

KfK 3168

Juli 1981

Verformungsverhalten von Zircaloy-4-Hüllrohren unter Schutzgas im Temperaturbereich zwischen 600 und 1200°C

P. Hofmann, S. Raff

Institut für Material- und Festkörperforschung
Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3168

Verformungsverhalten von Zircaloy-4-Hüllrohren unter Schutz-
gas im Temperaturbereich zwischen 600 und 1200°C

P.Hofmann, S. Raff

unter Mitarbeit von

G.Gausmann

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Im Temperaturbereich zwischen 600 und 1200°C wurden isotherme, isobare Zeitstandexperimente mit kurzen Zircaloy-4-Rohrproben unter Schutzgas durchgeführt, um experimentelle Daten zur Unterstützung der Entwicklung des Hüllrohr-Deformationsmodells NORA zu erhalten. Die Rohrrinnendruckwerte wurden so gewählt, daß die Standzeiten zwischen 2 und 2000 s variierten. Entsprechende Zeitstandkurven werden angegeben. Bei gegebenen Werten von Temperatur und Berstdruck wurde auch der zeitliche Verformungsverlauf der Rohrproben ermittelt. Dadurch war es möglich, Spannungs-Dehnungsgeschwindigkeit-Dehnungsdiagramme zu erstellen. Aufgrund der angewandten Art der Probenaufheizung (Strahlungsheizung) ist die Temperaturdifferenz am Hüllrohrumfang sehr klein (≤ 3 K). Die ermittelten Berstdehnungen von 37 bis 120% stellen daher Maximalwerte dar, die allerdings von der Verformungsgeschwindigkeit und der Temperatur abhängen. Infolge der großen Verformungen kommt es im gesamten Temperaturbereich zu Rohrverkürzungen. Als Ursache der im α -Phasengebiet des Zircaloy verstärkt auftretenden Rohrverkürzung als auch der in diesem Temperaturbereich gleichzeitig auftretenden Rohrverbiegung wird anisotropes Deformationsverhalten vermutet.

Deformation Behavior of Zircaloy-4 Cladding Tubes under Inert Gas Conditions in the Temperature Range from 600 to 1200°C

Summary

Within the temperature range from 600 to 1200°C isothermal, isobaric creep rupture experiments were performed under inert gas with short Zircaloy-4 tube specimens in order to obtain experimental data supporting the development of the NORA cladding tube deformation model. The values of the tube inner pressure were so selected that the time-to-failure values varied between 2 and 2000 s. The corresponding creep rupture curves are indicated. Besides the temperature and the burst pressure the development of deformation over time of the tube specimens was measured. This allowed to draw diagrams of stress, strain rate and strain. On account of the type of specimen heating applied (radiation heating) the temperature difference at the cladding tube circumference is very small (≤ 3 K). The 37 to 120% burst strains determined are therefore maximum values which, however, are dependent on the rate of deformation and on the temperature. Due to the large radial deformations the tubes are shortened axially over the whole temperature range. The supposed cause of tube shortening, occurring above all in the α -phase range of Zircaloy, and of the simultaneous tube bending in this temperature range is the anisotropic deformation behavior.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Versuchsdurchführung	2
3. Datenerfassung und -darstellung	4
3.1 Datenabspeicherung	4
3.2 Datendarstellung	4
4. Versuchsergebnisse	5
4.1 Zeitlicher Verformungsverlauf	5
4.2 Versagensverhalten	8
5. Diskussion	11
5.1 Bedeutung isothermer Experimente	11
5.2 Anisotropie	12
5.3 Berstdehnung und Berstspannung	13
5.4 Verformungsverhalten	15
6. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen	16
7. Literatur	17
Tabellen	19
Abbildungen	21

TABELLEN

- Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Zircaloy-4-Hüllrohre
- Tab. 2: Berstdaten der isotherm/isobaren Rohrrinnendruck- Zeitstandexperimente mit as-received Zircaloy-4-Hüllrohren

ABBILDUNGEN

- Abb.1: Schematische Darstellung der Rohrberstanlage TUBA (Tube Burst Apparatus)
- Abb.2: Innenaufbau der Versuchsapparatur TUBA
- Abb.3: Axialer Verlauf des Temperaturgradienten einer in der TUBA-Anlage beheizten Zircaloy-4- Rohrprobe
- Abb.4: Ansicht der Rohrberstapparatur TUBA mit Temperaturregel- und Videosystem
- Abb.5-17: Temperatur-, Druck- und Dehnverlauf für die untersuchten Rohrproben im Temperaturbereich 600 bis 1200^oC. Die verschiedenen Zeitstandexperimente bei einer Temperatur (unterschiedliche Innendrucke) werden zu je einer Abbildung zusammengefaßt.
- Abb.18-30: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
- Abb.31: Berstumfangsdehnung der Rohrproben in Abhängigkeit der Temperatur
- Abb.32: Tangentiale Bruchspannung der Rohrproben in Abhängigkeit der Temperatur
- Abb.33: Zeitstandkurven der Rohrproben für den Temperaturbereich 600 bis 1200^oC unter Schutzgas
- Abb.34-46: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente
- Abb.47-59: Photographische Dokumentation der geborstenen Zircaloy-4-Rohrproben

ABBILDUNGSSCHEMA

Temperatur (°C)	Abbildungsnummer			
	Graphische Darstellung der Meßdaten $p(t)$, $T(t)$ $\epsilon(t)$	Axiales Profil der Umfangsdehnung der geborstenen Rohrproben	σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente	Photographische Dokumentation der geborstenen Rohrproben
600	5	18	34	47
650	6	19	35	48
700	7	20	36	49
750	8	21	37	50
800	9	22	38	51
850	10	23	39	52
900	11	24	40	53
950	12	25	41	54
1000	13	26	42	55
1050	14	27	43	56
1100	15	28	44	57
1150	16	29	45	58
1200	17	30	46	59

1. Einleitung

Zur genauen Beschreibung des Brennstabverhaltens bei LWR-Störfällen ist die Kenntnis des mechanischen Verhaltens der Zircaloy-4-Hüllrohre bei hohen Temperaturen notwendig. Die mechanischen Eigenschaften von Zircaloy-Hüllrohren waren aber noch nicht ausreichend gut bekannt. Es war deshalb erforderlich, die notwendigen Materialdaten (Verformung als Funktion der Zeit, Spannungsexponent der Verformungsgeschwindigkeit, Berstdehnung, Berstspannung, Standzeit) durch geeignete Experimente zu ermitteln.

Im allgemeinen wird das mechanische Verhalten von Werkstoffen in einaxialen Zug- bzw. Kriechversuchen bestimmt. Die Übertragbarkeit der aus einaxialen Versuchsergebnissen gewonnenen Deformations- und Versagenseigenschaften auf den mehrachsigen Spannungszustand und das Texturgefüge im Rohr ist besonders hinsichtlich anisotroper Eigenschaften und des Versagensverhaltens nur bedingt möglich. Deshalb ist es erforderlich, neben der Untersuchung des Materialverhaltens an Zugproben, die gewünschten Materialdaten ebenfalls direkt an Rohrexperimenten zu bestimmen.

Durch Vergleichsbetrachtungen mit Ergebnissen eindimensionaler Versuche kann der Einfluß des Spannungszustandes und der Textur im Rohr auf die Deformation ermittelt werden bzw. die Übertragbarkeit eines aus Zugversuchen gewonnenen Modells auf Rohrversuche überprüft werden. Dabei sind im einzelnen zu überprüfen:

- der Einfluß unterschiedlicher Geometrie,
- der Einfluß der Gefügetextur,
- der Einfluß der unterschiedlichen Spannungszustände auf die Deformations- und Versagensmechanismen.

Die hier durchgeführten Experimente an kurzen Rohrproben bilden einen Teil der Datenbasis zur Entwicklung des Deformations- und Berstmodells NORA ^{+) /1/ für Zircaloy-Hüllrohre von LWR-Brennelementen bei}

^{+) NORA: NORTon Ansatz}

Störfalltransienten im Rahmen des Programmsystems S⁺SYST⁺ /2/. Die Modellentwicklung stützt sich auf unterschiedliche Typen von Experimenten, wobei die hier durchgeführten Versuche eine wichtige Übergangsstufe zwischen eindimensionalen Experimenten (Zugversuche) und Brennstabsimulatorexperimenten darstellen. Sie gestatten es, die Materialeigenschaften sowie die Einflüsse der Geometrie und des Spannungszustandes auf die Rohrdeformation bei im Vergleich zu Simulatorexperimenten (FABIOLA /3/, REBEKA /4,5/ einfacheren Randbedingungen zu untersuchen.

2. Versuchsdurchführung

Die isothermen, isobaren Zeitstandexperimente wurden mit beidseitig verschweißten Zircaloy-4-Rohrabschnitten im Temperaturbereich zwischen 700 und 1200°C in Helium in der Versuchsanlage TUBA⁺⁺ durchgeführt. Das Hüllmaterial kam im Anlieferungszustand (as-received) zum Einsatz. Die Probenlänge betrug 60 mm, der Außendurchmesser 10,76 mm und die mittlere Wandstärke 0,72 mm. Die chemische Zusammensetzung des untersuchten Zircaloy-4 ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

Die Versuchsanordnung ist der Abb. 1 zu entnehmen. Die Rohrprobe wird senkrecht in der Anlage montiert (Abb. 2a) und ist über ein Kapillarrohr mit einem Druckreservoir und einer Druckmeßdose verbunden. Auf der Hüllrohroberfläche ist zwecks Temperaturmessung ein Thermoelement befestigt. Nach der Montage der Versuchsprobe wird das Heizelement hydraulisch über die Rohrprobe gesenkt (Abb. 2b). Anschließend wird über den Heizer eine Stahlglocke gestülpt. Der Innenraum wird vor dem Experiment mehrfach evakuiert und mit Helium geflutet.

Die Aufheizung der Probe erfolgt mittels eines Wolfram-Heizleiters über Wärmestrahlung. Die Probe wird zunächst drucklos auf 500°C ge-

⁺) S⁺SYST: Sicherheits SYSTem

⁺⁺) TUBA: Tube Burst Apparatus

bracht und nach einer Haltezeit von 400 - 600 s mit einer konstanten Aufheizgeschwindigkeit von ca. $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ auf die gewünschte Versuchstemperatur aufgeheizt. Nach dem Erreichen dieser Temperatur wird die Rohrprobe mit dem gewünschten Innendruck belastet. Die mechanische Beanspruchung (Druckbeaufschlagung) des Rohres erfolgt sehr schnell, da der Druckausgleich zwischen dem Druckbehälter und der Probe in sehr kurzer Zeit erfolgt (ca. 1 s). Die Messung des Gasdruckes erfolgt mittels einer Druckmeßdose mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ bar.

Infolge der Probeneinspannung und des axialen Temperaturprofils im Heizelement entsteht in der Rohrprobe ebenfalls ein axiales Temperaturprofil, das vom Temperaturniveau abhängt. Bedingt durch dieses axiale Profil, sowie durch die Endstopfen der Rohrproben, ergibt sich eine "konische" Deformation. Die maximale Verformung des Rohres erfolgt in der Probenmitte, der Stelle maximaler Temperatur. Um eine Beeinflussung der vorwiegend in Rohrmitte stattfindenden Rohrdeformation durch das Thermostatelement zu vermeiden, wird dieses am unteren Teil der Probe angebracht. Die Temperatur an der Berststelle wird dann anhand von Eichkurven bestimmt. Den Eichkurven (Abb.3) kann man entnehmen, daß die axiale Temperaturdifferenz der Versuchsproben zwischen Meßstelle und Stelle maximaler Deformation bis zu 25°C betragen kann. In Umfangsrichtung stellt sich durch die Art der Beheizung eine homogene Temperaturverteilung ein, die maximale Umfangsdehnungen erwarten läßt. Die Temperaturdifferenz über den Probenumfang ist kleiner 3 K. Die absolute Bestimmung der Bersttemperatur erfolgt mit einer Genauigkeit von ± 5 K.

Abb. 4 zeigt die geschlossene Versuchsanlage zusammen mit dem Temperaturregel- und Kontrollsystem sowie einem Videosystem. Die Rohrprobe kann durch eine Öffnung im Heizelement und der Stahlglocke von oben beobachtet werden. Es ist daher möglich, die Verformung der Rohrproben mit einem Videosystem aufzuzeichnen. Im Gegensatz zur üblichen Aufzeichnung der Rohrverformung aus einer seitlichen Projektion mittels Röntgenstrahlen ermöglicht die hier angewandte Methode der Aufzeichnung der Projektion senkrecht zur Längsachse eine Beobachtung des gesamten Rohrumfanges. Neben einer zuverlässigen Bestimmung der Umfangsdehnung - es

wird mit Sicherheit die maximale Umfangsdehnung gemessen (Projektion) - ermöglicht dieses Verfahren auch die Beobachtung des winkelabhängigen Dehnungsverlaufes, sowie zeitliche Rohrverbiegungseffekte (σ -Bereich). Der Nachteil ist allerdings, daß das zeitliche axiale Dehnungsprofil nicht ermittelt werden kann. Die Aufzeichnung der Hüllrohrverformung erfolgt auf einem Magnetband, auf dem außerdem die Zeitverläufe der Proben temperatur sowie des Probeninnendruckes registriert werden. Die Rohrverformung wird anschließend auf dem Bildschirm manuell ausgemessen und in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Die Auflösung bei der Bestimmung des Durchmessers der Rohrproben beträgt etwa 2% des Ausgangsdurchmessers. Das bedeutet, daß Dehnungen kleiner 2% nicht bestimmt werden können und der relative Fehler bei 100% Dehnung etwa 2% beträgt. Die Auflösung bei kleinen Dehnungen kann durch Schattenbildung infolge Rohrverkrümmung noch zusätzlich beeinträchtigt werden.

3. Datenerfassung und -darstellung

3.1 Datenabspeicherung

Zur Unterstützung der Entwicklung eines Zircaloy-Deformations- und Versagensmodells wurde eine computergespeicherte Datenbank errichtet. In ihr werden die Daten von eindimensionalen Zug- und Kriechversuchen sowie von Rohrzeitstand-, Rohrberstexperimenten und Brennstab-Simulatorexperimenten abgelegt.

Bezüglich der Rohrversuche bilden die TUBA-Versuchsdaten den größten Teil des Bestandes. Sie überdecken in systematischer Weise das gesamte betrachtete Temperatur- und Dehnungsgeschwindigkeitsintervall (Tabelle 2). Von jedem Versuch werden neben den den Einzelversuch charakterisierenden Daten die zeitlichen Verläufe von Durchmesserzunahme (maximaler Wert), der Temperatur an der Stelle der maximalen Deformation sowie des Innendruckes abgespeichert.

3.2 Datendarstellung

Zur Datenauswertung und Darstellung wurden Programme erstellt, die direkten Zugriff zur Datenbank haben und so eine schnelle Datenauswertung

gestatten. Bei der Datenerfassung wurde darauf Wert gelegt, daß möglichst die originalen Meßdaten abgespeichert wurden (z.B. Umfangszunahme anstatt Dehnung). Die weiteren Annahmen sind dann im Verarbeitungsprogramm dokumentiert und neue Auswertungen mit veränderten Annahmen können durch Veränderung der Programme schnell und problemlos durchgeführt werden. Einen wesentlichen Bestandteil der Verarbeitungsprogramme bilden die Plotprogramme, die gewisse Standardplots erzeugen (so z.B. die Abb.5-17 dieses Berichtes) und so einen schnellen Überblick über die Daten und Auswertungen erlauben. Dabei wurde als Basis das Plotprogramm PLOTCP /6/ verwendet. Die Eingabe für dieses Programm wird vollautomatisch in jedem Auswertelauf erzeugt.

4. Versuchsergebnisse

Die Experimente geben zum einen Information über den zeitlichen Ablauf der Deformation, allerdings beschränkt auf den Ort der maximalen Umfangsdehnung, zum anderen über die Form der Rohrprobe nach dem Bersten, die Aufschluß über die axiale Dehnungsverteilung und das Berstverhalten gibt.

4.1 Zeitlicher Verformungsverlauf

Die Abb. 5 - 17 zeigen den zeitlichen Verlauf des maximalen Rohrumfanges sowie der Temperatur an der Stelle der maximalen Deformation und des Drucks. Für die Entwicklung des Deformationsmodells ist der Anfang des Dehnverlaufs wichtig, da hier die Vorgänge des Primärkriechens (Verfestigung) ablaufen, deren Modellierung besonders bei isothermen Experimenten für den gesamten Dehnverlauf von großer Bedeutung sind. Jedoch ist bei diesen Experimenten die Dehnung unter 5% mit größerer Unsicherheit behaftet, da infolge Rohrverbiegung während der Deformation bei der Bestimmung des maximalen Umfangs größere Fehler entstehen können.

Für eine detaillierte Datenanalyse mit dem Ziel eines Vergleichs dieser Experimente mit eindimensionalen Zug- und Kriechversuchen reicht die Darstellung der Umfangsdehnung der äußeren Rohrhaut nicht aus. Bei den folgenden Darstellungen wurden Effektivwerte der Spannung, Dehnung

und Dehngeschwindigkeit benutzt, die neben den tangentialen Größen auch die Komponenten dieser Größen in radialer und axialer Richtung berücksichtigen. Allerdings müssen dazu weitere Annahmen getroffen werden, da

1. die Umfangsdehnung allein die Rohrdehnung nicht beschreiben kann (axiale und radiale Dehnverläufe konnten bei der Messung nicht erfaßt werden),
2. die Spannungs- und Dehnkomponenten von der axialen Form der Rohraufweitung abhängig sind /7/.

Diese Annahmen sind:

- isotropes Materialverhalten
- Gleichmaßverformung
- zylindrische Rohrgeometrie.

Mit den Spannungskomponenten in tangentialer

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i - p_a r_a}{r_a - r_i} \quad (1) \quad r_i, r_a = \text{innerer, äußerer Rohr-} \\ \text{radius}$$

axialer

$$\sigma_z = \frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \quad (2) \quad p_i, p_a = \text{Rohrrinnen-, Umgebungs-} \\ \text{druck}$$

und radialer Richtung

$$\sigma_r = -(p_i + p_a)/2 \quad (3)$$

ergibt sich die wahre effektive Spannung σ_{eff} bezüglich der Schalenmittelfläche (gekennzeichnet durch den Schalenradius $r_s = (r_a + r_i)/2$) mit Hilfe der aus den Spannungskomponenten bestimmten Diviatorkomponenten s_{ij} in den Hauptspannungsrichtungen

$$s_{ij} = \left\{ \begin{array}{ccc} \sigma_r - 1/3(\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t - 1/3(\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - 1/3(\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) \end{array} \right\} \quad (4)$$

nach der Beziehung

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{i,j} s_{ij}^2} \quad (5)$$

Die effektive wahre Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}$ wird allgemein nach der Beziehung

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i,j} \dot{\epsilon}_{ij}^2} \quad (6)$$

aus den Einzelkomponenten der Dehngeschwindigkeit berechnet /7/. Für die oben getroffenen Annahmen (Zylindergeometrie, isotropes Materialverhalten) ergibt sich $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}$ näherungsweise zu

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}} = \sqrt{3/2} \dot{\epsilon}_t ; \quad (7)$$

$\dot{\epsilon}_t$ = tangentielle Dehngeschwindigkeit.

Die Abb. 34 - 46 zeigen Darstellungen der Rohrdeformation im Spannungs-Dehngeschwindigkeits-Dehnungs-Raum in den drei möglichen Projektionen auf drei Ebenen:

$$\sigma/\epsilon, \quad \epsilon/\dot{\epsilon} \quad \text{und} \quad \sigma/\dot{\epsilon}$$

mit der Temperatur als Parameter. In den $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen (Abb. 34 - 46) sind die Probenbezeichnungen eingetragen. Neben den IMF-Nummern, die den Probennummern entsprechen, sind weitere Nummern für interne Zwecke angegeben.

Die $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen geben Aufschlüsse über die Dehngeschwindigkeitsabhängigkeit der Deformation, während die $\epsilon/\dot{\epsilon}$ -Auftragung das Dehnverhalten im Primärbereich (Verfestigungsverhalten) besonders deutlich macht. Die σ/ϵ -Kurven zeigen den Übergang zwischen elastischer und plastischer Verformung.

Bei der Beurteilung der Kurvenverläufe muß berücksichtigt werden, daß der teilweise etwas unruhige Verlauf Folge der numerischen Bestimmung der Dehngeschwindigkeit aus dem Dehnverlauf ist. Der größere Meßfehler bei kleineren Dehnungen bewirkt auch eine größere Unsicherheit bei den zugeordneten Dehngeschwindigkeiten.

In diesen Darstellungen, die unter anderem auch zum Vergleich mit einachsigen Experimenten erzeugt wurden, sind jeweils die "wahren" Effektivwerte der Spannung, Dehngeschwindigkeit und Dehnung bezüglich der Schalenmittelfläche des Rohres (wie durch Gleich. 5 und 6 definiert) dargestellt. Dies ist beim Vergleich der Werte mit den übrigen Darstellungen dieses Berichtes zu berücksichtigen. So sind z.B. die in den Abb. 5 - 17 dargestellten Umfangsdehnungen die Tangentialdehnungen (engineering circumferential strain $\epsilon_U = (U-U_0)/U_0$) bezogen auf die Rohraußenhaut. Ein Vergleich von Experimenten unterschiedlicher Probengeometrie (bzw. unterschiedlicher Lastfelder) kann nur über die Effektivwerte, die alle Komponenten berücksichtigen, gemacht werden.

Die Auswertung dieser Darstellungen, die nicht Bestandteil dieses Berichtes ist, ergibt die Abhängigkeit der Fließspannung von der Temperatur, der Dehngeschwindigkeit (bzw. dem Innendruck) sowie der Dehnung.

4.2 Versagensverhalten

Zusätzlich zur maximalen Rohraufweitung steht nach dem Bersten der axiale Durchmessererlauf der Rohrproben zur Verfügung. Die axialen Dehnverläufe sind in den Abb.18 - 30 für den betrachteten Temperaturbereich wiedergegeben. Die Hüllrohraufweitung in axialer Richtung ist nicht für alle Rohrproben dargestellt. Es wurden im allgemeinen nur diejenigen Proben ausgewählt, die bei der angegebenen Temperatur die stärkste bzw. geringste Verformung zeigten. Die entsprechenden Differenzdrücke, die zu diesen Verformungen führten, sind auf den Abbildungen ebenfalls angegeben.

Ein Vergleich der axialen Form bei unterschiedlichen Temperaturen zeigt, daß die Hüllrohraufweitung im α und α/β -Bereich axial weniger ausgedehnt ist, als im β -Bereich. Daraus läßt sich andererseits schließen, daß der Einfluß der Rohrenden im β -Bereich größer ist, als im α und α/β -Umwandlungsbereich (Abb.47-59).

Durch die Hüllrohraufweitung kommt es bei allen Rohrproben zu einer Verkürzung der Rohrlänge, die auf der Abszisse der Abbildungen eingezeichnet ist. Darüber hinaus ist in den gleichen Abbildungen eine photographische Darstellung einer geborstenen Rohrprobe der Versuchsserie angebracht. Den Aufnahmen kann man entnehmen, daß sich die Oberflächenstruktur des Zircaloy-Hüllrohres im Beulenbereich bei Experimenten im β -Phasengebiet ($>950^{\circ}\text{C}$) stark verändert hat. Infolge Kornwachstum des Zircaloy-Gefüges entstehen große Kristallite.

Durch Korngrenzengleitung während der Hüllrohrverformung, die eine relative Verschiebung der einzelnen Kristallite bewirkt, kommt es dann zur Ausbildung der rauhen Zircaloy-Oberfläche (Abb. 26 - 30 und 55 - 59). Solche Oberflächenveränderungen erfolgen dagegen nicht bei Bersttemperaturen unterhalb 950°C (Abb. 18 - 25 und 47 - 54). Die Abb. 18 - 30 zeigen - neben dem Temperatureinfluß - auch den Einfluß des Berstdruckes auf die Beulenform der Rohrproben.

Neben dem Verformungsverlauf der Hüllrohre ist die Berstdehnung, die Standzeit sowie die tangentielle Berstspannung von Interesse. In Abb. 31 ist die Umfangsberstdehnung ($\epsilon_U = (U-U_0)/U_0$) der Rohrproben in Abhängigkeit von der Bersttemperatur aufgetragen. Man erkennt, daß die Berstdehnung der Zircaloy-Hüllrohre in Schutzgas im untersuchten Temperaturbereich von 600 bis 1200°C zwischen 37 und 120% variiert. Die Berstdehnung zeigt bei etwa 900 und 1050°C ausgeprägte Minima und bei ca. 1000°C ein ausgeprägtes Maximum. Im Temperaturbereich 700 bis 850°C sind die ermittelten (druckabhängigen) Berstumfangsdehnungen nahezu unabhängig von der Temperatur. Zu beachten ist jedoch bei einer solchen Darstellung, daß die Berstdehnung von der Spannung im Hüllrohr (Innendruck) bzw. von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt.

Aufgrund der isothermen Versuchsführung und der damit verbundenen homogenen Temperaturverteilung am Hüllrohrumfang stellen die gefundenen Berstdehnungen Maximalwerte dar.

