jedoch eine Neuentwicklung notwendig, da für die gestellte Aufgabe entweder keine Vorrichtung vorhanden oder eine Anpassung einer erprobten Vorrichtung an den gewählten Reaktor nicht möglich oder zu aufwendig ist.

Eine Neuentwicklung kann sich auch dann lohnen, wenn sie Vorteile gegenüber vorhandenen Einrichtungen erwarten läßt. Dies ist ein Grund, warum im Institut für Material- und Festkörperforschung eine Kriechvorrichtung Mol 5C entwickelt wird, über die anschließend ausführlich berichtet wird.

Bevor im einzelnen die Kriechvorrichtung Mol 5C beschrieben wird, sollen verschiedene Meßsysteme zur in pile-Messung der Kriechdehnung gegenübergestellt werden. Es wird erläutert, warum wir uns für ein induktives Meßsystem entschieden haben.

2. Meßsysteme zur Erfassung der Kriechdehnung2.1 Mechanisch

Hierbei wird die Dehnung des Prüflings über ein Gestänge aus dem Corebereich nach außen geführt und mit einer Mikrometerschraube die Verlagerung abgetastet. In der Regel werden die benötigten Gestänge sehr lang und unhandlich und die Messung durch thermische Dehnung des Gestänges verfälscht.

2.2 Elektrischer Kontakt

Zwei Kontakte können durch einen Motor in einen genau definierten Abstand gefahren werden. Es wird die Zeit gemessen, welche der mit der Zugprobe gekoppelte Kontakt benötigt, um den unterbrochenen Stromkreis zu schließen. Anschließend wird der alte Abstand wieder hergestellt und die Messung beginnt von neuem. Nachteilig bei dieser Messung ist die Veränderung der Kontaktflächen infolge Funkenbildung und mechanische Abnutzung, so daß sich kein definierter Abstand mehr einstellen läßt.

2.3 Kapazitiv

Durch Änderung des Plattenabstandes kann die Kapazität eines Kondensators variiert werden, und zwar umgekehrt proportional dem Plattenabstand, wenn die Kondensatorfläche und das Dielektrikum konstant bleiben. Es wäre also möglich, den Prüfling mit der einen Plattenseite zu koppeln. Da die ionisierende Strahlung des Reaktors das Dielektrikum verändert, scheidet dieses Meßprinzip für den in pile-Einsatz aus.

2.4 Pneumatisch (Bild 1)

Die Änderung des Druckabfalles eines Gases in einem Düse-Nadel-System bei bewegter Nadel oder Düse dient als Meßsignal für die in pile-Dehnung, wobei der Prüfling entweder mit der Düse oder der Nadel gekoppelt werden kann. An empfindlichen Manometern außerhalb des Cores wird die Änderung des Druckabfalles abgelesen. Sehr aufwendig ist für dieses System die Meßgasversorgung, da Temperaturen und Vordruck an der Meßstelle konstant gehalten werden müssen. Wenn man den offenen Kreislauf für die Meßstellenversorgung wählt, kommt man zu sehr hohen Gasverbräuchen. Für den geschlossenen Kreislauf ist ein aufwendiges Umwälzsystem notwendig.

2.5 Hohlraum-Resonanzverfahren (Bild 2)

Bei dem Hohlraum-Resonanzverfahren wird eine hochfrequente elektromagnetische Welle im Gigahertzbereich durch einen Hohlleiter

in einen Zylinder eingeleitet und das Resonanzsignal außerhalb des Reaktors auf einem Oszillographen abgelesen. Nur bei einem bestimmten Zylindervolumen wird für eine Frequenz das Resonanzsignal erhalten. Der Zylinderboden ist als Kolben ausgebildet, der über ein kurzes Gestänge mit dem Prüfling verbunden ist. Dehnungen der Probe verändern die Kolbenstellung und damit das Volumen des Zylinders. Für jede Kolbenstellung gibt es nur eine Resonanzfrequenz, so daß über Eichkurven aus der Resonanzfrequenz direkt auf die Kolbenstellung und die Prüflingsdehnung geschlossen werden kann. Durch einen Vergleichsresonanzhohlraum außerhalb des Reaktors kann an einer Mikrometerschraube unmittelbar die Prüflingsdehnung abgelesen werden. Dieses Meßsystem arbeitet gut unter Bestrahlung, verlangt allerdings eine möglichst gerade Herausführung des Hohlleiters (10 x 20 mm) aus dem Corebereich.

2.6 Induktiv (Bild 3)

Hier wird die induktive Ankopplung eines Spulensystems (Primär- und Sekundär-Spulen) durch die Stellung eines magnetischen Eisenkerns verändert. Der Eisenkern kann über ein kurzes Gestänge mit dem Prüfling verbunden sein. Das Meßsignal fällt als Spannungsänderung an der Sekundärspule an und kann verstärkt einem Meßgerät außerhalb des Cores zugeführt werden.

Wir haben dieses Meßsystem für unsere Kriechvorrichtung gewählt, weil wir glauben, daß es gegenüber allen anderen Meßmethoden Vorteile aufweist. Es kann verhältnismäßig nahe an den Prüfling herangebracht werden, so daß nur kurze Übertragungsgestänge notwendig werden und mindestens zwei Prüflinge in einem Einsatz unterzubringen sind. Bei entsprechender Wahl der verwendeten Materialien für Spulendraht und Isolierungen kann der Wegaufnehmer weitgehend strahlen- und hitzebeständig gebaut werden. Das Meßsystem benötigt out pile keinen großen apparativen Aufwand. Es ist auch dann noch einsatzfähig, wenn Reaktordeckelkonstruktionen ein Herausführen der Meßleitungen erschweren.

3. Auslegungsbedingungen für die Kriechvorrichtung Mol 50

3.1 Experimentelle Anforderungen

Für die Auswahl von Hüllmaterialien sind grundsätzliche Untersuchungen über das Kriechverhalten unter Bestrahlung notwendig, da erst solche Untersuchungen Extrapolationen auf hohe Standzeiten erlauben und Aufschlüsse über strukturelle Materialveränderungen während der Bestrahlung bringen. Die experimentellen Anforderungen bei derartigen Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit der Kriechdehnungsmessung und der Temperaturkonstanz sind sehr scharf gestellt und machen aufwendige Konstruktionen notwendig. Die Anforderungen wurden wie folgt festgelegt:

Meßbereich der Dehnungsmessung	$\pm 0,5$ mm kontinuierlich
Genauigkeit der Dehnungsmessung besser	$3 \cdot 10^{-3}$ mm
kleinste meßbare Dehnung	$1 \cdot 10^{-3}$ mm
Probentemperatur	400 - 800°C
Temperaturkonstanz	$\pm 2^\circ\text{C}$
axiale Temperaturdifferenz über die Probe	$< 3^\circ\text{C}$
Prüflingsbelastung	max. 40 kp/mm ²
Genauigkeit des Belastungssystems	$\pm 1\%$
Probenform	Rundprobe
Probenlänge	40 mm
Probendurchmesser	2 - 3 mm
thermischer Neutronenfluß	$3-4 \cdot 10^{14}$ n/cm ² s
schneller Neutronenfluß	$4-5 \cdot 10^{14}$ n/cm s

3.2 Reaktortyp und Bestrahlungskanal

Der gewünschte schnelle Fluß für diese Bestrahlung steht in einer Coreposition des BR2 Mol zur Verfügung. Es wurde ein Standard-Kanal vom Typ SVn mit einem nutzbaren Kanaldurchmesser von $34,0 \pm 0,1$ mm ausgewählt. Die Herausführung der Meß- und Versorgungsleitungen erfolgt bei diesem Kanal nach oben durch das Wasserabschirmbecken. Die Gamma-Heizung bei dem geforderten

Neutronenfluß beträgt etwa 10 - 14 W/g Al. Dies führt zu einer starken Aufheizung der Kapsel. Die konstruktive Ausführung wird deshalb hier besonders stark von der Wärmeableitung an das Kühlwasser bestimmt, so daß oft nur ein schmaler Pfad für eine konstruktive Lösung übrig bleibt.

4. Entwicklung der Kriechvorrichtung Mol 5C

Wir hatten uns zur Aufgabe gestellt, mehrere Prüflinge gemeinsam in einer Vorrichtung unterzubringen. Diese Aufgabenstellung erklärt auch die Entwicklung, die bei diesem Projekt gemacht wurde. Zunächst gingen wir von einer sehr kompakten Anordnung aus, die es ermöglichte, etwa 4 Prüflinge in einem Einsatz unterzubringen (s. Bild 4). Thermodynamische Rechnungen zeigten zunächst, daß es auf diese Weise möglich ist, die Wärme aus dem Meßsystem abzuführen, die infolge der hohen Gamma-Heizung des BR2 entsteht. Das Belastungssystem wurde hinter dem Meßsystem angeordnet, wobei die Kraftübertragung mit halbschalenförmigen Zugankern erfolgt, die um das induktive Meßsystem herumgreifen (Bild Nr. 5). Nur so konnte der Kernträger des Meßsystems so kurz gestaltet werden, daß die Gamma-Wärme ohne unzulässig hohe Überhitzung der Kernträgerspitze abgeführt werden konnte. Leider zeigten Bestrahlungen des induktiven Wegaufnehmers im BR2, daß infolge der hohen Gamma-Heizung die Verbindungen zwischen Spulen und Anschlußdraht weggeschmolzen und der Kernträger wider Erwarten zu heiß wurde. Der Wegaufnehmer war für den Einsatz in dem hohen Fluß des BR2 ungeeignet. Komplette Umkonstruktionen der Vorrichtung wurden notwendig (Bild 6). Induktiver Wegaufnehmer und Belastungssystem wurden an den Core-Rand verlegt. Ein kurzes Gestänge für die Übertragung der Dehnung wurde notwendig. Es können nur noch zwei Prüflinge parallel bestrahlt werden (Bild 7). Nach diesem allgemeinen Überblick komme ich nun zu den einzelnen Komponenten der Vorrichtung.

4.1 Einsatz

4.11 Prüflingsbereich (Bild 4)

Die Forderung nach einem möglichst kleinen axialen Temperaturgradienten über die Probenlänge bestimmte vorwiegend die

konstruktive Ausbildung des Prüflingsbereiches. Der Prüfling wird mit zwei Köpfen im Probenträger zentriert. Durch entsprechende Ausbildung der Kopflängen kann man Wärmebarrieren schaffen, die unter Berücksichtigung der entstehenden Gammawärme und Wärmeableitung über die Probenhalterung die Prüflingsenden auf das Temperaturniveau der Probenmitte anheben. Zusätzlich wurde durch einen elektrischen Drei-Zonen-Heizer eine unabhängige Temperaturbeeinflussung der drei Prüflingsbereiche Kopf-Prüfling-Kopf geschaffen, um damit Temperaturschieflagen infolge Flußverschiebung ausgleichen zu können. Besondere Aufmerksamkeit haben wir auch der radialen Schichtung um den Prüfling geschenkt. Es ist zweckmäßig, den Heizer möglichst nahe an den Prüfling heranzulegen, da sich so für eine bestimmte Heizerleistung eine maximale Probentemperaturbeeinflussung ergibt. Durch diese Anordnung kann auch der Gasspalt weit nach innen verlegt werden und wir erhalten bei einem System mit inneren Wärmequellen für einen vorgegebenen Temperatursprung einen Gasspalt mit größten Spaltweiten, was sich besonders günstig bei der Fertigung auswirkt, da Fertigungsfehler nicht so sehr ins Gewicht fallen. Diese thermodynamische Auslegung spiegelt sich in dem anschließenden Diagramm wieder (Bild 8). Die Prüflingstemperatur ist über der Gammaheizung aufgetragen. Als Parameter ist der Gasspalt gewählt. Es sind für einen Gasspalt jeweils die Kurven ohne und mit voller elektrischer Zusatzheizung gezeichnet, so daß das große Regelspiel einer gewählten Gasspalt-Ausführung erkennbar wird. (Bild 8, straffierter Bereich).

