

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

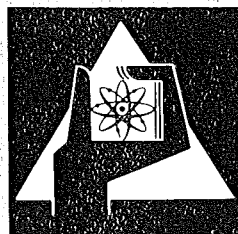
Oktober 1974

KFK 2068

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Hochdruckkapsel zur Bestrahlung von Brennstoff-
Schwellproben im FR2

H.E. Häfner



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2058

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Hochdruckkapsel zur Bestrahlung von
Brennstoff-Schwellproben im FR2

H.E. Häfner

zu dem Bericht haben beigetragen:

K. Philipp

G. Sebold

H. Seitz

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Dieser Bericht steht am Ende einer etwa zweijährigen Entwicklungsphase, in der viele Einzelfragen durch eine Reihe von Vorversuchen geklärt werden mußten. Diese umfangreichen Versuche wurden im wesentlichen von der Versuchsgruppe bei RBT/M durchgeführt, die auch die Montage der Bestrahlungseinsätze übernommen hat.

Wir danken allen beteiligten Mitarbeitern, im besonderen Herrn G.Sebold für viele Anregungen und die wertvolle Zuarbeit.

Zusammenfassung

Seit 1968 sind im IMF für den FR2 u. a. Bestrahlungskapseln entwickelt worden, die es erlauben, Kriech- bzw. Schwellbeträge an Kernbrennstoffen unter verschiedenen Betriebsbedingungen, aber durchweg axialer Belastung, zu messen. Es bestand jedoch nach wie vor der Wunsch, das Brennstoffschwellen unter hydrostatischem Druck zu ermitteln. Entsprechende Überlegungen führten zu einer Hochdruckkapsel, in der die Probenbelastung allseitig durch einen äußeren Gasdruck (max. 500 bar) aufgebracht wird. In dieser Kapsel sollen an kleinen Tablettenstapeln (ca. 6 mm Ø) Brennstoffoberflächentemperaturen zwischen 1000 und 1500°C und Probenbelastungen bis 5 kp/mm² eingestellt werden können. Der Schwellbetrag des Brennstoffs wird bei der Nachuntersuchung in den heißen Zellen durch Dichtebestimmung an den einzelnen Pellets ermittelt.

Dieser Bericht enthält, neben der technischen Beschreibung des Bestrahlungseinsatzes, hauptsächlich die thermodynamische und festigkeitsmäßige Auslegung und Sicherheitsbetrachtungen. Selbstverständlich kommt den Festigkeitsbetrachtungen wegen der hohen Innendrucke besondere Bedeutung zu. Es sind deshalb gerade auch diesbezüglich umfangreiche Vorversuche durchgeführt worden.

Mit der Bestrahlung des ersten Kapselversuchseinsatzes wird Anfang 1975 gerechnet.

High-pressure Capsules for Irradiation of Fuel Swelling Samples in FR2

Summary

Since 1968 development work of the Institute of Materials and Solid State Research (IMF) has included irradiation capsules for FR2 which allow measurement under various operating conditions, although with axial loading in every case, of the amount of creeping and swelling, respectively, occurring at nuclear fuels. However, the desire persisted of determining fuel swelling under hydrostatic pressure. Considerations resulted in a high-pressure capsule with the load applied on all sides of the sample through an outer gas pressure (max. 500 bar). It is intended to set at small pellet stacks (about 6 mm in diameter) placed in this capsule fuel surface temperatures between 1000 and 1500°C and sample loads up to 5 kp/mm². The amount of swelling of the fuel is detected by assessment of the density of the individual pellets in the post-examination performed in the hot cells.

In addition to the technical description of the irradiation rig, this report indicates above all the thermodynamic and mechanical design as well as safety considerations. Evidently, considerations relating to mechanical strength are of special importance on account of the high inner pressure. For this reason, extensive preliminary studies were carried out in this field.

The irradiation of the first capsule test rig is scheduled for early 1975.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Aufgabenstellung und Allgemeines	1
2. Auswahl eines Kapselkonzeptes	3
3. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes	3
3.1 Allgemeiner Aufbau des KVE	3
3.2 Die Bestrahlungsprobeneinsätze	5
4. Thermodynamische Auslegung der Kapsel	7
5. Festigkeitsbetrachtungen	10
5.1 Druckkapsel	10
5.2 Beanspruchung der sog. Druckhülse	12
5.3 Beanspruchung der Druckkapillaren	13
5.4 Beanspruchung des äußeren Kapselrohres	13
6. Druckeinstellung in den Probenkapseln	14
7. Bisher durchgeführte Vorversuche	15
7.1 Lötversuche	15
7.2 Schweißversuche	15
7.3 Druck- und Berstversuche	16
7.4 Versuche mit Sintermetallfiltern	19
7.5 Allgemeine Erfahrungen mit Prüfungen und Montage der H.D.-Schwellkapsel	20
8. Beschreibung der Montage- und Prüfschritte	20
9. Sicherheitsbetrachtungen	24
9.1 Allgemeines zur Sicherheit	24
9.2 Temperaturmessung	25
9.3 Drucküberwachung	25
9.4 Spaltproduktinventar	26
9.5 Leck der Druckkapsel bzw. im Drucksystem	26
10. Literaturverzeichnis	28

1. Aufgabenstellung und Allgemeines

In der Vergangenheit sind im IMF für den FR2 u.a. Bestrahlungskapseln entwickelt worden, die es erlauben, Kriech- bzw. Schwellbeträge an Kernbrennstoffen unter verschiedenen Betriebsbedingungen, aber durchweg axialer Belastung, zu messen. Mit diesen Kapseln wurden z.T. recht beachtliche Erfolge erzielt. Schwierigkeiten treten aber auf, wenn man für die Fälle, in denen die Kriechgeschwindigkeit des Brennstoffs nicht wesentlich größer ist als seine Schwellgeschwindigkeit, die auf diese Weise erhaltenen Werte für allseitige Belastung umrechnen will, vor allem wegen der schwer erfaßbaren Reibungskräfte zwischen Brennstoff und Hülle. Es besteht deshalb nach wie vor der Wunsch, das Brennstoffschwellen unter hydrostatischem Druck zu ermitteln.

Einleitende Untersuchungen zu einer entsprechenden Kapsel wurden im Frühjahr 1972 angestellt. Sie führten zu einer Hochdruckkapsel (interne Bezeichnung Typ 10), in der die Probenbelastung allseitig durch einen äußeren Gasdruck (max. 500 bar) aufgebracht wird. In dieser Kapsel sollen an kleinen Tablettenstapeln (ca. 6 mm \emptyset) Brennstoffoberflächentemperaturen zwischen 1000 und 1500°C und Probenbelastungen bis 5 kp/mm² eingestellt werden können. Die Proben temperatur ist durch eine geeignete Meßeinrichtung zu messen und kontinuierlich zu registrieren. Die durch Gasdruckeinfüllung eingestellte Probenbelastung soll während des Betriebs durch geeignete Druckmeßgeber überwacht werden. Der Schwellbetrag des Brennstoffs wird bei der Nachuntersuchung in den Heißen Zellen durch Dichtebestimmung an den einzelnen Pellets ermittelt.

Die Bestrahlungskapseln sollen im FR2 vorzugsweise auf Zwischengitterpositionen anstelle von Isotopenkanälen, können aber auch auf BE-Positionen eingesetzt werden. Es wird angestrebt, in einer Kapsel zwei Proben mit den entsprechenden Meßleitungen unterzubringen. Eine Begrenzung ist hierbei durch die 26 elektrischen Kontakte der Standard-Oberteile gegeben.

Seit Ende 1972 sind eine Durchführbarkeitsstudie mit einem Entwurf erstellt und gemeinsam mit RBT/M-V eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt worden. Die Detailkonstruktion und der Bau einer Prototypkapsel sind inzwischen nahezu abgeschlossen. Bei RBT/M-V werden z.Zt. an einer Attrappe Montage- und Prüftechniken erprobt. Mit der Bestrahlung des ersten Kapselversuchseinsatzes wird Anfang 1975 gerechnet. Es ist an die Bestrahlung von jährlich ca. 3 KVE gedacht. Die Betriebsüberwachung kann mit vorhandenen out of pile-Meßeinrichtungen durchgeführt werden.

Die Prototypkapsel soll mit angereichertem UO_2 bei einer Probenleistung von ca. 100 W (5 Pellets je 20 W) erprobt werden. Die weiteren Kapseln sind für Mischkarbid-Brennstoff vorgesehen. Hierbei sind die Probenleistungen geringfügig höher (ca. 120 W). Wegen der massiven Bauweise der Probenkapseln ist es bei diesen geringen Leistungen schwierig, die gewünschten hohen Temperaturen zu erreichen, da relativ viel Wärme axial abfließt. Vorteilhaft wirkt sich allerdings bei dieser massiven Bauweise die relativ hohe Freisetzung von γ -Wärme aus. Die Wärmeleistung durch γ -Heizung einer Probenkapsel beträgt ca. 400 W und ist damit etwa 4-mal höher als die eigentliche Probenleistung. Die Gesamtleistung einer Probenkapsel beträgt also ca. 500 W.

Leider ist es bei dieser Kapselkonstruktion nicht möglich, die Belastungen des Brennstoffs im Betrieb zu verändern; der an einer Probe einmal durch Gaseinfüllung eingestellte Druck kann im Betrieb nicht mehr - bzw. nur im Rahmen der thermischen Dehnungen - verändert werden. Auch eine Temperaturregelung ist nicht vorgesehen. Mit einem KVE können aber immerhin zwei Proben bei verschiedenen Temperaturen und verschiedener Belastung bestrahlt werden.

Bei der Entwicklung dieser Bestrahlungseinrichtung war RBT von Anfang an in sehr starkem Maße durch eine Reihe von begleitenden

Versuchen, vor allem auch im Hinblick auf Fragen der Sicherheit, beteiligt. Der entsprechende Versuchsbericht wird im folgenden noch häufiger zu zitieren sein.

2. Auswahl eines Kapselkonzeptes

Mit /⁻1_7 wurde im Juni 1972 eine Gegenüberstellung von 4 möglichen Kapselvarianten einer sog. H.D.-Schwellkapsel vorgelegt. Es wurde versucht, eine gewisse Bewertung der vorgeschlagenen Konzepte zu finden. Die in der Zwischenzeit angestellten Überlegungen und Versuche ergaben eine Präferenz für die damalige Variante 3, einem Konzept mit Molybdän-Zwischenrohr um den Probenstapel und einem Druck-Kapselrohr aus Edelstahl. Noch vorteilhafter, was das Erreichen der gewünschten hohen Probertemperaturen betrifft, wäre die Variante 4 mit einem Druckkapselrohr aus einer geeigneten hochwarmfesten Sonderlegierung, z.B. Nb-15% W-5% Mo-1%Zr /⁻2_7. Diese Variante ist jedoch nicht so schnell zu verwirklichen wie die Variante 3, weil derartige Legierungen eine Reihe von zusätzlichen Problemen aufwerfen. Sie soll aber weiter im Auge behalten und mit einer geringen Kapazität weiter verfolgt werden, um für den Fall, daß mit der Edelstahlkapsel die oberen Temperaturwerte nicht zu schaffen sind, eine echte Alternative zu haben. Vorläufig sollen im wesentlichen geeignete Materialien beschafft und Löt- bzw. Schweißversuche durchgeführt werden.

3. Beschreibung des Kapselversuchseinsatzes

3.1 Allgemeiner Aufbau des KVE

Der Kapselversuchseinsatz (KVE), der in Abb. 1 schematisch dargestellt ist, setzt sich wie bisher aus drei Haupt-Bau-einheiten zusammen: der Bestrahlungskapsel, dem Oberteil und der Kühlwasserführung. Die relativ leichte Demontierbarkeit gestattet die wiederholte Verwendung des Oberteils, das im wesentlichen zur oberen Core-Abschirmung und zur Übertragung der Meßleitungen dient.

Die eigentliche Bestrahlungskapsel mit einer Länge von ca. 3 m enthält in ihrem unteren Teil im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums zwei sog. Probeneinsätze (siehe Abb. 2). Die thermodynamische Auslegung dieser Probeneinsätze macht in diesem Bereich einen Durchmesser des äußeren Kapselrohres von 38 mm notwendig; die Wanddicke beträgt 2 mm. Oberhalb dieses "aktiven" Bereichs ist die äußere Kapsel auf 32 mm Durchmesser eingezogen, während unterhalb des Kapselkopfes, im Bereich, in dem die beiden Druckgeber untergebracht sind, noch einmal 35 mm erreicht werden. Diese äußere Kapsel 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 Probenkapseln werden mit Thermoelementen und je einem strahlenbeständigen Druckgeber ausgerüstet, der während der Bestrahlung die Druckbelastung der Proben anzeigen soll und auch Auskunft über ein eventuelles Leck im Probeneinsatz oder dessen Leitungssystem geben kann. Für die beiden Druckgeber werden 6 Anschlußkontakte belegt, so daß für Thermoelemente $26 - 6 = 20$ Kontakte an der Steckerdurchführung verbleiben. Es stehen also für beide Proben 10 Thermoelemente zur Verfügung. Es ist daran gedacht, 3 bzw. 4 Thermoelemente in das Innere jeder Probenkapsel zu führen. Zusätzlich sollen zur Kontrolle der Wandtemperatur und des axialen Wärmeabflusses am heißesten Probeneinsatz innerhalb eines KVE zwei bis vier Thermoelemente an entsprechenden Stellen befestigt werden. Bei Temperaturen unterhalb ca. 1100°C werden Chromel/Alumel-Thermoelemente verwendet, und darüber Hochtemperatur-Thermoelemente, voraussichtlich W5Re/W26Re. Über eine Fülleitung von 1,2 mm Außendurchmesser x 0,4 mm Wand, verbunden mit einem Miniatur-Rückschlagventil, wird das Füllgas, z.B. Argon, bei der Endmontage mit einem entsprechenden Druck in das System bzw. den Probeneinsatz eingefüllt (siehe Abschnitt 6 und 8).

