



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5726

**Temperaturtransiente
Kriechberstversuche an
Zirconium-Niob1-Hüllrohren
Vergleich zu Zircaloy-4 Hüllrohren**

**F. J. Erbacher, H. Schmidt, P. Saey,
R. Häusler, L. Wetzel, J. Böhmert, L. Lübke**
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

August 1997

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5726

**TEMPERATURTRANSIENTE KRIECHBERSTVERSUCHE AN
ZIRCONIUM-NIOB1-HÜLLROHREN
VERGLEICH ZU ZIRCALOY-4 HÜLLROHREN**

F. J. Erbacher, H. Schmidt, P. Saey,
R. Häusler*, L. Wetzel*, J. Böhmert**, L. Lübke**

Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

* Technische Universität Dresden

** Forschungszentrum Rossendorf

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1997

Zusammenfassung

In der REBEKA-Versuchsanlage des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) wurden an Zirkonium-Niob 1 (ZrNb1)-Hüllrohren russischer WWER-Reaktoren Einzelstabversuche zum temperaturtransienten Kriechberstverhalten beim Kühlmittelverluststörfall durchgeführt. Die Ergebnisse erlauben eine erste vergleichende Bewertung des Berstverhaltens von ZrNb1- und Zircaloy-4 (Zry4)-Hüllrohren. Die Bersttemperaturen und Berstumfangsdehnungen zeigen in Abhängigkeit von Berstdruck, Bersttemperatur und Aufheizrate eine ähnliche Tendenz. Die Daten von ZrNb1 tendieren i.a. zu niedrigeren Werten. Unterschiede ergeben sich im wesentlichen in den Phasenumwandlungstemperaturen, die bei ZrNb1 bis zu 100 K niedriger sind als bei Zry4. Für eine genauere Beschreibung des ZrNb 1 Hüllrohrverhaltens beim Kühlmittelverluststörfall sind noch weitere experimentelle und theoretische Arbeiten erforderlich.

TEMPERATURE-TRANSIENT SINGLE-ROD CREEP BURST TESTS ON ZIRCONIUM-NIOBIUM 1 CLADDING TUBES, COMPARISON WITH ZIRCALOY-4 CLADDING TUBES

Abstract

In the REBEKA-test facility of the Karlsruhe Research Centre (FZK) temperature-transient single-rod creep burst tests on Zirconium-Niobium 1 (ZrNb1) cladding tubes of Russian VVER reactors have been performed under conditions simulating a loss-of-coolant accident (LOCA). For the time being the test results obtained allow a comparison of the burst behaviour of ZrNb1 - and Zircaloy-4 (Zry4) cladding tubes. The burst temperature and burst strains, respectively as influenced by the burst pressure, burst temperature and heating rate exhibit a similar tendency. In general, the data of ZrNb1 tend to lower values. Main differences exist in the phase transformation temperatures which are up to 100 K lower for ZrNb1 compared to Zry4. For a reliable description of the ZrNb1 cladding behaviour in a LOCA further experimental and theoretical research work is needed.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Versuchsvorbereitung	2
2.1 Geometriebestimmung der ZrNb1-Hüllrohre.....	2
2.2 Festlegung der Versuchsparameter.....	6
3 Versuchstechnik und Versuchsdurchführung.....	6
4 Versuchsauswertung	10
5 Versuchsergebnisse	13
5.1 Bersttemperatur	13
5.2 Berstdehnung.....	17
5.3 Zeitlicher Verlauf der Dehnung.....	23
5.4 Metallographische Untersuchungen	28
6 Zusammenfassung.....	51
7 Diskussion.....	52
8 Danksagung.....	52
9 Literaturverzeichnis.....	53
10 Anhang I: Tabellen.....	54
11 Anhang II: Abbildungsverzeichnis.....	61

1 Einleitung

In den Druckwasserreaktoren sowjetischer Bauart vom Typ WWER kommen Brennstabhüllrohre aus Zirkon-Niob 1 (ZrNb1) zum Einsatz.

Zur Beurteilung des Brennstabverhaltens beim Kühlmittelverluststörfall mit „Großem Leck“ (Auslegungsstörfall) muß als ein wichtiger Aspekt das Ausmaß der Deformation und des Versagens der Brennstabhüllrohre eingeschätzt werden. Hierbei sind die Brennstabhüllrohre vorwiegend der Oxidation durch Wasserdampf und hohen Temperatur- und Innendruckbelastungen ausgesetzt. Diese Belastungen können zum Kriechen und zum Bersten der Brennstabhülle führen.

Eine Literaturlauswertung [3] zu bisher durchgeführten isotherm-isobaren und temperaturtransient-isobaren Kriechberstuntersuchungen an ZrNb1-Brennstabhüllrohren hat gezeigt, daß die wenigen Daten einer großen Bandbreite unterliegen und damit keine genaue Aussagen zum ZrNb1-Brennstabverhalten getroffen werden können. Außerdem sind die experimentellen Randbedingungen z.T. nur ungenau definiert.

Zum Materialverhalten von weltweit in Druckwasserreaktoren eingesetzten Brennstabhüllrohren aus Zircaloy-4 (Zry4) liegen umfangreiche Untersuchungen vor [2], [6], [8]. Im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) steht für solche Untersuchungen die Versuchsanlage REBEKA zur Verfügung.

Diese Versuchsanlage wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur detaillierten Untersuchung des Materialverhaltens der ZrNb1-Brennelementhüllrohre eingesetzt. Dies ermöglichte die Durchführung der Experimente unter gleichen Versuchsbedingungen wie bei den Zry4-Experimenten. Es wurden 121 temperaturtransiente Einzelstab-Kriechberst-Experimente unter Innendruckbelastung mit verkürzten Brennstabsimulatoren durchgeführt.

Die Ergebnisse erlauben erstmals einen fundierten Vergleich des Deformationsverhaltens von Zry4- und ZrNb1- Hüllrohren.

2 Versuchsvorbereitung

2.1 Geometriebestimmung der ZrNb1-Hüllrohre

Die zur Versuchsdurchführung verwendeten Brennstabhüllrohre sind aus einer einheitlichen Charge für WWER-1000 gefertigt. Für sie lag kein materialtechnisches Zertifikat vor. Die Angaben zu den Abmessungen der Hüllrohre unterscheiden sich geringfügig. Im „Technischen Projekt WWER-1000“ [4] sind folgende Angaben zu Abmessungen der ZrNb1-Hüllrohre gemacht:

Außendurchmesser (mm):	9.15	+ 0.05	max.: 9.20
		- 0.05	min.: 9.10
Innendurchmesser (mm):	7.72	+ 0.08	max.: 7.80
			min.: 7.72

ergibt

Wandstärke (mm):	0.715	+ 0.025	max.: 0.74
		- 0.065	min.: 0.65

Zur genauen Versuchsauswertung ist die Kenntnis der Rohrgeometrie erforderlich. Aus diesem Grund wurde in die Versuchsvorbereitung eine Vermessung der Hüllrohre aufgenommen. Dafür stand die Rohrvermessungsanlage des Institut für Material- und Festkörperphysik (IMF) des FZK zur Verfügung.

Die ungefähr 4 m langen ZrNb1-Rohre wurden halbiert und danach die ca. 2 m langen Rohre (32 Stück) durch die Vermessungsanlage gezogen. Pro Durchlauf erfolgte jeweils die Bestimmung des Außendurchmessers mittels kapazitiver Wegaufnehmer sowie der Wandstärke mittels Ultraschall. Die Wegaufnehmer wurden mittels Eichdorn geeicht. Die Eichung der Ultraschalltechnik erfolgte an einem aus dem zu vermessenden Material angefertigten Eichrohr. In dieses Eichrohr wurden Wandstärkenverjüngungen (mittels Mikrometermeßtechnik bestimmt) eingedreht.

Ein Meßschrieb dieses Verfahrens ist in Abb. 1 zu sehen. Die Reproduzierbarkeit der Meßvorgänge wurde bestätigt.

Wie in Tabelle I aufgeführt, wurde aus den Meßschrieben für jedes der 32 Rohre der maximale und minimale Wert für den Außendurchmesser und für die Wandstärke bestimmt. Aus den Differenzen wurden anschließend die jeweiligen Mittelwerte und Schwankungsbreiten ermittelt.

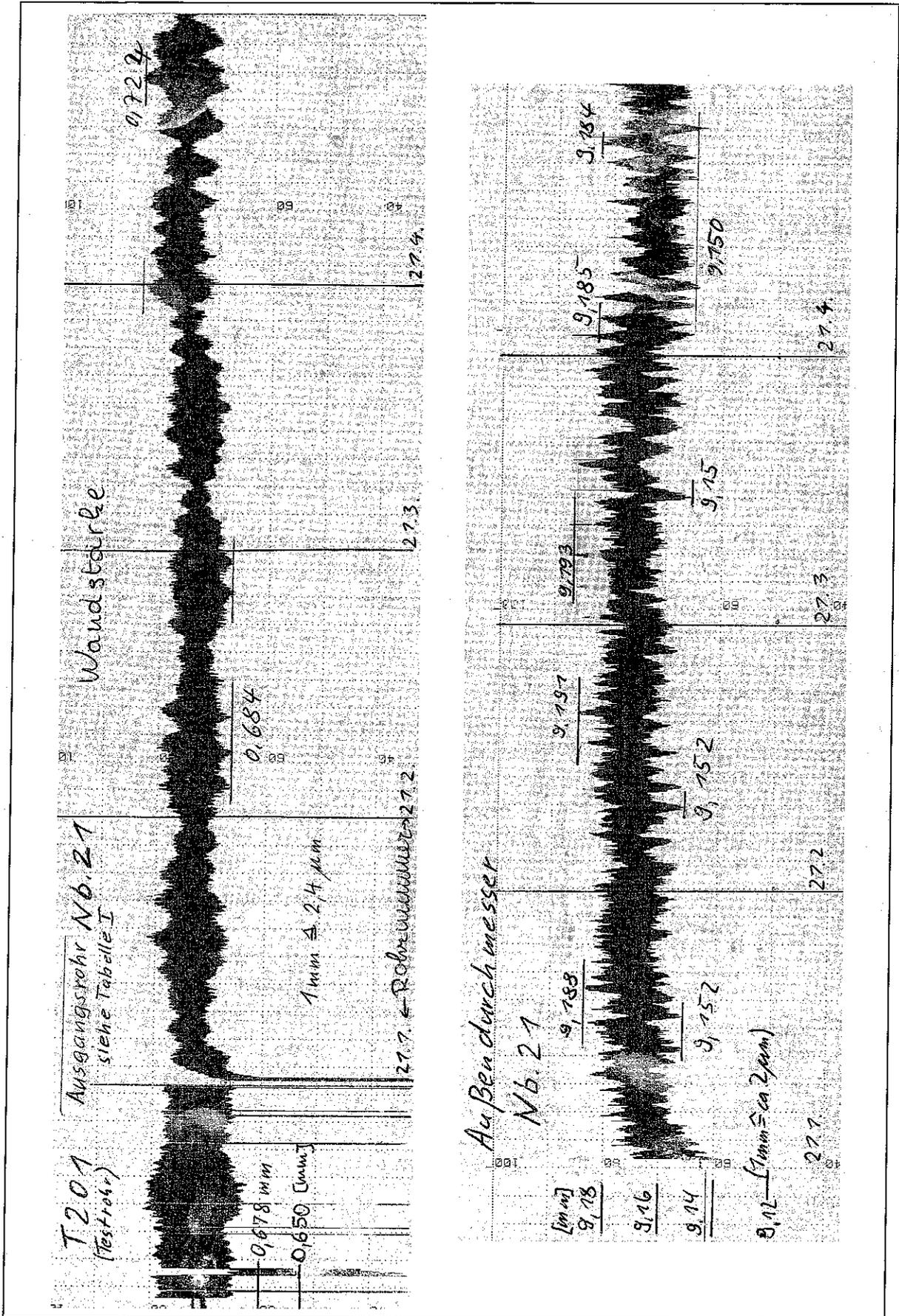


Abb. 1: Meßschieb zur Bestimmung der Wandstärke und des Außendurchmessers (siehe Anhang Tabelle I, II und IV)

Der maximale Außendurchmesser beträgt bei allen Messungen 9.203 mm, der minimale 9.125 mm. Damit liegen die Außendurchmesser der Rohre innerhalb der bereits aufgeführten Herstellertoleranz. Nur im Extremfall erreichen die Abmessungen die obere Toleranzgrenze.

Die maximalen Schwankungen des Außendurchmessers pro Rohr (Meßlänge 1.92 m) liegen zwischen 22 und 54 μm bei einem Mittelwert von etwa 39 μm .

Die bei allen Messungen aufgetretene maximale Wandstärke beträgt 0.733 mm, die minimale 0.666 mm. Auch hier liegen die Abmessungen im Herstellertoleranzbereich.

Die Schwankungsbreite der Wandstärke pro Rohr liegt zwischen 22 und 65 μm bei einem Mittelwert von etwa 42 μm . Die maximale Wandstärkeschwankung von 65 μm für ZrNb1-Hüllrohre befindet sich innerhalb der für Zircaloy-4 Hüllrohre angegebenen oberen Toleranzgrenze von 70 μm (KWU Siemens).

Für die in diesem Bericht zum Vergleich herangezogenen Zircaloy-Kriechberstversuche wurden Zircaloy-4 Hüllrohre mit einer Wandstärkenschwankung bis maximal 30 μm ausgewählt.

Da die REBEKA-Einzelstabversuche auf eine Probelänge von ungefähr 50 cm festgelegt sind, wurden die ZrNb1-Rohre von ihrer ursprünglichen Länge (2 m) auf 4 Teile zu je ca. 475 mm abgestochen. Die Vierteilung ist auch auf den Meßschieben ersichtlich (Abb. 1 und 2).

Als Grundlage für anschließende Berechnungen diente die Bestimmung des mittleren Außendurchmessers sowie der mittleren Wandstärke der Rohrproben. Dazu wurde für jede Probe über den mittleren und oberen Rohrbereich (wahrscheinlicher Berstort, s. Abb. 1) die optische Flächenmittellinie bestimmt. Diese Werte sind in Tab. II eingetragen.

Der größte mittlere Außendurchmesser beträgt 9.178 mm und der kleinste 9.141 mm. Der Mittelwert aller Rohraußendurchmesser ist 9.163 mm.

Die größte mittlere Wandstärke beträgt 0.706 mm, die kleinste 0.690 mm. Der Mittelwert aller mittleren Wandstärken ist 0.700 mm.

Ein weiterer Meßdurchlauf war zur Untersuchung der Fehlerhaftigkeit der Rohre mittels Wirbelstromsonde notwendig. Dazu wurden in das Eichrohr Fehler in Form von Bohrungen (0.4 mm und 0.5 mm) und Längskerben außen (130 μm tief) und innen (150 μm tief) angebracht. Ein Vergleich zwischen dem Meßschieb des jeweils mitlaufenden Eichrohres und des sich anschließenden Probemeßschiebes führte zur Beurteilung der Fehlerhaftigkeit. Als Grenzwert für die Fehlerkategorie I ist das Überschreiten der Ausschlaghöhe des Längsfehlers innen (90 μm) und für die Fehlerkategorie II das Überschreiten der Ausschlaghöhe des Längsfehlers außen (140 μm) gewählt worden (s. Abb. 2).

In Tab. II sind die für jedes Versuchsrohr ausgewählten „Fehler“ in der entsprechenden Fehlerkategorie angegeben (Mit der Fehleranzahl von -1 sind Rohre mit einer sehr geringen Meßschiebausschlaghöhe ausgewiesen).

2.2 Festlegung der Versuchsparameter

Die Festlegung der Versuchsparameter für die temperaturtransienten Kriechberstuntersuchungen erfolgte unter Berücksichtigung von reaktortypischen Störfallbedingungen und von bekannten materialtechnischen Eigenschaften des ZrNb1, vor allem in Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Experimentierbedingungen mit den vorliegenden Ergebnissen von Zry4 Hüllrohren.

Als Vorgabeparameter für die Versuche dienten die Aufheizrate der Brennstabhülle und die Innendruckbelastung. Der Druckparameter ist in unterschiedlichen Abständen abgestuft.

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse sind die Versuche in der Regel dreimal mit festgelegten Parametern von Aufheizrate und Innendruck durchgeführt worden.

Ein Teil der Versuche erfolgte ohne Beheizung des Umgebungsrohres, um größere azimutale Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang zu erzeugen und deren Einfluß auf das Dehverhalten des Brennstabhüllrohres zu untersuchen. (Diese Versuche wurden bei entsprechend eingestellten Druck- und Aufheizparametern jeweils zweimal durchgeführt)

Eine vorab erstellte Testmatrix wurde während der Experimentierarbeiten modifiziert und erweitert (Tab. III). Nach Abschluß der Versuchsreihe standen 115 Einzelstabexperimente zur Auswertung zur Verfügung.

3 Versuchstechnik und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Experimente stand die REBEKA-Einzelstabversuchsanlage des Instituts für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik (IATF) im FZK zur Verfügung, bei der ein elektrisch beheizter Stab (Brennstabsimulator) den nuklearen Brennstab des Reaktors simuliert. Es mußte lediglich eine Anpassung der Al_2O_3 -Ringpellets an die Rohrgeometrie der ZrNb1 Hüllrohre (9.16 x 0.7 mm) vorgenommen werden. Die Hüllrohrlänge wurde auf 475mm festgelegt. Der Brennstabsimulator hat eine beheizte Länge von 325 mm. Zur Simulation der Brennstoffpellets sind zwischen dem 6 mm dicken Heizstab und dem ZrNb1-Hüllrohr Al_2O_3 -Pellets eingesetzt. Der radiale Aufbau des im FZK entwickelten Brennstabsimulators ist in Abb. 3 dargestellt. Den Brennstabsimulator im eingebauten Zustand zeigt Abb. 4. Das Umgebungsrohr dient der Simulation unterschiedlicher Umgebungstemperaturen und kann als Dampfrohr parallel zum Heizstab beheizt werden.

Durch die Beheizung des Umgebungsrohres können weitgehend adiabate Bedingungen erreicht und hierdurch die Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang minimiert werden.

Zur Temperaturbestimmung sind auf dem Brennstabhüllrohr 6 Thermolemente aus Pallaplat-Drähten (0.1 mm) aufgepunktet. Davon sind 4 Thermolemente axial mit einem Abstand von 25 mm angeordnet, 3 Thermolemente sind auf dem Umfang (azimutal) im Winkel von 120° , auf Höhe der zu erwartenden Berststelle, angebracht. Die axiale Position der Berststelle ist im wesentlichen vom Innendruck und der Aufheizrate abhängig. Diese Positionierung ist in Abb. 5 verdeutlicht.

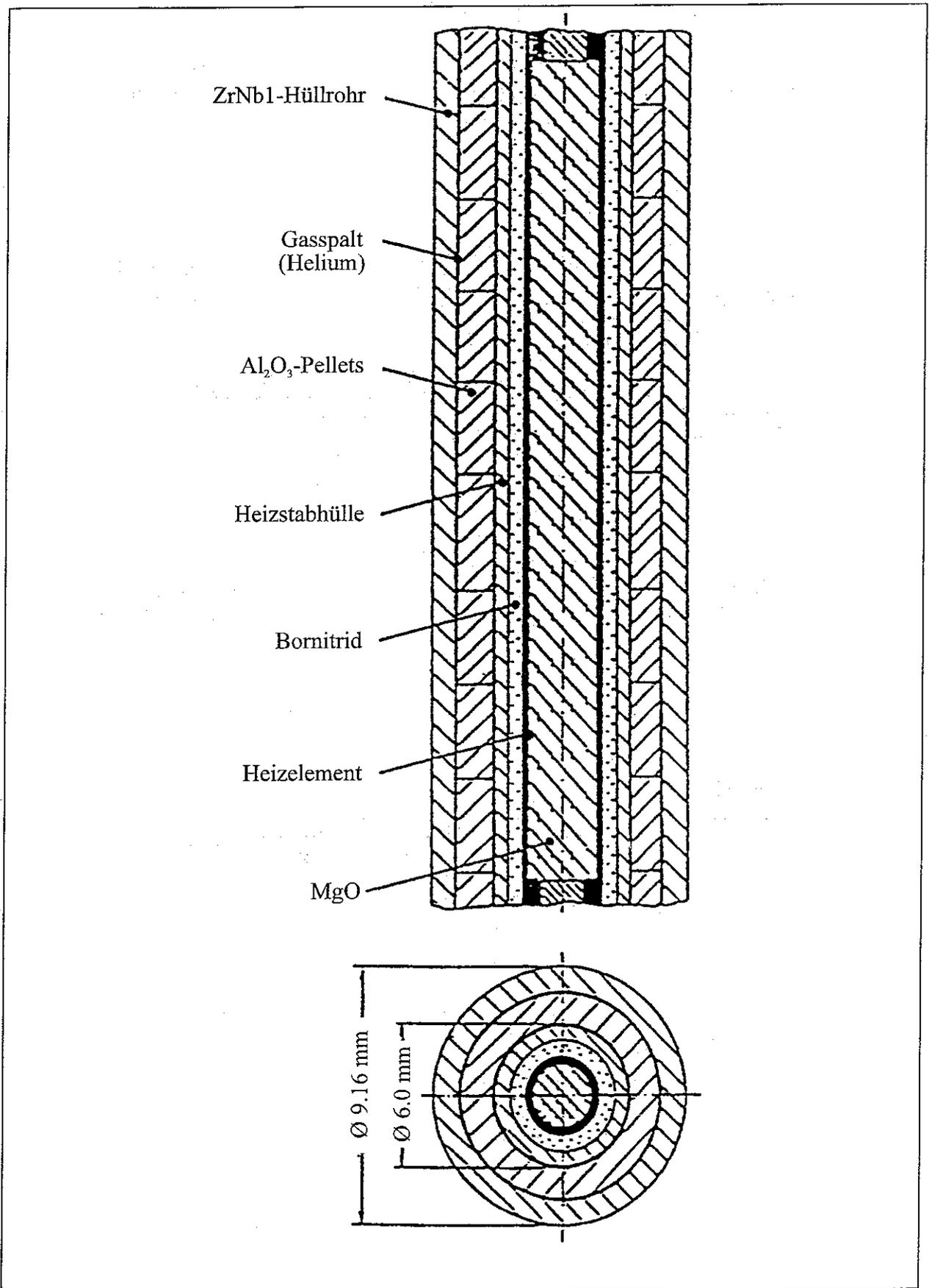


Abb. 3: Radialer Aufbau des Brennstabsimulators.

