

06.01.06/15A Berstversuche an Zircaloy-Hüllrohren unter kombinierter
PNS 4235.4 mechanisch-chemischer Beanspruchung (FABIOLA)
KfK-2950 (L. Schmidt, H. Lehning, K. Müller, D. Piel, H. Schleger,
Aug. 1981 IMF III)

Die Versuche in der Testeinrichtung FABIOLA dienen zur Untersuchung des Dehnungs- und Berstverhaltens von Zircaloy-4-Hüllrohren unter störfall-typischen Bedingungen /1/. Im Berichtszeitraum wurden die Berstexperimente unter Heißstabbedingungen weitergeführt. Schwerpunkt war die Untersuchung des Einflusses von Jod auf das Verformungsverhalten der Hüllrohre.

Für die on-line Erfassung des Verformungsvorganges wurde Anfang des Jahres ein neuartiges TV-Breitenmeßsystem in Betrieb genommen, das die Hüllrohrkontur vom Röntgenbildverstärker abnimmt.

Mit einem numerischen Rechenverfahren wurden für jeden Versuch mit den experimentell gewonnenen Daten für Druck und Temperatur die Standzeiten berechnet, um die Anwendbarkeit des von M. Boček entwickelten Rechenmodells zu überprüfen.

Mehrere Tests wurden durchgeführt zur Verifizierung der pyrometrischen Temperaturmessung und zur Ermittlung der azimuthalen Temperaturverteilung im Bereich der Beulzone.

1. Berührungslose on-line Dehnungsmessung

Die Erfassung des Aufbeulvorganges wurde bislang mit Hilfe der Röntgenkinematographie durchgeführt, wobei die Dehnkurven später sehr aufwendig manuell aus dem belichteten Filmmaterial ermittelt werden mußten. Durch den Einsatz eines messenden TV-Systems mit Rechnerkopplung ist es nun möglich, über den Helligkeitsunterschied an der Hüllrohr-Kontur den Dehnungsverlauf exakt zu erfassen /2/.

Die Teststrecke wird mit einer 160 kV-Röntgenröhre durchstrahlt und das Röntgen-Schattenbild des Brennstabsimulators, insbesondere des Zircaloy-Hüllrohres mit einem elektronischen Röntgen-Bildverstärker sichtbar gemacht. Dieses Bild wird von einer hochauflösenden TV-Kamera übernommen, die das Video-Signal einer Kamera-Kontrolleinheit mit nachgeschaltetem Breitenanalysator zuführt.

Hier wird innerhalb des Kontrastsprunges zwischen Hüllrohrkontur und dem hellen Strömungskanal der Teststrecke eine Grauwertschwelle eingestellt und aus dem Originalbild ein Binärbild erzeugt (siehe Abbildung 06.01.06/15A-1); d.h. die Graustufenauflösung beträgt nur ein Bit, also schwarz oder weiß. Dadurch ist die Kontur des Rohres eindeutig definiert. Dieses Bild wird invertiert und zeilenweise abgetastet, wobei die X-Koordinaten innerhalb eines vorgegebenen Meßfensters für den ersten schwarz/weiß und den letzten weiß/schwarz Übergang für jede Bildzeile digital ausgegeben und vom Rechnersystem übernommen werden. In Richtung der Stabachse (Y-Richtung) werden maximal 256 Bildzeilen gemessen und in Dehnungsrichtung (X-Richtung) beträgt die Auflösung des dargestellten Bildes 1024 Bildpunkte. Das entspricht einem X/Y-Verhältnis von 4:1. Die Auflösung der Rohrkontur ist abhängig vom Abbildungsmaßstab und beträgt bei einer abgebildeten Rohrlänge von 100 mm weniger als 0,1 mm ($y = 100/256$ mm, $\Delta x = y/4 = 0,098$ mm); der Rohrdurchmesser beträgt 10,75 mm. Zur Erfassung der Gesamtdehnung wird die Kontur in einer Bildzeile zweimal gemessen, so daß Durchmesseränderungen von weniger als 0,2 mm registriert werden können.

Während der Messung werden vom Rechnersystem nur die X-Werte der Hüllrohrkontur übernommen und gespeichert. Unmittelbar nach dem Experiment kann aus diesen Daten der gemessene Konturverlauf jedes einzelnen Bildes über einen Bildspeicher sichtbar gemacht werden. Abbildung 06.01.06/15A-1 zeigt vergrößert die gemessene Rohrkontur mit der Auflösung Δx .

Die Zykluszeit für ein TV-Bild beträgt 20 ms, das entspricht einer Frequenz von 50 Bildern/s oder 25 600 Meßwerten/s. Zur genauen Wiedergabe des Dehnungsverlaufes ist eine Meßfrequenz von 25 Bildern/s ausreichend. Die Charakteristik der gemessenen Dehnungsverläufe zeigt, daß diese Meßfrequenz nur gegen Ende des Versuches bei schnell zunehmender Hüllrohrverformung erforderlich ist. Um die Datenmenge in Grenzen zu halten, wird die Meßfrequenz während der Versuchszeit verändert.

Vor dem Beginn des Experimentes werden jeweils zwei Eichmessungen durchgeführt: Zuerst erfolgt mit einem entlang der Länge markierten Dummy-Stab eine Y-Eichung, die es ermöglicht, den gemessenen Dehnungsverlauf der axialen Lage der Temperaturmeßstellen genau zuzuordnen. Unmittelbar vor dem Setzen des Start-Signals wird dann am heißen Originalstab eine X-Eichung durchgeführt, die für jede Y-Ebene ein ΔD ermittelt, das dem wahren Durchmesser des Stabes entspricht.

Durch diese Eichmessungen können auch alle Verzerrungen des auszumessenden Bildes, die durch die optischen und magnetischen Systeme - insbesondere des Röntgenbildverstärkers - verursacht werden und zu Fehlmessungen führen könnten, kompensiert werden.

2. Berstversuche

Bei den durchgeführten Berstversuchen wurden Heißstabbedingungen eingestellt, d.h. bei konstantem Innendruck zwischen 40 und 125 bar wurde die Hüllrohrtemperatur mit Aufheizraten zwischen 7 und 10 K/s bis zum Bersten der Hülle hochgefahren. Die Brennstabsimulatoren waren mit Aluminiumoxid-Pellets beladen, als Druckgas wurde Helium verwendet. Außen wurden die Zircaloy-Hüllrohre von Heißdampf mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/s umströmt. Zur Untersuchung des Einflusses von Spaltprodukten auf das Verformungsverhalten der Hülle war ein Teil der Brennstabsimulatoren mit Jod geimpft. Die kritische Jodkonzentration, das ist die Konzentration, bei der im α -Phasenbereich des Zry-4 die Spannungsrißkorrosion den Versagensmechanismus bestimmt, wurde in einer Reihe von Versuchen mit 20 mg/cm^3 freies Volumen ermittelt. Dieser Wert liegt wesentlich über den in Einzeleffektuntersuchungen festgestellten Konzentrationen /3/ und wird zurückgeführt auf den speziellen Aufbau des FABIOLA-Brennstabsimulators. Neben den Untersuchungen zum Jodeinfluß im α -Phasenbereich wurden auch Experimente bei gleicher Jodkonzentration mit Bersttemperaturen im $\alpha+\beta$ -Phasenbereich oberhalb 820°C gefahren.

Die Abbildungen 06.01.06/15A-2 bis 06.01.06/15A-5 zeigen typische Versuchsergebnisse im α - und $\alpha+\beta$ -Phasenbereich jeweils mit und ohne Jod. Aufgetragen sind Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf sowie die berechnete Standzeit. Die Deformationsformen dieser Hüllrohre zeigt Abbildung 06.01.06/15A-6. Bei diesen Versuchen, die primär der Untersuchung des Jodeinflusses dienten, waren entsprechend den Umgebungsbedingungen größere azimutale Temperaturunterschiede vorhanden.

Im α -Phasenbereich wurden an jodfreien Stäben große Berstdehnungen gemessen. Stäbe mit Jod zeigten bei gleichen Versuchsparametern sehr kleine Dehnungen. Im $\alpha+\beta$ -Phasenbereich konnte kein Einfluß des Jods auf das Dehnungsverhalten festgestellt werden. In Abbildung 06.01.06/15A-7 sind die Berstdehnungen über der Bersttemperatur aufgetragen. Parameter ist die Aufheizrate. Auf die Standzeit der Hüllrohre, das ist die Versuchszeit von 600°C bis zum Bersten, hat das Jod weder im α - noch im $\alpha+\beta$ -Phasenbereich einen Einfluß.

Mit dem eingangs erwähnten Rechenmodell zur Bestimmung der Lebensdauer von Zircaloy-Hüllrohren /4/, die nicht-stationären Belastungsbedingungen unterworfen sind (Summenregel der Lebensanteile), wurde für alle Experimente die Standzeit berechnet. Eingabegrößen aus dem Experiment sind der gemessene Temperatur- und Druckverlauf. Wenn das Integral der Live Fraction Rule den Wert 1 erreicht hat, sind die theoretische Standzeit und die theoretische Bersttemperatur bekannt. Während im α -Phasenbereich eine recht gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung gefunden wurde, liegen im $\alpha+\beta$ -Phasenbereich die gerechneten Standzeiten im allgemeinen um mehr als 15 % niedriger als die experimentell ermittelten /5/. Abbildung 06.01.06/15A-8 zeigt die relative Abweichung der gerechneten von der experimentell ermittelten Standzeit für mehrere Versuche.