Mit Hilfe der Berstdehnwerte können auch die tangentialen Berstspannungswerte der Hüllrohre bestimmt werden. Die Berechnung der anfänglichen

Tangentialspannung im Hüllrohr erfolgte nach der Kesselformel

$$\sigma_{HS_0} = p_i \frac{d_{i_0}}{2W_0} \quad \begin{array}{l} p_i = \text{Innendruck} \hat{=} \text{Berstdruck} \\ d_{i_0} = \text{Hüllrohrinnendurchmesser} \\ W_0 = \text{Wandstärke.} \end{array} \quad (8)$$

Berücksichtigt man die Berstdehnung (ϵ_B) so folgt, bei Annahme von Gleichmaßverformung in Umfangsrichtung:

$$\sigma_{HS} = p_i \frac{d_{i_0}}{2W_0} (1 + \epsilon_B)^2 \quad (9)$$

Bei großen Verformungen der Rohrproben liegt keine Zylindergeometrie mehr vor; für die die Kesselformel gilt. Durch ein entsprechendes Korrekturglied, das die axiale Krümmung der Beule berücksichtigt (Abb.32), erhält man die effektive Bruchspannung in der verformten Rohrprobe

$$\sigma_{HS,eff} = p_i \frac{d_{i_0}}{2W_0} (1 + \epsilon_B)^2 \left(1 - \frac{r_{berst}}{2 R_{ax}}\right) \quad (10)$$

$r_{berst} = \text{Berstumfang}/(2\pi)$; $R_{ax} = \text{axialer Krümmungsradius der Beule.}$

Die nach Gleichung (9) berechneten tangentialen Bruchspannungen weichen von den nach Gleichung (5) bestimmten effektiven Spannungen systematisch ab, die für die graphischen Computerdarstellungen (Abb. 34 - 46) verwendet wurden (die Abweichungen betragen ca. 15%).

Die nach den Gleichungen (8) bis (10) berechneten tangentialen Bruchspannungen σ_{HS_0} , σ_{HS} und $\sigma_{HS,eff}$ sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Man kann der Tabelle entnehmen, daß starke Abweichungen zwischen den einzelnen Bruchspannungswerten auftreten. Insbesondere ist die nominale Spannung σ_{HS_0} erheblich kleiner als die dazugehörige effektive Bruchspannung $\sigma_{HS,eff}$, die sowohl die Berstdehnung als auch die Form der Beule (Zylinder, Kugel) berücksichtigt. Die Bruchspannungen σ_{HS} , bei deren Berechnung lediglich die Aufweitung berücksichtigt wurde, und $\sigma_{HS,eff}$ sind in Abb.32 in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Man erkennt deutlich, daß oberhalb 900°C die Unterschiede zwischen

diesen beiden Bruchspannungen, die allein durch die geometrische Gestalt der Rohrproben bewirkt werden, vernachlässigbar klein sind (Abb.32). Mit abnehmender Temperatur treten dagegen Unterschiede auf, die z.T. beträchtlich sein können (Tabelle 2). Das hat seine Ursache darin, daß mit abnehmender Berstdehnung das stark verformte Hüllrohr im Beulenbereich sich immer mehr der Kugelform annähert (Abb.18 - 30), wodurch die Spannungen stark reduziert werden (s.Gleichung 10). Man kann der Abb.32 sowie der Abb.33 außerdem entnehmen, daß die Bruchspannung der Hüllrohre oberhalb 950°C sehr kleine Werte annimmt, und diese Werte nur geringfügig von der Temperatur abhängen. Die großen Streubänder der Bruchspannungen σ_{HS} und $\sigma_{HS,eff}$ unterhalb 900°C kommen durch die unterschiedlich großen Berstdehnungen zustande (Abb.31, 32).

Die Zeitstandkurven der Zircaloy-4-Hüllrohre für den Temperaturbereich 600 bis 1200°C sind in Abb. 33 dargestellt. Gleichzeitig wurden noch die Berstdehnungen in der Abbildung angegeben. Die angegebene Tangentialspannung entspricht der nominellen Spannung im unverformten Hüllrohr zum Zeitpunkt $t = 0$.

Das Aussehen der Rohrproben nach dem Bersten kann den Abb.47 - 59 entnommen werden. Man erkennt, daß es bis zu einer Temperatur von 900°C zu einer starken Verbiegung der Rohrproben kommt; die Berststelle liegt stets auf der konkaven Seite (Abb.47 - 53). Ab etwa 950°C bis zu der hier untersuchten maximalen Temperatur von 1200°C kommt es praktisch nicht mehr zu einer Verkrümmung (Abb.54 - 59). Die Gründe für das unterschiedliche Zircaloy-Materialverhalten werden in Abschnitt 5.2 diskutiert.

5. Diskussion

5.1 Bedeutung isothermer Experimente

Orientiert am Temperatur- und Druckverlauf von Kühlmittelverluststörfalluntersuchungen wurden bisher weitaus die meisten Experimente bei temperaturtransienter Versuchsführung in Dampfatmosfera durchgeführt. Der Vorteil der "Praxisnähe" wird aber durch den Nachteil des komplexen

Zusammenwirkens vieler Effekte während einer Temperaturtransienten erkaufte. Die hier durchgeführten isotherm-isobaren Experimente in Inertatmosphäre erlauben in systematischer Weise das Deformationsverhalten abhängig von Temperatur und Spannung bzw. Dehngeschwindigkeit zu ermitteln. Die Einfachheit des Experiments (ofenbeheizte Rohrproben) erlaubt die Ermittlung des "reinen" Material- bzw. Rohrverhaltens bei gut bekannter Temperaturverteilung.

Aufbauend auf dem Kenntnis dieser Experimente kommt man durch zusätzliche Untersuchungen über den Einfluß der Oxidation sowie der Ermittlung möglicherweise vorhandener Temperaturrampeneffekte (zeitabhängige Strukturveränderungen während der Transiente: Rekristallisation, Phasenumwandlung) zur "praxisrelevanten" Versuchsführung. Auf diesem Wege ist es gleichzeitig möglich, zu erkennen, inwieweit bei Simulatorexperimenten Einflüsse des Heizstabes bzw. der Einspannung des Simulators die Deformation und das Versagen beeinflussen.

5.2 Anisotropie

Wie in den Abb. 18 - 30 dargestellt ist, haben alle Proben im gesamten Temperaturbereich eine Verkürzung erfahren. Da ein zylindrisches Rohr bei isotropen Materialeigenschaften während der Deformation unter Innendruckbelastung seine Länge nicht ändert, wird die Längenänderung oft als Hinweis bzw. Maß des anisotropen Verhaltens bewertet. Andererseits ist aus der Literatur bekannt, daß sich das anisotrope Deformationsverhalten mit wachsender Temperatur abschwächt und während der Phasenumwandlung verschwindet. Daraus läßt sich wiederum schließen, daß die Rohrverkürzung im β -Phasenbereich alleine der von der Zylinderform abweichenden Gestalt bei großen Deformationen zuzuschreiben ist. Der Einfluß der geometrischen Form auf die Längenänderung zeigt besonders deutlich Abb. 25. Bei den dort dargestellten Experimenten zeigt das bei 8 bar durchgeführte eine gleichmäßigere axiale Dehnungsverteilung als dasjenige bei 20 bar, dessen axiale Form praktisch Kugelgestalt erreicht hat und dessen Verkürzung wesentlich stärker ausgefallen ist. Bei der hier vorliegenden Temperatur von 950°C wird im Vergleich zu eindimensionalen Experimenten keine Anisotropie festgestellt.

Im α -Bereich zeigen die Proben neben einer stärkeren Rohrverkürzung eine Verkrümmung, deren Krümmungsrichtung stets mit der Berstöffnung korreliert ist (Abb.47 - 59). Dies wird als Hinweis des Einflusses der Anisotropie gewertet (Im Umwandlungs- und β -Bereich krümmen sich die Proben nicht). Zur Quantifizierung der Anisotropieeigenschaften wurden Experimente mit einem orthogonalen Raster auf der Mantelfläche begonnen. Erste Auswertungen haben gezeigt, daß im α -Phasenbereich die Anisotropie zur Probenverkürzung beiträgt (differentielle Rohrabschnitte wurden verkürzt), während dies im Umwandlungsbereich nicht mehr zutrifft, also die dort beobachtete Verkürzung auf die von der Zylindergeometrie abweichende Probenform zurückgeführt werden kann.

5.3 Berstdehnung und Berstspannung

Da bei den hier durchgeführten Zeitstandexperimenten in inerter Atmosphäre die Temperaturdifferenz am Probenumfang maximal 3 K betrug, stellen die ermittelten Berstumfangsdehnungen Maximalwerte dar. Bei Vergleich mit Werten aus der Literatur müssen die dehnungsreduzierenden Einflüsse größerer Temperaturvariationen in Umfangsrichtung (Simulatorexperimente) und der Oxidation in Dampfatmosfera berücksichtigt werden.

Neben der starken Abhängigkeit der Berstdehnung von der Temperatur wird eine Abhängigkeit vom Rohrrinnendruck bzw. von der Deformationsgeschwindigkeit deutlich (Abb. 18 - 30). Das bewirkt zusammen mit der statistischen Datenstreuung eine Auffächerung der "Datenstreuung" in der Darstellung Berstdehnung über der Temperatur.

Bei 600°C variiert die Berstdehnung lediglich zwischen 61 und 67% (Abb. 18,31), bei 950°C dagegen zwischen 51 und 120% (Abb. 25,31). Ähnlich große Unterschiede in den Berstdehnungen wurden nur noch bei 700°C beobachtet (Abb.20, 31). Die großen "Streuungen" sind jedoch nur zum geringen Teil statistischer Natur, sondern werden ursächlich durch eine starke Abhängigkeit der Berstdehnung vom Innendruck bzw. der mittleren Verformungsgeschwindigkeit hervorgerufen. So nimmt z.B. die Berstdehnung bei 850°C (Phasenumwandlungsbereich) mit wachsendem Innendruck,

d.h. mit wachsender mittlerer Dehngeschwindigkeit, ab, während z.B. bei 750 (α -Phasengebiet) und bei 1100°C (β -Phasengebiet) wachsender Innendruck wachsende Berstdehnungen zur Folge hat (Abb.21,23,28).Möglicherweise kommt es bei 700-850 und bei 950°C zu einem superplastischen Verhalten des Zircaloy, das zu sehr großen Berstdehnungen (ca.120%) führt. Berstdehnungen über 100% treten ebenfalls im Temperaturbereich 650 bis 850°C auf (Abb. 19 - 23, 31), nur sind diese nicht so stark vom Innendruck abhängig wie bei 700 und 950°C. Die Ursache für das Verformungsminimum bei etwa 900°C ist sehr wahrscheinlich in der Phasenumwandlung des Zircaloy zu sehen.

Das ausgeprägte Minimum der Berstdehnungen bei etwa 900°C wird unabhängig vom Versuchstyp (direkte oder indirekte Beheizung) sowie dem Versuchsverlauf (transient oder isobar/isotherm) oder der Versuchsatmosphäre (inert oder oxidierend) festgestellt /3 - 5, 8 - 10/. Das nachfolgende Maximum bei ca. 1000°C und Minimum bei etwa 1050°C (Abb. 31) werden dagegen nur unter inerten Versuchsbedingungen beobachtet.

Wie Versuche unter oxidierenden Bedingungen gezeigt haben, kommt es oberhalb 900°C infolge Oxidation des Zircaloy zu einer mit der Temperatur zunehmenden Verprödung, die deutlich kleinere Berstdehnungen zur Folge hat. Es wird dabei mit steigender Temperatur eine kontinuierliche Abnahme der Berstdehnung festgestellt /8,9/.

Inwieweit die axiale Temperaturverteilung und die daraus resultierende axiale Form die Versagenswerte der Umfangsdehnung beeinflusst, kann anhand dieser Experimente nicht ermittelt werden. Dazu sind Experimente mit unterschiedlichen axialen Temperaturprofilen erforderlich.

Entsprechend der Abhängigkeit der Berstdehnung vom Innendruck ergibt sich ebenfalls eine Abhängigkeit der tangentialen Versagensspannung vom Innendruck. Bei der Ermittlung dieser Größe muß insbesondere im α -Bereich die axiale Form des deformierten Rohres mitberücksichtigt werden. Diese wiederum ist abhängig von der Temperatur, dem axialen Temperaturprofil und dem Innendruck. Bei den Auswertungen wurde außerdem nicht berücksichtigt, daß es infolge Einschnürung zu weiteren Spannungserhöhungen im Hüllrohr an diesen Stellen kommt.

5.4 Verformungsverhalten

Zur Beschreibung des Zircaloy-Materialverhaltens sind neben der Berstdehnung der Rohrproben, die zeitliche Verformung bzw. Verformungsgeschwindigkeit von Bedeutung. Die gemessenen Daten wurden deshalb aufgearbeitet und die Ergebnisse in Form von σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ -Diagrammen dargestellt (Abb.34 - 46). Es ist hier aber nochmals darauf hinzuweisen, daß die in den Diagrammen dargestellten Dehnungen wahre Dehnungen sind [$\epsilon_w = \ln(\epsilon_u + 1)$; $\epsilon_u = (U - U_0)/U_0$]. Sie sind kleiner als die nach dem Experiment direkt an den Rohren gemessenen Berstumfangsdehnungen ($\epsilon_u \hat{=} \epsilon_B$) wie sie in Tabelle 2 und den Abb. 5 - 17 bzw. 18 - 30 dargestellt sind. Auch die Berstspannungen weichen von den in Tab. 2 angegebenen Werten systematisch ab (s. Abschnitt 4.2).

Die σ/ϵ -Diagramme lassen teilweise den Übergang vom elastischen zum plastischen Verhalten erkennen. Auf der Ordinate ($\epsilon = 0$) ist deutlich ein Spannungsanstieg zu erkennen, ohne daß es zu einer plastischen Verformung der Rohre kommt (Abb.36,39,40). Man muß jedoch beachten, daß die kleinen Verformungen (<5%) aufgrund des angewandten Verfahrens nur sehr schwer zu messen sind. Die Daten sind daher mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet. Dies gilt nicht für größere Dehnungen. Der Spannungsanstieg entspricht der geometrischen Veränderung des Rohres. Abb. 41 (950°C) zeigt, daß die Versagensspannung vom Innendruck abhängig ist.

Bei der doppellogarithmischen Auftragung der Spannung über der Verformungsgeschwindigkeit ($\sigma/\dot{\epsilon}$) stellt der Kurvenverlauf für den sekundären Kriechbereich angenähert eine Gerade dar. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für den Spannungsexponenten der Verformungsgeschwindigkeit. Die Steigung ist für alle Proben einer Temperatur gleich groß, z.T. besitzt auch der Ordinatenschnittpunkt für diese Proben den gleichen Wert. Der Spannungsexponent n ist temperaturabhängig, wobei die Temperaturabhängigkeit stark durch die Phasenumwandlung bestimmt wird; er fällt im betrachteten Temperaturbereich von etwa 10 (600°C) bis auf einen Wert von ca. 3 (1200°C) ab /7/.

Sowohl in der $\sigma/\dot{\epsilon}$ - als auch in der $\epsilon/\dot{\epsilon}$ -Darstellung erkennt man das Deformationsverhalten in der Primärphase. Während, abhängig von Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit teilweise eine ausgeprägte Materialverfestigung deutlich wird (z.B. bei 950°C , Abb.41), bei der bei zunehmender Verformung die Dehngeschwindigkeit abnimmt, gibt es andere Temperaturbereiche (z.B. bei 1000°C , Abb.42) in denen die Dehngeschwindigkeit zunächst mit wachsender Dehnung schneller zunimmt als im anschließenden quasi-stationären Verformungsbereich (inverted primary creep).

6. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen

- Die Verformung der Zircaloy-4-Rohrproben in Umfangsrichtung variiert im Temperaturbereich 600 bis 1200°C zwischen etwa 37 und 120% und zeigt im temperaturabhängigen Verlauf ausgeprägte Maxima und Minima.
- Die ermittelten Berstdehnungen stellen aufgrund einer vernachlässigbaren Temperaturdifferenz am Rohrumfang Maximalwerte dar. Die Berstdehnungen hängen aber - neben der Temperatur - von der mittleren Verformungsgeschwindigkeit ab, die durch den Rohrrinnendruck bestimmt wird. Es kommt daher teilweise zu sehr großen Streuungen, die bei 950°C mit Werten zwischen 51 und 120% am größten sind. Bei 600°C variiert die Berstdehnung dagegen nur zwischen 61 und 67% .
- Die Tangentialspannung beim Bersten hängt außer von der Temperatur auch vom Innendruck und der axialen Form des deformierten Rohres ab (Zylinder, Kugel) und kann sich bei gleicher Temperatur bis zu einem Faktor 3 unterscheiden. Oberhalb 900°C sind die Berstspannungen sehr klein und nur geringfügig von der Temperatur abhängig.
- Aufgrund des anisotropen Verhaltens von Zircaloy-4 kommt es im α -Phasengebiet zu einer starken Verkürzung und Verbiegung der Rohrproben. Im β -Phasengebiet ist die Anisotropie nicht mehr vorhanden, und es kommt daher nicht mehr zu einer Verbiegung der Rohre, die Probenverkürzung ist minimal und wird allein durch die entstehende Beule verursacht.

- Die Bestimmung der zeitlichen Verformung der Rohrproben erlaubt den Deformationsverlauf in Spannungs- Dehnungsgeschwindigkeit- Dehnungsdiagrammen darzustellen. Dadurch werden die Verformungsphasen wie Primär- und Sekundärkriechen deutlich und sind einer Modellierung zugänglich. Für die Entwicklung des Hüllrohrdeformationsmodells NORA sind diese Zeitstandexperimente mit Rohren daher von großer Bedeutung.
- Die ermittelten experimentellen Daten (Berstdruck, Berstdehnung, zeitlicher Verlauf der Verformung) bilden den größten Teil der NORA-Rohrdatenbank /7/. Sie überdecken in systematischer Weise das gesamte bei LWR-Kühlmittelverluststörfällen zu betrachtende Temperatur- und Dehnungsgeschwindigkeitsintervall.

7. Literatur

- /1/ S.Raff, R.Meyder; Development of a Zircaloy Creep and Failure Model for LOCA Conditions; CSNI Specialist Meeting on "Safety Aspects of Fuel Behavior in off-normal and Accident Conditions", 1st - 4th September 1980, Espoo, Helsinki, Finland
- /2/ W.Gulden et al.; Dokumentation SSYST-1; Ein Programmsystem zur Beschreibung des LWR-Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverluststörfällen; KfK 2496 (1977)
- /3/ L.Schmidt et al.; Verification of life-time Predictions by Means of Temperature Transient Burst Tests on Zircaloy-4 Fuel Rod Simulators; gleiche Konferenz wie /1/
- /4/ K.Wiehr et al.; Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles; in KfK 2570 (1977) Seite 154 - 194
- /5/ K.Wiehr, F.J.Erbacher, H.J.Neitzel; Influence of Thermo hydraulics on Fuel Rod Behavior in a LOCA; gleiche Konferenz wie /1/
- /6/ W.Zimmerer; PLOTCP - Ein Fortran - IV - Programm zur Erzeugung von CALCOMP - Plot Zeichnungen; KfK 2081 (1975)
- /7/ S.Raff; Entwicklung eines Deformations- und Versagensmodells für Zircaloy im Hochtemperaturbereich zur Anwendung bei LWR-Kühlmittelverluststörfalluntersuchungen; KfK 3184 (in Vorbereitung)

- /8/ S.Leistikow et al.; Untersuchungen zur Hochtemperatur-Wasserdampf-Oxidation von Zircaloy-4-Hüllrohren, in KfK 2500 (1977), Seite 306 - 344
- /9/ H.M.Chung, A.M.Garde, T.F.Kassner; High Temperature Deformation and Rupture Behavior of Internally Pressurized Zircaloy-4 Cladding in Vacuum and Steam Environments; Topical Meeting on "Thermal Reactor Safety", Juli 31 - August 4, 1977, Sun Valley, Idaho, U.S.A; CONF - 770708, Seite 3-60/83
- /10/ P.Hofmann, C.Politis; Investigations of the Influence of Oxide Fuel and Fission Products on the Mechanical Properties of Zircaloy-4 Cladding Tubes under LWR Transient Conditions; gleiche Konferenz wie /9/, Seite 3 - 43/59

Danksagung

Herrn Professor Dr. W. Dienst und Herrn Dr. R.Meyder möchten wir hiermit für die kritische Durchsicht des Manuskriptes danken.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Zircaloy-4 Hüllrohre

Element		Konzentration (Gew. % bzw. ppm)	
Zinn	Sn	1,57	Gew. %
Eisen	Fe	0,22	"
Chrom	Cr	0,10	"
Eisen + Chrom	Fe + Cr	0,33	"
Aluminium	Al	40	ppm
Blei	Pb	<25	"
Bor	B	<0,25	"
Cadmium	Cd	<0,25	"
Calcium	Ca	<10	"
Chlor	Cl	<5	"
Kobalt	Co	<10	"
Hafnium	Hf	<50	"
Kohlenstoff	C	140	"
Kupfer	Cu	<10	"
Magnesium	Mg	<10	"
Mangan	Mn	<25	"
Nickel	Ni	<35	"
Titan	Ti	<25	"
Vanadium	V	<25	"
Wolfram	W	<25	"
Uran	U	<0,6	"
Niob	Nb	<50	"
Silizium	Si	70	"
Sauerstoff	O	1300	"
Wasserstoff	H	6	"
Stickstoff	N	28	"
Zirkonium	Zr	Rest	

Tab. 2: Berstdaten der isothermen/isobaren Rohrrinnendruck-Zeitstand-experimente mit as-received Zircaloy-4-Hüllrohren in Helium

Bersttemperatur T_B (°C)	Probennummer	Differenzdruck p_i (bar)	Standzeit t_B (s)	Bruchdehnung ϵ_B (%)	Tangentialspannung (MPa)			
					σ_{HS_0}	σ_{HS}	$\sigma_{HS,eff}$	
600	B 143	98,5	13840	61,5	63,7	166	143	
	B 142	140	1942	67	90,5	252	212	
	B 148	157	1235	61,2	101,5	264	224	
	B 149	170,5	860	61,4	110,2	287	235	
650	B 147	100,5	1440	82	65	215	176	
	B 146	110	1010	108,5	71,1	309	213	
	B 145	120,5	475	69,5	77,9	224	193	
	B 144	130	310	69,5	94	270	227	
700	B 139	60	3805	69	38,3	111	93	
	41 K	70	1554	82	45,3	150	116	
	47	74,9	982	120	48,5	235	153	
	46	80	626	120	51,8	250	155	
	45	85,2	464	113,5	55,1	251	163	
	44	90	408	116	58,2	272	180	
	43	94,9	296	97,5	61,4	239	177	
	42 K	95,8	222	88	62	219	169	
	B 150	199,6	4	42,7	129	263	242	
	750	7	61,3	415	70	39,6	114	95
		6	64	318	77,5	41,3	130	104
135 D		70,6	216	95	45,7	174	134	
2		71,3	206	84	46,1	156	125	
4		72,2	156	100	46,6	187	133	
5		72,6	136	115	46,9	217	145	
800	B 141	23	13258	81,5	14,9	49	41	
	49	40,8	706	109	26,4	115	79	
	8	51,6	205	80,5	33,3	109	88	
	48	60,1	103	113	38,8	176	120	
	B 137	90	14	74,8	58,2	178	155	
850	13	24	358	102	15,5	63	47	
	11	40,8	53	109	26,4	115	68	
	12	41,8	46	88	27	95	74	
	9	61,8	9	96,5	40	154	102	
	10	61,9	8,5	83,5	40	135	105	
	900	18	10,2	2605	48,5	6,6	14,5	14
16		15,2	402	63,5	9,8	26,2	25	
15		25,2	76	54,5	16,3	38,9	33	
19		25,2	62	70	16,3	47,1	40	
14		46,4	2	57	30	74	61	
17		46,5	3,1	55,5	30,1	73	61	
950		24	7,9	777	51	5,1	11,7	10
	20	10	339	54	6,5	15,3	13	
	21	16	6,4	81	10,3	33,9	24	
	23	16	16	66,5	10,3	28,7	22	
	22	19,8	6,2	120,5	12,8	62	29	
1000	27	3,9	562	66,5	2,5	7	6	
	28	4	599	76	2,6	8	7	
	26	6	92	99	3,9	15,3	12	
	25	8,9	25	95	5,7	21,9	18	
1050	30	3	770	41	1,9	3,9	3,8	
	29	5	105	70	3,2	9,3	9	
1100	31	3	554	37	1,9	3,6	3,5	
	32	4	107	65,5	2,6	7,1	6	
	33	4	99	81	2,6	8,5	7	
	37	4	146	76,5	2,6	8	7	
	34	5,9	31	80,5	3,8	12,4	11	
1150	36	3	555	56	1,9	4,7	4,5	
	35	4	102	78,5	2,6	8,2	7	
1200	39	2,5	422	77	1,6	5,1	4,5	
	40	2,5	230	91,5	1,6	5,9	5	
	38	4	103	91	2,6	9,4	8	

$$\sigma_{HS_0} = p_i \frac{d_{i0}}{2W_0}; \sigma_{HS} = \sigma_{HS_0} (1 + \epsilon_B)^2; \sigma_{HS,eff} = \sigma_{HS} \left(1 - \frac{r_{berst}}{2R_{ax}}\right)$$

$d_{i0} = 9,31 \text{ mm}$, $W_0 = 0,72 \text{ mm}$, $p_i = \text{Differenzdruck} \hat{=} \text{Berstdruck}$

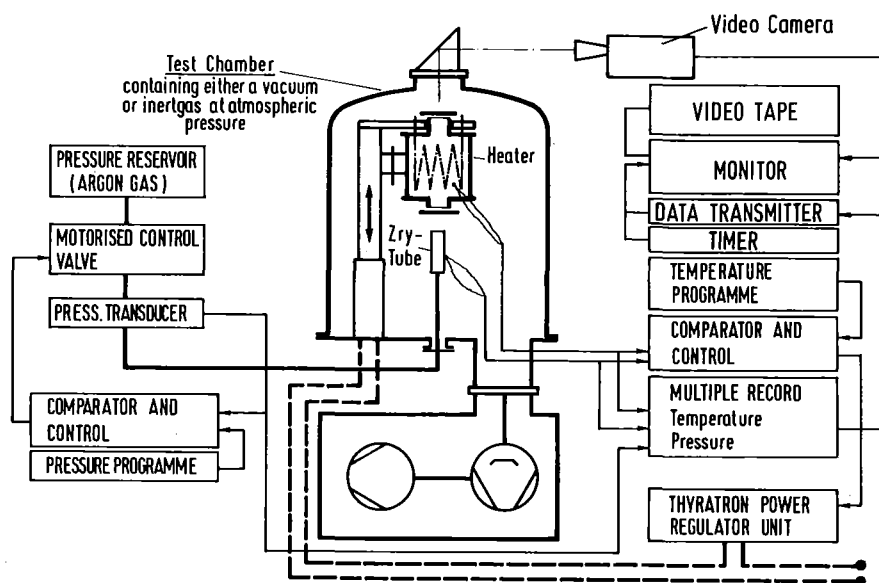


Abb.1: Schematische Darstellung der Rohrberstanlage TUBA (Tube Burst Apparatus). Die radiale Hüllrohrverformung wird mittels eines Videosystems kontinuierlich aufgezeichnet.