4.12 Meßsystem

Die allgemeinen Gesichtspunkte, die zur Auswahl des induktiven Meßsystems führten, sind schon unter 2.4 behandelt. Es wird jetzt auf die speziellen Probleme eingegangen.

a) Strahlenbeständigkeit

Die Strahlenbeständigkeit des Wegaufnehmers wird vorwiegend durch die Wahl des Drahtmaterials für die Spulen und dessen Isolierung bestimmt. Aluminium ist besonders geeignet, da es wegen seines kleinen Einfangquerschnittes wenig Nuklide bildet

und somit unter Bestrahlung nur eine geringfügige Veränderung des Ohmschen Widerstandes erleidet. Außerdem läßt es sich durch Eloxieren mit einer thermisch und mechanisch sehr widerstandsfähigen Isolierung versehen. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Verbindung zwischen Spulen- und Anschlußdraht. Es kommen nur Quetschverbindungen in Frage, da Lötungen nicht möglich sind.

b) Temperaturbeständigkeit

Für die Temperaturbeständigkeit der Wegaufnehmer bei hoher Gamma-Heizung ist es entscheidend, wie gut sich die Wärme aus dem Innern des Systems ableiten läßt. Da sehr viel keramische Isoliermaterialien mit schlechten Wärmeleitfähigkeitswerten verwendet werden, kann man nur mit einer sehr kompakten Bauweise dieses Problem lösen.

Mit dem von uns zunächst vorgesehenen strahlenbeständigen Wegaufnehmer konnte die Gamma-Wärme nicht genügend gut aus dem Innern des Systems abgeführt werden. Dies zwang uns, den Wegaufnehmer an den Core-Rand zu legen und das System so gut wie möglich gegen Strahlen abzuschirmen. Die Nachteile, die damit eingehandelt wurden, waren einmal das Gestänge zwischen Prüfling und Meßsystem und der Verzicht, mehr als zwei Prüflinge in einer Vorrichtung unterzubringen. Als Vorteil stellte sich heraus, daß das Meßsystem durch seine Lage am Core-Rand während der Bestrahlung gleichmäßig temperiert ist, da hier die Gamma-Heizung niedrig ist. Die Aufnahme von Eichkurven wird dadurch erheblich vereinfacht, da sie nur für die Beharrungstemperatur des Meßsystems erfolgen muß, die in etwa bei der Kühlmitteltemperatur des BR2 von 50°C liegt. Die niedrige Strahlenbelastung der Randposition erlaubt auch die Verwendung von Kupfer als Drahtmaterial, so daß die Schwierigkeiten an den Verbindungsstellen Spulendraht-Anschlußleitungen ausgeschaltet werden konnten.

Nur wenn die relativen thermischen Dehnungen zwischen Übertragungsgestänge und Gehäuse erfaßbar wurden, konnte die Genauigkeitsanforderung an das Meßsystem von besser 3 µm erfüllt werden. Wir haben deshalb das gesamte System auf thermische Dehnungen eingehend untersucht und konstruktive Änderungen so vorgenommen, daß sich eine gut überschaubare und berechenbare Konstruktion ergab (Bild 7). Aus diesem Grunde wurde für

Gehäuse und Übertragungsgestänge eine Rohr-in-Rohr-Konstruktion gewählt. AlMg 3 als Gehäusematerial wurde wegen der großen thermischen Dehnung aufgegeben und dafür Invar-Stahl verwandt. Um die thermischen Dehnungen des gesamten Systems zu ermitteln, haben wir eine Berechnung angestellt, für welche die Vorrichtung in 25 mm breite Scheiben eingeteilt wurde. Für die mittlere Ebene jeder Scheibe wurde die relative Dehnung zwischen Gehäuse- und Übertragungsrohr anhand der Temperaturdifferenz ermittelt, die sich aus der maximalen Änderung der Gamma-Heizung an dieser Stelle während eines Zyklus berechnet. Hierbei wurden die neuesten Messungen in entsprechenden BR2-Kanälen zugrundegelegt. Das Ergebnis dieser Untersuchung war folgendes: Die maximale Differenzdehnung zwischen Gehäuse und Übertragungsrohr beträgt zwischen 10 und 25 μm . Deshalb haben wir auf dem Übertragungsrohr und dem Gehäuse jeweils in einer Ebene Thermolemente aufgekennzeichnet. Durch die Messung der Temperaturdifferenz kann die thermische Dehnung während der Bestrahlung ermittelt und zur Korrektur der Dehnmeßwerte herangezogen werden. Diese Korrektur erlaubt es, mit diesem System Dehnungsmessungen mit einer Genauigkeit besser 3 μm auszuführen.

4.13 Belastungssystem

Das pneumatische Belastungssystem ist für das Aufbringen einer Prüflingslast in einer solchen Vorrichtung besonders gut geeignet, da es sehr klein baut und durch flexible Kapillarrohre beaufschlagt werden kann. Es ist zweckmäßig für die Anordnung eines solchen Systems, den maximal vorhandenen Querschnitt auszunützen, um die Druckbeaufschlagung des Faltenbalges möglichst klein zu halten. Außerdem spielt bei der hohen Gamma-Heizung die Wärmeableitung aus den Wellen des Balges eine entscheidende Rolle.

Bei dem verwendeten pneumatischen Belastungssystem bietet sich die Möglichkeit, durch Druckumkehr Eichkurven aufzunehmen und so den Einfluß der Reibung, der Schwerkraft und der Federsteifigkeit des Faltenbalges experimentell, out pile und in pile, für die verschiedenen Temperaturen zu bestimmen. Die Eichkurven

für eine bestimmte Temperaturverteilung im Meßsystem haben den Verlauf nach Bild 9.

- A: Der Prüfling liegt durch Druckumkehr im Belastungssystem ($P_A > P_I$) gegen eine untere Anlage an. (Siehe Bild 4).
- B: Der Prüfling beginnt sich ab Punkt B zu verschieben. Systemgewicht und Haftreibung sind durch die erfolgte Steigerung des Innendruckes ($P_I > P_A$) überwunden.
- C: Der Prüfling ist bis zur Gehäuseanlage gefahren, wobei die Steigung der Geraden B - C die Federsteifigkeit des Faltenbalgsystems anzeigt.
- D: Der Prüfling ist unter Last.
- E: Der Prüfling beginnt sich durch Absenkung des Innendruckes von der Gehäuseanlage zu lösen.
- F: Der Prüfling ist wieder gegen die untere Anlage gefahren ($P_A > P_I$).

Das Kräftegleichgewicht im Belastungssystem stellt sich folgendermaßen dar:

$$(P_I - P_A) \cdot F = K + C_0 \cdot F + C \cdot \Delta l \cdot F$$

Hierbei bedeuten

- P_I = Innendruck am Belastungssystem kp/cm^2
- P_A = Außendruck am Belastungssystem kp/cm^2
- F = Nutzbare Fläche des Faltenbalges cm^2
- K = Kraft am Prüfling kp
- C_0 = Korrekturfaktor für Reibung, Systemgewicht und Federsteifigkeit des Faltenbalges bei belastetem aber ungedehntem Prüfling. kp/cm^2

C = Korrekturfaktor für die Federsteifigkeit des Faltenbalges bei Dehnung Δl des Prüflings kp/cm^2

Δl = Auslenkung des Prüflings cm

Die Korrekturfaktoren C_0 und C können Eichkurven, die für verschiedene Temperaturen aufgenommen wurden, entnommen werden. Es wird in guter Näherung angenommen, daß die Federkonstante des Faltenbalges unabhängig von der Auslenkung Δl des Faltenbalges ist. Für eine gewünschte Belastung K am Prüfling ergibt sich der Innendruck zu

$$P_I = \frac{K}{F} + C_0 + C \cdot \Delta l + P_A$$

4.2 Verbindungsleitungen und out pile-Anlage

Die Verbindung zwischen Einsatz und out pile-Anlage muß im einzelnen sorgfältig überlegt werden. Im BR2 werden bei den vorgesehenen Bestrahlungskanälen Meß- und Versorgungsleitungen für den Brennelementwechsel abgekuppelt. Da sich die Kupplungen am Kopf im Wasserabschirmbecken befinden, kommen nur wasserdichte Kupplungen in Frage. Der besondere Vorteil des angewandten Meßsystems ist die flexible und raumsparende Herausführung der Meßleitungen des Wegaufnehmers aus dem Corebereich. Im BR2 kommt dieser Vorteil nicht voll zum tragen, da im Wasserpool für die Verlegung der Leitungen genügend Platz ist. Bei Bestrahlungen in anderen Reaktortypen wird sich hier ein Vorteil des gewählten Konzeptes gegenüber dem Hohlraum-Resonanzverfahren ergeben.

Die out pile-Anlage wird nur kurz gestreift. Sie gliedert sich in die Druckversorgungsanlage und den Schrank für Meß- und Regelungstechnik.

Die Druckversorgungsanlage speist den Kopf, den Einsatz und die Belastungssysteme mit Helium von einem vorgegebenen Druck. Während Kopf- und Einsatzversorgung als einfache Entspannungsstrecken mit Druckminderern ausgebildet und gegen Drucküberschreitung mit Sicherheitsventilen an das Abgassystem des Reaktors gelegt sind, müssen für die Belastungssysteme Einspeisemöglichkeiten für verschiedene, vorgegebene Drücke vorgesehen werden.

Hier ist im einfachsten Fall eine Handsteuerung über Feinregulierventile möglich. Der Druck wird turnusmäßig kontrolliert und nachgestellt. Für Mol 5C ist eine geregelte Druckbeaufschlagung geplant. Mit einem Druckumformer wird der Druck in der Versorgungsleitung überwacht und in einem Regler mit dem eingestellten Druck verglichen. Erfolgt eine Druckunterschreitung in der Versorgungsleitung, so wird ein Einlaßmagnetventil geöffnet, erfolgt eine Drucküberschreitung, so wird ein Auslaßmagnetventil geöffnet.

Der Meß- und Regelschrank enthält die Stromversorgung, die Verstärker und Meßeinrichtung für den Wegaufnehmer sowie die Geräte für die Temperaturmessung und die Regelkreise für die Heizer.

5. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Unser erstes Ziel bei der Entwicklung dieser Vorrichtung ist es, Erfahrungen mit dem Meßsystem und der Mechanik der Vorrichtung im hohen Neutronenfluß des BR2 zu sammeln. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationseinsatz gebaut, der mit einer Kriechvorrichtung bestückt ist und etwa im Mai-Juni dieses Jahres im BR2 zur Bestrahlung kommt.

Wenn diese Erfahrungen positiv sind, kann eine Einrichtung zur parallelen Bestrahlung von zwei Kriechproben in Gasatmosphäre gebaut werden. Weitere Möglichkeiten bestehen darin, die Vorrichtung konstruktiv so abzuändern, daß die Proben in NaK eingesetzt werden können, um auch bei der Brucheinschnürung der Kriechproben noch einwandfreie Kühlverhältnisse zu schaffen. Diese Vorrichtungen können auch dann noch verwendet werden, wenn Reaktortypen für die Bestrahlung notwendig werden, bei denen ein Herausführen von Meßleitungen erschwert ist.