3. Temperaturmessung

Für die Auswertung der bisherigen Berstversuche ist die Verifizierung der pyrometrisch gemessenen Hüllrohrtemperaturen mit einem anderen Meßverfahren unter den verschiedenen Testbedingungen notwendig. Außerdem sollte die azimutale Temperaturverteilung im Bereich der Beulzone ermittelt werden, da die drei Pyrometer in der FABIOLA-Teststrecke axial übereinander mit einem Abstand von 75 mm angeordnet sind. Sie messen einen Bereich von 1 mm Breite mit 6 mm axialer Ausdehnung auf dem Umfang der Hülle. Für die einzelnen Testreihen wurden Brennstabsimulatoren mit speziellen Temperaturmeßstellen (direkt aufgeschweißte Pa/Pt-Thermoelemente) ausgerüstet. Bei den Versuchen zur Verifizierung der pyrometrischen Temperaturmessung lagen die Thermoelementmeßstellen in unmittelbarer Nähe der Pyrometer-Meßflecke auf der Hüllrohroberfläche. Bei Aufheizraten am Brennstabsimulator zwischen 2 und 10 K/s stimmten im Bereich von 700 bis 900°C beide Meßverfahren recht gut überein. Die Abweichungen liegen in diesem Bereich bei $\pm 1,5$ % von der Meßspanne. Von 550 bis 700°C sind die Abweichungen etwas größer; sie sind abhängig von der Genauigkeit der Pyrometer-Nullpunktjustierung. Eine Beeinflussung der Temperaturmessung durch die Temperatur am Dampfrohr - Aufheizrate wie am Brennstabsimulator oder konstante Temperatur von 600°C - konnte nicht festgestellt werden. Auch die Reduzierung der Dampfschwindigkeit in der Teststrecke hatte keinen Einfluß.

Zur Ermittlung der azimutalen Temperaturverteilung wurden im Bereich der Berststelle drei Thermoelemente am Umfang angebracht (siehe Abbildung 06.01.06/15A-9).

Bei diesem Aufbau der Teststrecke bildet sich die Berstzone vornehmlich zwischen den Pyrometermeßebebenen TP1 und TP3.

Es wurden Versuche mit Aufheizraten um 9 K/s bis zu maximalen Hüllrohroberflächentemperaturen von 1000°C gefahren. Die azimuthalen Abweichungen lagen je nach Temperaturniveau zwischen 8 und 14 K. Am Dampfführungsrohr lagen die gleichen Bedingungen vor wie bei den bisherigen Bersttests. Abbildung 06.01.06/15A-10 zeigt die Temperaturverläufe bei einem Aufheizversuch bis ca. 1000°C. Mit dem Brennstabsimulator, Abbildung 06.01.06/15A-9, wurden sieben Aufheiztests gefahren und anschließend ein Berstversuch durchgeführt. Die Temperaturverläufe während des Berstversuches sind in Abbildung 06.01.06/15A-11 dargestellt. Zum Zeitpunkt des Berstens wurde mit den drei Thermoelementen eine mittlere Temperatur von 889°C gemessen, azimuthale Abweichungen ± 7 K. Die Pyrometermessung TP1 liegt der Berstzone am nächsten und war 5 K kälter (884°C) als die mittlere Temperatur aus den Thermoelementmessungen.

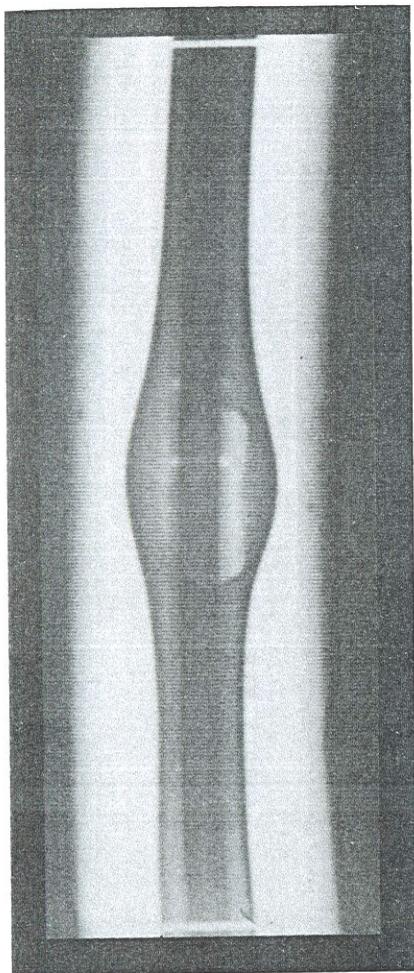
4. Geplante Weiterarbeit

- Abschließen der bisherigen Versuchsserie mit Berstversuchen an UO₂-gefüllten Brennstabsimulatoren.
- Einbau einer modifizierten Teststrecke und Vorversuche zur Temperaturverteilung am Brennstabsimulator.
- Ausbau des Datenerfassungssystems im Hinblick auf längere Versuchszeiten und zur Beschleunigung der Versuchsauswertung und Dokumentation.

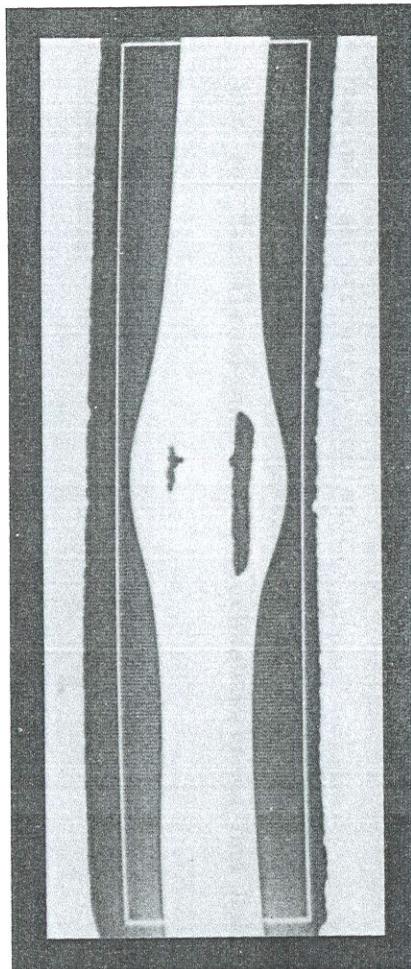
5. Referenzen

- /1/ H. Lehning, K. Müller, D. Piel, L. Schmidt
Berstversuche an Zircaloy-Hüllrohren unter kombinierter mechanisch-chemischer Beanspruchung (FABIOLA)
Jahrestagung Kerntechnik, Berlin, 25.-27. März 1980, S. 231-234
- /2/ D. Piel
unveröffentlichter Bericht des KfK (1980)

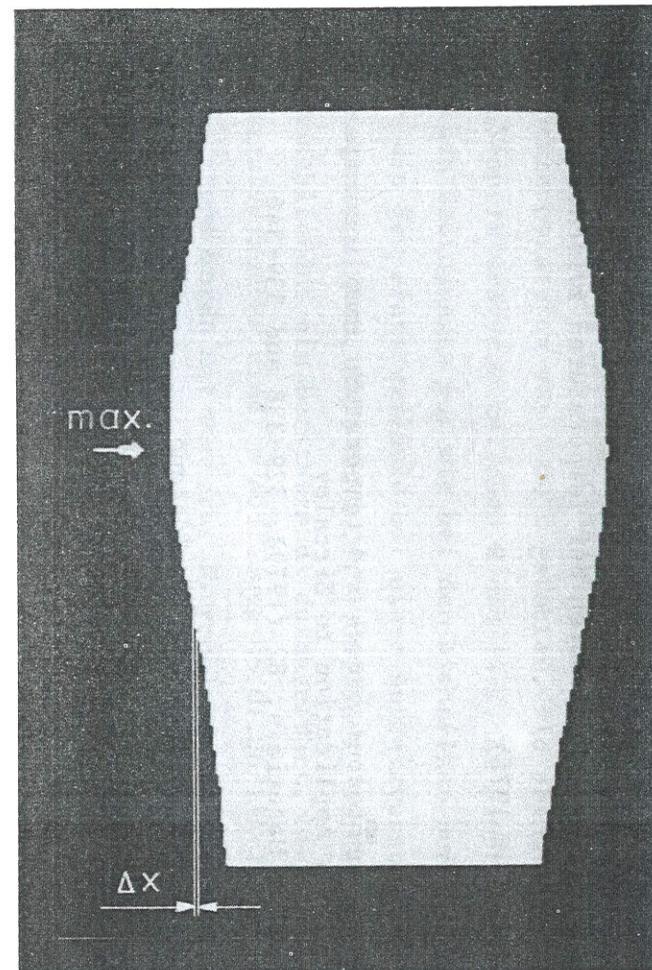
- /3/ P. Hofmann
Einfluß des Spaltproduktelementes Jod auf das Verformungs- und Bruchverhalten von Zircaloy-4-Hüllrohren bei Temperaturen zwischen 600 und 1000°C
KfK 2661 (September 1978)
- /4/ M. Boček
Creep rupture at monotonous stress and temperature ramp loading.
I. Calculation, II. Application to Zircaloy
Journal of Nuclear Materials, 82 (1979), 329-338 and 339-346
- /5/ M. Boček, C. Petersen, L. Schmidt, E. Toscano
Verification of life time predictions by means of temperature transient burst tests on Zry-4 fuel rod simulators
NEA/CSNI Specialist Meeting on Safety Aspects on Fuel Behaviour in Off-Normal and Accident Conditions, Espoo, September 1-4, 1980