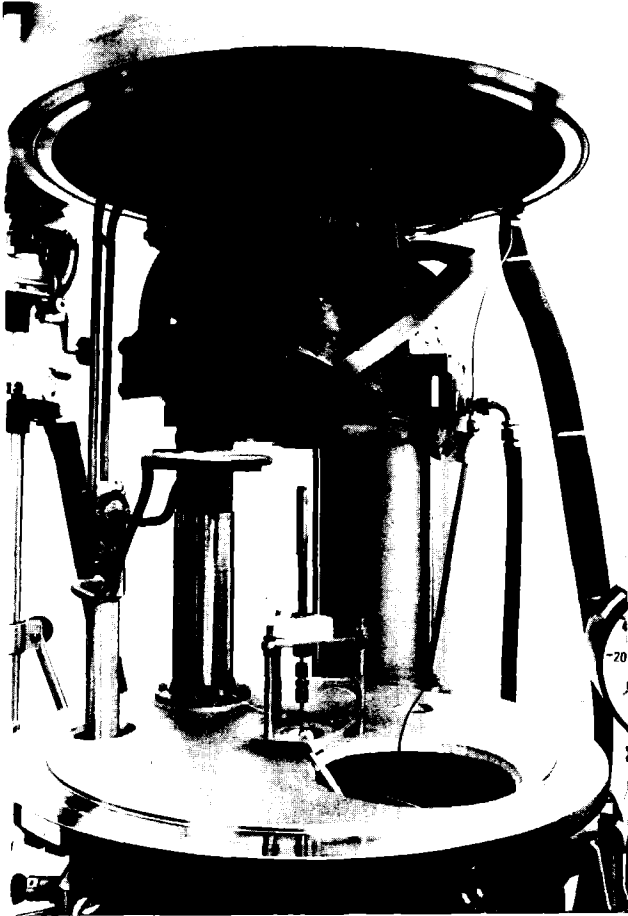


Abb. 2a:

Innenaufbau der Versuchsa-
pparatur TUBA. Die Rohr-
probe ist senkrecht ange-
ordnet. Der Heizer wird
zur Montage der Rohrprobe
hydraulisch nach oben ge-
schoben.

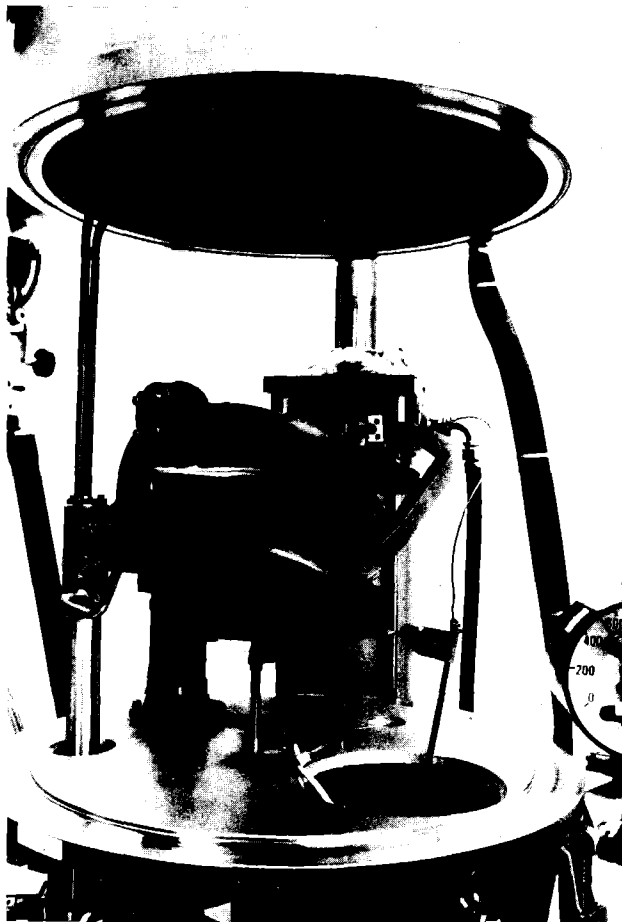


Abb. 2b:

Rohrberstapparat mit über
die Rohrprobe gesenktem
Heizerelement (W-Drähte)

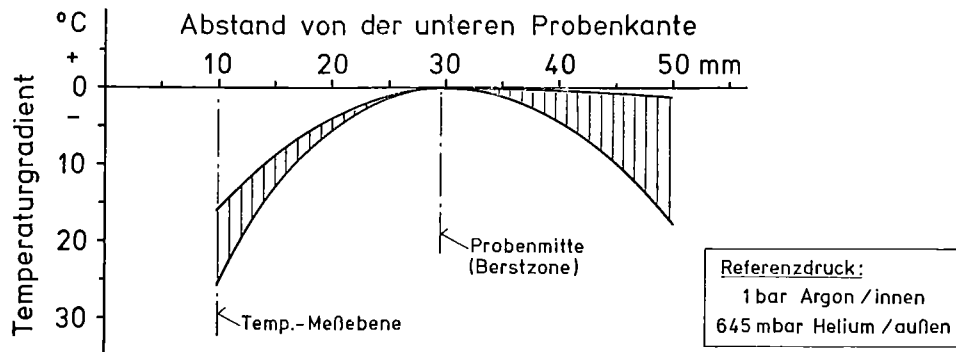
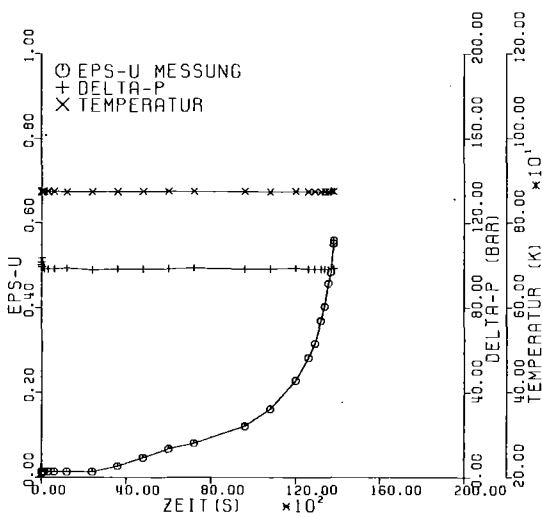


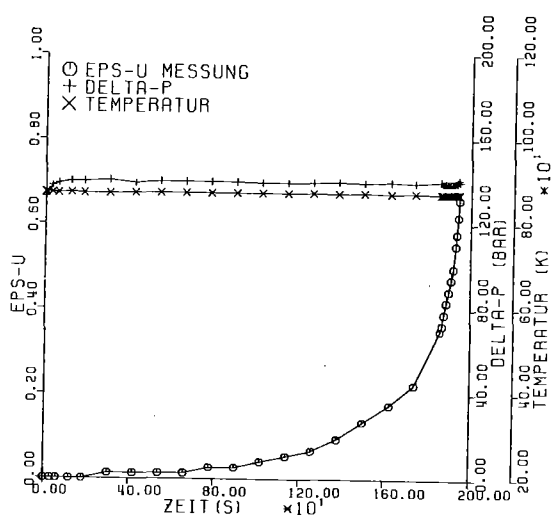
Abb.3: Axialer Verlauf der Temperaturgradienten von in der TUBA-Anlage beheizten Zircaloy-4-Rohrproben. Das Streuband kommt durch die unterschiedlich untersuchten Temperaturen (600 - 1200°C) zustande



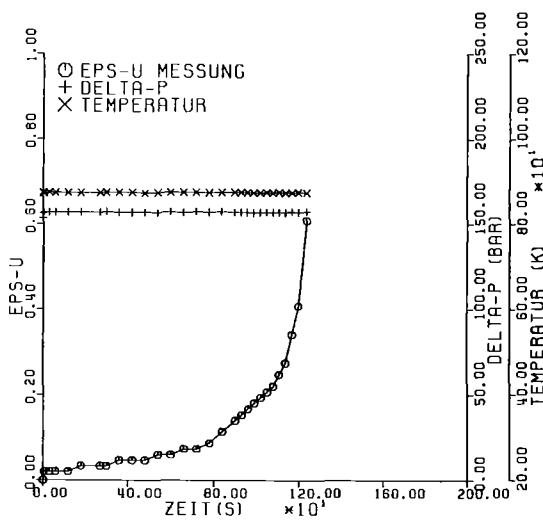
Abb.4: Ansicht der Rohrberstapparatur TUBA mit Temperaturregel- und Videosystem. Die radiale Verformung der Rohrprobe kann über ein Umlenkprisma von oben betrachtet und mit einer Fernsehkamera aufgezeichnet werden. Auf dem Magnetband werden außerdem die Proben temperatur, der Innendruck und die Versuchszeit registriert



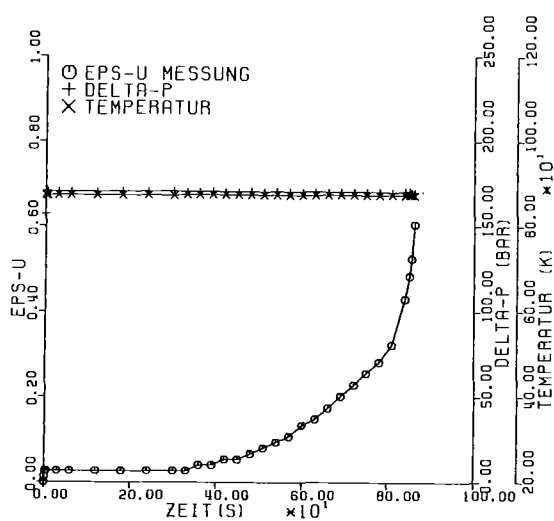
Experiment-Nr. B143



Experiment-Nr. B142

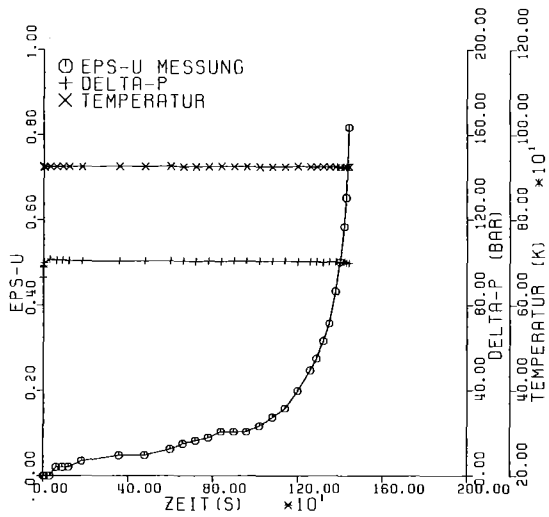


Experiment-Nr. B148

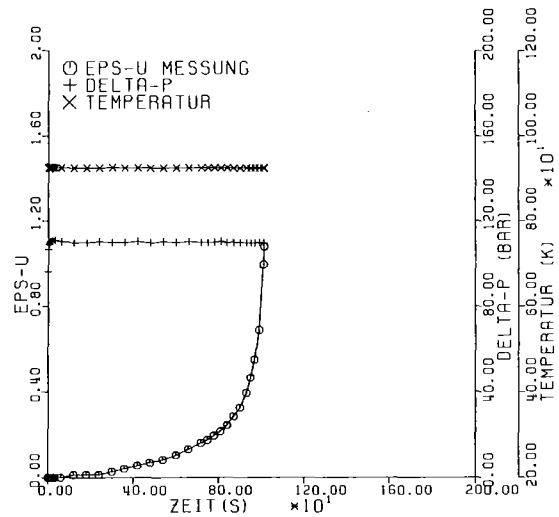


Experiment-Nr. B149

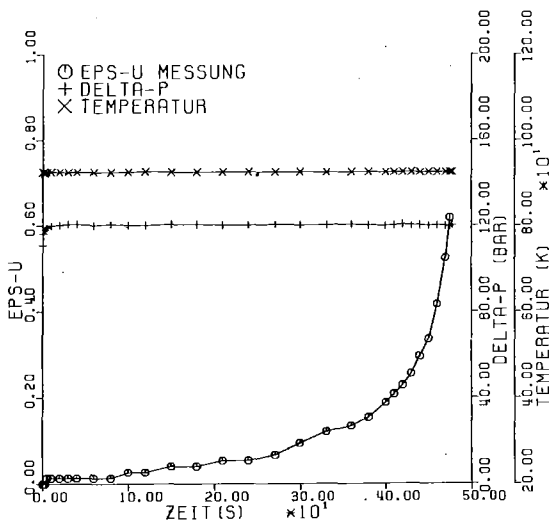
Abb.5: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 600°C in He-Atmosphäre



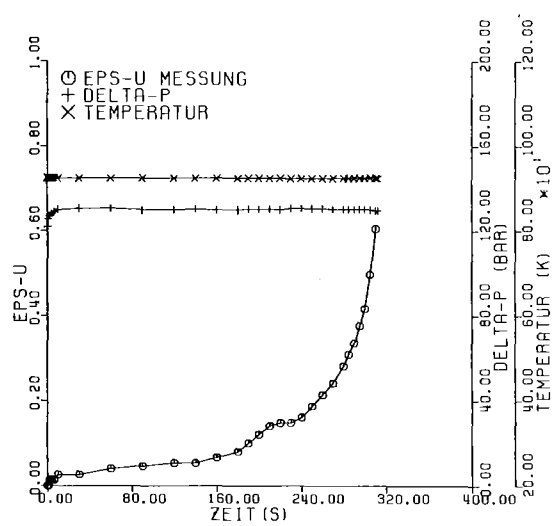
Experiment-Nr. B147



Experiment-Nr. B146

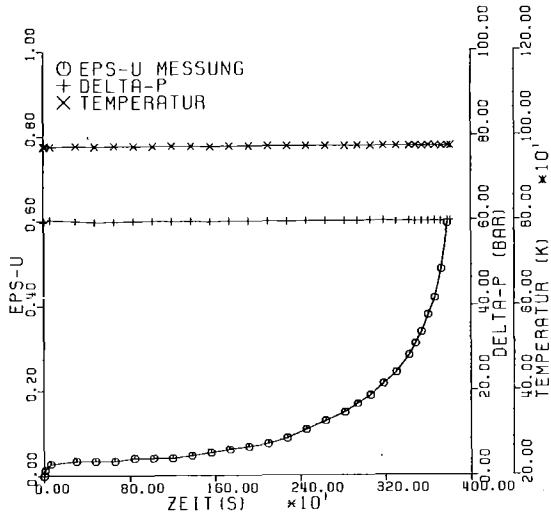


Experiment-Nr. B145

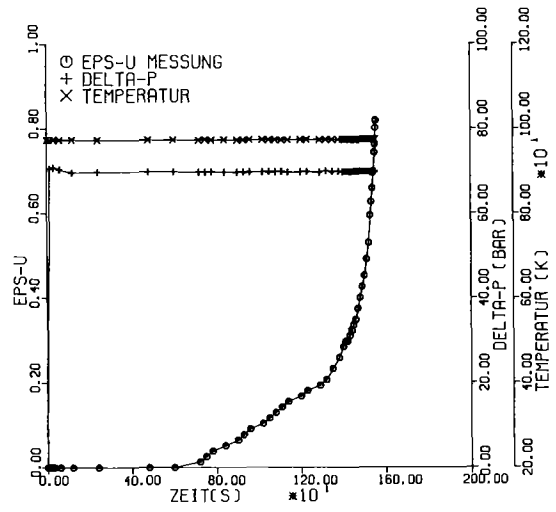


Experiment-Nr. B144

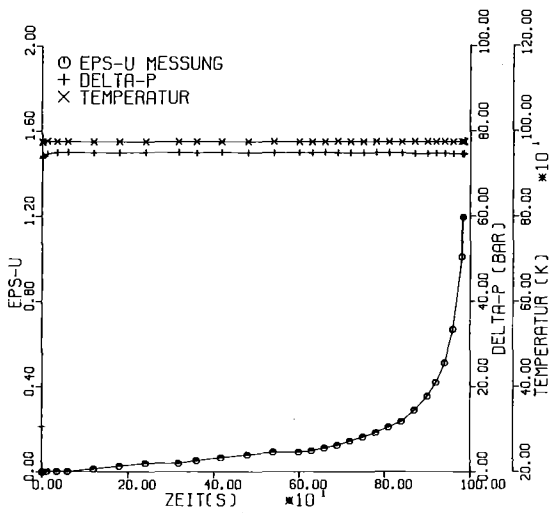
Abb.6: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-loy-4-Rohrproben bei 650°C in He-Atmosphäre



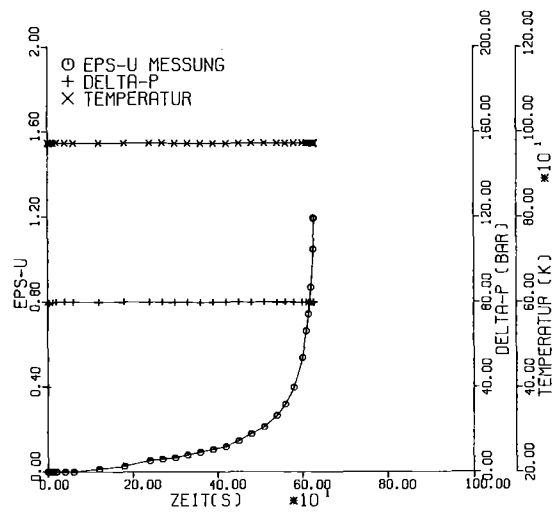
Experiment-Nr. B139



Experiment-Nr. 41K

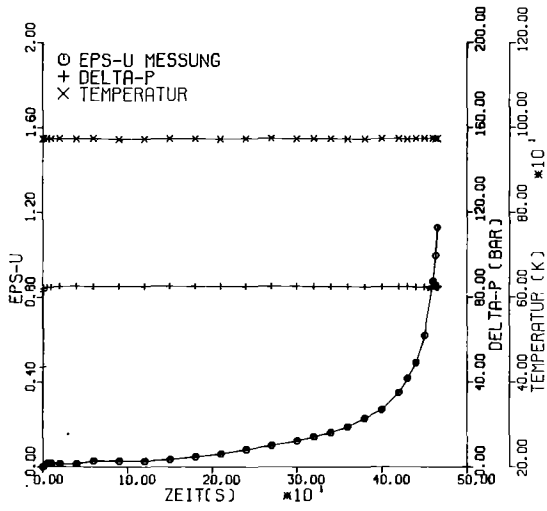


Experiment-Nr. 47

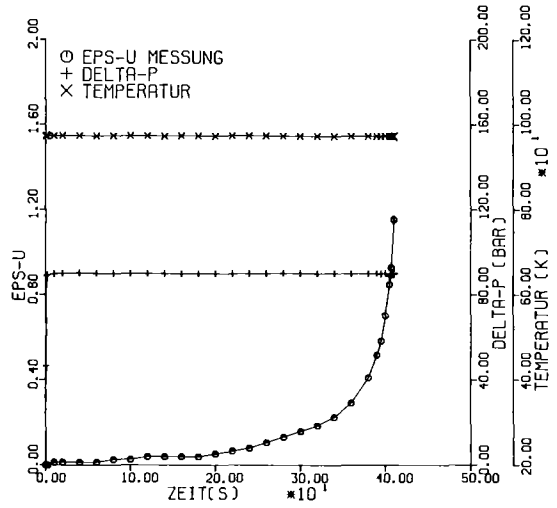


Experiment-Nr. 46

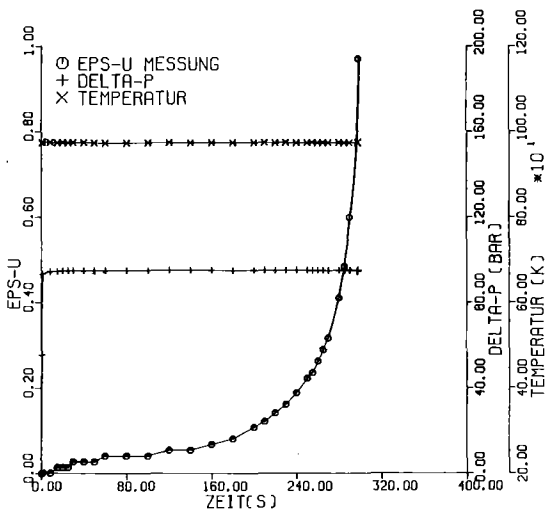
Abb. 7 : Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 700°C in He-Atmosphäre



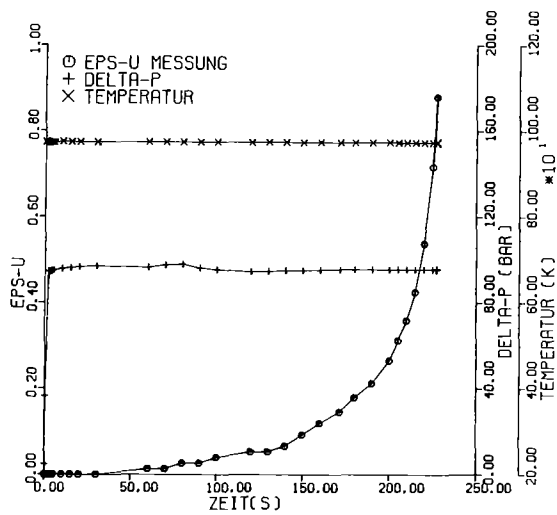
Experiment-Nr. 45



Experiment-Nr. 44

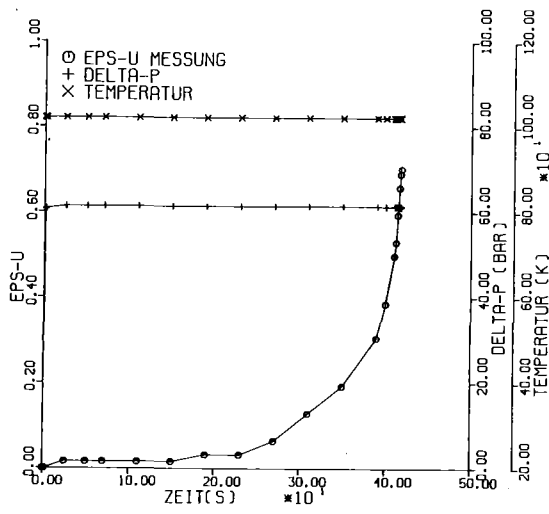


Experiment-Nr. 43

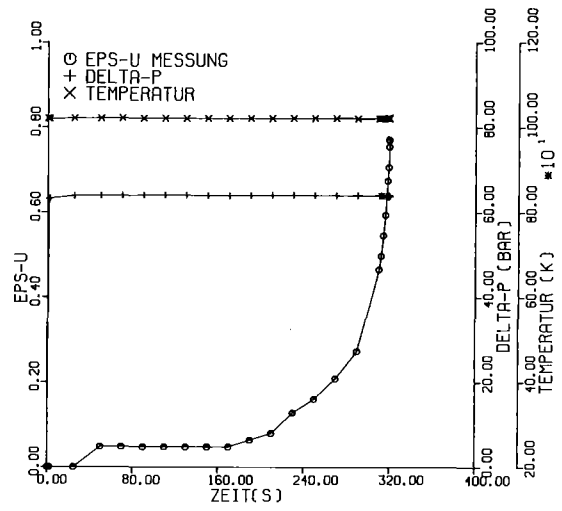


Experiment-Nr. 42 K

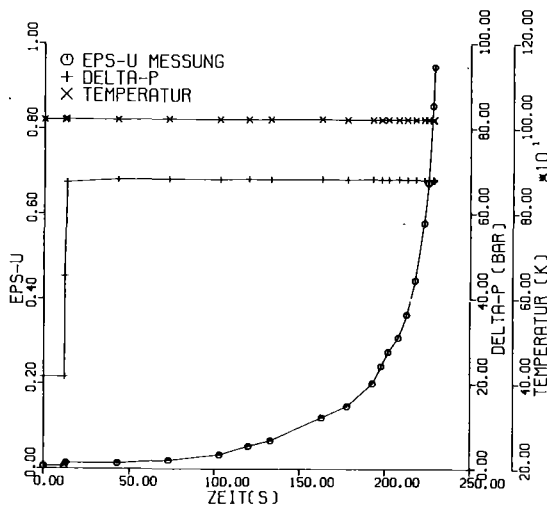
Abb. 7: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca- (Fortsetzung) loy-4-Rohrproben bei 700 °C in He-Atmosphäre