Ein interessanter Preisvergleich soll den Bericht abschließen. Die Bestrahlungseinrichtungen zum Messen der Kriechdehnung an einer Hüllmaterialprobe, die im Augenblick im BR2 eingesetzt werden, kosten etwa DM 50.000,--. Wenn man die Bestrahlungszeit

für derartige Experimente mit etwa 15 Wochen ansetzt, kommen noch einmal ca. DM 100.000,-- für Neutronenkosten hinzu. Eine Probe kostet also etwa DM 150.000,--, wobei die Kosten für die out pile Anlage nicht berücksichtigt wurden. Wenn es gelingt, einen Einsatz für die gleichzeitige Bestrahlung von zwei Materialproben für den Preis der augenblicklich verwendeten Einsätze zu bauen, können DM 75.000,-- pro Probe eingespart werden, da die Bestrahlungskosten etwa gleich bleiben. Allein aus diesem Grund dürfte die Mühe und der Aufwand einer solchen Entwicklung gerechtfertigt sein.

Teil 2

Brennstoffkriech- bzw. -schwellkapseln im FR2

1. Aufgabenstellung und Allgemeines

Eine wichtige Grundlage für die Ermittlung des Brennstoffschwelldruckes sind die Kriechdaten des Brennstoffes. Bei Temperaturen unter 1200°C hat man einen überwiegenden strahlungsinduzierten Anteil des Kriechens zu erwarten, so daß hier vorwiegend in pile-Kriechtests notwendig sind. Die Untersuchung des Kriechens von Brennstoffen unter Bestrahlung wurde im IMF nach einer Analyse der verfügbaren Literatur im Jahre 1968 aufgenommen. Es wurde ein Bestrahlungsprogramm erstellt, das neben einfachen Versuchen zur halbquantitativen Bestimmung der Kriechraten an Brennstoffproben in vorhandenen Bestrahlungskapseln die Entwicklung einer Einrichtung zur kontinuierlichen Messung des Brennstoffkriechens unter Bestrahlung vorsah.

An diese Bestrahlungseinrichtung waren bei der Konzipierung im wesentlichen folgende Forderungen gestellt worden (siehe Bild 10):

1. Die Bestrahlungen sollten auf normalen Brennelement- bzw. Zwischengitterpositionen im hiesigen FR2 durchgeführt werden.
2. Der Brennstoff sollte bei einer Leistungsdichte von max. 4000 W/cm^3 und einer Temperatur zwischen 300 und 900°C einer Druckbelastung bis zu 5 kp/mm^2 ausgesetzt werden können.
3. Die Druckbelastung sollte auf $\pm 10\%$ genau eingestellt werden können.
4. Die Bestrahlungszeit sollte 1000 bis 2500 Stunden betragen.
5. Die Brennstofftabletten sollten unter den genannten Bedingungen möglichst nicht zerbröckeln.

6. Die Meßgenauigkeit für die Erfassung der Längenänderungen des Brennstoffs sollte möglichst hoch sein.
7. Die Temperaturen und Längenänderungen der Proben sollten möglichst kontinuierlich gemessen und registriert werden können.
8. Schließlich sollten die Parameter Leistungsdichte, Proben-temperatur und Probenbelastung von Kapsel zu Kapsel verändert werden können.

Eine Regelung der Proben-temperatur auf einen genauen Wert ist bei Versuchen zum Brennstoffkriechen im Gegensatz zum Strukturmaterialkriechen nicht erforderlich. Es genügt im allgemeinen eine Temperaturkonstanz von ± 50 °C. Diese kann aber - und das ist ein Vorteil des FR2 mit dem großen Core - durch Positionswechsel erreicht werden. Das heißt, wenn Leistungsdichte und Temperatur der Probe absinken, können durch Wahl einer Coreposition mit höherem Neutronenfluß wieder die Ausgangswerte erreicht werden.

Für die Bestrahlungen im FR2 liegen nun die Verhältnisse ganz anders als im BR2. Im FR2 hat man z.B. eine vergleichsweise niedrige γ -Heizung von nur 0,5 W/g und damit praktisch keine Schwierigkeiten mit der Wärmeabfuhr aus Strukturmaterialien. Dagegen sind die Platzprobleme im FR2 gravierend. Durch den Reaktordeckel von ca. 3 m Durchmesser müssen rund 240 senkrechte Einsätze - Brennelemente, Abschaltstäbe und Isotopenkanäle - mit all den erforderlichen Meßleitungen herausgeführt werden. Die Köpfe dieser verschiedenartigen Einsätze stehen also über dem Reaktordeckel dicht an dicht und zusätzliche Leitungen für Experimente sind kaum unterzubringen (Bild 11). So ist es z.B. kaum möglich, ein für die sog. Hohlraumresonatormethode notwendiges Rohr in geeigneter Weise aus dem FR2-Core herauszuführen.

Der Grund für die um rund den Faktor 25 niedrigere γ -Heizung liegt im wesentlichen in der relativ geringen Leistungsdichte im großen FR2-Core und im unterschiedlichen Coreaufbau.

Die genannten äußeren Umstände - Platzfrage, γ -Heizung - führten zusammen mit den experimentellen Anforderungen auch für die Brennstoffkriechexperimente im FR2 zur Wahl der sog. induktiven Meßmethode mittels Differentialtrafos. Die relativ niedrigen schnellen Neutronenflüsse im FR2 von max. ca. $5 \cdot 10^{12}$ Neutr. pro cm^2 u. sek (>100 KeV) ließen eine ausreichende Lebensdauer der induktiven Verlagerungsaufnehmer auch direkt im Core erwarten. Diese Annahme hat sich im großen und ganzen mittlerweile bestätigt; es sind ja bereits recht beachtliche Standzeiten des gewählten Meßsystems im FR2 erreicht worden.

2. Beschreibung des Versuchseinsatzes

Die FR2-Kapselversuchseinsätze (KVE) setzen sich standardmäßig aus 3 Hauptbaueinheiten zusammen (Bild 12): der ca. 3m langen eigentlichen Bestrahlungskapsel, der Kühlwasserführung und dem Oberteil, das im wesentlichen zur oberen Coreabschirmung und zur Durchführung der Meßleitungen dient.

Der KVE hat eine Gesamtlänge von ca. 6,5 m und an seiner dicksten Stelle - im Bereich des Oberteils - einen Durchmesser von ca. 70 mm.

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

Jeweils zwei Kriechprobeneinsätze mit einer Gesamtlänge von ca. 40 cm sind im unteren Teil der Bestrahlungskapsel im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums angeordnet. Von hier aus werden im Kapselrohr 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 sog. Canschädenrohr werden in einem 25min.-Rhythmus Proben entnommen und auf Aktivität untersucht.

Die Kriechprobeneinsätze und die Meßeinrichtung sollen im folgenden näher beschrieben werden (Bild 13):

Die eigentliche Kriechprobe ist ein Stapel von etwa 20 mm Höhe aus abwechselnd Brennstoffringen und Molybdänringen von je ca. 1 mm Höhe und 5 mm Durchmesser, die auf einem zentralen Thermoelement aufgefädelt sind. Durch diese abwechselnde Stapelung kann der Temperaturgradient im Brennstoff flach gehalten und ein Zerbröckeln des Brennstoffs vermieden werden. Die Druckbelastung des Probenstapels erfolgt in axialer Richtung. Sie wird durch einen entsprechenden Gasdruck in der äußeren Kapsel (max. 35 kp/cm^2) 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 Druckübertragungsstück sitzt. Nach dem Einfüllvorgang wird dieser Stutzen durch induktive 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 Kapsel 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 Probertemperatur kann durch diese Thermoelemente auf ca. $\pm 10^{\circ}\text{C}$ genau ermittelt und verfolgt werden.

Der induktive Wegaufnehmer ist in den sog. 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 sog. 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, wie im Teil 1 bereits herausgestellt wurde. Ein Nachteil, der sich aus dem völlig dichten

Kapselsystem ergibt, ist, daß die einmal gewählte und eingestellte Druckbelastung der Proben während des Betriebs nicht verändert werden kann. Sicherheitstechnisch hat diese Lösung einige Vorteile.

Ein steuerbares und regelbares Belastungssystem ist am FR2 wiederum aus Platzgründen kaum möglich.

Probleme ergaben sich insbesondere aus den anfangs recht häufigen Ausfällen der Wegaufnehmer, auf die später noch eingegangen werden wird, und mit der Einstellung der gewünschten Probentemperatur. Bei der geringen Höhe der Proben und der komplizierten Geometrie der Probeneinsätze ist es außerordentlich schwierig, abzuschätzen, welcher Anteil an erzeugter Wärme jeweils radial und axial abfließt. Aus diesem Grunde ist es anfangs nicht gleich gelungen, die gewünschte Probentemperatur zu erreichen und wir steigerten uns schließlich durch konstruktive Änderungen von 250°C über 450, 600 auf 800°C.

3. Meßprinzip und Eichung der Wegaufnehmer

Es wurde bereits zuvor ausführlich dargelegt, warum das induktive Meßsystem zur Erfassung der Längenänderungen der Proben gewählt wurde. Für die Versuche im FR2 schienen sich von Anfang an die sog. LVDT (Linear variable differential transducer) der Fa. Schaevitz, USA, in strahlenbeständiger Ausführung zu eignen. Das Meßprinzip dieser Differentialtrafos ist folgendes (Bild 3): 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 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 Längenänderungsmeßbereich 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 (Bild 3) 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 $\pm 5\mu\text{m}$. Bild 14 zeigt den out of pile-Meßschrank im FR2-Reaktorgebäude, 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.

4. Betriebserfahrungen und Ergebnisse

Insgesamt sind von dem hier besprochenen Typ bislang 12 Kapselversuchseinsätze bestrahlt worden; also insgesamt 24 Proben, da in jedem Versuchseinsatz 2 Proben angeordnet sind. Dabei wurden die Probentemperaturen zwischen 250 und 950°C variiert und Druckbelastungen bis 4 kp/mm² gefahren. Die grundsätzliche Tauglichkeit dieser Meßmethode konnte für FR2-Betriebsverhältnisse nachgewiesen werden. Die durchschnittliche Bestrahlungszeit der Einsätze betrug ungefähr 3 FR2-Zyklen, entsprechend etwa 2000 h. Die maximale Bestrahlungszeit eines Einsatzes beträgt bisher maximal 6000 Vollast-Betriebsstunden, was einem Abbrand von ca. 70000 MWd/t entspricht. Eine derart lange Bestrahlungszeit hat bisher nur ein Verlagerungsaufnehmer durchgehalten. Der Grund für den Ausfall der Aufnehmer während der Bestrahlung ist noch nicht geklärt. Vieles deutet auf ein Abreißen der dünnen Spulendrähte durch thermische Dehnungen hin, die infolge des diskontinuierlichen Reaktorbetriebes nicht zu vermeiden sind. Es scheint also gar nicht der Einfluß der Bestrahlung zu sein,

der zum Ausfall der Wegaufnehmer führt. Sorgen bereitetea anfangs auch die relativ hohe Ausfallquote von ca. 30% der Aufnehmer schon beim Eichen oder während der Montage durch das Abreißen der Verbindungsstellen zwischen Spulen und Zuleitungen. Die von uns bei der Herstellerfirma geforderten konstruktiven Verbesserungen an den Wegaufnehmern (Zugentlastung der Drähte) haben uns jedoch aus dieser Schwierigkeit herausgeführt. 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 Meßsystemhalterung berücksichtigt werden. Die Korrekturbeträge können z.B. aus dem Meßkurvenverlauf während des Aufheizvorganges bei Bestrahlungsbeginn ermittelt werden.

Die mit der hier beschriebenen Bestrahlungseinrichtung gemessenen Werte für die Kriechgeschwindigkeit sowohl von UO_2 als auch UN unter Bestrahlung stehen in guter Übereinstimmung mit theoretischen Abschätzungen des Kriechverhaltens dieser Kernbrennstoffe und lassen sich mit den unter anderen Bedingungen

bei auswärtigen Forschungsstellen gemessenen Werten gut aneinanderfügen. Die erst neuerdings ermittelten Werte für UO_2 - PuO_2 sind zusammen mit den gleichzeitig vom Batelle Institute in Columbus bei höheren Temperaturen gemessenen Werten die ersten in pile-Kriechdaten für Pu-Mischoxide überhaupt.