Originalbild



Binärbild



gemessener Konturverlauf

Abb.: 06.01.06/15A-1

KIK IMF III

FABIOLA On - line Dehnungsmessung

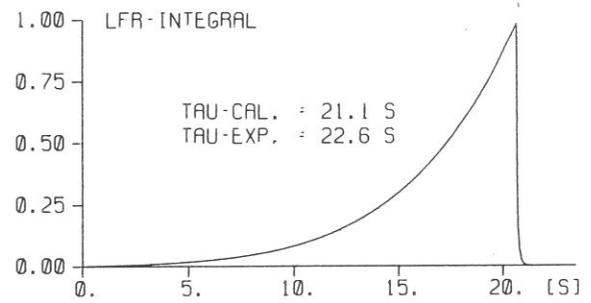
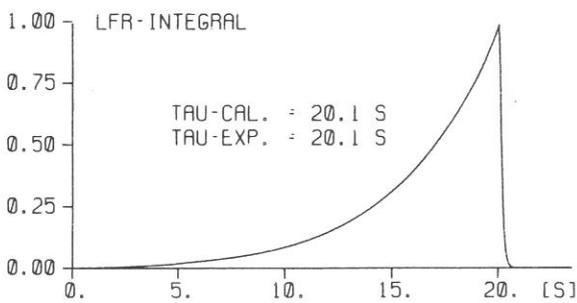
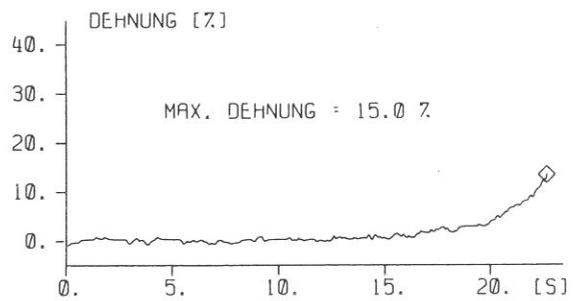
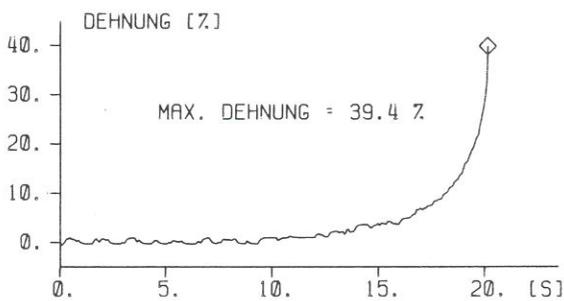
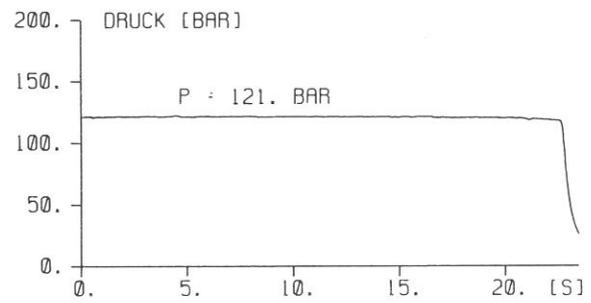
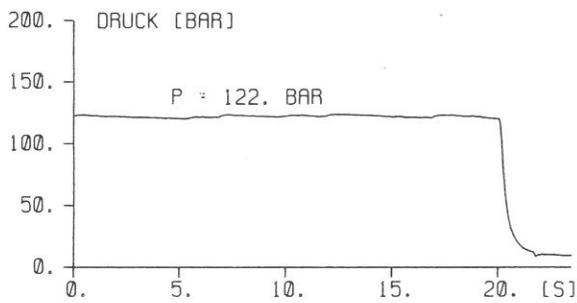
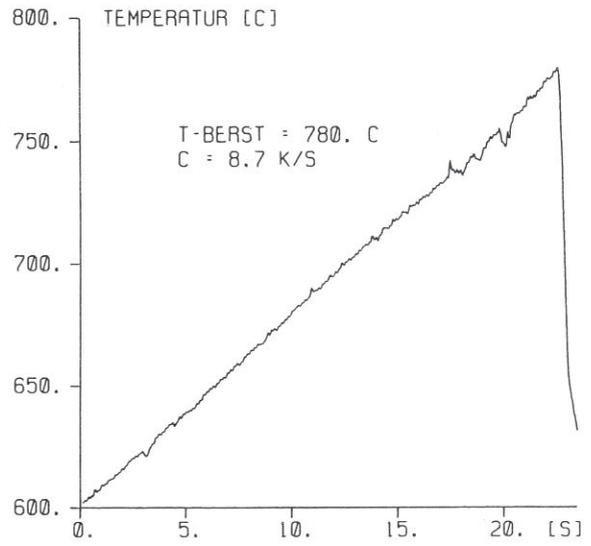
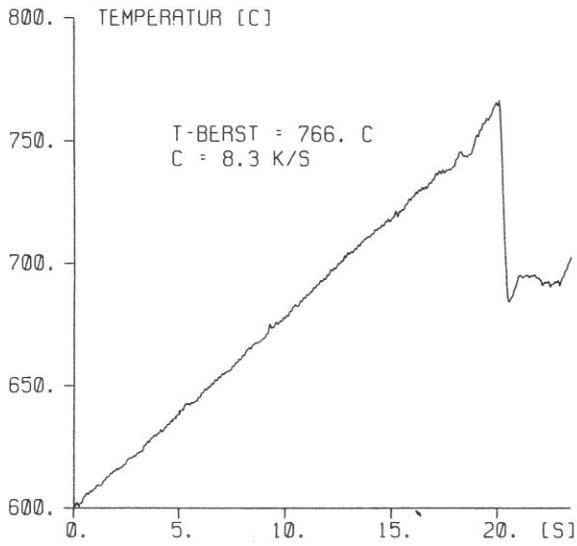