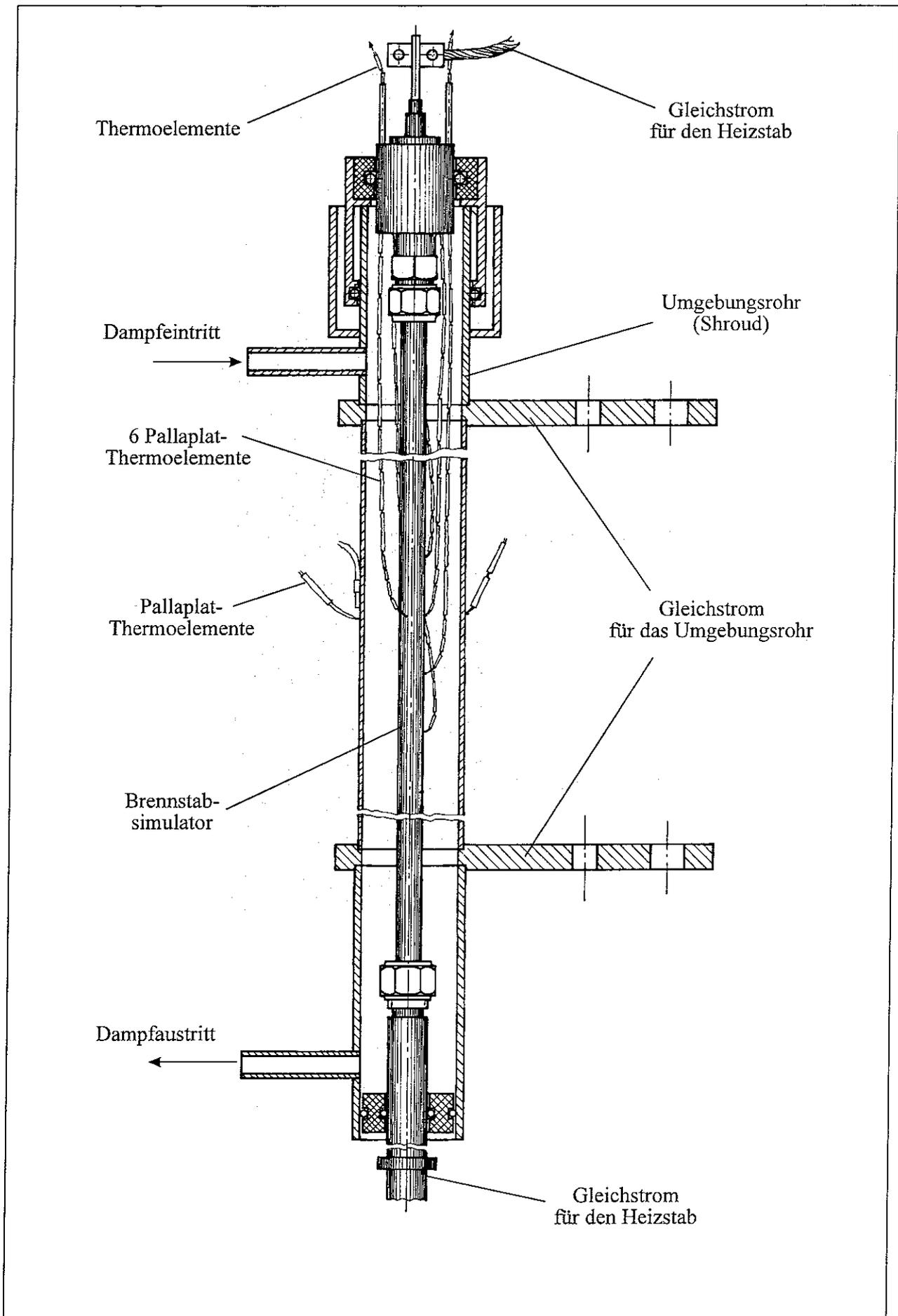


Abb. 4: Eingebauter Brennstabsimulator.

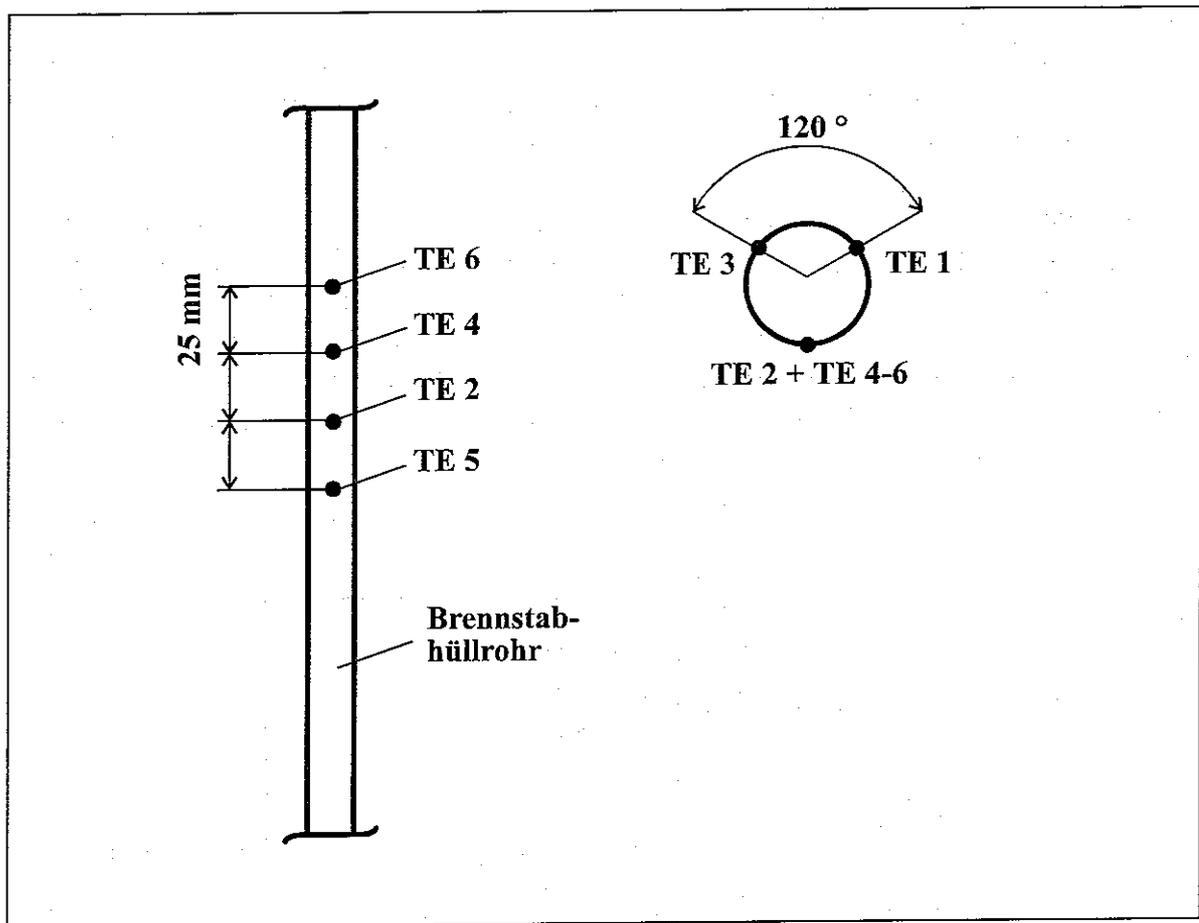


Abb. 5: Position der Thermoelemente.

Weiterhin gehören zur Versuchsanlage das Drucksystem zur Innendruckbeaufschlagung der Brennstabhülle, ein Dampferzeuger, Gleichstromtransformatoren für den Heizstab und das Umgebungsrohr, eine Röntgen- sowie Filmeinrichtung zur Aufnahme des zeitabhängigen Dehnverlaufes sowie umfangreiche Steuer- und Regeleinrichtungen. Die Meßwertaufzeichnung der Temperaturen und des Druckes erfolgte fortlaufend mittels einer rechnergesteuerten Datenerfassungsanlage. Eine Eichung der Temperatureaufzeichnung erfolgte etwa bei jedem fünften Versuch, die Eichung des Druckaufnehmers vor jedem Versuch.

Die bei der Meßwerterfassung auftretenden systematischen und statistischen Fehler werden wie folgt angegeben [2]:

Rechner und Verstärker:	bis 400 °C	:	± 0.85 °C
	bis 800 °C	:	± 0.75 °C
Thermoelemente:	bis 400 °C	:	< ± 1.5 °C
	400°- 800 °C	:	< ± 3 °C
Druckmessung:	bis 50 bar	:	± 0.35 bar
	bis 100 bar	:	± 0.55 bar

Als Ausgangszustand für die Kriechberstversuche wurde der Brennstabsimulator (Abb. 6) drucklos auf eine Temperatur von ca. 300 °C (am ZrNb1-Hüllrohr) gebracht. Als Außenatmosphäre des Brennstabhüllrohrs diente schwach von oben nach unten strömender, leicht überhitzter Wasserdampf von etwa 120 °C unter Umgebungsdruck. Dem Brennstabhüllrohr wird der Heliuminnendruck aufgelastet. Daraufhin wird die lineare, transiente Aufheizung gestartet.

Die Temperatur des Umgebungsrohres wird entsprechend der Temperatur des Brennstabhüllrohrs am Regelthermoelement (oberstes axiales Thermolement TE6) nachgeregelt. Dadurch wird ein Ausgleich von Temperaturunterschieden auf dem Hüllrohrumfang erreicht. Bei einigen Versuchen (s. Kap. 2.2.) diente das Nichtbeheizen des Umgebungsrohres der Ausprägung größerer azimuthaler Temperaturdifferenzen. Der Innendruck blieb unter Nutzung eines Volumenkompensators während des Versuches weitgehend konstant. Nach dem Bersten der Brennstabhülle wurde die Energiezufuhr abgeschaltet.

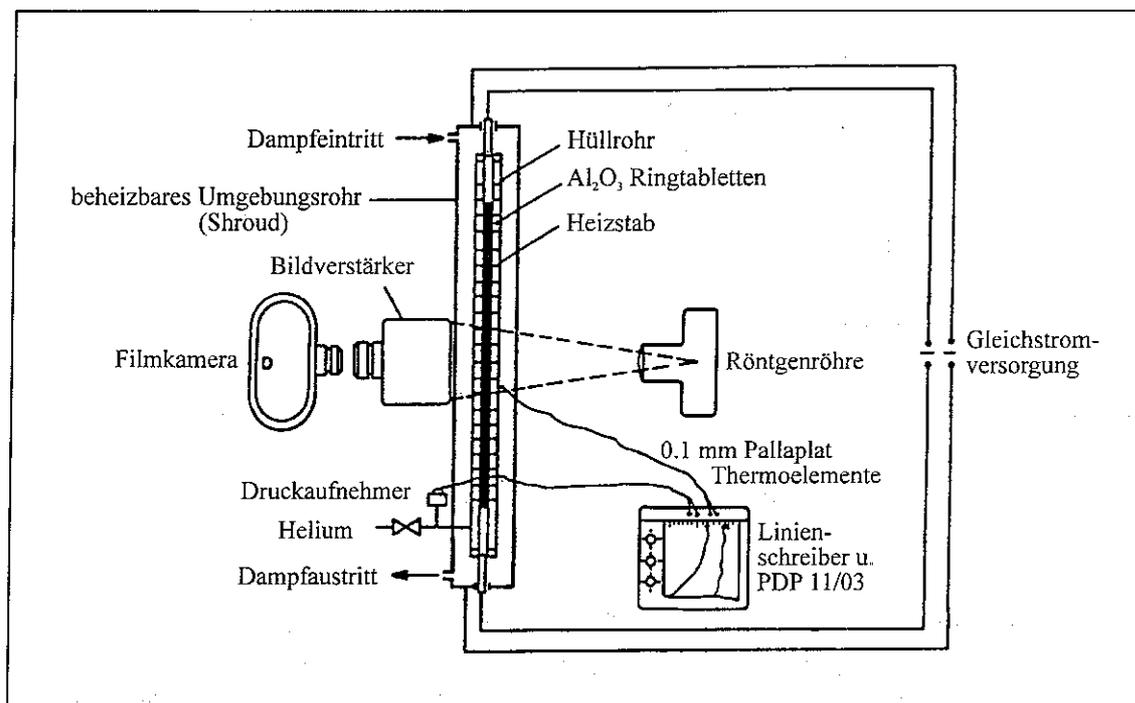


Abb. 6: Versuchsstand für Einzelstabversuche (schematisch).

4 Versuchsauswertung

Die zu messenden Größen sind der Berstdruck, die Bersttemperatur, die Umfangsdehnung und die azimuthale Temperaturdifferenz.

Der Druck und die Temperaturen wurden, wie bereits erwähnt, von der Datenerfassungsanlage aufgezeichnet. Ein Monitorbild des Druckverlaufes und der Temperaturverläufe eines Versuches bei 15,6 MPa und einer Aufheizrate von 1 K/s ist in Abb. 7 zu sehen.

Der Berstzeitpunkt zeichnet sich durch einen plötzlichen Druckabfall aus. Der Berstdruck ist der Druck, der unmittelbar vor dem Druckabfall herrscht. Bei der Wiederholung der Versuche unter gleichen Parametern treten, bedingt durch die Einstell-, Eich- und Meßgenauigkeit des Druckes,

den Differenzen der Hüllrohrabmessungen sowie den nicht identischen Spalten beim Zusammenbau des Brennstabstimulators, geringe Abweichungen beim Berstdruck und der Bersttemperatur auf. Zur Ermittlung der gefahrenen Temperaturtransiente wurde die Temperatur- und Zeitdifferenz zwischen dem Zeitpunkt des Erreichens von 600 °C und dem Berstzeitpunkt herangezogen. Der Mittelwert der Transienten für alle 6 gemessenen Temperaturverläufe wird als Temperaturtransiente für den jeweiligen Versuch angegeben. Für alle Versuche einer vorgegebenen Transiente von 1 K/s ergab sich ein Mittelwert von 0.96 K/s. (Der geringste Temperaturanstieg betrug 0.70 K/s und der größte 1.02 K/s.) Für alle Versuche einer vorgegebenen Transienten von 10 K/s ergab sich ein Mittelwert von 9.7 K/s (Der geringste Anstieg betrug 8.7 K/s und der größte 10.7 K/s).

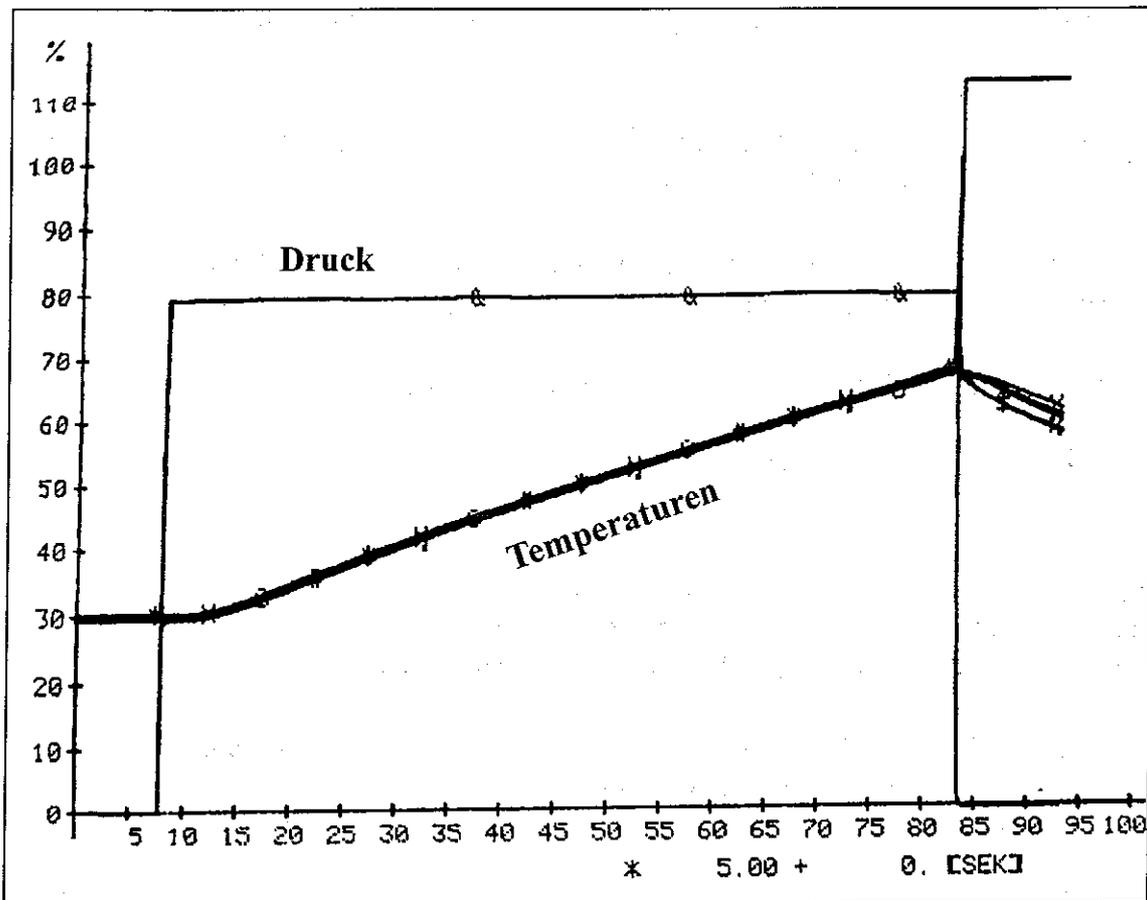


Abb. 7: Druck- und Temperaturverlauf eines Versuches mit einer Druckbelastung von 15.6 MPa und einer Temperaturtransiente von 1 K/s (Monitorbild, 100 % \equiv 1000 °C).

Die Bersttemperatur wurde unter Berücksichtigung der Lage der Berststelle bestimmt. Lag die Berststelle in unmittelbarer Nähe oder auf einer Thermolement-Punktstelle, so entspricht die Temperatur dieses Thermolementes der Bersttemperatur. Ist das Brennstabhüllrohr zwischen den Thermoementen geborsten, so wurde die höchste Temperatur dieser Thermoelemente als Bersttemperatur festgelegt (s. Tab. IV).

Bei den Versuchen mit großen azimutalen Temperaturdifferenzen kam es kurz vor dem Bersten (ca. 6 - 20 s, je nach Berstdruck) zu einem Abflachen des Temperaturverlaufes derjenigen Thermoelemente, die sich auf der Beule befanden oder angrenzten. In einigen Fällen wiesen die

Temperaturverläufe dieser Thermoelemente auch einen leichten Temperaturabfall vor dem Bersten auf. In diesen Fällen wurde der Gipfelpunkt des Temperaturverlaufes der in der Nähe befindlichen Thermoelemente als Bersttemperatur gewählt. Die Berechnung des Temperaturanstieges dieser Versuche erfolgte bis zum Ende des linearen Verlaufes vor dem Abflachen. Die angegebene azimutale Temperaturdifferenz stellt die größte Differenz der drei azimutal angeordneten Thermoelemente dar (TE1 - TE3).

Zur Bestimmung der Umfangsdehnung des geborstenen Brennstabhüllrohres wurde der größte Umfang der Berstbeule mittels eines schmalen Klebestreifens von Rißkante zu Rißkante vermessen. Diese Messung geschah einmal jeweils nach dem Versuch im FZK und ein zweites Mal im Forschungszentrum Rossendorf (FZR). Der Mittelwert aus beiden Meßwerten dient als Berstumfang für die weitere Berechnung. Alle Meßdaten der Experimente sind in Tab. IV zusammengefaßt.

Die Rohrgeometrie des Brennstabhüllrohres vor dem Versuch ist durch die ermittelten Werte für Außendurchmesser und Wandstärke (s. Tab. II) gegeben.

Die Berechnung der Umfangsdehnung nach dem Bersten erfolgte auf der Grundlage des Außendurchmessers des Brennstabhüllrohres.

Die Dehnung bezogen auf den Außendurchmesser berechnet sich wie folgt:

$$\varepsilon_{da} = \frac{u_n}{u_v} - 1$$

ε_{da} [-] = Dehnung (auf den Außendurchmesser bezogen)

u_n [mm] = äußerer Umfang der Beule nach dem Bersten

u_v [mm] = äußerer Umfang der Hülle vor dem Versuch, unbelastet

Der aufgeprägte Innendruck erzeugt im Brennstabhüllrohr eine Tangentialspannung. Zur Berechnung der Tangentialspannungen wird die „Kesselformel“ herangezogen, da das Brennstabhüllrohr als dünnwandiges Rohr betrachtet wird.