Wird z.B. ein Betriebsdruck von 400 ata gefordert, so muß je nach der gewünschten Temperatur (thermische Ausdehnung) der Einfülldruck um 250 ata betragen. Die Gasföulleitung 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.

3.2 Die Bestrahlungsprobeneinsätze (Abb. 3 und 4)

Die beiden Probeneinsätze liegen übereinander knapp unter Coremitte im Bereich des axialen Neutronenflußmaximums und sind über jeweils 8 Distanznocken im äußeren Kapselrohr zentriert. Aus Festigkeitsgründen ist als Material für die innere Druckkapsel der Werkstoff Nr. 1.4988 vorgesehen /27. Der innere Durchmesser der inneren Kapsel ist mit 20 mm festgelegt und die Wanddicke mit mindestens 5 mm und max. 6 mm. Das heißt, der Außendurchmesser der inneren Druckkapsel kann zwischen 30 und 32 mm betragen, je nach der gewünschten Temperatur bzw. Gasspaltbreite (1 bis 2 mm) zwischen Innen- und Außenkapsel. Durch vier Bohrungen im Boden der Druckkapsel sind Tauchrohre aus Wolfram lose hindurchgeführt, die zur Aufnahme von Thermoelementen dienen. Auf dem zentralen Thermoelementschutzrohr (Messung der Brennstoff-Zentraltemperatur) ist der Probenstapel - 5 Brennstoffringe und 6 Ringe aus W - aufgefädelt. Durch diese abwechselnde Stapelung von Brennstoffringen und gut wärmeleitenden Metallringen soll eine gleichmäßige Temperaturverteilung des Probenstapels erreicht und ein Zerbröckeln der Brennstofftabletten vermieden werden. 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 Proben-temperatur kann durch Veränderung des Durchmessers der Zwischenringe (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 kleingehalten.

Die vorgesehenen Hochtemperatur-Thermoelemente haben nur eine Länge von ca. 5 cm und tragen eine sog. Kupplungshülse aus Edelstahl, die die Übergangsstelle auf eine edelstahlummantelte Ausgleichsleitung umgibt. Sofern normale edelstahlummantelte Chromel/Alumel-Thermoelemente verwendet werden, tragen diese an entsprechender Stelle (ca. 5 cm vom Meßende entfernt) eine gleichartige Edelstahlhülse. Diese Edelstahlhülsen sind ihrerseits mit der sog. 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 (Ergan) ausgefüllt. Mit dem oberen Endstopfen der Druckkapsel ist über eine Hülse eine Druckkapillare dicht verschweißt, die weiter oben 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 erlaubt.

In der Anschlußbohrung des oberen Endstopfens ist ein Sintermetallfilterpaket eingebracht, mit dem Brennstoffstaub zurückgehalten werden soll, vor allem, wenn bei der Montage nach dem Einfüllen des Gases infolge eines Defekts der Druck wieder abgelassen werden muß (siehe Abschnitt 7.4). Eine kleine Druckfeder, die im oberen Endstopfen geführt ist, dient zur Niederhalterung des Probenstapels und der Isolierkörper.

Das Molybdän-Zwischenrohr hat bei einer Länge von 3 cm einen Innendurchmesser von 10 mm. Der Außendurchmesser kann je nach der gewünschten Probertemperatur bzw. dem erforderlichen Gasspalt zwischen Druckkapselrohr und Zwischenrohr zwischen mindestens 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.

Für die Fälle, wo der Gasspalt zwischen Außen- und Druckkapsel unter 2,0 mm Breite liegt, sind auf letzterer Längsnuten zur Durchführung der Thermoelemente und Gasleitungen vorhanden.

4. Thermodynamische Auslegung der Kapsel

Bei der thermodynamischen Auslegung der Hochdruck-Schwellkapsel wird zunächst zugrundegelegt, daß im Probenstapel 100 W an Spaltungswärme frei werden (5 Brennstoffpellets zu je 20 W). Hinzu kommt die in den einzelnen Schichten durch Einfang von γ -Quanten frei werdende sog. γ -Wärme von 0,5 W/g im FR2, die bei den relativ großen Massen dieser Kapsel mit insgesamt ca. 500 W also um den Faktor 5 höher ist als die im Brennstoff erzeugte Wärme.

Die max. Wandmittentemperatur des eigentlichen Druckkapselrohrs soll aus Festigkeitsgründen unter 550°C liegen (siehe Abschnitt 5). Damit ergäbe sich ein Gasspalt zwischen innerer Druckkapsel und äußerem Kapselrohr von ca. 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.

Vorläufig wird ein Gasspalt von 1,5 mm gewählt; die dafür errechnete Wandtemperatur liegt unter 350 °C. Die thermodynamische Durchrechnung der Kapsel erfolgte mit dem Fortran-Rechenprogramm "RELAX" /-3_7 mit einem im IMF entwickelten Vorprogramm zur vereinfachten Berechnung der Eingabedaten. Das Programm beruht auf dem Relaxationsverfahren der Thermodynamik zur Lösung der Fourier-Gleichung des Wärmeübergangs für den mehrdimensionalen Fall in beliebigen Körpern.

Die Rechnung geht von folgenden Voraussetzungen aus:

- Die Wärmeübertragung erfolgt radial und axial durch Wärmeleitung und Strahlung
- Die Wärmeleitahlen der verschiedenen Kapselmaterialien sind temperaturabhängig; die Wärmequellichten durch γ -Heizung (W/cm^3) sind nur stoffabhängig

- Da nur rotationssymmetrische Körper zu erfassen sind, werden jeweils die 4 Distanznocken zur Zentrierung auf dem Umfang der Teile durch einen Ring mit entsprechendem Wärmeübergang ersetzt.
- Die Kühlmitteltemperatur soll 60°C betragen und die Wärmeübergangszahl zwischen Kapseloberfläche und Kühlmittel wird nach den bisherigen Berechnungen und Erfahrungen mit früheren Kapseltypen zu $\alpha = 2,0 \text{ W/cm}^2\text{K}$ eingesetzt.
- Zur Berechnung der Wärmestrahlung ist für alle Oberflächen ein Emissionsverhältnis von $\varepsilon = 0,2$ eingesetzt worden 47.

Folgende Parameter wurden in der Berechnung variiert:

- Der Durchmesser der Wolfram-Zwischenplättchen zwischen den Brennstofftabletten mit 6, 7, 8,0, 8,6, 9,2 und 9,6 mm, was Argonspalten um den Probenstapel von 2, 1,5, 1,0, 0,7, 0,4 und 0,2 mm entspricht.
- Der äußere Durchmesser des Molybdän-Zwischenrohres mit 17, 18 und 19 mm, was Argonspalten zwischen Druckkapsel und Zwischenrohr von 1,5, 1,0 und 0,5 mm entspricht. Zuletzt wurde der max. Spalt von 1,5 mm beibehalten.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Abb. 5 bis 7 dargestellt. In Abb. 5 ist die Abhängigkeit der Temperaturen t_Z = Zentraltemperatur und t_{max} = Temperatur des heißesten Brennstoffplättchens) von der Gasspaltbreite (Argon) zwischen W-Plättchen und Mo-Zwischenrohr für 100 bzw. 150 W Brennstoffleistung aufgetragen.

Auf Abb. 6 ist der Temperaturverlauf innerhalb der Druckschwellkapsel für eine max. Brennstoffleistung von 150 W aufgetragen.

Abb. 7 stellt die Abhängigkeit der Proben temperatur von der Brennstoffleistung bei veränderlichem inneren Argonspalt dar.

Das für diese Berechnungen verwendete Rechenprogramm wurde an der seit längerer Zeit erprobten IMF-Schwellkapsel des Typs G getestet. Dennoch sind gewisse Unsicherheiten in den errechneten Temperaturen nicht auszuschließen. Z.B. hängen die Ergebnisse in starkem Maße von den angenommenen Emissionszahlen zur Berechnung des Wärmeübergangs durch Strahlung zwischen den einzelnen Schichten ab. Außerdem sind die Wärmeleitfähigkeiten von Argon bei hohen Drücken und Temperaturen relativ unsicher. Falls die gewünschte Proben temperatur infolge nicht zutreffender Annahmen nicht erreicht werden könnte, so wären nach einer ersten Erprobung folgende Maßnahmen zur Erreichung einer höheren Temperatur denkbar:

- Erhöhung der Wandmittentemperatur der Druckschwellkapsel von jetzt 300°C auf die aus Festigkeitsgründen noch zulässigen 550°C und damit Erhöhung der Proben temperatur um ca. 200°C .
- Erhöhung der spezifischen Probenleistung durch höhere Anreicherung.
- Erhöhung der Probenstapelleistung durch Erhöhung der Brennstoffmenge (Zahl und Abmessung der Pellets und Zwischenplättchen).
- Wahl eines noch schlechter wärmeleitenden Gases als Argon (Xenon, Krypton) in der Druckkapsel.
- Evtl. noch bessere Wärmeisolierung in axialer Richtung.
- Kapselkonzept mit einer Nb-Legierung als Material für die Druckkapsel zur Erreichung einer um ca. 400°C höheren Kapselwandtemperatur (siehe Abschnitt 2 und /-2_7).

5. Festigkeitsbetrachtungen

Im folgenden werden die besonders beanspruchten Teile einer genaueren Festigkeitsbetrachtung unterzogen.

5.1 Druckkapsel

Wegen der hohen Innendrucke liegt bei der festigkeitsmäßigen Beurteilung des Experiments der Schwerpunkt auf der eigentlichen Probenkapsel, die im Betrieb eine bestimmte Temperatur nicht überschreiten darf. Eine ausführlichere Analyse dieser Problematik wurde in [2] durchgeführt.

Neben der mechanischen Beanspruchung durch Innendruck ist auch die Beanspruchung durch thermische Spannungen infolge des von innen nach außen gerichteten Wärmestromes in Betracht zu ziehen. Für diese Berechnungen werden die ungünstigsten Bedingungen zugrundegelegt, die nur in seltenen Fällen zusammenreffen werden:

- Der max. Kapselinnendruck betrage 500 bar, entsprechend $5,0 \text{ kp/mm}^2$.
- Die max. Probenleistung betrage 150 W.
- Daraus errechnet sich für eine max. Wandstärke von 6 mm eine Temperaturdifferenz von max. 17°C .
- Da auf ihrer Oberfläche max. 1 mm tiefe Längsnuten eingefräst sind, verbleibt für die Berechnung der Druckbeanspruchung nur eine effektive Wanddicke von min. 5 mm.
- Die mittlere Wandtemperatur der Druckkapsel betrage max. 550°C .

Mechanische Belastung der Druckkapsel

Die vom Innendruck herrührende Vergleichsspannung berechnet sich nach dem AD-Merkblatt B 10 an der Innenfaser zu

$$\sigma_{vi} = \frac{p(d_a+s)}{230 \cdot s} \text{ kp/mm}^2$$

und an der Außenfaser zu

$$\sigma_{va} = \frac{p(d_a - 3s)}{230 \cdot s} \quad \text{kp/mm}^2$$

p ist in bar einzusetzen.

In Abb. 8 sind die Werte σ_{vi} und σ_{va} für die gegebene effektive Wanddicke $s=5$ mm bei $d_{a,eff}=30$ mm für verschiedene Drücke p aufgetragen.

Thermische Spannungen in der Druckkapsel

Die tangentialen Wärmespannungen an der Innenfaser errechnen sich zu

$$\sigma_{ti} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2(1-\nu)} \cdot f_i \quad \text{kp/mm}^2$$

und entsprechend an der Außenfaser

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

Für den Werkstoff 1.4988 sind für eine mittlere Temperatur von 550°C folgende Werte einzusetzen:

Elastizitätsmodul $E = 16500 \text{ kp/mm}^2$

linearer therm. Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Querdehnzahl (Poisson-Zahl) $\nu = 0,3$

Die Temperaturdifferenz in der Wand betrage $\Delta t = 17 \text{ K}$.

Die geometrischen Korrekturfaktoren für Innenfaser und Außenfaser sind

$$f_i = \frac{2r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_i}} = 1,13$$

$$f_a = \frac{2r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_i}} = f_i - 2 = -0,87$$

Somit ergeben sich die Wärmespannungen zu

$$\sigma_{t_i} = 4,0 \text{ kp/mm}^2$$

$$\sigma_{t_a} = -3,1 \text{ kp/mm}^2.$$

Gesamtbeanspruchung der Druckkapsel

Die Gesamtbeanspruchung der Druckkapsel ergibt sich aus der Summe der Spannungen durch Innendruck und den Wärmespannungen. In Abb. 8 sind die Gesamtspannungen jeweils für die Innen- und Außenfaser der Druckschwellkapsel aufgetragen.

Die bei 500 bar max. auftretende Belastung beträgt an der Innenfaser $19,2 \text{ kp/mm}^2$.