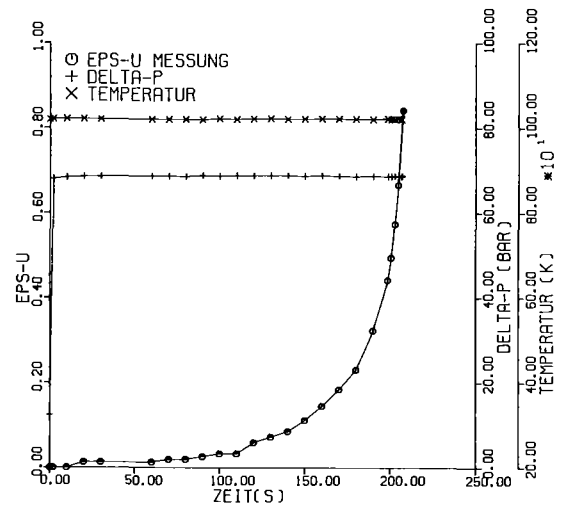
Experiment-Nr. 7



Experiment-Nr. 6

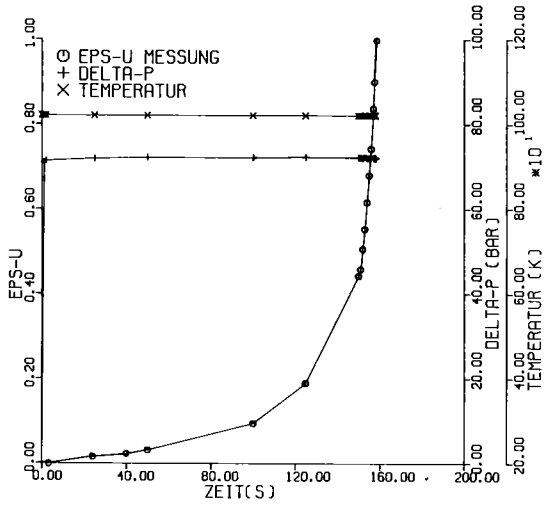


Experiment-Nr. 135 D

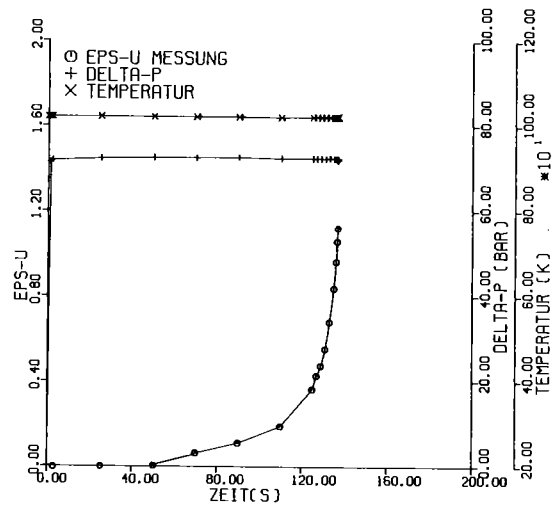


Experiment-Nr. 2

Abb. 8: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-loy-4-Rohrproben bei 750°C in He-Atmosphäre

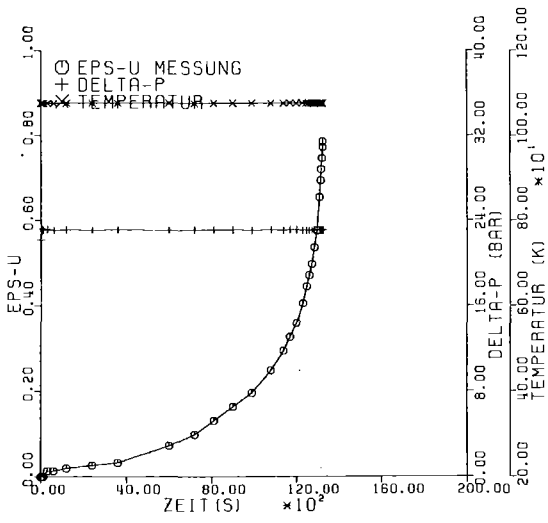


Experiment-Nr. 4

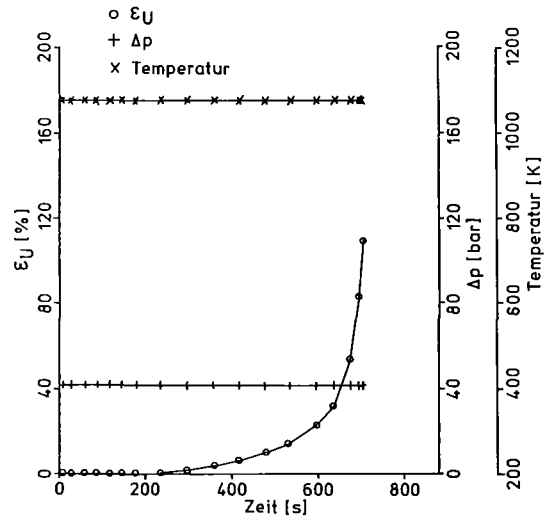


Experiment-Nr. 5

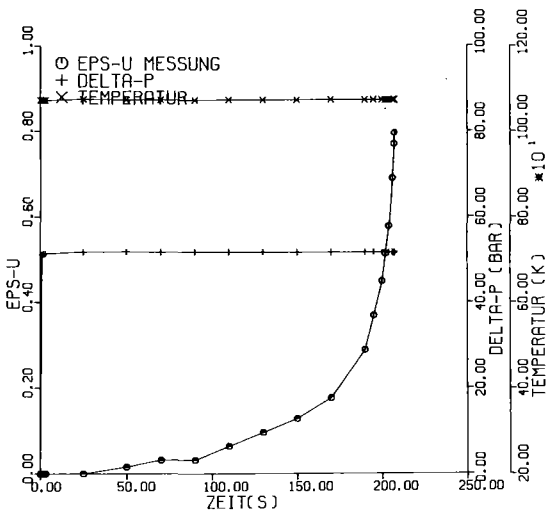
Abb. 8: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-
(Fortsetzung) loy-4-Rohrproben bei 750°C in He-Atmosphäre



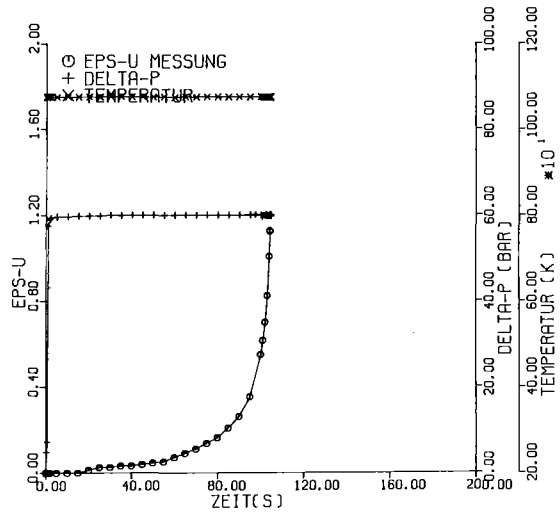
Experiment-Nr. B141



Experiment-Nr. 49

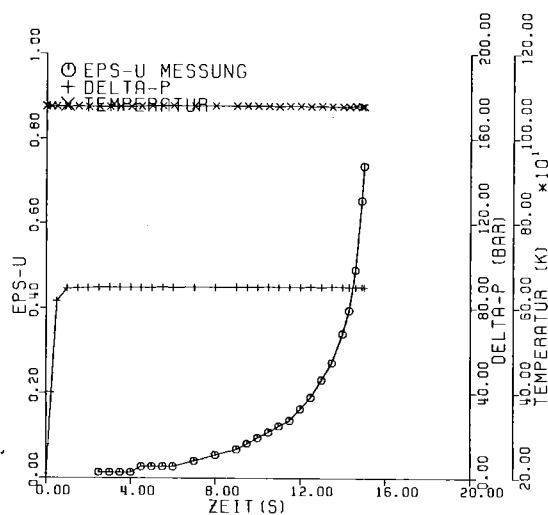


Experiment-Nr. 8



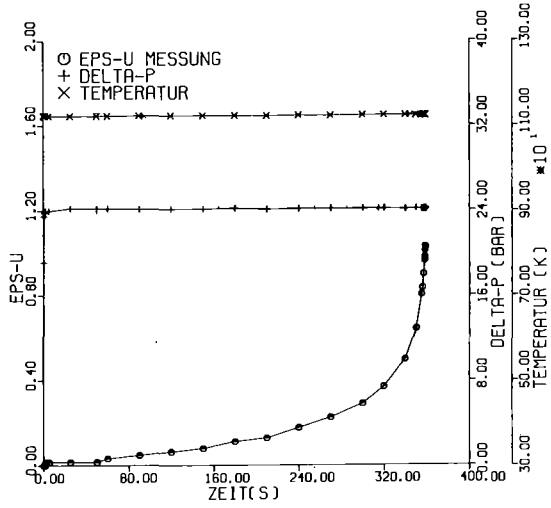
Experiment-Nr. 48

Abb. 9: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-loy-4-Rohrproben bei 800 °C in He-Atmosphäre

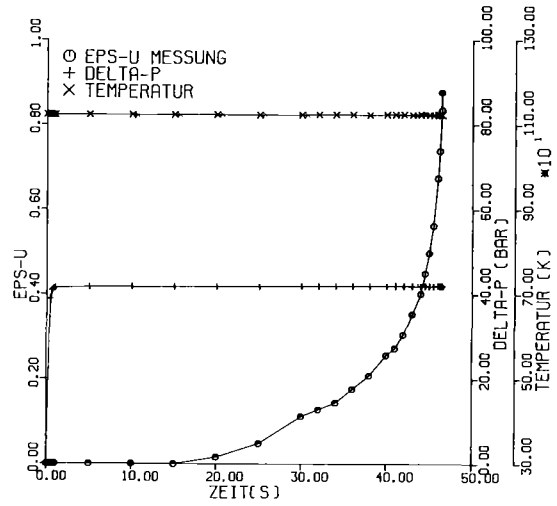


Experiment-Nr. B137

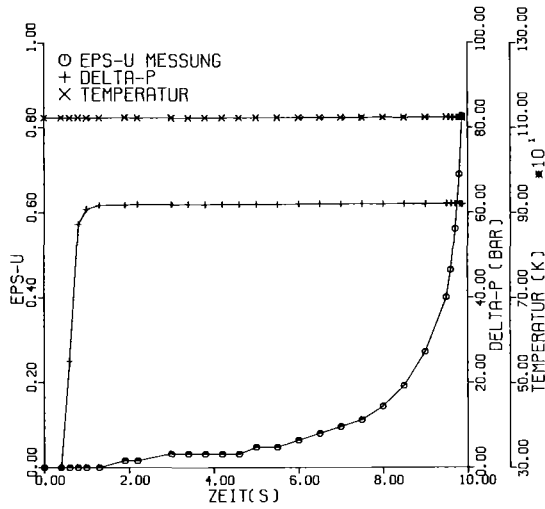
Abb. 9: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-
(Fortsetzung) loy-4-Rohrproben bei 800 °C in He-Atmosphäre



Experiment-Nr. 13

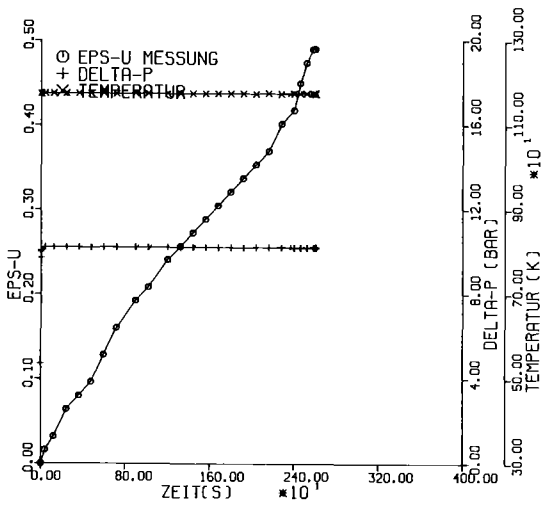


Experiment-Nr. 12

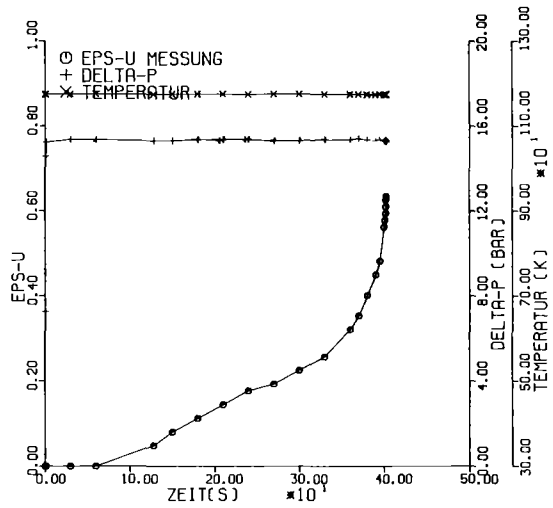


Experiment-Nr. 10

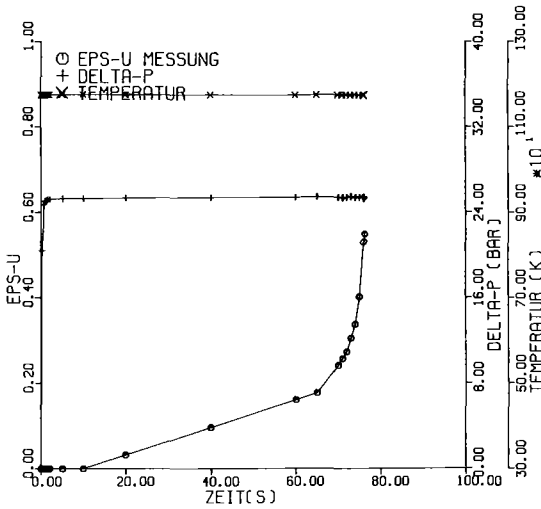
Abb.10: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 850 °C in He-Atmosphäre



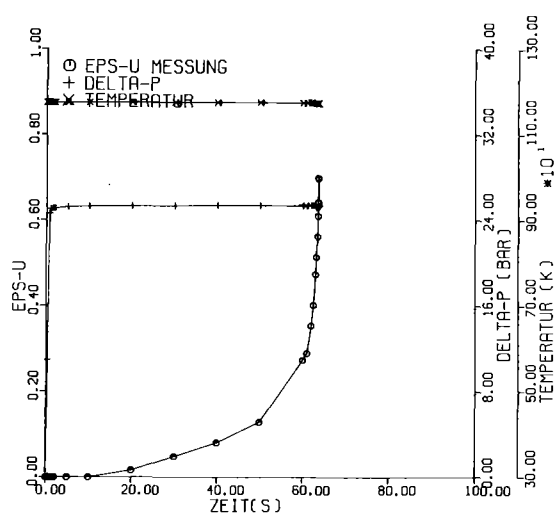
Experiment-Nr. 18



Experiment-Nr. 16

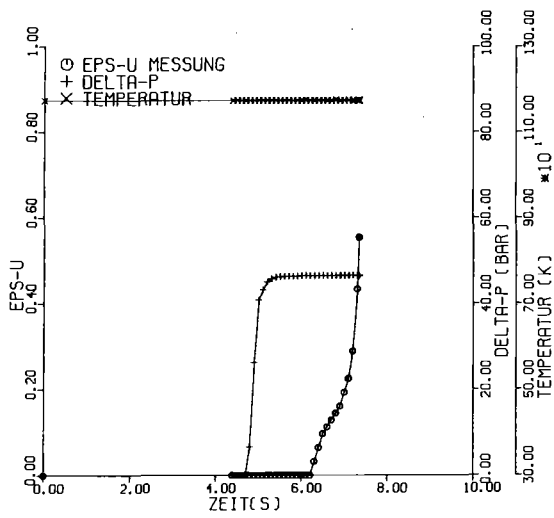


Experiment-Nr. 15

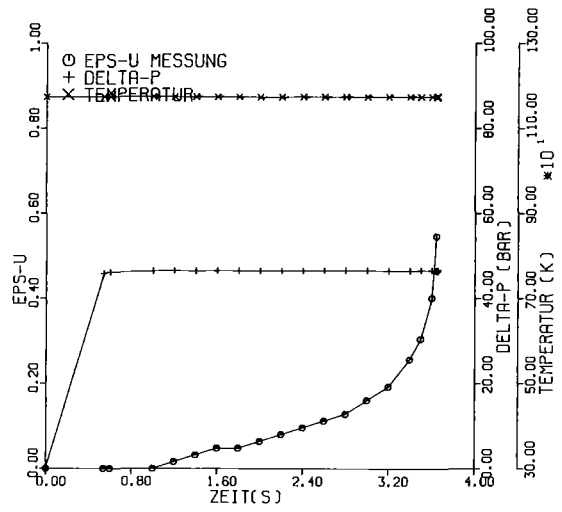


Experiment-Nr. 19

Abb. 11: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 900 °C in He-Atmosphäre

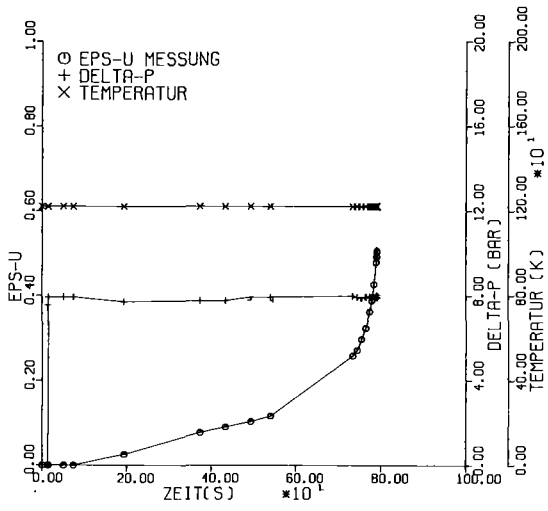


Experiment-Nr. 14

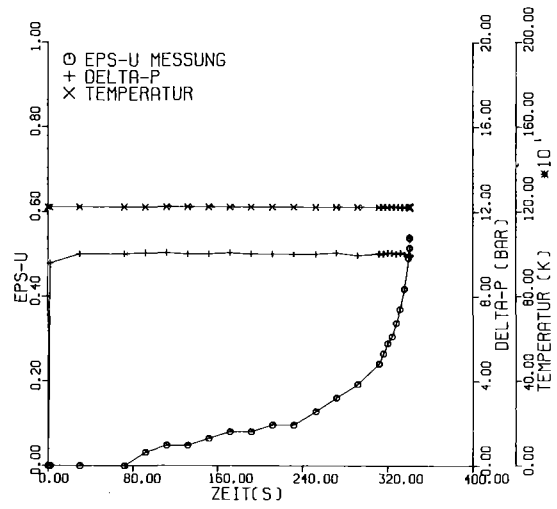


Experiment-Nr. 17

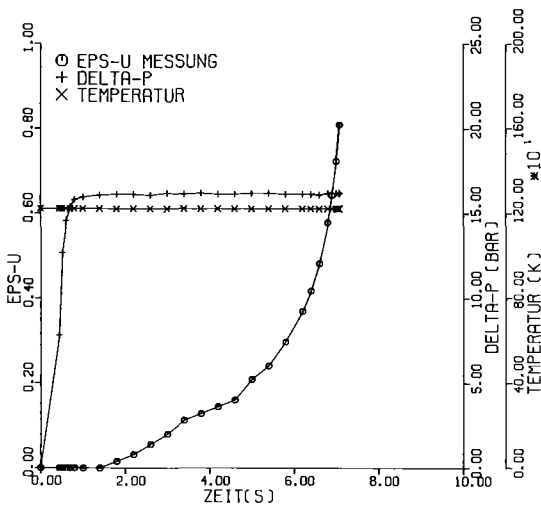
Abb.11: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-
(Fortsetzung) loy-4-Rohrproben bei 900 C in He-Atmosphäre



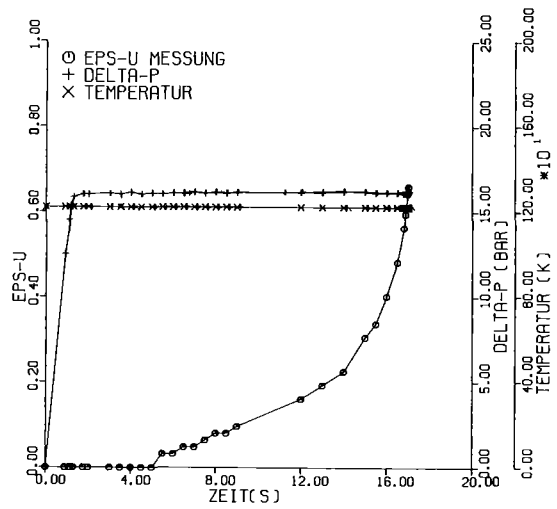
Experiment-Nr. 24



Experiment-Nr. 20

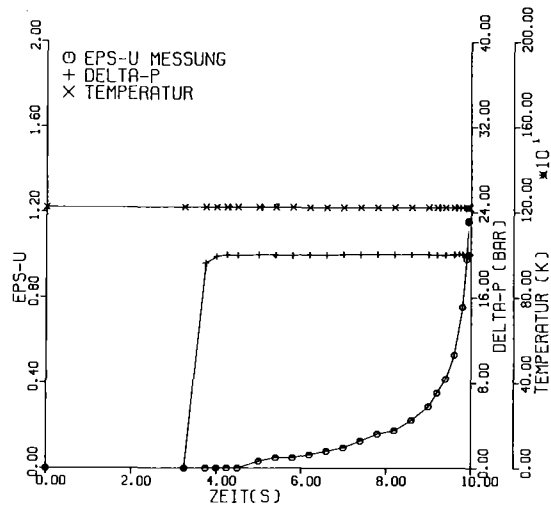


Experiment-Nr. 21



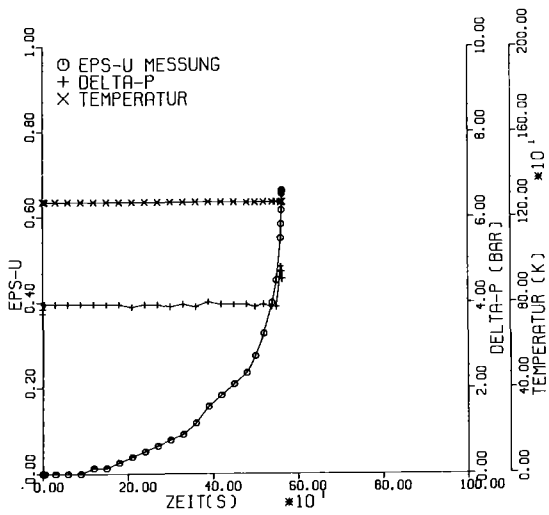
Experiment-Nr. 23

Abb. 12: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-loy-4-Rohrproben bei 950 °C in He-Atmosphäre

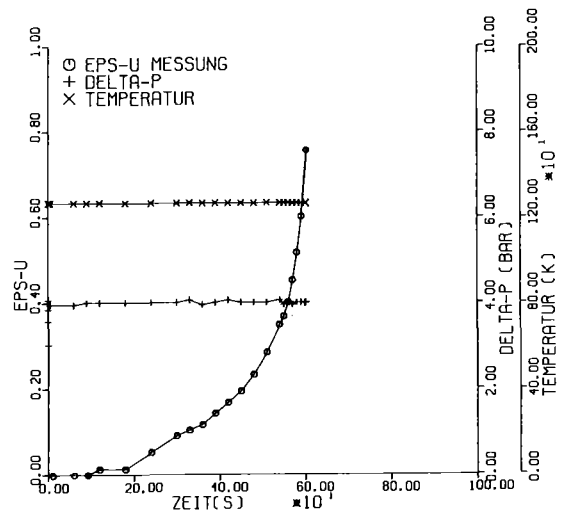


Experiment-Nr. 22

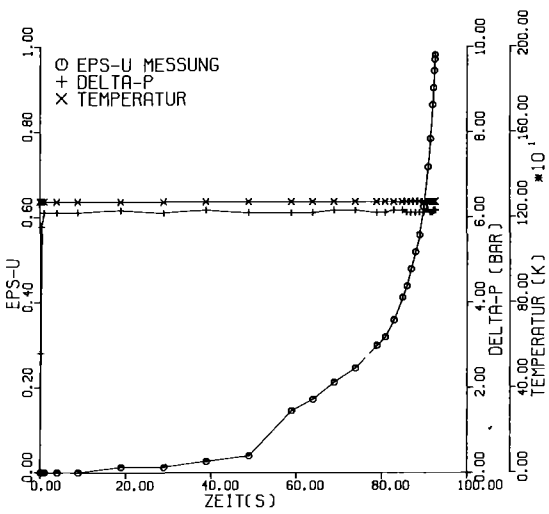
Abb.12: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-
(Fortsetzung) loy-4-Rohrproben bei 950 °C in He-Atmosphäre



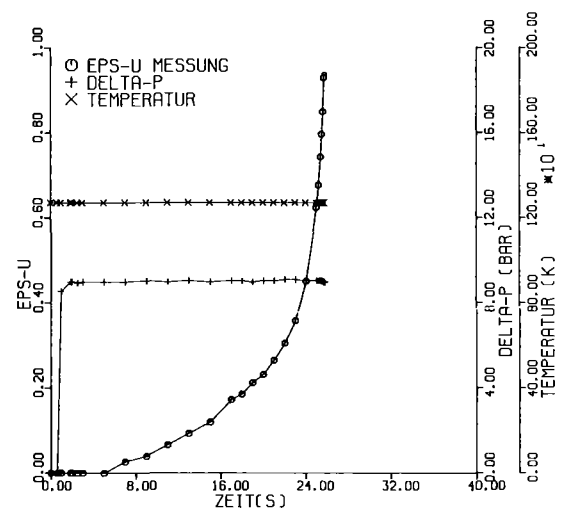
Experiment-Nr. 27



Experiment-Nr. 28

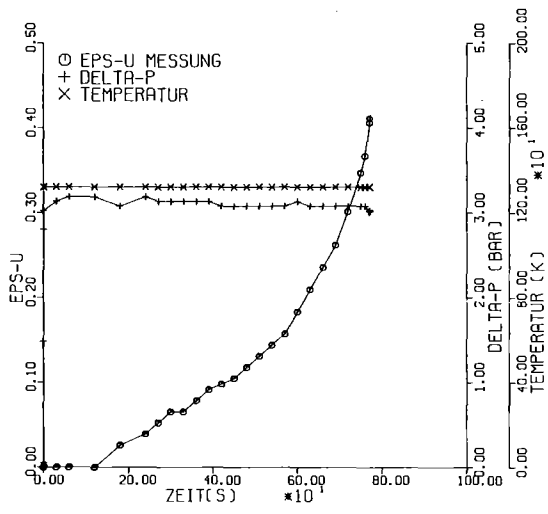


Experiment-Nr. 26

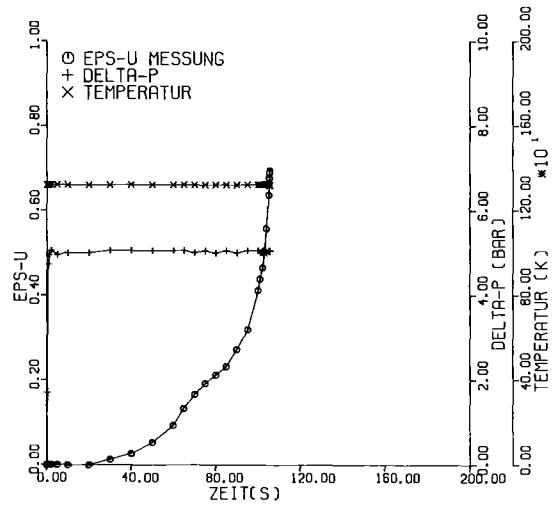


Experiment-Nr. 25

Abb.13: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircalloy-4-Rohrproben bei 1000 °C in He-Atmosphäre