Im Ausgangszustand ergibt sich folgende Tangentialspannung (Initialspannung):

$$\sigma_0 = \frac{p}{2} \frac{d_{mv}}{s_v}$$

σ_0 [MPa] = Initialspannung

p [MPa] = innerer Überdruck

d_{mv} [mm] = mittlerer Durchmesser der Hülle vor Versuch

s_v [mm] = Wandstärke der Hülle vor Versuch

5 Versuchsergebnisse

Die Werte für Berstdruck und entsprechender Initialspannung, Bersttemperatur, Umfangsdehnung und die azimutale Temperaturdifferenz sind in den Tabellen IV aufgelistet. Im folgenden werden diese Größen in ihren Abhängigkeiten von einander dargestellt.

Die Ergebnisse werden mit denen von Zircaloy-4 Kriechberstversuchen, die an der gleichen Versuchsanlage durchgeführt wurden, verglichen. Dazu dienten 160 Zircaloy-Versuche mit einem Temperaturanstieg von 1 K/s und 37 Versuche mit einem Temperaturanstieg von 10 K/s. Desweiteren wird zum Vergleich das REBEKA-Deformationsmodell (REMOD: [9], [10], [11]) herangezogen.

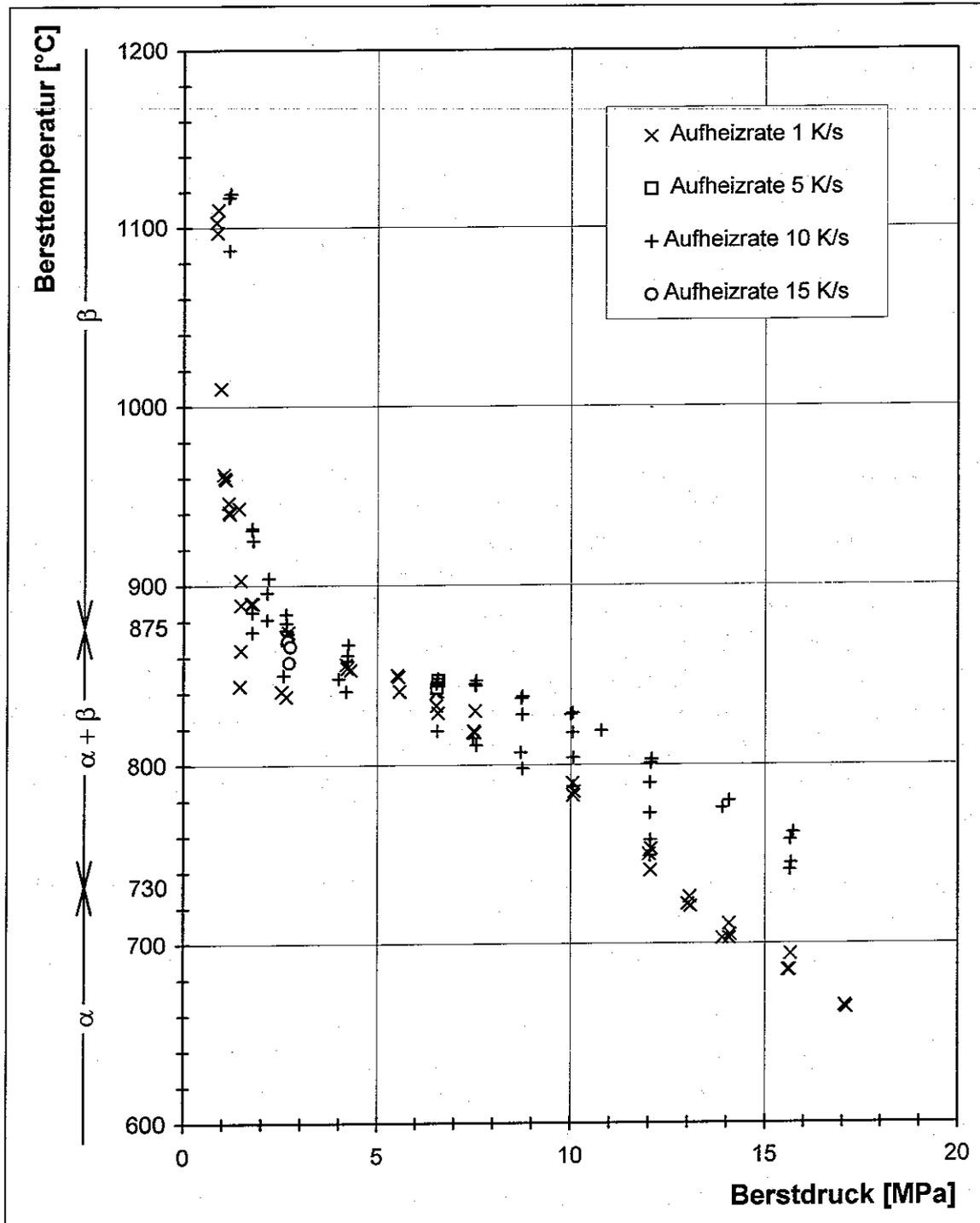
5.1 Bersttemperatur

Die Abb. 8 zeigt die Bersttemperatur in Abhängigkeit vom Berstdruck mit der Aufheizrate als Parameter. Ein höherer Stabinnendruck führt zu einer niedrigeren Bersttemperatur. Zu sehr niedrigen Berstdrücken hin ist ein sehr steiler Anstieg der Bersttemperaturen zu verzeichnen. Bei niedrigen Berstdrücken bis ca. 2 MPa und bei höheren Berstdrücken ab ca. 7 MPa ist eine Abhängigkeit der Bersttemperatur von der Aufheizrate in der Art ausgeprägt, daß eine höhere Aufheizrate eine höhere Bersttemperatur bei gleichen Berstdruck bewirkt. Im mittleren Druckbereich ist diese Abhängigkeit geringer. Bei den Aufheizraten von 5 und 15 K/s ist dies aufgrund der wenigen Versuche bei je einem Versuchspunkt nicht zu erkennen. Der vom Zry4 bekannte Einfluß der Aufheizrate auf die Bersttemperatur konnte bei ZrNb1 nicht eindeutig nachgewiesen werden. Für die Darstellung dieser Abhängigkeit wurden alle Versuche herangezogen.

Die Versuche mit einer Aufheizrate von 1 K/s und 10 K/s wurden nach der azimutalen Temperaturdifferenz in 3 Bereiche ($\Delta T_{azi} < 10$ K, $10 \text{ K} \leq \Delta T_{azi} < 20$ K, $\Delta T_{azi} \geq 20$ K) sortiert und in der Abhängigkeit von Bersttemperatur über Berstdruck in Abb. 9a und 9b dargestellt.

Um gleichmäßige adiabatische Verhältnisse für die zu berstenden Hüllrohre zu erhalten, wurde ein beheizbares Umgebungsrohr eingesetzt, das direkt, entsprechend der Aufheizrate, elektrisch beheizt wird. Abb. 10 zeigt, daß die Berststellen relativ gleichmäßig auf dem Hüllrohrumfang verteilt sind.

Der Vergleich der Bersttemperaturen der ZrNb1-Hüllrohre mit den Bersttemperaturen der Zry4-Hüllrohre kann nur auf Basis der Initialspannungen erfolgen, denn ein vorgegebener Innendruck verursacht in den verschiedenen Rohrgeometrien unterschiedliche Tangentialspannungen im Ausgangszustand (Initialspannung). Der gleiche Innendruck erzeugt im ZrNb1-Hüllrohr (9.16 x 0.70 mm), verglichen mit dem Zry4-Hüllrohr (10.75 x 0.72 mm) eine ca. 0.88-fache Initialspannung.



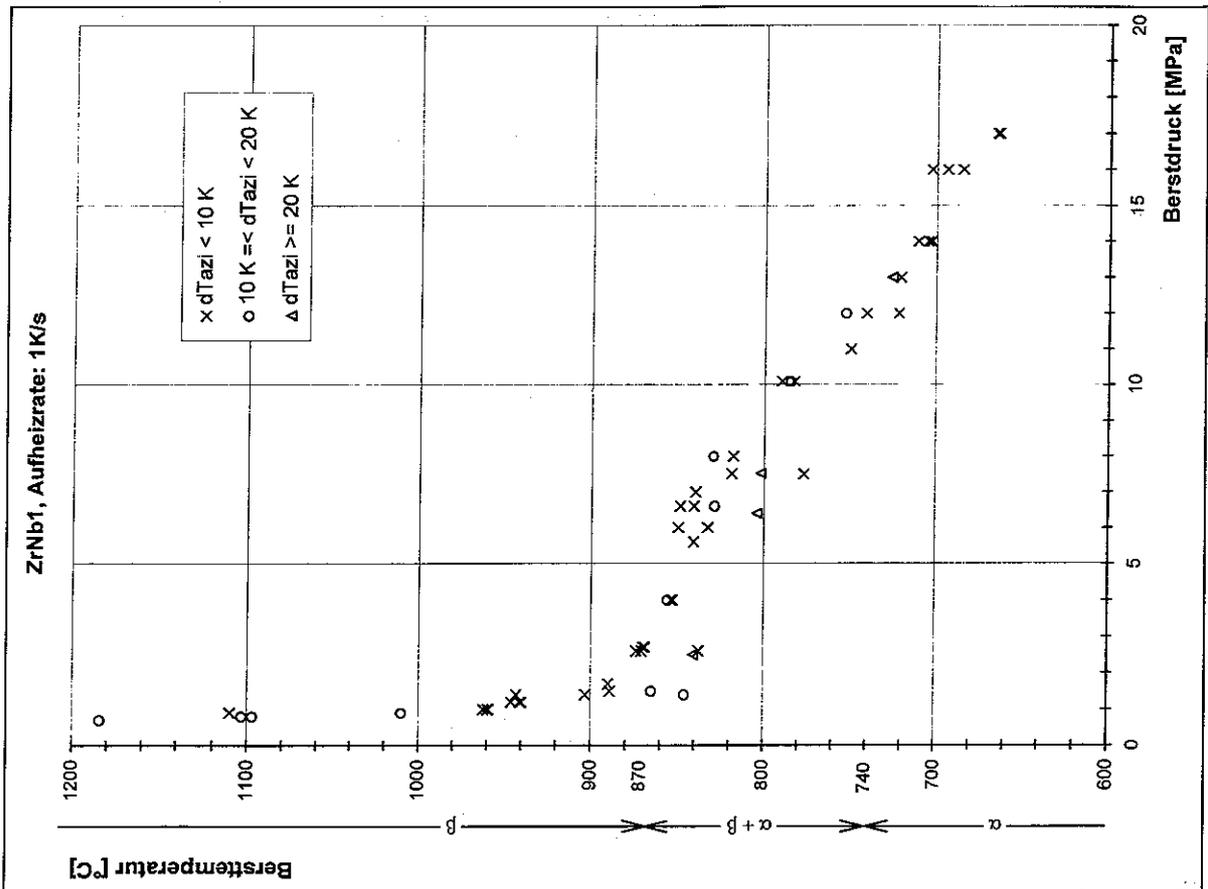
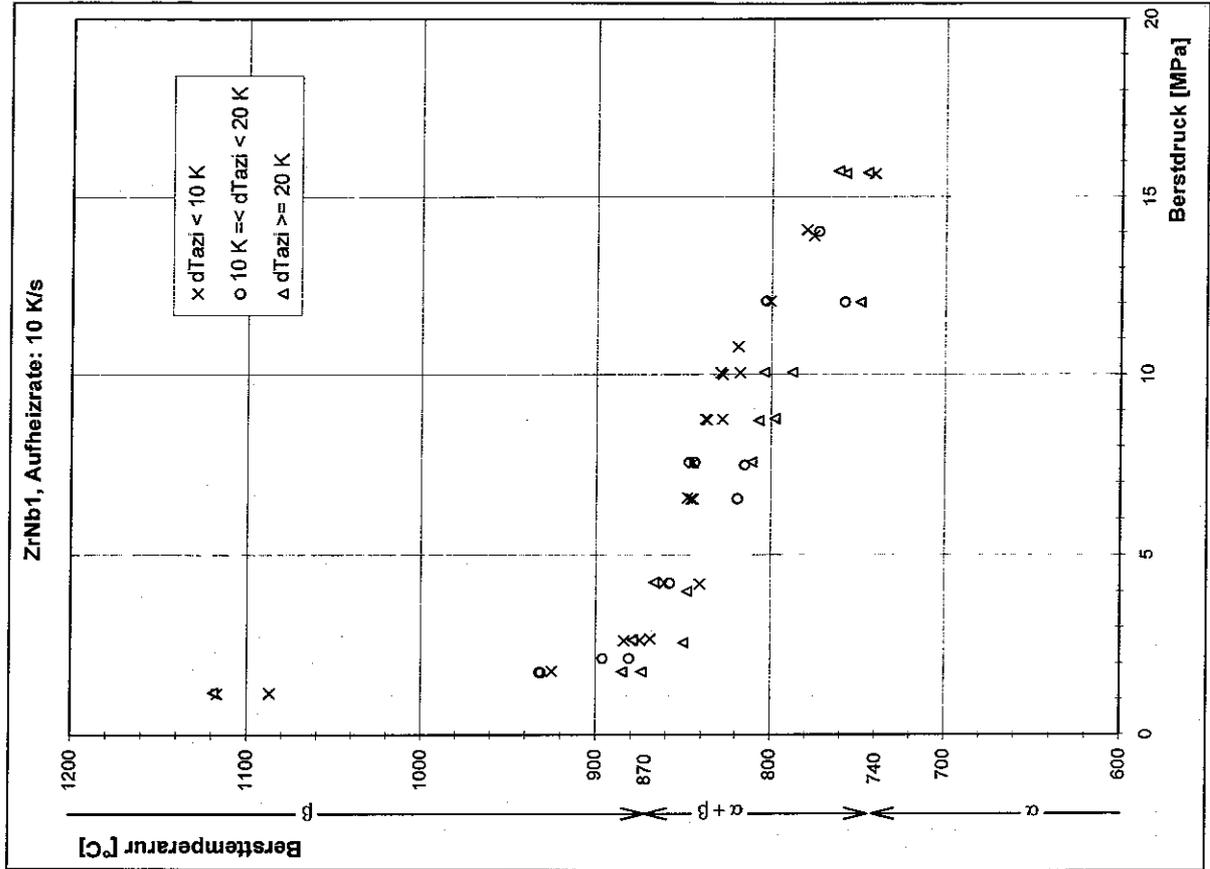


Abb. 9 a und b: Einfluß der azimuthalen Temperaturdifferenz (Bersttemperatur über Berstdruck).

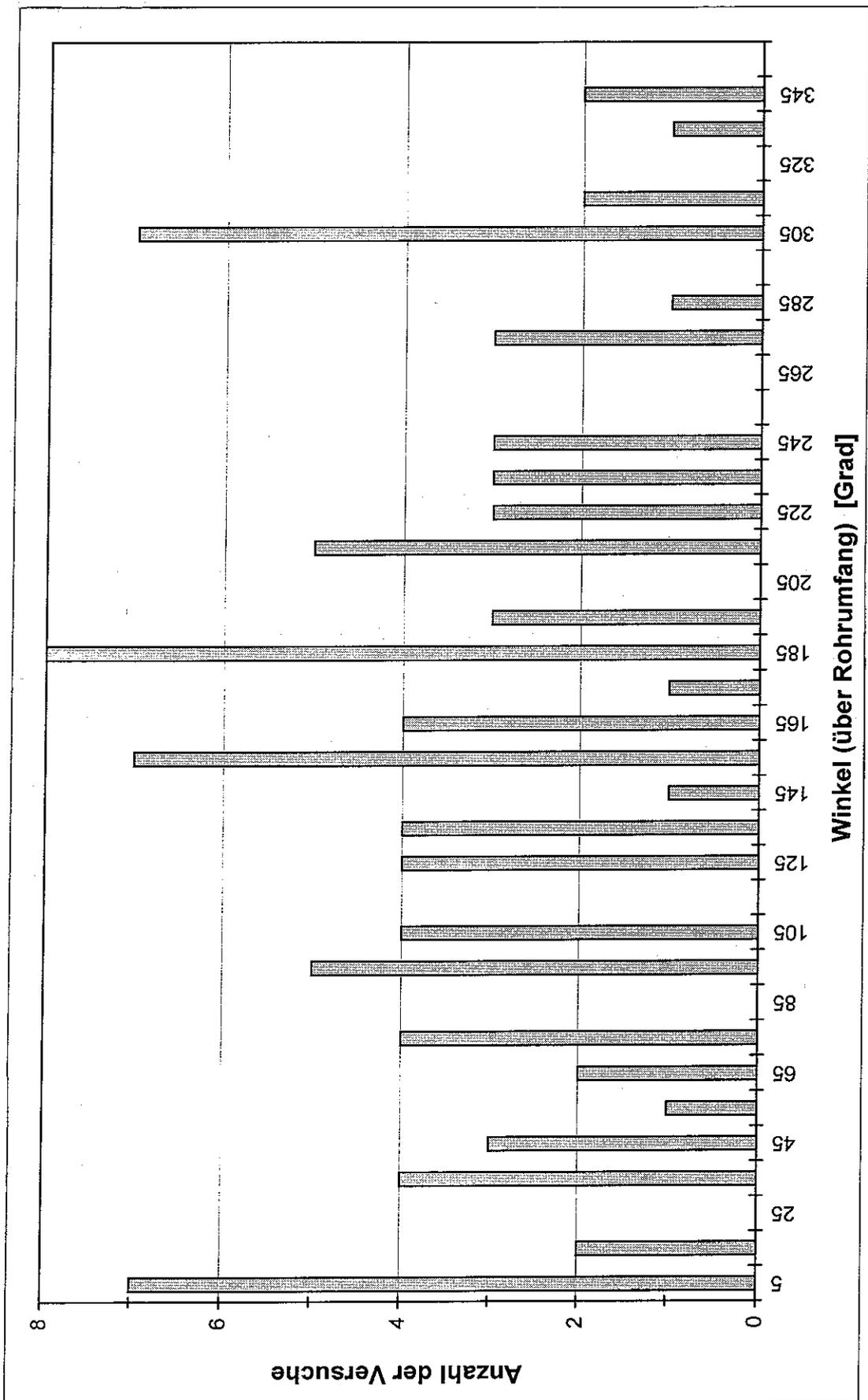


Abb. 10: Häufigkeit der Berstwinkel der Versuche mit beheiztem Umgebungsrohres.

In Abb. 11 ist die Bersttemperatur über der Initialspannung der Versuche mit einer Aufheizrate von 1 K/s für ZrNb1- und Zry4- Hüllrohre dargestellt. Dazu ist der Verlauf der Rechenwerte des REBEKA- Deformationsmodells (REMOD) für Zry4 eingetragen. Die ZrNb1-Bersttemperaturen sind im unteren Spannungsbereich bis ca. 30 MPa deutlich niedriger als die von Zry4-Hüllrohren. Im oberen Spannungsbereich ist der Verlauf annähernd identisch. Abb. 12 zeigt den Vergleich der Bersttemperaturen von ZrNb1 und Zry4 für die Versuche mit einer Aufheizrate von 10 K/s. Die niedrigen Bersttemperaturen von ZrNb1 gegenüber Zry4 sind hier noch deutlicher bis zu einer Initialspannung von ca. 60 MPa ausgeprägt.

5.2 Berstdehnung

In Abb. 13 a und 13 b ist die Berstumfangsdehnung über der Bersttemperatur der ZrNb1-Versuche dargestellt. Alle hier und im folgenden dargestellten Berstumfangsdehnungen sind außendurchmesserbezogen, da diese Dehnungswerte für reaktortechnische Betrachtungen (Kühlkanalversperrung) sinnvoll sind. Bei den Versuchen mit einer Aufheizrate von 1 K/s (Abb. 13a) weisen die Dehnungen eine relativ große Streuung auf. Bis zu einer Bersttemperatur von ca. 850 °C tritt eine abnehmende Tendenz der Dehnung auf. Zwischen 830 °C und 860 °C ist ein Minimum der Dehnung zu verzeichnen. Bei Bersttemperaturen zwischen 890 °C und 930 °C tritt ein Maximum der Dehnung auf. Im unteren Temperaturbereich um 700 °C ist ein Maximum der Dehnung nicht eindeutig bestimmbar.

Bei den ZrNb1-Versuchen mit 10 K/s Aufheizrate (Abb. 13b) tritt bei ca. 930 °C ein Maximum der Dehnung auf. Zur Bestätigung dieses Maximums müßten jedoch noch Versuche mit Bersttemperaturen größer als 930 °C durchgeführt werden.

Der Vergleich der beiden Aufheizraten der ZrNb1-Versuche (Abb. 14) zeigt, daß im Bersttemperaturbereich bis ca. 870 °C die bei einer Aufheizrate von 10 K/s gemessenen Berstumfangsdehnungen kleiner als bei einer Aufheizrate von 1 K/s sind. Im oberen Bersttemperaturbereich ab ca. 930 °C sind die bei 10 K/s gemessenen Dehnungen größer als diejenigen bei 1 K/s, wobei hier im Temperaturbereich um 1000 °C zu wenige Werte vorliegen. Dieser Einfluß der Aufheizrate auf die Berstdehnung ist ähnlich dem bei Zry4.

In Abb. 15 a und 15 b sind die Berstumfangsdehnungen der ZrNb1-Hüllrohre denen der Zry4-Hüllrohre gegenübergestellt. Dazu ist der Verlauf der Rechenwerte des REBEKA-Deformationsmodells für Zry4 eingetragen. Dieses Modell dient für die Zry4-Meßwerte als obere Einhüllende.

Die Berstumfangsdehnungen der ZrNb1-Hüllrohre sind im Temperaturbereich bis etwa 900 °C niedriger als die der Zry4-Hüllrohre. Der tendenzielle Verlauf ist für beide Materialien ähnlich. Nur ist der Verlauf, insbesondere das im Mischphasenbereich ($(\alpha + \beta)$ - Phase) auftretende Minimum der Berstdehnung beim ZrNb1 gegenüber Zry4 um ca. 80 K zu niedrigeren Bersttemperaturen verschoben.