In Abb. 9 sind u.a. die Festigkeitswerte für den verwendeten Stahl 1.4988 aufgetragen. Man kann daraus erkennen, daß die maximale Gesamtbeanspruchung deutlich unter der Zeitdehngrenze $\sigma_{1\%/10\ 000\ h} = 22 \text{ kp/mm}^2$ bei der max. Temperatur von $550\ ^\circ\text{C}$ liegt. Die Zeitstandfestigkeit für diese Temperatur beträgt $\sigma_{B/10\ 000\ h} = 34 \text{ kp/mm}^2$. Bei Temperaturen unter $550\ ^\circ\text{C}$ kann auch die Streckgrenze zur Beurteilung der Kapselfestigkeit herangezogen werden; der Wert $\sigma_{0,2}$ liegt ebenfalls über 20 kp/mm^2 .

5.2 Beanspruchung der sog. Druckhülse

Die sog. Druckhülse als unterer Abschluß der Druckkapsel steht unter dem gleichen Innendruck wie die Druckkapsel selbst. Bei gleicher Wanddicke treten also die gleichen Beanspruchungen infolge Innendruck auf. Die Wärmespannungen dagegen sind geringer, weil an dieser Stelle der radiale Wärmestrom vom Brennstoff her fehlt. Auch sind die Temperaturen im Bereich der Druckhülse niedriger. Insgesamt sind die Beanspruchungen der Druckhülse also deutlich harmloser, so daß es hier keiner detaillierten Festigkeitsberechnung bedarf.

5.3 Beanspruchung der Druckkapillaren

Die Druckkapillaren im Drucksystem haben bei einem Außendurchmesser von 1,2 mm eine Wanddicke von 0,4 mm und stehen ebenfalls unter max. 500 bar Innendruck.

Dieser Druck erzeugt eine Spannung von

$$\sigma_p = p \cdot \frac{r_i}{s} = 5 \cdot \frac{0,2}{0,4} = 2,5 \text{ kp/mm}^2$$

Die Betriebstemperatur dieser Kapillaren liegt zum größten Teil knapp über der Kühlmitteltemperatur. Nur auf der kurzen Strecke, auf der die Kapillare des unteren Probeneinsatzes an dem oberen Probeneinsatz vorbeigeführt wird, kann durch Berührung die Temperatur max. 500 °C betragen. Dieser Wert wird für die Beurteilung der Festigkeit zugrundegelegt. Die 0,2% Streckgrenze liegt für den verwendeten Werkstoff 1.4571 und 500 °C bei 13 kp/mm² und damit 5 mal höher als die maximale Spannung.

5.4 Beanspruchung des äußeren Kapselrohres

Nimmt man an, daß sich im ungünstigsten Fall das Gasvolumen beider Schwellprobeneinsätze bei 500 bar durch Lecks in das Volumen der äußeren Kapsel entspannt, so würde sich ein Innendruck unter 50 bar einstellen.

Die am höchsten belastete Stelle des äußeren Kapselrohres liegt im Bereich der Schwellproben, wo zu den Beanspruchungen durch Innendruck noch geringe Wärmespannungen kommen. Als Werkstoff für die äußere Kapsel wird 1.4571 verwendet.

Die Beanspruchung durch Innendruck

ist
$$\sigma_p = p \cdot \frac{r_i}{s} = 0,5 \cdot \frac{17}{2} = 4,25 \text{ kp/mm}^2$$

Für die Wärmespannungen sind einzusetzen:

$$\Delta t = 13\text{K (max. Wert, nur im Bereich der Zentriernocken)}$$

$$t_m = 70 \text{ °C}$$

$$E = 20 \text{ 000 kp/mm}^2$$

$$\alpha = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\nu = 0,3$$

Diese Werte gelten für eine maximale Probenleistung von 150 W. Daraus errechnen sich die Wärmespannungen zu $\sigma_t = 3,15 \text{ kp/mm}^2$.

Die Gesamtbeanspruchung $\sigma_{\text{ges}} = \sigma_p + \sigma_t$ ergibt sich somit zu $7,4 \text{ kp/mm}^2$ und liegt damit bei Betriebstemperatur deutlich unter der Streckgrenze $\sigma_{0,2} \approx 20 \text{ kp/mm}^2$.

6. Druckeinstellung in den Probenkapseln

Der max. Betriebsdruck in der inneren Kapsel, d.h. die Probenbelastung bei Betriebstemperatur soll 500 bar betragen. Dementsprechend ist im kalten Zustand, d.h. bei der Montage auf Raumtemperatur, ein bestimmter Einfülldruck einzubringen. Es ist nun relativ schwierig, diesen genau zu ermitteln, da das Totvolumen im Drucksystem, z.B. des Druckgebers, und auch die Temperaturen in den einzelnen Bereichen ungenau bekannt sind; es beträgt max. 15 Ncm^3 . Man kann nun abschätzen, daß der Druck durch thermische Ausdehnung je nach Kapseltemperatur und Geometrie im Betrieb um den Faktor 1,5 bis 2 gegenüber dem Einfülldruck ansteigt. Schon beim Einbau in den Reaktor mit einer Kühlwassertemperatur von knapp 60°C steigt der Innendruck um 13%. Als Füllgas ist für die innere Kapsel aus thermodynamischen Gründen Argon vorgesehen.

Für die beiden ersten Proben in der ersten Kapsel, die mit 500 bzw. 300 bar belastet werden sollen, wird der Faktor 2 als Druckanstieg zugrundegelegt. Der Einfülldruck beträgt also 250 bzw. 150 bar. Es ist möglich, daß der Solldruck nicht ganz erreicht wird; das ist vom Experimentator her gesehen auch nicht erforderlich. Mit den Ergebnissen der ersten Kapsel ist dann voraussichtlich für die zweite der Belastungsdruck schon genauer festzulegen.

7. Bisher durchgeführte Vorversuche

Wie schon mehrfach betont, sind eine Reihe von Vorversuchen zusammen mit RBT/M-V durchgeführt worden, die in /-5_7 beschrieben wurden. Hier sollen im wesentlichen kurz die Ergebnisse der Versuche zusammengefaßt und aufgetretene Schwierigkeiten aufgezeigt werden.

7.1 Lötversuche

Verschiedene Vorversuche bezüglich einiger Lötverbindungen haben schon in einem frühen Stadium zu konstruktiven Änderungen geführt, so daß nur noch eine Lötverbindung in der Konstruktion verblieben ist: die druckfeste und gasdichte Einlötlung der Thermoelementkupplungshülsen aus Werkstoff 1.4571 in die sog. Druckhülse aus Werkstoff 1.4988. Diese Induktionslötung mit Microbraze 30 unter Vakuum bereitet keine besonderen Schwierigkeiten.

7.2 Schweißversuche

In der Konstruktion werden drei Schweißarten angewandt: das WIG-Schweißen, das Plasma-Schweißen und das Elektronenstrahl-Schweißen. Für den größten Teil der erforderlichen Schweißnähte zwischen Teilen aus dem Werkstoff 1.4571 wird das WIG-Schweißverfahren eingesetzt. Das Plasmaschweißen wird zur Verbindung dünnwandiger Teile eingesetzt, wie z.B. zur Einschweißung der Kapillar-Röhrchen in die sog. Kupplungshülsen.

Für die drei Rundnähte an der eigentlichen dickwandigen Druckkapsel aus dem Werkstoff 1.4988 wird das Elektronenstrahl-Schweißen angewandt. Da hierbei gewisse Schwierigkeiten aufgetreten sind, wurde dazu eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Die Elektronenstrahl-Schweißung ergab in allen Fällen gleichmäßige Nahtformen und ein homogenes, feinkörniges Gefüge, doch sind in einigen Fällen Mikrorisse (max. 0,2 mm lang) in der Schweißzone aufgetreten. Solche Mikrorisse haben jedoch bei keinem der Berstversuche unter realistischen Bedingungen zu

einer Undichtheit geführt. Optimierungsversuche hinsichtlich des Röntgens dieser Schweißnähte mit Dickenausgleich haben ergeben, daß auch bei der vorliegenden Geometrie und Wanddicke (max. 6 mm) kritische Fehler hinreichend gut erkennbar sind. Kleinere, d.h. durch Röntgen nicht erkennbare Schweißnahtfehler haben aber nie zu einem Defekt geführt.

7.3 Druck- und Berstversuche

Die Berstversuche wurden unter extremen Bedingungen durchgeführt, um gewissermaßen die Grenzen der Belastbarkeit der Kapsel bzw. "schwache Stellen" in der Konstruktion aufzuzeigen.

In einer ersten Versuchsreihe wurden - noch im Sinne einer Materialauswahl - Kapselattrappen mit Originalabmessungen (außer bei Versuch 4) aus den Werkstoffen 1.4571, 1.4988, einer Niob1%Zr-Legierung und einer 80 Nb-17W-3,5Hf-Legierung einem Berstversuch unterzogen. Dieser Versuch sollte zunächst zeigen, welches Material unter den gegebenen Belastungen die höchsten Temperaturen zuläßt. Dabei wurden andere Gesichtspunkte, wie z.B. die Schweißbarkeit, außer Acht gelassen.

Alle 5 Probenkapseln wurden unter einem Innendruck von 600 bar (1,2-facher max. Betriebsdruck) im Ausgangszustand langsam bis zum Bersten hochgeheizt.

Versuch	Kapselmaterial	Bersttemperatur
1	1.4571	800 °C
2	1.4988	840 °C
3	Nb-1%Zr	1050 °C
4	80 Nb-17W-3,5Hf	bei 1200 °C noch nicht geborsten
5	80 Nb-17W-3,5Hf	

Alle Probenkapseln waren in der Höhe des Brennstoffprobenstapels ringförmig induktiv aufgeheizt worden und hatten demzufolge über ihre Länge ein "natürliches" axiales Temperaturprofil, so daß die Schweißnähte auf ca. 100°C niedrigerer Temperatur lagen. Die ersten 3 Kapseln sind im Bereich höchster Temperatur, also in Probenmitte und nicht an den Schweißnähten geborsten. Ein vorheriger Anstieg der Leckrate war nicht zu verzeichnen. Die Kapseln 4 und 5 sind überhaupt nicht geborsten.

Thermodynamische Berechnungen hatten in der Zwischenzeit gezeigt, daß bei dem hohen Anteil an γ -Wärme entlang der Druckkapsel eine ziemlich gleichmäßige Temperatur herrscht, die Schweißnähte also nicht auf nennenswert niedrigerer Temperatur liegen würden als die Kapselmitte. Ein 6. Versuch mit dem inzwischen ausgewählten Stahl 1.4988 berücksichtigte in etwa diese Kenntnis. Die Kapsel wurde wieder bei 1,2-fachem Nenndruck langsam aufgeheizt, doch jetzt bei etwa konstanter Temperatur über die Kapsellänge, wobei das Temperaturmaximum an der Schweißnaht lag. Die Kapsel ist schließlich bei einer Temperatur von rund 1000°C an der Schweißnaht undicht geworden; der Innendruck war infolge thermischer Ausdehnung des Füllgases auf 725 bar angestiegen.

Nun muß man natürlich klar sagen, daß dieser Versuch im Sinne eines Härtetests insofern unter völlig unrealistischen Bedingungen abgelaufen war, als Stähle dieser Art bei Temperaturen oberhalb 900°C sehr starke Grobkornbildung aufweisen und entsprechend verspröden. Es war also völlig klar, daß die Kapsel spätestens bei 1000°C reißen mußte, wobei es relativ bedeutungslos ist, daß es gerade an der Schweißnaht passierte. Bei Versuchen des RCN / 6 7 im Rahmen von Sicherheitsexperimenten an dünnwandigen Hüllrohren wurde deutlich, daß die Festigkeit der austenitischen Stähle bei Temperaturen von 950, 1000 und 1050°C jeweils deutlich abnimmt ($\sigma_{1050}/\sigma_{950}$ 1:3). Für den in Frage kommenden Stahl 1.4988 sind die ermittelten Werte in Abb. 10 aufgetragen. Aus dem Diagramm ist auch zu erkennen, wie stark die Standzeit bei solch hohen Temperaturen eingeht. Nach 600 min bleibt z.B. nur noch $1/3$ der Festigkeitswerte nach 20 min erhalten.

Ein 7. Berstversuch wurde mit einer Probenkapsel aus dem Werkstoff 1.4988 durchgeführt, die im Gegensatz zu den anderen Kapseln nicht Elektronenstrahl-, sondern WIG-geschweißt war. Dabei zeigte sich klar, daß die für das WIG-Schweißen erforderliche Konstruktion des Schweißnahtbereiches bereits bei deutlich geringeren Belastungen (ca. 600 bar, 600°C) zum Aufbeulen neigt als die Konstruktion für die Elektronenstrahl-Schweißung. Die Kapsel ist schließlich bei 600 bar und 800°C geborsten.

Ein 8. Berstversuch wurde mit einer Probenkapsel aus 1.4988 durchgeführt, deren Einzelteile vor dem Elektronenstrahl-Schweißen

versuchsweise geglüht ($800^{\circ}\text{C}/24$ Stunden) worden war. Die Belastung betrug mit 700 bar das 1,4-fache des max. Betriebsdruckes. Die Temperatur an der Kapsel-schweißnaht war zu 650°C festgelegt (20% über der max. Betriebstemperatur); sie dürfte jedoch im Versuch eher über 700°C gelegen haben. Der Versuch bestätigte eine starke Zeitabhängigkeit der Festigkeit des Materials bei hohen Temperaturen: Nach ca. 30 Minuten begann die Kapsel sich langsam aufzubeulen und nach ca. 40 min. ist sie sanft geborsten, wobei sich das Material wie bei allen anderen Versuchen als sehr zäh erwies.

Im Anschluß an diese ersten orientierenden Berstversuche unter extremen Bedingungen wurden noch einige mehr realistische Druckversuche durchgeführt.

