

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

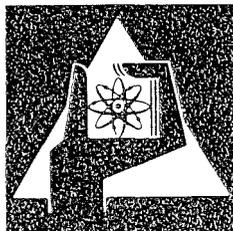
Oktober 1977

KFK 2345

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

**Out-of-pile-Versuche zum Aufblähvorgang von
Zirkaloy-Hüllen
Ergebnisse aus Vorversuchen mit verkürzten
Brennstabsimulatoren**

K. Wiehr, He. Schmidt



**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 2345

Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Nukleare Sicherheit

Out-of-pile-Versuche zum Aufblähvorgang von Zirkaloy-
Hüllen - Ergebnisse aus Vorversuchen mit verkürzten
Brennstabsimulatoren

K. Wiehr, He. Schmidt

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG mbH, KARLSRUHE

Zusammenfassung

Aufblähversuche an verkürzten indirekt beheizten Brennstab-simulatoren in Luftatmosphäre wurden durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Versuchsführung werden kurz skizziert. Es sind im wesentlichen folgende Ergebnisse angefallen:

- Bei Stabinnendrucken von 70 bar ergeben sich Berstumfangsdehnungen von ca. 36 %, höhere Drucke führen zu niedrigeren Dehnungen.
- Die dabei gemessenen Dehnungsgeschwindigkeiten und Temperaturen sind kennzeichnend für normalplastisches Verhalten von Zirkaloy-4.
- Ausgangsexzentrizitäten zwischen Pelletsäule und Hülle verursachen zum Berstzeitpunkt azimutale Temperaturunterschiede bis zu 100 K.
- Bei ausgeprägten azimutalen Temperaturunterschieden liegt die Berststelle stets auf der heißen, meist geradlinigen, z.T. konkaven Mantellinie mit großer lokaler Verformung und damit größter Wandstärkenverschwächung.
- Die heiße Mantellinie hebt praktisch nicht von der Wärmequelle ab, die gegenüberliegende Seite hebt ab, jedoch ohne meßbare Wandstärkenverschwächung.

Out-of-Pile Experiments on Ballooning of Zircaloy Fuel Rod Claddings. Test Results with Shortened Fuel Rod Simulators.

Summary

Ballooning experiments were performed on shortened indirectly heated fuel for simulators in an air atmosphere. The test set-up and the test procedure are described. The following results were achieved:

- Initial internal rod pressures of 70 bar result in burst circumferential strains of about 36 %, higher internal pressures in lower strains.
- The measured strain rates and temperatures are characteristic of the normal plastic behaviour of zircaloy-4.
- Initial eccentricities between the pellet stack and the cladding initiate differential circumferential temperatures up to 100 K at rupture.
- In case of pronounced differential circumferential temperatures the rupture point is always located on the hot surface line which, in most cases, is a straight or partly concave line with high local strain, i.e., maximum weakening of the wall thickness.
- The hot surface line is not lifted off the heat source, whereas the opposite colder side is, but without any measurable reduction in wall thickness.

Inhaltsverzeichnis:

Vorwort

1. Einleitung
2. Versuchsaufbau und Versuchsführung
 - 2.1. Brennstabsimulator
 - 2.2. Instrumentierung
 - 2.3. Versuchsführung
3. Experimentelle Ergebnisse
 - 3.1. Druck-, Temperatur- und Verformungsverlauf
 - 3.2. Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur
 - 3.3. Azimutale Temperaturverteilung
 - 3.4. Kühlrippenwirkung der Thermodrähte
 - 3.5. Verformungsbild
 - 3.6. Röntgenaufnahmen
 - 3.7. Querschnittsschliffbilder
4. Schlußwort

Out-of-pile Versuche zum Aufblähvorgang von Zirkaloy-Hüllen - Ergebnisse aus Vorversuchen mit verkürzten Brennstabsimulatoren

Vorbemerkung:

Die in diesem Bericht mitgeteilten Ergebnisse wurden im 1. Halbjahr 1976 erarbeitet und wurden bereits im Juli 76 interessierten Stellen als Vorabinformation in Form des Entwurfes dieses Berichtes übergeben.

1. Einleitung

Experimente mit Brennstabsimulatoren in Originalgeometrie, d.h. auch voller Länge, wie sie in den Hauptexperimenten zum Vorhaben 4238 des Projektes Nukleare Sicherheit verwendet werden, sind kostspielig und aufwendig. Es wird daher versucht, die möglichen Verformungsabläufe und Verformungsmechanismen zunächst an verkürzten Brennstabsimulatoren zu untersuchen und zu klären.

Eine genaue Kenntnis dieser Vorgänge, studiert an einer Vielzahl von Einzelstabversuchen mit verkürzten Simulatoren, erleichtert die Interpretation der Ergebnisse an Stäben voller Länge, seien es Einzelstabversuche oder Bündelexperimente.

2. Versuchsaufbau und Versuchsführung

In den folgenden Abschnitten werden der Prüfling, seine Instrumentierung sowie die Versuchsführung stichwortartig beschrieben.

2.1 Brennstabsimulator

- elektrisch indirekt beheizter Brennstabsimulator
(radialer Aufbau identisch mit den Brennstabsimulatoren für PNS 4238-Experimente) [1]

- stark verkürzt (325 mm beheizte Länge)
- kein axiales Leistungsprofil
- oberes und unteres Spaltgasplenum : 9 und 16 cm³
- abgeschlossenes Drucksystem ohne weitere nennenswerte Gasvolumina (<0,5 cm³) durch Meßeinrichtungen oder Ventile
- Heizstab kann sich axial frei gegen Zirkaloy Hülle bewegen
- Zirkaloyhüllrohr steht unten auf, ist oben mit Heizstab verschraubt, so daß es durch sein Eigengewicht sowie zusätzlich mit 0,2 kp durch den hängenden Heizstab belastet ist.
- Zirkaloy - 4 - Hüllrohrabmessungen : 10,75 mm Ø x 0,725 mm. Die Hüllrohre sind auf Außendurchmesser, Ovalität und Wandstärke vermessen.
- Gasfüllung : He
- Anfangsinnendruck kalt: 70, 100, 130 bar
- Außenatmosphäre : Luft, 1 bar

2.2. Instrumentierung

- Innendruckmessung: Micro-DMS-Druckaufnehmer
- Temperaturmessung : nackte Pt/PtRh-Thermodrähte von 0,1 mm Ø direkt auf Zr-4-Hüllrohr aufgepunktet, 1 - 7 Stück axial und azimutal
- Verformungsmessung: Röntgenkinematographie. [2]

2.3. Versuchsführung

Der Brennstabsimulator wird mit einer Leistung von 50 W/cm von Raumtemperatur bis zum Bersten des Hüllrohres aufgeheizt. Am Anfang beträgt die Aufheizrate etwa 12 K/s, sie sinkt zwischen 400 und 600⁰C auf 11,5 K/s, bei weiter steigender Hüllrohrtemperatur auf noch geringere Werte. (Wärmeabgabe durch Naturkonvektion an Luft und durch Strahlung). Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau und die Randbedingungen des Versuchs.

3. Experimentelle Ergebnisse

3.1. Druck- Temperatur- und Verformungsverlauf

In Abb. 2 sind die gemessenen Verläufe des Druckes, der Temperatur und der Umfangsdehnung über der Zeit aufgetragen. Die ausgezogenen Linien gelten für Anfangsinnendrucke von 70 bar, die gestrichelten für 100 bar und die strichpunktierten für 130 bar Anfangsinnendruck.

Der gemessene Temperaturverlauf der Hüllrohroberfläche wird entscheidend von der Art des Abhebens des Hüllrohres von der Wärmequelle sowie der azimuthalen Lage der Temperaturmeßstelle zur Berststelle bestimmt. Der gemessene Temperaturverlauf zeigt meistens das folgende Erscheinungsbild:

Die Hüllrohrtemperatur steigt bis zum Abheben der Hülle kontinuierlich an. Mit zunehmendem Abheben des Hüllrohres wird der Wärmetransport reduziert, was sich zunächst durch ein schwächeres Ansteigen und schließlich je nach Spaltweite zwischen den heißen Pellets und der Zirkaloyhülle durch ein Wiederabsinken der Hüllrohrtemperatur bemerkbar macht, bevor das Rohr birst. Würde der Temperaturverlauf jedoch bei jedem Versuch immer genau an der Berststelle gemessen werden, so würde der Hüllrohrtemperaturverlauf im Zeitraum stark zunehmender Umfangsdehnungen in der Mehrzahl der Fälle etwas anders aussehen. Die Gründe für dieses Verhalten werden bei der Diskussion der azimuthalen Temperaturverteilung und der Verformungsmechanismen erläutert. Ähnliche Temperaturverläufe werden in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles erwartet.

Der Stabinnendruck nimmt entsprechend der Gasgleichung mit steigender Temperatur zu, solange die Zirkaloyhülle keine Umfangsdehnung erfährt. Mit beginnender Verformung der Hülle fällt der Gasdruck zunächst langsam und nimmt mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit, je nach Vorinnendruck und Umfangsdehnung, rasch ab. Das Bersten ist durch einen jähen Druckzusammenbruch gekennzeichnet.

Die zeitlich gemessenen Umfangsdehnungen zeigen in Bezug auf Beginn, Verlauf und maximalen Wert eine deutliche Abhängigkeit vom Innendruck. Die Berst-Dehnungswerte (Umfangsdehnung in % = Umfangszunahme/Ausgangsumfang x 100) von 36 % bei 70 bar, 28 % bei 100 bar und 24 % bei 130 bar sind für diese Innendrucke nur dann typisch, wenn während der Temperaturtransiente große azimutale Temperaturunterschiede am Umfang des Hüllrohres auftreten, z.B. verstärkt hervorgerufen durch Hüllrohre mit relativ großen Wandstärkenunterschieden über dem Umfang. Die drei in der Abb. 2 wiedergegebenen Kriechberstversuche wurden mit Zirkaloy-Hüllrohren durchgeführt, die am Umfang einen Wandstärkenunterschied von 41 Mikrometer aufwiesen.