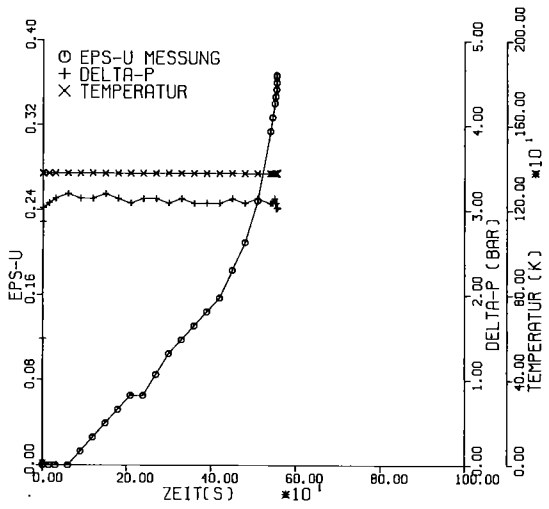


Experiment-Nr. 30

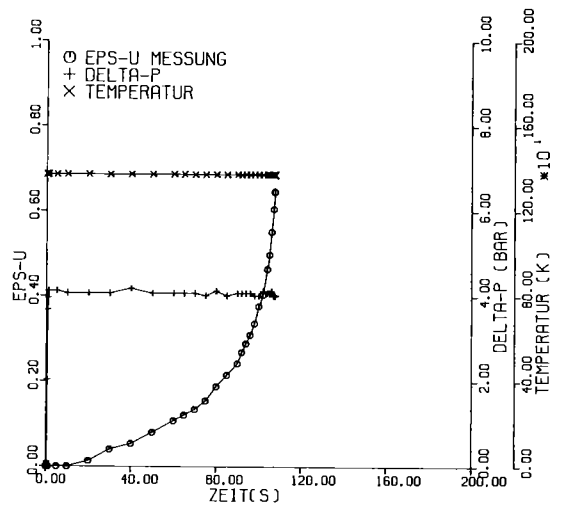


Experiment-Nr. 29

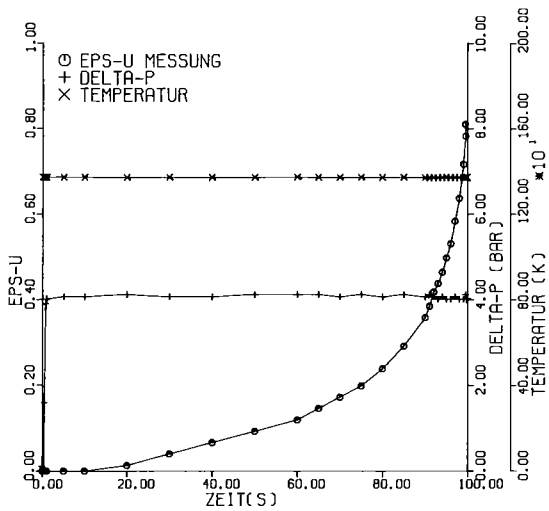
Abb.14: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 1050 °C in He-Atmosphäre



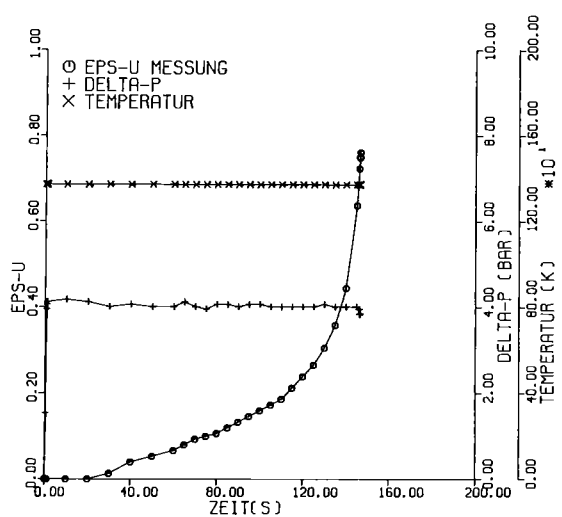
Experiment-Nr. 31



Experiment-Nr. 32

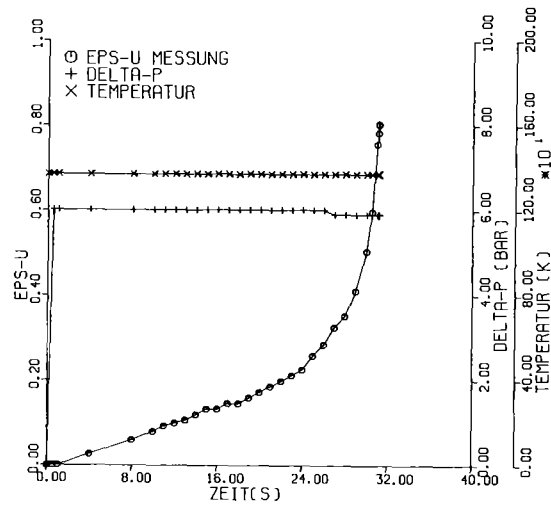


Experiment-Nr. 33



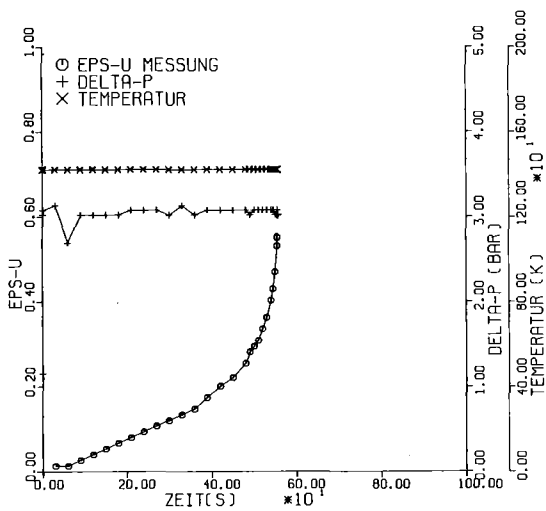
Experiment-Nr. 37

Abb.15: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 1100 °C in He-Atmosphäre

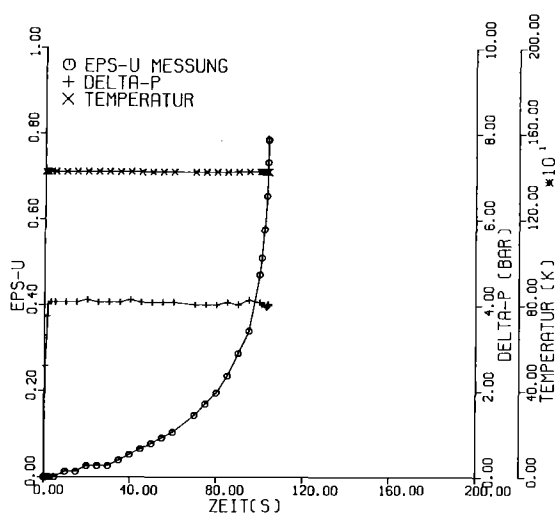


Experiment-Nr. 34

Abb.15: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-
(Fortsetzung) 10Y-4-Rohrproben bei 1100 °C in He-Atmosphäre

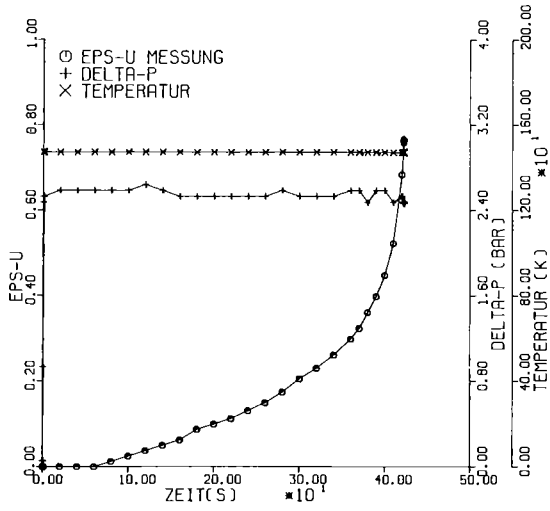


Experiment-Nr. 36

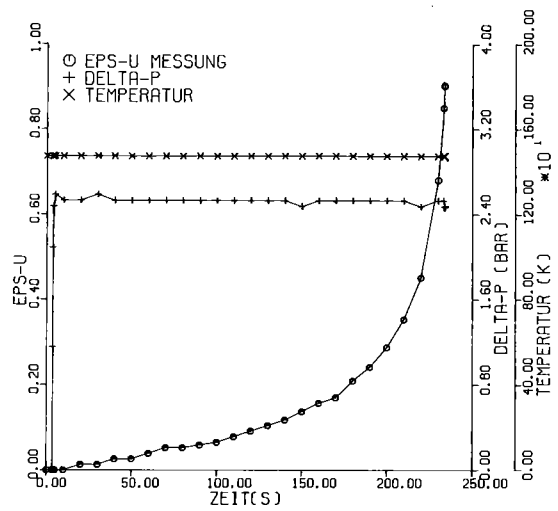


Experiment-Nr. 35

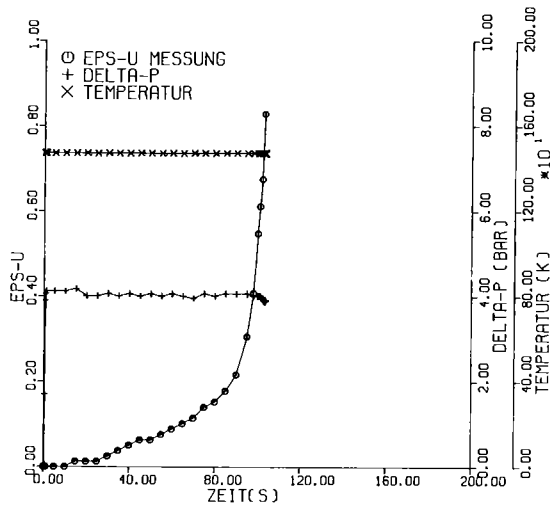
Abb.16: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zirca-loy-4-Rohrproben bei 1150 °C in He-Atmosphäre



Experiment-Nr. 39



Experiment-Nr. 40



Experiment-Nr. 38

Abb.17: Temperatur-, Druck- und Dehnungsverlauf von as-received Zircaloy-4-Rohrproben bei 1200 °C in He-Atmosphäre

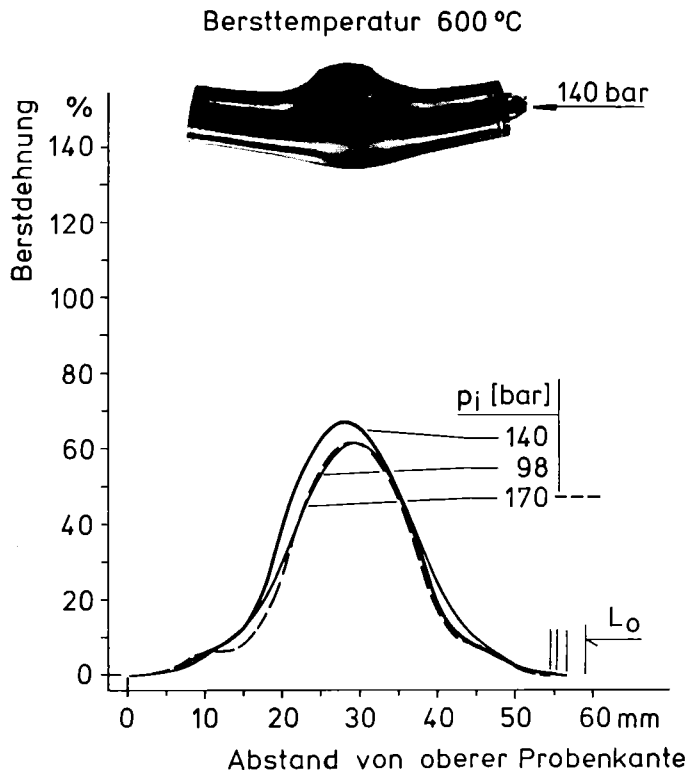


Abb.18: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 600 °C. Einfluß des Druckes auf die Berstdehnung. Darstellung der Proben mit maximaler und minimaler Aufweitung