An einer 9., ebenfalls geglühten Testkapsel wurden zunächst 550°C bei 550 bar eingestellt, was der max. Betriebstemperatur und dem 1,1-fachen Betriebsdruck entspricht. Da sich nach einer Stunde keine Veränderung der Kapsel zeigte, wurde der Druck bei gleicher Temperatur auf das 1,4-fache des Nenndruckes, also 700 bar erhöht (Versuch 10). Auch unter diesen Bedingungen zeigte die Kapsel nach einer Stunde keine Veränderungen. Die gleiche Kapsel wurde dann auf 600°C hochgefahren, wobei der Druck auf ca. 625 bar abgesenkt wurde (Versuch 11). Diese Druckbelastung in Höhe vom 1,25-fachen des Nenndrucks entspricht in etwa der maximalen Gesamtbelastung durch Innendruck zuzüglich der Wärmespannungen. Durch die um ca. 10% höhere Temperatur sollten in etwa Langzeiteffekte ausgeglichen werden. Diese Kapsel zeigte bei diesen wehr wirklichkeitsnahen Bedingungen nach 7 Stunden Standzeit noch keinerlei Veränderung; auch nach einer weiteren Erhöhung der Temperatur auf 650°C - bei gleichem Druck - blieb die Kapsel unverändert dicht und maßhaltig (Versuch 12). Nach einer Abkühlung wurde diese Kapsel noch einmal auf 550 bar und 700°C gebracht (Versuch 13). Jedoch erst eine weitere Verschärfung der Bedingungen auf 600 bzw. 625 bar und 700°C (Versuch 14 und 15) brachte an der Kapsel eine bleibende Dehnung von 0,1 %. Bis zu diesem Zeitpunkt war diese 9. Testkapsel insgesamt ca. 18 h belastet. Diese Aufweitung entspricht übrigens auch den errechneten Werten.

Mit einer 10. Testkapsel, die ebenfalls aus dem Werkstoff 1.4988 gefertigt, jedoch nicht gegläht war, wurden folgende Parameter eingestellt:

Versuch 16	550 bar 575 °C
Versuch 17	625 bar 575 °C
Versuch 18	750 bar 600 °C

Die Versuche mit dieser Kapsel liefen über ca. 3,5 Stunden. Die Kapsel hatte danach eine bleibende Dehnung von 0,2% erfahren, was wieder in etwa den rechnerischen Werten entspricht.

Die Ergebnisse aller Druck- bzw. Berstversuche sind in Abb. 11 zusammengefaßt. Daraus ist zu ersehen, bei welcher extremen Bedingungen Kapseln geborsten sind (Versuch 1 bis 8) und wie hart auch noch die Bedingungen der sog. Druckversuche waren (Versuche 9 bis 18), gemessen an den tatsächlichen Betriebsbedingungen.

7.4 Versuche mit Sintermetallfiltern

Für den Fall, daß nach der Gaseinspeisung in das Drucksystem aus irgend einem Grund bei der Montage der Druck noch einmal abgelassen werden muß, könnte aus dem Kapselinnern feinsten Brennstoffstaub (Pu!) mit ins Freie gelangen. Deshalb ist im oberen Endstopfen der Druckkapsel ein Paket von Sintermetall- und Papierfiltern vorgesehen, dessen Abscheidegrad bei Versuchen unter realistischen Bedingungen im Plutoniumlabor ermittelt wurde. Konstruktive Maßnahmen verhindern, daß die Papierfilter bei Schweißungen verbrennen. Selbst beim Entspannen hoher Innendrucke über das Filterpaket konnte dahinter keine Kontamination festgestellt werden.

7.5 Allgemeine Erfahrungen mit Prüfungen und Montage der H.D.-Schwellkapsel

Schon im Rahmen der Vorversuche wurde eine Reihe von einzelnen Komponenten gefertigt, geprüft und montiert. Dabei wurden schon viele wertvolle Erkenntnisse für die eigentliche Kapsel-assemblierung gesammelt. Da die Montage dieses Kapseltyps jedoch an Schwierigkeit bisherige Kapseltypen übertrifft, wird z.Zt. erstmals eine komplette Attrappe mit allen Original-einheiten vorbereitet, an der alle Fertigungs-, Montage- und Prüfschritte erprobt werden können (siehe Abschnitt 8). Insofern ist zu hoffen, daß bei der Vorbereitung der eigentlichen Bestrahlungseinsätze keine völlig neuen, unerwarteten Schwierigkeiten mehr auftreten.

8. Beschreibung der Montage- und Prüfschritte

Im folgenden wird der Ablauf der Montage sowie der erforderlichen Prüfungen für die HD-Schwellkapsel schrittweise wiedergegeben, wobei zu beachten ist, daß einzelne Arbeitsgänge durchaus zeitlich parallel ablaufen können.

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.
2. Einpassen der Thermoelemente (Teile 49) in die Druckhülse (36).
3. Lötung mittels Microbraze 30 (Teile 36/49) nach besonderem Arbeitsplan.
4. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
5. Einführen des Füllkörpers (39) in die Druckhülse (36).
6. Einpassen der Schutzrohre (47) in den Kapselkörper (35).

7. Elektronenstrahl-Schweißung Kapselkörper/Druckhülse (35/36) nach den in Vorversuchen ermittelten Schweißparametern.
8. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \cong 10^{-7}$ Torr l/s).
9. Einführen auf das mittlere Schutzrohr (47) im Kapselkörper (35):
Hülse (41), Abstandshülse (43), Isolierstück (42), sechs Zwischenplättchen(48) und fünf Brennstoffringe (entsprechend Begleitblatt) im Wechsel, Zwischenrohr (46) auf die äußeren Schutzrohre (47), dann Abstandshülse (43), Formkörper (40) und Druckfeder (45).
10. Aufschiessen des Verschlussstopfens (37) auf den Kapselkörper (35), Elektronenstrahl.
11. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \cong 10^{-7}$ Torr l/s).
12. Plasmaschweißung der Kupplungshülsen (31) mit den Kapillarrohren (32,33, 34, 51).
13. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \cong 10^{-7}$ Torr l/s).
14. Einschweißen der Kapillarleitung (31/32) in die Kopfhülse (38), WIG-Schweißung.
15. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \cong 10^{-7}$ Torr l/s).
16. Einbau des Filterpakets (44) in den Verschlussstopfen (37), Zusammensetzung lt. Protokoll.
17. Einführen der Kopfhülse (38) und Schweißung (37/38), Elektronenstrahl.
18. Dichtheitsprüfung (Druckprüfung 600 bar, Vakuummethode $L \cong 10^{-7}$ Torr l/s).
19. Biegen der Thermoelemente (49) und Befestigung auf dem Kapselkörper (35).

20. Anschweißen der Kapillaren (31/33) und (31/34) an das Dreiwegstück (28), WIG-Schweißung.
21. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
22. Anschweißen der Kapillare (31/33) des Dreiwegstücks (28) an den Ventilkörper (29).
23. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
24. Einbau des Ventileinsatzes (50) in den Ventilkörper (29).
25. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
26. Anschweißen der Kapillare (31/51) an den Ventilkörper-Deckel (29).
27. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
28. Anschweißen der Dreiwegstück-Gruppe an die Kapselkörper-Gruppe (32/31/38).
29. Befestigen der Schwellprobeneinsätze (27) und der anschließenden Baugruppen auf der Montageschiene; Zwischenstück (18) einbauen, Kapillare (32) ausbiegen.
30. Befestigen der Thermoelemente und Kapillaren an den dafür vorgesehenen Stellen der benachbarten Bauteile.
31. Unteres Kabelführungsrohr (20) überschieben und mit Arretierstift (19) sichern.
32. Ventilkörper (29) aus dem Schlitz des Kabelführungsrohres (20) leicht ausbiegen.
33. Schweißung von Kapselrohr (14), Erweiterungsstück (13), Zwischenrohr (11), Zentrierring (12) und Verjüngungsstück (10).
34. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
35. Einschieben des unteren Kabelführungsrohres (20) samt Kapillaren (31/34), Thermoelementen (49) und Schwellprobeneinsätzen (27) in Kapselrohr (14) und Zwischenrohr (11), Tiefe durch Kapselendstopfen (15) bestimmt.

36. Schiebehülse (22) über Thermoelemente (49) und Kapillaren (34) auf das untere Kabelführungsrohr (20) aufsetzen, Ventilkörper (29) aus dem Schlitz des Kabelführungsrohres (20) vorsichtig weiter ausbiegen.
37. Oberes Kabelführungsrohr (24) über die Thermoelemente (49) und die Kapillaren (34) in das untere Kabelführungsrohr (20) einschieben auf etwa 150 mm Länge.
38. Unteren Druckaufnehmer (30) an untere Kapillare (31/34) anschweißen.
39. Schlitzrohr (26) über obere Kapillare (31/34) schieben, als Maß für Abstand vom unteren zum oberen Druckaufnehmer verwenden, ausbiegen, gleichfalls oberen Druckaufnehmer (30) an Kapillare (31/34) anschweißen.
40. Elektrische Anschlüsse des unteren Druckaufnehmers (30) aus oberem Schlitz des Schlitzrohres (26) herausführen, Kabelanschlüsse (52) vergießen mit Araldit-Gießharz.
41. Oberes Kabelführungsrohr (24) in richtige Lage bringen, mit unterem Kabelführungsrohr (20) und Schiebehülse (22) mittels Verbindungsstift (23) verstiften, Schlitzrohr (26) zwischen beiden Druckaufnehmern (30) anordnen, Thermoelemente (49) befestigen, Kabel und Thermoelemente oberhalb des oberen Druckaufnehmers wendeln.
42. Elektrische Funktionsprüfungen der Thermoelemente (49) und der Druckaufnehmer (30), Dichtheitsprüfungen (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
43. Evakuieren der Leitungen und He-Spülungen beider Drucksysteme.
44. Schweißung von Kapselkopf (4) und Verlängerungsrohr (9), WIG-Schweißung; Schraubhülse (7) mit Gewindezapfen (8) aufgeschraubt!
45. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
46. Aufschieben von Verlängerungsrohr und Kapselkopf (9/4) auf Kabel und Thermoelemente, Druckaufnehmer, Schlitzrohr und oberes Kabelführungsrohr bis zur Verbindungsstelle der Kabelführungsrohre (24, 22, 20).

47. Druckbeaufschlagung der Systeme und Dichtheitsprüfungen.
48. Zuschweißen des Ventilkörpers (29), WIG-Schweißung.
49. Dichtheitsprüfung (Vakuummethode, $L \leq 10^{-7}$ Torr l/s).
50. Nachspeisen auf gewünschten Systemdruck und Zuschmelzen der Speiseleitungen.
51. Integrale Dichtheitsprüfung beider Systeme (Vakuummethode, $L \leq 10^{-6}$ Torr l/s).
52. Verschweißen von Verlängerungsrohr (9) und Verjüngungsstück (10), WIG-Schweißung.
53. Verschweißen von Kapselrohr und Kapselendstopfen (14/15), WIG-Schweißung.
54. Anschluß der Kabel und Thermoelemente an Steckergruppe (1, 2, 3).
55. Funktionsprüfungen (Messung der Schleifen- und Isolationswiderstände).
56. Spülung der Kapsel mit Helium, Zuschweißen der Stopfen (5) und (16).
57. Aufschrauben des Strömungskörpers (17, 4), Anbringen der Dichtungsringe (6).

9. Sicherheitsbetrachtungen

9.1 Allgemeines zur Sicherheit

Die Kapselversuchseinsätze mit H.D.-Schwellkapseln sind in ihrem äußeren Aufbau den bereits 130 KVE mit Kapseln der verschiedensten Typen gleich. Es liegt also eine große Erfahrung in der Montage, Instrumentierung, in der Handhabung, in der Kühlung und in der Demontage der KVE in der Heißen Zelle des FR2 vor. Viele Einzelfragen zu diesen Problemen, die in früheren Sicherheitsberichten sehr detailliert behandelt werden mußten, bedürfen deshalb hier keiner besonderen Erörterung mehr. Die wesentlichen neuen Punkte werden im folgenden behandelt.

9.2 Temperaturmessung

Zur Messung der Brennstoff- und Umgebungstemperaturen stehen in jeder Kapsel 10 Thermoelemente, also 5 je Probe, zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.1). Die kontinuierliche Registrierung der Meßwerte (max. ca. 1800°C, kurzzeitig) erfolgt mit den von den früheren Kapselexperimenten her vorhandenen 12 Punktdruckern und Linienschreibern.

Die Wandtemperatur der inneren Druckkapseln liegt im allgemeinen zwischen 300 und 450°C. Sie soll aus Festigkeitsgründen 550°C nicht übersteigen (siehe Abschnitt 5.1). Zur Überwachung dieses Grenzwertes, der weit unter den bei Berstversuchen erreichten Grenzwerten liegt, wird an jeder Probe an entsprechender Stelle ein Chromel/Alumel-Thermoelement angeordnet. Eine Aufschaltung auf das Sicherheitssystem des Reaktors ist aber nicht erforderlich.

9.3 Drucküberwachung

Die durch Gasdruckeinfüllung (max. 500 bar) eingestellte Probenbelastung wird während des Betriebes durch hinreichend strahlenbeständige induktive Druckaufnehmer mit einem Meßbereich bis 700 bar überwacht. Auf diese Weise kann auch ein eventuelles Leck im Probeneinsatz bzw. im Leitungssystem festgestellt werden. Jede Probe ist mit einem Druckgeber ausgerüstet, so daß in jedem KVE 2 Druckgeber unterzubringen sind. Jeder Druckaufnehmer ist auf einen geeigneten Trägerfrequenzverstärker aufgeschaltet, über den der Druckaufnehmer gespeist wird und der das Meßsignal verstärkt. Die Meßwerte werden mit den vorhandenen Schreibern kontinuierlich registriert. Die Druckaufnehmer sind zusammen mit den Trägerfrequenzverstärkern in mehreren Versuchsreihen getestet worden [77]. Bis zu einem Druck von 500 bar ist die größte Abweichung in der Anzeige 0,5%. Für jeden Druckaufnehmer wird nach einem Test die Abhängigkeit des outputs in mV vom Systemdruck auf einem Diagramm aufgetragen.