Weitere Versuche mit Hüllrohren, die derartige Wandstärkenunterschiede aufwiesen, zeigten gleiche Ergebnisse. Auch bei diesen Versuchen wurden größere azimutale Temperaturunterschiede festgestellt. Da der Heizstab auf seinem Umfang keine Temperaturunterschiede zeigt, muß die Ursache für dieses Erscheinungsbild in unterschiedlich großen Wärmeübergangswiderständen im Spalt sowie unterschiedlichen Wandstärken liegen. Um den Einfluß des Parameters "Wandstärkenunterschiede" bei der weiteren Untersuchung des Verformungsmechanismus so klein wie möglich zu halten, wurden für die folgenden Versuche nur Hüllrohre verwendet, die Wandstärkentoleranzen kleiner oder gleich 6 μm aufwiesen;

3.2. Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur

In Abb. 3 sind eigene Meßergebnisse in das Feld der aus der Literatur bekannten Ergebnisse eingetragen. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde eine Auftragung der Bersttemperatur über dem Differenzdruck zwischen dem Innendruck des Stabes und dem Containmentdruck gewählt. Die meisten der in dieser Abbildung wiedergegebenen Meßpunkte und Kurven

geben Ergebnisse amerikanischer Berstexperimente wieder. Es handelt sich dabei um Hüllrohrberstversuche mit direkter und indirekter Beheizung des Zirkaloy-

hüllrohres und mit unterschiedlichen Versuchsrandbedingungen und Hüllrohrabmessungen.

Die mit ORNL-MRBT bezeichneten Punkte [4] sind Messungen an indirekt beheizten Zirkaloyhüllen in Wasserdampfatmosphäre. Der mit "KWU-Kurve" beschriftete Linienzug [5] ist das Ergebnis aus einer Vielzahl von Hüllrohrberstexperimenten mit direkter Beheizung des Hüllrohres in Luftatmosphäre.

Die eingetragenen eigenen Versuche, deren Versuchsaufbau und Versuchsführung in Abschnitt 2 angegeben sind, wurden alle mit der gleichen Leistung von 50 W/cm gefahren. Als Parameter wurde lediglich der Anfangsinnendruck variiert. Es fällt auf, daß trotz identischer Versuchsführung bei gleichen Ausgangsdrücken eine Streubreite der Bersttemperaturen von bis zu 100 K zu existieren scheint. Die Erklärung hierfür liegt überwiegend in der Tatsache, daß die Temperatur häufig nicht an der Berststelle selbst erfaßt wird, sondern axial oder azimuthal davon versetzt. Je nach Dehnungsverlauf treten mehr oder weniger große Umfangsdehnungen auf, die beim Brennstabsimulator vom Wärmeleitertyp, der dem nuklearen Brennstab am ähnlichsten ist, azimuthale Temperaturunterschiede bis zu 100 K hervorrufen.

3.3. Azimuthale Temperaturverteilung

An Hand von drei identisch geführten Kriechberstversuchen mit einem Gasinnendruck von 100 bar und einer Stabileistung von 50 W/cm (Abb. 4-6), kann das Entstehen und Anwachsen von azimuthalen Temperaturunterschieden erläutert werden. Zur Überprüfung, welche azimuthalen Temperaturverteilungen vom Heizstab herrühren, wurde dieser ohne Ringpellets und Zirkaloyhülle mit der gleichen Leistung wie bei den Experimenten aufgeheizt. Dabei wurde eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung auf dem Umfang dieses Heizstabes festgestellt ($\ll 2$ K Unterschied). Außerdem geht aus einer Vielzahl von Versuchen (etwa 30 Versuche) mit demselben Heizstab hervor, daß die Berststellen der Zirkaloyhüllrohre statistisch verteilt auf dem ganzen Umfang wiederzufinden sind und nicht in einem bestimmten Winkel zur auf dem Heizstab markierten Nullposition (0-Pos. HST in den Abb.4-6)

liegen. Die Temperaturverteilung auf der Hülle kann daher nicht vom Heizstab verursacht werden.

Über den gerade gerichteten Heizstab werden sehr eng tolerierte Ringpellets geschoben und darüber wiederum die Zirkaloyhülle. Der häufigste Fall, der hierbei entsteht, ist eine mehr oder weniger exzentrische Lage zwischen Pelletzylinder und Zirkaloyrohrinnenwand. Der Fall einer absolut zentrischen Montagelage ist sehr selten.

Wird ein solches mit He gefülltes System aufgeheizt, so beginnen sich aufgrund unterschiedlicher Spaltweiten am Umfang der Zirkaloyhülle Temperaturdifferenzen auszubilden, die stetig wachsen.

Mit beginnendem Abheben der Hülle von der Wärmequelle zeigen alle Temperaturmeßstellen auf einer Umfangslinie innerhalb eines Segmentes mit einem Winkel von etwa 300° das in Abschnitt 3.1 beschriebene Temperaturverhalten: Flacher werden-der Anstieg - Temperaturmaximum - Abfall der Temperatur. Im verbleibenden Winkelraum von 60° , in dem auch später das Bersten des Hüllrohres eintritt, zeigen die Temperaturmeßstellen ein anderes Verhalten. Die Temperaturen fallen nicht wieder ab, sondern steigen weiter an und erreichen schließlich zum Berstzeitpunkt ihre maximalen Werte. Abb. 4 zeigt neben dem Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf über der Zeit die axiale und azimutale Positionierung der fünf auf dem Zirkaloyrohr angeordneten Meßstellen. Es ist ebenfalls auf dem Bild dargestellt, daß die Berststelle zwischen den azimutalen Temperaturmeßstellen ϑ_4 und ϑ_2 liegt. Da das Bersten des Rohres immer an der heißesten Stelle des Zirkaloy-Rohres erfolgt, konnte auch durch die Anbringung von drei azimutalen Temperaturmeßstellen die tatsächliche Bersttemperatur nicht erfaßt werden. Nach Erfahrungen aus weiteren Versuchen liegt die tatsächliche Hüllrohrbersttemperatur bei diesem Versuch um ca. 40 K höher als ϑ_4 , d.h. die maximale azimutale Temperaturdifferenz liegt bei ca. 100 K. Das verstärkte Ansteigen der Hüllrohrtemperatur auf der Mantellinie, auf der auch das Bersten erfolgt, ist auf einen sehr kleinen Spalt zwischen der wärmeabgebenden Pelletsäule und der Zirkaloyhülle zurück-

zuführen.

In Abb. 5 ist eine weitere Eigenart des Temperaturverlaufes auf der Berstmantellinie zu erkennen. Die Temperaturmeßstelle ϑ_1 , die fast auf der Berstmantellinie liegt, zeigt in den letzten 2 sec vor dem Bersten einen verstärkten Anstieg der Hüllrohrtemperatur. Dies deutet darauf hin, daß sich das Hüllrohr bei beginnender Verformung mit seiner wärmeren Mantellinie nicht von seiner Wärmequelle abhebt, sondern sich in einer Anzahl von Fällen kurz vor Erreichen der maximalen Umfangsdehnung, d.h. kurz vor dem Bersten sogar noch verstärkt an die Pelletsäule anlegt.

Auf diese Phänomene wird bei der Diskussion der Röntgenfilmbilder sowie der Querschnittsschliffbilder näher eingegangen.

Abb. 6 zeigt für einen weiteren Versuch die Zusammenhänge zwischen Temperaturen, Druck und Dehnung. Die in Abb. 5 und 6 wiedergegebenen Meßwerte der maximalen Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang betragen auch bei diesen Versuchen ca. 100 K.

3.4. Kühlrippenwirkung der Thermodrähte

Zur Temperaturmessung auf der Hüllrohroberfläche werden blanke Pt/PtRh Thermodrähte direkt auf die Zirkaloyhülle aufgepunktet. Die 0,1 mm starken Drähte werden verschweißt und die Schweißperle flachgedrückt. Die Thermoelementspitze ist danach ein Plättchen von ca. 0,25 mm Durchmesser. Über die beiden Drähte werden 1,2 mm starke Isolierperlen mit zwei Bohrungen à 0,3 mm Durchmesser gefädelt und bis ca. 2 mm an die Meßstelle herangeschoben.

Bei allen bisherigen Versuchen, bei denen nur ein Thermoelement auf der Hülle angepunktet war, konnte keinerlei Beeinflussung auf die sich verformende Hülle festgestellt werden. Bei dem Versuch mit drei azimutalen Thermoelementen trat jedoch bereits eine ganz geringfügige Verringerung im Verformungsumfang ein (ca. 1 %).

Bei den Versuchen, bei denen jedoch fünf Thermoelemente in

einer axialen Ebene auf dem Umfang verteilt waren (s. auch Abb. 5 und 6), zeigte sich eine deutliche Beeinflussung. Die Hüllen enthielten axial zwei Stellen gleicher Umfangsdehnung von je 28 % und dazwischen lag eine Zone von nur 16 % Umfangsdehnung. Die Thermoelemente wirkten wie ein kalter Gürtel.

In Abb. 7 sind Hüllrohrtemperaturen sich verformender Zr-Hüllen zum Berstzeitpunkt über dem Umfangswinkel φ aufgetragen. Der Winkel $\varphi = 0$ bzw. 360° liegt auf der Mantellinie der Berststelle. Sämtliche aufgetragenen Meßpunkte stammen aus Versuchen unter identischen Randbedingungen bei 100 bar Innendruck. Die Meßpunkte (Symbol X), die zum Kurvenverlauf " 1 TE " führen, stammen aus Experimenten, die nur mit einem einzigen Thermo-element versehen waren. Die Kurvenzüge "3TE"(Symbol Δ) bzw. "5 TE " (Symbol \square : 1. Versuch und Symbol θ : 2. Versuch) verbinden die Meßpunkte aus Experimenten, bei denen 3 bzw. 5 Thermoelemente azimuthal in einer Ebene auf dem Umfang angebracht waren.

Es ist deutlich die Kühlrippenwirkung der Thermodrähte in Abhängigkeit von der Anzahl der azimuthal angeordneten Thermo-elemente zu erkennen. Im Bereich der heißen Mantellinie, also der Berstmantellinie, ist dieser Einfluß sehr gering, da durch den sehr engen Spalt zwischen Wärmequelle und Hülle der Wärmewiderstand sehr gering ist, und die Kühlrippe praktisch keine Absenkung der Hüllrohrtemperatur verursachen kann.