In Abb. 16 a und 16 b sind noch einmal zur Übersicht die Berstumfangsdehnungen für Zry4 in Form der Rechenwerte des REBEKA-Deformationsmodells mit den Meßwerten für ZrNb1 verglichen.

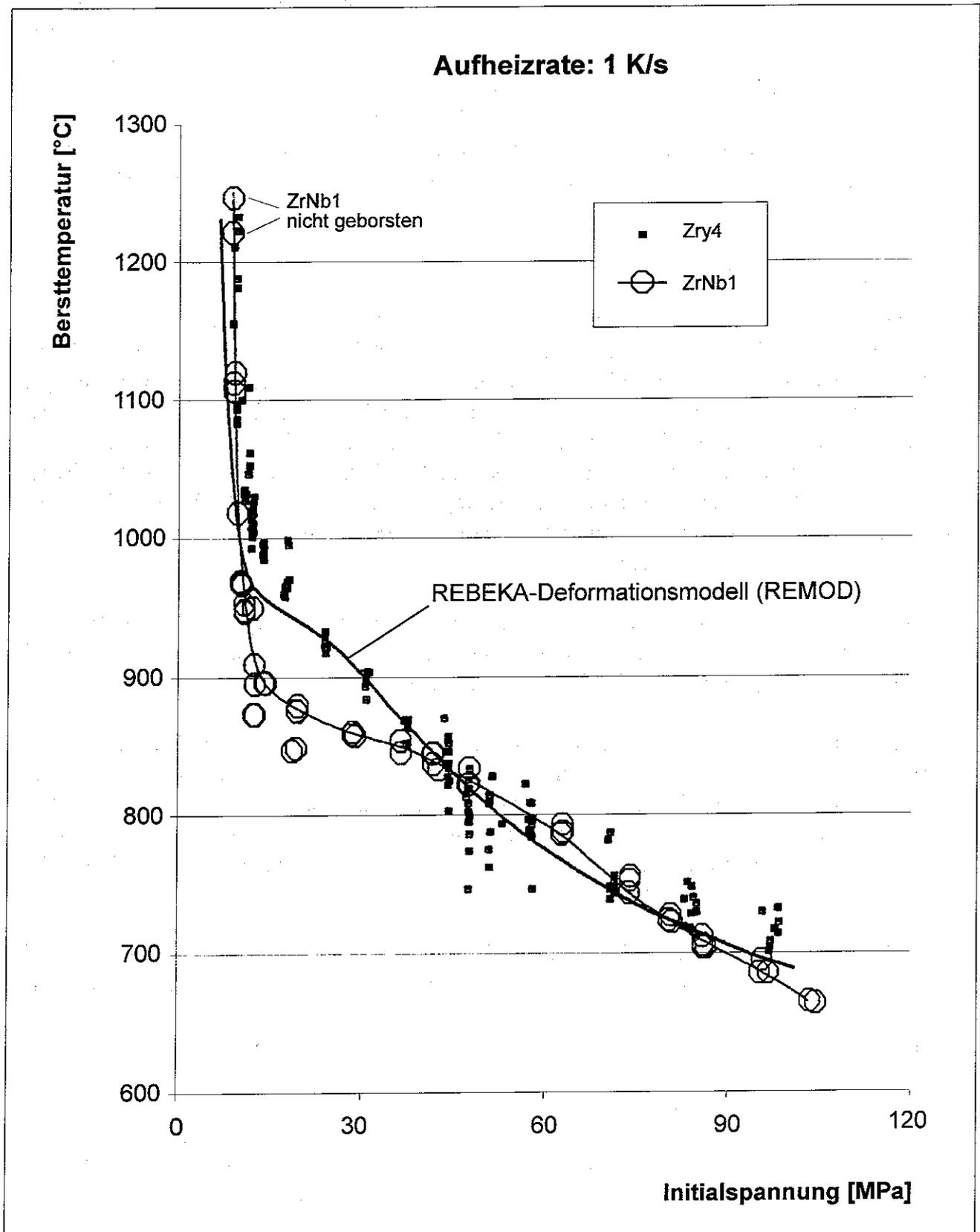


Abb. 11: Bersttemperatur über Initialspannung
Vergleich: ZrNb1 mit Zry4 bei 1 K/s

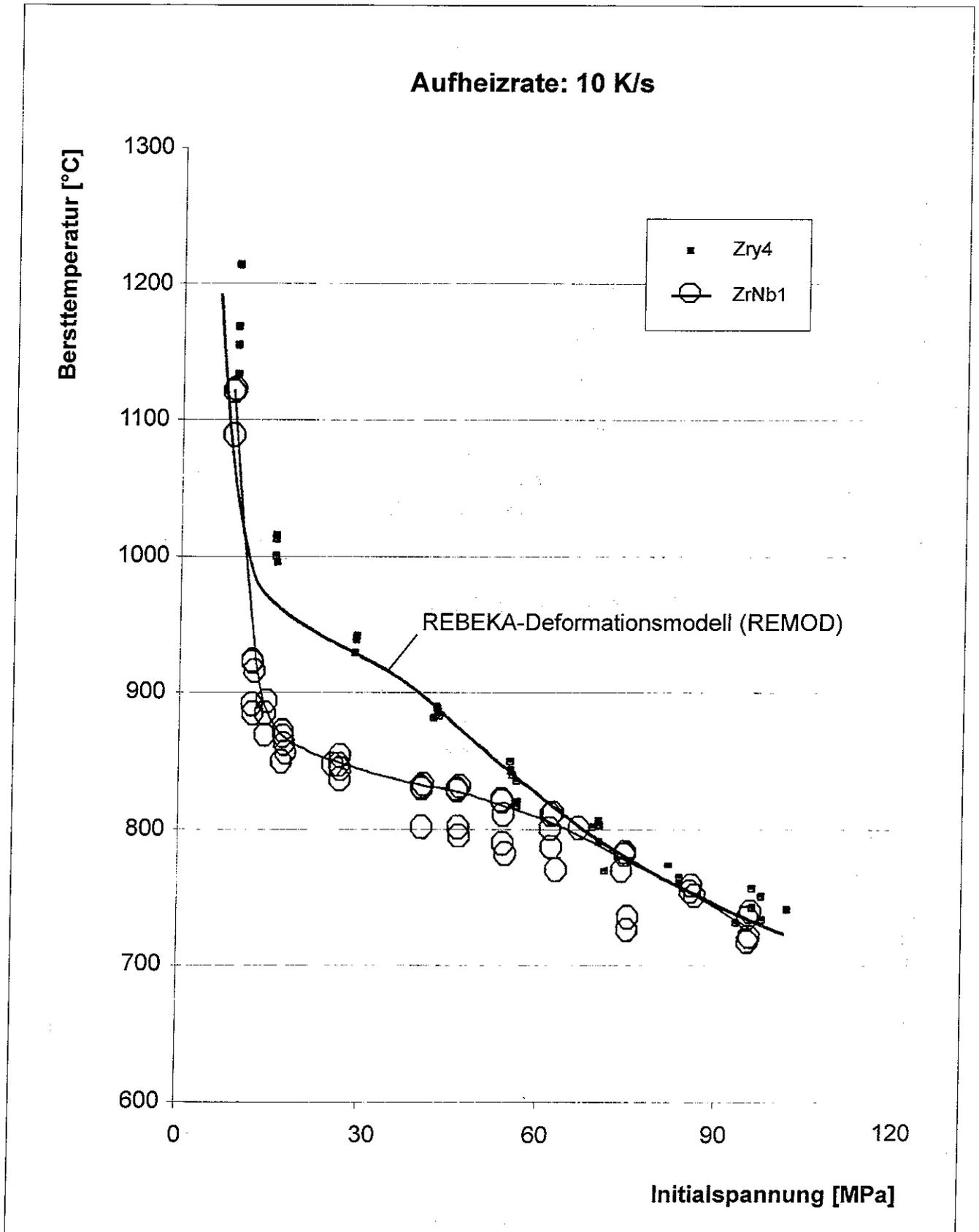


Abb.12: Bersttemperatur über Initialspannung
 Vergleich: ZrNb1 mit Zry4 bei 10 K/s

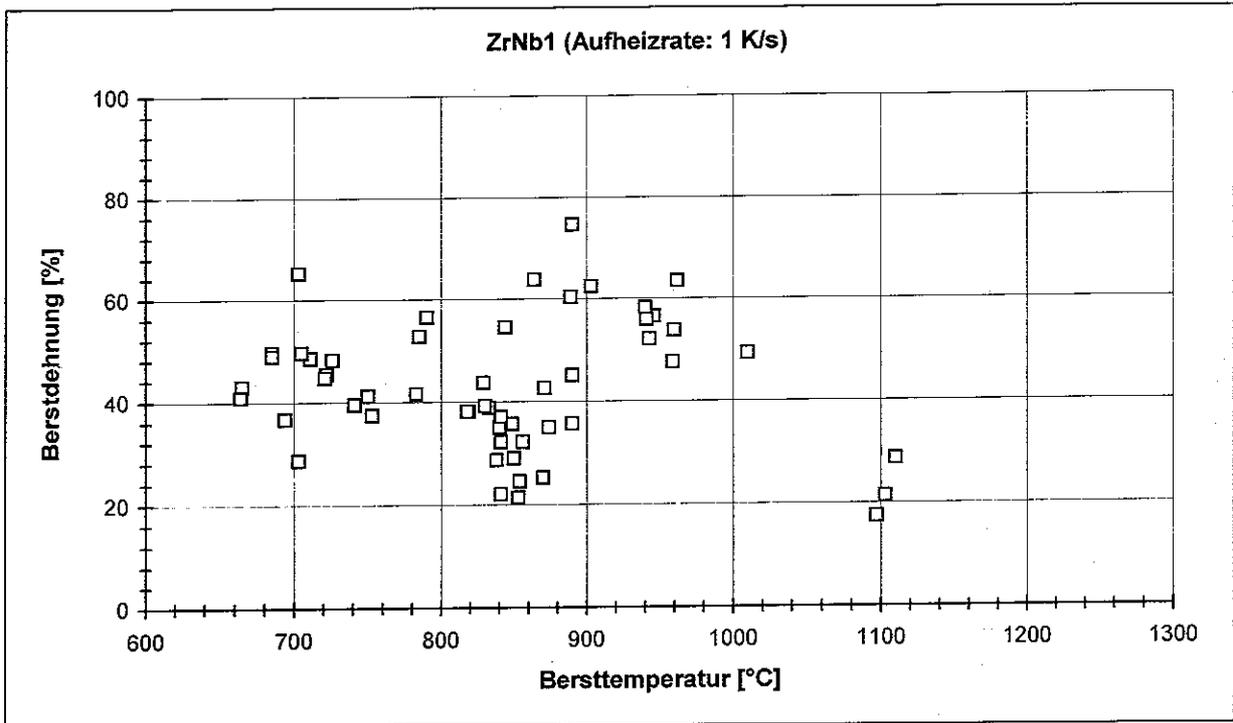
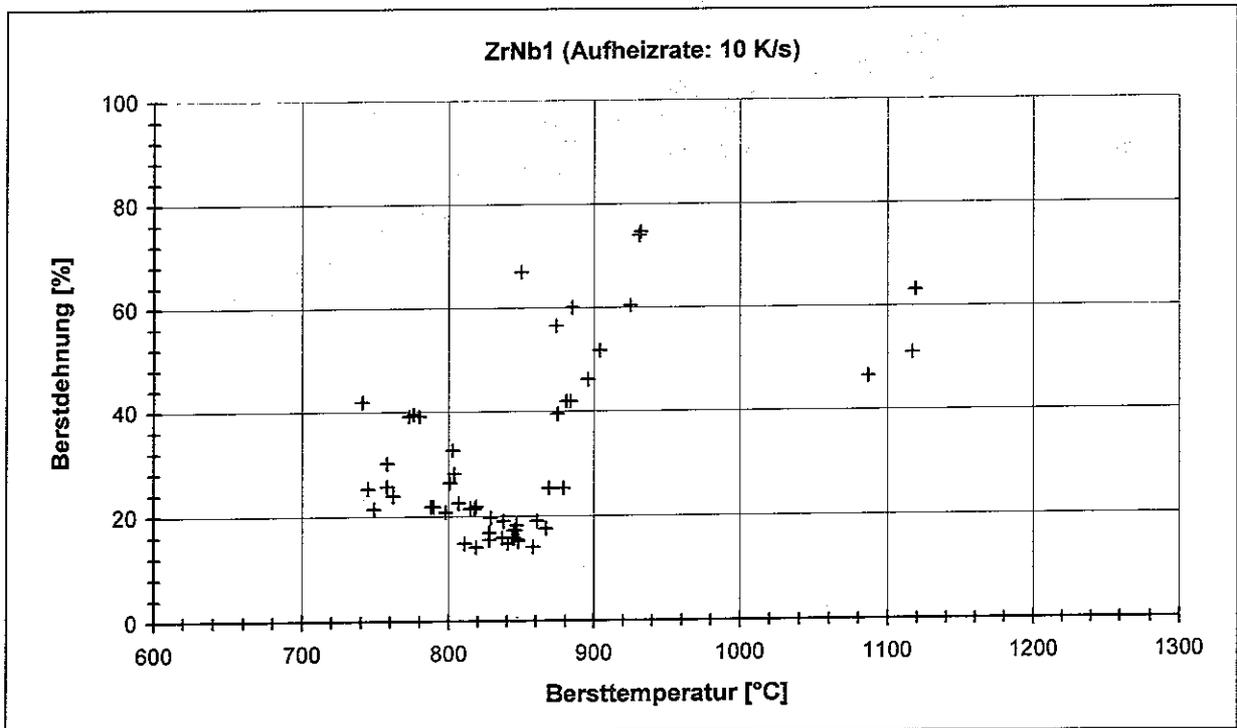


Abb. 13 a: Berstdrehung über Bersttemperatur.



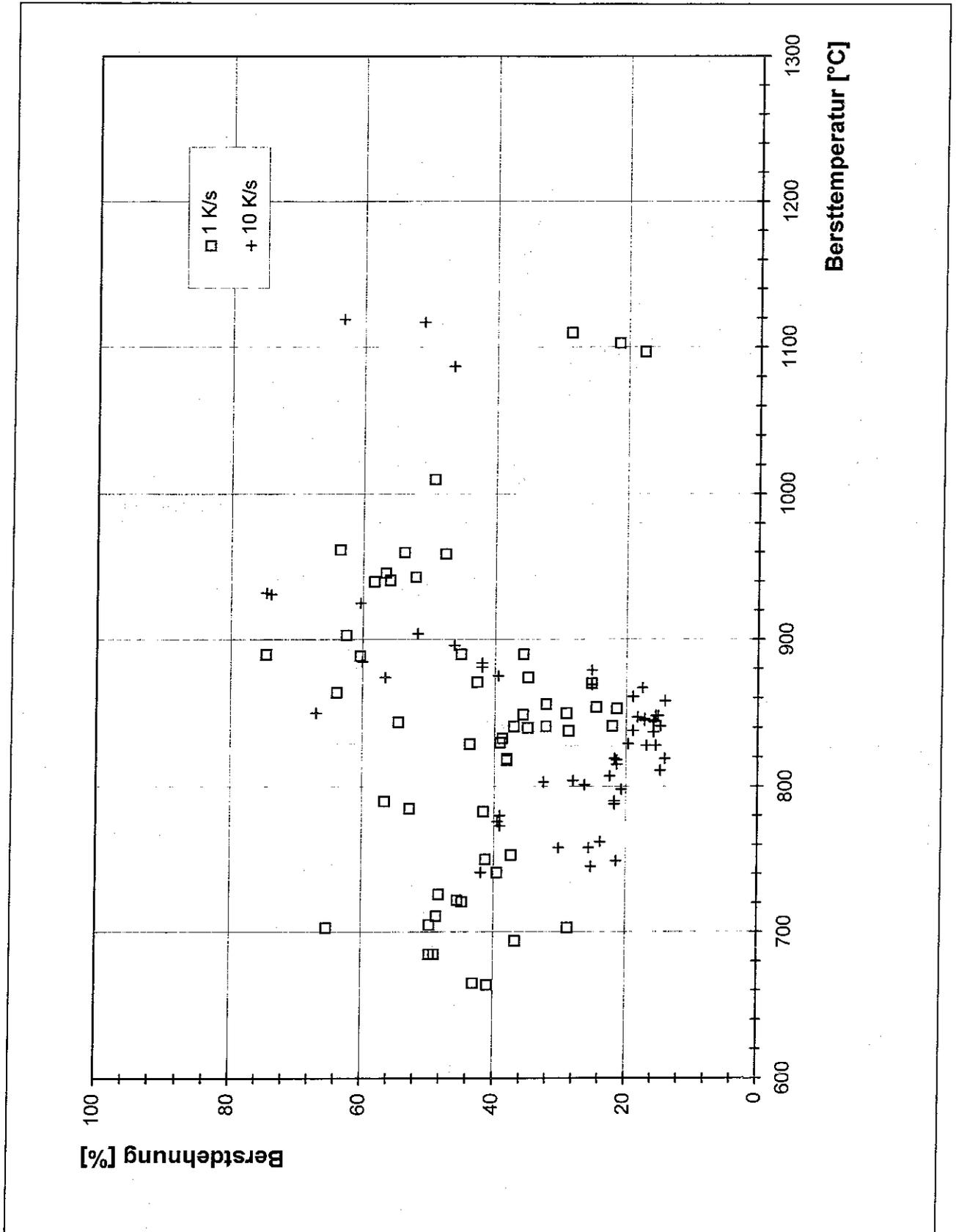


Abb. 14: Vergleich der beiden Aufheizraten der ZrNb1-Versuche

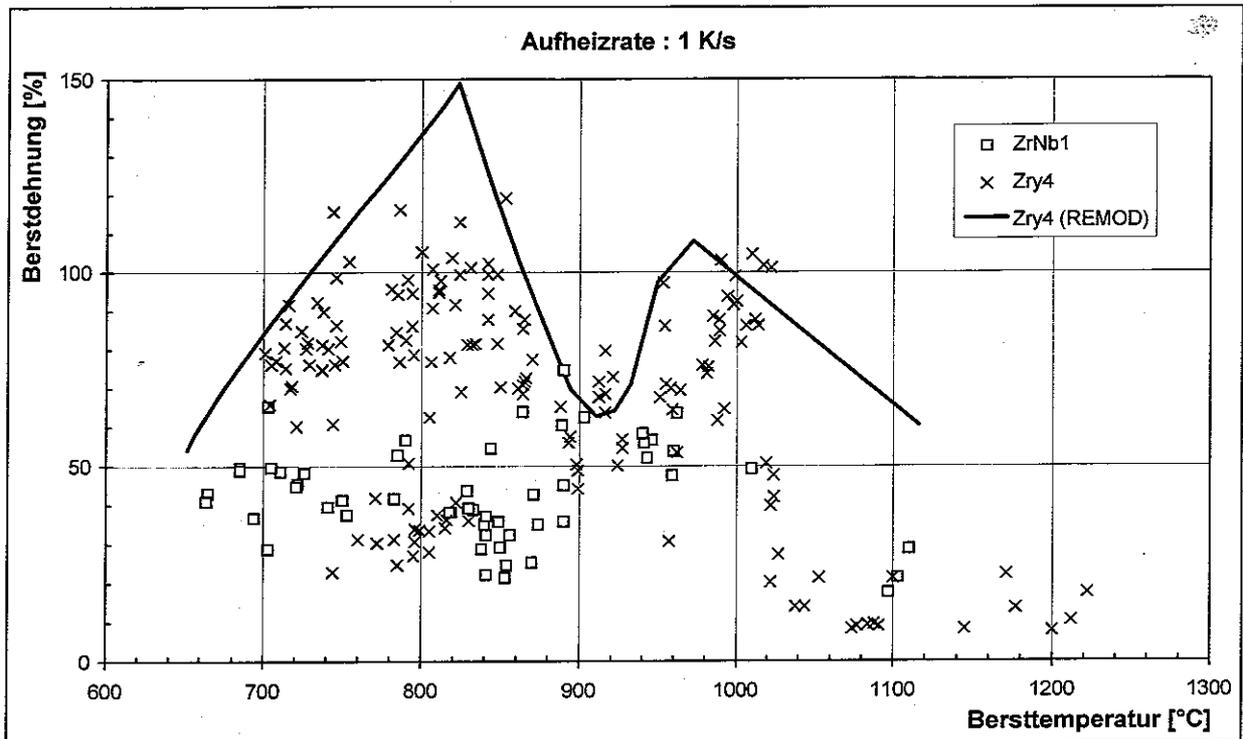


Abb. 15 a: Berstdehnung über Bersttemperatur (Aufheizrate 1 K/s)

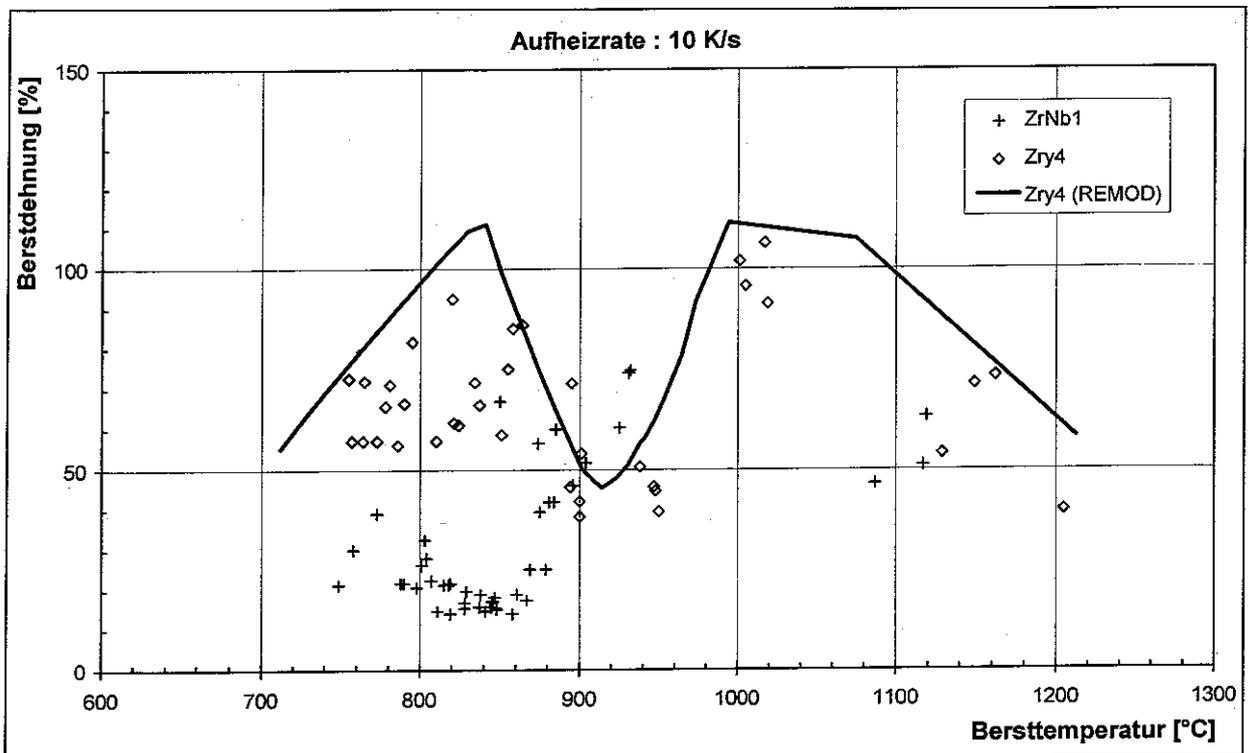


Abb. 15 b: Berstdehnung über Bersttemperatur (Aufheizrate 10 K/s)

Bei den Einzelstabversuchen mit Zry4-Hüllrohren wurde für Bersttemperaturen in der α - und frühen ($\alpha + \beta$) - Phase eine Abhängigkeit der Berstdehnungen von der azimutalen Temperaturdifferenz insofern nachgewiesen, daß bei größeren azimutalen Temperaturdifferenzen geringere Berstdehnungen auftreten [2]. Da bei ZrNb1 die Phasenumwandlung wesentlich früher beginnt (s. Kap. 5.4), konnte dieser Zusammenhang im Bersttemperaturbereich der Versuche für ZrNb1 nicht gefunden werden.