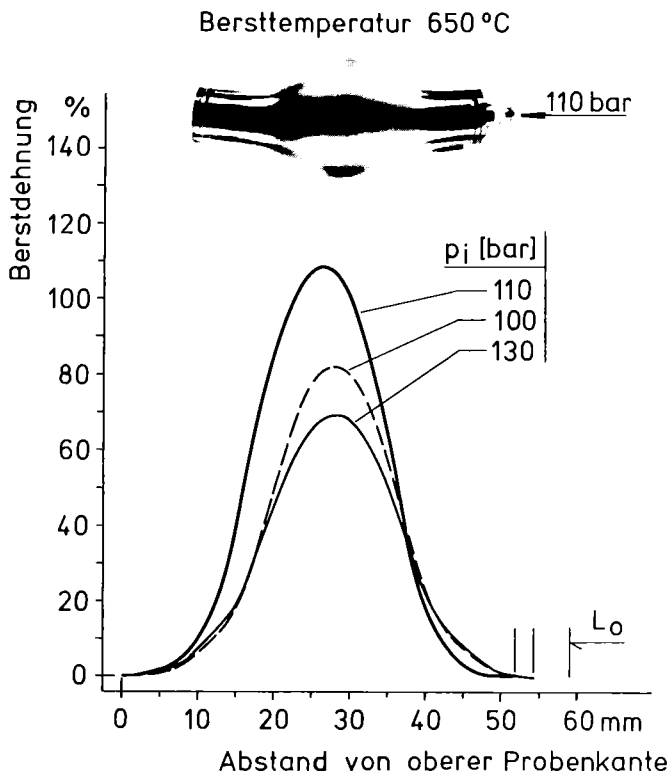


Abb.19: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 650 °C

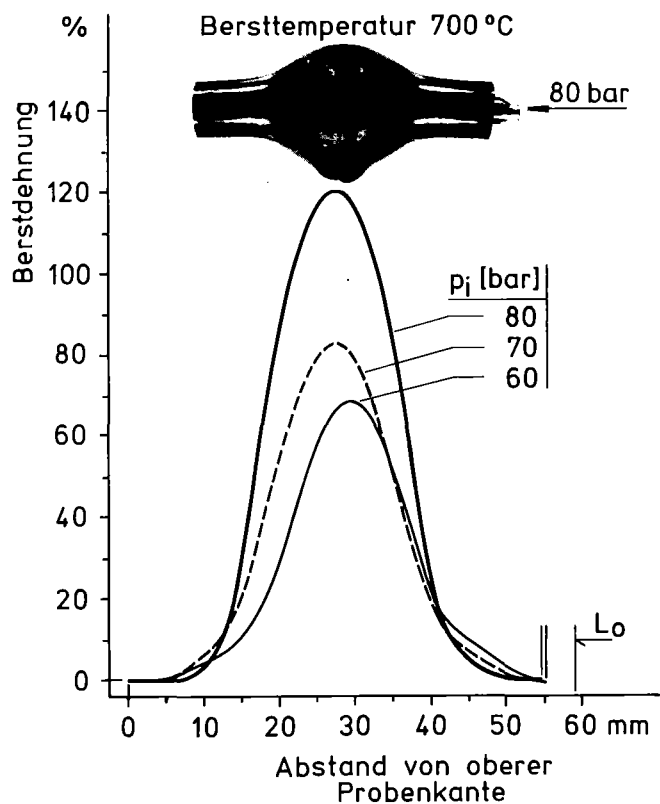


Abb.20: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 700 °C

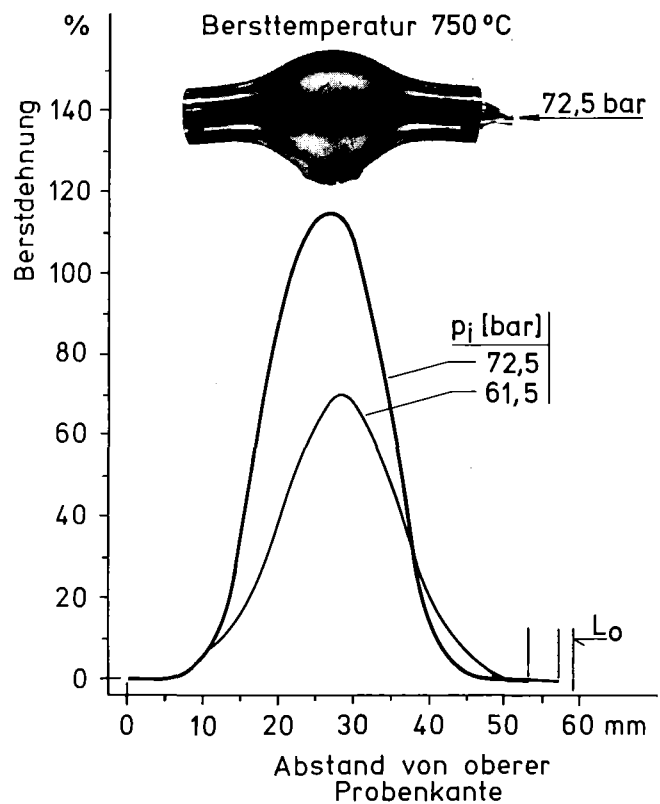


Abb.21: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 750 °C

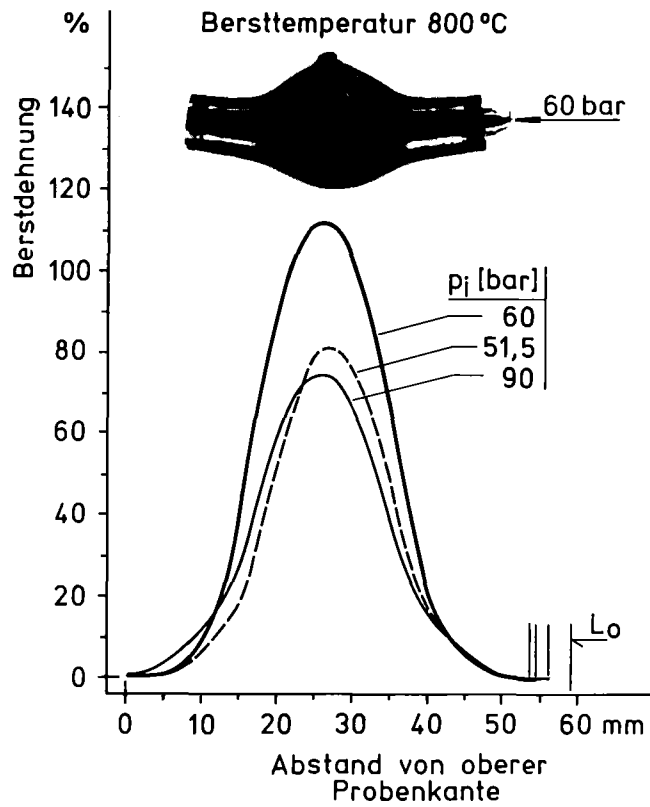


Abb.22: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 800 °C

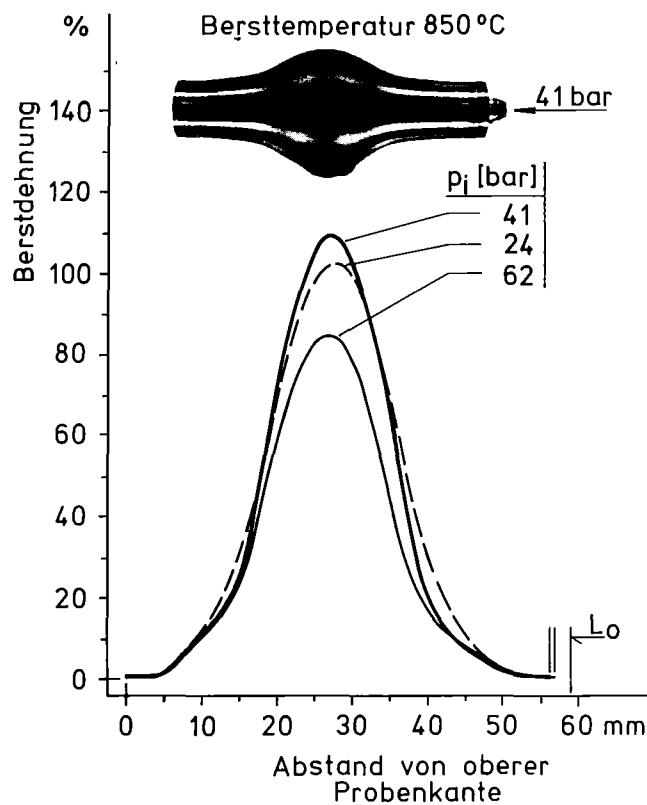


Abb.23: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 850 °C

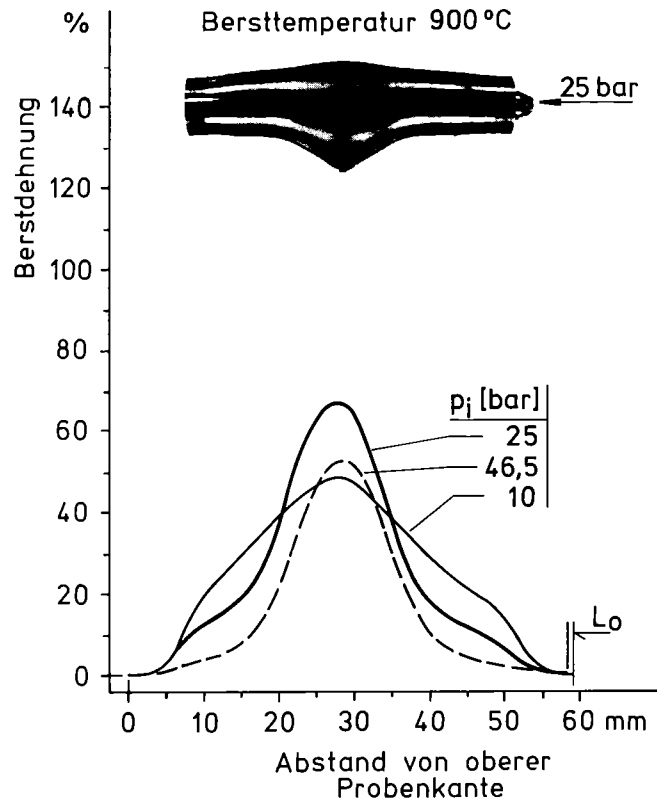


Abb.24: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 900 °C

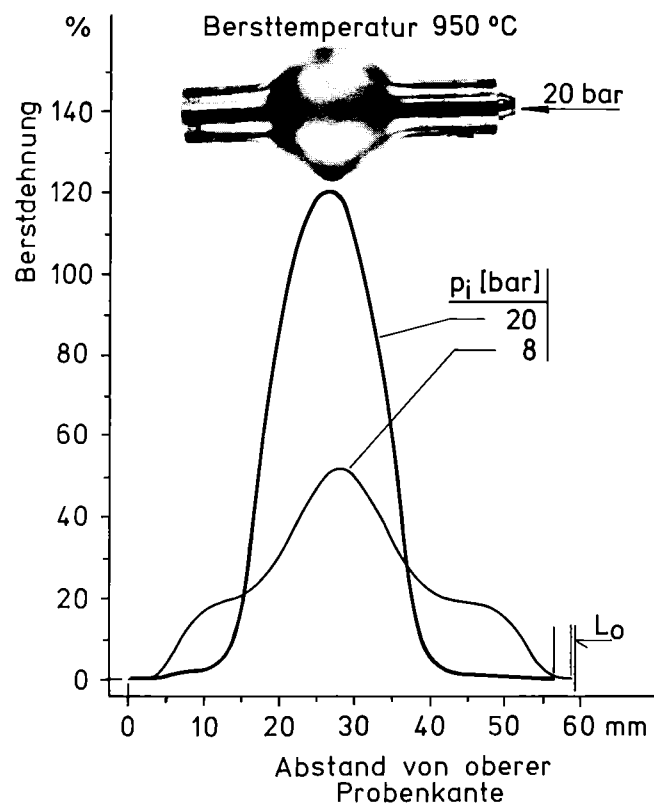


Abb.25: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 950 °C

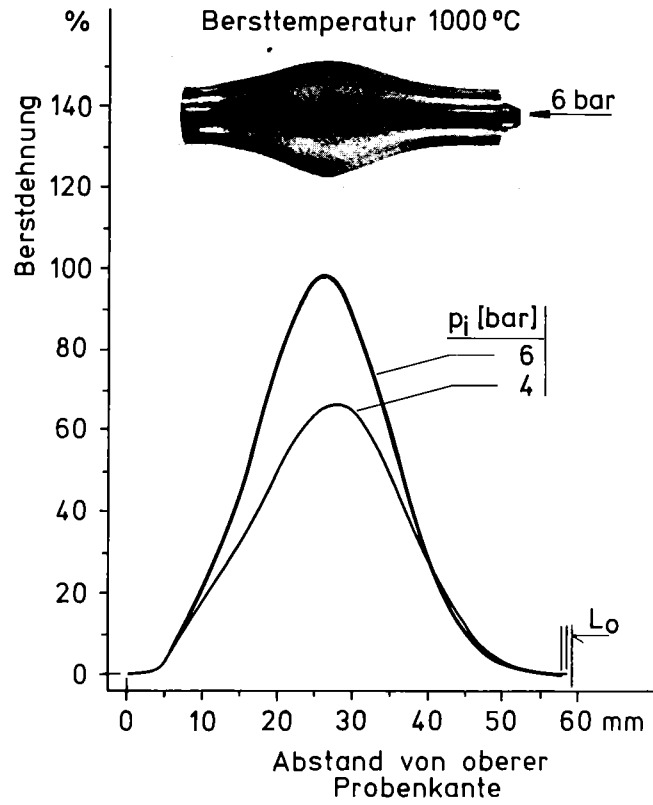


Abb.26: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 1000 °C

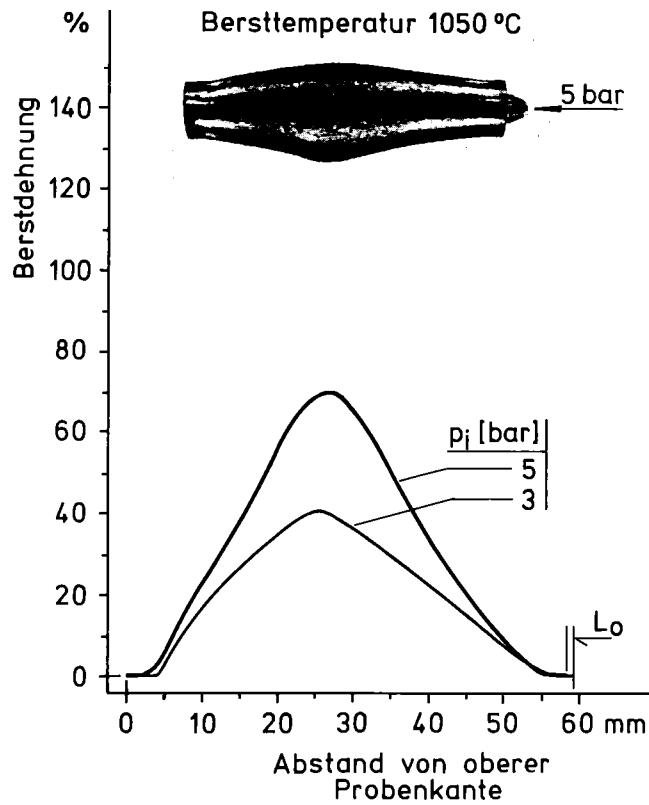


Abb.27: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 1050 °C

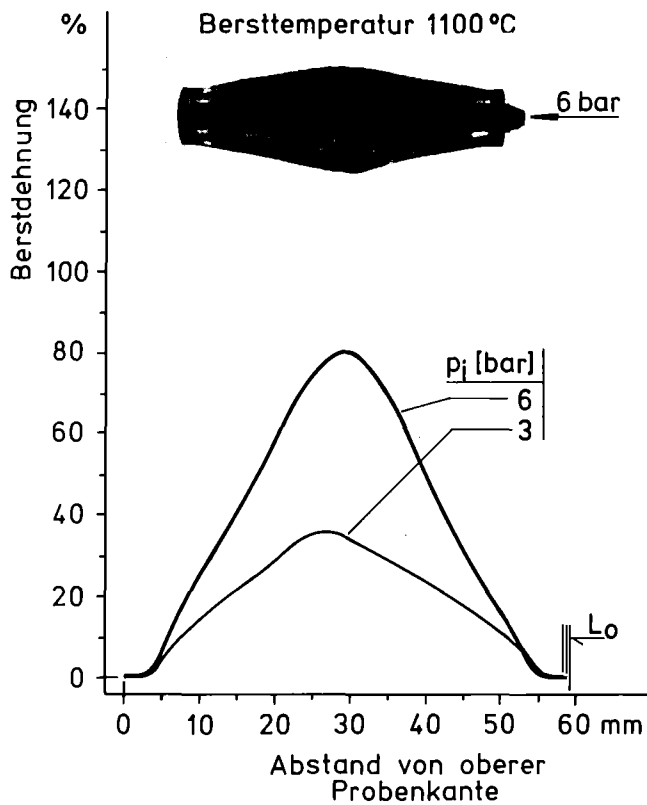


Abb.28: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 1100 °C

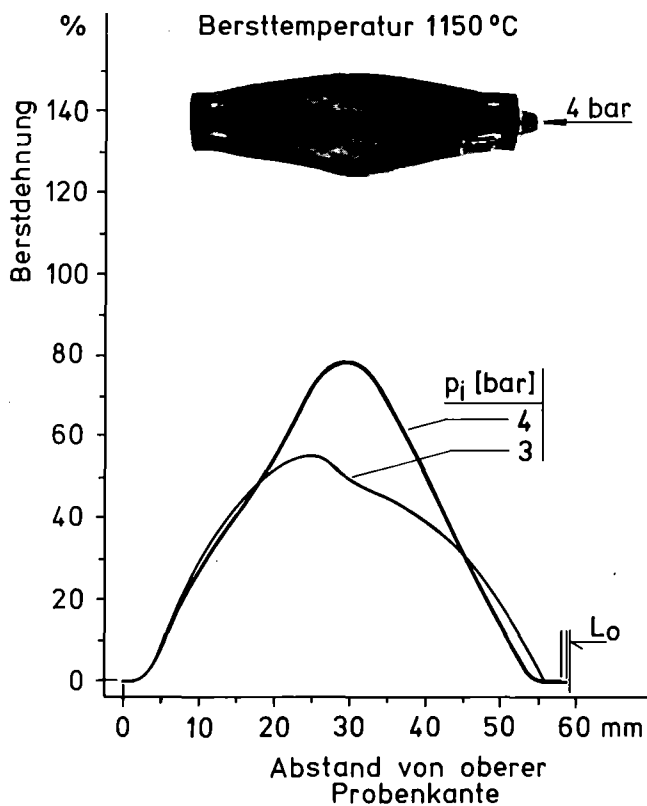


Abb.29: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 1150 °C

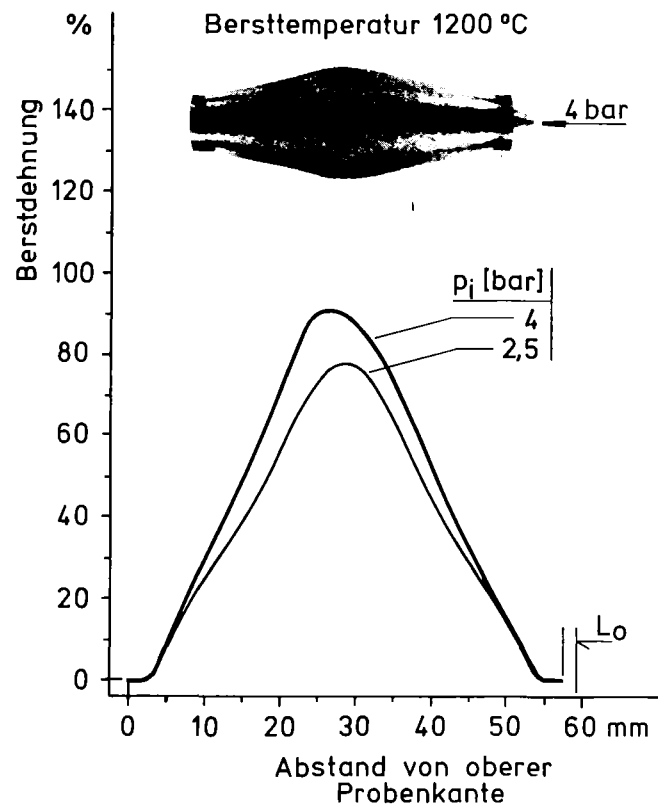


Abb.30: Axiales Profil der Umfangsdehnung der Rohrproben nach dem Bersten bei 1200 °C

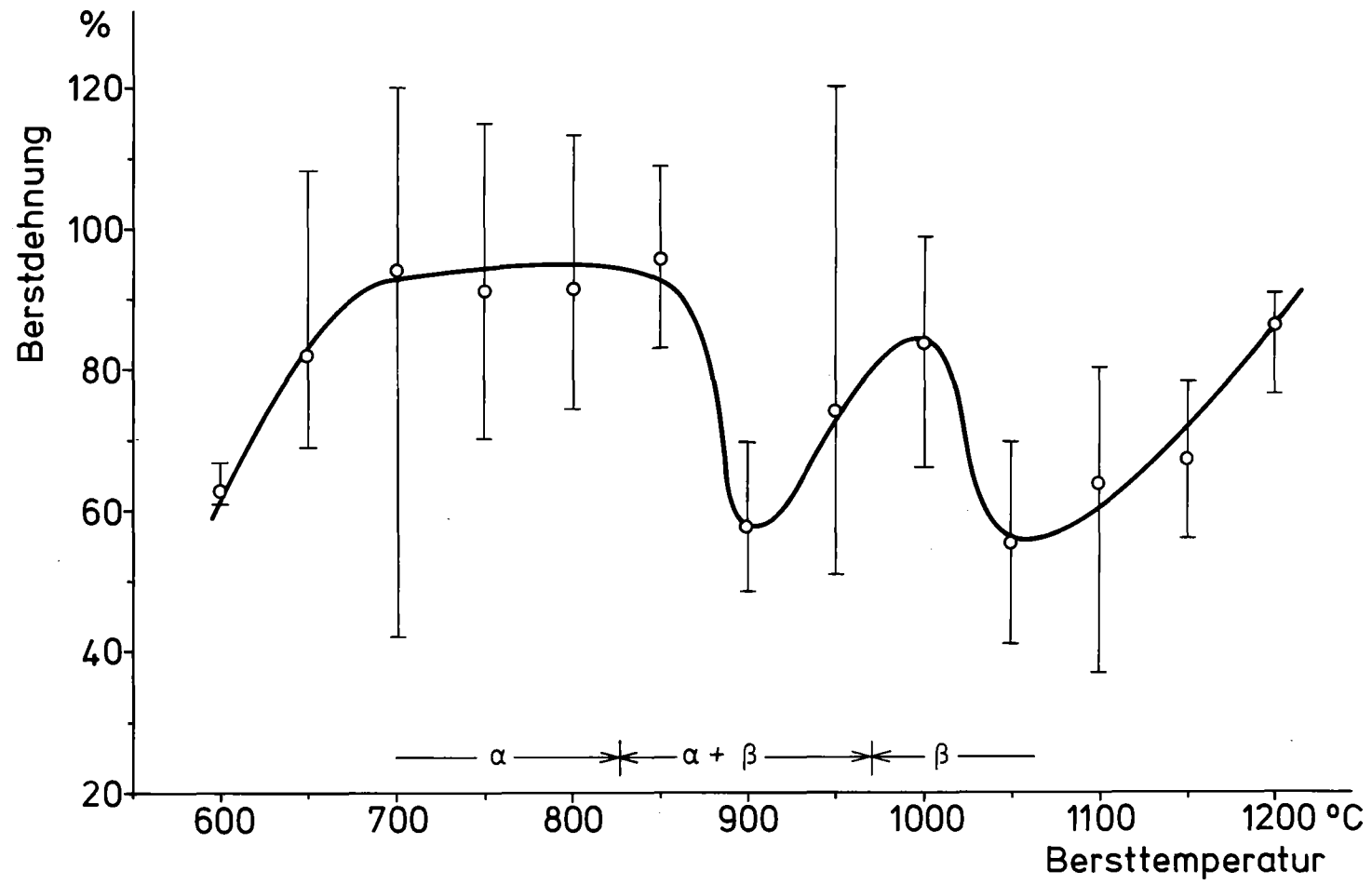


Abb.31: Berstumfangsdehnung der as-received Zircaloy-4-Rohrproben in He-Atmosphäre in Abhängigkeit der Temperatur

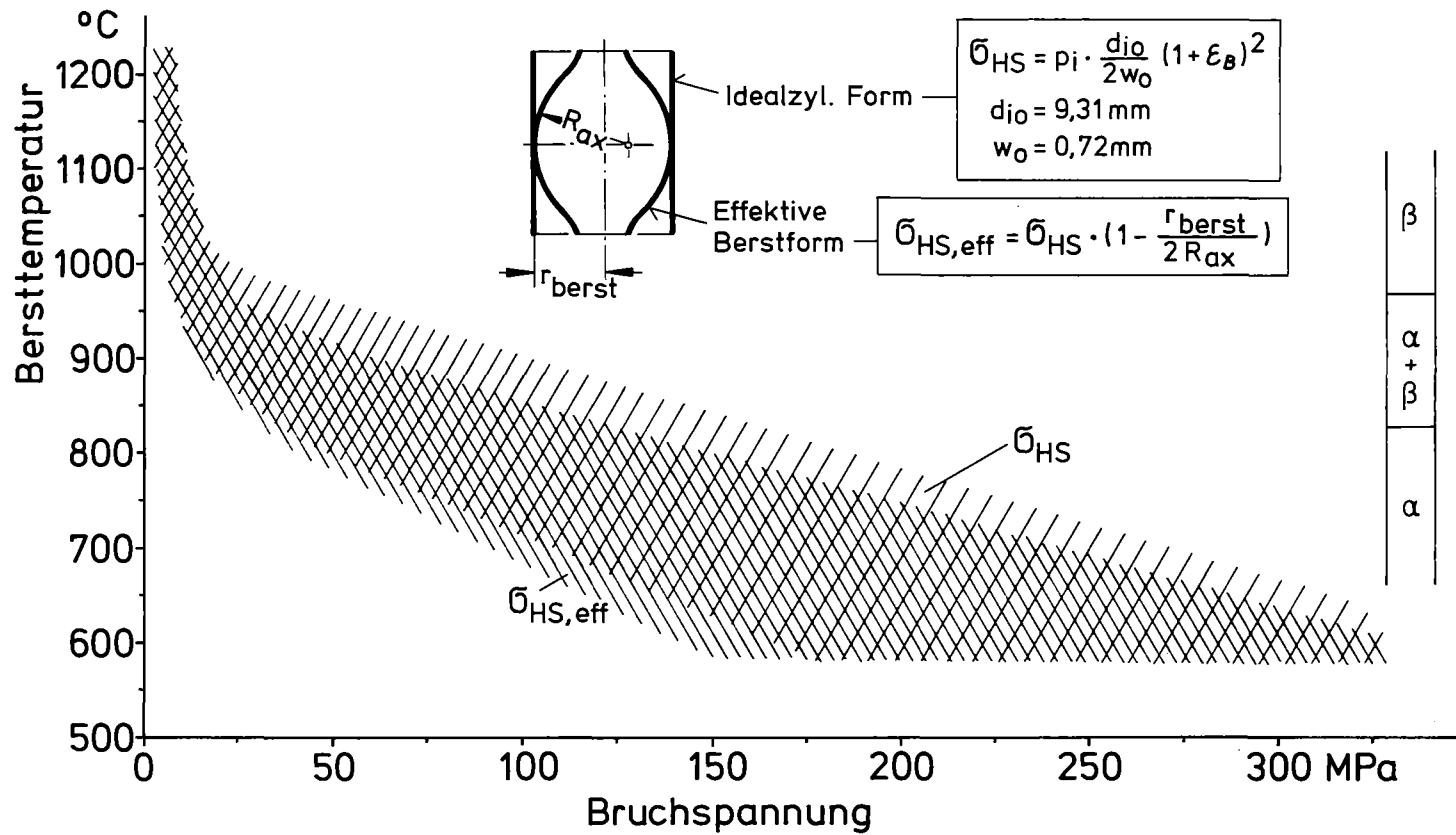


Abb.32: Tangentiale Bruchspannungen der Rohrproben in Abhängigkeit der Temperatur

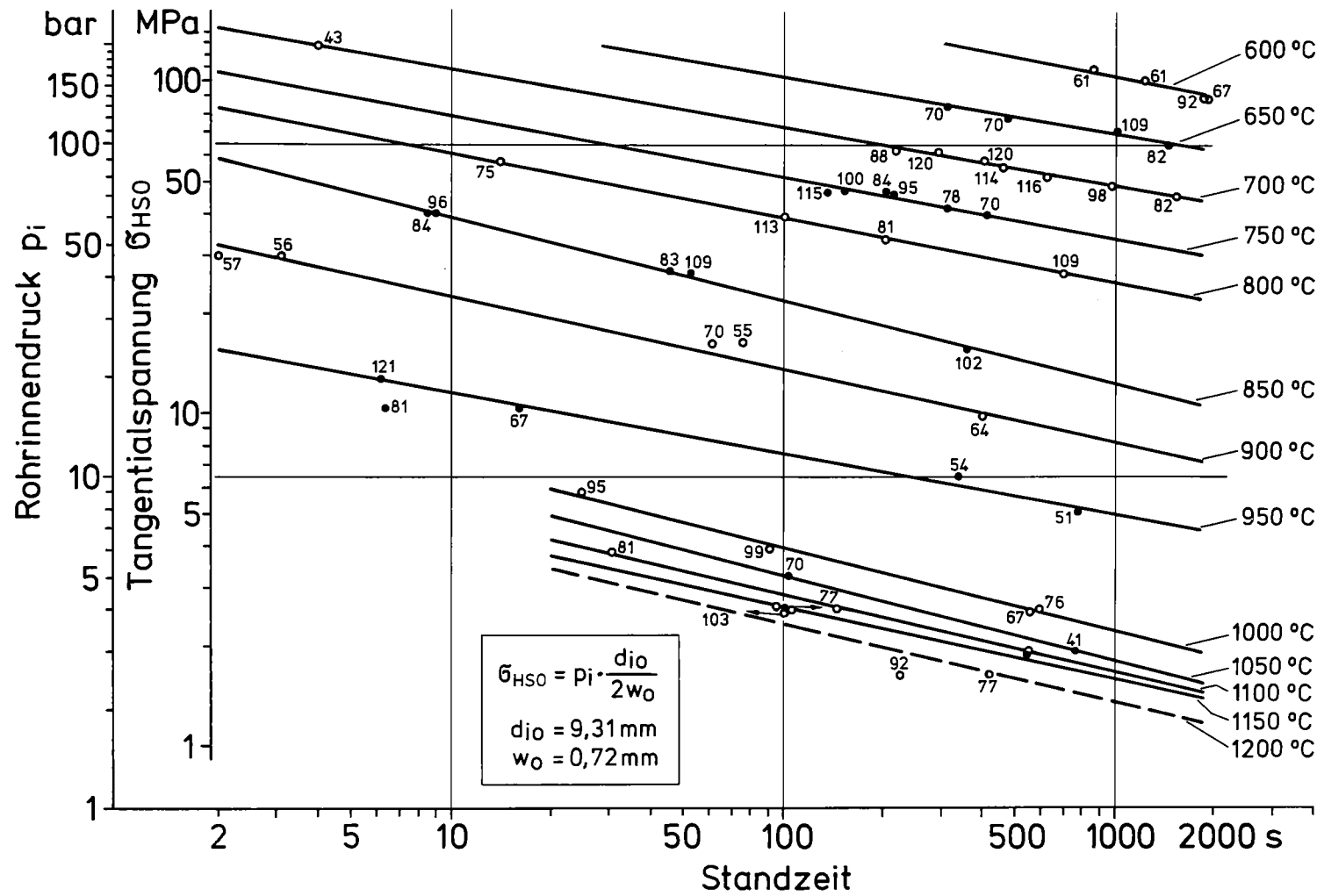
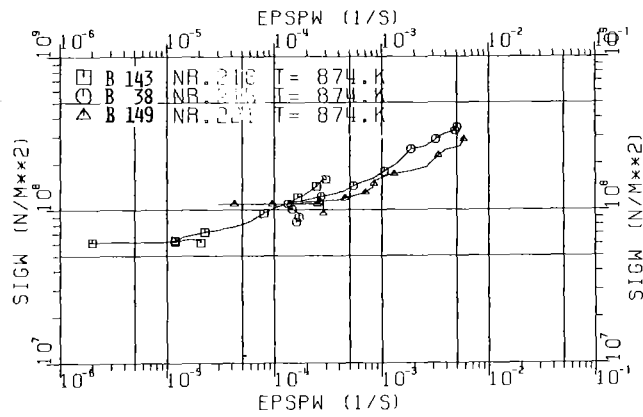
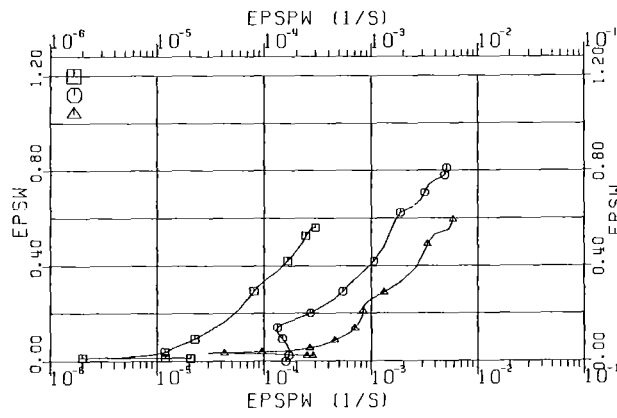
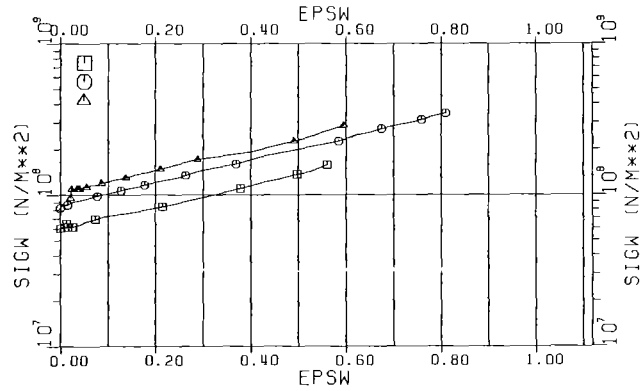


Abb.33: Zeitstandkurven der Rohrproben für den Temperaturbereich 600 bis 1200 °C in He-Atmosphäre (mit Angabe der Berstdehnung in %)



BRST TUBR ANALYSE T=600C

Abb.34: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 600°C

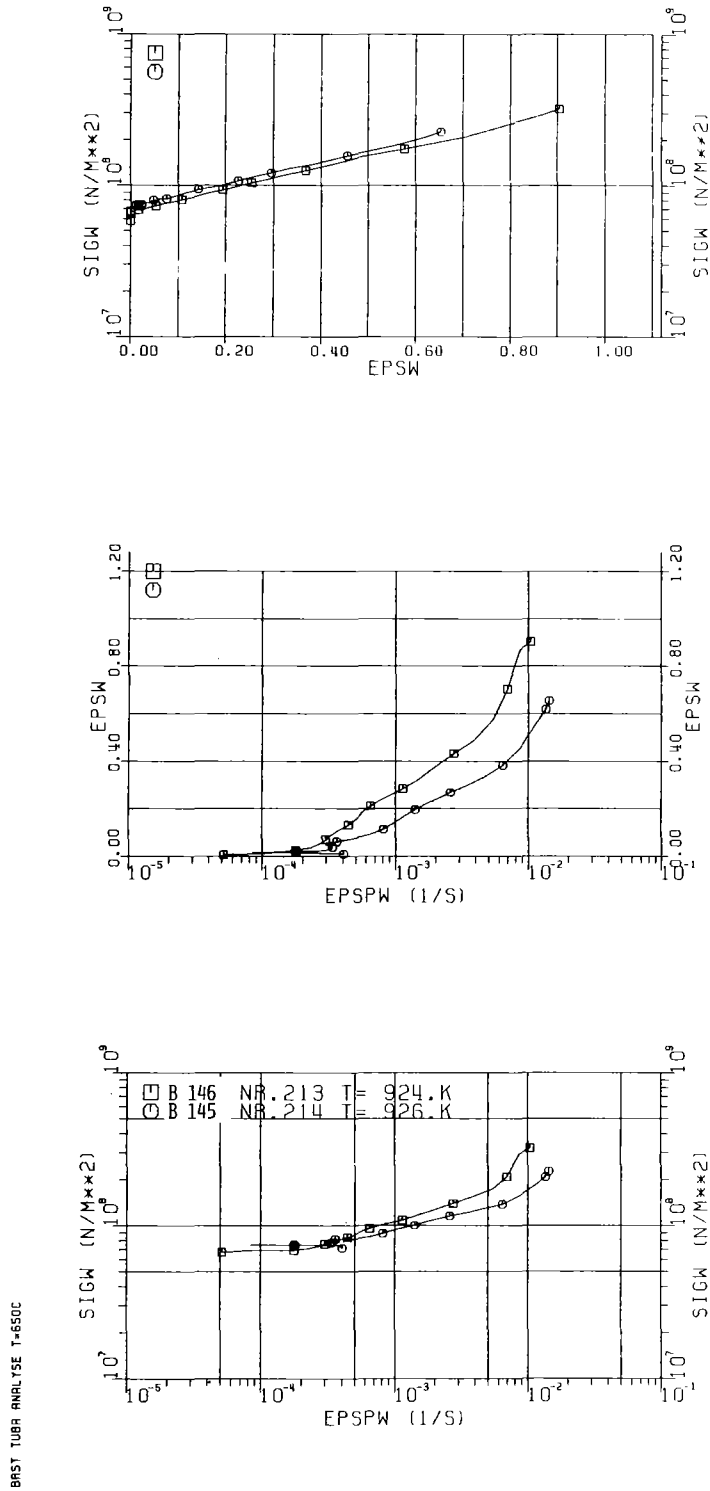
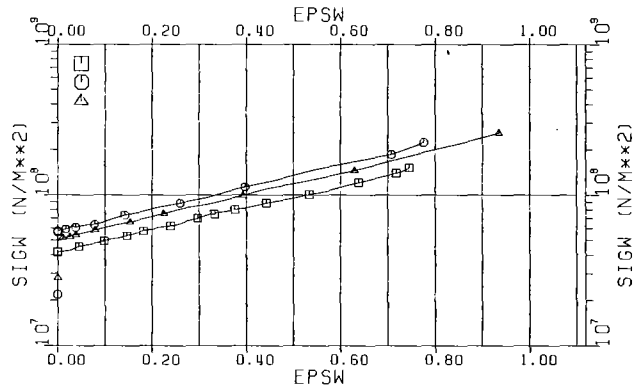
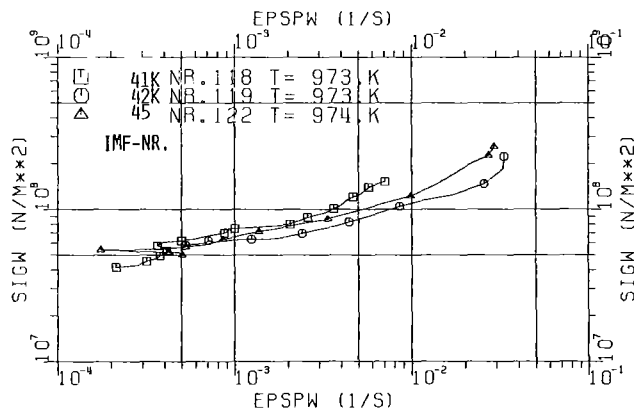
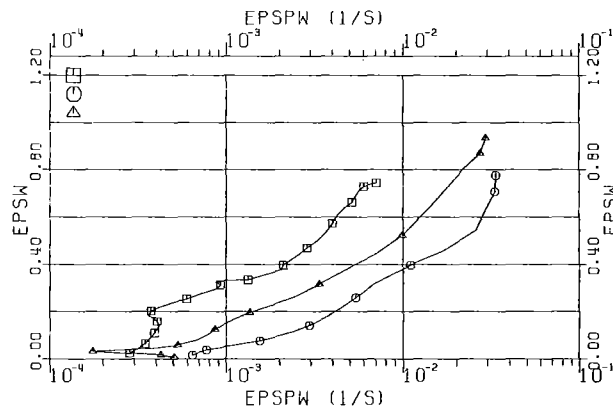