Für den weiteren Verlauf des Untersuchungsprogrammes ist zunächst noch die Bestrahlung weiterer 12 Kapselversuchseinsätze dieser Art mit 24 Kriechproben - hauptsächlich Pu-Mischbrennstoffe - vorgesehen.

5. Kurze Beschreibung der sog. Druckschwellkapsel

Für die Erfassung des axialen Brennstoffschwellens unter mechanischer Belastung wurde eine relativ einfache Kapsel entwickelt, die hier nur noch kurz vorgestellt werden soll (Bild 15).

Hier wurde auf eine kontinuierliche Messung der Längenänderungen verzichtet; man begnügt sich mit der Erfassung der integralen Längenänderung nach erreichtem Abbrand. Dafür ist die Kapsel für höhere Temperaturen geeignet, und es können in einem Kapselversuchseinsatz mehrere Proben übereinander angeordnet werden.

Die Bestrahlungseinrichtung hat folgenden Aufbau:

Die Brennstoffsäule - es ist an alle möglichen Brennstoffvarianten gedacht - von z.B. 4 mm \emptyset und 40 mm Höhe ist von einer dickwandigen Molybdänhülle umgeben. Diese Molybdänhülle sitzt, über Distanznocken zentriert, in einer inneren Kapsel, durch deren Boden Thermoelemente zur Bestimmung der Proben temperatur hindurchgeführt werden. Die Probenbelastung wird, wie bei der Kriechkapsel, über einen entsprechenden Gasdruck in der äußeren Kapsel (max. 55 ata) erreicht, der über Druckübertragungsstück und

Druckstempel auf die Probe wirkt. Längenänderungen des Brennstoffs werden von einem Faltenbalg aufgenommen und können nach Bestrahlung über Maßbolzen (Kontrollmaß) ausgemessen werden.

Mehrere solcher inneren Probenkapseln sitzen, ebenfalls über Distanznocken zentriert, übereinander in der äußeren Druckkapsel. Über die Breite der Gasspalte zwischen Mo-Hülle und Innenkapsel sowie Innenkapsel und Außenkapsel können Probentemperaturen zwischen ca. 800 und 2000°C eingestellt werden. So ist es möglich, bei gleicher Belastung von z.B. drei übereinanderliegenden Proben jede mit einer anderen Temperatur zu fahren.

Eine erste Kapsel dieser Art befindet sich mit drei UN-Proben zur Zeit in der Endmontage. Die Probenbelastung soll 3 kp/mm² betragen, entsprechend 31,5 ata Kapselinnendruck. Die Probentemperaturen sollen bei 800, 1100 und 1400 °C liegen.

Weitere Kapseln befinden sich z.T. in der Fertigung und z.T. in der Montage.

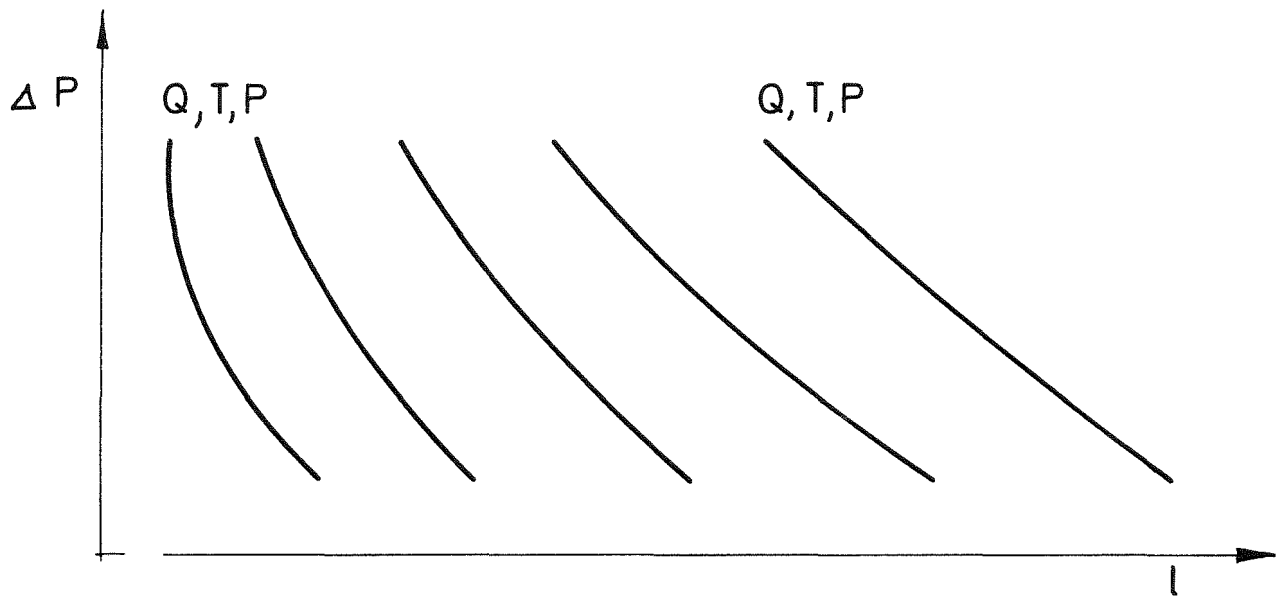
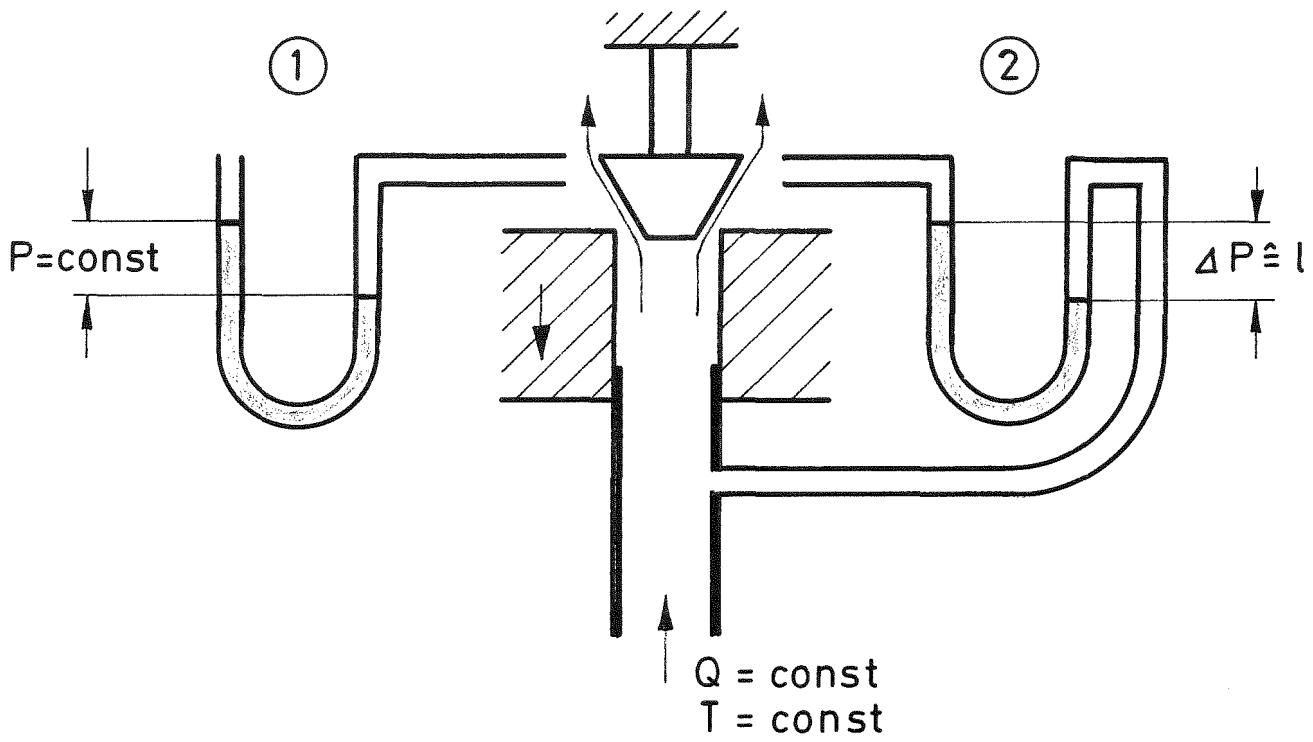


Bild 1: Solex - Verfahren

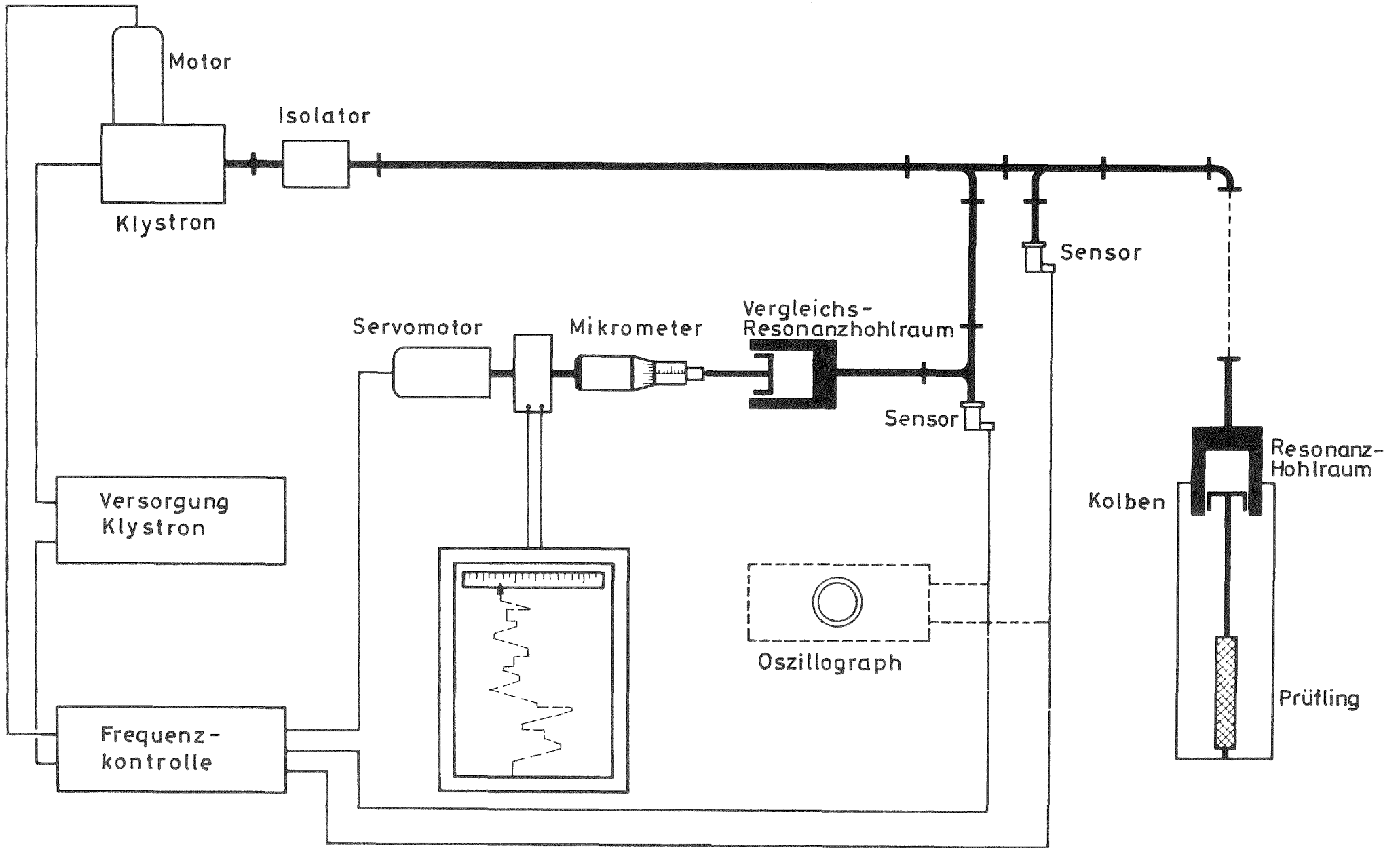
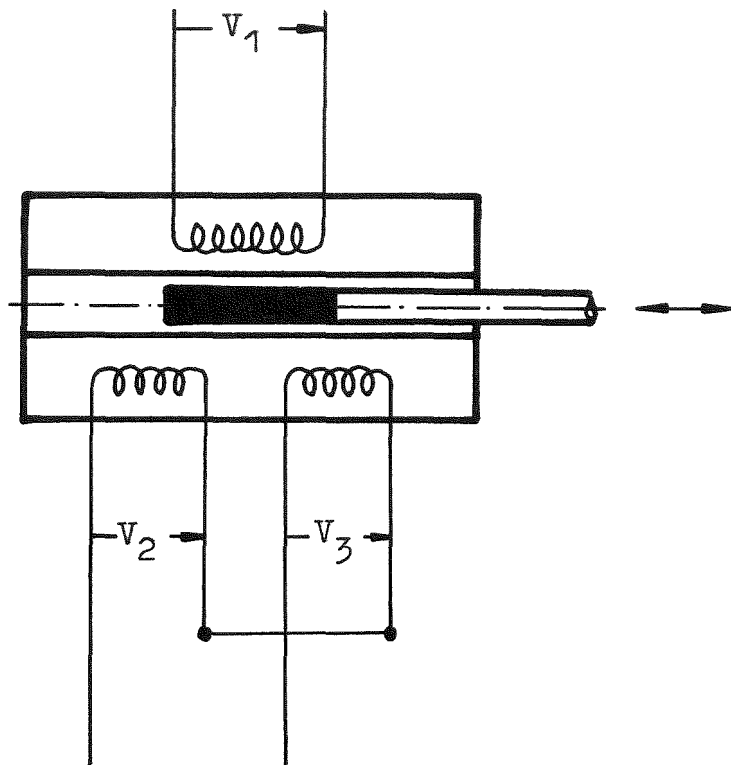