5.3 Zeitlicher Verlauf der Dehnung

Die Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Umfangsdehnung erfolgte mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera. Das Röntgenbild des Brennstabsimulators wurde über einen Röntgenbildwandler von einer Filmkamera aufgenommen. Die Aufnahmen wurden mit 24 Bilder pro Sekunde bei 9 Kriechberstversuchen kurz vor dem Bersten (etwa 40 s bis zum Bersten) durchgeführt.

Zur Auswertung der zeitlichen Durchmesseränderung des Brennstabhüllrohres aus den Filmaufnahmen wurde ein Mikrodensitometer verwendet, d.h. zur Vermessung der jeweiligen Hüllrohrdurchmesser wurde der unterschiedliche Schwärzungsgrad des Filmes zwischen Brennstab und Brennstabumgebung genutzt (Abb. 17).

In Abb. 18 ist als Beispiel der Dehnungsverlauf bis zum Bersten von 4 Versuchen eingetragen. Der wesentliche Dehnungsvorgang des Brennstabhüllrohres findet in wenigen Sekunden vor dem Bersten statt. Die Dehnungsgeschwindigkeit wird durch die Aufheizrate bestimmt, d.h. bei einer größeren Aufheizrate erfolgt der Dehnvorgang in kürzerer Zeit in steilerem Anstieg vor dem Bersten.

Die wenigen vorliegenden Zeit-Dehnungsverläufe für ZrNb1-Kriechberstversuche und die sehr wenigen ausgewerteten Zeit-Dehnungsverläufe für temperaturtransiente Zry4-Versuche gestatten keinen systematischen Vergleich beider Materialien.

In Abb. 19 sind je ein Verlauf für ZrNb1 und Zry4 dargestellt, die aber aufgrund fehlender statistischer Absicherung keine eindeutige Aussage zulassen.

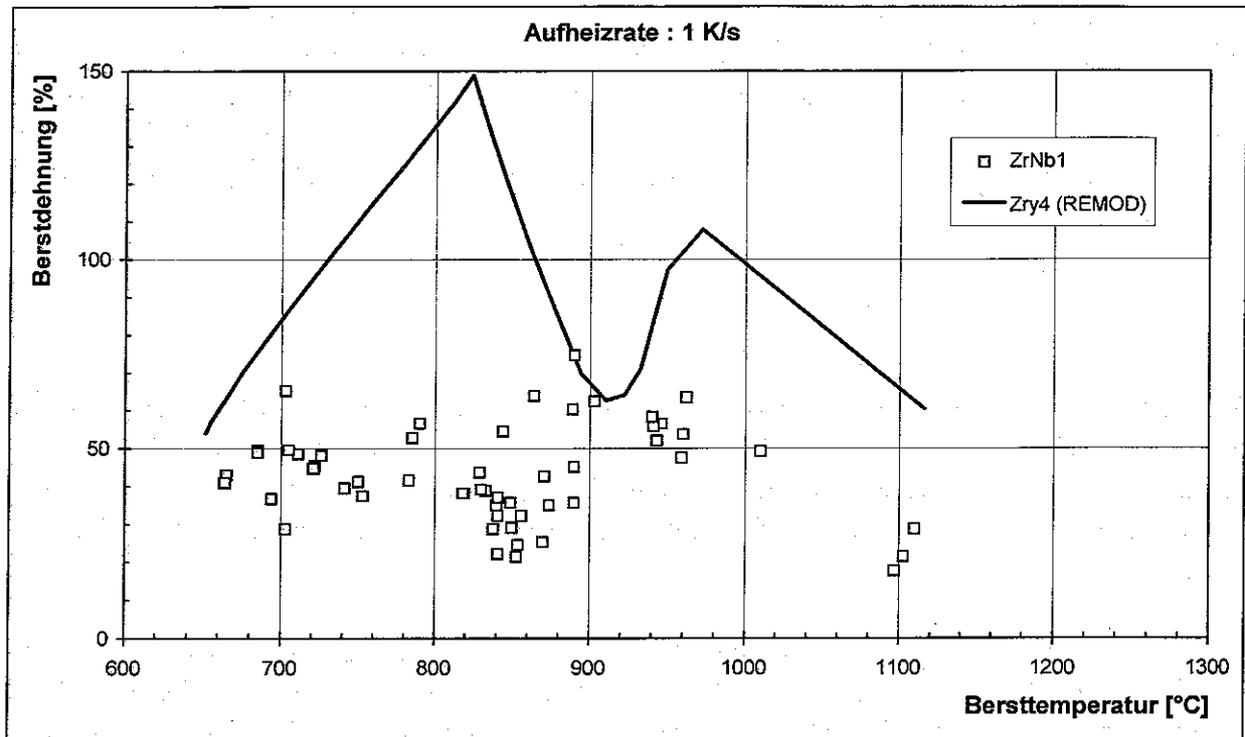


Abb. 16 a: Berstdehnung über Bersttemperatur (ZrNb1 - 1 K/s, REMOD).

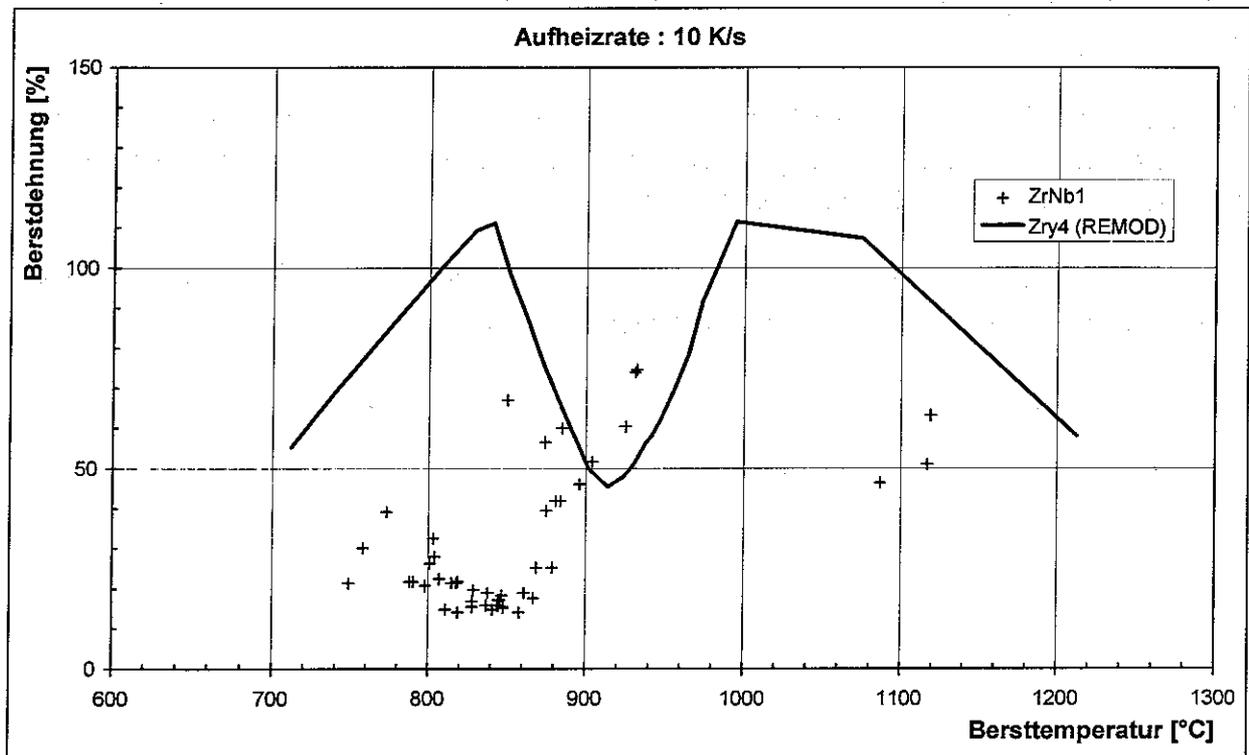


Abb. 16 b: Berstdehnung über Bersttemperatur (ZrNb1 - 10 K/s, REMOD).

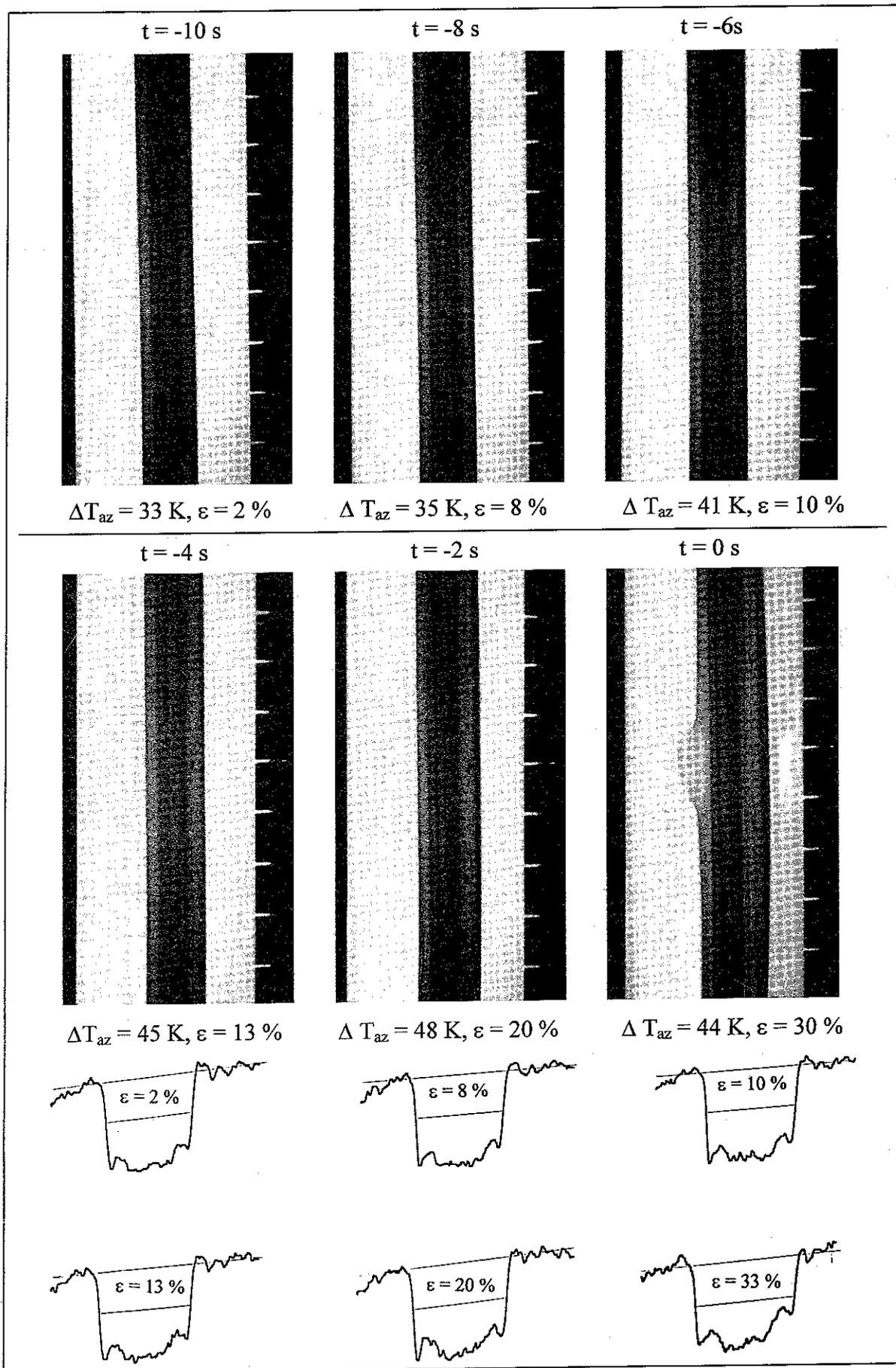


Abb. 17: Zeitlicher Deformationsvorgang mit Mikrodensitometrischer Hüllrohrvermessung.

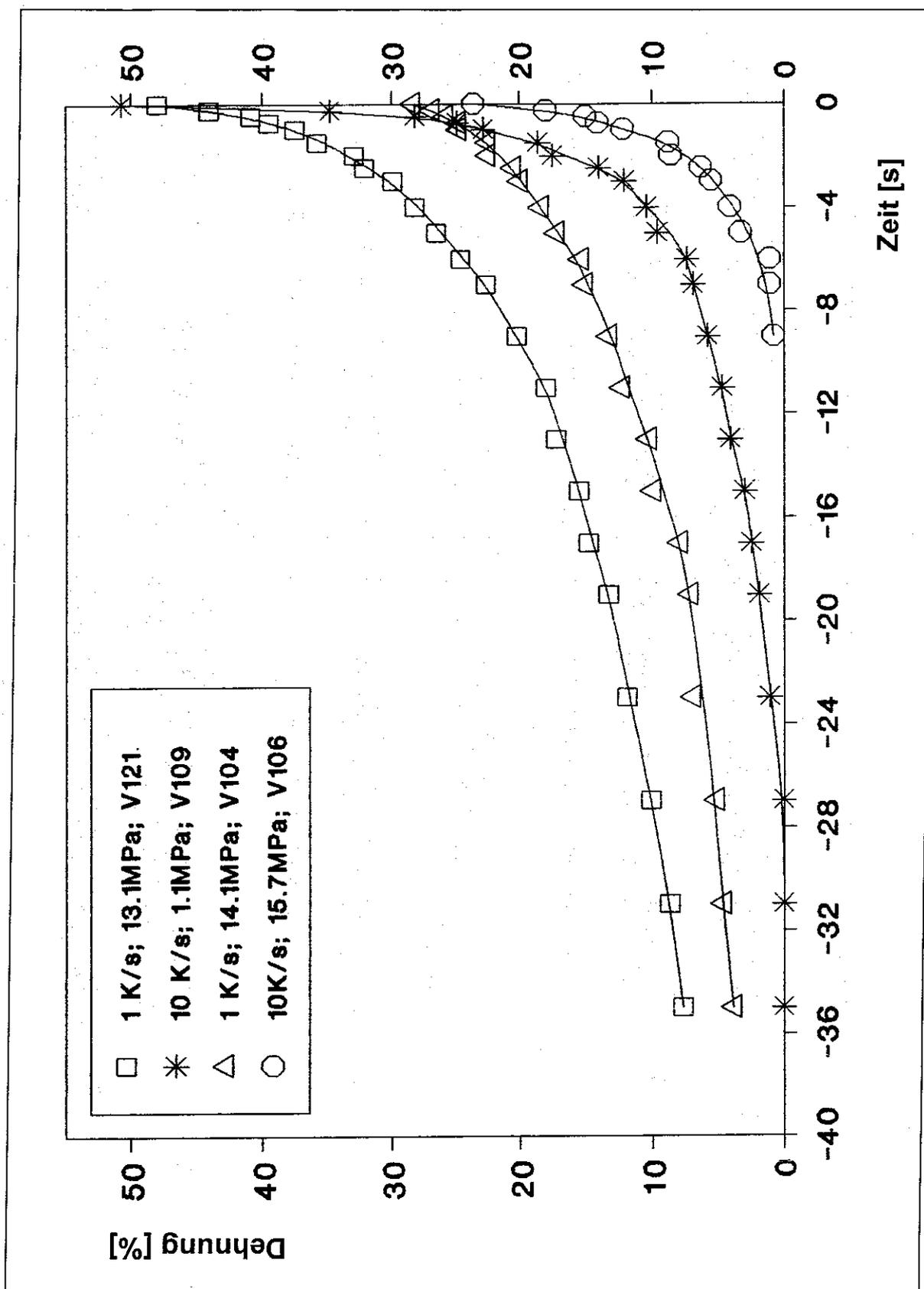


Abb. 18: Dehnungsverlauf bis zum Bersten (ZrNb1).

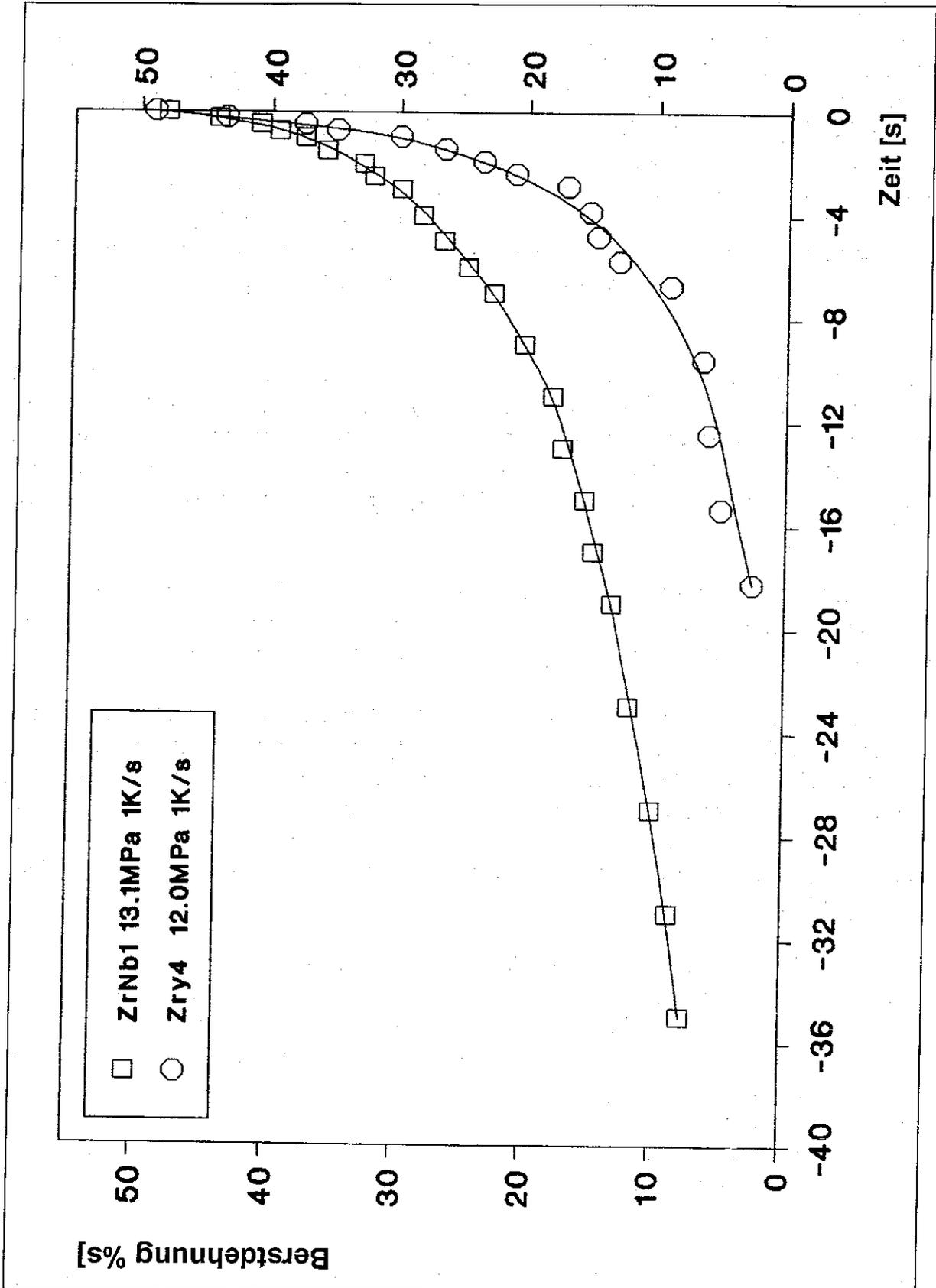


Abb. 19: Dehnungsverlauf bis zum Bersten (ZrNb1/Zry4).