Abb.35: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 650°C

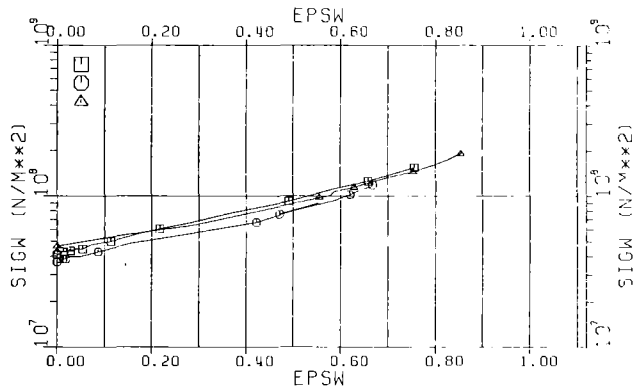


BRSTVERSUCHE

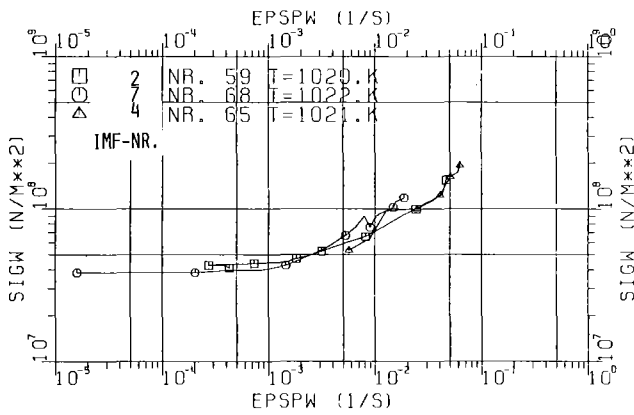
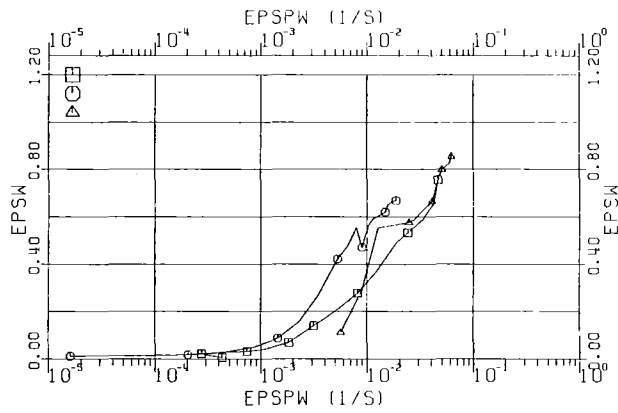


BRST TUBA ANALYSE T=700C

Abb.36: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 700 °C

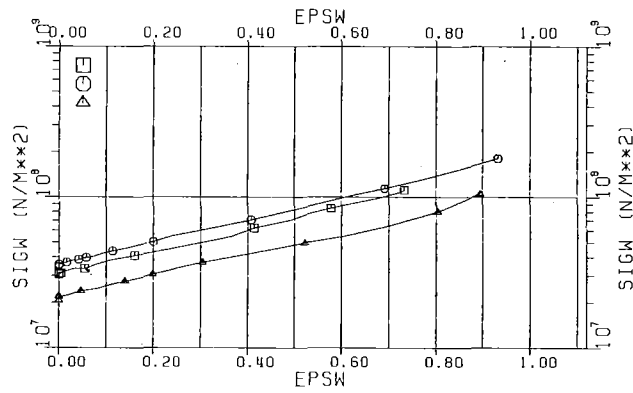


BRSI VERSUCHE

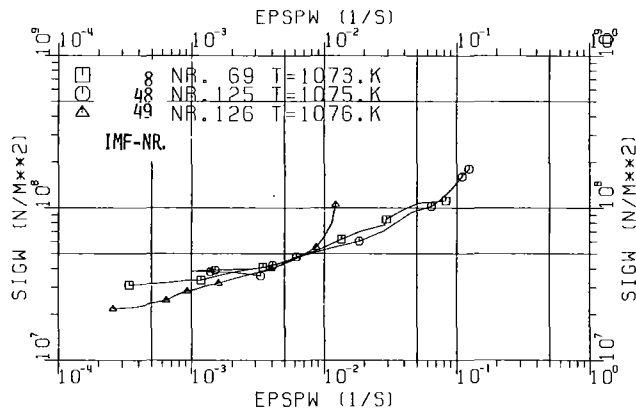
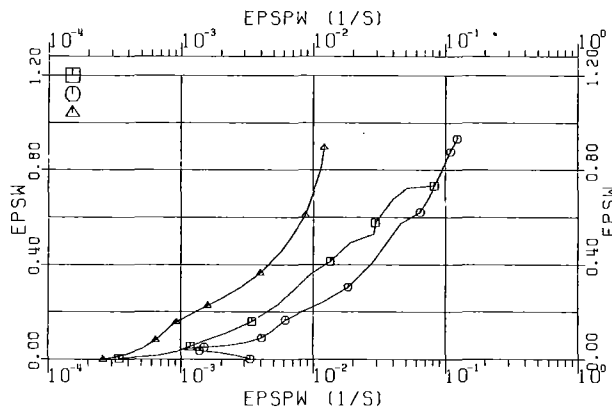


BRSI TUBA ANALYSE T=750C

Abb.37: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 750°C

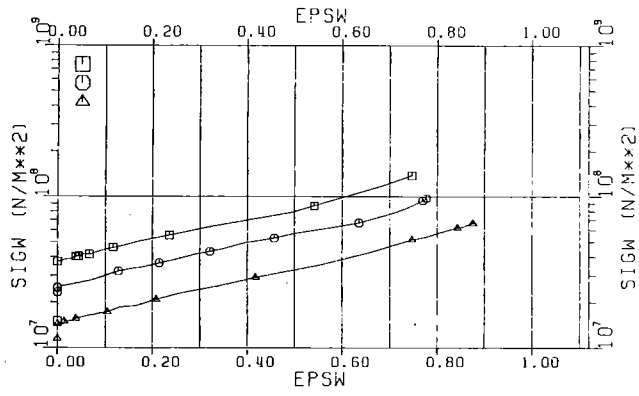


BRSTVERSUCHE

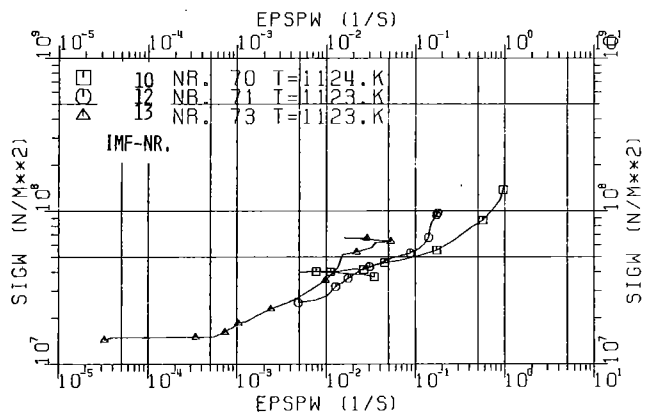
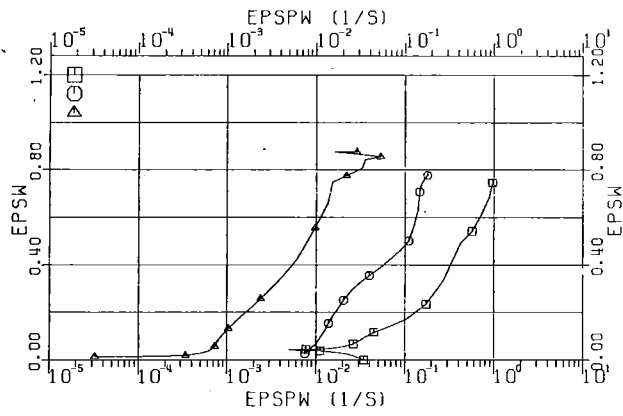


BRST TUBA ANALYSE T=800C

Abb.38: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 800°C

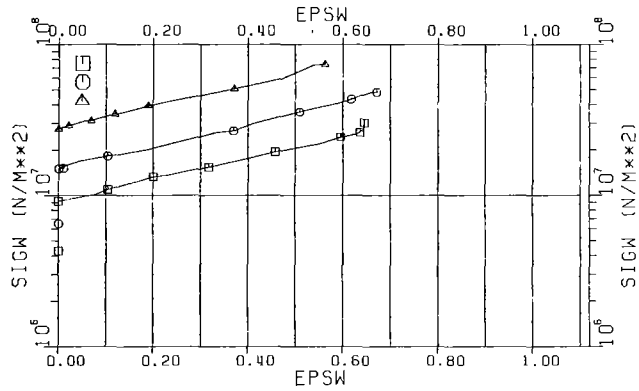


BRSTVERSUCHE

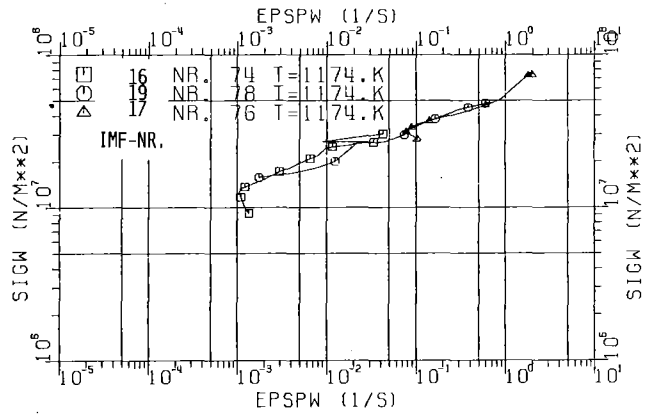
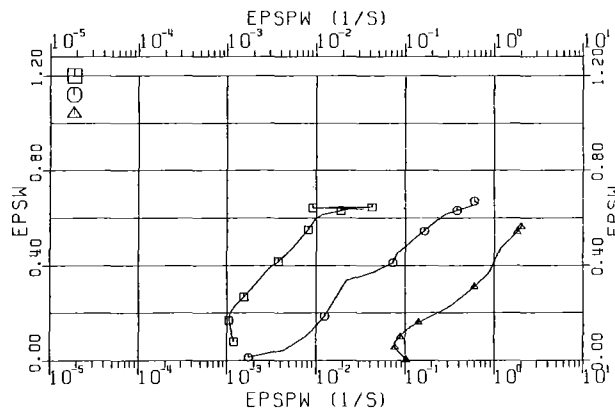


BRST TUBR ANALYSE T=850C

Abb.39: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 850°C

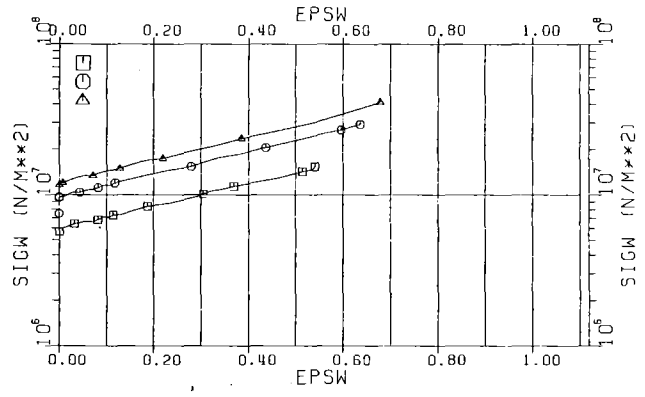


BRSTVERSUCHE

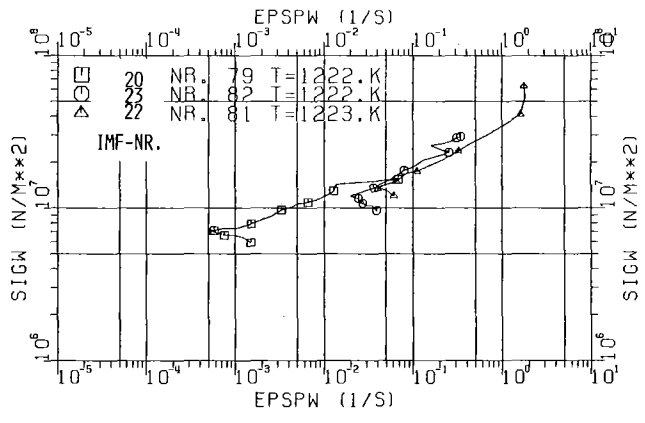
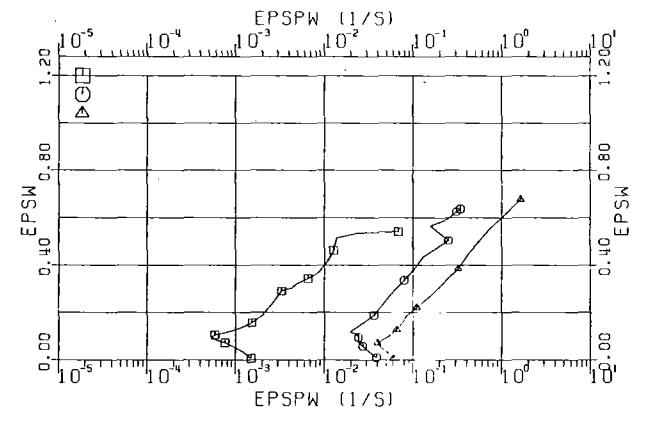


BRST TUBA ANALYSE T=900C

Abb. 40: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 900°C

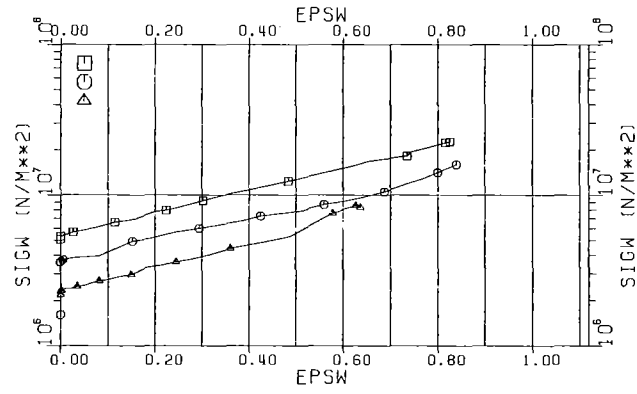


BRSTVERSUCHE

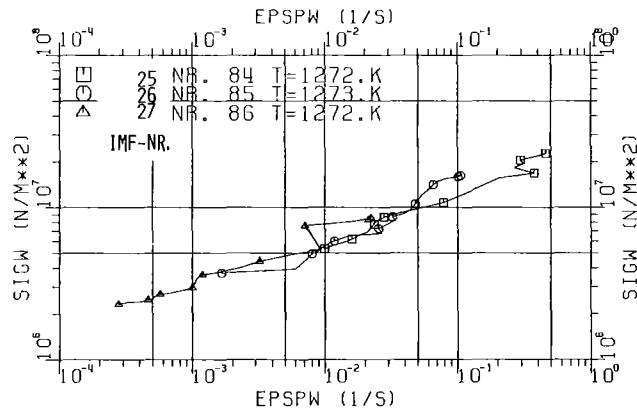
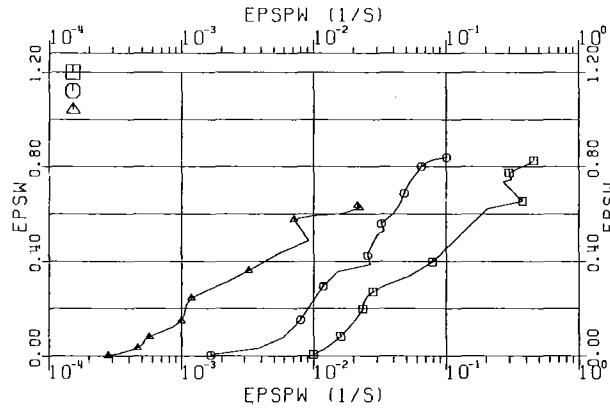


BRST TUBER ANALYSE T=950C

Abb.41: $\sigma/\dot{\epsilon}$ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 950°C

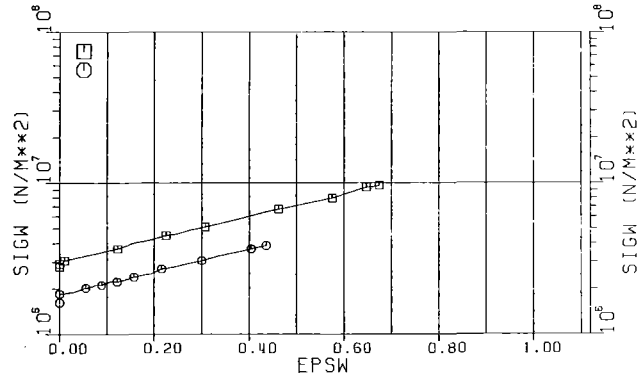


BRSTVERSUCHE

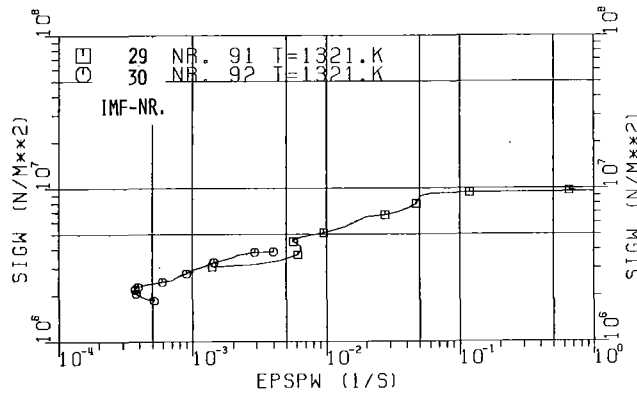
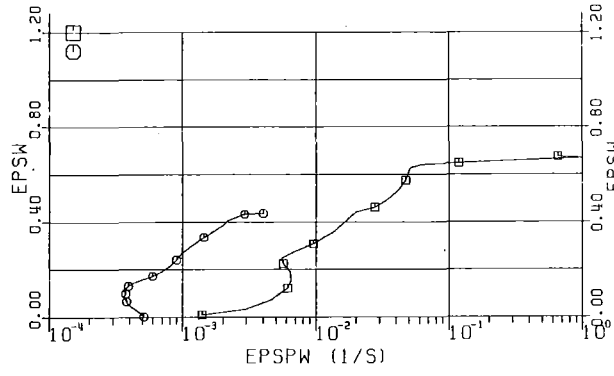


BRST TUBA ANALYSE T=1000C

Abb.42: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 1000°C

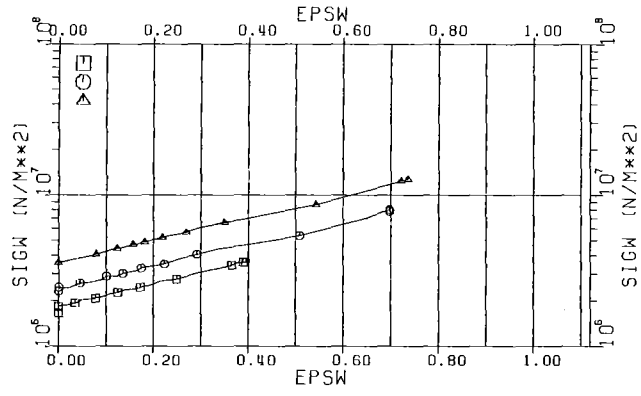


BRSTVERSUCHE

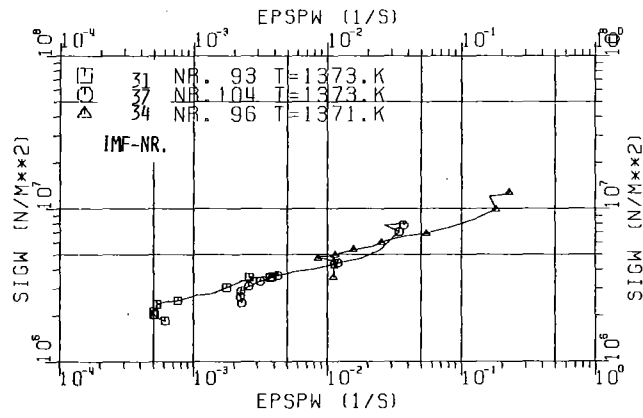
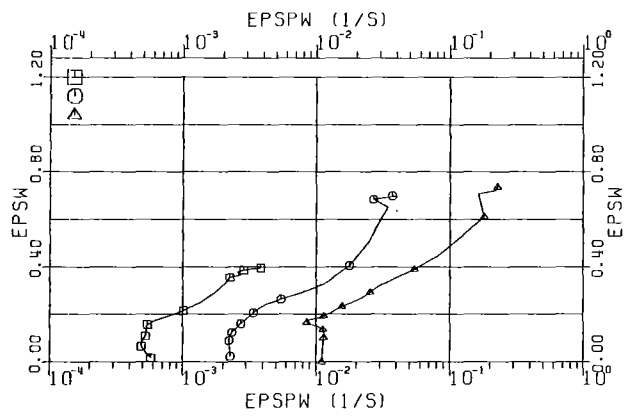


BRST TUBA ANALYSE T=1050C

Abb.43: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 1050°C

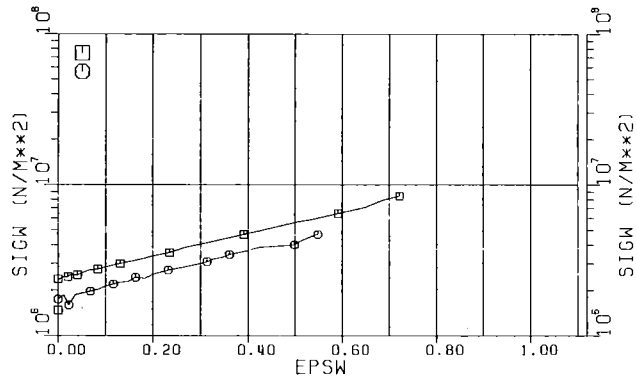


BRSTVERSUCHE

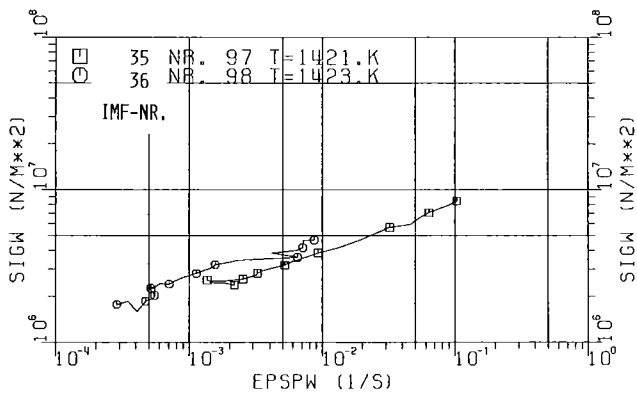
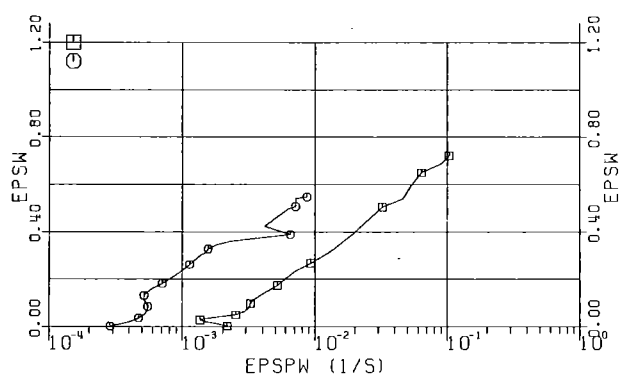


BRST TUBA ANALYSE T=1100C

Abb.44: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 1100°C

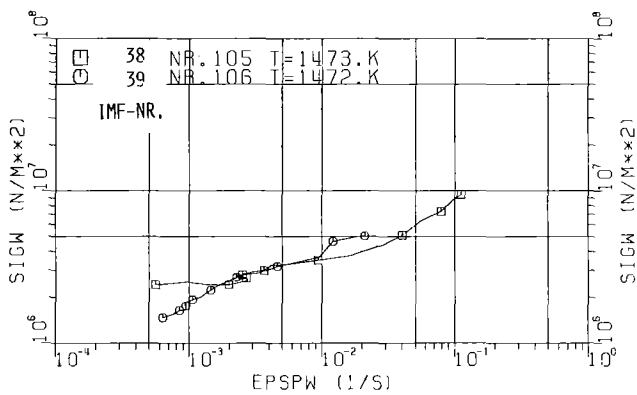
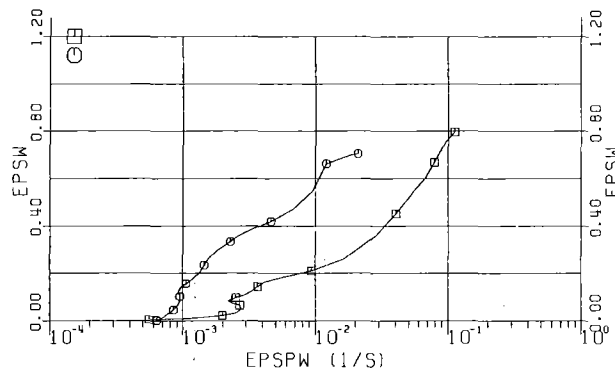
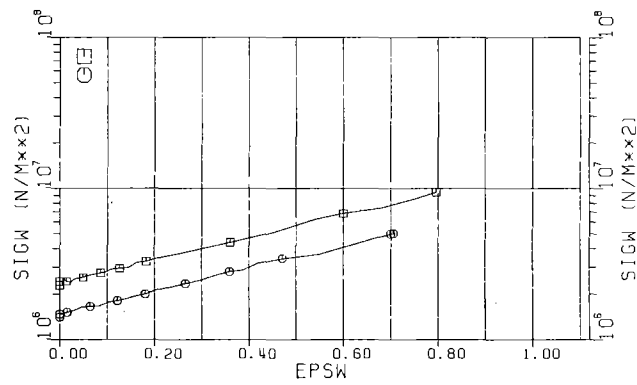


BRSTVERSUCHE



BRST TUBA ANALYSE T=1150C

Abb.45: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 1150°C



BRST TUBR ANALYSE T=1200C

Abb. 46: σ/ϵ -, $\epsilon/\dot{\epsilon}$ - und $\sigma/\dot{\epsilon}$ -Darstellungen der Zeitstandexperimente bei 1200°C

Δp [bar]

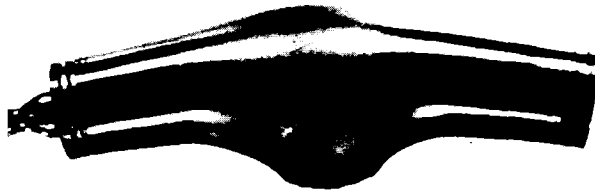
ε_B [%]

98,5



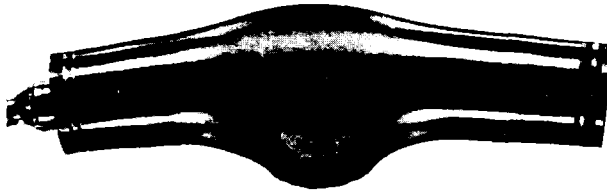
61,5

140



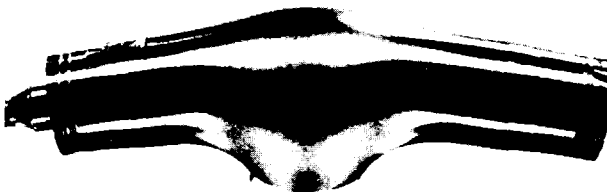
67

157



61,2

170,5



61,4

Abb. 47: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 600°C.