Abb.: 06.01.06/15A-2

Berstversuch mit Stab Nr. 64
ohne Jod, α -Phasenbereich

Abb.: 06.01.06/15A-3

Berstversuch mit Stab Nr. 37
mit Jod, α -Phasenbereich

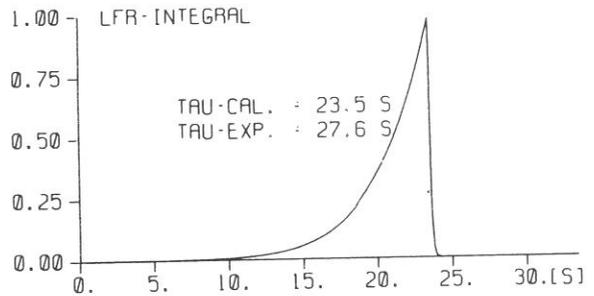
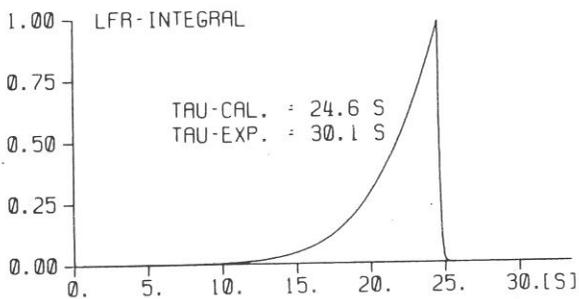
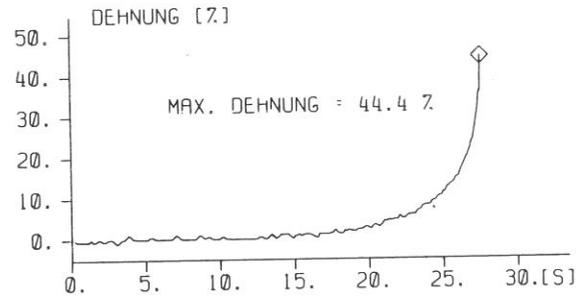
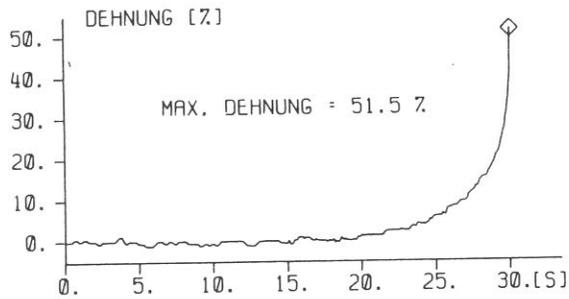
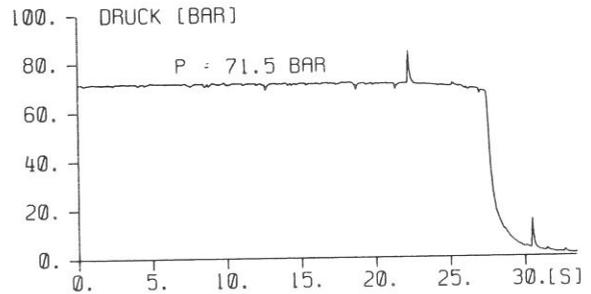
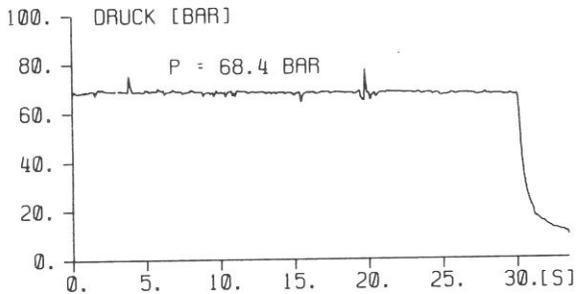
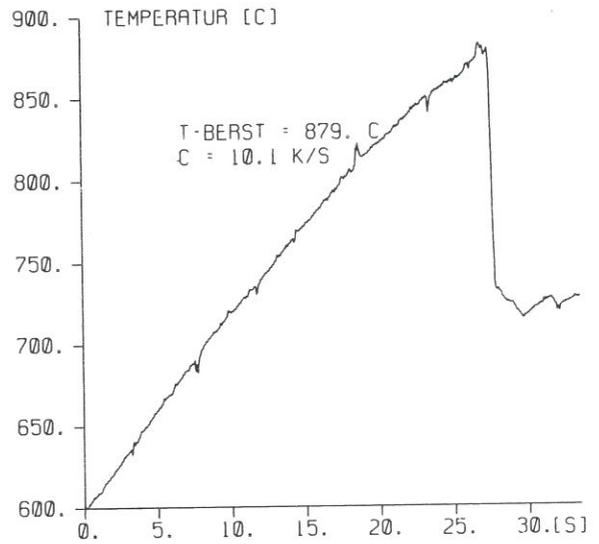
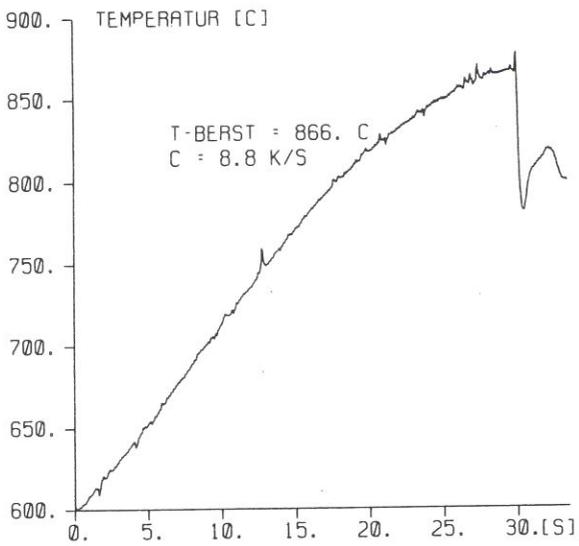
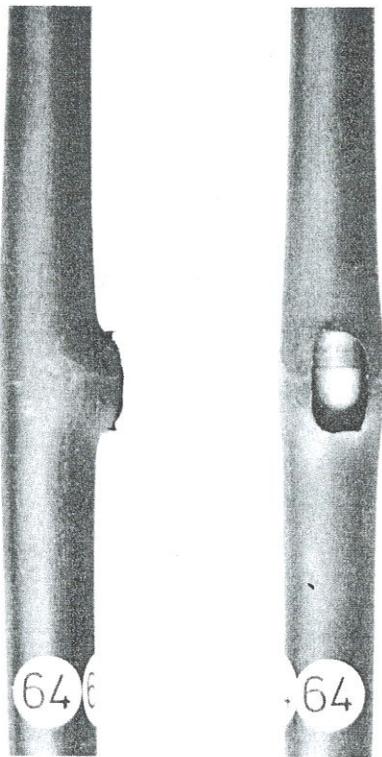


Abb.: 06.01.06/15A-4

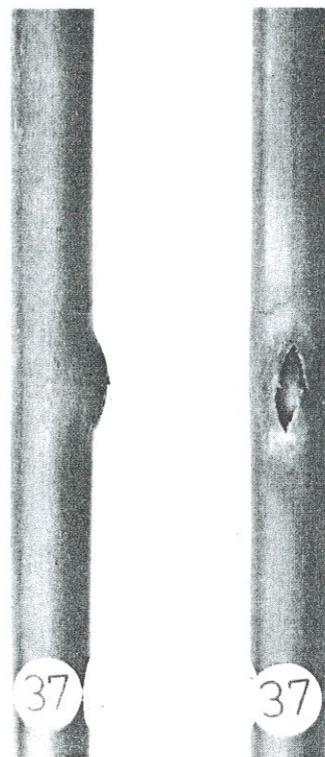
Berstversuch mit Stab Nr. 62
ohne Jod, $\alpha+\beta$ -Phasenbereich

Abb.: 06.01.06/15A-5

Berstversuch mit Stab Nr. 56
mit Jod, $\alpha+\beta$ -Phasenbereich



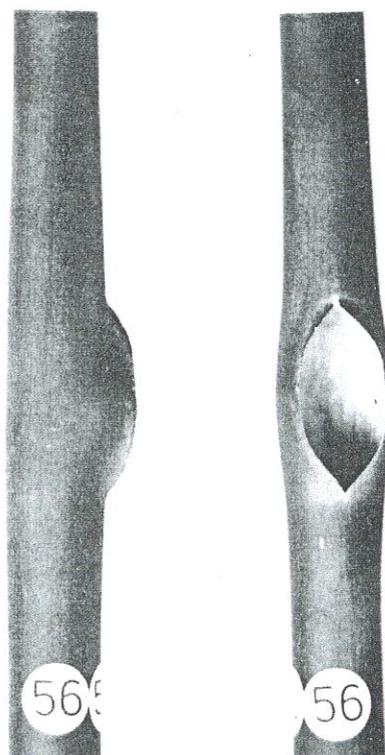
Stab Nr. 64
ohne Jod, α -Phasenbereich
 $\epsilon_{\max} = 39,4 \%$