9.4 Spaltproduktinventar

In der Menge des eingebrachten Brennstoffs und der damit auftretenden Spaltprodukte sind die H.D.-Schwellkapseln am ehesten mit den Kriechkapseln vom Typ 8 vergleichbar. Die Mengen liegen rund 2 Größenordnungen unter anderen Kapselversuchseinsätzen. Bei fünf 1 mm dicken Pellets liegt die Brennstoffmenge gerade bei rund 1 g pro Probe. Wenn wir sicherheitshalber schon eine evtl. spätere Verdoppelung der Brennstoffmenge annehmen und eine Anreicherung von max. 25 % Pu bzw. U 235 beim Prototyp, so kommt man gerade auf 0,5 g spaltbares Material je Probenkapsel bzw. auf 1 g je KVE. Die Gesamt- γ -Aktivität je Probe liegt demnach bei einer hoch angesetzten Spaltleistung von 175 W, unendlich langer Bestrahlungs- und 2,4 h Abklingzeit bei 200 Curie. Die Sättigungsaktivität der flüchtigen Spaltprodukte (55% Edelgase und 45% Halogene) ist nach 30 Tagen Bestrahlungszeit erreicht und beträgt max. 170 Curie je Probe; nach 2,4 h verbleiben noch 70 Curie und nach 10 Tagen noch ca. 6 Curie.

9.5 Leck der Druckkapsel bzw. im Drucksystem

Bei den hohen Systemdrücken von max. 500 bar ist es denkbar, daß die Druckkapsel oder das Leitungssystem im Betrieb undicht werden, obwohl an Hand der Festigkeitsberechnungen (siehe Abschnitt 5) und entsprechender Druckversuche (Abschnitt 7.3) ausreichende Festigkeit nachgewiesen werden konnte. In diesem Fall würde sich das Gasvolumen des Drucksystems (max. 15 Ncm³ je Probenkapsel) in die äußere Kapsel entspannen. Beim Defekt beider Druckkapseln würde dabei der Druck in der äußeren Kapsel noch unter 50 bar bleiben. Wie aus Abschnitt 5.4 zu ersehen ist, bedeutet das keine Gefahr für das äußere Kapselrohr.

Eine Befürchtung könnte nun sein, daß das Drucksystem explosionsartig unter Freisetzung erheblicher kinetischer Energiemengen aufreißt. Diese Bedenken konnten jedoch durch die in Abschnitt 7.3 beschriebenen Berstversuche unter extremen Bedingungen zerstreut werden. In allen Fällen kam es zu völlig harmlosen Rissen, die ein ungefährliches Entspannen des Drucksystems zur

Folge hatten. Dieses durchweg "gutmütige" Berstverhalten ist nicht zuletzt eine Folge der Zähigkeit der austenitischen Stähle, vor allem bei höheren Temperaturen.

Die Druckversuche, die nicht wie die Berstversuche unter extremen Bedingungen gefahren wurden, bestätigen voll den rechnerischen Festigkeitsnachweis der Druckkapsel, wenngleich es sich natürlich um Kurzzeitversuche handelt. Der Zusammenhang zwischen der Kurzzeitfestigkeit und der Zeitstandfestigkeit ist aber bei diesen Stählen und Temperaturen bekannt. Die Versuchsergebnisse auf Abb. 11 zeigen ganz klar, daß die gewählten Betriebsbedingungen der Druckkapseln (max. 500 bar und 550 °C) weit unterhalb des kritischen Bereichs liegen.

Die verschiedentlich bei metallographischen Untersuchungen in den Schweißnähten gefundenen Mikrorisse haben in keinem Fall zu einem Kapseldefekt geführt. Kritische Fehlergrößen können aber auf jeden Fall bei der Röntgenprüfung festgestellt werden.

10. Literaturverzeichnis

- [1] H.E.Häfner:
Unveröffentlichte interne Notiz
- [2] H.E.Häfner, I.Kimmer:
Unveröffentlichte interne Notiz
- [3] S.Malang, K.Rust:
Relax, ein Fortran-Programm zur numerischen Bestimmung von Temperaturfeldern mittels der Relaxationsmethode der Thermodynamik
KFK-Bericht 1053 (Sept. 1969).
- [4] Y.S.Touloukian:
Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials,
TPRC, Purdue University
- [5] G.Sebold, H.Stiefel:
Unveröffentlichte interne Notiz
- [6] W.van Witzenburg, H.Kwast:
Stress rupture tests on fast breeder fuel cladding tubes at temperatures near 1000°C.
RCN-193 (Aug. 1973)
- [7] H.Jochim
Unveröffentlichte interne Notiz.

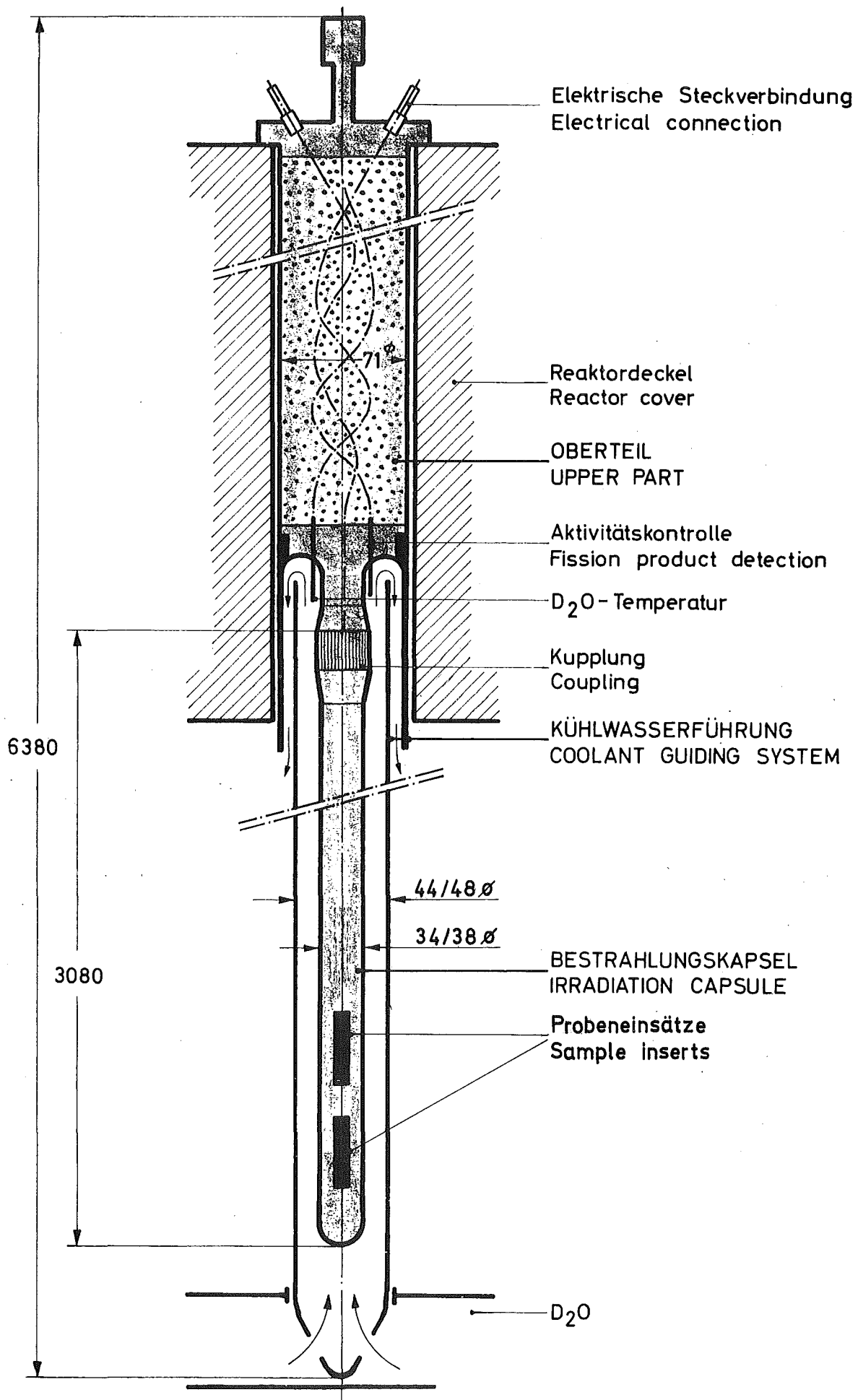


Abb.: 1 Schematische Darstellung der FR 2 - Kapselversuchseinsätze (Typ 10)
Schematic representation of the FR 2 fuel irradiation rigs

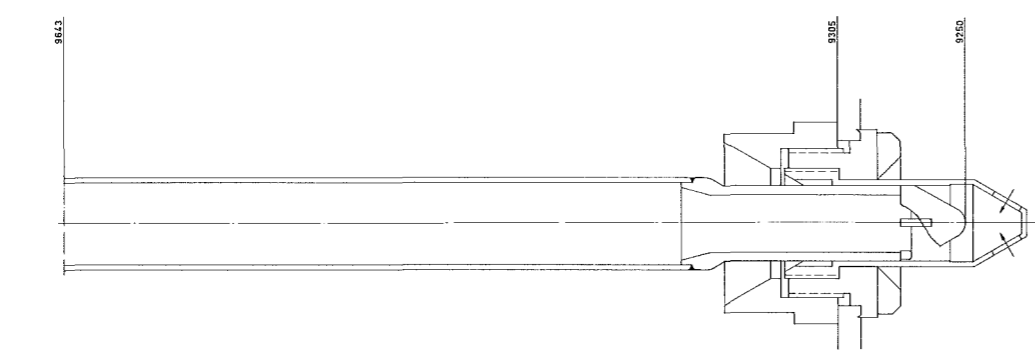
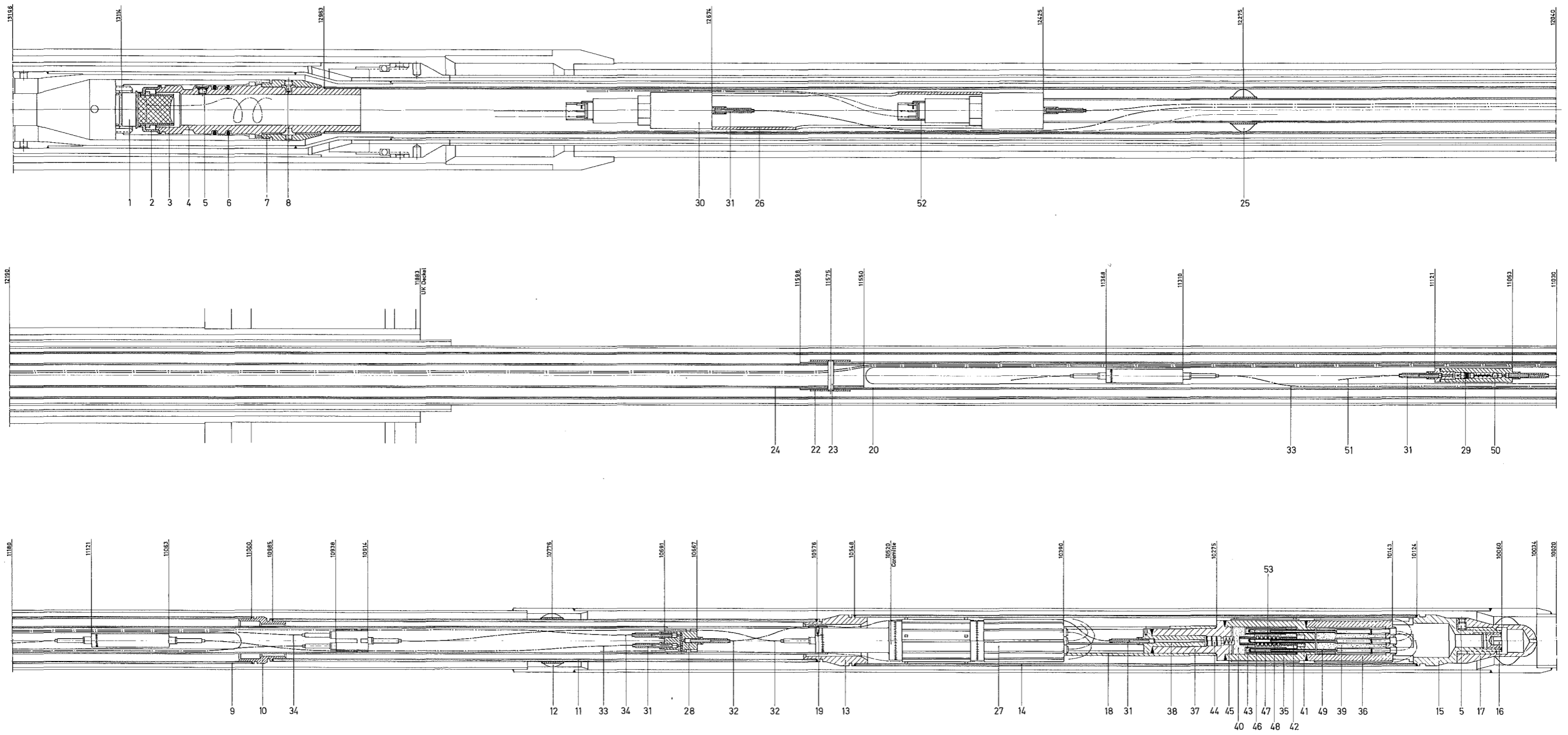