5.4 Metallographische Untersuchungen

Die Ansichten der Berststellen zeigen die Abb. 20 - 23. Die Form der Berstbeule wird in erster Linie vom Berstdruck bestimmt: Je höher der Innendruck, desto großflächiger reißt der Stab auf und desto größer ist der Reißöffnungswinkel bei gleicher Aufheizrate. Der Vergleich zwischen dem Verhalten bei unterschiedlichen Aufheizraten (Abb. 20 und 21) läßt erkennen, daß darüber hinaus auch ein Einfluß der Berstdehnung bzw. -temperatur vorliegt. Im unteren Temperaturbereich bis ca. 800 °C ist eine Verbiegung der Stäbe mit der Krümmung zur Berstöffnung hin feststellbar. Der Effekt wird auch bei Zircaloy beobachtet, ist dort aber stärker ausgeprägt [2]. Die Aufheizung ohne Beheizung des Umgebungsrohres (größere azimutale Temperaturdifferenzen) führt zu keinem qualitativ andersartigen Verhalten, die Krümmung ist in der Regel jedoch geringer.

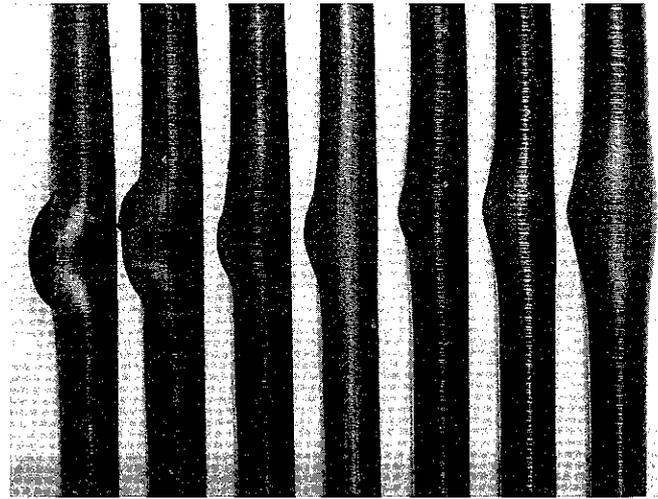
Die Querschnitte in der Berstmittelebene (Abb. 22 und 23) dokumentieren anschaulich die Berstdruck- und Temperaturabhängigkeit der Berstdehnung. Sie zeigen in der Regel eine weitestgehend gleichmäßige Wanddickenschwächung, die nur in unmittelbarer Nachbarschaft der Berststelle stark lokalisiert ist. Es gibt aber auch Beispiele mit azimutal breiter Einschnürung (z.B. 0.9/1010 in Abb.22) oder mit mehreren Ansätzen zur Einschnürung (0.84/1110 in Abb.22, 7.5/847 in Abb.23).

Die Oxidschichten sind vom äußeren Erscheinungsbild her in allen Fällen festhaftend und bis ca. 900 °C gleichmäßig dunkel. Mit wachsender Temperatur wird die Oberfläche zunehmend fleckig-hellgrau. Bei 1200 °C tritt durchgängig eine weißlich-graue Oxiddeckschicht auf.

Das mikroskopische Erscheinungsbild ist in den Abb. 24 und 25 wiedergegeben. Die Grenzfläche Oxid/Metall ist uneben. Bei niedrigen Bersttemperaturen und folglich geringen Oxidschichten ist die Grenzfläche sinusförmig gewellt, mit wachsender Temperatur treten immer stärker bucht- oder sägezahnartige Einwachsungen des Oxides auf. Die Oxidschichten werden schon bei geringeren Dicken rissig, mit zunehmender Oxidschichtdicke zerfallen sie in eine Vielzahl unregelmäßiger Oxidfragmente, wobei in der Randzone oder linsenartig bis zum Metall Oxid auftritt (Abb. 26).

Wie der Vergleich der Abb. 25 und 26 zeigt, ist für dieses Verhalten der wesentliche Parameter nicht unmittelbar die Temperatur oder die Dehnung, sondern die während der Aufheizphase gebildete Oxidschicht [1]. Allerdings ist eine entsprechende Dehnung notwendige Voraussetzung für die Reiß- und Fragmentbildung der Oxidschicht. Bei isothermen oder transienten drucklosen Oxidationsversuchen im Wasserdampf [1] werden grundsätzlich ähnliche Effekte, allerdings erst bei wesentlich höheren Oxidschichtdicken und nur in bestimmten Temperaturbereichen beobachtet. In vergleichbaren Temperatur-Zeitbereichen treten noch sehr homogene, kaum rissige Oxidschichtstrukturen auf (Abb. 27).

Trotz der starken Defekte der Oxidschicht wird die Bildungskinetik nicht wesentlich verändert, wie der Vergleich mit SSYST-Oxidationsrechnungen zeigt (Abb. 28). Das dabei verwendete Oxidationsmodell ist aus isothermen ZrNb1-Oxidationsversuchen ermittelt worden [1]. Die Abweichungen bei niedrigen Oxidschichtdicken erklären sich daraus, daß das SSYST-Modell für niedrige Temperaturen und kurze Oxidationszeiten keine gute Näherung darstellt. Erwartungsgemäß wird mit zunehmender Bersttemperatur und Oxidationszeit auch eine zunehmende Oxidstärke gemessen.



Versuch Nr.	62	63	66	72	74	76	77
Berstdruck [MPa]	12,0	10,1	8,8	6,6	4,0	2,6	1,8
Bersttemp. [°C]	749	788	798	819	861	879	885
Aufheizrate [K/s]	9,4	9,3	9,5	9,6	9,5	10,0	10,1
Δt_{az} [K/s]	24	20	29	14	47	26	40

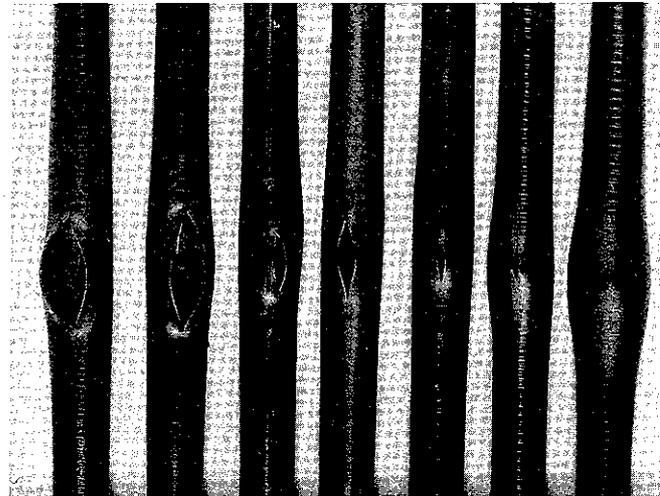


Abb. 20: Berststellenansicht von ZrNb1-Hüllrohren (Aufheizrate 1 K/s).



Versuchsnr.	31	34	37	42	45	47	49	54	57	59
Berstdruck [MPa]	0,7	1,8	2,6	4,2	6,6	7,6	8,8	10,0	12,1	14,0
Bersttemp. [°C]	>1235	932	884	867	846	844	838	828	801	773
Aufheizrate [K/s]		10,5	9,3	9,5	9,5	9,2	9,7	9,9	10,1	9,7
Δt_{az} [K/s]	4	12	6	23	8	14	6	8	1	18

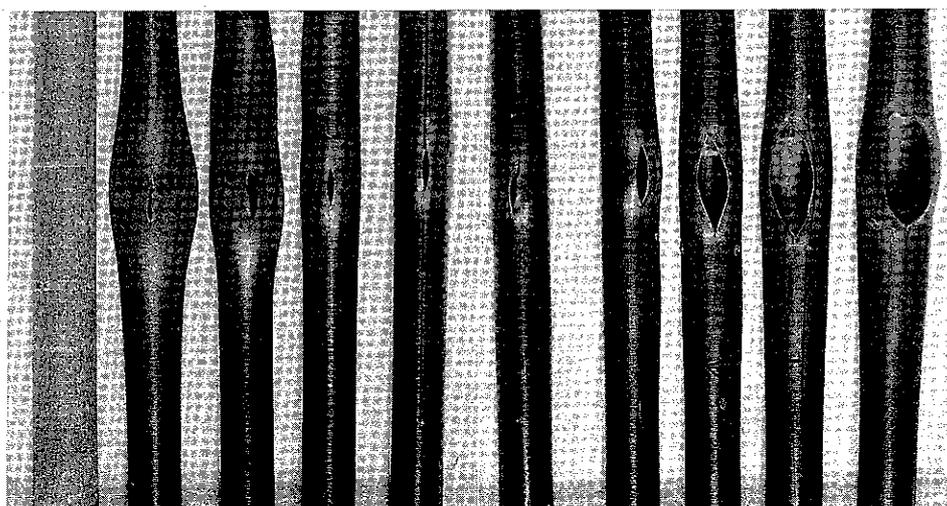


Abb. 21: Berststellenansicht von ZrNb1-Hüllrohren (Aufheizrate 10 K/s).

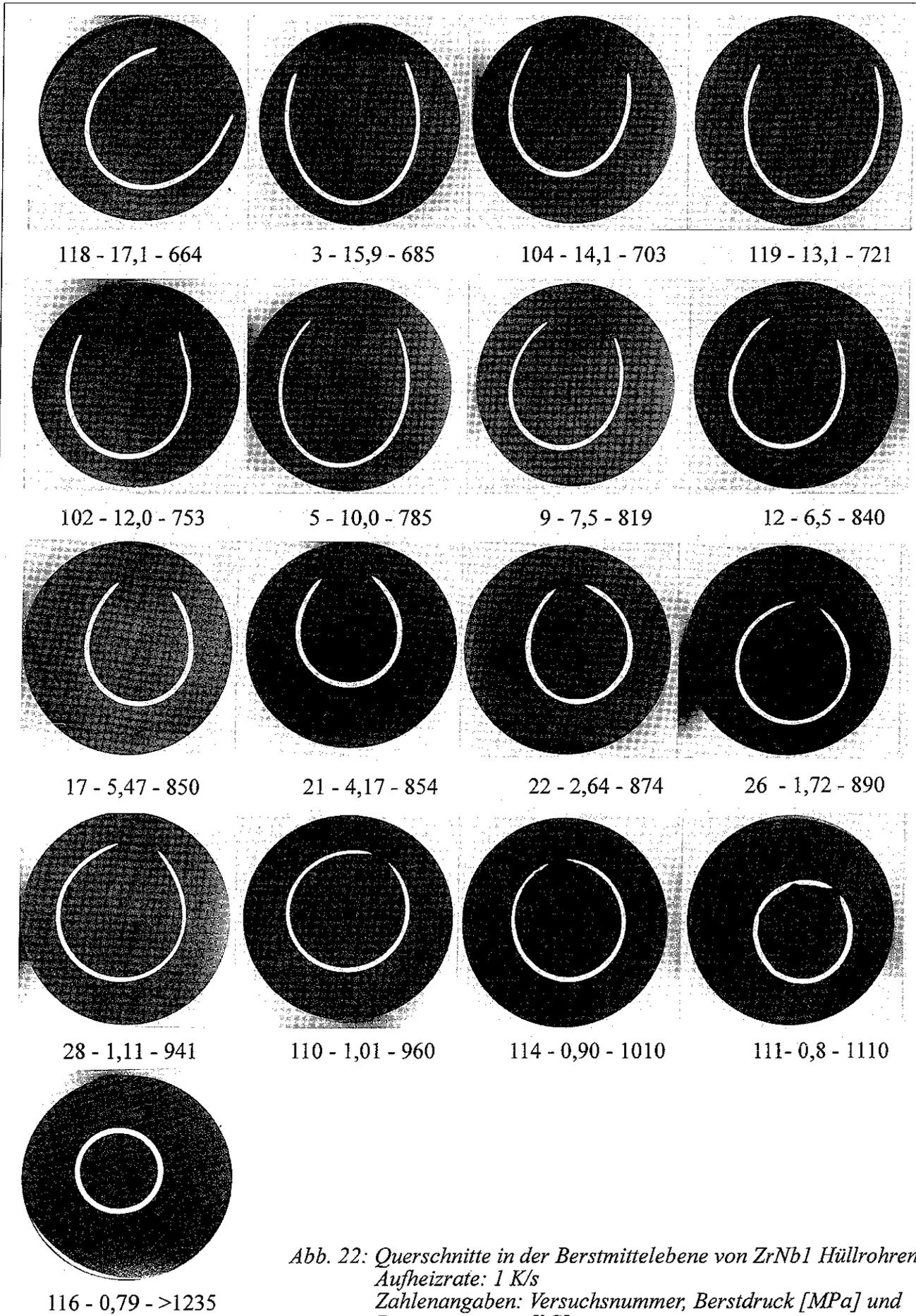


Abb. 22: Querschnitte in der Berstmittlebene von ZrNb1 Hüllrohren
 Aufheizrate: 1 K/s
 Zahlenangaben: Versuchsnummer, Berstdruck [MPa] und
 Bersttemperatur [°C]

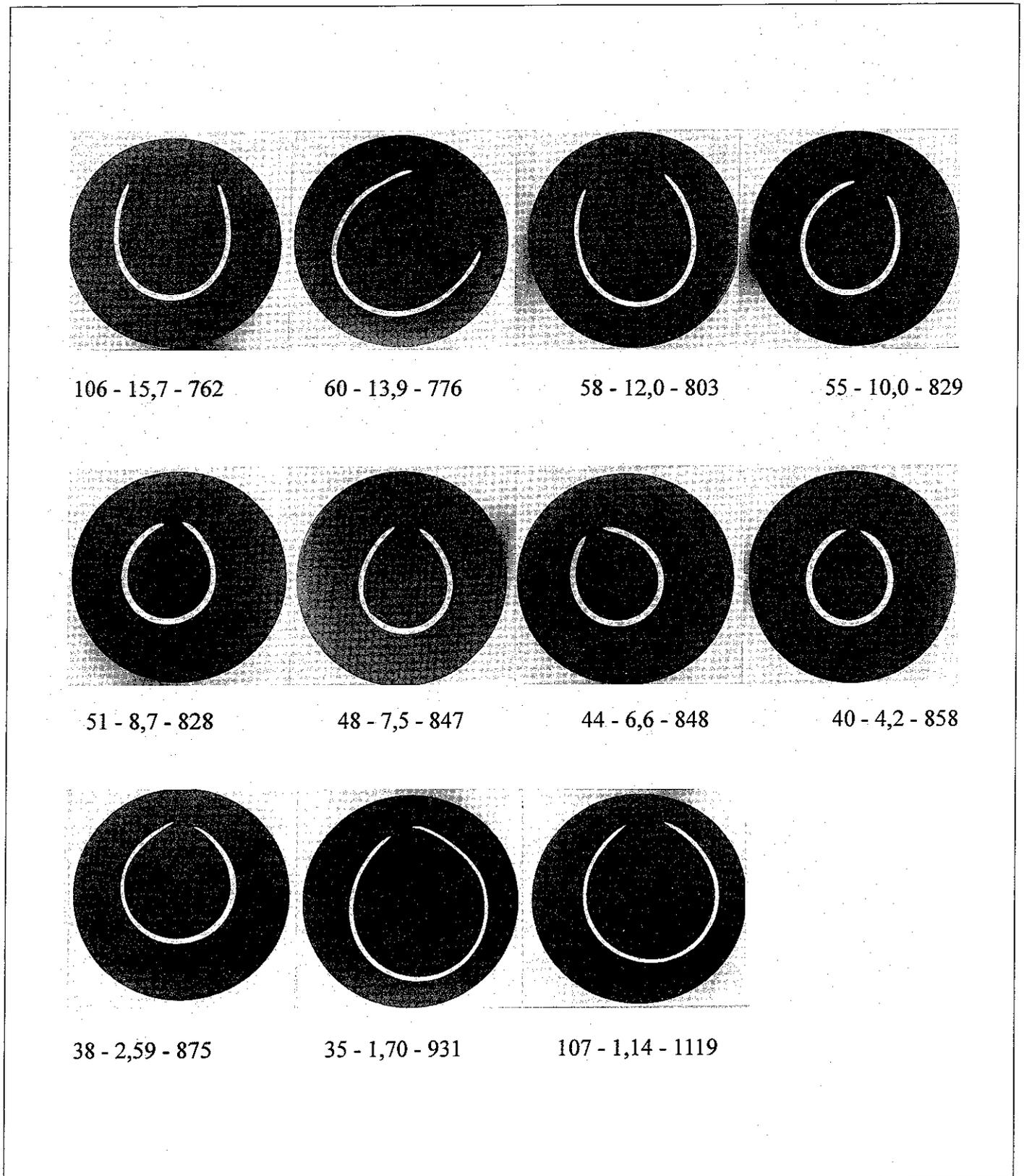


Abb. 23: Querschnitte in der Berstmittlebene von ZrNb1 Hüllrohren
Aufheizrate: 10 K/s
Zahlenangaben: Versuchsnummer, Berstdruck [MPa] und
Bersttemperatur [°C]

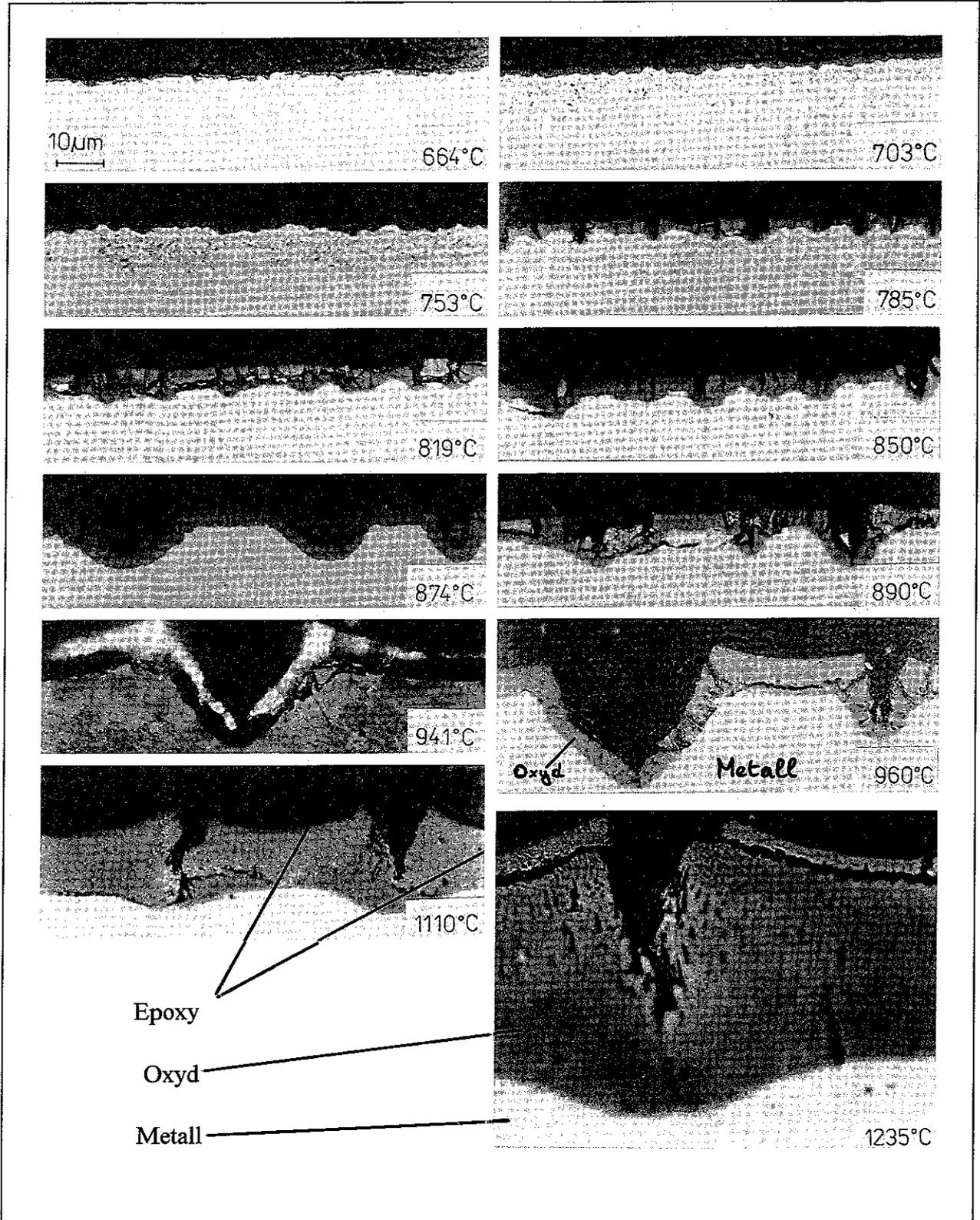


Abb. 24: Makroaufnahme der Oxydschicht in der Berstmittlebene (ZrNb1, poliert, Hellfeld, Aufheizrate 1 K/s, Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]).