Stab Nr. 37
mit Jod, α -Phasenbereich
 $\epsilon_{\max} = 15 \%$



Stab Nr. 62
ohne Jod, $\alpha+\beta$ -Phasenbereich
 $\epsilon_{\max} = 51,5 \%$



Stab Nr. 56
mit Jod, $\alpha+\beta$ -Phasenbereich
 $\epsilon_{\max} = 44,4 \%$

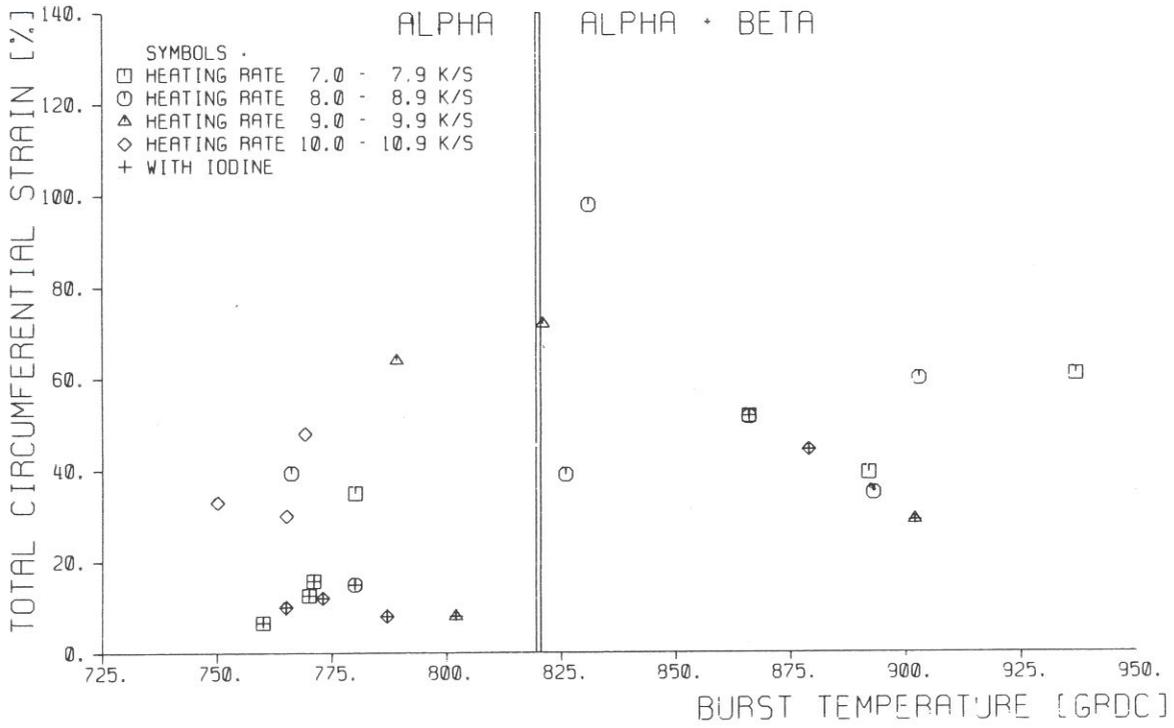


Abb.: 06.01.06/15A-7

Berstdehnung über der Bersttemperatur

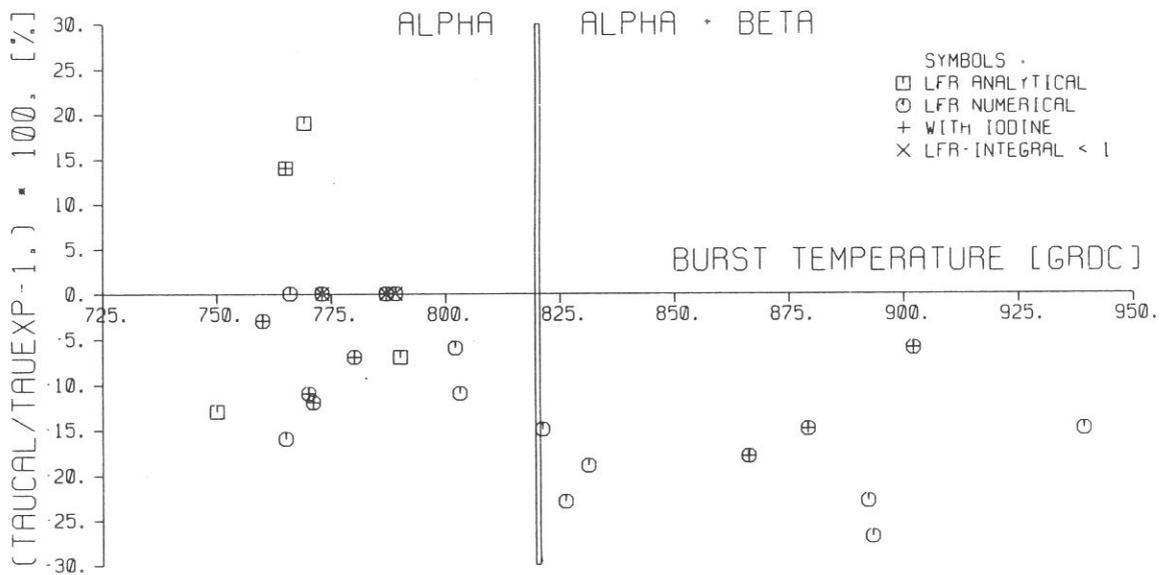


Abb.: 06.01.06/15A-8

Relative Abweichungen der gerechneten von den gemessenen Standzeiten

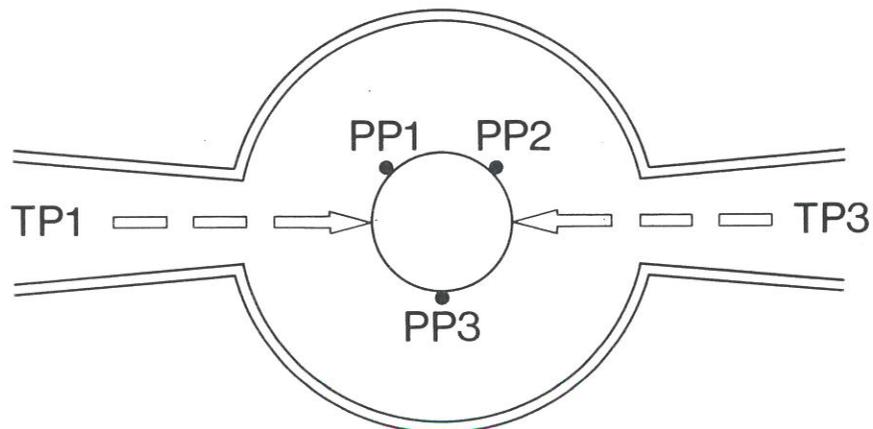
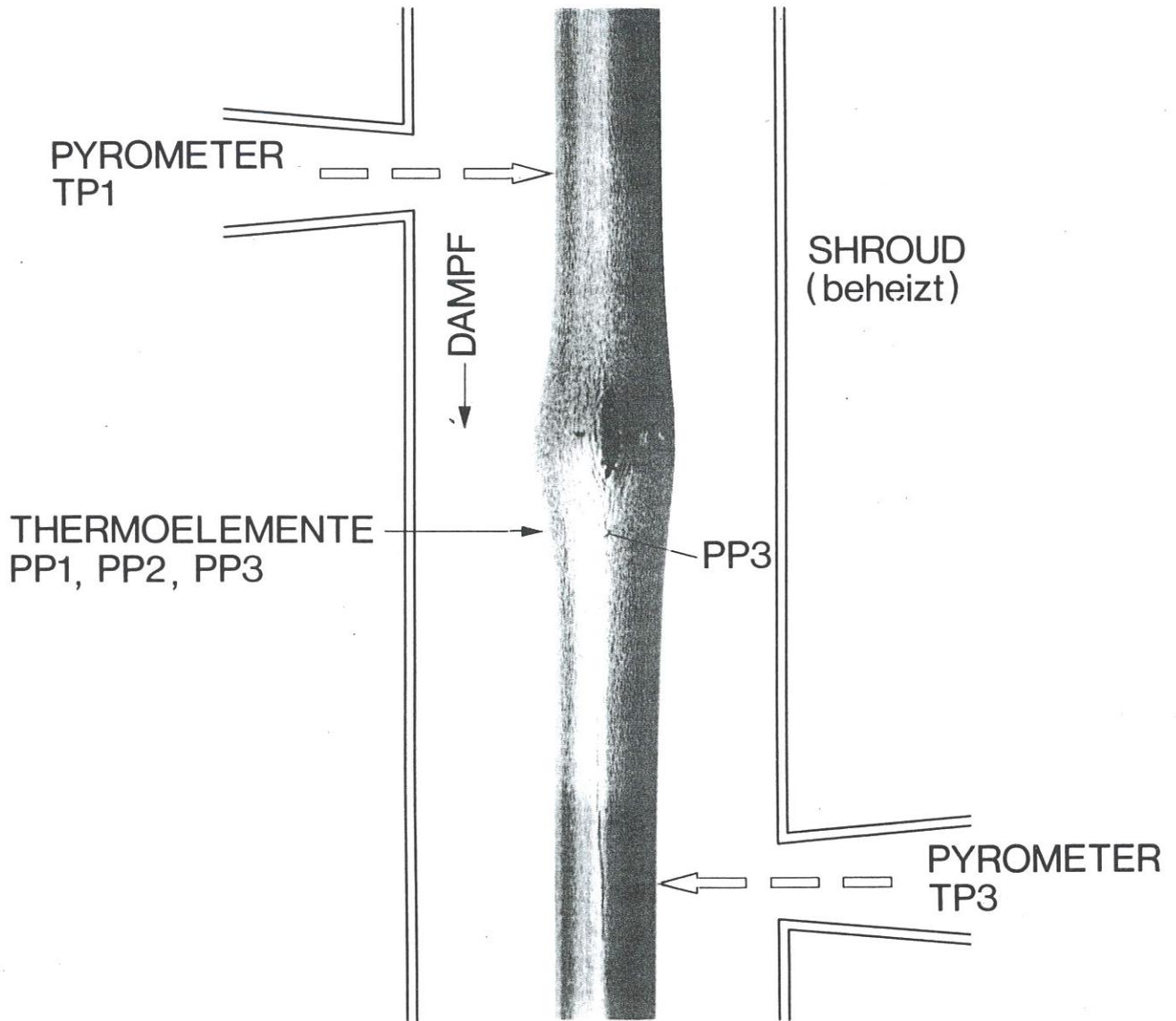