Abb. 2

Pos.	Bezeichnung	Menge	Material	Abmessung	Zeichn. Norm	Abmessung	Zeichn. Norm	Material	Abmessung	Zeichn. Norm	Material	Abmessung	Zeichn. Norm
28	Ventilkörper	2	1.4571	Ø10 x 68	MF-06-3-5191	1.4571	Ø10 x 30	MF-06-3-4796					
28	Dreieckstück	2	1.4571	Ø17 x 30	MF-06-3-4912								
27	Schwellkörperansatz	2	1.4571	Ø28 x 150	MF-06-3-4912								
26	Schwellrohr	1	1.4571	Ø32 x 18 x 20	MF-06-4-5081								
25	Zentrierung	1	1.4571	Ø18 x 18 x 75	MF-06-4-4903								
24	Kohleabfuhrrohr, oben	24	1.4301	Ø4 x 23	MF-06-4-5090								
23	Verbindungsstift	1	1.4571	Ø25 x 150	MF-06-4-5098								
22	Schiebehülse	1	1.4571	—	—								
20	Kohleabfuhrrohr, unten	20	1.4301	Ø20 x 100	MF-06-3-5021								
19	Arrierierstift	19	1.4571	Ø2 x 5	MF-06-4-5096								
18	Zwischenstück	18	1.4571	Ø22 x 115	MF-06-4-5028								
17	Störungskörper	17	1.4571	Ø36 x 60	MF-06-4-5069								
16	Verchlussstopfen	16	1.4571	Ø12 x 15	MF-06-4-5071								
15	Kapselendsopfen	15	1.4571	Ø38 x 83	MF-06-4-4793								
14	Kapselrohr	14	1.4571	Ø39 x 44	MF-06-4-4784								
13	Erweiterungsstück	13	1.4571	Ø38 x 48	MF-06-4-4780								
12	Zentrierhülse	12	1.4571	Ø40 x 32 x 16	MF-06-4-5025								
11	Zwischenrohr	11	1.4571	Ø32 x 40	MF-06-4-4783								
10	Verlängerungsstück	10	1.4571	Ø35 x 25	MF-06-4-4797								
9	Verlängerungsrohr	9	1.4571	Ø35 x 56	MF-06-4-4782								
8	Gewindestopfen	8	1.4571	M8 x 8	MF-06-4-5066								
7	Schraubhülse	7	1.4571	Ø45 x 45	MF-06-4-5083								
6	Rundschraube - Dichtung	6	Comp. 8307	Ø20 x 35	PRP 217								
5	Gewindestopfen	5	1.4571	M8 x 6	MF-06-4-5066								
4	Kapselkopf	4	1.4571	Ø38 x 15	MF-06-4-5065								
3	Veräußerte	3	1.4541	Ø27 x 21 x 25	MF-06-4-5064								
2	Steckerhülse	2	1.4571	Ø36 x 16	MF-06-4-5064								
1	Stiefrohr - Apparatstecker	1	1.4571	Ø28 x 110	MF-06-4-5064								

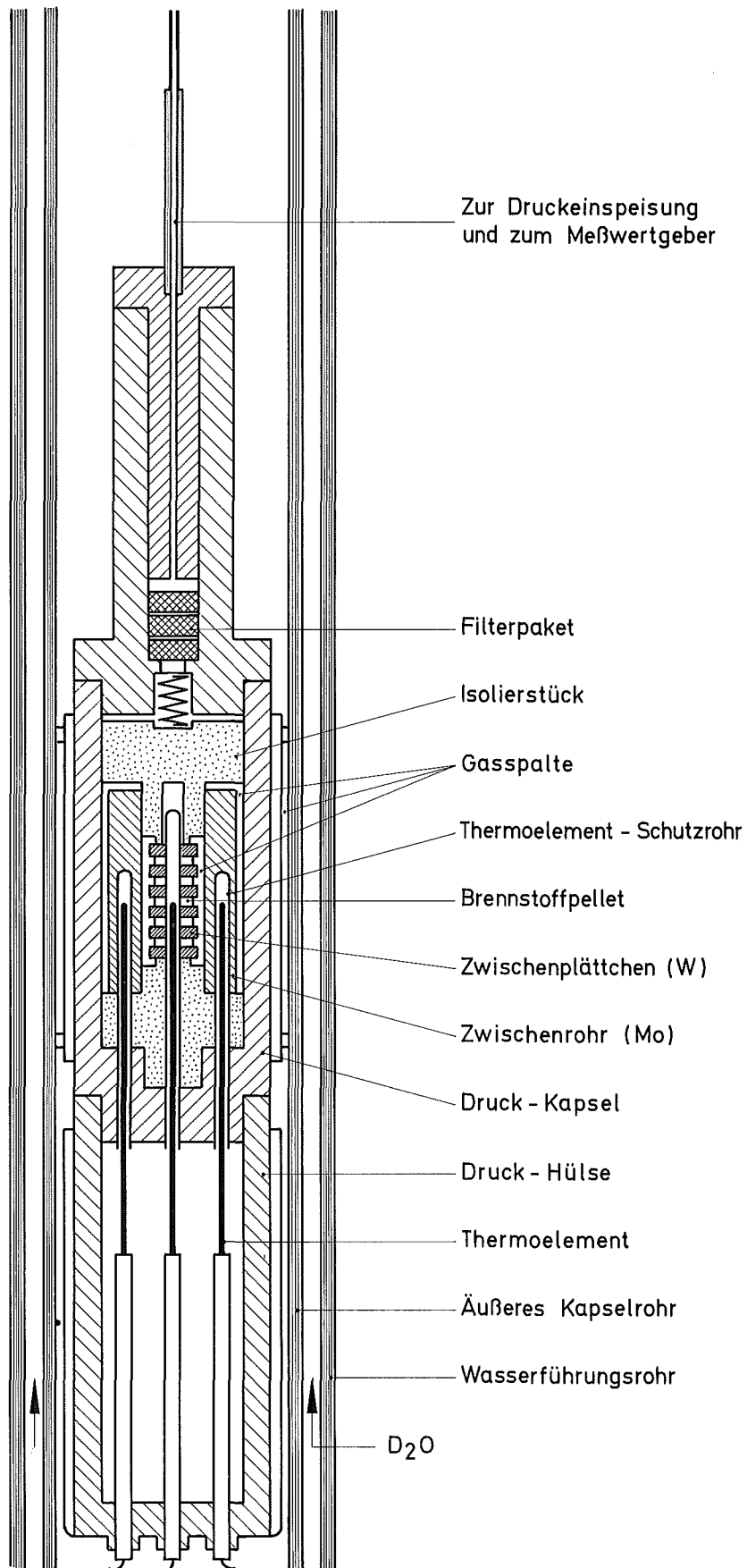


Abb.3: Schematische Darstellung des HD - Schwellprobeneinsatzes

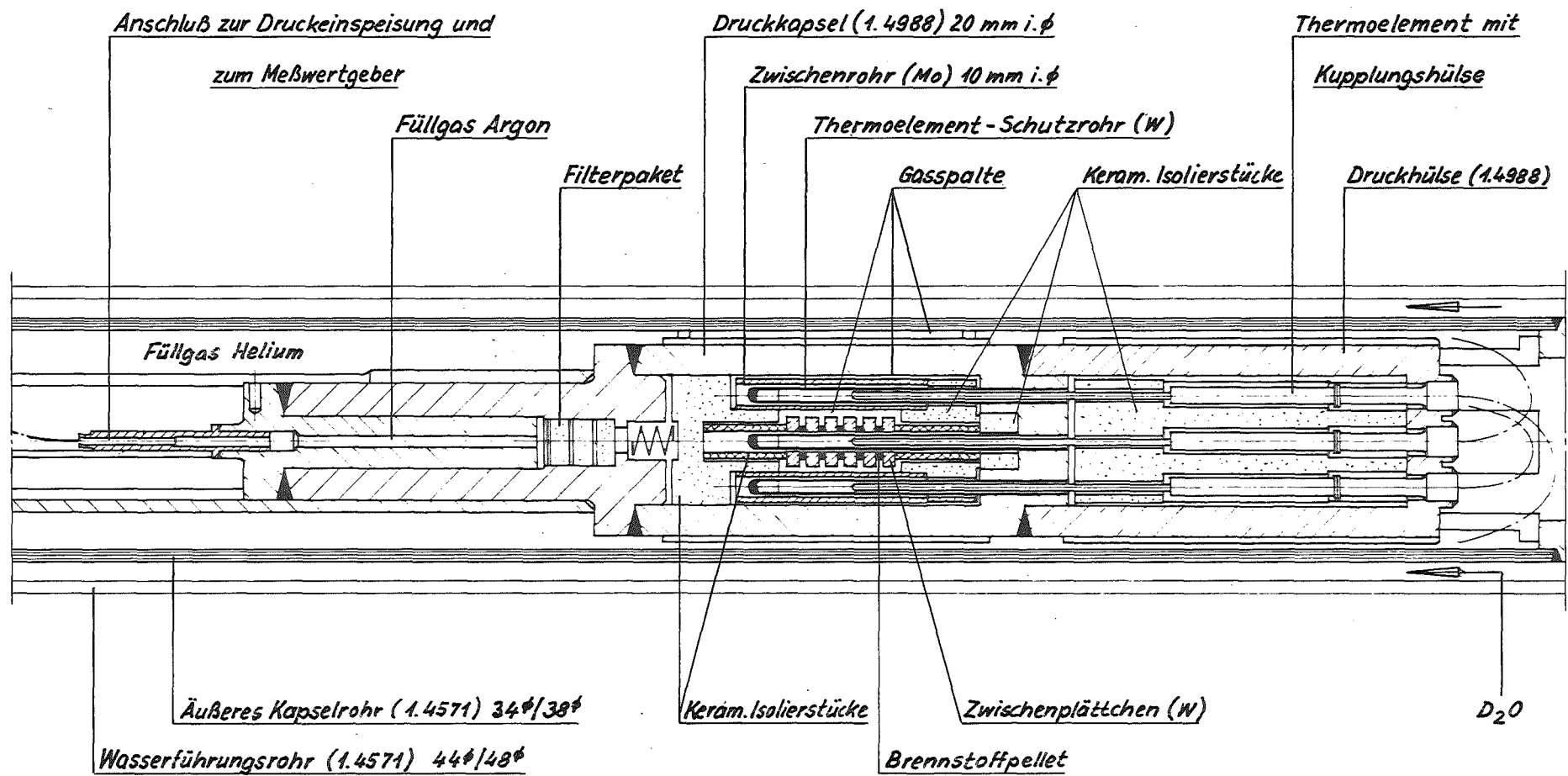
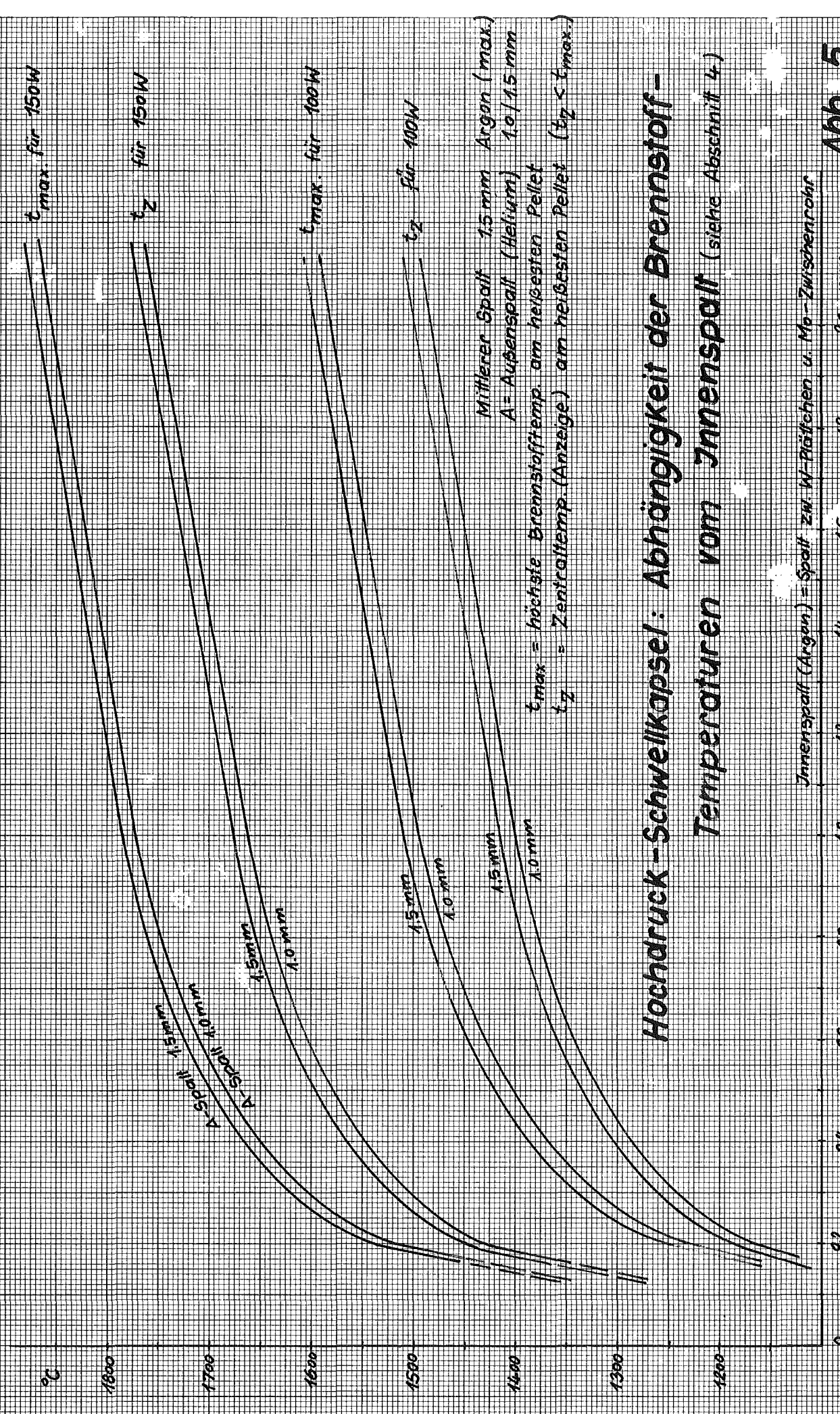