Anders ist es jedoch auf der gegenüberliegenden Seite, der Seite des großen Spaltes. Mit größer werdender Anzahl von Thermoelementen auf dem Umfang sinkt die Hüllentemperatur in diesem Bereich ab. Über die Beeinflussung der azimuthalen Temperaturverteilung findet dann schließlich auch eine Beeinflussung des Beulverhaltens statt.

Obwohl bei den Versuchen mit nur einem Thermoelement der beschriebenen Ausführung und Anbringungsart keinerlei Beeinflussung auf die Verformung festzustellen ist, ist damit jedoch nicht sichergestellt, daß nicht auch von nur einem Thermoelement eine Absenkung der Hüllrohrtemperatur verursacht werden kann, wenn es im Bereich sitzt, in dem das Hüllrohr stark abgehoben

hat.

Ob zur Temperaturmessung an sich verformenden Hüllrohren Thermoelemente verwendet werden können oder ob berührungslose Meßmethode angewendet werden müssen, muß von Fall zu Fall entschieden werden und hängt von den Kühlbedingungen der Umgebung ab.

Eine Schwächung des Zirkaloymaterials durch den Schweißpunkt und eine Entstehung der Berststelle an der Schweißung wurde nie festgestellt.

3.5 Verformungsbild

Abb. 8 zeigt einige mehr oder weniger stark verformte Hüllrohre. Alle Versuche wurden mit einem Ausgangsdruck im Brennstabsimulator von ca. 100 bar durchgeführt. Abgesehen von der Tatsache, daß trotz gleicher Versuchsrandbedingungen die Rohre verschieden große Umfangsdehnungen aufweisen, ist an allen Rohren deutlich zu erkennen, daß die Mantellinie auf der die Berststelle liegt, geradlinig, ja zum Teil sogar konkav verläuft.

Anfangs bestand die Ansicht, daß diese Form durch den Rückstoßeffekt des austretenden Gases beim Bersten des Rohres hervorgerufen wird. Die Betrachtung der Röntgenfilme vom Aufblähvorgang widerlegte jedoch diese Annahme.

Aus der Zuordnung der azimutalen Temperaturmeßstellen zu den Röntgenfilmbildern geht hervor, daß mit dem Beginn sichtbarer plastischer Verformung das Zirkaloyhüllrohr an seiner kälteren Seite von der Wärmequelle abzuheben beginnt. Zu diesem Zeitpunkt hat sich aufgrund der bereits erwähnten exzentrischen Lage von Hüllrohr und Pelletsäule ein azimutales Temperaturprofil ausgebildet. Das Hüllrohr hebt mit zunehmender Umfangsdehnung an seiner kalten Mantellinie verstärkt ab, d.h. der Spalt wird immer größer und führt zu den bereits gezeigten, am häufigsten gemessenen Temperaturverläufen. Die Mantellinie auf der gegenüberliegenden Seite, also die heißere, hebt jedoch

nicht oder nur wenig von seiner Wärmequelle ab. In einigen Fällen wird der Spalt auf der heißen Mantellinie kurz (etwa 2 sec) vor Erreichen der maximalen Umfangsdehnung sogar noch geschlossen. Dies bewirkt einen verstärkten Anstieg der Temperatur kurz vor dem Bersten (s. Abb. 5). Da bei den meisten Hüllrohrberstexperimenten mehr oder weniger große Temperaturunterschiede in axialer Erstreckung und auf dem Umfang auftreten, die Temperaturmeßstellen jedoch in den seltensten Fällen genau auf der Berststelle liegen, werden sehr unterschiedliche Temperaturen als "Bersttemperaturen" angegeben; z.B. die der Berststelle am nächsten liegende Meßstelle oder die irgendwo am Hüllrohr gemessene höchste Temperatur. Dies bedeutet, daß bei Hüllrohrberstexperimenten, speziell bei indirekt beheizten, Unterschiede in der Angabe der Bersttemperatur bis zu 100 K enthalten sein können, was mit einer Erklärung für die relativ große Streubreite der "Bersttemperaturen" darstellt.

3.6 Röntgenaufnahmen

Die Abb. 9 zeigt zwei um 90° versetzte Röntgenaufnahmen von einem unsymmetrisch verformten Hüllrohr. Auf der rechten Aufnahme ist deutlich zu sehen, daß die Hülle völlig symmetrisch vom Heizstab mit seiner Pelletsäule abgehoben hat. Auf der linken Aufnahme, einer Seitenansicht vom geborstenen Rohr, ist zu erkennen, daß sich die Hülle auf der Seite der Berststelle ganz nahe an der Pelletsäule befindet, auf der gegenüberliegenden kalten Mantellinie dagegen deutlich abgehoben hat. Es stellt sich die Frage, ob sich die Hülle oder vielleicht nur der Heizstab verbogen hat. Ein Auswerten des Filmmaterials hat ergeben, daß der Heizstab vom Beginn des Aufheizens bis zur maximalen Verformung der Zirkaloyhülle im Rahmen der Meßgenauigkeit gerade bleibt. Das Bersten erfolgt durch ein sehr schnelles Aufreißen des plastisch verformten Hüllrohres. Das restliche Rohr verformt oder verbiegt sich jedoch durch den Berstvorgang nicht weiter. Lediglich im Augenblick des Berstens erfährt der Heizstab kurzzeitig eine gewisse Auslenkung, kommt

jedoch sofort wieder in seine Ausgangslage zurück.

Auch das Heranbewegen der Zirkaloyhülle an den Heizstab als Erklärung für den Temperaturanstieg unmittelbar vor dem Bersten kann deutlich auf einigen Röntgenfilmen beobachtet werden.

In Abb. 10 ist ein unverformter Brennstabsimulator und der seltene Fall eines fast symmetrisch verformten Brennstabsimulators zu sehen. Je symmetrischer eine Hülle von ihrer Wärmequelle abhebt, um so größer werden die auftretenden Umfangsdehnungen. Die Hüllrohrtemperatur erreicht auf keiner Mantellinie vorzeitig extreme Werte durch einseitiges Anliegen an der Pelletsäule, die Hüllrohrversagenstemperatur steigt nur noch langsam oder gar nicht mehr an und das Hüllrohr erfährt während einer wesentlich längeren Verformungszeit sehr viel größere Umfangsdehnungen, bis es zum Bersten kommt.

Dieser typische Aufblähmechanismus von indirekt beheizten Brennstabsimulatoren erklärt, daß solche Kriechberstversuche unter identischen Randbedingungen eine größere Streubreite von Umfangsdehnungen hervorbringen müssen.

Extreme Dehnungswerte, wie sie bei direkt beheizten Rohrproben gemessen werden, sind bei von innen direkt beheizten Proben nicht zu erwarten. Dies liegt daran, daß bei der Direktbeheizung (Widerstandsheizung) von Zirkaloyhüllrohren, besonders wenn keine großen Wandstärkenunterschiede auf dem Umfang und kein eng an der Innenwand anliegender Füllkern vorhanden sind, nur relativ kleine azimutale Temperaturunterschiede auftreten. Praktisch gleiche Temperaturen auf dem Umfang führen zu einer relativ gleichmäßigen Verformung der Rohrwand, also einem Zunehmen der Umfangsdehnung überwiegend aus einer gleichmäßigen Schwächung der Wandstärke, bis das Rohr bei verhältnismäßig großen Umfangsdehnungen schließlich durch Überschreiten einer kritischen Spannung birst.

3.7 Querschnittsschliffbilder

Abb. 11 zeigt den Querschnitt eines Rohrstückes, der 10 mm oberhalb der Berststelle liegt. Dieses Hüllrohr stammt aus

einem Experiment mit der beschriebenen azimutalen Temperaturverteilung und dem Anliegen des Hüllrohres mit der wärmeren Mantellinie an den Pellets. Der Pfeil mit "B" im Kreis zeigt auf die Berstmantellinie, also die heißeste, wo die größte Änderung des Metallgefüges stattgefunden hat. Das Rohr hat in dieser axialen Ebene eine Umfangsdehnung von 33 % erfahren und auf der kalten Seite vom Heizstab abgehoben. Das Rohr hat auf dieser Seite (Pfeil "A") praktisch überhaupt keine Wandstärkenverschwächung erlitten. Das Rohr bleibt trotz einseitiger Wandstärkenverschwächung praktisch kreisrund. Diese Form stellt sich durch Minimierung der Spannungen ein. Das linke Bild zeigt die glatten Konturen der unverformten Wand, das rechte Bild dagegen läßt deutlich die verschwächte Wand erkennen, die außen wegen der sich bildenden und ständig wieder aufreißenden Oxidschicht stärker zerklüftet ist.

Abb. 12 zeigt geätzte Querschnittsschliffe der dicksten und dünnsten Wand dieses Rohrquerschnittes. Das linke Bild zeigt ein unverformtes α -Gefüge, das rechte Bild läßt deutlich eine Kornstreckung in Zugrichtung erkennen.

Die Abb. 13 zeigt ein Querschnittsbild der geborstenen Stelle selbst (oben) mit einer Vergrößerung der unverformten Wand (links unten) und einer Vergrößerung vom Rand der Berststelle, der am stärksten verformt worden ist (rechts unten). Es zeigt sich auch in der Berstebene, daß die Rohrwand, die der Berststelle gegenüberliegt, praktisch keine Wandstärkenverschwächung erfahren hat.

Mit Hilfe der Röntgenfilmtechnik läßt sich auch die Frage nach dem zeitlichen Verlauf der Verformung beantworten. Mit Einsetzen der plastischen Verformung beginnt ein relativ langsamer und stabiler Kriechvorgang, der mit einem sehr kurzzeitigen ($< 0,01$ sec) Aufreißen des Hüllrohres beendet wird. Während dieses Aufreißen der Hülle tritt keine meßbare Umfangsdehnung und damit Wandstärkenverschwächung mehr auf. Die Auswertung von bisher mehr als 30 Versuchen ergab folgendes Bild: Auf dem Röntgenfilm (25 Bilder/s - z.T. 100 Bilder/s) wurde

das Bild unmittelbar vor dem Bersten des Rohres direkt an der späteren Berststelle vermessen. Der daraus errechnete Umfang stimmt mit der Umfangsmessung am geborstenen Rohr von Berstkante zu Berstkante sehr gut überein.

Es gibt beim Vergleich der Werte aus diesen Umfangsbestimmungen keine systematischen Tendenzen. Bei häufiger genauer Übereinstimmung ergibt sich eine Abweichung von maximal 2 % in der Umfangsdehnung.