Δp [bar]

ε_B [%]

100,5



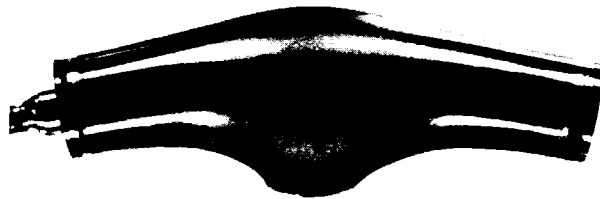
82

110



108,5

120,5



69,5

130



69,5

Abb. 48: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 650 °C.


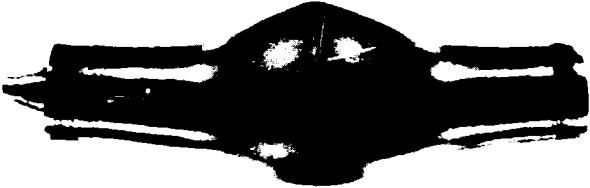
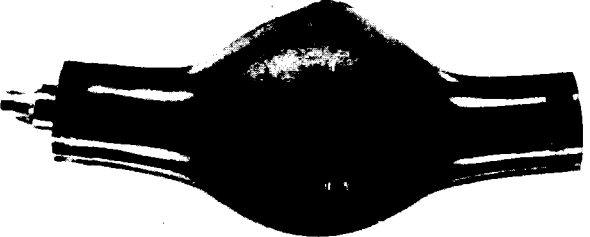
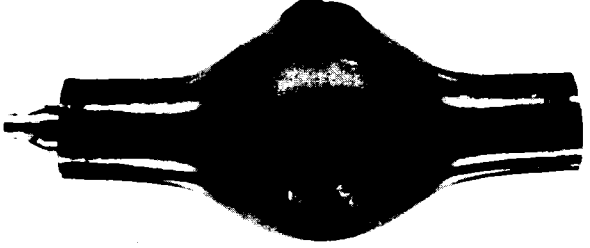
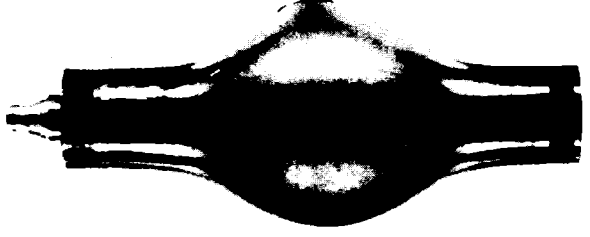

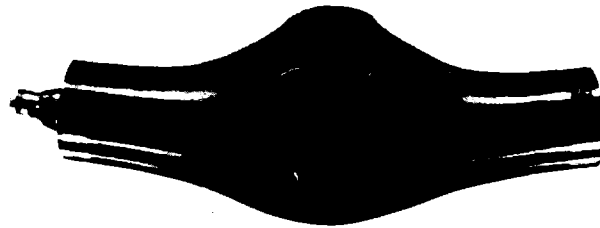
Δp [bar]		ε_B [%]
<u>60</u>		<u>69</u>
<u>70</u>		<u>82</u>
<u>74,9</u>		<u>120</u>
<u>80</u>		<u>120</u>
<u>85,2</u>		<u>113,5</u>
<u>90</u>		<u>116</u>

Abb. 49: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 700°C.

Δp [bar]

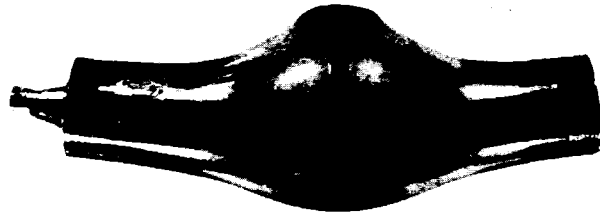
ε_B [%]

94,9



97,5

95,8



88

199,6



42,7

Abb. 49: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 700 °C.
(Fortsetzung)

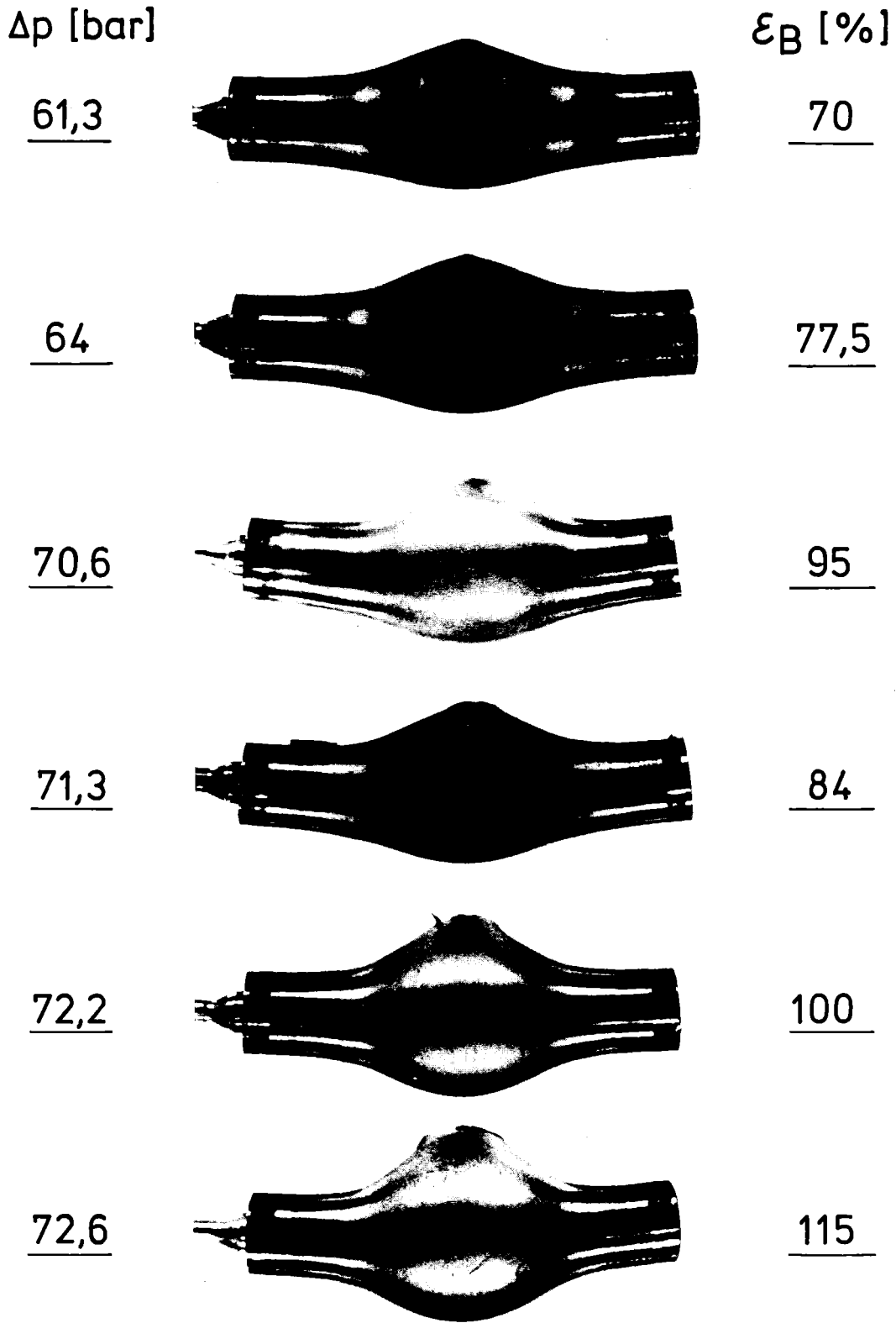


Abb. 50: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 750 °C.

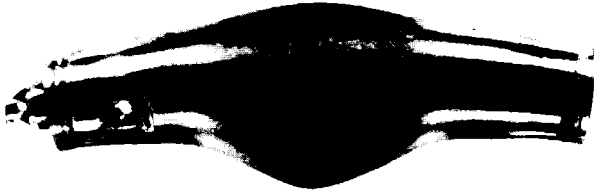
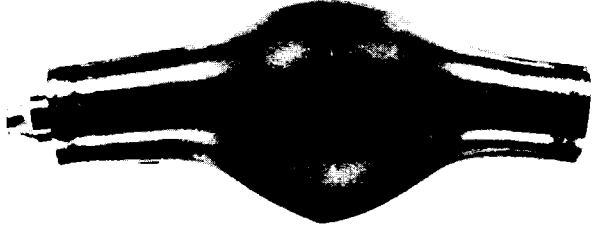
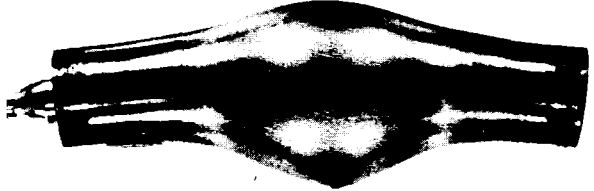
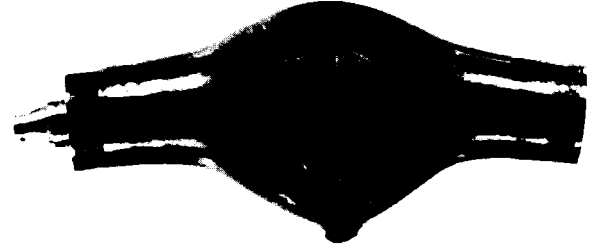

Δp [bar]		ε_B [%]
<u>23</u>		<u>81,5</u>
<u>40,8</u>		<u>109</u>
<u>51,6</u>		<u>80,5</u>
<u>60,1</u>		<u>113</u>
<u>90</u>		<u>74,8</u>

Abb. 51: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 800 °C.

Δp [bar]

ϵ_B [%]

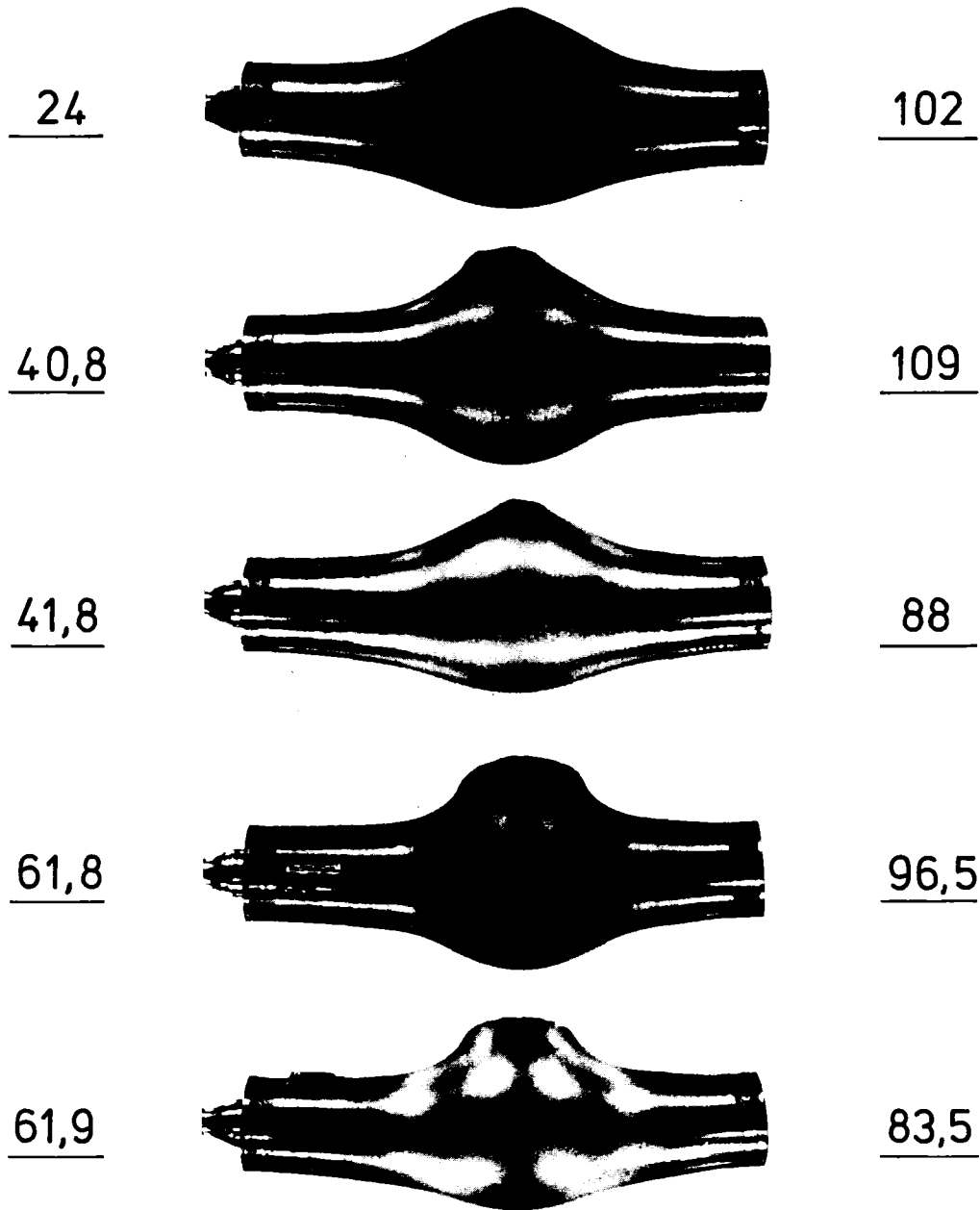
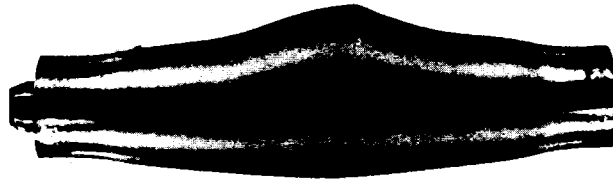


Abb. 52: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 850 °C.

Δp [bar]

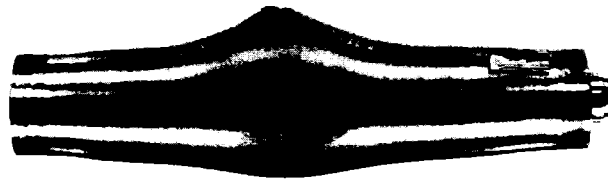
ε_B [%]

15,2



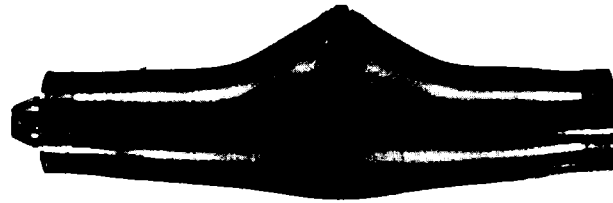
63,5

25,2



54,5

25,2



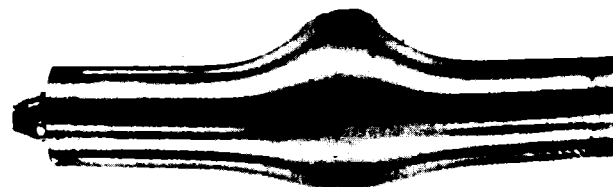
70

46,4



57

46,5



55,5

Abb. 53: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 900 °C.

Δp [bar]

ε_B [%]

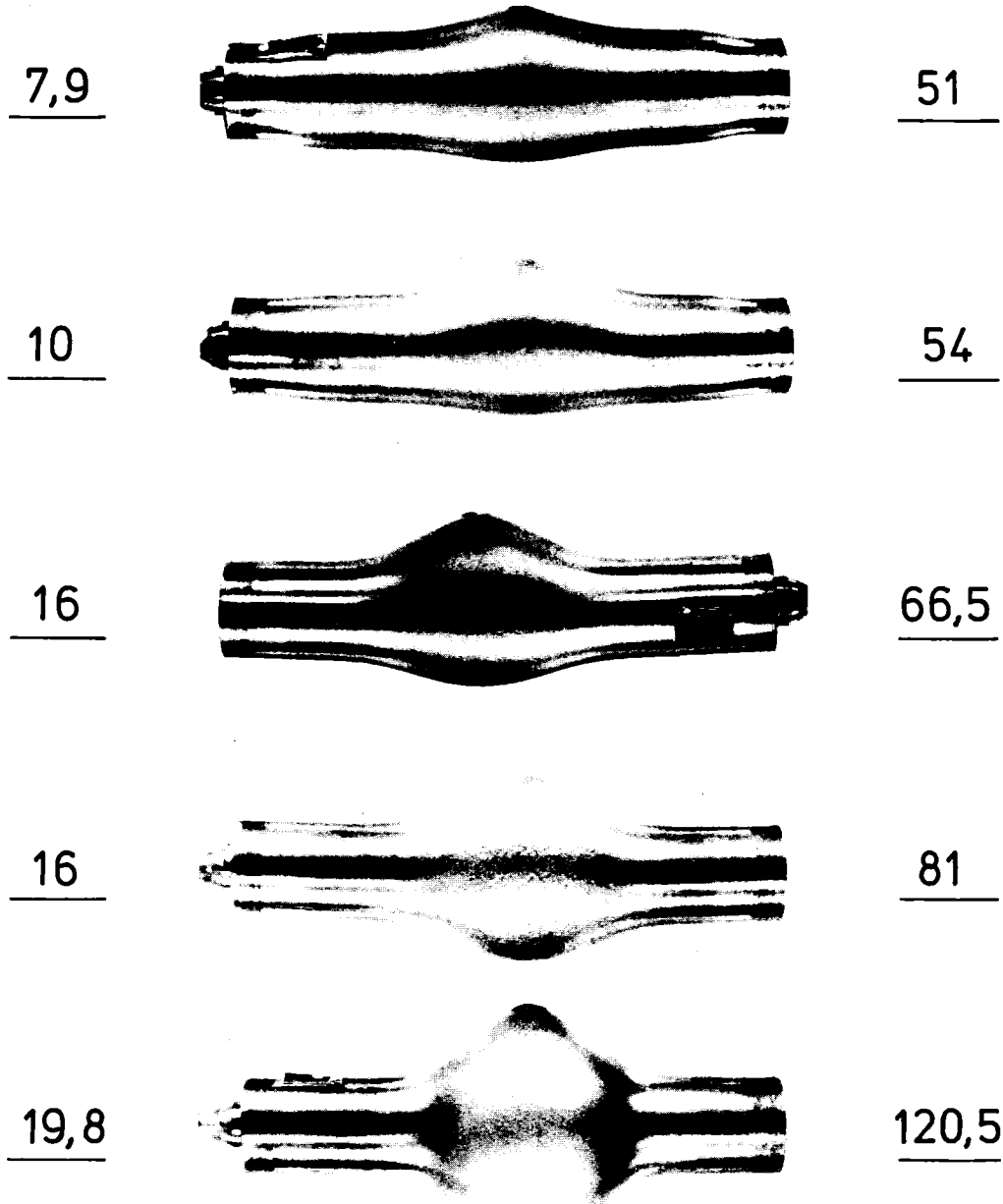
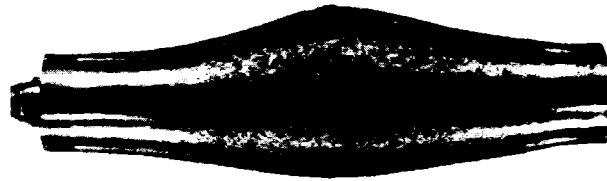


Abb. 54: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 950 °C.

Δp [bar]

ε_B [%]

3,9



66,5

4



76

6



99

8,9



95

Abb. 55: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 1000°C.

Δp [bar]

ϵ_B [%]



Abb. 56: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 1050°C.

Δp [bar]

ϵ_B [%]


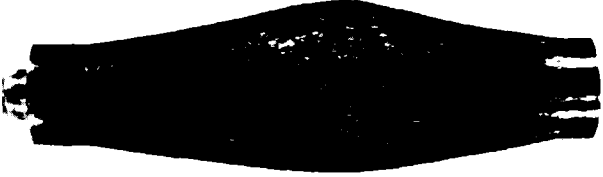

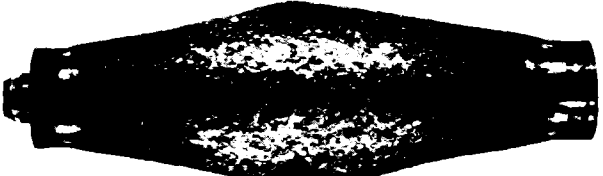

<u>3</u>		<u>37</u>
<u>4</u>		<u>65,5</u>
<u>4</u>		<u>76,5</u>
<u>4</u>		<u>81</u>
<u>5,9</u>		<u>80,5</u>

Abb. 57: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten bei 1100°C.

Δp [bar]

ϵ_B [%]

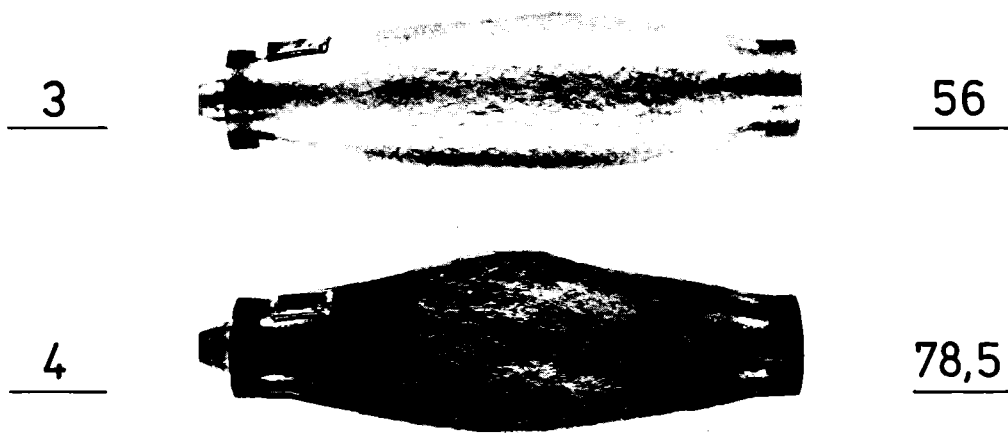
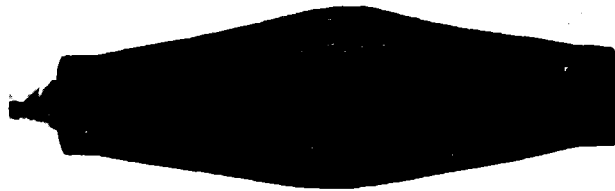


Abb. 58: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 1150 °C.

Δp [bar]

ε_B [%]

2,5



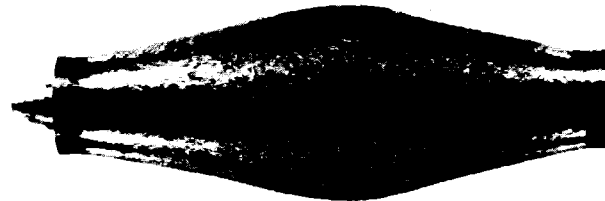
77

2,5



91,5

4



91

Abb. 59: Zircaloy-4-Rohrproben nach dem Bersten
bei 1200°C.