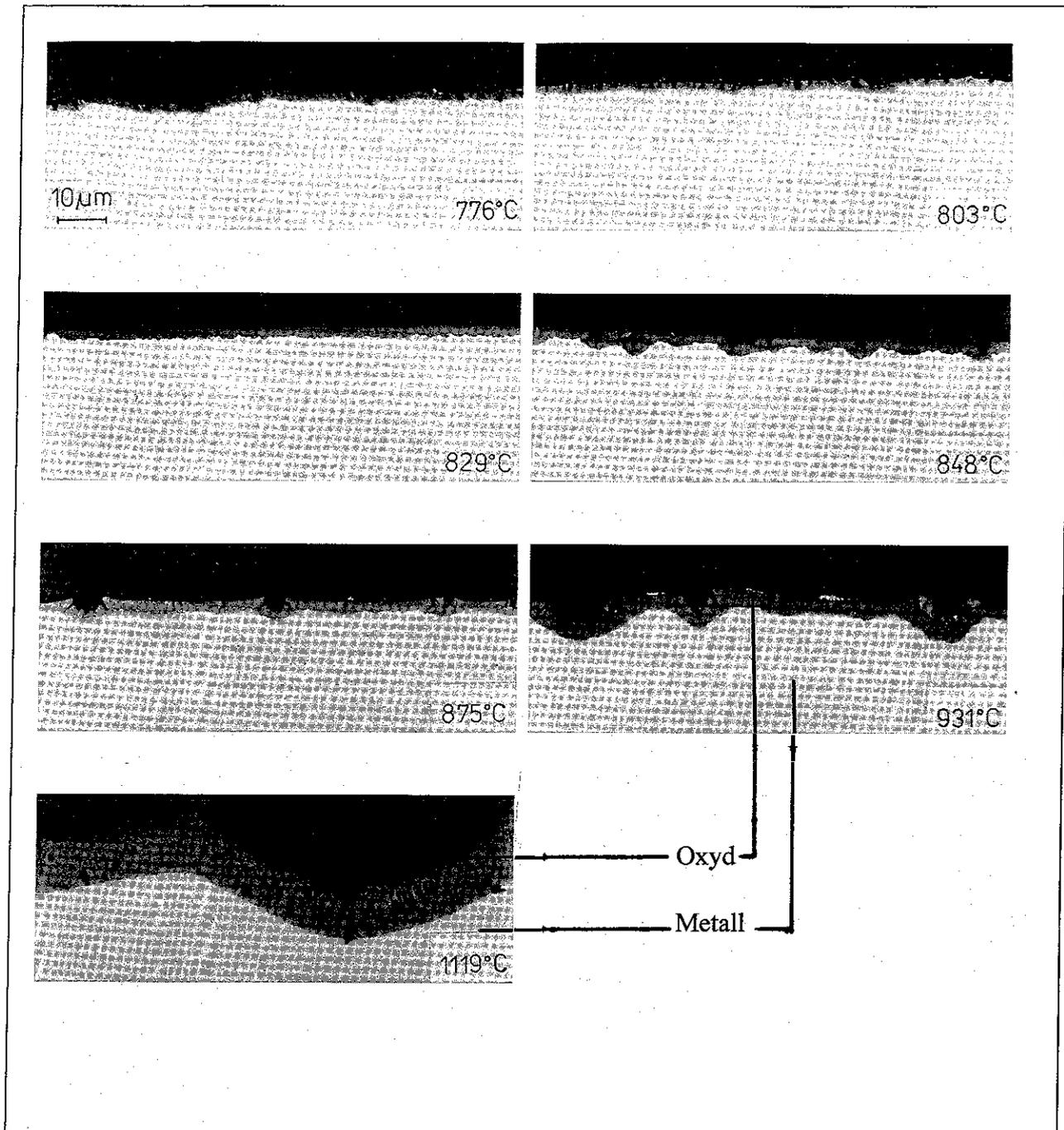


Abb. 25: Makroaufnahme der Oxydschicht in der Berstmittelebene (ZrNb1, poliert, Hellfeld, Aufheizrate 10 K/s, Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]).

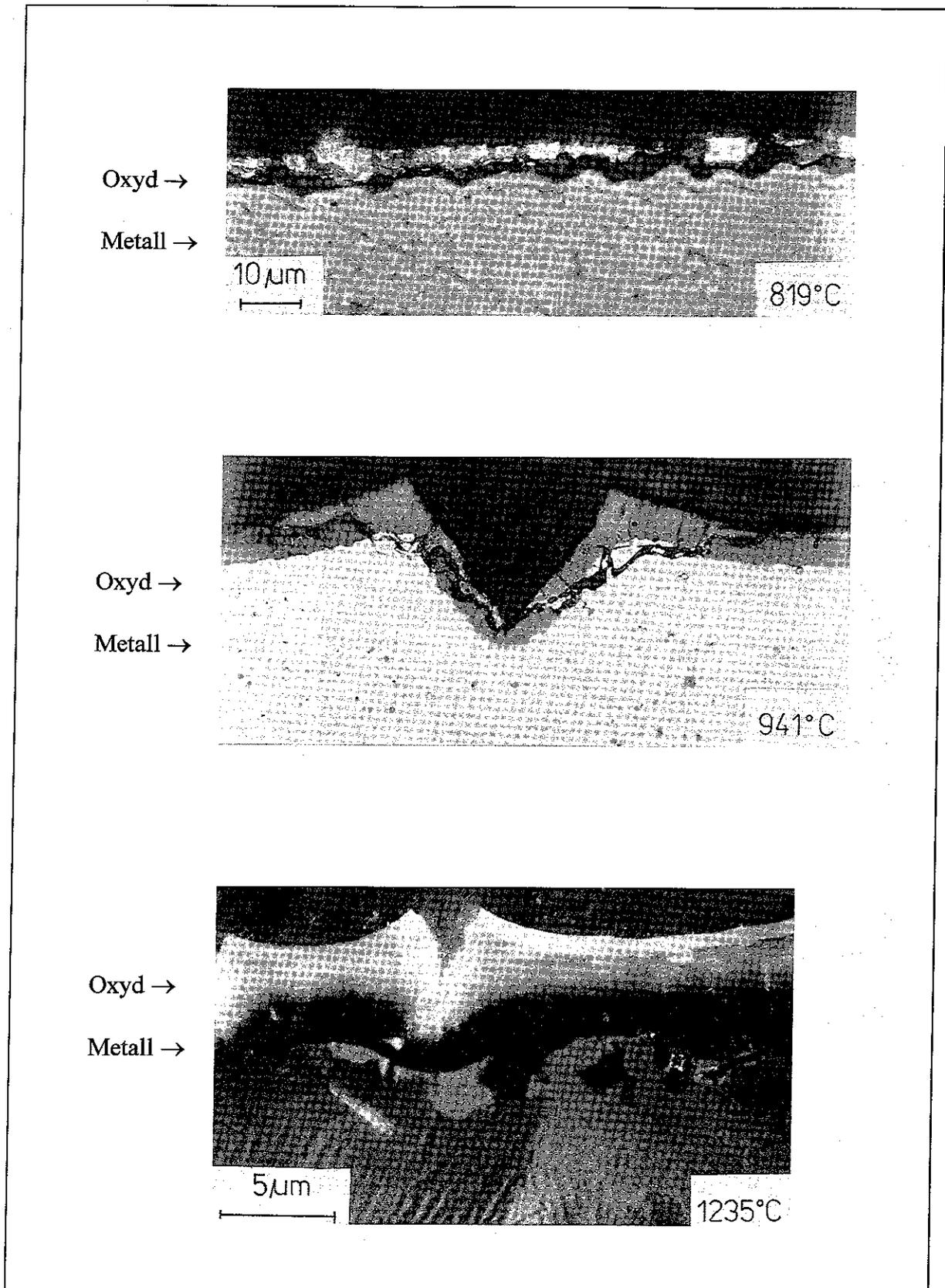


Abb. 26: Oxidschicht, Vergleichsaufnahme zu Abb. 24, gleiche Stelle im polarisierten Licht
 Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]

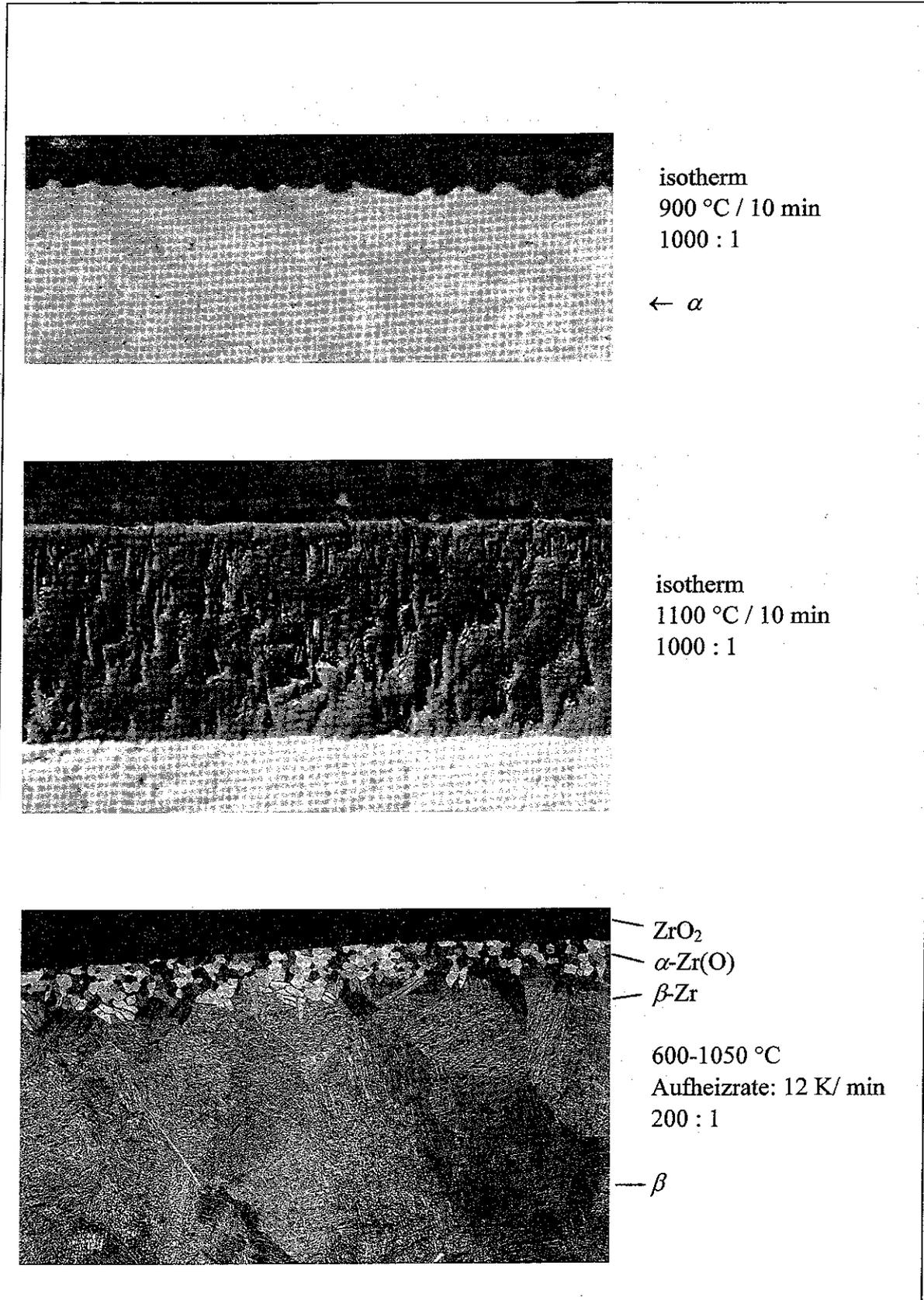


Abb. 27: Oxidschicht nach isothermer und transienter Wasserdampfoxidation (ZrNb1, kein Innendruck).

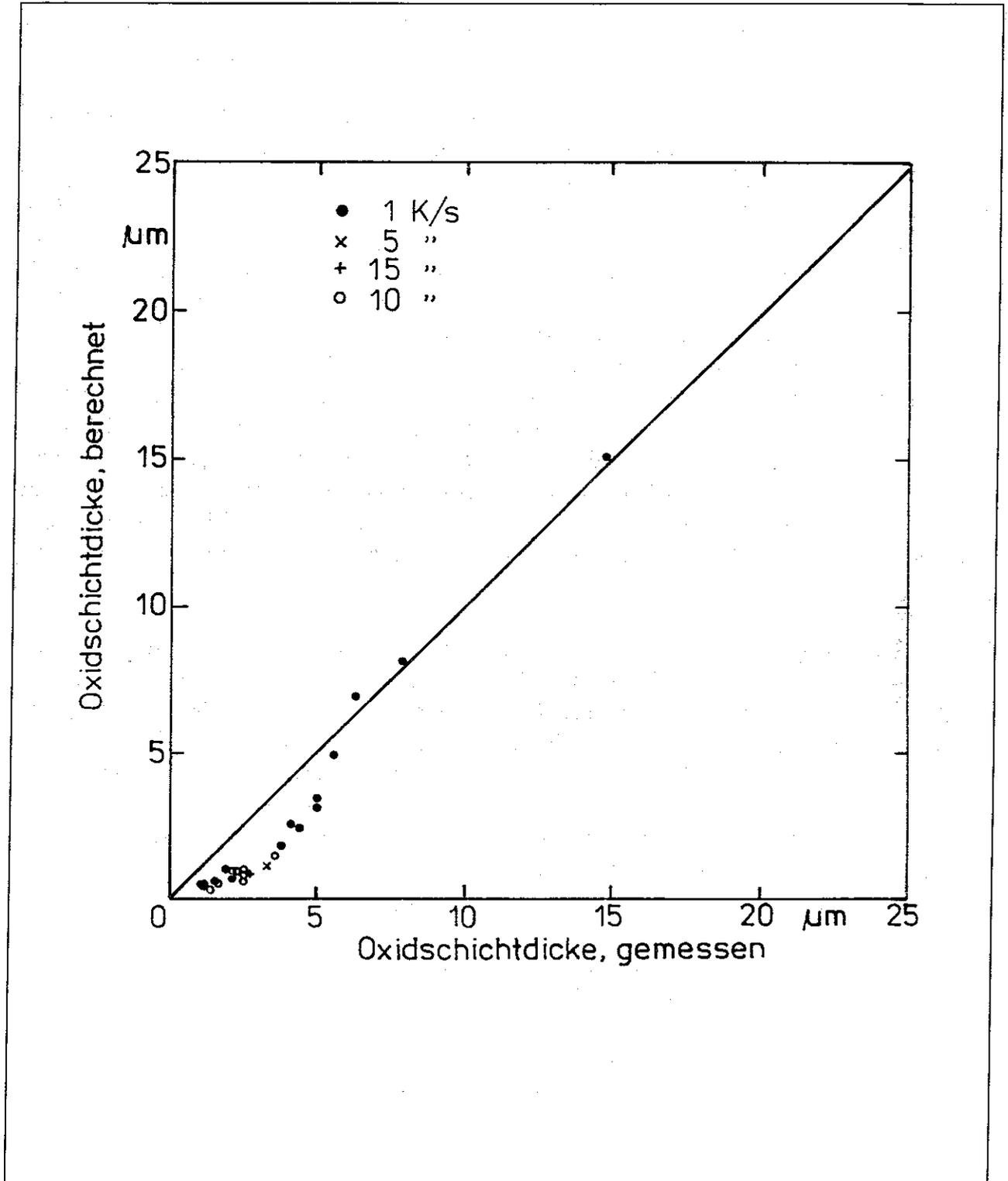


Abb. 28: REBEKA-Berstexperimente: Vergleich von gerechneter und gemessener Oxidschichtdicke von ZrNb1-Rohren.

Der ähnliche phänomenologische Befund kann auch an den Zircaloy-Proben nachgewiesen werden (Abb. 29). Allerdings sind die Einflüsse von Bersttemperatur und Aufheizrate, insbesondere auf den Verlauf der Oxid-Metall-Grenzfläche, noch stärker differenziert als bei ZrNb1.

Die Gefügeuntersuchungen ergeben im wesentlichen das aus isothermen Untersuchungen [1] bekannte Verhalten. Entscheidender Parameter ist die Bersttemperatur. Bis 729 °C wird reines α -Gefüge beobachtet. Im Einschnürungsbereich sind die Körner gestreckt. Ab 750°C sind geänderte Gefügestrukturen festzustellen, die auf beginnende α - β -Umwandlung hindeuten. Diese Umwandlung ist bis ca. 800 °C wenig betont und nur im Interferenzphasenkontrast erkennbar. Ein solch allmählicher, schwer nachweisbarer Beginn der α - β -Umwandlung scheint typisch für ZrNb1 zu sein und wird auch bei dilatometrischen Untersuchungen festgestellt. Eindeutiges Mischgefüge ist erst im Temperaturbereich von 800 - 860 °C zu konstatieren. In diesem Bereich verschwindet auch die Kornstreckung in der Einschnürzone. Bei 860 - 870 °C ist die Umwandlung beendet. Nach noch höheren Bersttemperaturen ist im Kern α -Umwandlungsgefüge zu erkennen. Die Körner des vormaligen β -Gefüges und die Platten des rücktransformierten α -Gefüges werden mit der Temperatur gröber. Unter der Oxidschicht tritt eine gleichmäßige, offensichtlich sauerstoffstabilisierte α -Schicht auf. Die Abb. 30 und 31 zeigen Gefügaufnahmen in Abhängigkeit von der Bersttemperatur bei Betrachtung im polarisierten Licht und im Interferenzphasenkontrast. Abb. 32 gibt die Änderung des α -Umwandlungsgefüges nach beendeter α - β -Umwandlung wieder.

Ein Zusammenhang zwischen Dehnung und dem Gefügezustand ist, soweit er nicht unmittelbar in der α - β -Umwandlung begründet ist, nicht nachzuweisen. Ebenfalls nicht nachzuweisen sind ein Einfluß der Aufheizrate oder azimutale Unterschiede. Lediglich bei den Proben, mit großer azimutaler Temperaturdifferenz, sind in 4 Fällen (Versuch 63, 74, 75 und 76) deutliche azimutale Gefügeunterschiede festzustellen. Abb. 33 zeigt den gravierendsten Fall: während an der Berststelle noch Mischgefüge auftritt, besitzt der gegenüberliegende Bereich schon relativ grobnadliges α -Gefüge. Im Temperaturbereich von 800 bis 900 °C sind verschiedentlich grobe, unregelmäßig orientierte Hydridausscheidungen zu beobachten (Abb. 34). Eine Auswirkung auf das Berstverhalten ist nicht anzunehmen.

Bei Zircaloy sind, bei grundsätzlich ähnlichem Verhalten, die Temperaturen der α - β -Umwandlung zu höheren Temperaturen verschoben. Bis 820 °C wird reines α -Gefüge beobachtet. Im Unterschied zum ZrNb1 sind dabei aber die Körner im Einschnürbereich trotz hoher Dehnung nicht gestreckt. Die Korngröße ist deutlich größer als bei ZrNb1. Nach Bersttemperaturen von 893 und 900 °C sind Mischgefüge geringerer Korngröße festzustellen. Die Proben mit Bersttemperaturen von 950 und 955 °C weisen fast vollständig umgewandeltes α -Gefüge mit einer blockigen α -Randschicht, deren Breite von der Aufheizrate abhängig ist, auf. Nach Bersttemperaturen von 1019 bis 1129 °C ist mit zunehmender Temperatur gröber werdendes α -Gefüge vorhanden; bei der höchsten Temperatur sind im α -Gefüge α -Einlagerungen vorhanden.

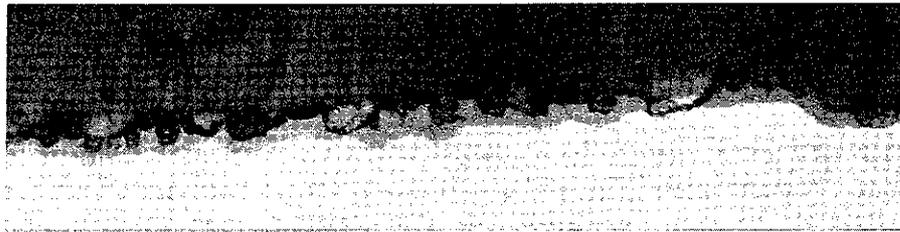
Auch die Breite der α -Randschicht nimmt erwartungsgemäß mit der Temperatur zu. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Gefügestruktur und Berstdehnung ist vordergründig nicht nachzuweisen. Die Abb. 35 und 36 demonstrieren das an zwei Gefügevergleichen. Abb. 35 zeigt sehr unterschiedliche Gefügeformen, die nach Bersttemperaturen von 900 °C bzw. 950 °C beobachtet wurden, die aber zu ähnlichen Berstdehnungen von ca. 39 % führen. In Abb. 36 sind zwei unterschiedliche Gefüge im α -Bereich wiedergegeben. Beide Versuche sind mit unter-

schiedlicher Aufheizrate bis zur gleichen Bersttemperatur (820 °C) belastet worden und zeigen fast gleiche Berstdehnungen (92 %). Trotzdem sind deutliche Unterschiede in der α -Korngröße festzustellen.

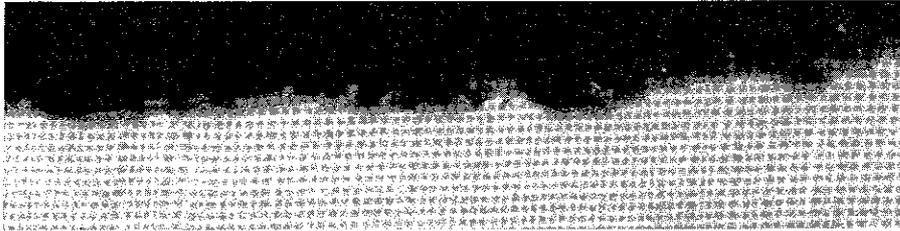
Typische radiale Mikrohärteverläufe sind in Abb. 37 dargestellt. Die Mikrohärte steigt mit der Bersttemperatur. Außerdem tritt zunehmend ein starker radialer Härtegradient auf. Nach hohen Bersttemperaturen sind starke Streuungen der Mikrohärte Hinweis auf starke Gefügeinhomogenitäten. Der Steilabfall der Mikrohärte in der Randzone oberhalb von Bersttemperaturen von 850 °C korreliert mit der α -Randschicht und sollte, ebenso wie der Anstieg im Kern, auf zunehmende Sauerstofflösung zurückzuführen sein. Ein azimuthaler Gradient der Mikrohärte wird nur bei zwei der untersuchten Proben festgestellt.