Abb.4: Hochdruck - Schwellprobeneinsatz M.: 1:1



t_{max} für 150W

t_z für 150W

t_{max} für 100W

t_z für 100W

A-Spalt 1,5 mm
A-Spalt 1,0 mm

1,5 mm
1,0 mm

1,5 mm
1,0 mm

1,5 mm
1,0 mm

Mittlerer Spalt 1,5 mm Argon (max.)
A = Außenspalt (Helium) 1,0 / 1,5 mm
 t_{max} = höchste Brennstofftemp am heißesten Pellet
 t_z = Zentralfemp. (Anzeige) am heißesten Pellet ($t_z < t_{max}$)

Hochdruck-Schwellkapsel: Abhängigkeit der Brennstoff-Temperaturen vom Innenspalt (siehe Abschnitt 4)

Innenspalt (Argon) = Spalt zw. W-Plättchen u. Mo-Zwischenrohr

1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 mm

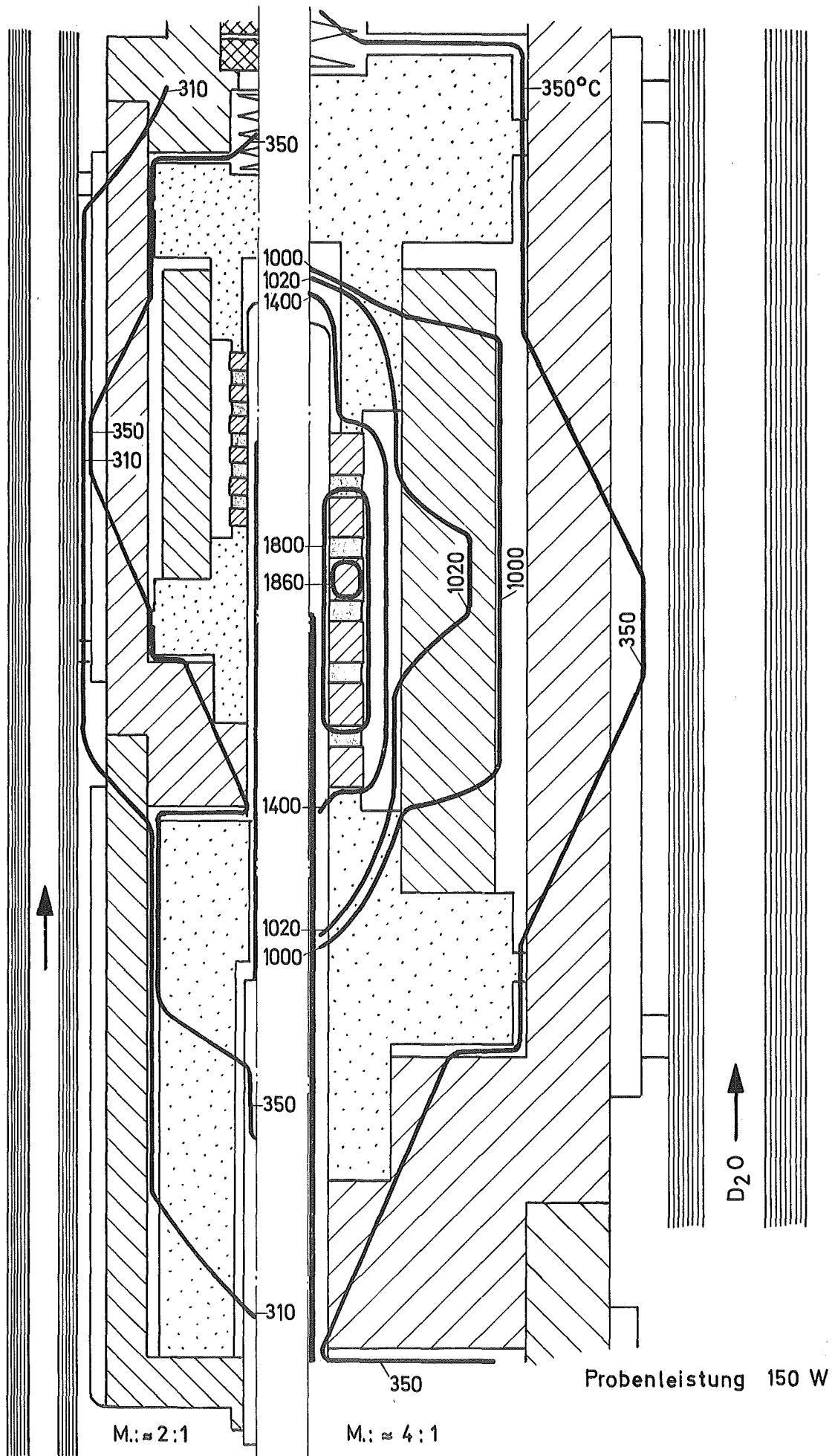


Abb. 6: Temperaturverlauf in der HD - Schwellkapsel

Hochdruck-Schwellkapsel: Abhängigkeit der Proben­temperatur von der Probenleistung

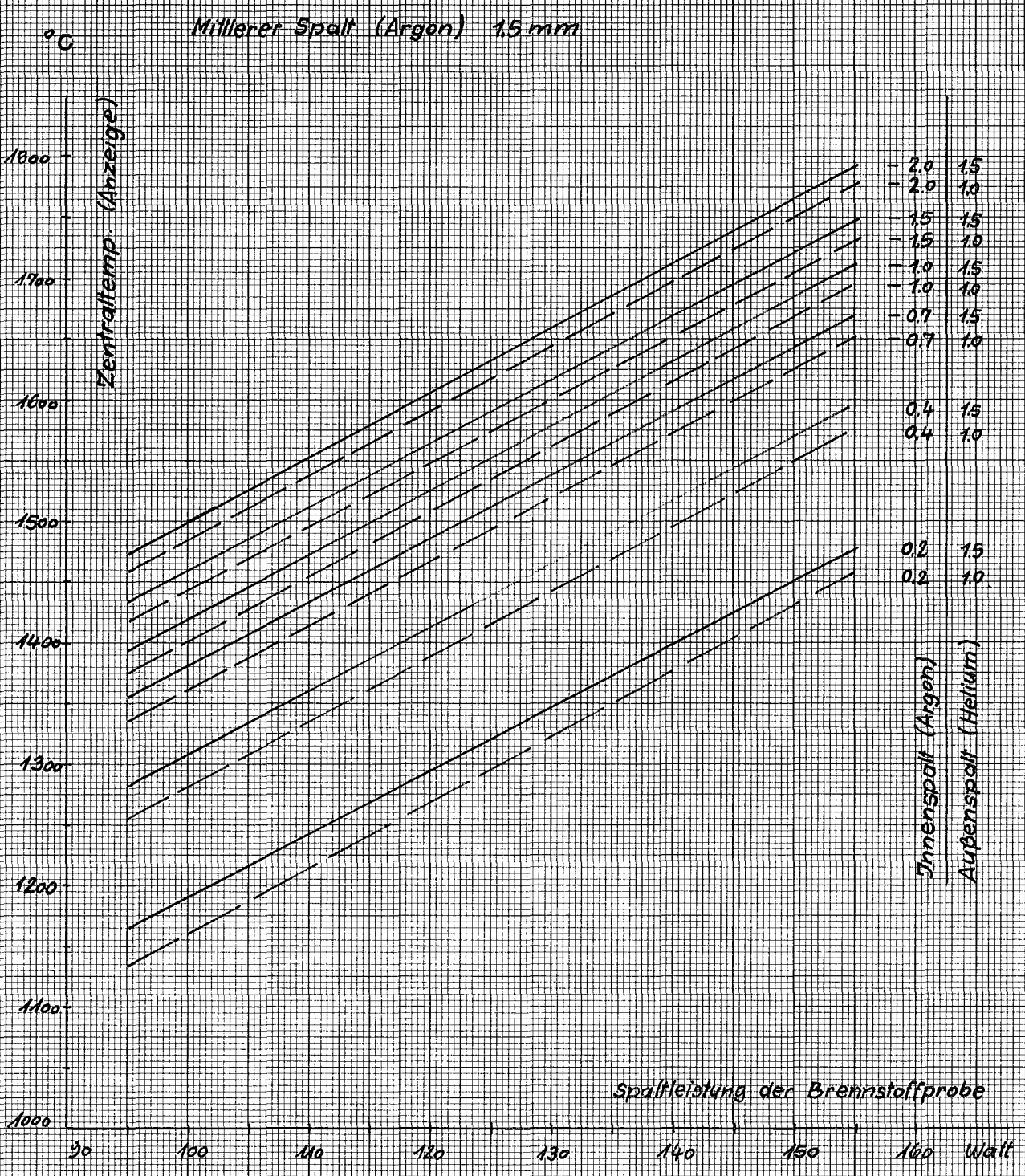


Abb. 7

Beanspruchung der Druckschwellkapsel in Abhängigkeit vom Innendruck

σ
kN/mm²

20

(siehe Abschnitt 5.1)

18

16

14

12

10

8

6

4

2

0

-2

100

200

300

400

500

bar

P_{in}

$\sigma_{a, ges.}$

$\sigma_{a, i}$

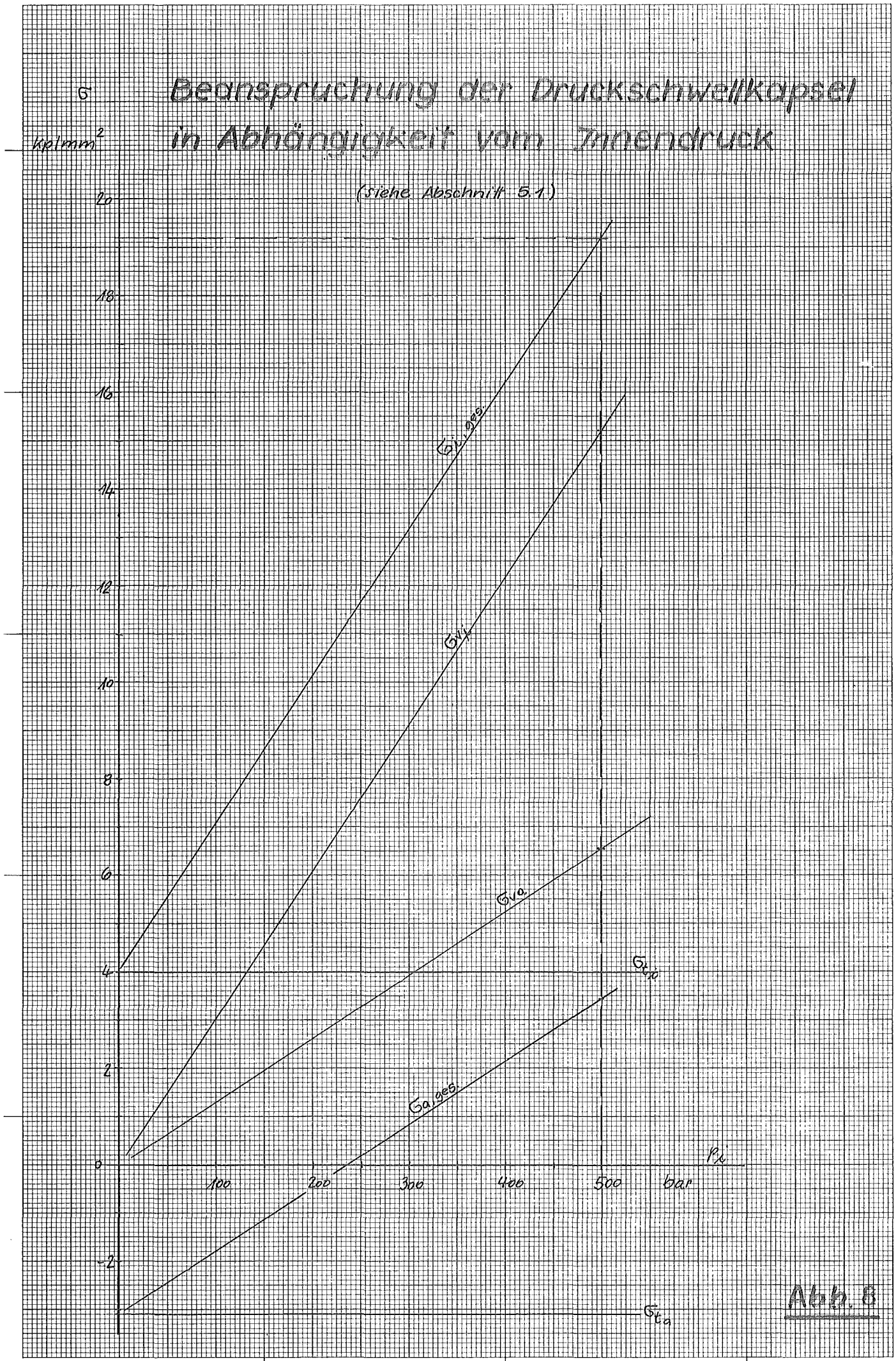
$\sigma_{a, e}$

$\sigma_{a, r}$

$\sigma_{a, ges.}$

$\sigma_{a, i}$

Abb. 8



Hochdruck-Schwellkapsel

Zeitstandsfestigkeit $\sigma_B/10000 \text{ h}$ für die Werkstoffe Nb-1Zr, Nb-15W-5Mo-1Zr (F48) und 4988. (Werte mit $P = (15 + \log t) \cdot 10^{-3}$ ermittelt) für die Nb-Legierungen, gemessen für 4988).
 Zeitdehngrenze $\sigma_{1\%}$ für den Werkstoff 4988.
 Kurzzeitfestigkeit $\sigma_{0,2}$ (Werte gemessen) für den Werkstoff Nb-1Zr.

