

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

Oktober 1970

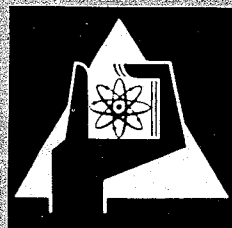
KFK 1281

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

In pile-Einrichtungen für Dehnungsmessungen an
Kernbrennstoffen und Strukturmaterialien

H. Will



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1970

KFK 1281

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

In pile-Einrichtungen für Dehnungsmessungen
an Kernbrennstoffen und Strukturmaterialien

H. Will

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht werden die wichtigsten Auslegungskriterien für eine Kriechkapsel dargelegt. Ausführlich werden dabei die möglichen Meßverfahren für in pile-Dehnungsmessungen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit und ihrer Verwendbarkeit in einem Bestrahlungseinsatz diskutiert.

Die Arbeit schließt mit einer Beschreibung von ausgeführten Bestrahlungseinsätzen.

Abstract

The main design criteria of a creep capsule are presented in this report. The possible methods of measurement for in-pile expansion measurements are discussed in detail with respect to suitability and applicability in an irradiation rig.

The work is concluded with a description of finished models of irradiation rigs.

Inhalt

1. Allgemeines
2. Die wichtigsten Auslegungskriterien für eine Kriechkapsel
 - 2.1 Dehnungsmessung
 - 2.1.1 Anforderungen an das Meßsystem
 - 2.1.2 Diskussion möglicher Meßverfahren
 - 2.2 Belastungssystem
 - 2.3 Temperatureinstellung
3. Beschreibung von ausgeführten Kriechkapseln
 - 3.1 Mol 5A
 - 3.2 Mol 5B
 - 3.3 Mol 5C
 - 3.4 FR2/73d
 - 3.5 Mol 12
 - 3.6 Siloe-Bestrahlung
4. Zusammenfassung
5. Literaturangaben
6. Abbildungen

Verzeichnis der Abbildungen

1. Prüfling mit Meßwicklung
2. Meßwicklung mit Temperaturmeßstelle
3. Anschluß der Zuführung
4. Differentialtrafo
5. Solexverfahren
6. Rohrproben, Druckabfall
7. Kriechmeßvorrichtung für Rohrproben
8. Hohlraum-Resonanzmessung
9. Einsatz Mol 5A
10. Einsatz Mol 5B
11. Kriechvorrichtung Mol 5C
12. Einsatz FR2/73d
13. Einsatz Mol 12
14. Siloe-Bestrahlung

1. Allgemeines

Um das Brennelement eines Reaktors optimal auslegen zu können, ist unter anderem die genaue Kenntnis des Brennstoffschwellens bzw. des Brennstoffkriechens unter Neutronenbestrahlung und unter Einwirkung von äußeren Kräften unbedingt notwendig. Aber ebenso notwendig ist das Wissen über Festigkeitseigenschaften der Brennelementhülle, insbesondere in wie weit sie Verformungen ohne Bruch aufnehmen in der Lage ist.

Aus diesen Gründen ist es nicht verwunderlich, daß mit den größten Bemühungen an den damit verbundenen Problemen gearbeitet wird, insbesondere an der Erforschung der Kriechraten der Kernbrennstoffe und der Festigkeitseigenschaften der Strukturmaterialien unter möglichst ähnlichen Bedingungen, wie sie in einem Leistungsreaktor herrschen.

Bei den angesprochenen Untersuchungen geht es also darum, Kriechraten und Kriechgeschwindigkeiten an entsprechenden Proben in einem Testreaktor zu erfassen. Das Messen von derart kleinen Bewegungen in der Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-5} mm/h gehört zu den meßtechnisch schwierigsten Aufgaben überhaupt, gleichgültig, ob es nun Brennstoff- oder Strukturmaterialproben sind.

2. Die wichtigsten Auslegungskriterien für eine Kriechkapsel

Im folgenden sollen nur die wichtigsten Kriterien sowie ihre technischen Lösungsmöglichkeiten dargelegt werden. Auf konstruktive Anforderungen, resultierend aus den Gegebenheiten des jeweiligen Testreaktors, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

2.1 Dehnungsmessung

Bei einer Kriechkapsel ist natürlich die Längenänderungsmessung das wichtigste Kriterium.

Aufgrund der an den Aufnehmer unbedingt zu stellenden Anforderungen ist sofort einzusehen, daß nur wenige Meßverfahren für in pile-Dehnungsmessungen tauglich sind.

2.1.1 Anforderungen an das Meßsystem

Die wichtigsten Anforderungen an den Meßwertaufnehmer sind:

- a) hohe Genauigkeit, in der Größenordnung 1 bis 3 μ ,
- b) Resistenz gegen radioaktive Strahlung bis zu Neutronendosen von mindestens 10^{22} n/cm^2 ,
- c) gute Temperaturverträglichkeit, da die Versuche bei hohen Temperaturen durchgeführt werden, wobei die Genauigkeit nicht wesentlich verschlechtert werden darf,
- d) geringe Abmessungen, da der Meßaufnehmer in den sehr beengten Platzverhältnissen innerhalb des Bestrahlungseinsatzes unterzubringen sein muß,
- e) Langzeitstabilität innerhalb der Bestrahlungsdauer von bis zu 5000 h.

Der mechanische Abgriff der Meßgröße und die Überleitung zu einem Aufnehmer, der in einer Zone angeordnet ist, wo nur noch geringe Neutronen- und Temperaturbelastung herrschen, ist meistens nicht möglich, da ein derartiges Gestänge unzulässigen schwankenden Temperaturgradienten unterworfen wäre, so daß die sich ändernde thermische Dehnung das eigentliche Meßsignal überdecken würde.

Außerdem würden mechanische Abgriffe, zumindest an Strukturmaterialproben, das angestrebte homogene Temperaturfeld derart stören, daß verwertbare Versuchsergebnisse nicht zu erzielen wären. Unvermeidbare Reibungen längs derartiger Gestänge würden zudem die Dehnung der Probe behindern.

2.1.2 Diskussion möglicher Meßverfahren

a) optische Meßverfahren

Die klassischen optischen Methoden zum Messen von Kriechbewegungen sind zwar prinzipiell möglich, jedoch in den beengten Platzverhältnissen eines Bestrahlungseinsatzes nicht unterzubringen. Auch ist es nicht möglich, ein optisches Signal aus dem Reaktorkern zu einer geeigneten Registriereinrichtung zu führen.

b) kapazitiver Meßwertaufnehmer

Kapazitive Meßwertaufnehmer sind für in pile-Messungen ungeeignet, da infolge des im Reaktor herrschenden Strahlenfeldes innerhalb des elektrischen Feldes des Meßgliedes Ionen entstehen. Die Ladungen dieser Ionen würden das eigentliche Meßsignal verdecken. Insbesondere Flußänderungen während eines Reaktorzyklus induzieren scheinbare Dehnungen.

c) Durchschlagspannung

Theoretische besteht die Möglichkeit, durch Messen der Durchschlagspannung Rückschlüsse auf die Dehnung zu ziehen. Jedoch ist die Durchschlagspannung durch veränderliche Ionisierung im Spalt, infolge des veränderlichen Flusses bei gleichem Spalt, nicht konstant. Auch wirft das Messen der Durchschlagfestigkeit mit Spannungen um 2000 V sicherheitstechnische Probleme auf, die wohl nicht befriedigend zu lösen wären.

d) Dehnungsmeßstreifenprinzip

Dehnungsmessungen nach dem Dehnungsmeßstreifenprinzip, also dem mit der Dehnung veränderlichen ohmschen Widerstandes eines dünnen Drahtes, nahmen anlässlich von Untersuchungen im IRE einen breiten Raum ein.

Dabei wurde auf kleine Rohrproben, den Prüflingen des Bestrahlungsprojektes Mol 2, die im Versuch sowohl bei hohen Temperaturen und mit mechanischer Belastung durch Innendruck betrieben werden, eine Isolationsschicht aus Magnesiumoxid mittels des Flamm-spritzverfahrens aufgebracht. Darauf wurde ein dünner Draht aus Widerstandsmaterial gewickelt und mit einer 2. Schicht aus Magnesiumoxid befestigt. Anschließend wurden die Anschlüsse hergestellt und ein Thermoelement zur Temperaturmessung aufgebracht.

In der Abb.1 wird ein solcher Prüfling gezeigt. Der Prüfling besteht aus einem Röhrchen in den Abmessungen 7 mm \varnothing x 0,4 und 45 mm lang. Das Röhrchen ist mittels zweier Endstopfen verschlossen. Einer dieser Stopfen dient als Einführung des elektrischen Heizleiters, der sich im Innern der Probe zum eigentlichen "heißen Teil" verzweigt. Die Rückleitung des Heizstromes erfolgt über Masse. Auf der anderen Seite ist der Anschluß eines Kapillarrohres zur Druckbeaufschlagung der Probe.

In Abb.2 ist stark vergrößert eine Temperaturmeßstelle dargestellt, dabei ist die äußere Hülle eines Miniatur-Mantelthermoelementes entfernt und die Adern direkt auf die Oberfläche der Probe aufgeschweißt. Es wurde festgestellt, daß bei den vorliegenden Betriebsbedingungen - unter anderem ein starker Temperaturgradient in radialer Richtung von max. $700^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ - mit dieser Meßstellenanordnung die besten Ergebnisse zu erzielen sind.

Ganz deutlich sind die in Magnesiumoxid eingebetteten Dehnungsmeßdrähte zu sehen.

Abb.3 zeigt die Anschlußstelle des "Dehnungsmeßstreifens" an die stahlummantelte Zuleitung.

Der sogenannte k-Faktor gibt das Verhältnis von Widerstandsänderung des Meßdrahtes zur Umfangsänderung der Probe an. Die Unkenntnis dieses k-Faktors, wegen der nicht bekannten Querkontraktionszahl bei den entsprechenden Prüftemperaturen ist nicht sehr erheblich, weil es genügt, den qualitativen Verlauf der Dehnung während des Versuches aufzuzeichnen. Quantitativ lassen die Messungen sich dann auf Grund der bei den Nachuntersuchungen festgestellten Aufweitungen der Proben auswerten.

Nach sehr erfolgreichen Vorversuchen, die die Tauglichkeit der Meßmethode out of pile bestätigten, mußte dieses Prinzip doch verworfen werden, da einerseits bei dicken Isolationsschichten die Kriechbewegung des Prüflings behindert wurde und andererseits bei dünnen Schichten die geforderten Isolationswerte bei den hohen Temperaturen bis 800 °C nicht erreicht werden konnten.