4. Schlußwort

Bei allen in diesem Bericht beschriebenen Versuchen findet die plastische Verformung der Zirkaloy-Hüllrohre in einem Temperaturbereich statt (wegen des gewählten Innendruckparameterfeldes), in dem das Zirkaloymaterial in der α -Phase vorliegt.

Alle bisherigen Experimente zum Aufblähvorgang von Zirkaloy-Hüllen mit elektrisch indirekt beheizten Brennstabsimulatoren bei den beschriebenen Versuchsrandbedingungen, zeigten im wesentlichen das gleiche Verformungs- und Berstverhalten, gekennzeichnet durch eine gerade bzw. zum Teil konkave Mantellinie auf der die Berststelle liegt.

Das auslösende Moment für das Verformungsverhalten ist sicher in der auftretenden azimutalen Temperaturverteilung zu suchen.

Folgende vorläufige Schlußfolgerungen sollen gezogen werden:

- 1) In Tests mit ähnlichen Temperaturtransienten, wie sie beim DWR-Kühlmittelverluststörfall erwartet werden, zeigen die Zirkaloyhüllen in den meisten Fällen relativ niedrige Umfangsdehnungen von ca. 20 - 40 %.
- 2) Das äußere Erscheinungsbild der verformten Hüllen aus diesen Tests kann wie folgt beschrieben werden:
 - eine schwach konisch abgehobene Hülle zu beiden Seiten der Berststelle über eine beträchtliche Länge mit einem kurzen, nicht stark ausgeprägten Ballon. Die Berststelle streute über eine gewisse axiale Länge. Größere Umfangsdehnungen als 33%, die ein Berühren von benachbarten Hüll-

rohren im Bündel hervorrufen würden, waren grundsätzlich auf eine axiale Erstreckung von weniger als drei Stabdurchmessern begrenzt.

- 3) Dieses Erscheinungsbild der Verformung war typisch für alle Temperaturtransienten, und zwar sowohl für solche bei denen das Bersten in der Rampe als auch unter quasi-isothermen Bedingungen erfolgte, natürlich nur bei indirekter Beheizung des Zirkaloyhüllrohres.

Literatur:

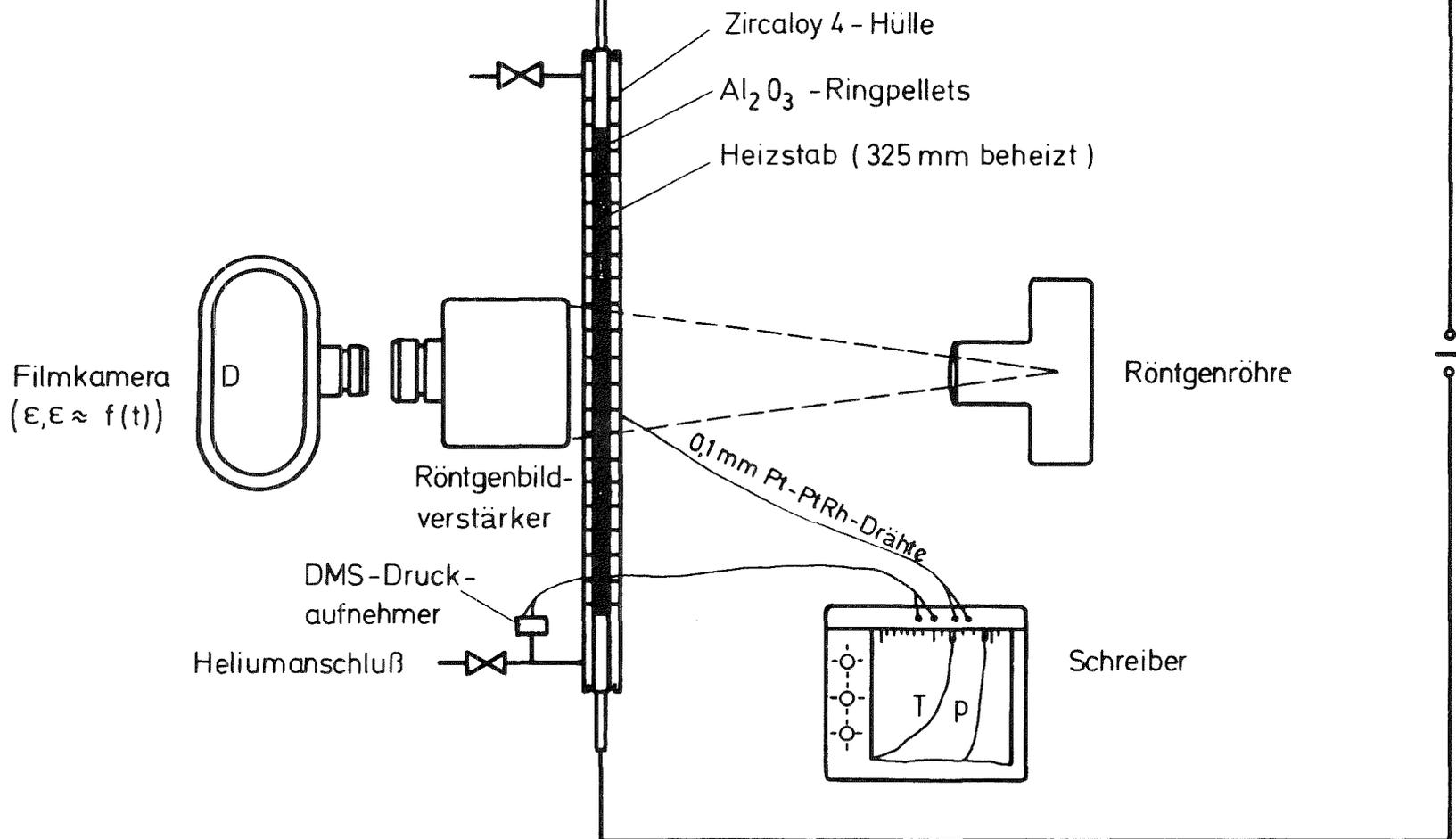
- 1 K. Wiehr et al.
KFK - 2130
2. Halbjahresbericht 1974 - PNS, Mai 74, S. 227

- 2 St. Müller, G. Thun
Röntgenanlage für das filmtechnische Erfassen des
Aufblähvorganges von Brennstäben in Versuchsständen.
Okt. 1975, unveröffentlicht

- 3 H.G. Weidinger et al.
Vortrag auf CSNI Specialist Meeting on the behaviour
of water reactor fuel elements under accident
conditions.
Spatind, Nord-Torpa (Norway)
13th - 16th Sept. 1976.

- 4 R.H. Chapman
Multirod Burst Test Program
Quarterly Progress Report for Jan-March 76,
Sept. 1976.
ORNL/NUREG/TM 36

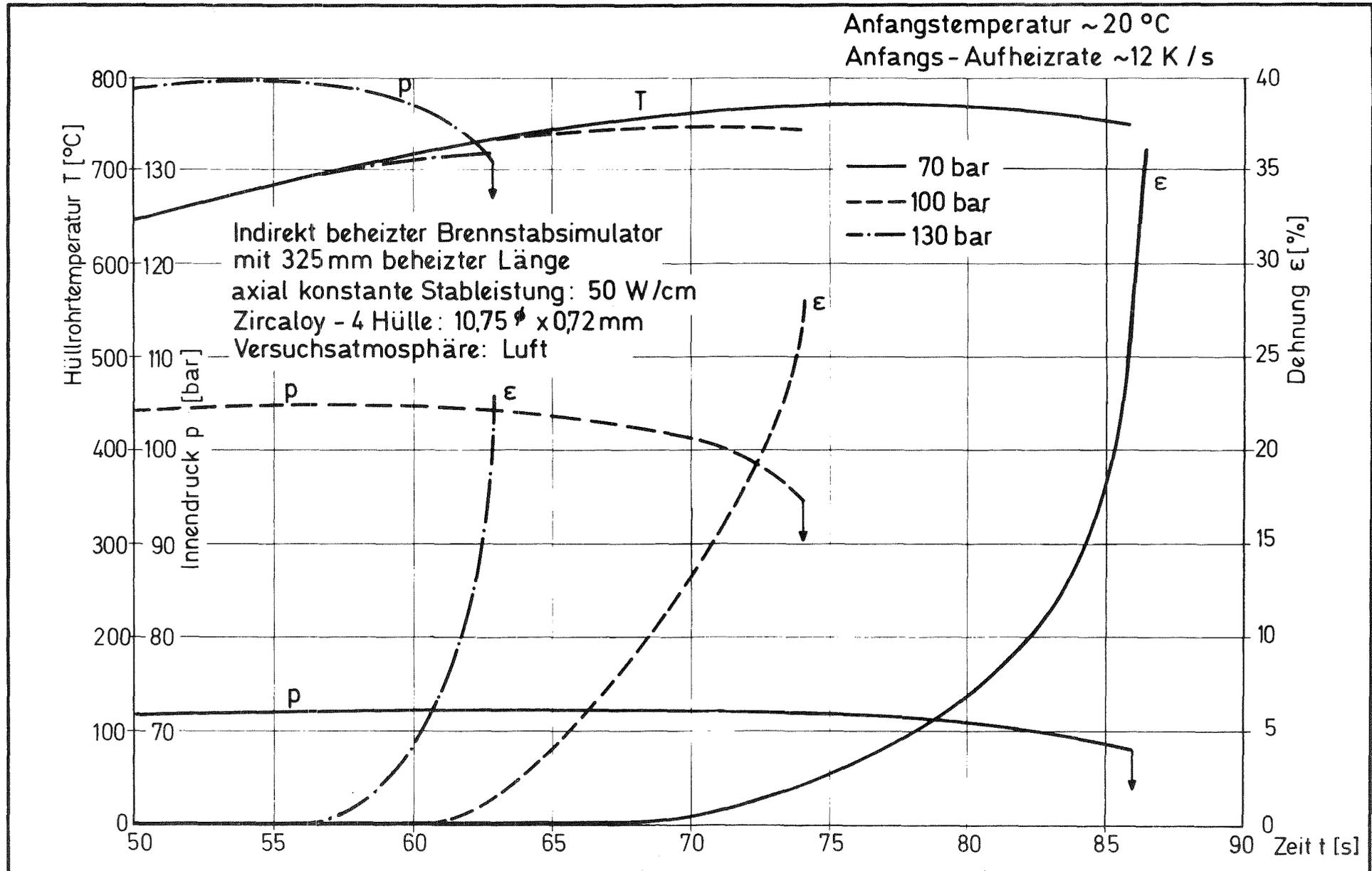
Versuchsatmosphäre: Luft



GfK - IRB
1976

Versuchsaufbau für Aufblähversuche

Abb. 1
PNS - 4238



GfK - IRB

1975

Aufblähvorgang einer Zircaloy - 4 Hülle
(Meßergebnisse)