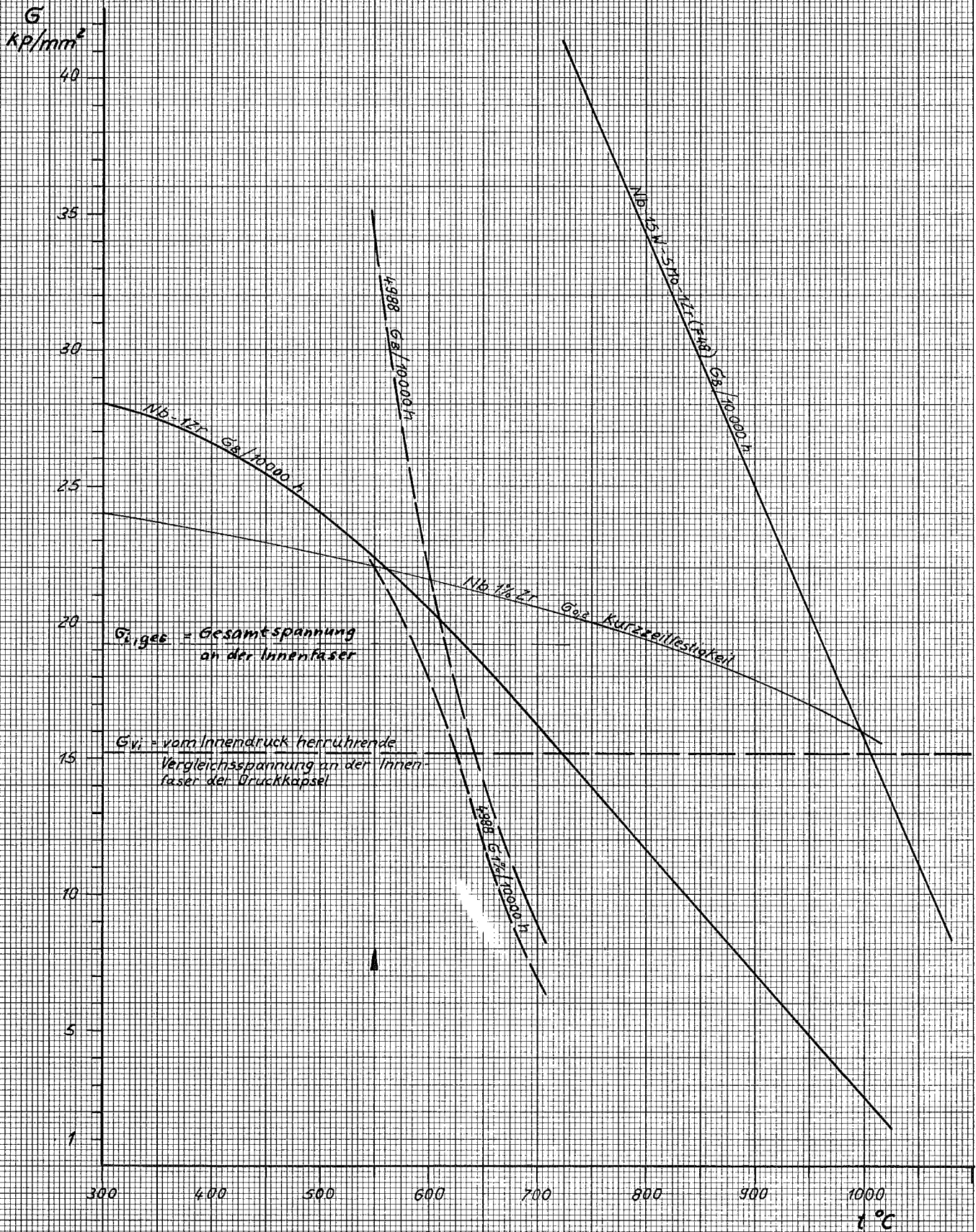
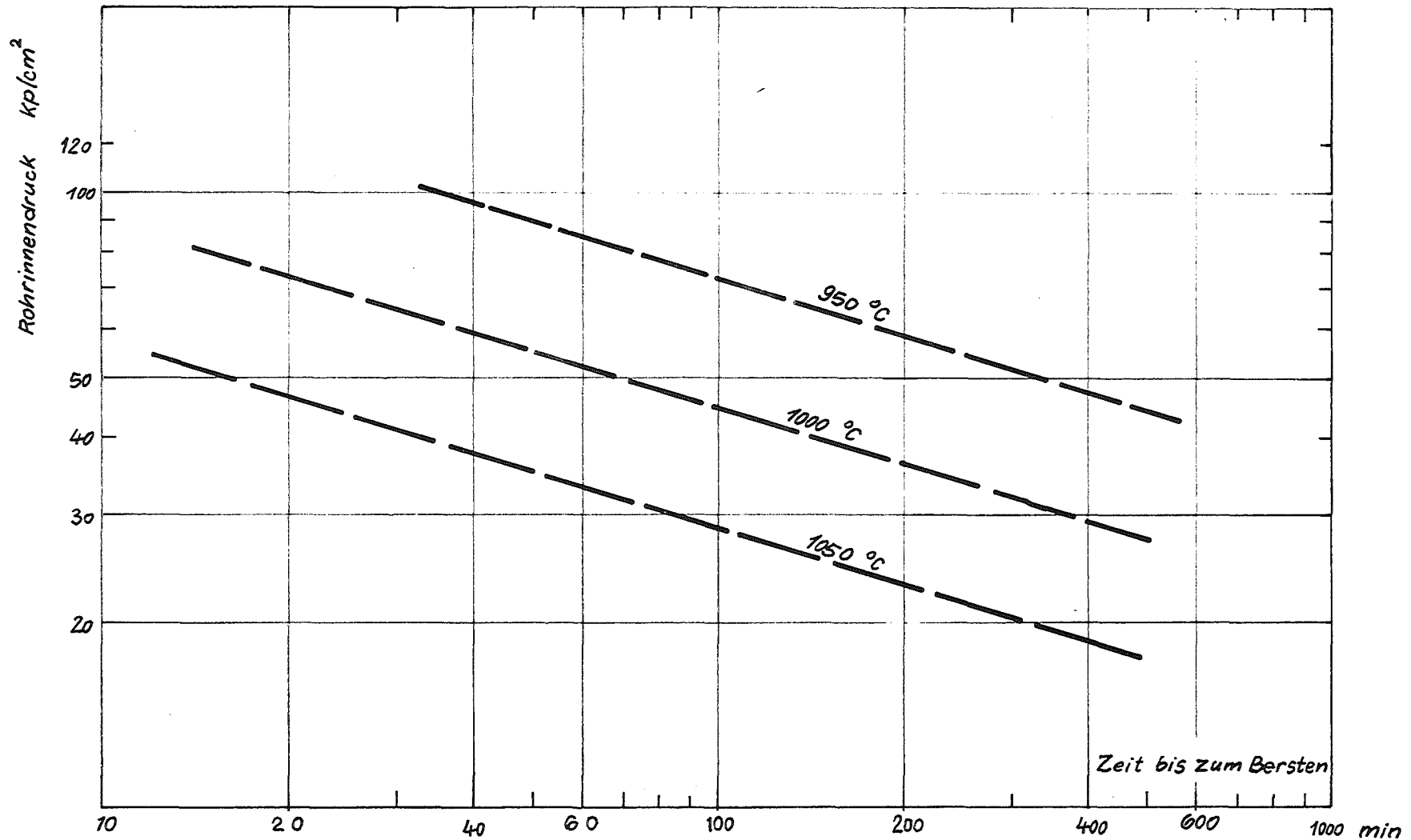


Abb. 9

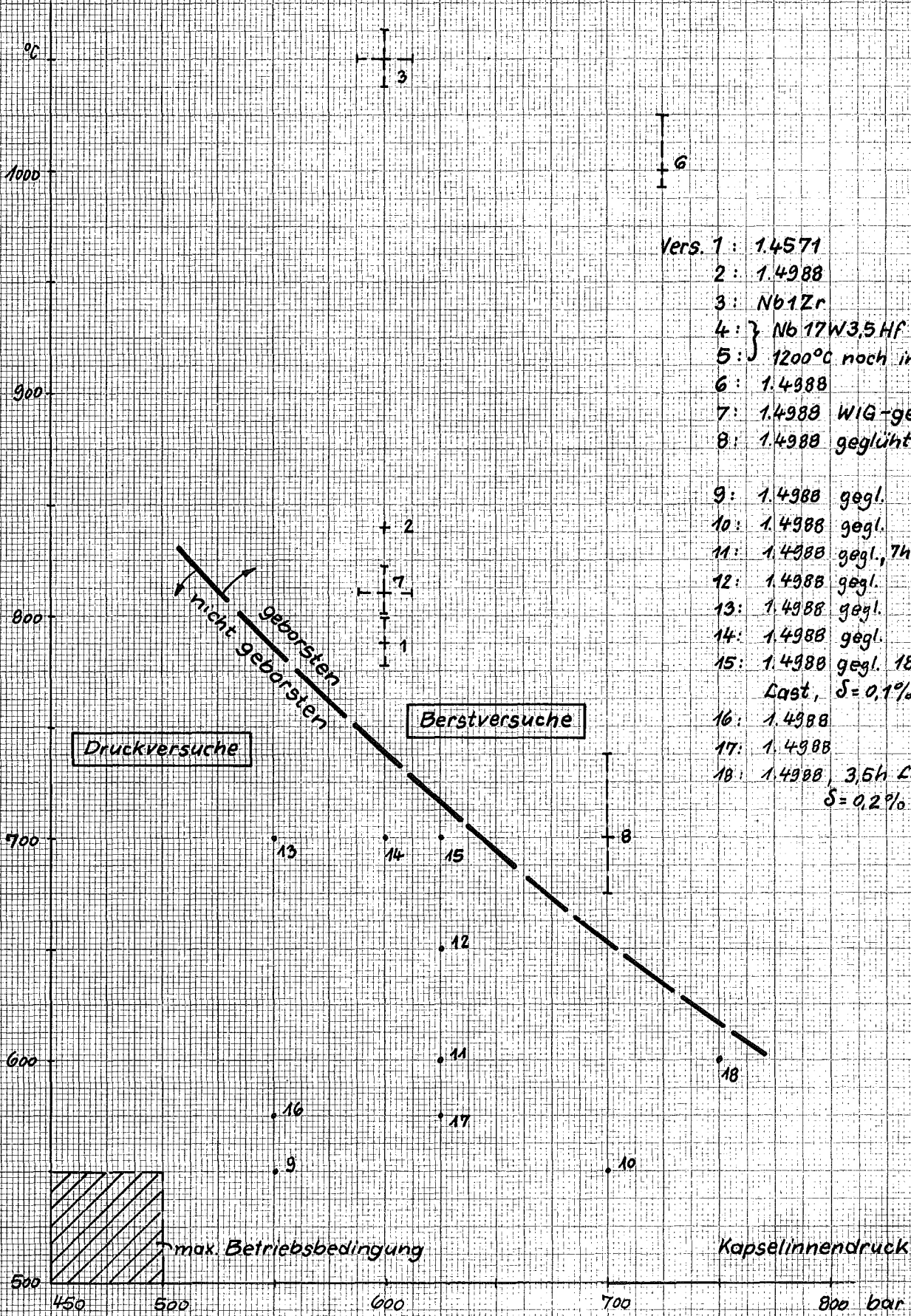


Rohrinnendruckversuche an Werkstoff 1.4988 – dünnwandige Hüllrohre – bei hohen Temperaturen [6]

HD-Schweil kapsel: Druck - bzw. Berstversuche

(siehe Abschnitt 7.3)

Kapselwandtemperatur °C



- Vers. 1 : 1.4571
- 2 : 1.4988
- 3 : Nb1Zr
- 4 : } Nb 17W3,5Hf bei
- 5 : } 1200°C noch intakt
- 6 : 1.4988
- 7 : 1.4988 WIG-geschw.
- 8 : 1.4988 geblüht
- 9 : 1.4988 gegl.
- 10 : 1.4988 gegl.
- 11 : 1.4988 gegl., 7h Last
- 12 : 1.4988 gegl.
- 13 : 1.4988 gegl.
- 14 : 1.4988 gegl.
- 15 : 1.4988 gegl. 18h Last, $\delta = 0,1\%$
- 16 : 1.4988
- 17 : 1.4988
- 18 : 1.4988, 3,5h Last $\delta = 0,2\%$

Kapselinnendruck

Abb. 11