Dies schließt aber nicht aus, daß diese Methode bei anderen Versuchsbedingungen, wie z.B. niedrigere Temperatur oder größere Wandstärke der Probe, zur Anwendung kommen kann.

e) Induktive Meßverfahren

Die Messung mittels induktiver Verlagerungsaufnehmer ist grundsätzlich möglich, wenn durch Verwendung geeigneter Materialien eine ausreichende Strahlen- und Temperaturbeständigkeit erreicht wird. Im Institut für Reaktorentwicklung (IRE) ist eine Bestrahlungskapsel konstruiert worden, mit der das Kriechen von Kernbrennstoffen mit derartigen Aufnehmern gemessen wird.

Verwendet wird dabei ein sogenannter Differential-Trafo in strahlenbeständiger Ausführung [17].

Dabei wird durch die an die Primärspule angelegte frequente Spannung V_1 eine von der Stellung eines in das Spulengehäuse eingeführten magnetischen Kerns abhängige Spannung in den beiden Sekundärspulen induziert. Der Kern selbst ist an dem Prüfling angelenkt, so daß er die Längenänderungen der Probe mitmacht (s. Abb. 4).

Wenn der Kern sich z.B. nach links bewegt, wird die magnetische Kopplung von Primärspannung zu Sekundärspannung V_2 verbessert und im gleichen Maße zu V_3 verschlechtert. Nach Gegeneinanderschalten von V_2 und V_3 entsteht ein linearer Zusammenhang zwischen ΔV und der Stellung des Kerns.

Die Summe $V_2 + V_3$ dagegen ist 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 laufend überprüfen.

In out pile-Versuchen wird jeder Aufnehmer vor dem Einbau in einen Bestrahlungseinsatz eingehend untersucht, um die optimalen Betriebsparameter (Spannung V_1 und Speisefrequenz) festzulegen. So gibt es zum Beispiel 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 Temperatur der Wicklungen selbst wird durch eine sinnvolle Anordnung des Aufnehmers im Rig niedrig und konstant gehalten. Im unteren Teil der Abb. 4 sehen Sie als Beispiel eine aufgenommene Eichkurve mit der Kerntemperatur als Parameter.

Die Genauigkeit des Meßsystems wird trotz aller Optimierungsversuche durch den Temperaturgang bestimmt und beträgt etwa $\pm 5 \mu$.

f) Solex-Verfahren

Eine 2. für in pile-Messungen geeignete Methode stellt das sogenannte Solex-Verfahren dar; es wird in mehreren Veröffentlichungen beschrieben: [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Dabei strömt ein Gas in definierter Menge durch eine Düse auf eine Prallplatte. Der Druckabfall über dieses System ist abhängig von dem Abstand Düse-Platte.

Eine Reihe von Kriechkapseln, in denen diese Meßmethode verwendet wird, sind gebaut worden, so in Kanada und in England.

Meistens wird dieses System dahingehend abgewandelt, daß die Prallplatte durch eine Nadel ersetzt wird, die sich aus der Düse heraus bewegt, sobald eine Längenänderung auftritt (s. Abb. 5). Dann erscheint das Meßsignal als Differenzdruck auf dem U-Rohr-Manometer 2. Bedingung für eine einwandfreie Messung ist, daß der Gasdurchsatz, meist Helium, über einen längeren Zeitraum sehr konstant gehalten wird. Bedingung für eine genaue Durchflußmessung wiederum ist eine sehr genaue Druckmessung an der Meßstelle. Außerdem muß der Rückdruck, gemessen am Manometer 1, die Temperatur des Gases an der Düse und die Temperatur der Düse und der Nadel konstant sein, um eine der Längendehnung des Prüflings zuortbare Messungen zu gewährleisten.

In umfangreichen out of pile-Versuchen wird die Charakteristik eines solchen Meßsystems ausgemessen und bei der Auswertung der Versuche zugrunde gelegt. Im unteren Teil der Abb. 5 sind derartige Eichkurven dargestellt, wobei der Durchfluß, die Gastemperatur, der Rückdruck und die Temperatur des Meßsystems Parameter sind.

Die Genauigkeit eines Düse-Prallplattensystems beträgt etwa $2,5 \cdot 10^{-4}$ mm. Die maximale meßbare Dehnung ist etwa 0,5 mm. Durch Abwandlung in ein Düse-Nadelsystem wird die maximale Meßlänge auf Kosten der Meßgenauigkeit erweitert. Z.B. hat ein ausgeführter Meßwertaufnehmer 3 mm Meßweg und eine Genauigkeit von ± 2 bis 3μ .

Der Nachteil dieser Methode ist, daß höchstreines Helium verwendet werden muß, um Oxidation zu vermeiden, und daß die reine Meßzeit für einen Punkt auf der Kriechkurve etwa 1 Stunde beträgt. Vorteilhaft jedoch ist, daß die Meßgenauigkeit durch radioaktive Strahlung nicht beeinflußt wird.

g) Druckabfallmethode

Eine recht einfache Meßmethode ist aus Kanada bekannt [87].

Bei einem definierten konstanten Gasdurchsatz ist der Druckabfall über einen Rohrprüfling abhängig von dessen Aufweitung (Abb. 6).

Nachteilig ist, daß

1. nur die integrale Aufweitung ausgemessen werden kann,
2. diese Methode nur bei relativ großen Proben angewendet werden kann,
und
3. nur relativ geringe Aufweitungen ausgemessen werden können.

Bemerkenswert ist diese Kriechkapsel wegen der interessanten Verknüpfung des Experiments mit Vergleichsmessungen (Abb. 7). Der gleiche Gasstrom, der am in pile-Prüfling das Meßsignal erzeugt, wird vorher über einen bei gleicher Temperatur aber nicht mit Innendruck belasteten Prüfling geführt. An dieser Probe, die keine Veränderung seiner Geometrie während der Versuchsdauer erfährt, wird ein konstanter Druckabfall und damit ein konstanter Gasstrom eingestellt. Die konstante Gasmenge umströmt dann einen mit Innendruck belasteten, bei gleicher Temperatur aber ohne Neutronenstrahlung betriebenen Rohrprüfling. Auf diese Weise läßt sich die Abweichung der Dehnung einer bestrahlten Probe gegenüber einer unbestrahlten ermitteln.

Damit ist ein Hauptproblem aller Kriechmessungen an Strukturmaterial gelöst, nämlich, daß wegen des diskontinuierlichen Betriebs eines Reaktors über die Testdauer nur schlecht die eigentliche Kriechrate gemessen und die Konstanz der Kriechgeschwindigkeit in dem sekundären Kriechbereich verfolgt werden kann. Man mißt deshalb üblicherweise die Kriechbewegung einer Probe in pile, registriert die Versuchsbedingungen und fährt dann out pile eine Vergleichsprobe bei gleichen Bedingungen. Anschließend werden die beiden Dehnungen verglichen und in Bezug auf einen möglichen Strahleneinfluß interpretiert.

Bei der beschriebenen Meßeinrichtung wird das eigentliche Ziel gleich erreicht und notfalls lassen sich die Versuchsparameter ändern, um gute Ergebnisse zu erzielen.

h) Hohlraum-Resonanzmessung

Eine weitere Methode, die für in pile-Kriecheinrichtungen verwendet wird, stellt die sogenannte "Hohlraum-Resonanzmessung" dar (Abb. 8). Dabei wird eine hochfrequente elektromagnetische Welle im Gigahertzbereich durch einen Hohlleiter in einen Zylinder eigeleitet. In dem Zylinder ist ein Kolben angeordnet, der über ein kurzes Gestänge mit dem Prüfling verbunden ist. Kriechbewegungen der Probe verändern das Volumen des Zylinders, und damit die für ein bestimmtes Zylindervolumen charakteristische Resonanzfrequenz. Erfolgt eine Änderung am Prüfling, wird durch eine elektrische Regeleinrichtung die Frequenz der Welle so geändert, daß wieder Resonanz auftritt. Eine 2. Regelstrecke ändert danach in einem Vergleichshohlraum solange das Volumen, bis es auch dort bei der Meßfrequenz zur Resonanz kommt. An dem Stellglied - eine Mikrometerschraube - ist dann die Längenänderung des Prüflings ablesbar. Die Genauigkeit dieser Meßmethode beträgt $\pm 2 \mu$ und wird vornehmlich bestimmt durch die Genauigkeit der Vergleichsmikrometerschraube. Wenn man jedoch auf die

Vergleichsmessung verzichtet und statt dessen die Resonanzfrequenz direkt mißt, lassen sich Genauigkeiten von etwa $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ mm leicht erreichen. Frequenzzähler mit der notwendigen Genauigkeit im Gigahertzbereich sind sehr teuer, so daß man bislang immer auf die billigere Methode mit einem Vergleichshohlraum zurückgegriffen hat.

i) Kontaktgabe

Aus England und Kanada [9] ist eine Meßmethode bekannt, bei der durch das Kriechen der Probe ein elektrischer Kontakt geschlossen wird. Ein Schrittmotor stellt nunmehr einen genau definierten Abstand wieder her. Das nächste Meßsignal tritt erst wieder auf, wenn die Dehnung des Prüflings die Kontakte wieder geschlossen hat.

Diese Methode ist sehr simpel, kann jedoch bezüglich Genauigkeit, Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit nicht voll befriedigen.

2.2 Belastungssysteme

Bei manchen ausgeführten Kriechkapseln wird die Prüflingslast erzeugt durch an langen Zugstangen hängenden Gewichten. Manchmal auch durch ein außerhalb des Bestrahlungseinsatzes angebrachtes hydraulisches System. In beiden Fällen treten Fehler auf, insbesondere durch längs den Zugstangen auftretende Reibungskräfte, die out of pile wegen der fehlenden radialen Temperaturgradienten nur sehr schwer oder garnicht auszumessen sind.

Besser sind die im Innern eines Einsatzes angeordneten pneumatischen oder hydraulischen (mit Flüssigmetallen) Faltenbalg-Belastungssysteme. Insbesondere dann, wenn bei den Original-Versuchsbedingungen durch Umkehr der wirksamen Differenzdrücke die Reibung des Belastungssystems meßbar gemacht wird.

Die Last selbst wird manchmal mit entsprechenden Aufnehmern gemessen, die aber dann außerhalb des Strahlenfeldes angeordnet sind. Meistens aber - und diese Methode ist ausreichend genau - benutzt man den empirisch gut zu ermittelnden Zusammenhang zwischen Pneumatik- bzw. Hydraulikdruck und Belastung.

2.3 Temperatureinstellung

Bei Kriechmessungen an Strukturmaterialien wird eine sehr gute Temperaturkonstanz und ein ausgeglichenes Temperaturprofil über die Prüflänge gefordert. Die sekundäre Kriechgeschwindigkeit kann sich bei den interessierenden Materialien und den entsprechenden Prüftemperaturen bis zu 100% pro 5°C ändern.