Abb. 2

PNS - 4238

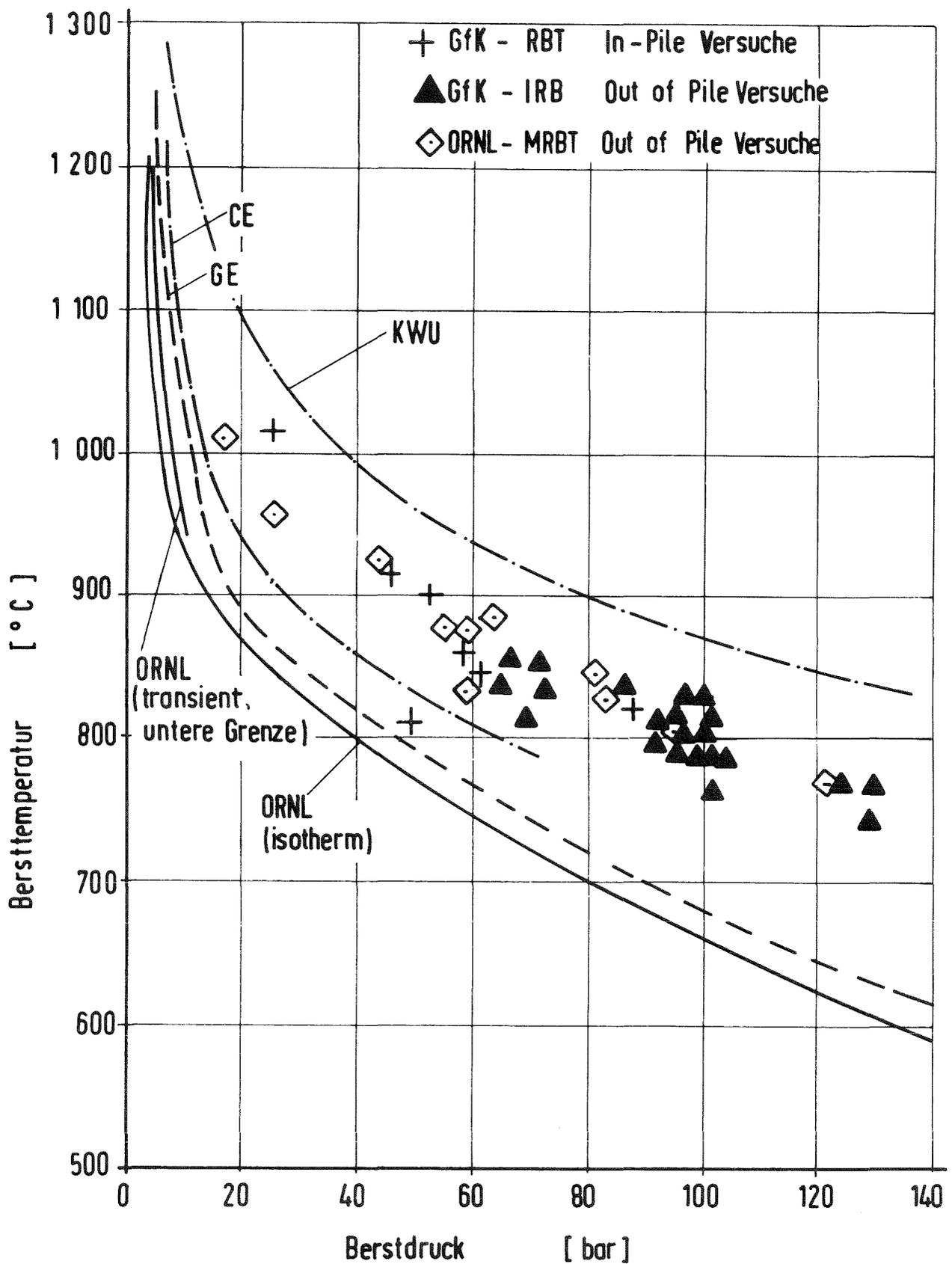
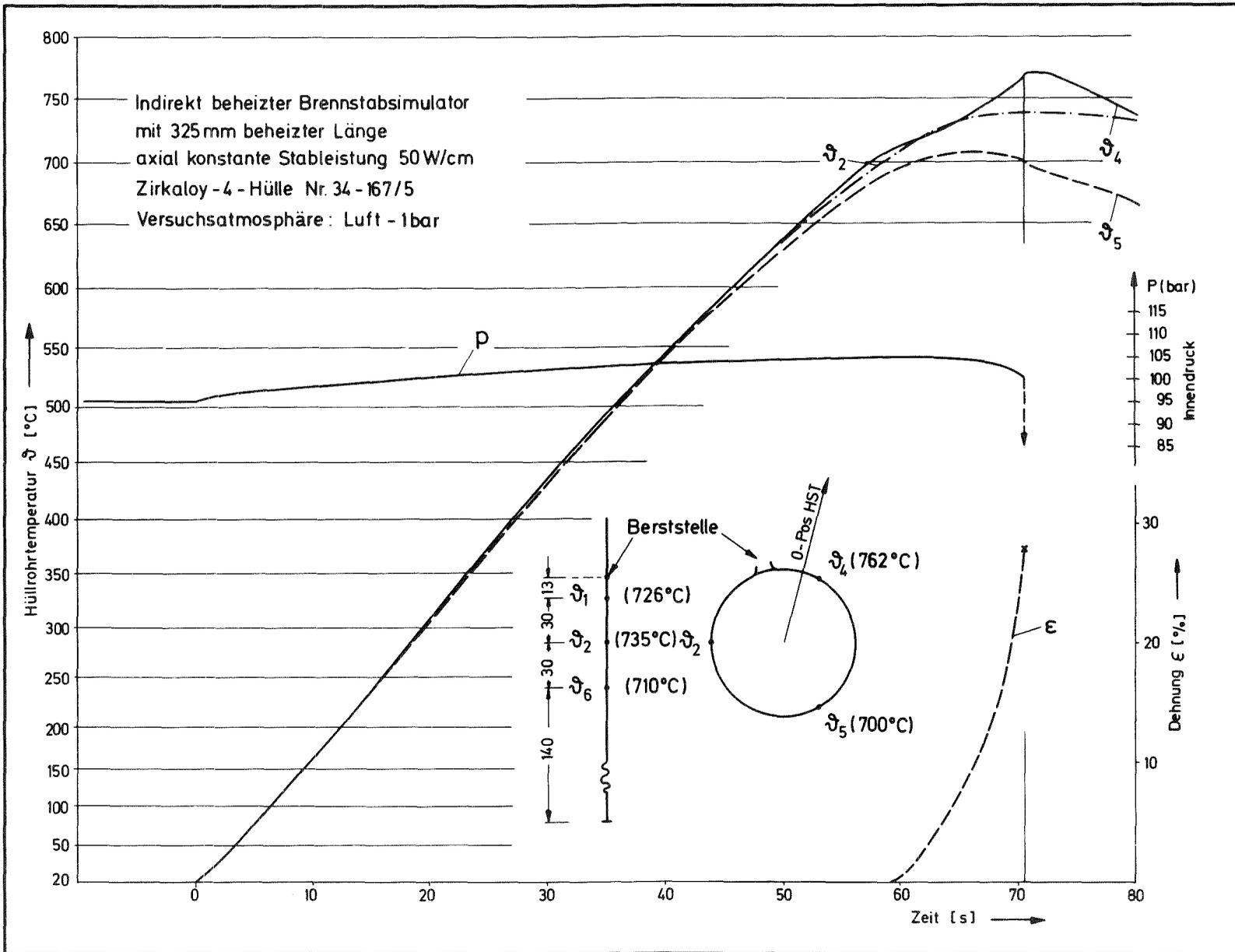
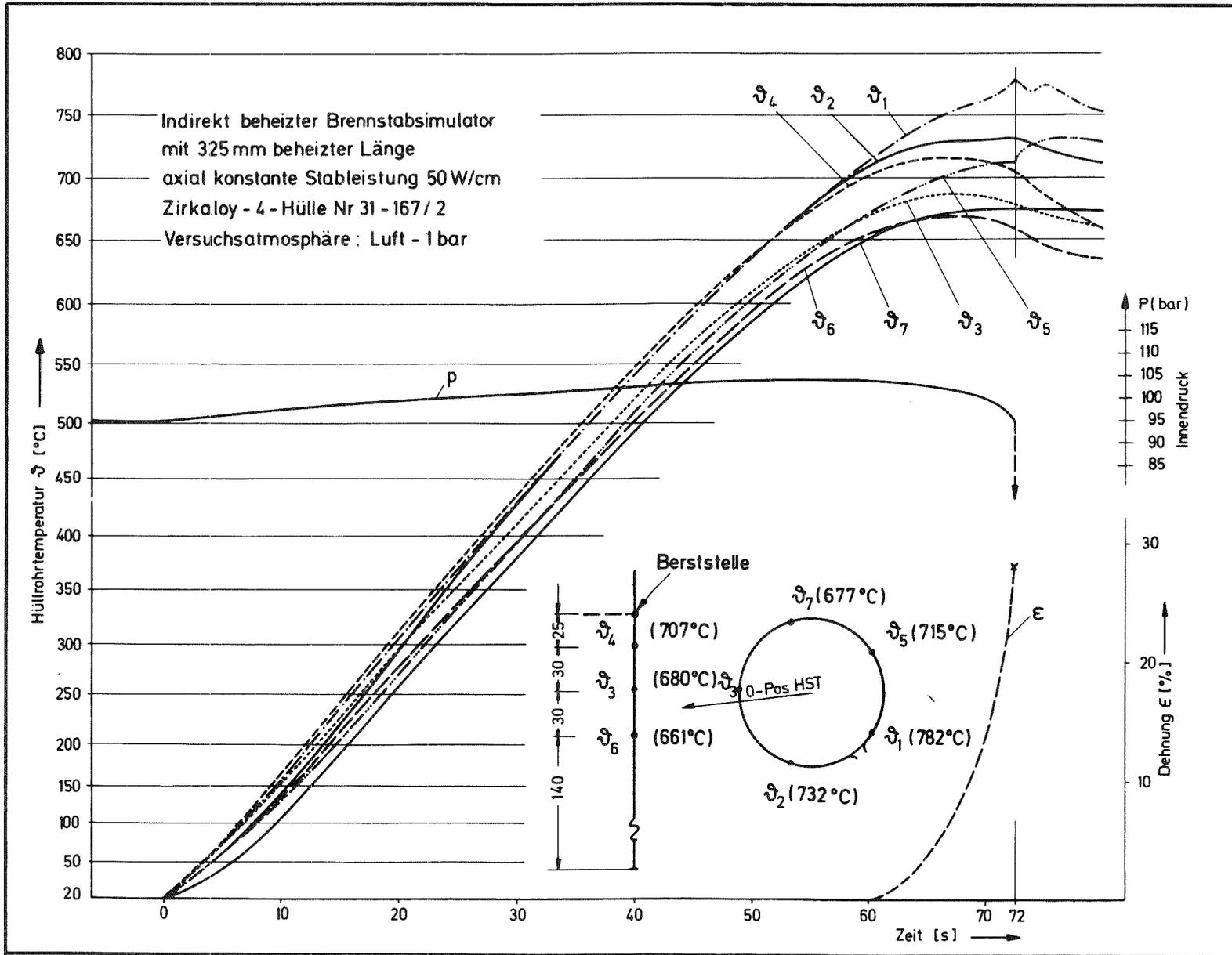