Bild 2: Hohlraum - Resonanzmessung



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

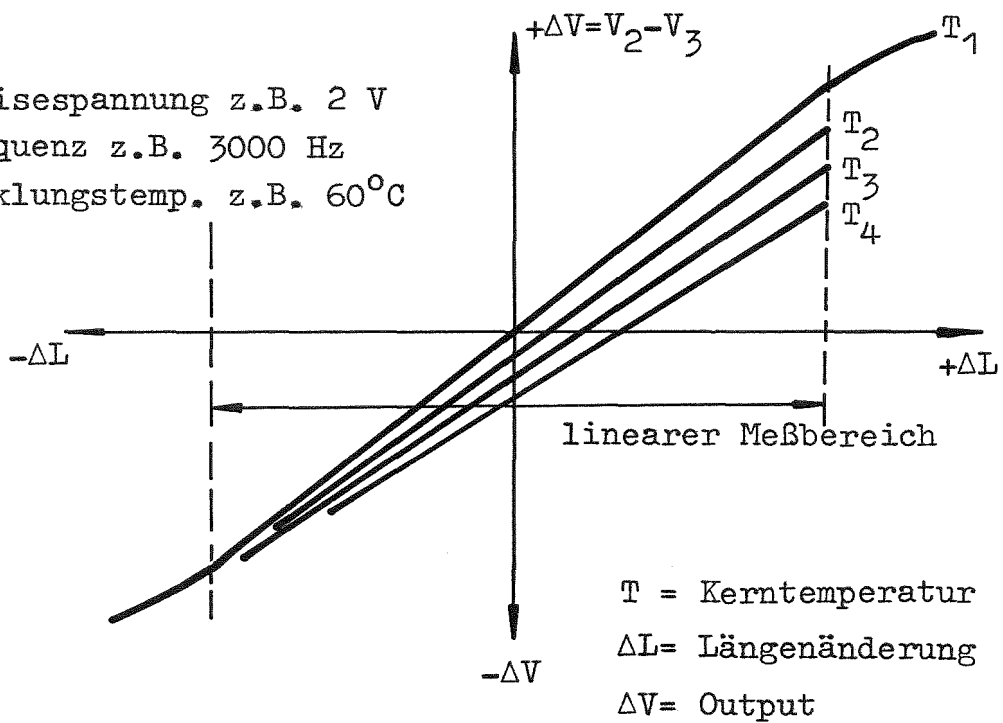


Bild 3 Differentialtrafo

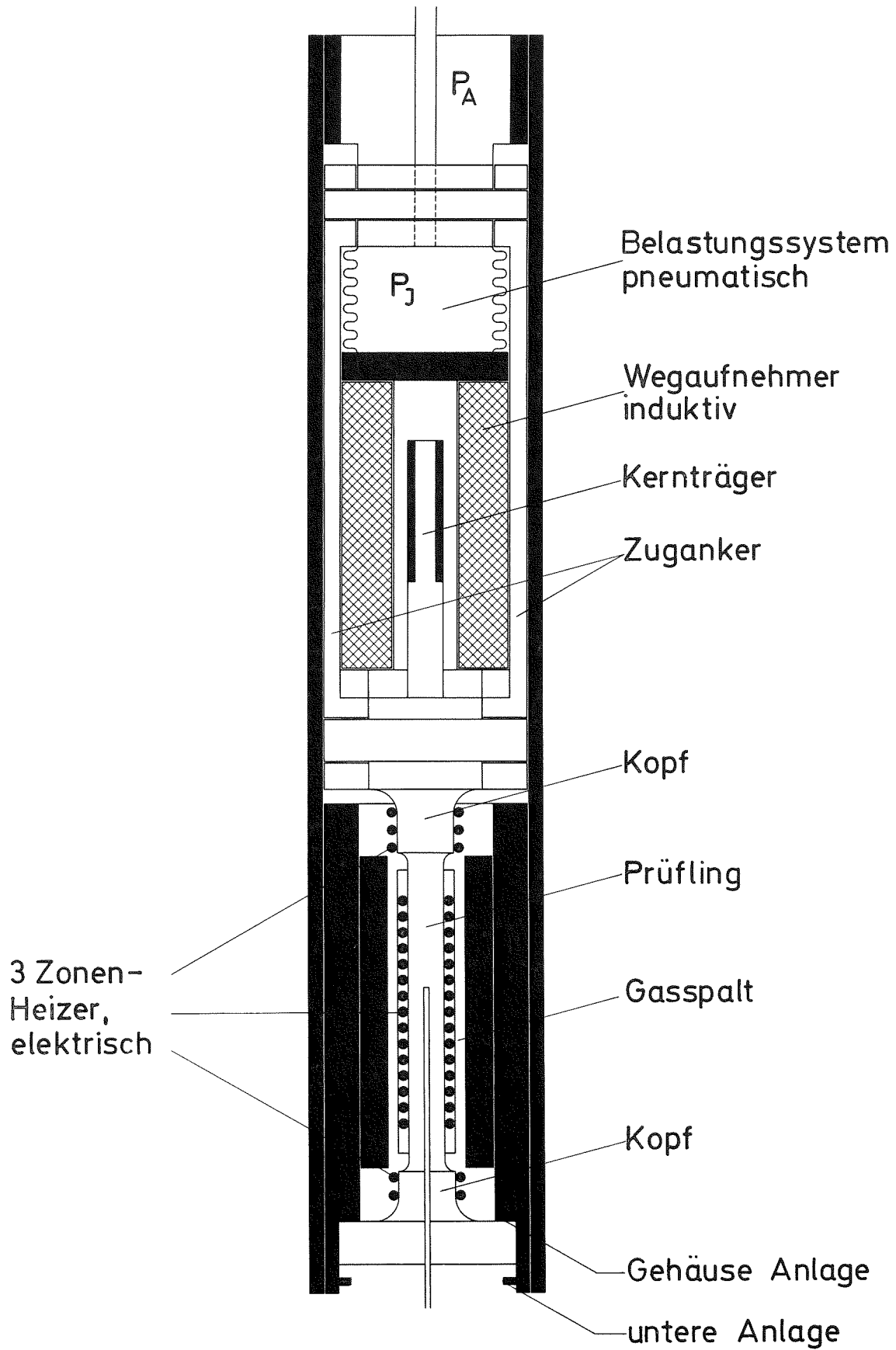


Bild 4 Kriechvorrichtung

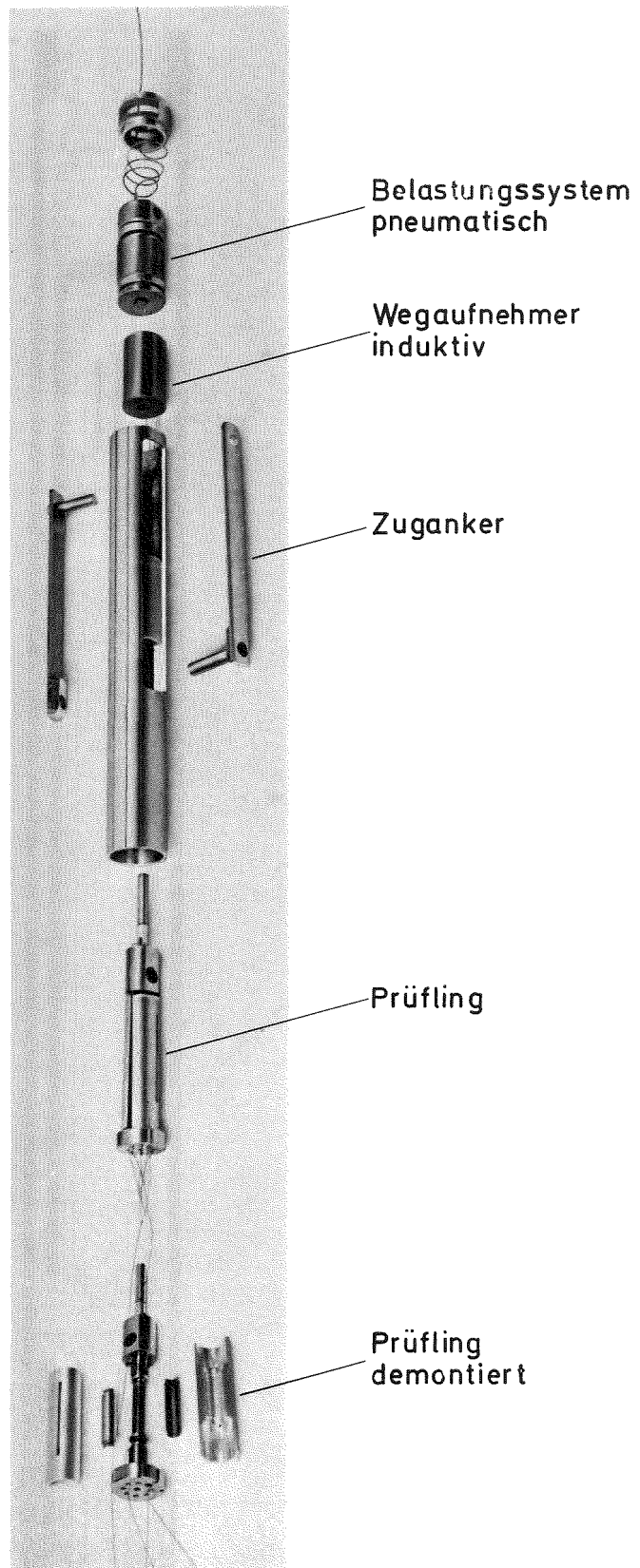


Bild 5 Kriechvorrichtung

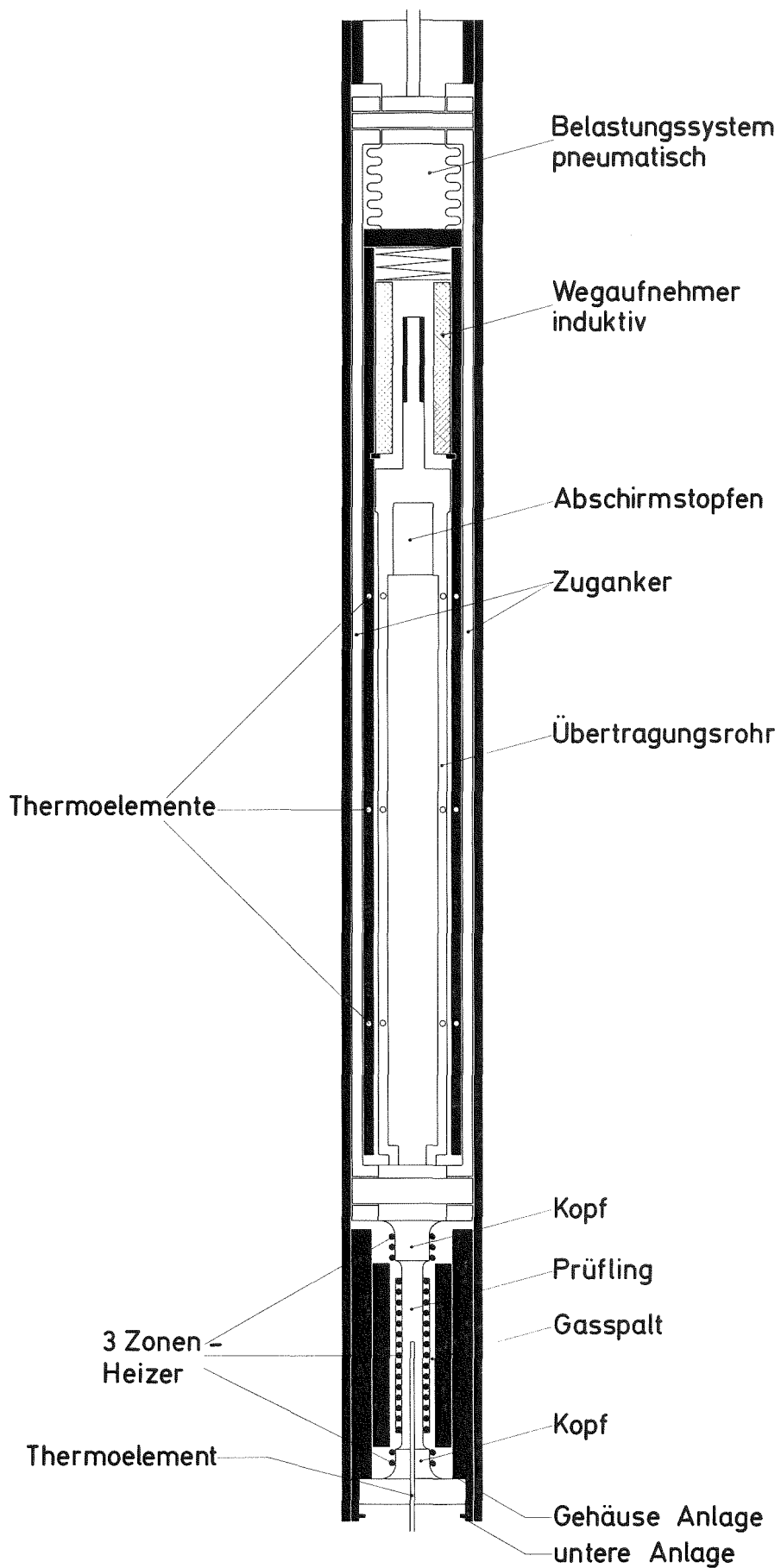
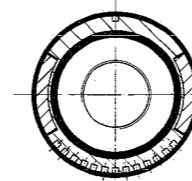
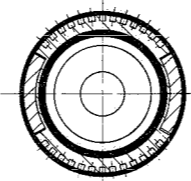
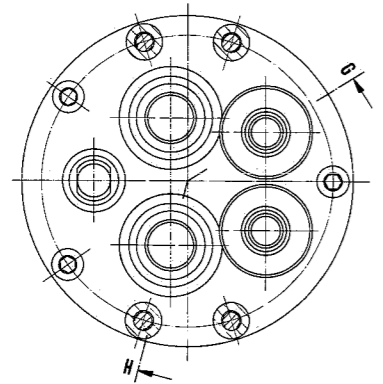
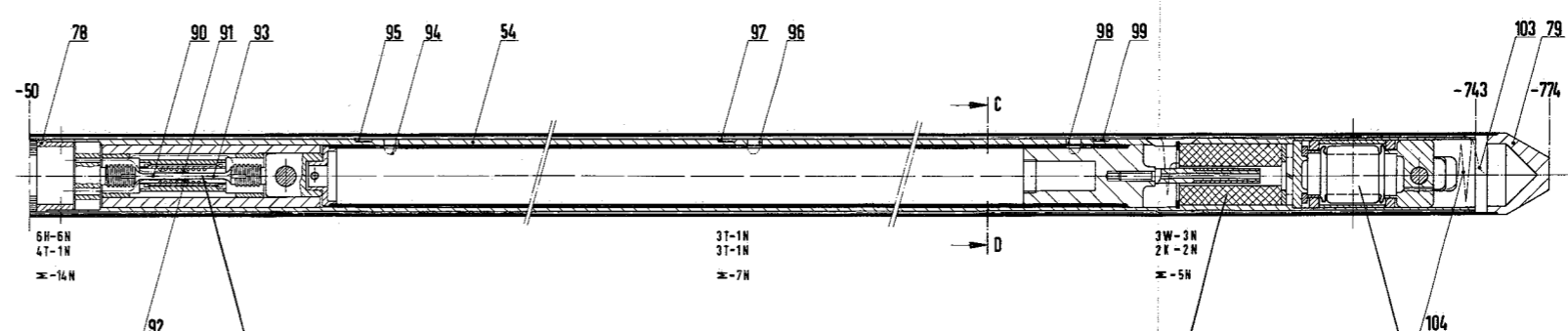
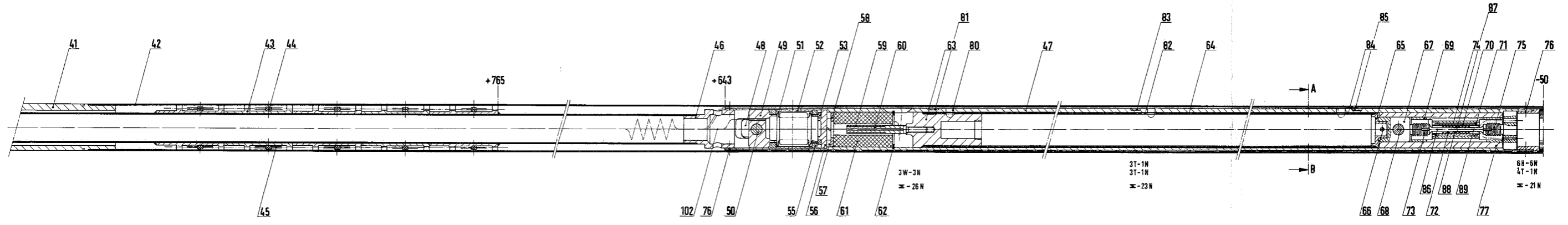
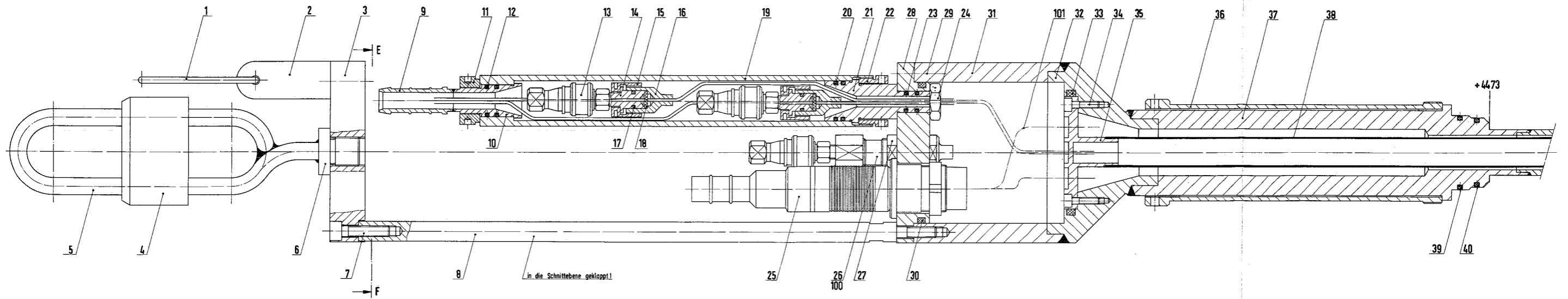


Bild 6 Kriechvorrichtung

Schnitt G-H



Prüfling

Wegaufnehmer induktiv

Belastungssystem pneumatisch

Bild 7

Blatt	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Druckluft, Öl, Wasser	Abmessung
19/27	1	Prüfling	St 50	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000
19/27	1	Wegaufnehmer induktiv	St 50	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000
19/27	1	Belastungssystem pneumatisch	St 50	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000	Ø 100 x 1000

Projekt: 1-1 (2-1)
 Benennung: Projekt Mol 5C Zusammenstellung
 Zeichnung Nr.: IMF 18-0-4269