Die Forderung nach Konstanz, Genauigkeit der Temperaturmessung und Temperaturgradient längs der Prüflänge besser $\pm 3^{\circ}\text{C}$ stellt schon einen Kompromiß an die technischen Möglichkeiten dar und beeinflusst die Konstruktion einer Bestrahlungseinrichtung maßgeblich.

Räumliche Gradienten in der Gammaheizung und dem Neutronenfluß, die außerdem noch zeitlichen Variationen unterworfen sind, induzieren Inkonstanz und Temperaturgradienten. Während die Inkonstanz durch geregelte elektrische Heizungen ausgeglichen wird, ist die Streckung des axialen Temperaturgradienten sehr schwierig. Manchmal wird versucht, durch Umhüllen des Prüflings mit Halbschalen aus gut wärmeleitenden Materialien, wie z.B. Kupfer, dieses Problem zu lösen. Wenn jedoch die Länge der Probe sich ändert, also auch der Durchmesser der Probe sich ändert, können sehr leicht "hot spots" entstehen, die das Versuchsergebnis nachteilig beeinflussen. Deshalb werden manchmal die Proben mit Flüssigmetallen "umhüllt" und außerdem mit 3-Zonen-Heizern ausgerüstet, wobei gerade 3-Zonen-Heizer regelungstechnische Probleme aufwerfen und eine umfangreiche Instrumentierung notwendig machen.

3. Beschreibung von ausgeführten Kriechkapseln

Die folgende Aufstellung von ausgeführten Kriechkapseln ist auf solche Einrichtungen beschränkt, die durch die Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, betrieben werden.

3.1 Mol 5A

In Abb.9 ist der Prüflingsbereich des Bestrahlungseinsatzes vereinfacht dargestellt.

In einem Einsatz ist eine Strukturmaterialprobe enthalten, wobei die Abmessungen mit 3 mm Durchmesser und 30 mm Länge denen eines DIN-Prüflings entsprechen. Er ist umhüllt von Kupferhalbschalen, die zapfenartig ineinandergreifen. Darumherum ist der sogenannte specimen holder, über den sich die Reaktionskräfte abstützen, die aus der Prüflingsbelastung resultieren. Auch hier sind wieder Teile aus Kupfer ausgeführt, um den axialen Temperaturgradienten klein zu halten. Dieser specimen holder ist in dieser vereinfachten Darstellung allerdings nicht gezeichnet. Nach außen schließt sich der heaterformer an, in den Heizwicklungen eingelassen sind zur Temperatureinstellung und Regelung am Prüfling. Zwischen dem heaterformer und dem thimble ist ein genau definierter Heliumspalt. Insgesamt wird die Temperaturverteilung im Prüflingsbereich mit 5 Thermoelementen gemessen, wobei 2 auf die Oberfläche der Probe aufgeschweißt und 3 in specimen holder angebracht sind.

Im unteren Teil der Abbildung sieht man die Zugstange, über die die Belastung auf die Probe eingeleitet wird. In dieser Zugstange eingearbeitet ist die Düse. Sie macht folglich jede Längenänderung der Probe mit, während die Nadel mit dem specimen holder verbunden ist und damit relativ zum Prüflingskopf feststeht. Rundherum ist ein 2. Heizer, mit dem die Temperatur am Meßsystem eingestellt und geregelt werden kann.

Das Meßgas durchströmt einen Heizer, in dem die gewünschte Gastemperatur eingestellt wird. Dieser Heizer ist in die Zugstange eingegliedert. Die Gastemperatur wird mittels zweier

Thermoelemente gemessen. Das Gas strömt dann durch die Meßdüse, wo das eigentliche Meßsignal als Differenzdruck anfällt. Dieser Differenzdruck wird über Kapillarrohre dem Meßschrank zugeführt.

Das Belastungssystem arbeitet mittels Hydraulikdruck und einem Faltenbalgsystem. Es ist außerhalb des Reaktordruckbehälters - im sogenannten sub pile room - angeordnet. Die Zugkraft wird über eine etwa 6 m lange Stange in den Prüfling eingeleitet. Die Proben temperatur beträgt 600 bis 650°C, die Belastung 42 kp/mm^2 , dieses entspricht bei 3 mm \varnothing etwa 290 kp Zugkraft.

Im Juni 1970 wurde der erste Prüfling des Mol 5A Projektes bestrahlt. Dabei hat das pneumatische Meßverfahren, wie nicht anders erwartet, einwandfrei funktioniert. Die Probleme bei dieser Einrichtung liegen in dem zu großen axialen Temperaturgradienten am Prüfling, den unübersichtlichen Reibungskräften an der Zugstange während der Bestrahlung sowie in der unstablen Belastungsmessung. Diese Fehler haben dazu geführt, daß die Probe für eine sinnvolle Auswertung unbrauchbar wurde. Dieses Projekt wird erst nach erfolgreichen Modifikationen weitergeführt werden.

3.2 Mol 5B

Auch diese Bestrahlungseinrichtung dient der Ermittlung von Kriechraten und Kriechgeschwindigkeiten von Strukturmaterial. Hier ist ebenfalls in einem Einsatz nur eine Probe enthalten. Dieser Kapseltyp benutzt das Hohlraum-Resonanzverfahren zur Längenänderungsmessung. In Abb.10 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt.

Die Probe mit einer Meßlänge von 40 mm und einem Durchmesser von 2 mm wird von NaK als wärmeübertragendes Medium umspült. Im NaK sind 3 elektrische Heizungen eingebaut zur Temperatur-Regelung. Die Temperatur selbst wird von 4 in Probennähe angebrachten Miniatur-Mantelthermoelementen gemessen.

Das Belastungssystem übermittelt die an dem Faltenbalg infolge des wirkenden Differenzdruckes entstehenden Kräfte als Zugspannung auf die Probe. Die Längendehnung des Prüflings wird über ein Gestänge auf den beweglichen Kolben im Resonanz-Hohlraum übertragen. Dabei wird das Gestänge durch einen auf diesen Faltenbalg wirkenden Überdruck des Natriums leicht an den Kopf der Probe angedrückt. Das Meßsystem erfaßt also kontinuierlich die Längenänderung der Probe und macht sie einer Registrierung zugänglich. Durch Umkehr des Differenzdruckes an dem Faltenbalg läßt sich das Gestänge nach unten verfahren und an den gegenüberliegenden Probenkopf zur Anlage bringen. Dadurch kann zu jedem Zeitpunkt die erfolgte Kriechrate am Prüfling nachgemessen werden.

Diese Meßmethode - das Hohlraum-Resonanzverfahren - wurde in Frankreich über 50-fach erfolgreich für Längenänderungsmessungen im Reaktor benutzt. Der erste Bestrahlungseinsatz Mol 5B wird voraussichtlich Ende 1970 in Betrieb gehen.

3.3 Mol 5C

Eine weitere Kapsel für Kriechmessungen an Strukturmaterialproben ist im IRE entwickelt und konstruiert worden. In Abbildung 11 sieht man die sehr kompakte Einheit: Prüfling, Meßaufnehmer und Belastungssystem. Diese Kompaktheit führt dazu, daß in einem Einsatz 4 Prüflinge angeordnet werden können, so daß sich gegenüber den anderen beschriebenen Typen ein ganz erheblicher Kostenvorteil ergibt. Ganz abgesehen davon, daß man sehr viel schneller zu der notwendigen Vielzahl von Meßdaten kommt.

Der Prüfling ist von einer in Halbschalen eingebetteten elektrischen Heizung zur Temperaturregelung umhüllt. Außerdem sind an den Probenköpfen noch jeweils eine elektrische Heizung angebracht, um den axialen Temperaturverlauf zu strecken. An einem Probenkopf greifen Zuganker an, die um den Meßaufnehmer herumgreifen und am Belastungssystem angeleitet sind.

Die Last wird hier pneumatisch mittels des Faltenbalges aufgebracht. Die Tauglichkeit des Meßaufnehmers konnte im Reaktor FR2 bewiesen werden. Ob aber dieser Aufnehmer auch bei den sehr hohen Neutronen- und Gammaflüssen des Reaktors BR2 in Mol - dort sind diese Versuche vorgesehen - genügend genau mißt, soll mit Hilfe eines Simulationseinsatzes überprüft werden. Dabei sollen auch die thermodynamischen Verhältnisse im Probenbereich ausgemessen werden.

3.4 FR2/73d

Diese Bestrahlungseinrichtung wurde gleichfalls im IRE entwickelt und dient der Erforschung des Kernbrennstoff-Kriechens. Der Meßwertaufnehmer ist ein strahlenbeständiger induktiver Differentialtrafo. In Abb. 12 ist der Probenbereich der Kapsel dargestellt. Die Probe besteht aus einem Stapel von UO_2 -Ringtabletten mit zwischengelagerten Molybdänscheiben. Der Probenstapel wird durch ein Zentralthermoelement sowie durch 3 weitere Elemente fixiert. Wärmeträger ist NaK. Die Probeneinheit ist mittels eines Faltenbalges gasdicht abgeschlossen. Die Probentemperatur wird nicht geregelt, sondern durch Wahl des Gasspaltes auf einen Wert innerhalb eines gerechneten Bereiches eingestellt. Die Belastung der Probe - eine Druckkraft - entsteht als Reaktionskraft des Rig-Innen-druckes auf dem Faltenbalg. Man sieht in Abb. 12 den Differentialtrafo mit dem Kern im Innern, wobei der Kern mit der Probe in Verbindung steht und jede Längenänderung mitmacht.

Insgesamt sind von diesem Kapseltyp bislang 7 Einsätze bestrahlt worden, also insgesamt 14 Proben, da in jedem Einsatz 2 Prüflinge angeordnet sind.

Die grundsätzliche Tauglichkeit dieser Meßmethode konnte dabei, zumindest für FR2-Betriebsverhältnisse, gefunden werden. Lediglich die relativ hohe Ausfallquote von Meßaufnehmern müßte noch gesenkt werden, damit das Experiment von der Meßtechnik her befriedigt.

3.5 Mol 12

Diese Bestrahlungseinrichtung ist der des Mol 5B-Projektes sehr ähnlich. In Abbildung 13 ist ein Prinzipbild gegeben.

Die Probe ist die gleiche wie bei FR2/73d, der Versuch dient also gleichfalls der Kriechraten-Erforschung an Kernbrennstoffen.

Der erste Bestrahlungseinsatz ist im September 1970 in Betrieb gegangen.

3.6 Siloe-Bestrahlung

Eine weitere Bestrahlungseinrichtung ist in Abbildung 14 im Prinzip dargestellt.

Meßwertaufnehmer ist wieder der Hohlraum-Resonator. Es wird die Durchmesseränderung an Brennstoffpins unter Neutronenstrahlung bei äußeren Druckkräften untersucht.