Abb. 3 Bersttemperatur als Funktion des Berstdrucks



GfK- IRB	Azimutale Temperaturverteilung beim Aufblähvorgang einer Zr-4-Hülle	Abb. 4
1976		PNS-4238



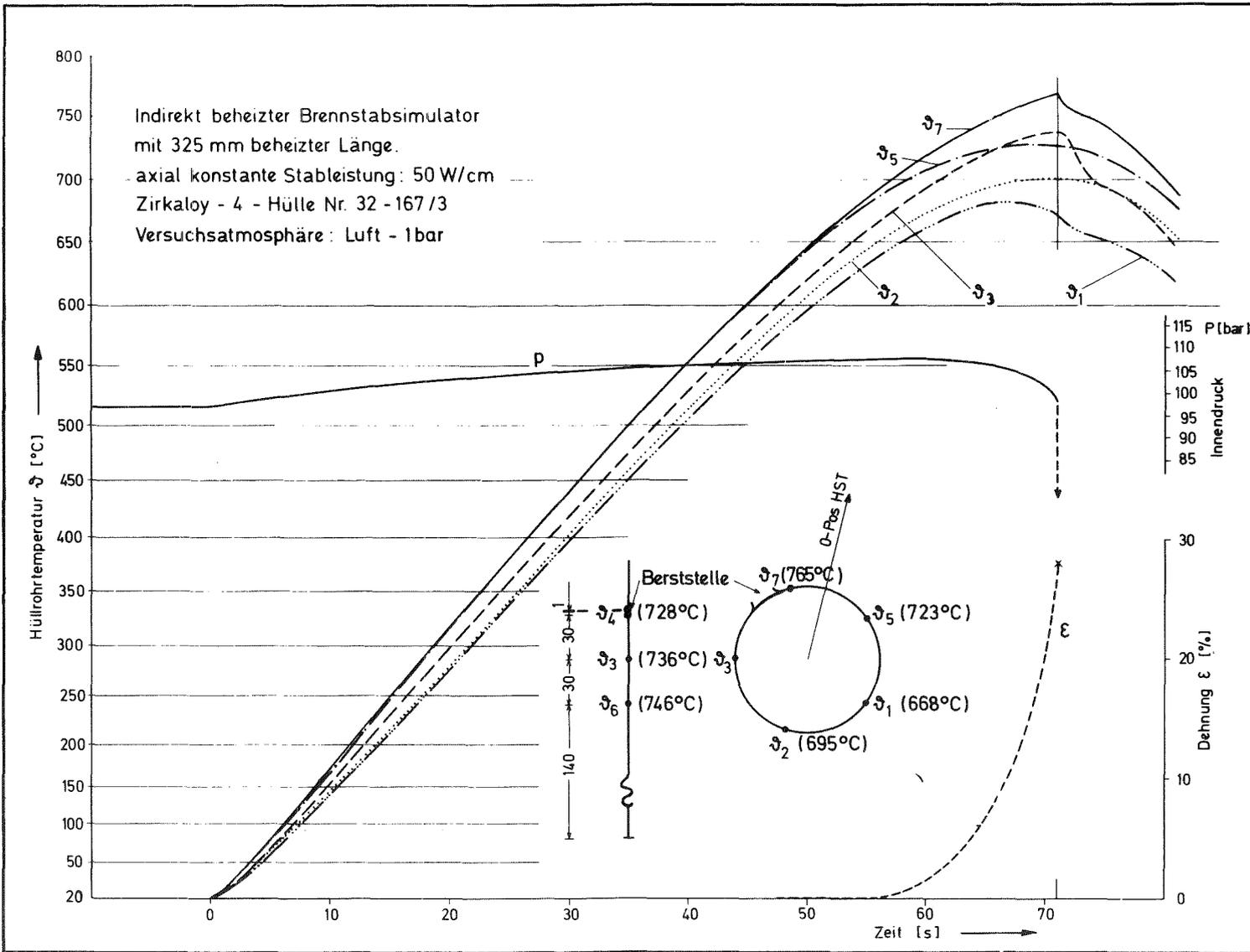
GfK-IRB

1976

Azimutale Temperaturverteilung beim Aufblähvorgang einer Zr-4 - Hülle.