Probentemperatur in Abhängigkeit von der Gamma-Heizung

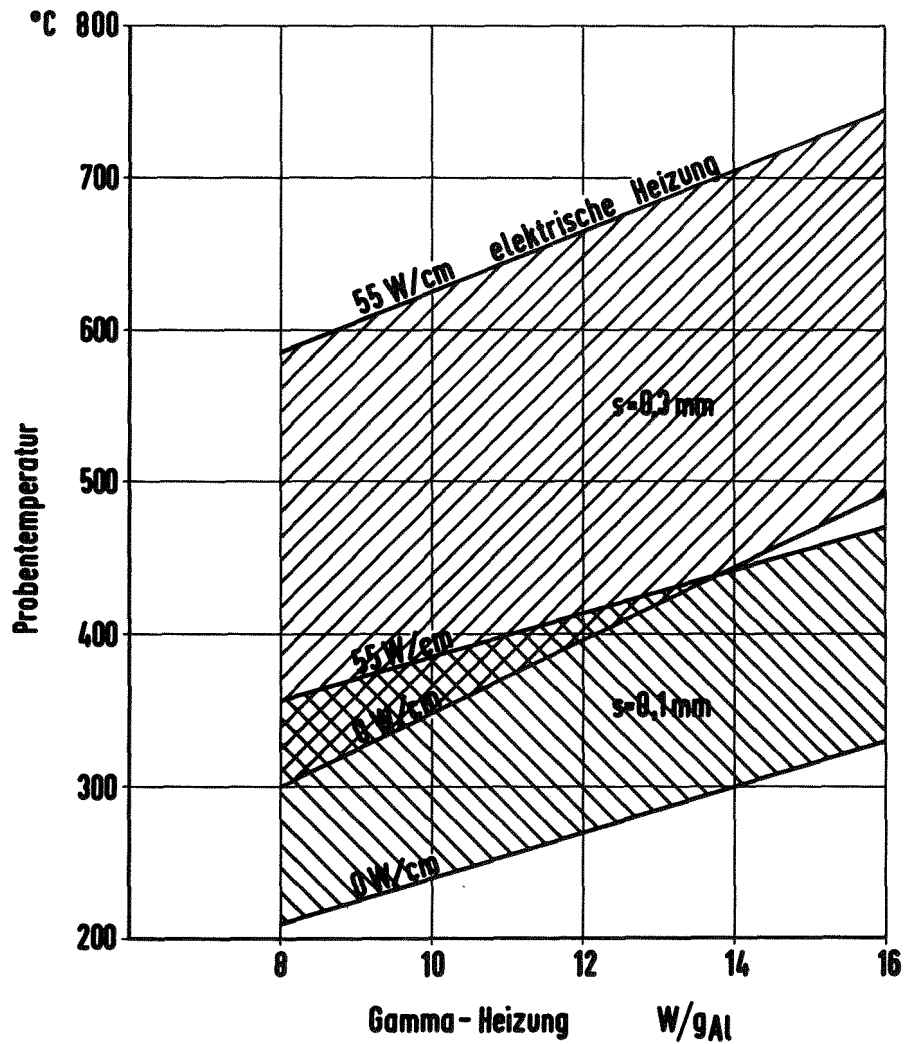


Bild 8

Differenzdruck am Faltenbalg in Abhängigkeit von der Verlagerung des Prüflings

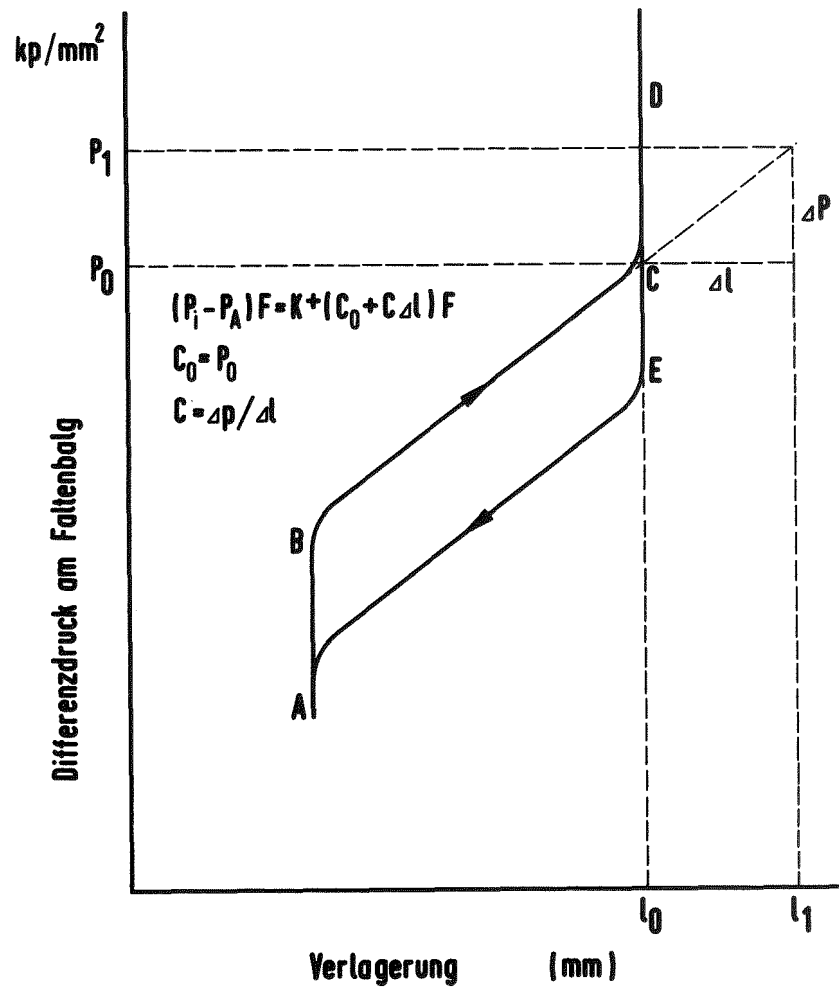


Bild 9

Anforderungen an Brennstoffkriechkapsel

Bestrahlung auf BE- oder Zwischengitterpositionen im FR2

Leistungsdichte im Brennstoff max. 4000 W/cm³

Brennstofftemperatur 300 - 900 °C

Probenbelastung bis 5 kp/mm² ± 10 %

Bestrahlungszeit 1000 bis 2500 h

Zerbröckeln der Tabletten möglichst vermeiden.

Längenänderungen mit hoher Genauigkeit erfassen.

Temperaturen und Längenänderungen kontinuierlich registrieren.

Parameter von Kapsel zu Kapsel veränderlich.