Die Probe wird von 2 Halbschalen umschlossen, die mittels zweier Taster mit der Oberfläche der Probe in Verbindung stehen. Die Taster werden durch eine kleine Kraft - die Reaktionskraft des Differenzdruckes über den Faltenbalg am Hohlraum, also ähnlich wie zuvor beschrieben - auf den Prüfling gedrückt.

Bei Erweiterung des Probendurchmessers klaffen die Halbschalen etwas auseinander. Die radiale Bewegung wird dann durch ein Hebelsystem in eine axiale umgeformt, die dann in üblicher Weise mit dem Resonanz-Hohlraum-Verfahren gemessen wird.

Im Siloe-Reaktor in Grenoble ist eine Probe-Bestrahlung durchgeführt worden, bei der die Vorrichtung einige Tage zur vollen Zufriedenheit gearbeitet hat.

Nach einigen Modifikationen ist mit Fortführung der Probebestrahlung im Herbst 1970 zu rechnen.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß nach einem umfassenden Literaturstudium und nach Kontakten mit anderen Forschungseinrichtungen keine weiteren, für in pile-Messungen tauglichen Meßmethoden neben den 3 beschriebenen bekannt geworden sind. Daß alle 3 Methoden in GfK-Kriechkapseln verwendet werden, liegt an der chronologischen Entwicklung der Bestrahlungstechnik. So war das Solex-Verfahren (gas-gauging) das erste auf dem Markt verfügbare Meßsystem für in pile-Kriechmessungen. Das Hohlraum Resonanzverfahren hat dem gegenüber eine weit höhere Genauigkeit und kann automatisiert werden, war jedoch erst später käuflich zu erwerben.

Die induktiven Aufnehmer haben schließlich den Vorteil der sehr kleinen Abmessungen, so daß in einem Bestrahlungseinsatz mehrere Proben untergebracht werden können. Wenn auch die Genauigkeit nicht so gut ist, so gab doch die Möglichkeit der Vielzahl von Meßergebnissen den Ausschlag, diese Aufnehmer einzusetzen bzw. ihre Tauglichkeit eingehend zu prüfen.

Literatur

- [1] "Notes on Linear Variable Differential Transformers"
Technical Bulletin AA-1b der Fa.Schaevitz Engineering.
- [2] J.Pefhany:
"Pneumatic Gauges für In-Pile-Measurements"
Nuclear Engineering 1961, p77.
- [3] V.Fidleris, H.N.Isaac, H.P.Köhler:
,
"In-Reactor Creep Mashines"
Atomic Energy of Canada Ltd. 1966.
- [4] J.Pefhany:
"Measurement of Metal Creep under fast Neutron
Irradiation in a Reactor"
AED-Conf. 1962-o89-36.
- [5] V.Fidleres:
"The Zircaloy 2 In-Pile Creep Measurements
at Chalk River"
AED-Conf. 1962-216-64.
- [6] J.Pefhany:
"Measurement of Metal Creep under fast Neutron
Irradiation in a Reactor".
- [7] E.Catling, F.G.Wallace, A.Ingersoll:
"The Development of Tensile Creep Irradiation
Equipment"
AED-Conf. 1966-129-16.
- [8] E.R.W. Jones, W.Munro, W.Jancock:
"The Creep of Aluminium during Neutron Irradiation"
Journal of Nuclear Energy 1954, p76.
- [9] L.J. Chochie, J.J. Holmes, J.C. Tobin:
"In-Reactor Creep Measurements on Zircaloy 2"
ASTM STP 341, 1962.

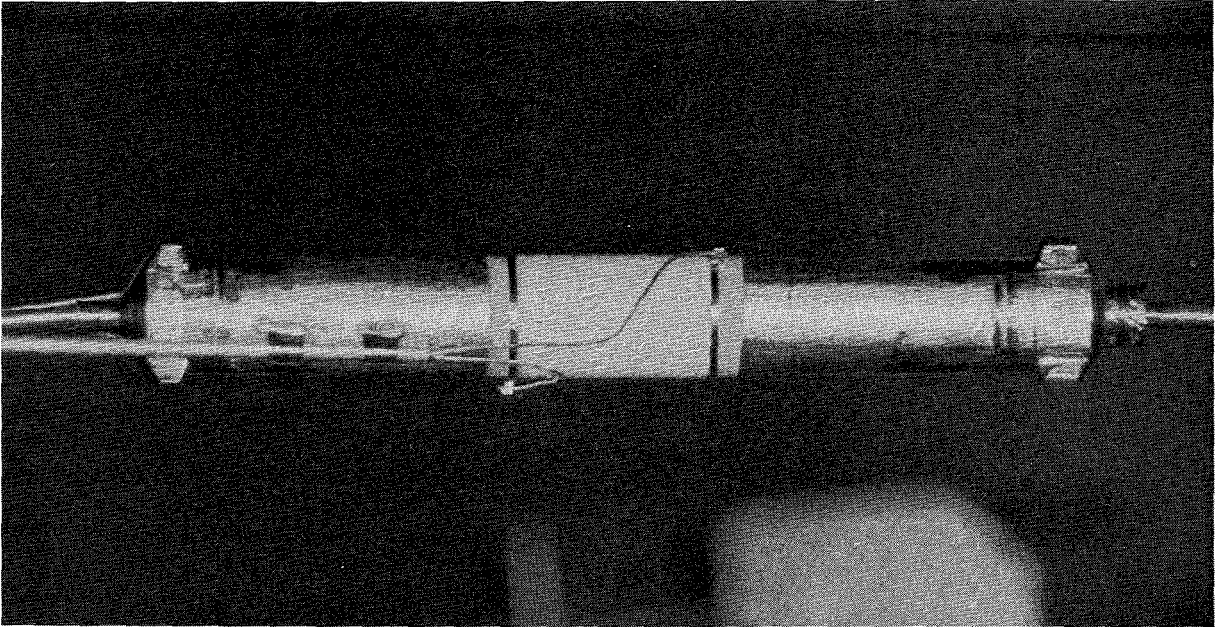


Abb.1: Prüfling (Projekt Mol 2) mit Meßwicklung [Vergrößerung 22:1]

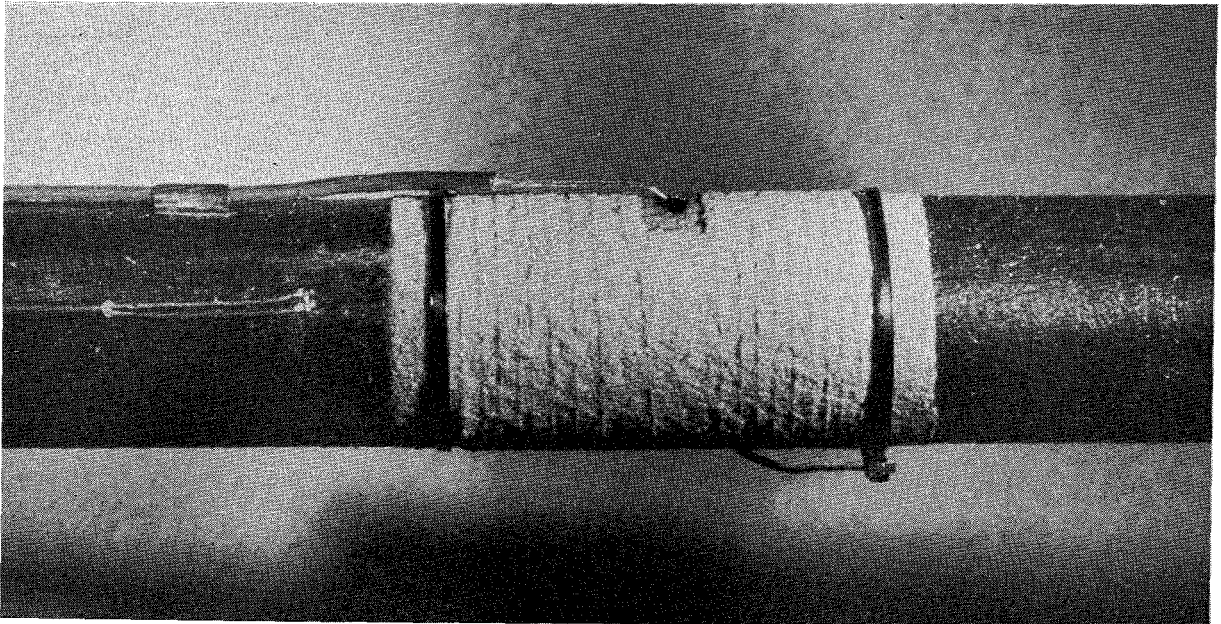


Abb.2: Meßwicklung mit Temperaturmeßstellen [5:1]

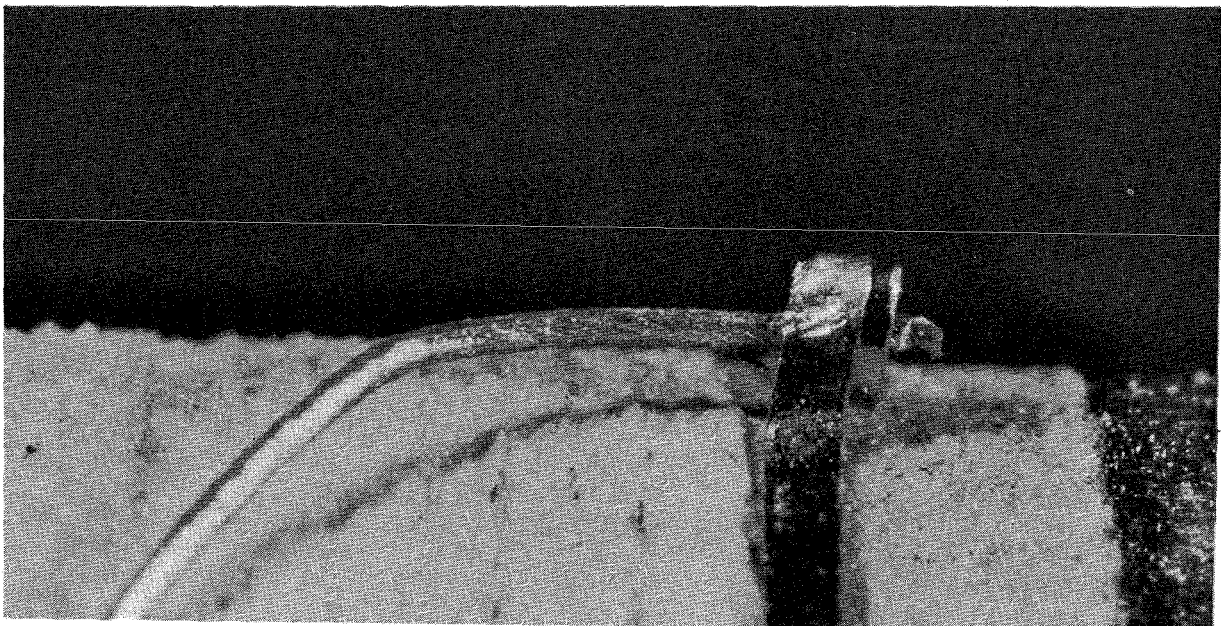


Abb.3: Anschluß der Zuführung [10:1]