Abb. 5

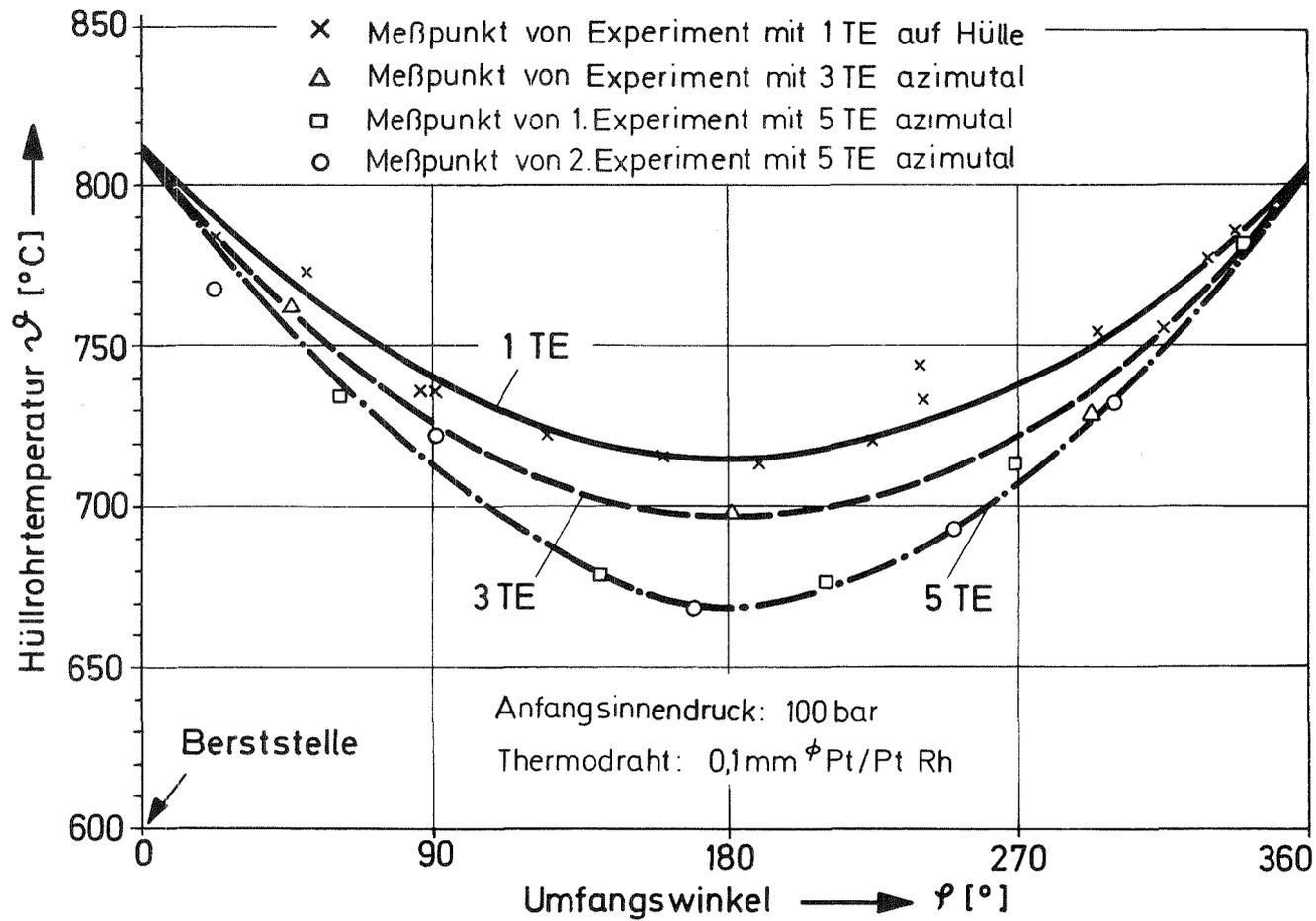
PNS-4238



GfK - IRB
1976

Azimutale Temperaturverteilung beim Aufblähvorgang einer Zr-4-Hülle

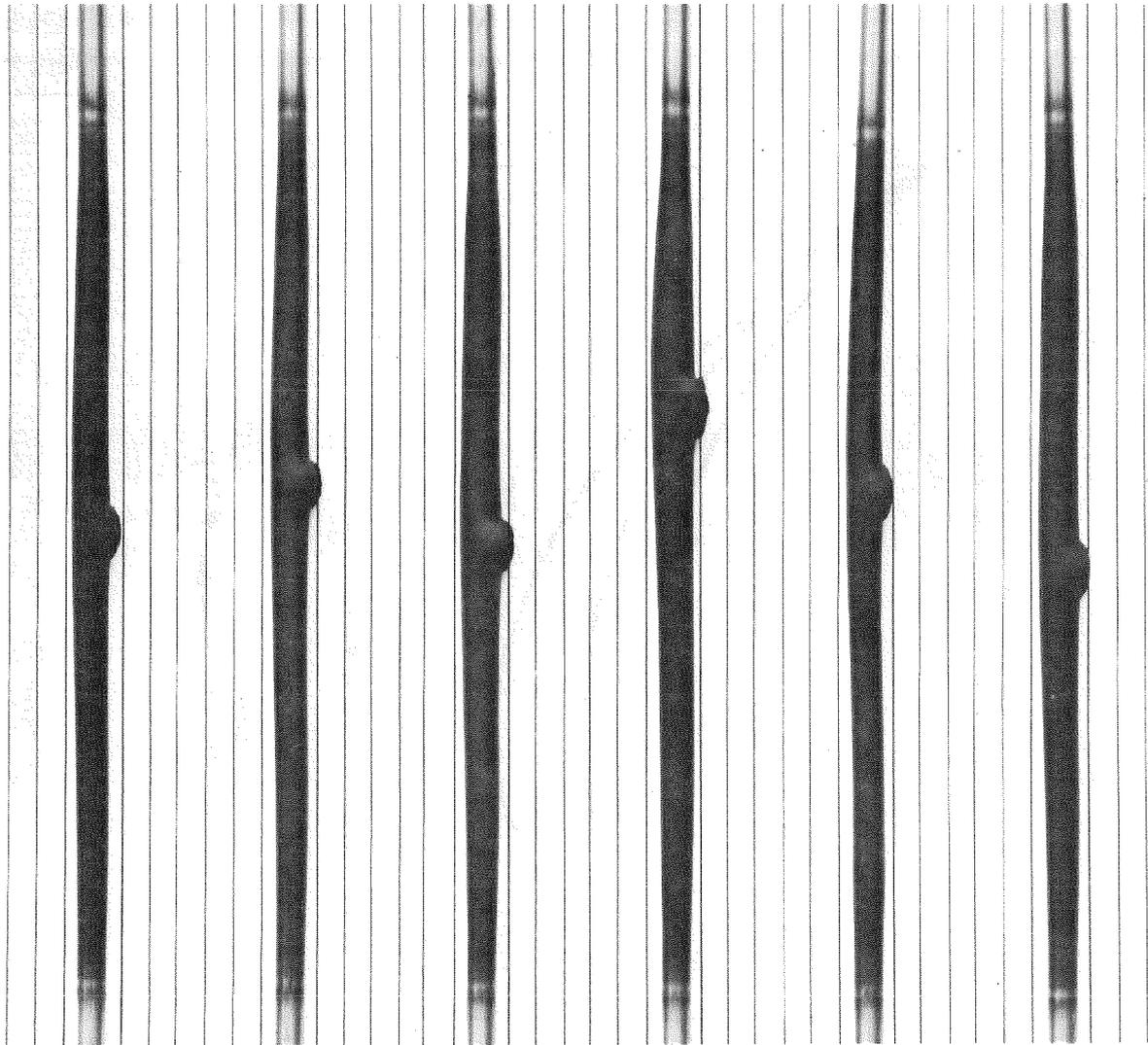
Abb. 6
PNS-4238



GfK - IRB
1976

Azimuthale Temperaturverteilung verformter Zr-Hüllen zum Berstzeitpunkt

Abb. 7
PNS-4238



beheizte Länge: 325 mm
konstante Stableistung: 50 W/cm
Innendruck: 100 bar
Versuchsatmosphäre: Luft, 1 bar

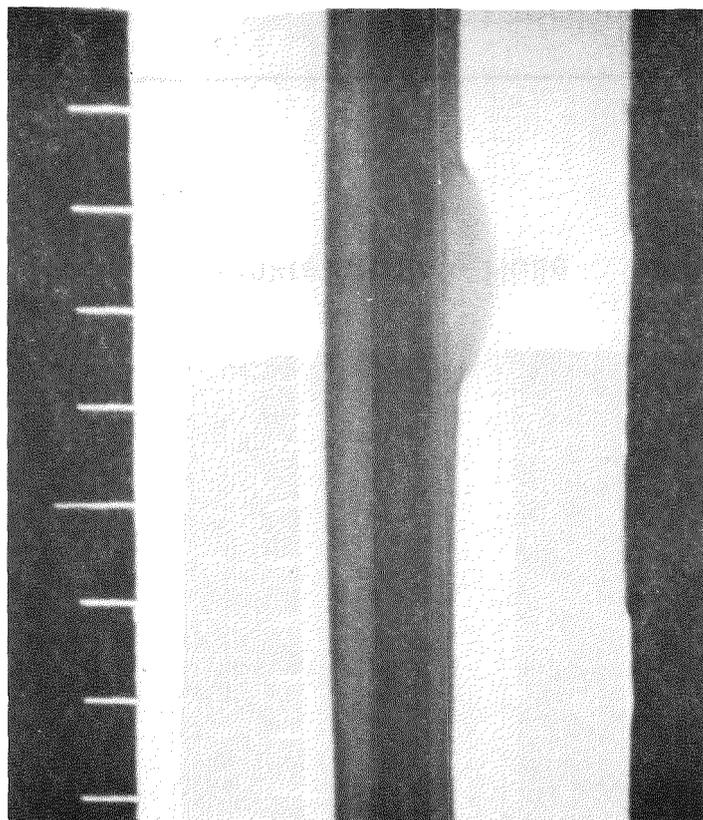
GfK - IRB

1976

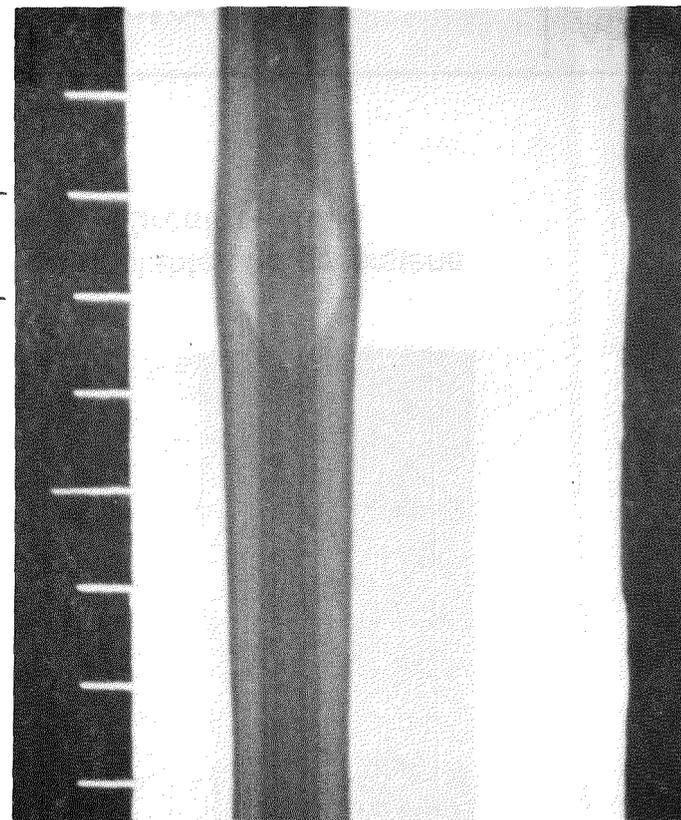
Aufgeblähte und geborstene
Zirkaloy - Hüllrohre