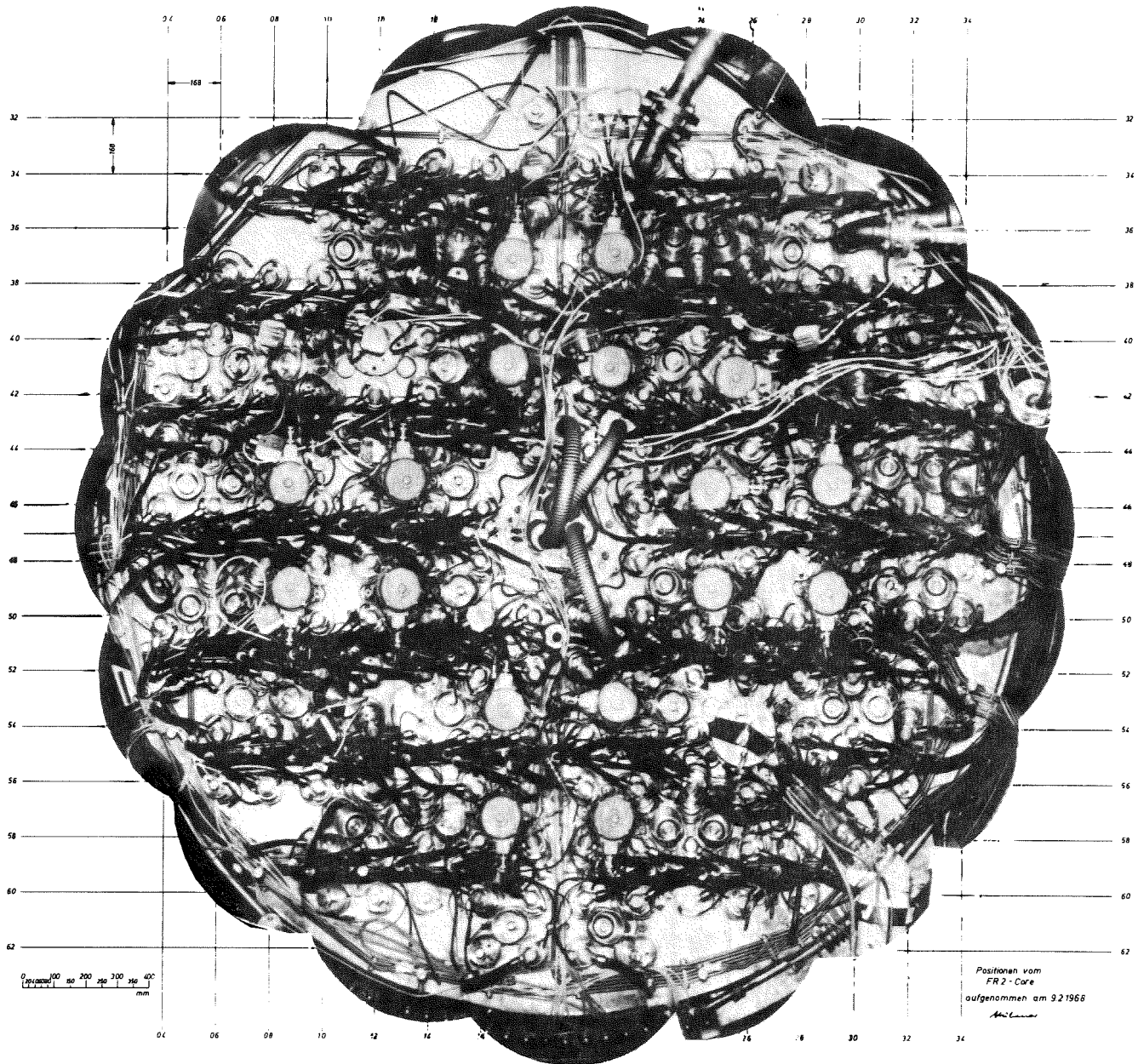


Bild 11: Draufsicht auf den FR2-Deckel

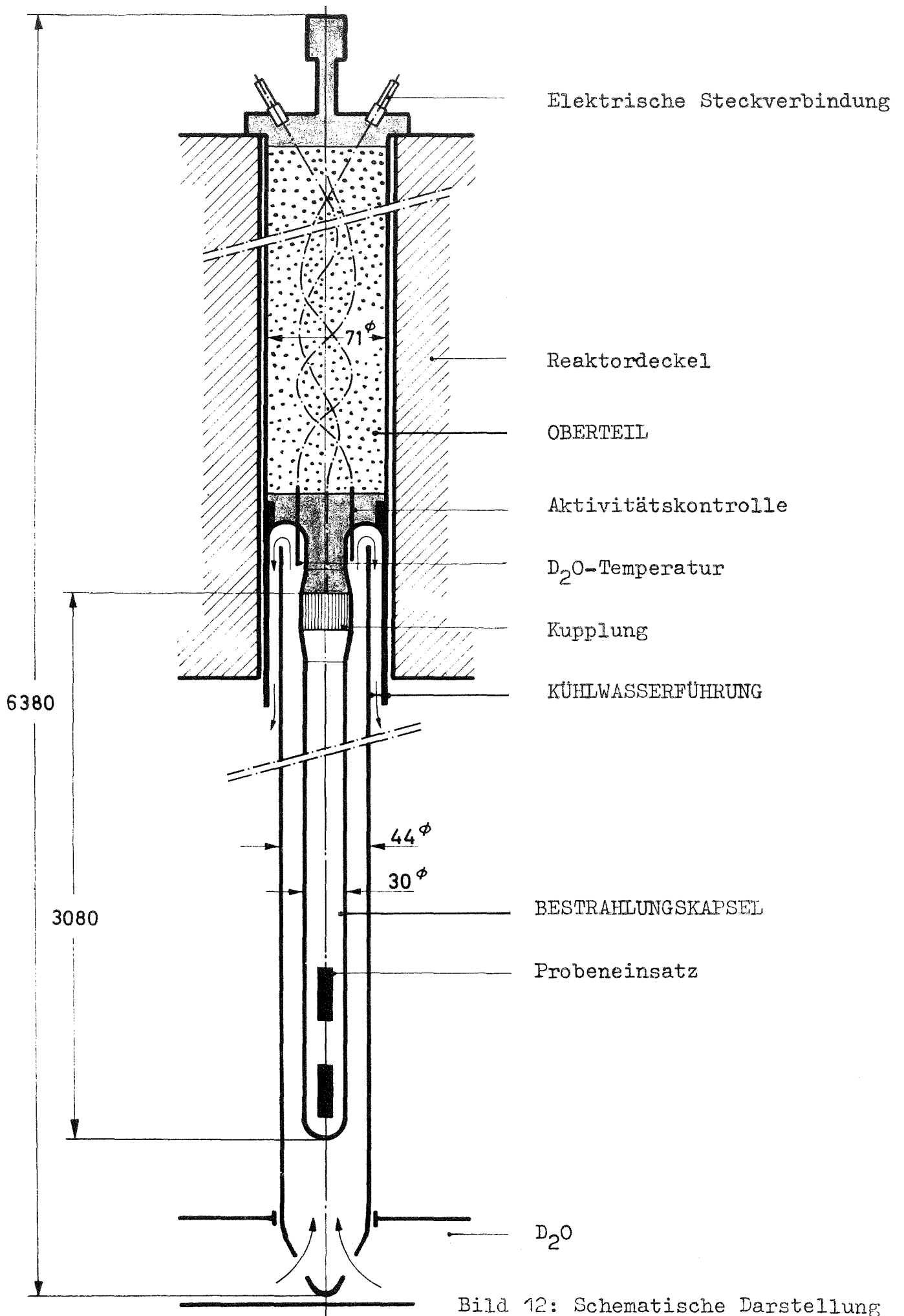


Bild 12: Schematische Darstellung eines FR2-Kapselversuchseinsatzes

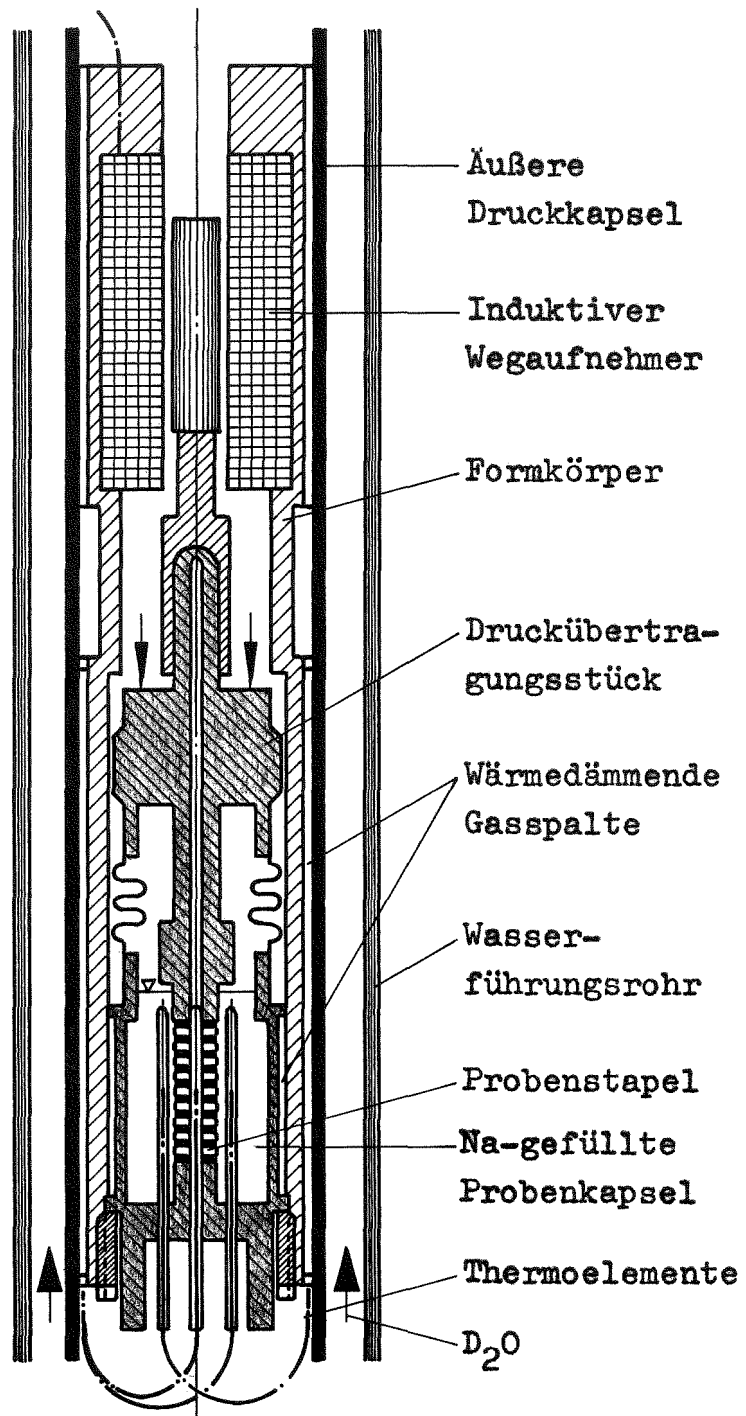


Bild 13: Brennstoff-Kriechprobeneinsatz

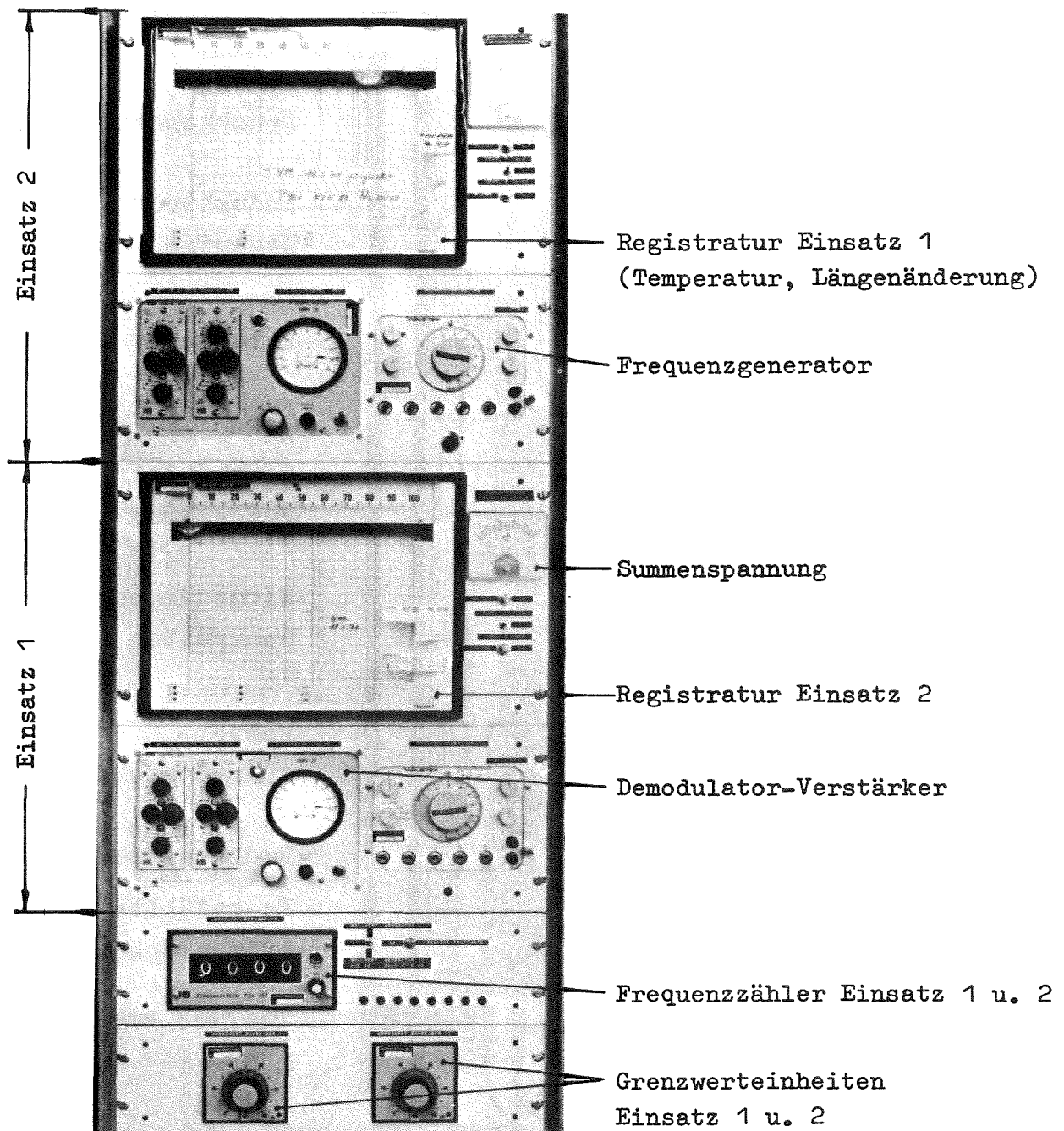


Bild 14: Meßschrank für FR2-Kriechexperimente

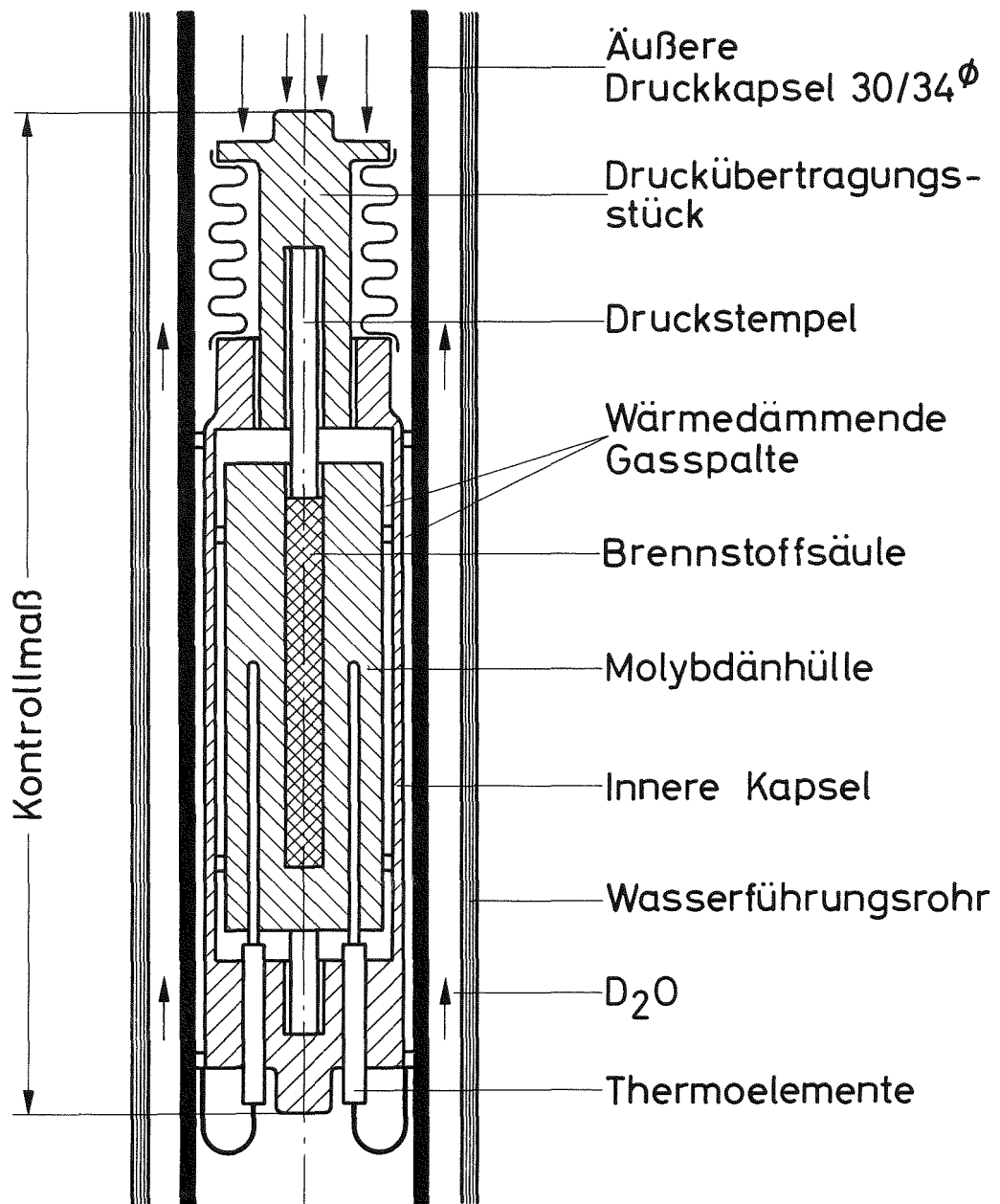


Bild 15: Schematische Darstellung einer Druckschwellkapsel