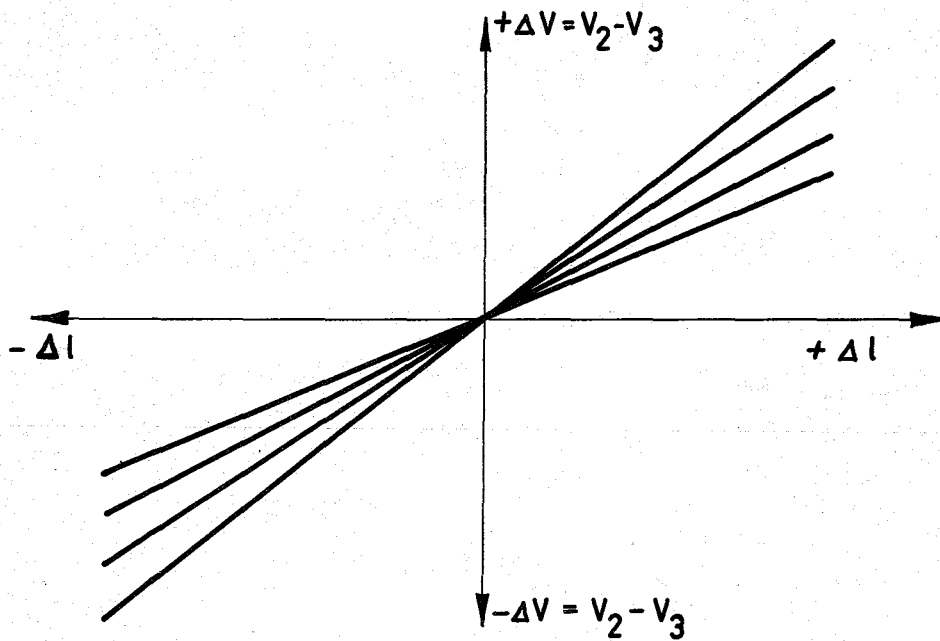
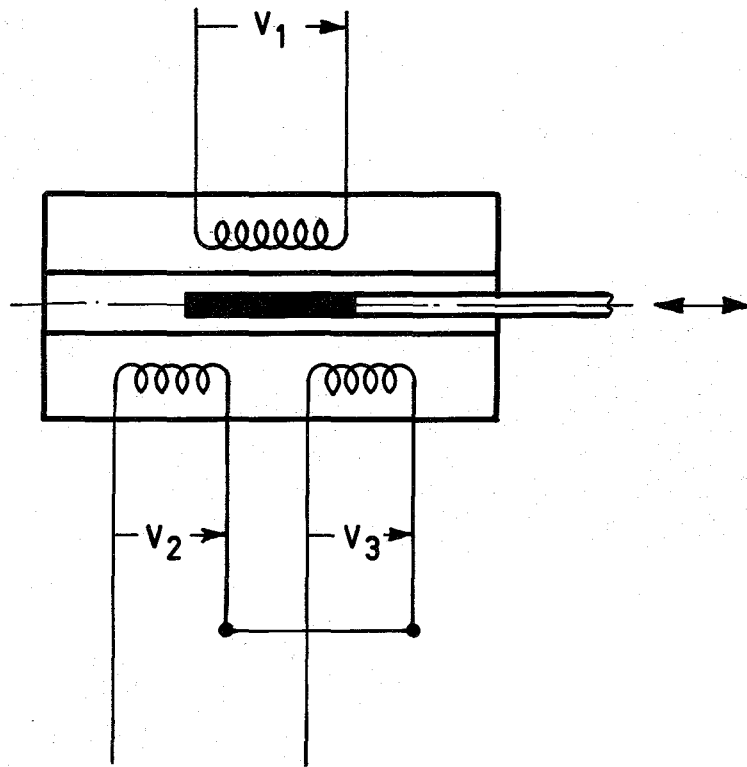


Abb.4: Differentialtrafo

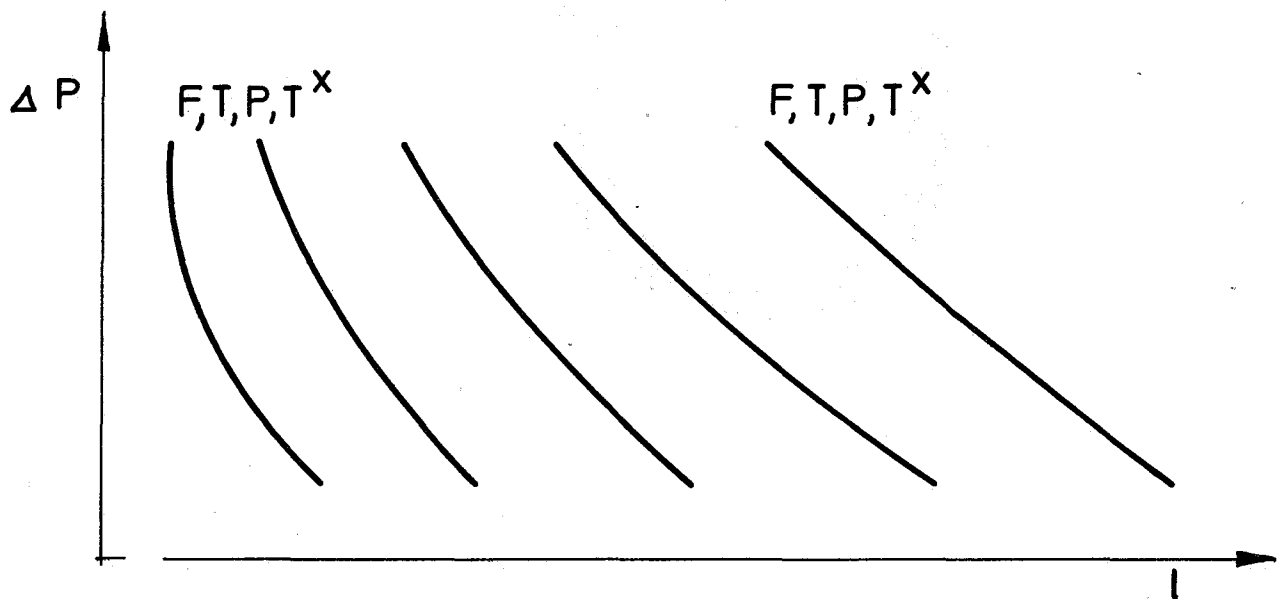
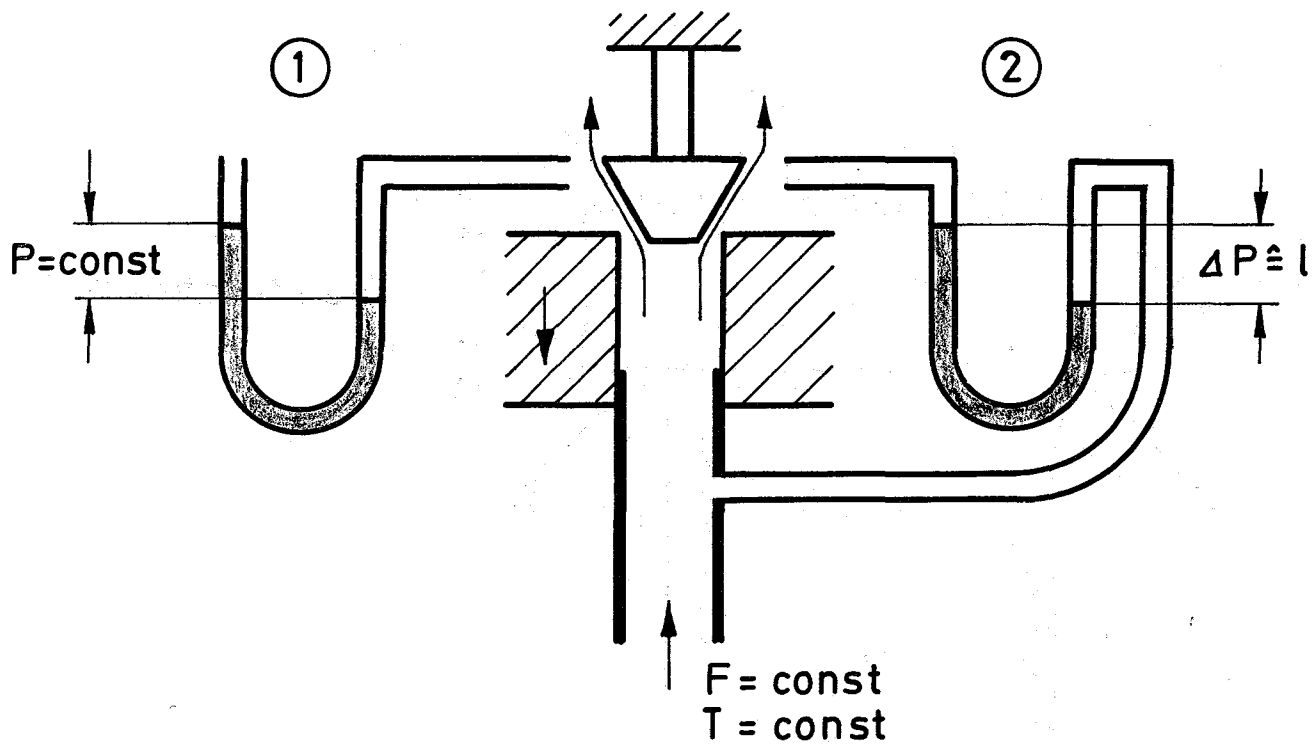