Abb.: 06.01.06/15A-9

Meßanordnung zur Ermittlung der azimuthalen Temperaturverteilung

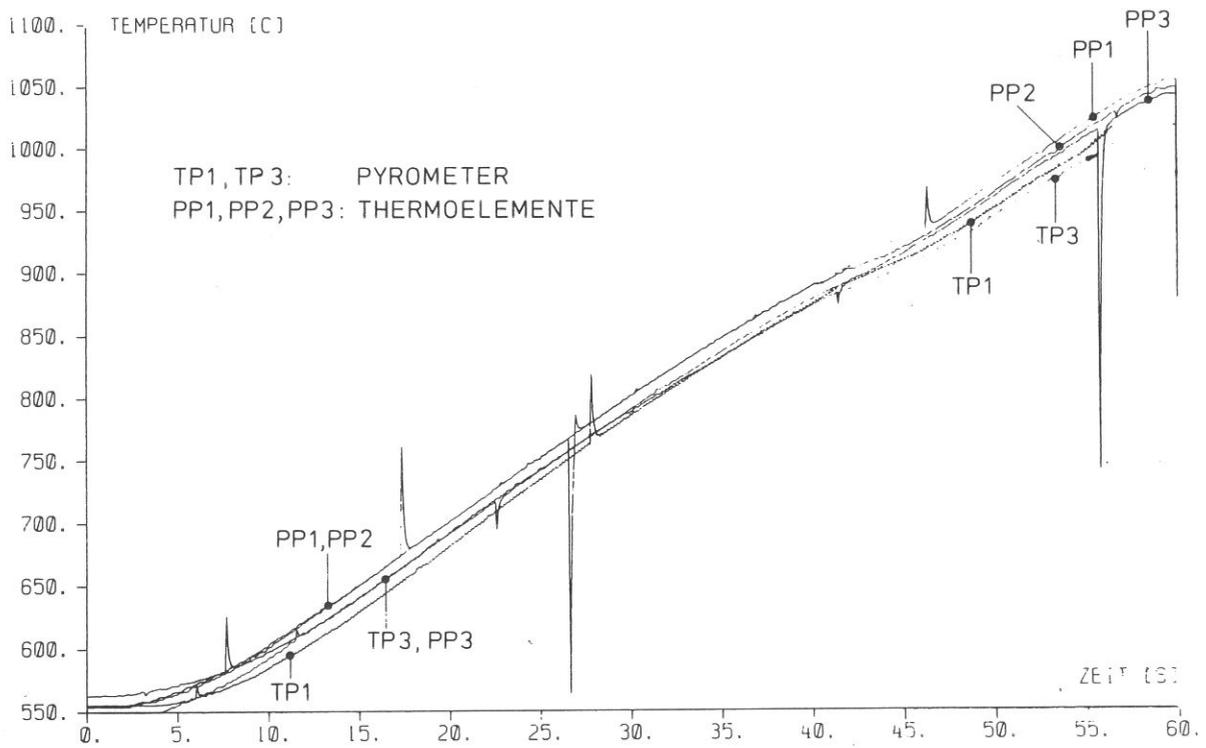


Abb.: 06.01.06/15A-10

Temperaturverteilung auf der Hüllrohroberfläche ohne Innendruckbelastung

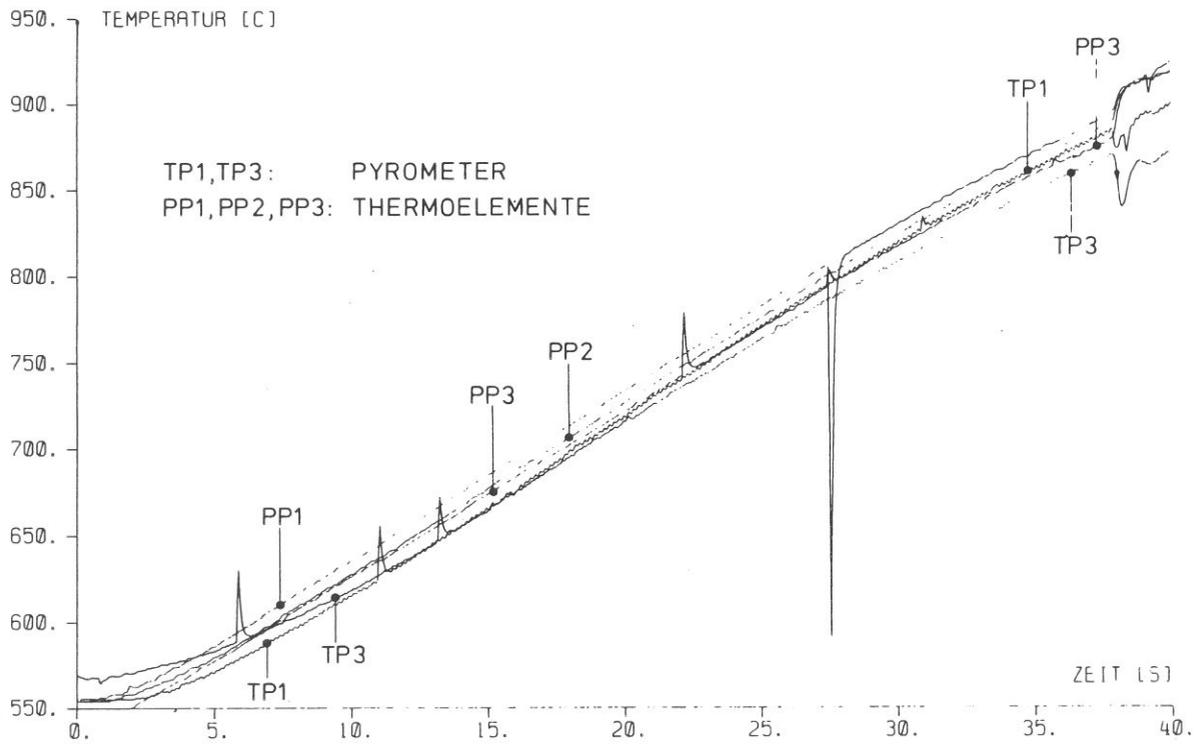


Abb.: 06.01.06/15A-11

Temperaturverteilung auf der Hüllrohroberfläche beim Berstversuch

06.01.06/19A Berstversuche an Zircaloy-Hüllrohren unter kombinierter
PNS 4235.4 mechanisch-chemischer Beanspruchung (FABIOLA)
KfK-3250 (L. Schmidt, H. Lehning, K. Müller, D. Piel, H. Schleger,
Juni 1982 IMF III)

In der Testeinrichtung FABIOLA wird das Beul- und Berstverhalten von Zircaloy-4-Hüllrohren in Einzelstabexperimenten unter störfalltypischen Bedingungen untersucht.

Das bisherige Testprogramm, bei dem schwerpunktmäßig der Einfluß von Spaltprodukten und der Einfluß des Sauerstoffpotentials des UO_2 auf das Verformungsverhalten der Hülle im Vordergrund stand, wurde mit Versuchen an UO_2 -gefüllten Brennstabsimulatoren abgeschlossen.

Eine neue Teststrecke wurde entwickelt und in Betrieb genommen. Danach wurde mit einer größeren Testserie unter Heißstabbedingungen begonnen. Hierbei werden erhöhte Anforderungen an die Temperaturgleichmäßigkeit am Hüllrohr im Bereich der Beulzone gestellt. Die Daten dieser Tests dienen zur Verifizierung verschiedener Rechencodes.

FABIOLA-Teststrecke

Bei den FABIOLA-Versuchen wird die Oberflächentemperatur des Zircaloy-Hüllrohres berührungslos mit Pyrometern gemessen. Dies hat zur Folge, daß die Teststrecke entsprechend gestaltet sein muß und im Dampfführungsrohr (Shroud) im Bereich der Meßstellen Durchbrüche vorhanden sein müssen. Da das Dampfführungsrohr insbesondere bei den Versuchen mit UO_2 auch gleichzeitig die Funktion einer dichten und in gewisser Weise auch druckfesten Barriere zu erfüllen hatte, mußten die Durchbrüche über eine aufwendige Anordnung abgedichtet werden.

Die unterschiedliche Anhäufung von Material am direkt beheizten Shroud hatte einen ungünstigen Einfluß auf die Temperaturverteilung auf der Brennstabsimulatoroberfläche. Bei der neuen Teststrecke wurde deshalb ein Doppelrohrsystem verwendet.

Abbildung 06.01.06/19A-1 zeigt die Röntgenaufnahme eines Teststreckenabschnittes im Bereich der mittleren Pyrometerebene. Der innenliegende, direkt beheizte Shroud ist ein glattes Rohr aus Inconel mit kleinen Öffnungen für die Pyrometer. Das äußere Rohr ist als dichte und druckfeste Barriere ausgebildet und wird indirekt beheizt. Der Dampf strömt im Ringraum zwischen dem

zentralen Brennstabsimulator und dem Shroud von oben nach unten. Der Heizer im indirekt beheizten Brennstabsimulator ist profiliert und bewirkt, daß sich im Hüllrohr ein axiales Temperaturprofil aufbaut und das Temperaturmaximum immer am gleichen Ort, im Bereich der Pyrometermeßebene, liegt. Dies wird in der oben genannten Abbildung deutlich veranschaulicht. Das Maximum der Beule liegt direkt am Pyrometermeßfleck. Damit ist eine exakte Zuordnung von Temperatur- und Dehnungsverlauf gegeben.

Da das Pyrometer nur eine Stelle am Umfang des Hüllrohres erfaßt, wird zwischen den einzelnen Testreihen die azimutale Temperaturverteilung an Brennstabsimulatoren ermittelt, die zusätzlich mit mehreren Thermoelementen instrumentiert sind.

Die gewählte Doppelrohranordnung erlaubt Aufheizraten von 2 K/s bis ca. 30 K/s bei Stablängenleistungen von 5 W/cm bis 90 W/cm (Mittelwerte). Der Shroud wird während des Versuches mit der gleichen Aufheizrate hochgeheizt wie der Brennstabsimulator. Das äußere indirekt beheizte Druckrohr wird auf einem höheren Temperaturniveau gehalten, so daß mit Sicherheit auch an den außen liegenden Pyrometerfenstern keine Dampfkondensation auftritt.