Abb. 8

PNS - 4238



10 mm



Seitenansicht

Draufsicht

aufgeblähte und geborstene Zirkaloy - Hülle

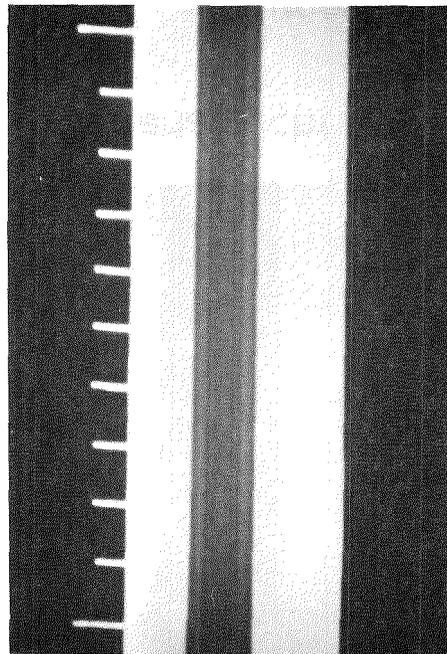
GfK - IRB

1976

Röntgenbild des Brennstabsimulators

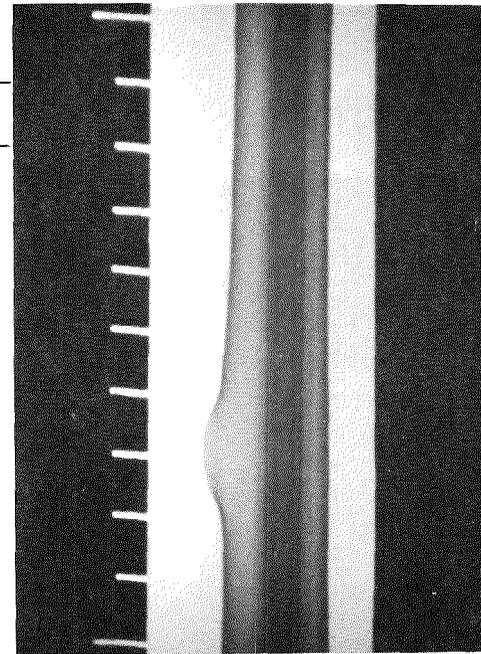
Abb. 9

PNS-4238



intakte Zircaloy - Hülle

10 mm

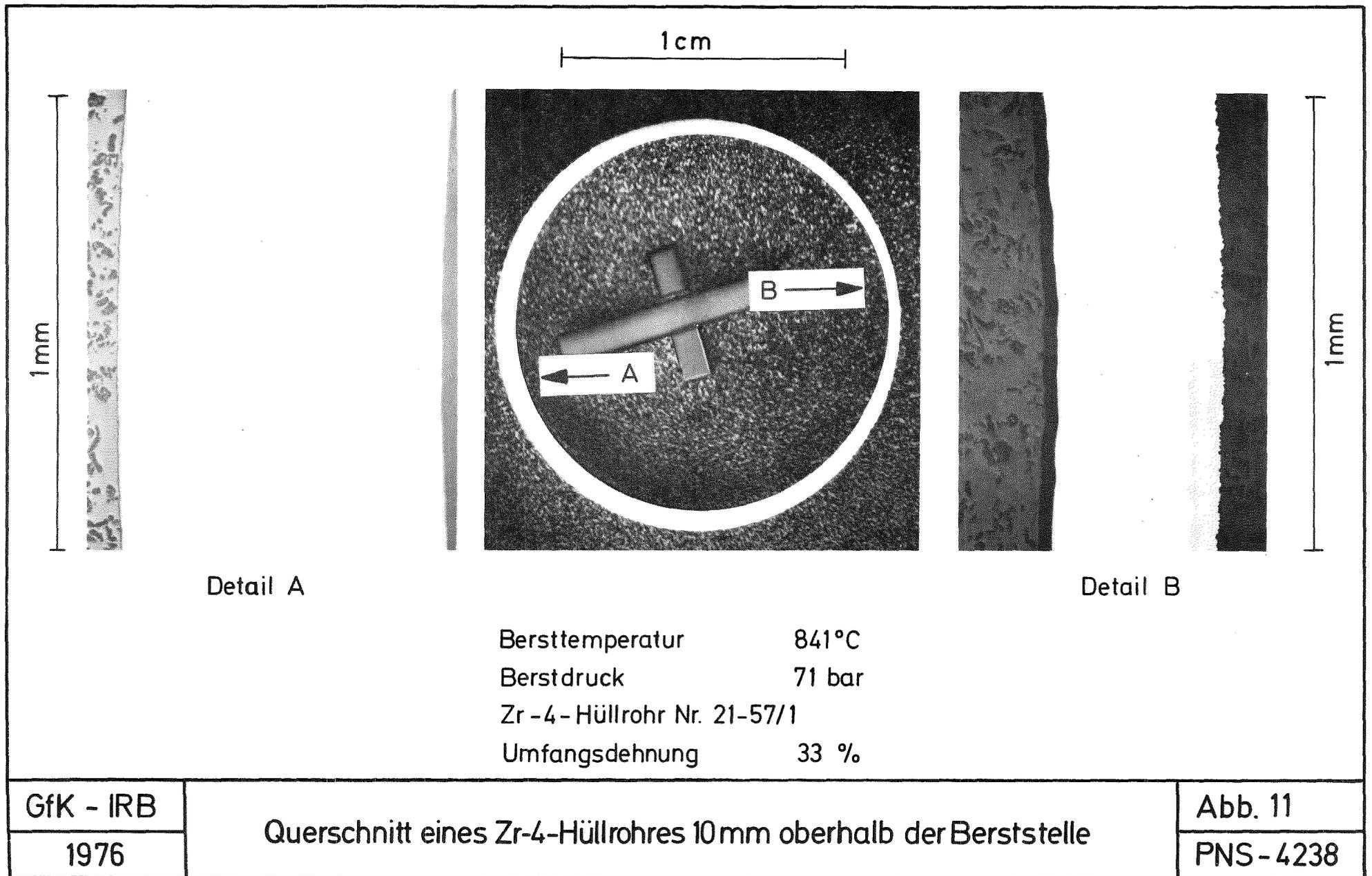


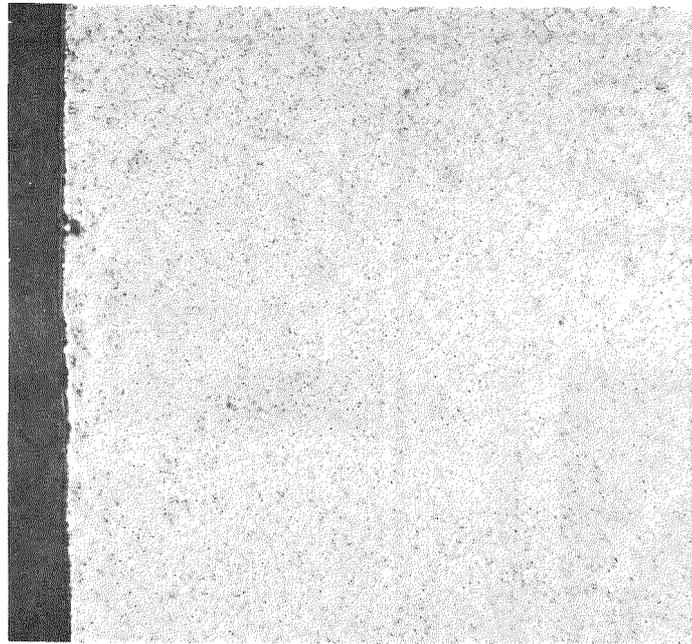
aufgeblähte und geborstene
Zircaloy - Hülle

GfK - IRB
1976

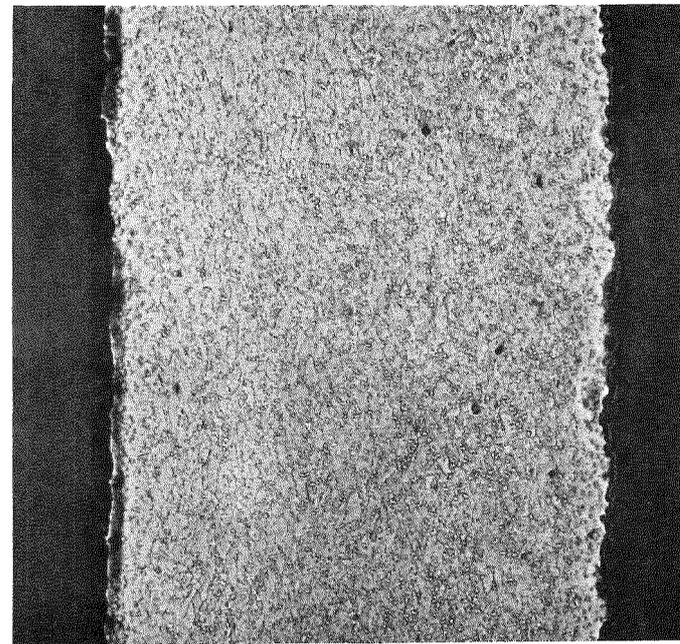
Röntgenbild des Brennstabsimulators

Abb. 10
PNS - 4238





0,5 mm



praktisch unverformt (A)

stark verformt (B)

Bersttemperatur 841 °C
Berstdruck 71 bar
Zirkaloy -4- Hüllrohr Nr. 21 -57/1
Umfangsdehnung 33 %

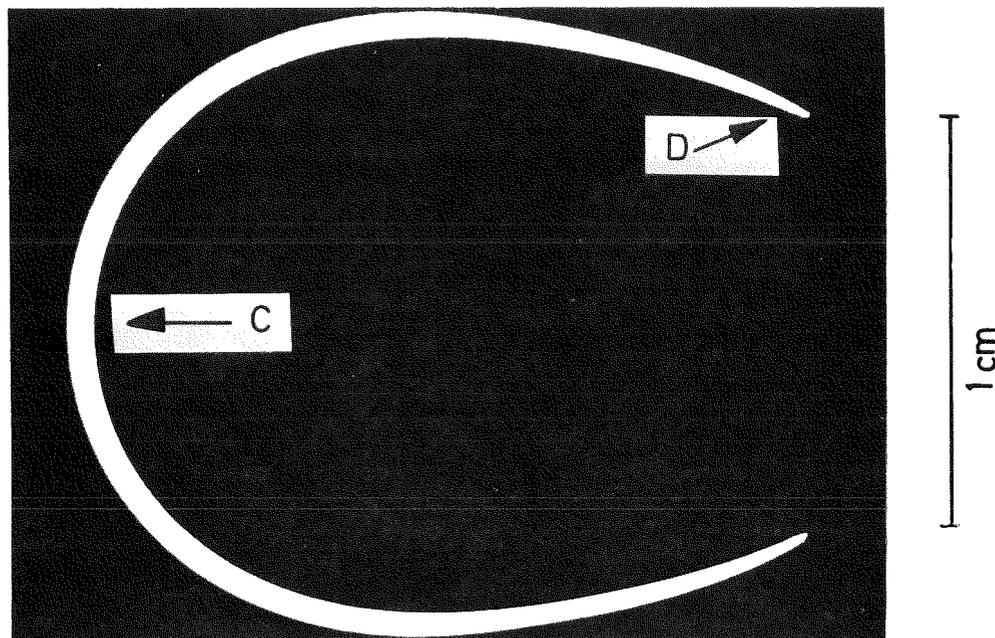
GfK- IRB

1976

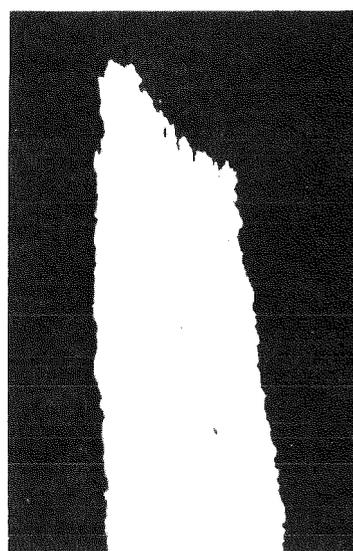
Schliffbilder aus Querschnitt von Zr-4-Hüllrohr 10mm oberhalb der Berststelle
Ätzung: Glyzerin + HNO + HF

Abb. 12

PNS-4238



Detail C



Detail D



Bersttemperatur 841 °C
 Berstdruck 71 bar
 Zr-4-Hüllrohr Nr. 21-57/1
 Umfangsdehnung 37 %

GfK-IRB	Querschnitt der Berststelle eines Zr-4-Hüllrohres	Abb. 13
1976		PNS-4238