Abb. 5: Solex - Verfahren

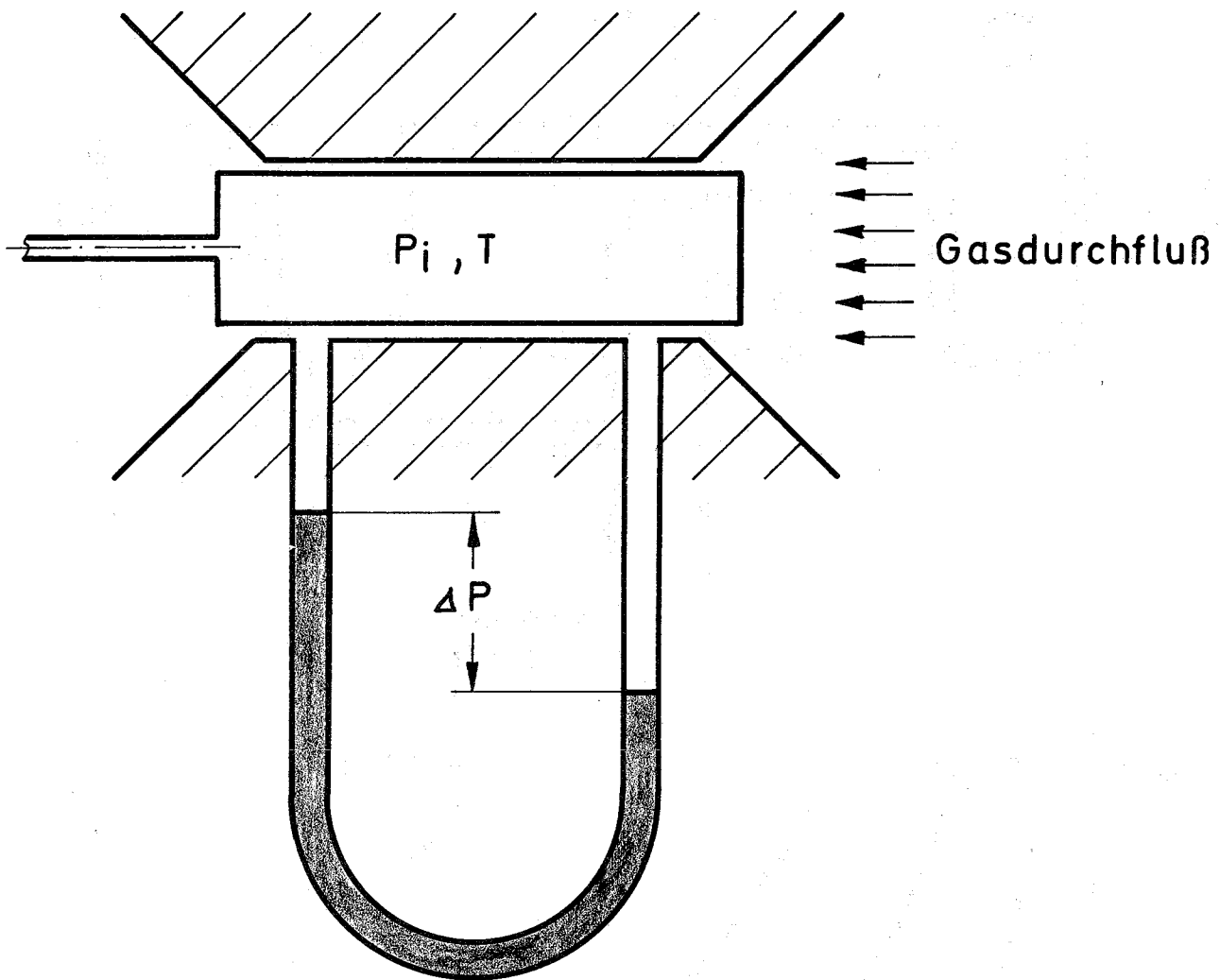


Abb. 6: Rohrprobe, Druckabfall

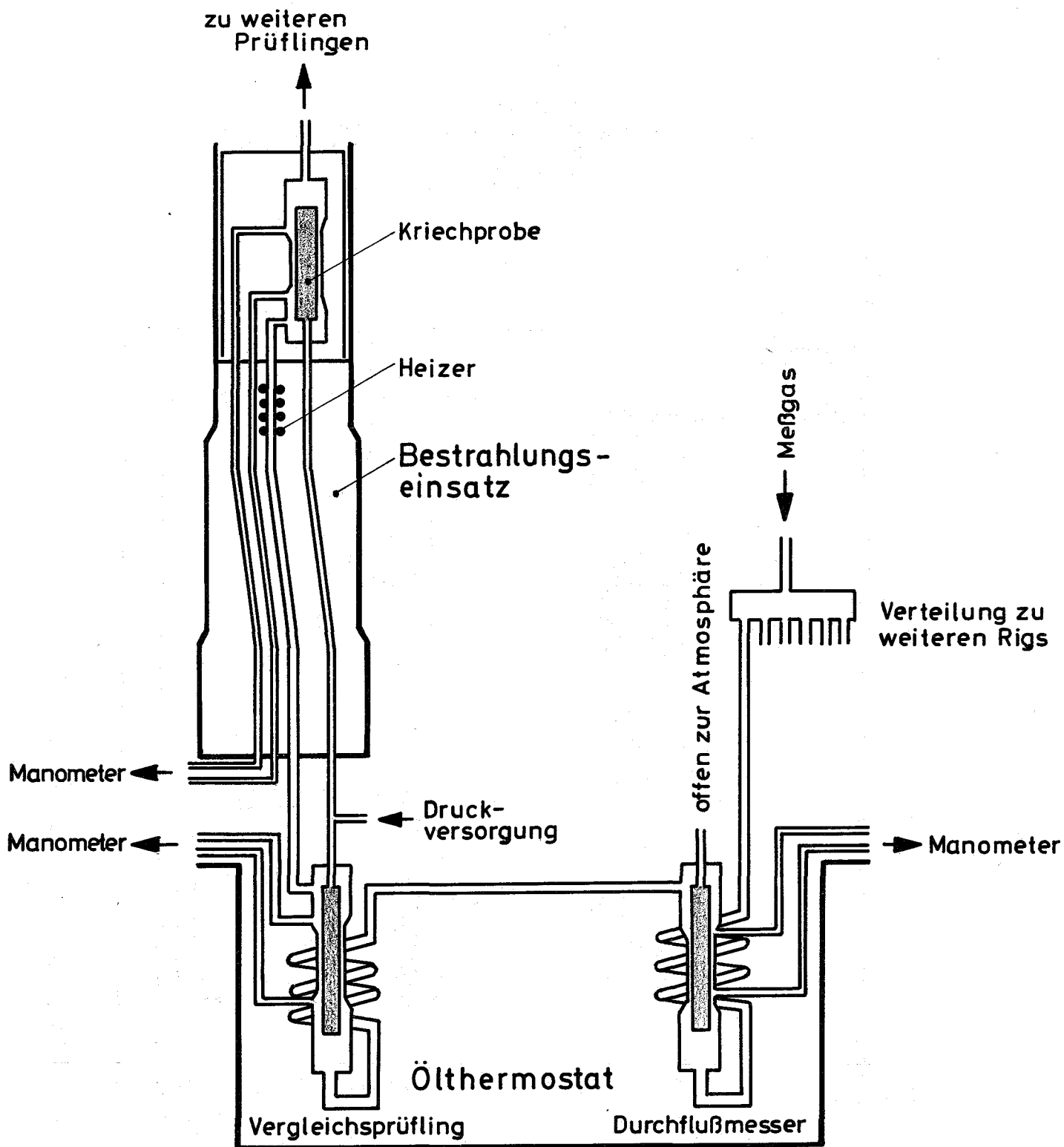


Abb. 7: Kriechmeßvorrichtung für Rohrproben

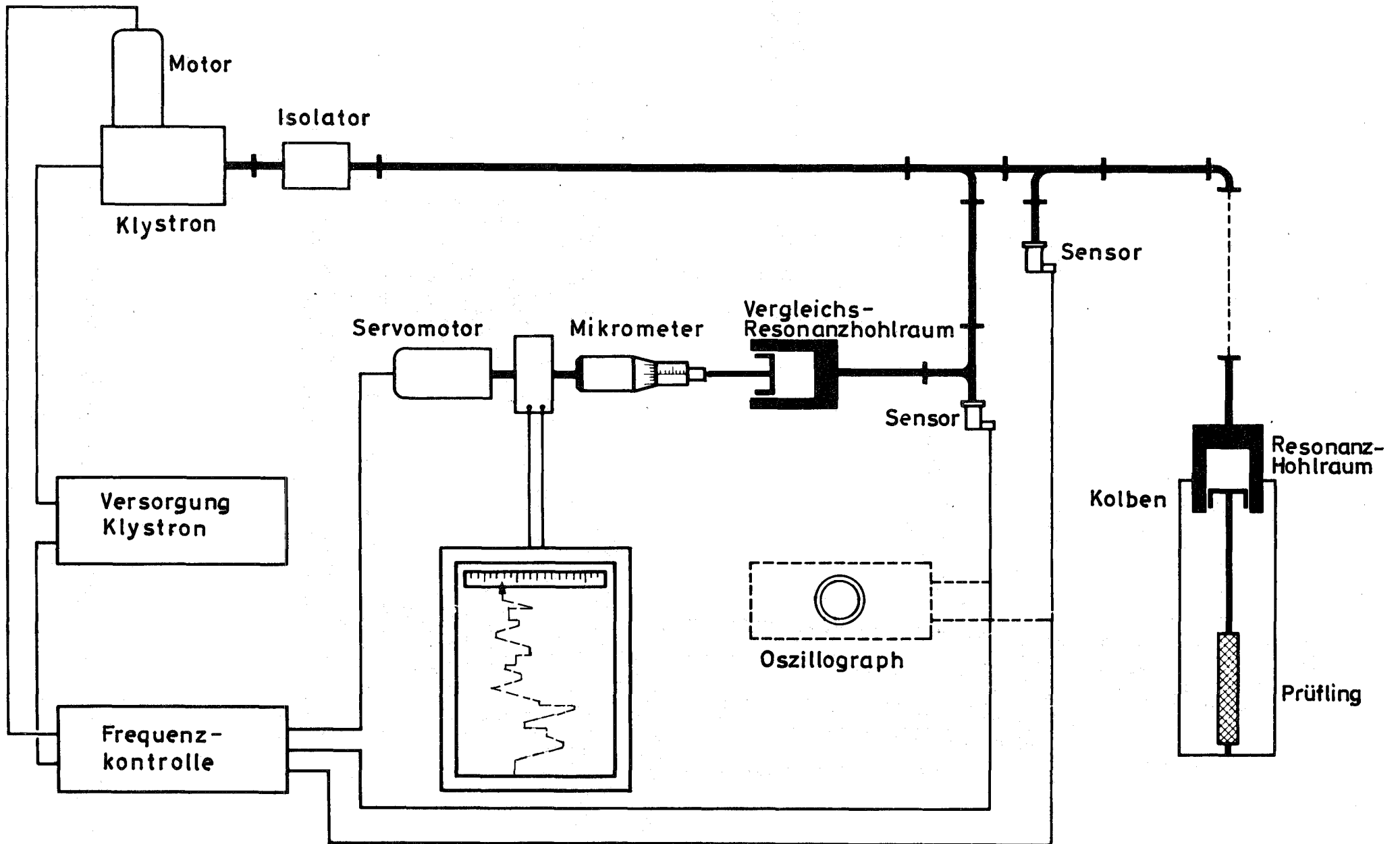


Abb. 8: Hohlraum - Resonanzmessung

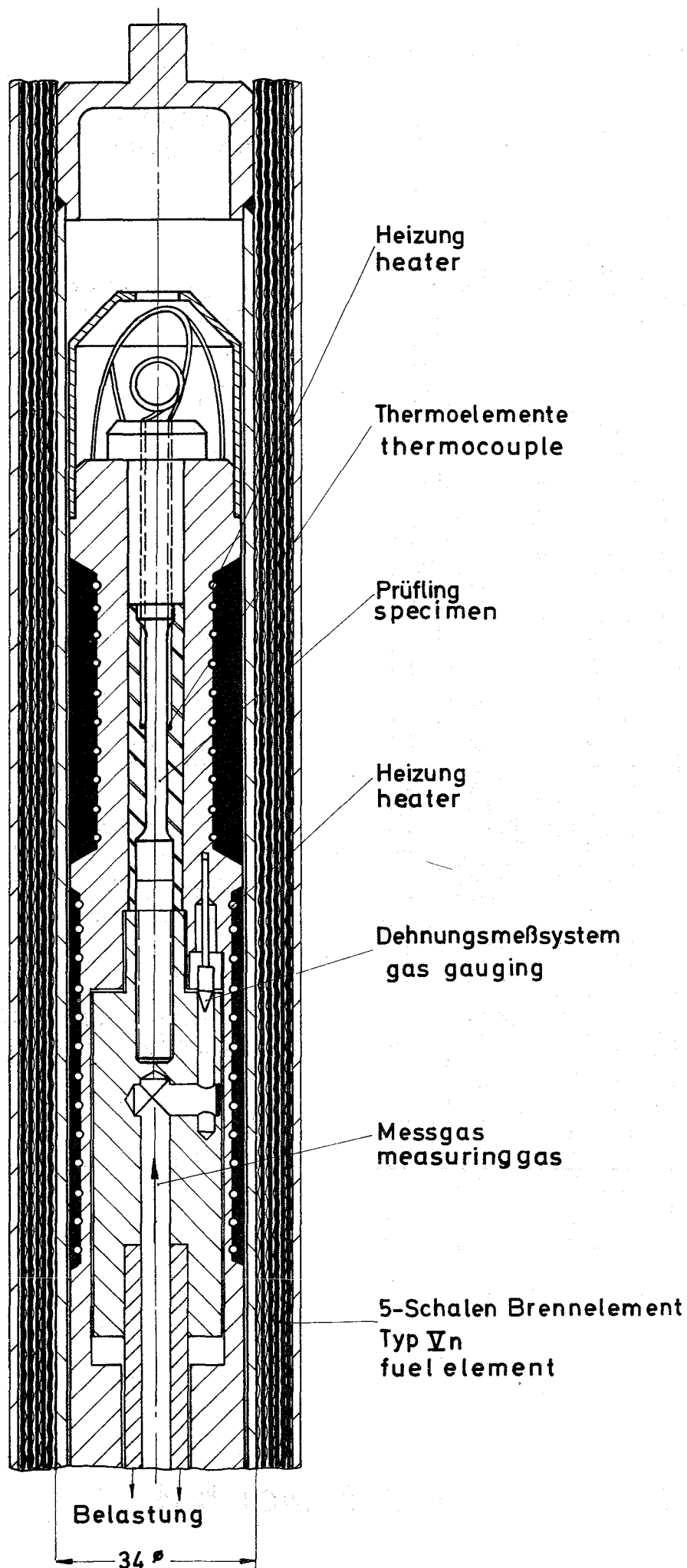


Abb. 9: Einsatz MOL 5A (vereinfacht)