Ergebnisse

Die Versuche mit UO_2 -gefüllten Brennstabsimulatoren zeigten, daß im Einphasenbereich des Zircaloy-4 (α -Phase) das UO_2 keinen Einfluß auf das Beul- und Berstverhalten der Hülle hat. Dies wurde auch schon bereits bei den Einzeleffektuntersuchungen festgestellt. In Anwesenheit von Jod tritt auch wieder Spannungsrißkorrosion auf mit extrem kleinen Berstdehnungen. Die Versuche wurden durchgeführt bei Innendrücken von ca. 120 bar und Aufheizraten um 11 K/s. Die Bersttemperaturen lagen bei ca. 800°C und die Berstdehnungen beim jodfreien Stab bei ca. 60 % und beim Stab mit Jod bei ca. 10 %. Ähnliche Werte wurden an Stäben mit Al_2O_3 -Füllung gemessen, die den gleichen Testbedingungen unterworfen waren.

Die Experimente unter Heißstabbedingungen sind erst angelaufen, so daß vorerst nur ein kurzer Überblick über die bisherigen Ergebnisse gegeben werden soll. Zwei Versuchsreihen konnten abgeschlossen werden. Die Aufheizraten betragen ca. 5 K/s und ca. 10 K/s, die Innendruckbelastungen lagen jeweils bei 140, 120, 80 und 50 bar. Die mit Thermoelementen im Beulbereich gemessenen azimutalen Temperaturabweichungen lagen bei ca. 10 K.

Die Bersttemperaturen über dem Berstdruck, Abbildung 06.01.06/19A-2, zeigen

ähnliche Werte, wie auch von anderen Experimentatoren ermittelt. Bei den hohen Drücken 120 und 140 bar liegen die Bersttemperaturen im Einphasenbereich des Zircaloy (α -Phase), bei den niedrigeren Drücken im Zweiphasenbereich ($\alpha+\beta$ -Phase).

In Abbildung 06.01.06/19A-3 sind die Berstdehnungen über der Bersttemperatur aufgetragen. Parameter ist die Aufheizrate. Es ist deutlich zu erkennen, daß im α -Phasenbereich die Dehnungen mit zunehmender Bersttemperatur größer werden und im Übergangsbereich zum Zweiphasenbereich hin ein Maximum erreichen.

Mit zunehmender Bersttemperatur nehmen die Berstdehnungen wieder ab und erreichen bei ca. 960°C ein Minimum. Bei weiter steigender Bersttemperatur werden die Dehnungen wieder größer.

Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten des REBEKA-Modells. Auch die Nachrechnung verschiedener Dehnungsverläufe mit dem NORA-Modell ergab gute Übereinstimmungen.

Geplante Weiterarbeit

- Abschluß der begonnenen Versuchsserie unter Heißstabbedingungen
- Auswertung und Dokumentation der Versuchsergebnisse
- Erweiterung der Testeinrichtung für Temperaturen über 1000°C

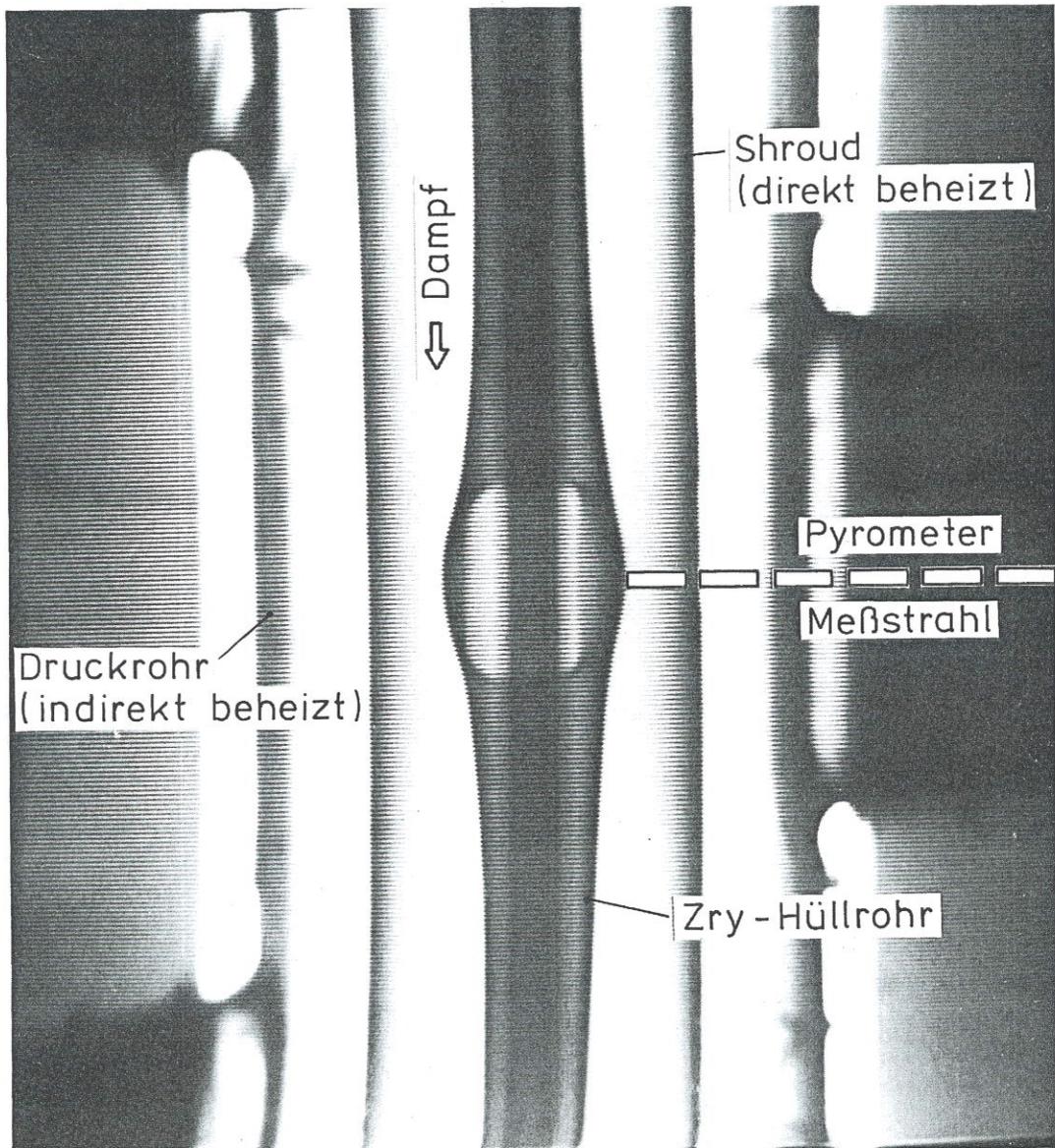


Abbildung 06.01.07/19A-1: FABIOLA-Teststrecke
Röntgenbildausschnitt

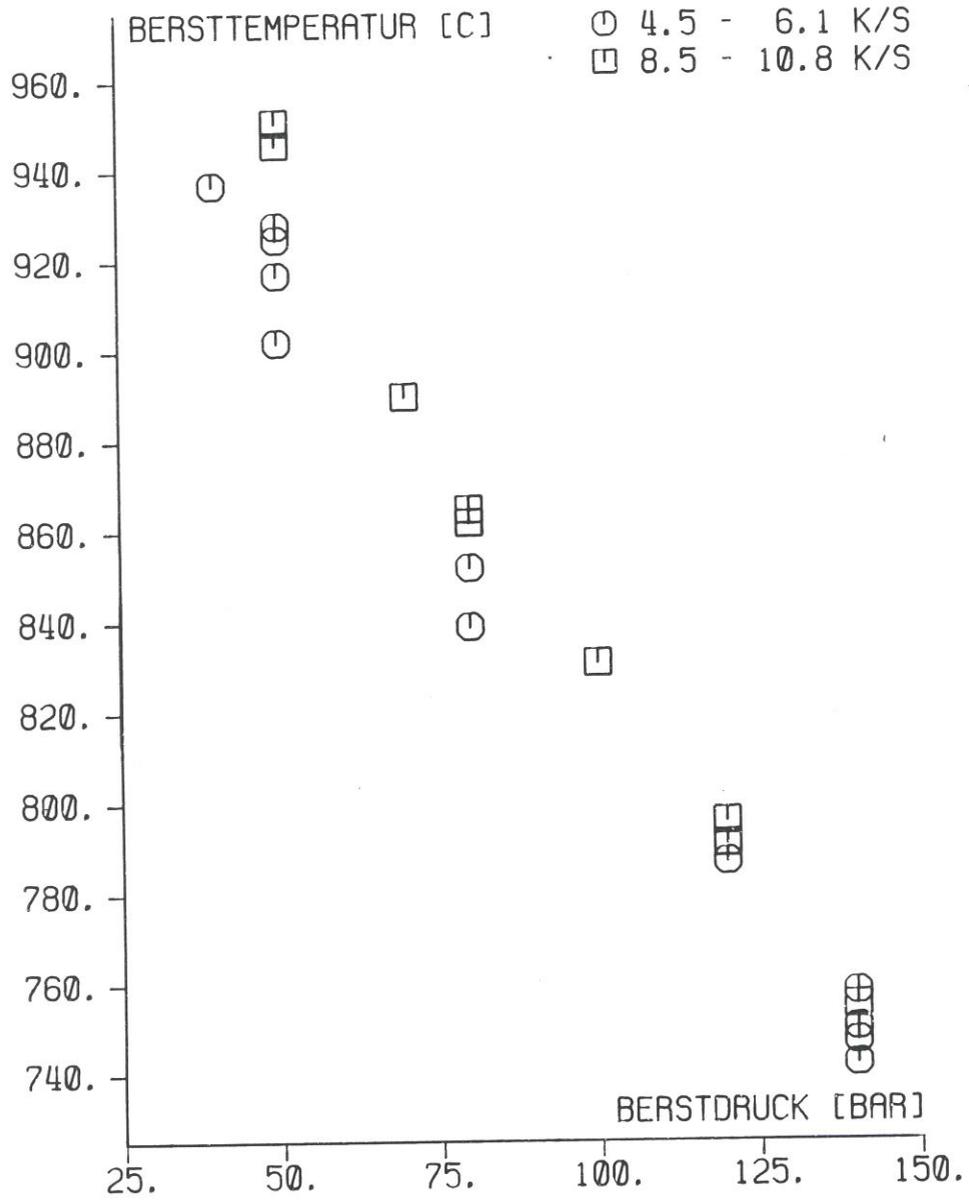


Abbildung 06.01.06/19A-2: FABIOLA-Testergebnisse
Bersttemperatur über Berstdruck

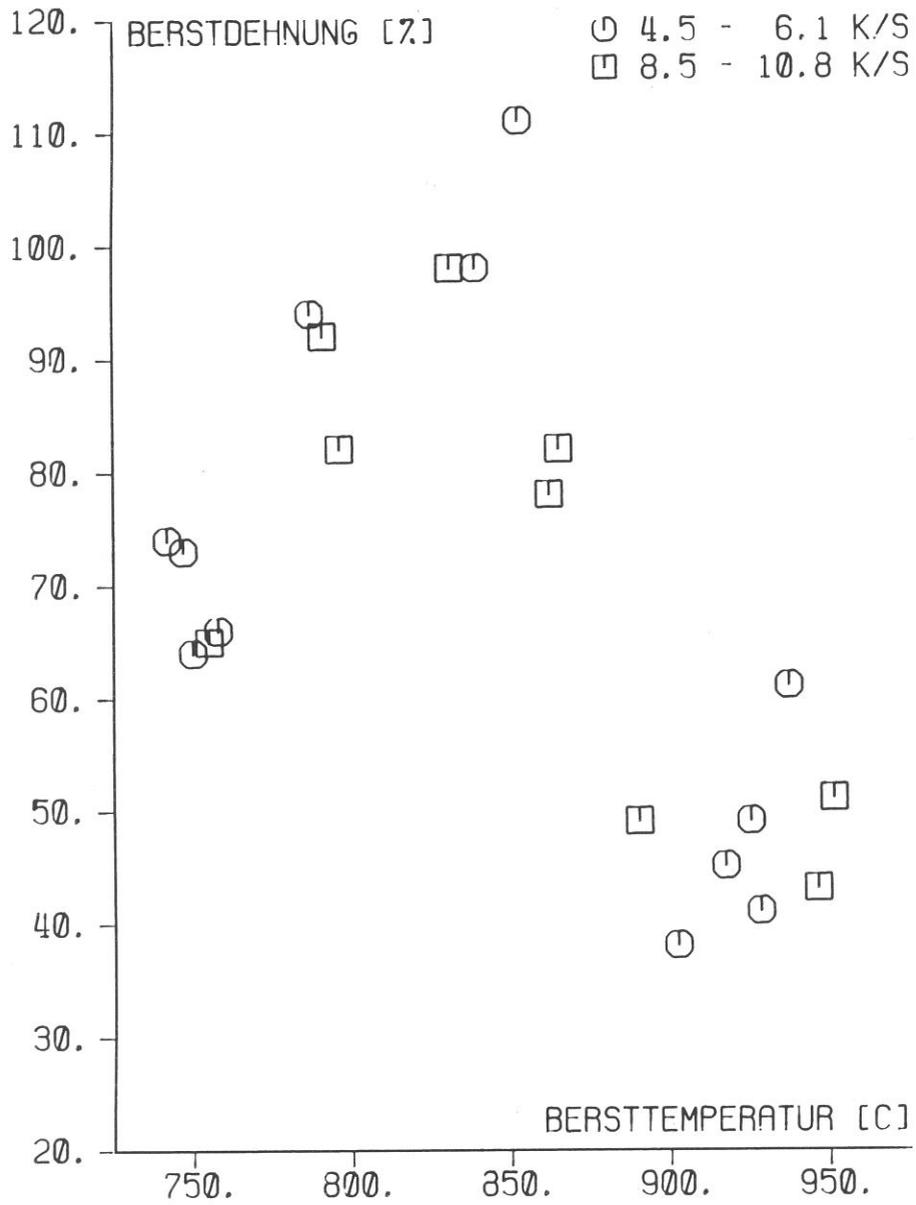


Abbildung 06.01.06/19A-3: FABIOLA-Testergebnisse
Borstdehnung über Bersttemperatur

O6.01.06/23A
PNS 4235.4
KfK-3350
Juli 1983

Berstversuche an Zircaloy-Hüllrohren unter kombinierter
mechanisch-chemischer Beanspruchung (FABIOLA)
(L. Schmidt, H. Lehning, D. Piel; IMF III)

In der Testeinrichtung FABIOLA wird das Beul- und Berstverhalten von Zircaloy-Hüllrohren untersucht. In 1982 wurden die Berstversuche unter Heißstabbedingungen weitergeführt. Dabei werden die Hüllrohre bei konstanter Innendruckbelastung bis zum Bersten mit gleichmäßiger Aufheizrate hochgeheizt. Die Versuchsreihe mit einer Aufheizrate von ca. 2 K/s konnte abgeschlossen werden. Tests mit Aufheizraten um 20 K/s wurden in Angriff genommen. Die Innendrucke lagen jeweils bei 50, 80, 120 und 140 bar.

In Abbildung O6.01.06/23A-1 sind für die bisher durchgeführten Heißstabversuche die Berstdehnungen in Abhängigkeit von der Bersttemperatur aufgetragen.

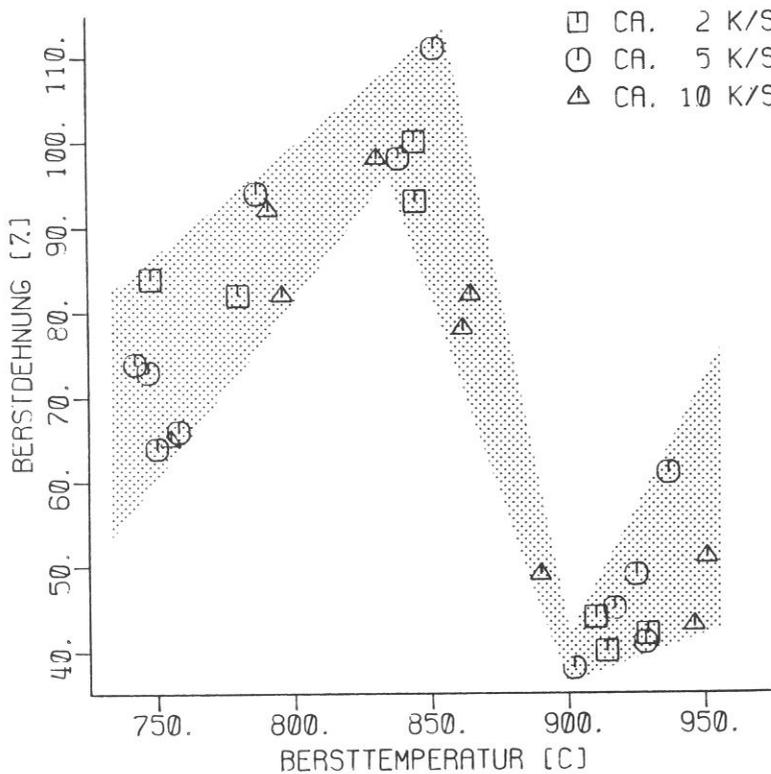


Abbildung O6.01.06/23A-1: FABIOLA-Testergebnisse
Burstdehnung über Bursttemperatur

Es handelt sich um ausgewählte Experimente, bei denen die azimutalen Temperaturabweichungen im Bereich der Berstzone unter 15 K lagen. Das Bild zeigt den bekannten Dehnungsverlauf mit einem Maximum im Übergangsbereich zum Zweiphasenbereich des Zircaloy-4 hin ($\alpha+\beta$ -Phase) und einem Minimum bei ca. 900°C.

In der FABIOLA-Teststrecke werden die Temperaturen pyrometrisch gemessen. Da der Temperaturverlauf nur auf einem kleinen Meßfleck am Umfang des Hüllrohres erfaßt wird, ist es erforderlich, für jede Versuchsreihe die Einstellungsparameter für die Versuchsführung zu ermitteln. Dazu dient ein spezieller Brennstabsimulator, der mit mehreren geeichten Thermoelementen ausgerüstet ist. Die Meßstellen sind in die Hülle eingelassen, um Verfälschungen auszuschließen, die durch die Dampfströmung verursacht werden können. Es ist somit möglich den Versuchsablauf so zu gestalten, daß eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung am Umfang erreicht wird.