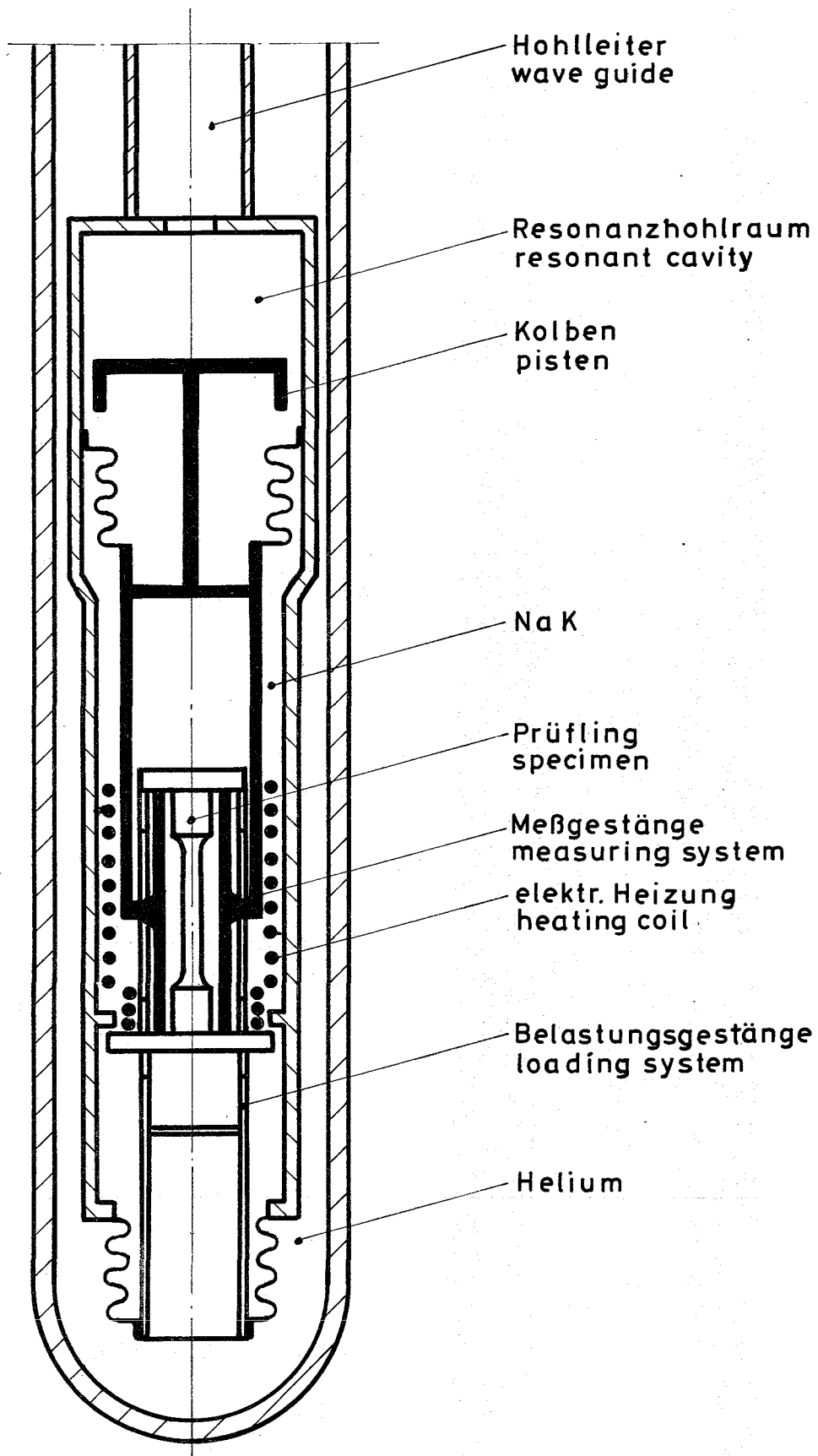


Abb.10 : Einsatz Mol 5 B

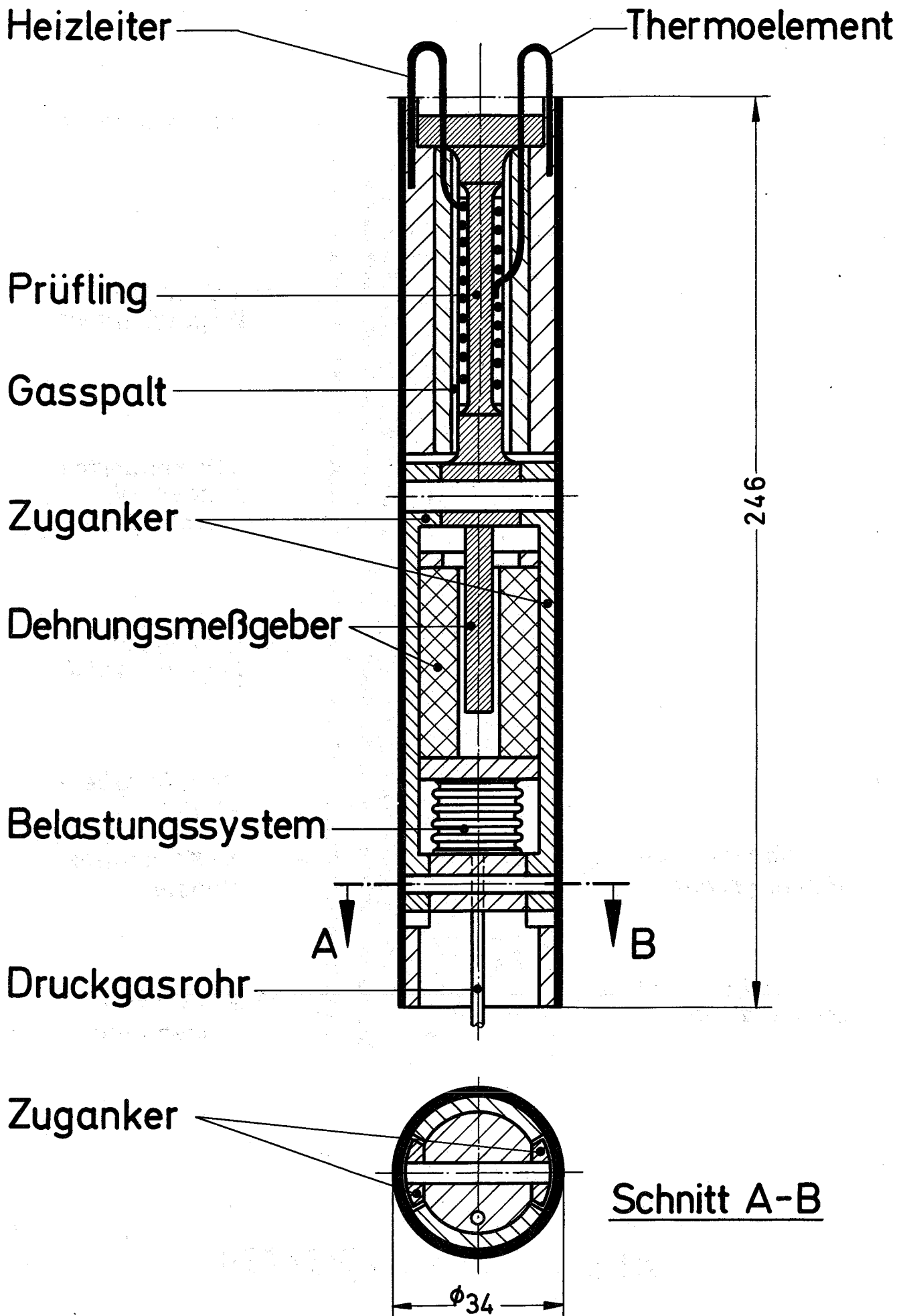


Abb. 11: Kriechvorrichtung, Mol 5 C

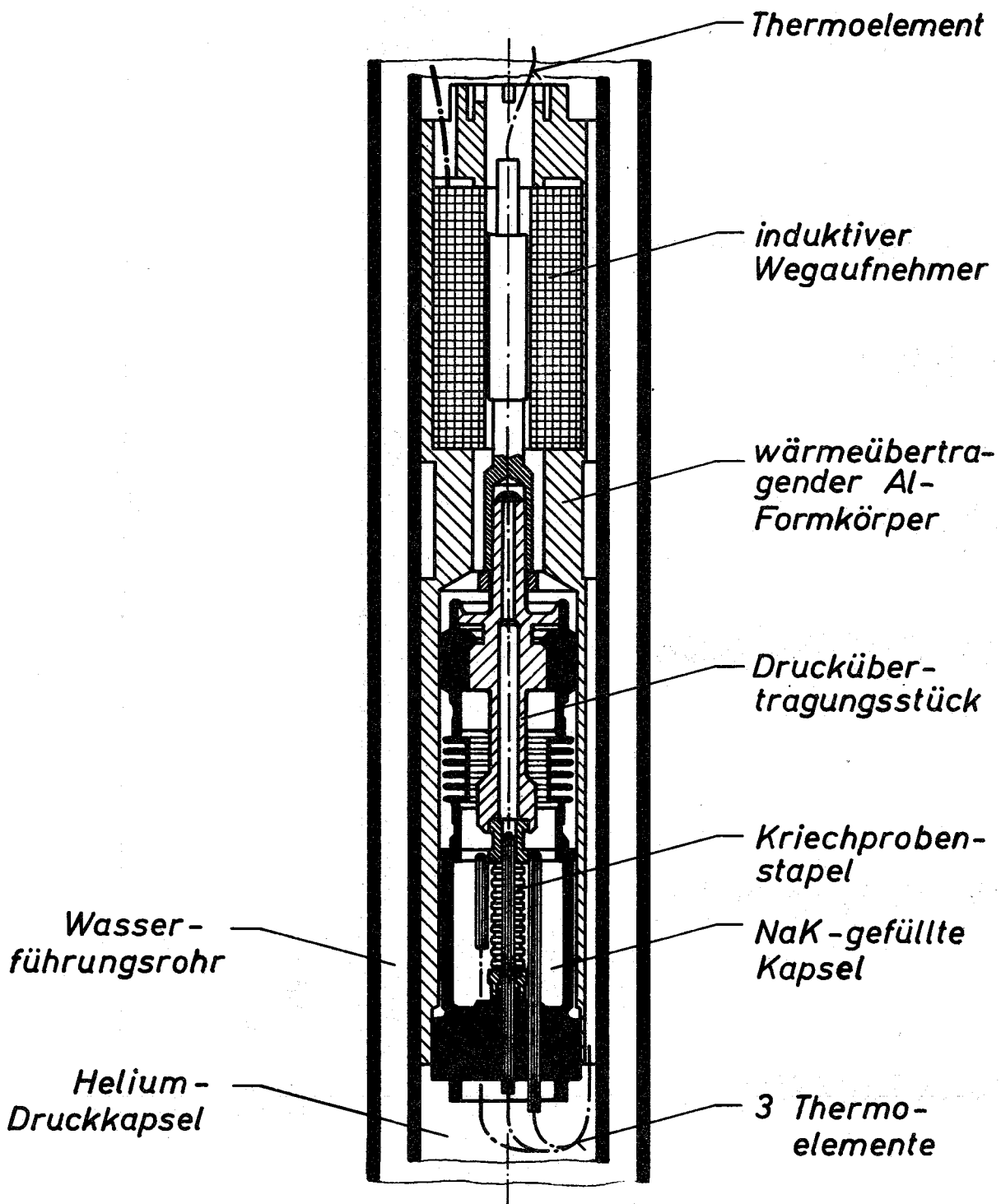


Abb. 12: Einsatz FR2/73d

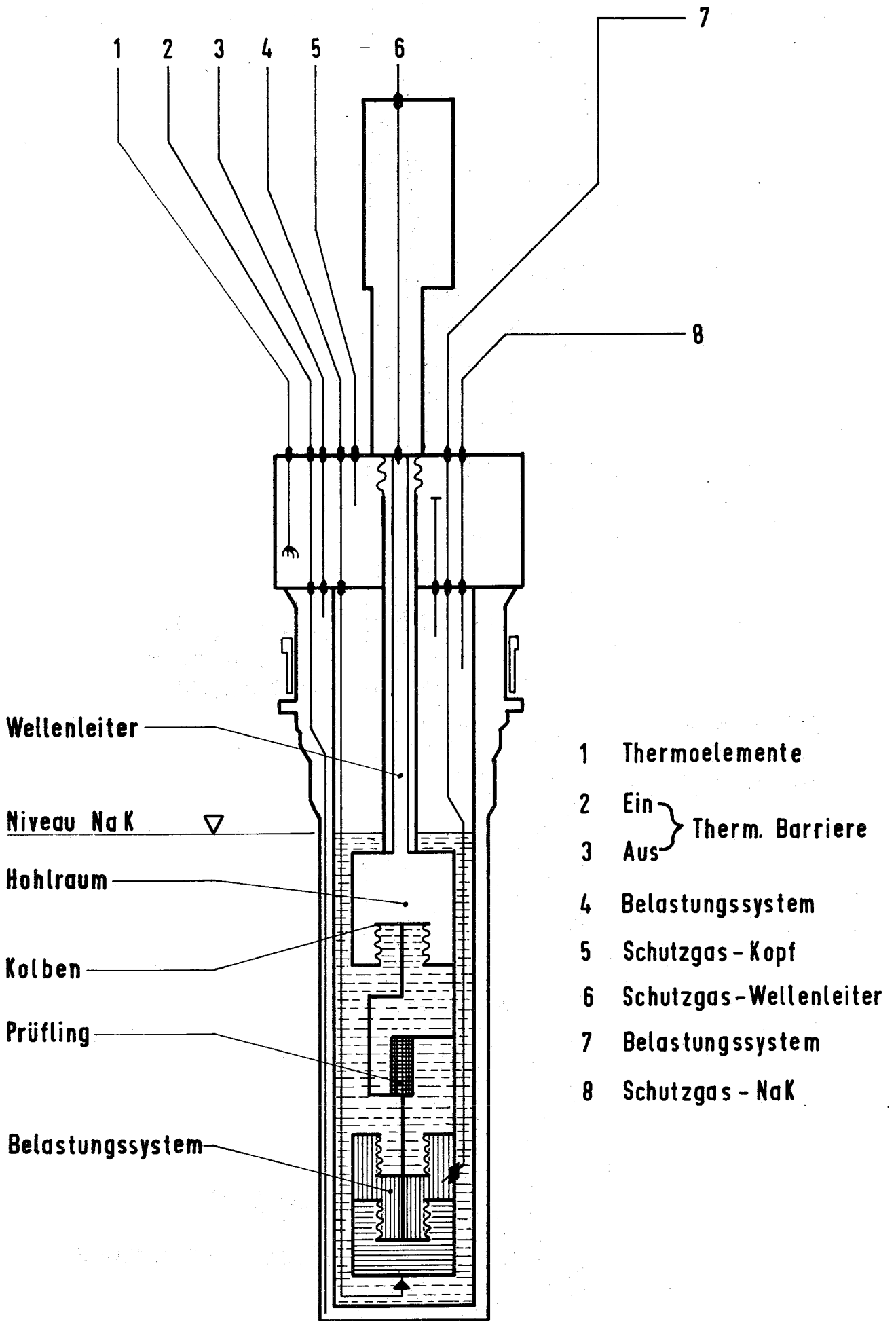
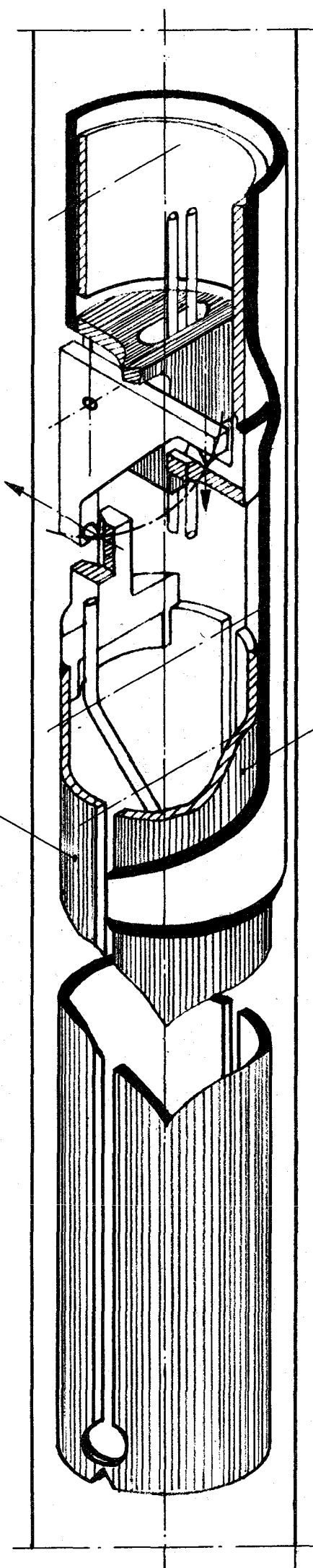


Abb. 13: Einsatz Mol 12



A detailed technical drawing of a silo irradiation system, shown in a vertical cross-section. The silo is a long, cylindrical structure. At the top, there is a complex assembly of components, including a curved upper shell and internal structures. Below this, a piston-like component is shown, which is connected to a lower shell. The lower shell is connected to a large, hollow cylindrical chamber. At the bottom of the silo, there is a vertical pipe with a circular opening at its base. The drawing uses various hatching and line styles to represent different materials and components.

Halbschale
verbunden
mit Kolben

Halbschale
verbunden mit
Hohlraum

Abb. 14:
Silo- Bestrahlung