Abb. 38 zeigt die Abhängigkeit der Härte in der Kernzone von der Bersttemperatur. Auch dieser Kurvenverlauf korreliert mit dem α - β -Umwandlungsverhalten, nicht aber mit dem Dehnungsverlauf. Der steile Härteanstieg oberhalb der vollständigen α - β -Umwandlung ist weniger auf Gefügeverfestigung als auf sauerstoffbedingte Mischkristallhärtung zurückzuführen. Die höhere Diffusionsgeschwindigkeit im β -Gitter bewirkt dabei die rasche Härtezunahme.

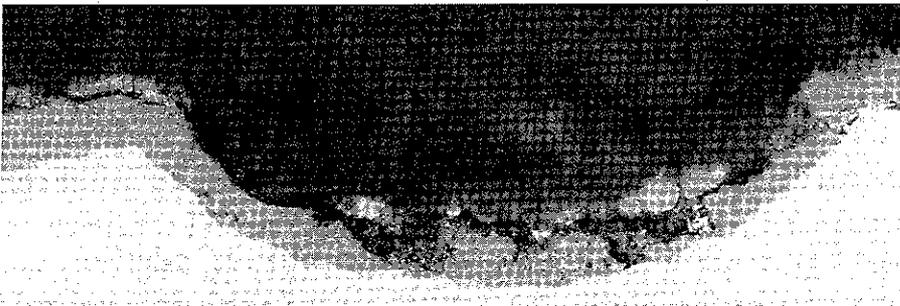
Auch die frakturischen Beobachtungen am Rasterelektronenmikroskop lassen keine Zuordnung zur Bruchdehnung, sondern lediglich zur Bersttemperatur erkennen (Abb. 39). Im Temperaturbereich bis 800 °C sind stark gescherte Wabenbruchformen charakteristisch. Bei Temperaturen um 750 bis 800 °C treten doppelwandige Bruchwaben auf. Oberhalb 800 °C sind flächige, mit Deckschichten belegte Bruchformen charakteristisch, die keine Details der Bruchbildung mehr erkennen lassen.



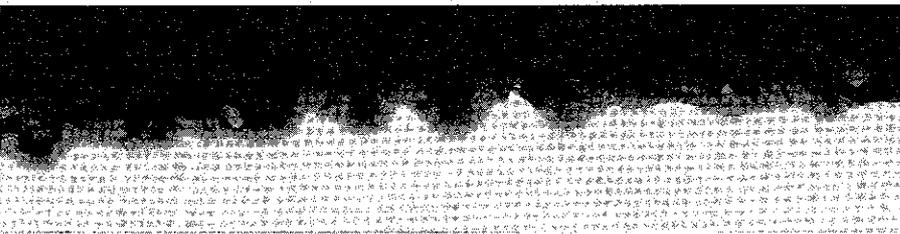
9.74 MPa
820 °C
10.4 K/s
Probe 103



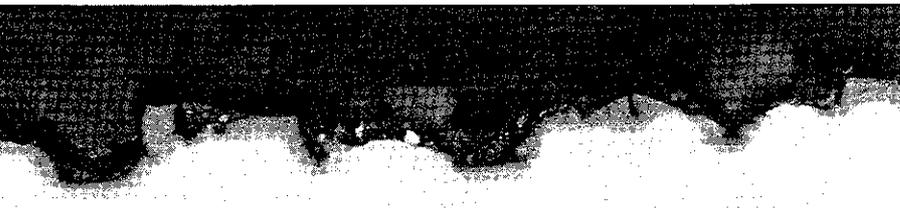
4.05 MPa
950 °C
9.9 K/s
Probe 173



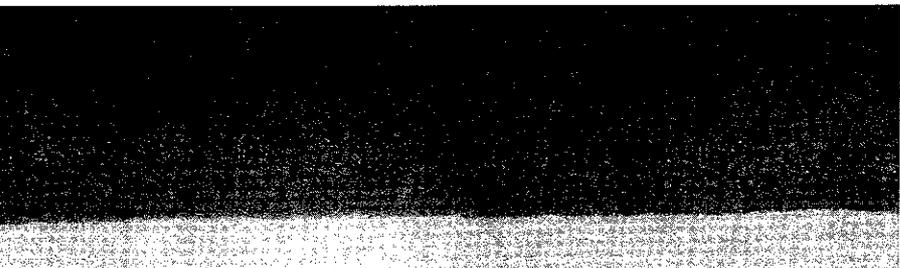
10.01 MPa
754 °C
1.06 K/s
Probe 703
9.74 MPa



1.98 MPa
955 °C
1.02 K/s
Probe 677



6.03 MPa
821 °C
0.97 K/s
Probe 717



0.9 MPa
1091 °C
0.96 K/s
Probe 696

Abb. 29: REBEKA-Berstexperimente an Zircaloy-4-Rohr. Einfluß von Bersttemperatur und Aufheizgeschwindigkeit auf die Oxidschichtdicke (poliert, Hellfeld).

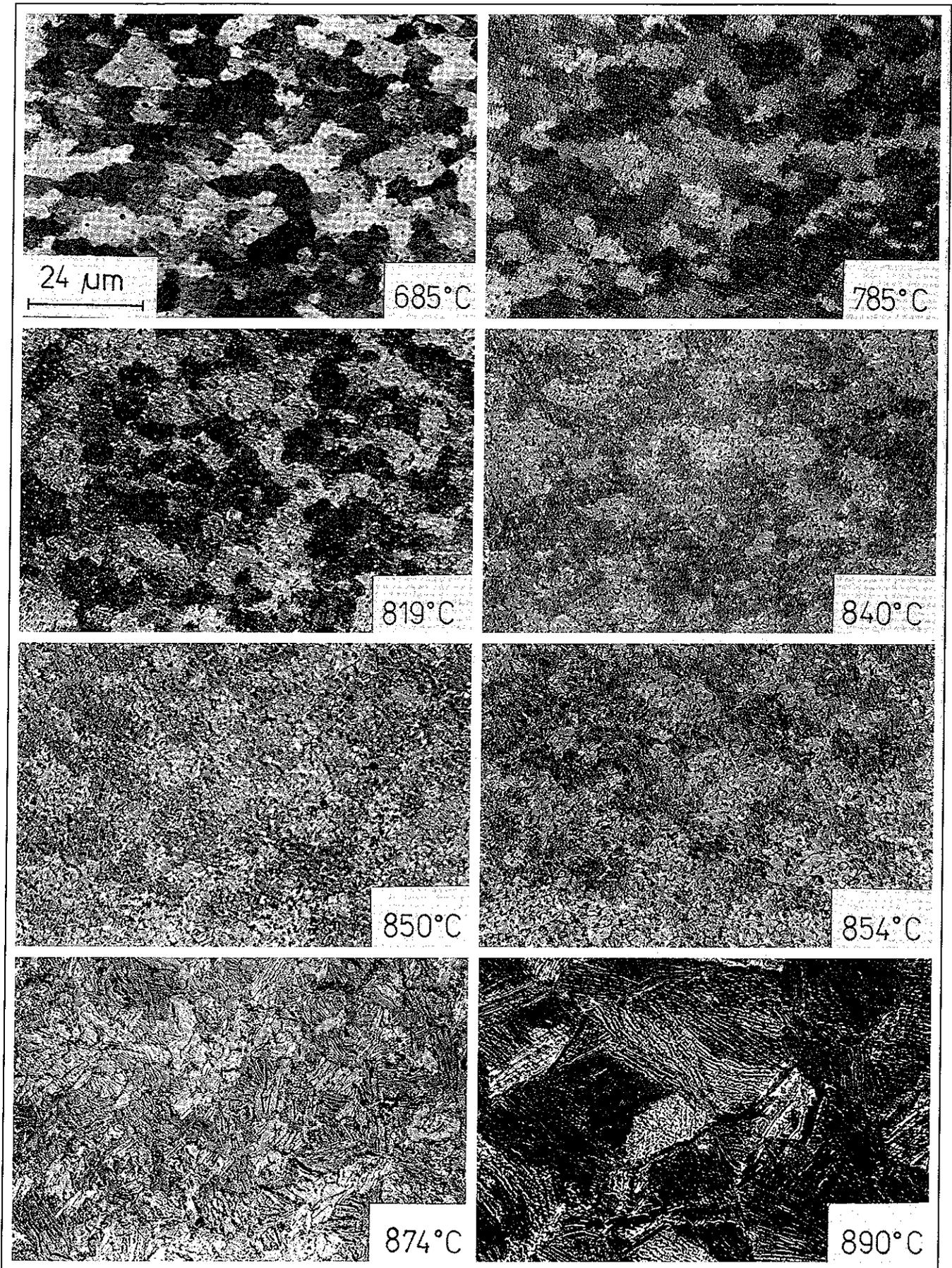


Abb. 30: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur. Die Bilder zeigen die Umwandlungen von α über $\alpha + \beta$ bis zur β -Phase (ZrNb1, Aufheizrate 1 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht)

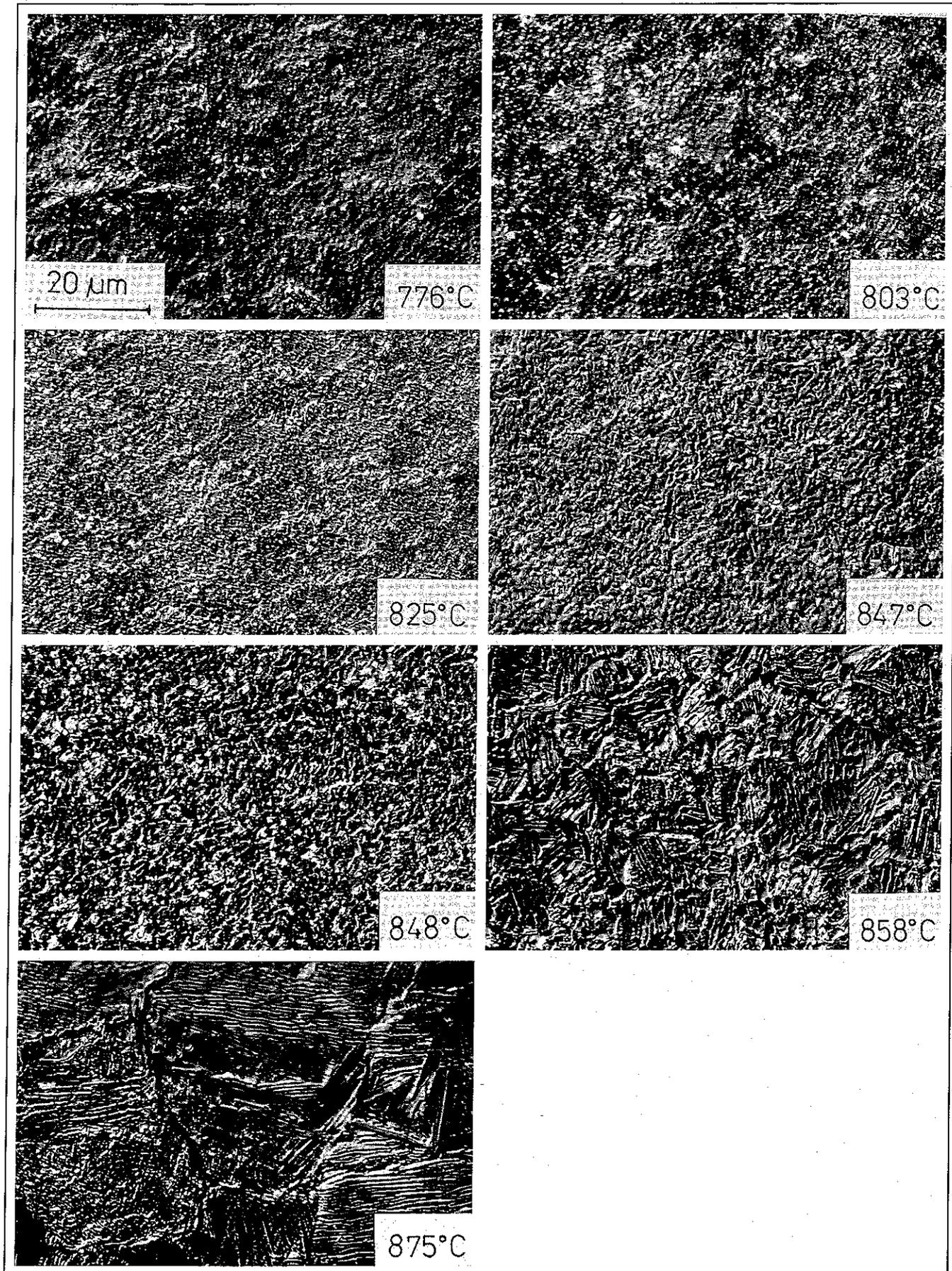


Abb. 31: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur. Die Bilder zeigen die Umwandlungen von α über $\alpha + \beta$ bis zur β -Phase (ZrNb1, Aufheizrate 10 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht)



Abb. 32: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur nach vollständiger α - β -Umwandlung (ZrNb1, Aufheizrate 1 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht).

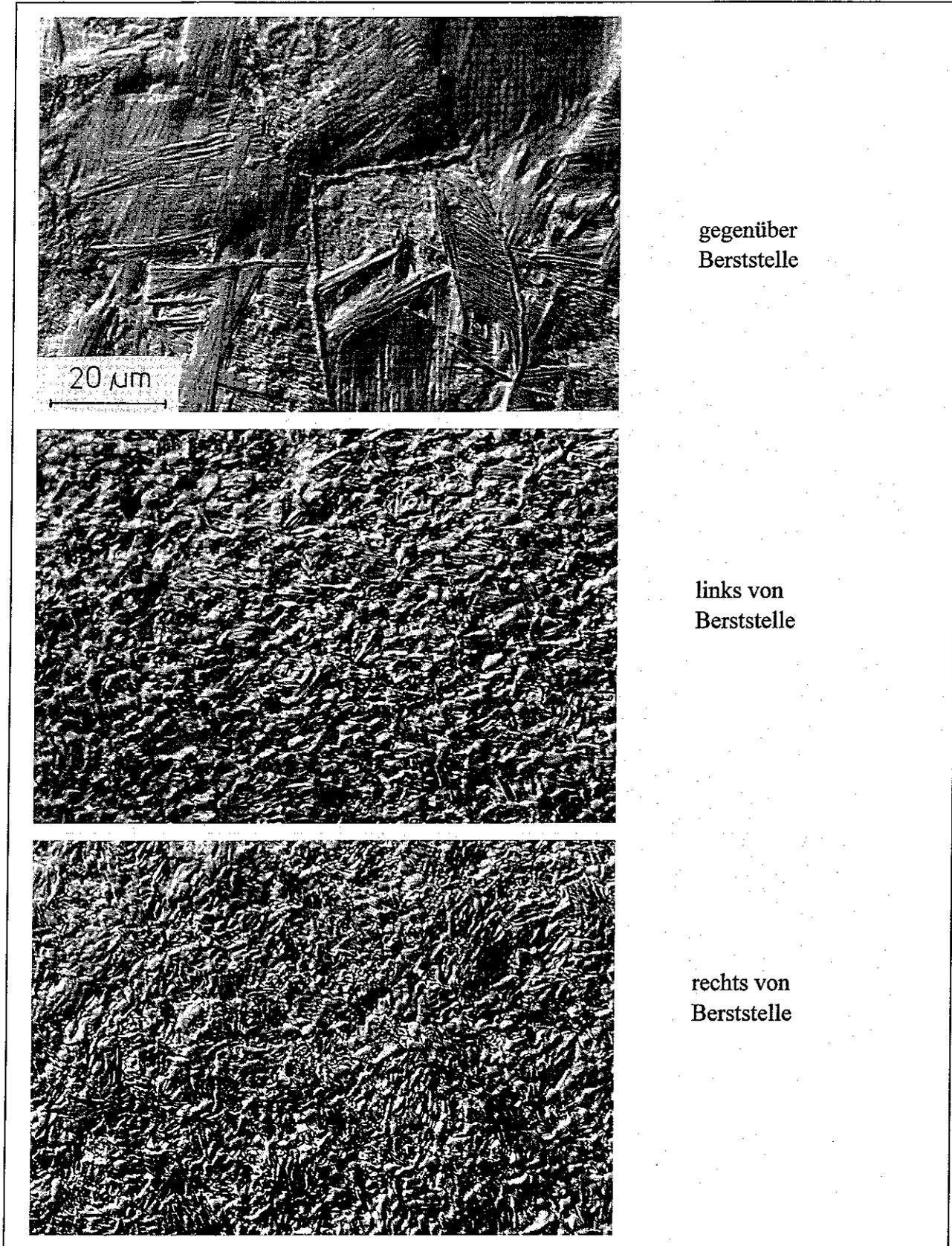


Abb. 33: Azimutale Unterschiede in der Gefügeausbildung von ZrNb1. Versuch 74, $p = 4.0 \text{ MPa}$, $t_{\beta} = 861 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{az} = 47 \text{ K}$, Aufheizrate = 9.5 K/s (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast).

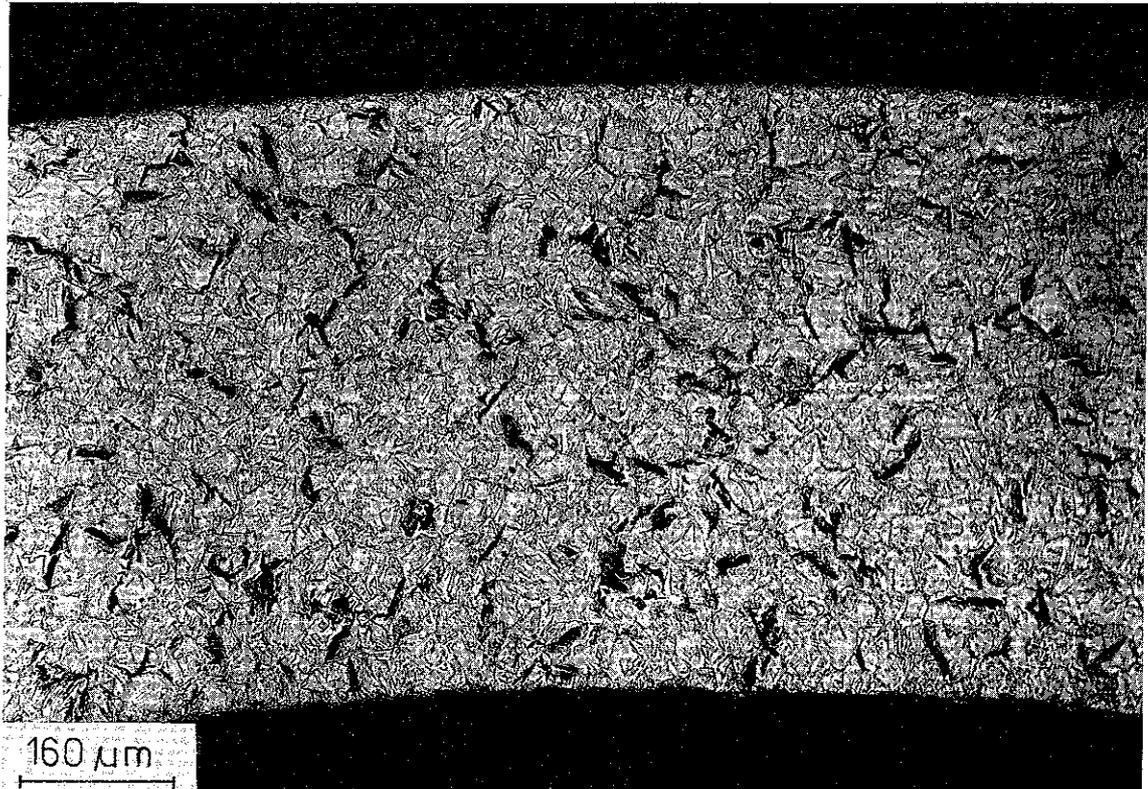
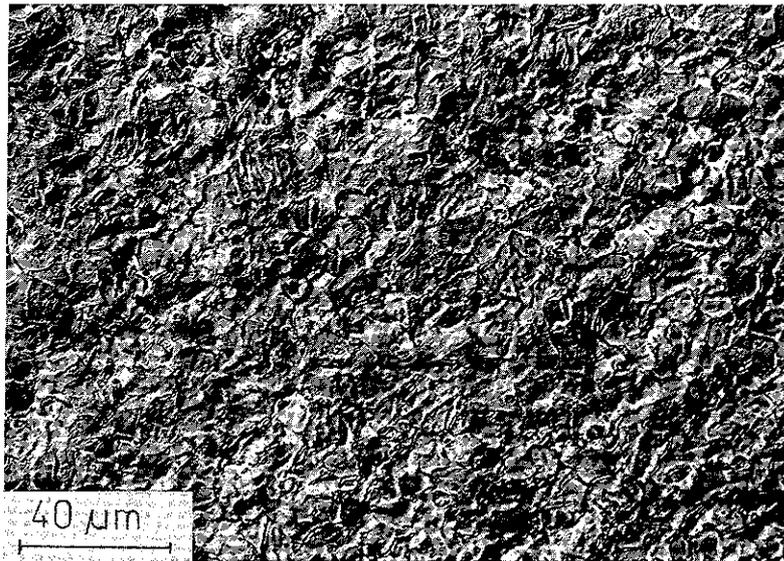


Abb. 34: Hydridausscheidung bei ZrNb1 (wischpoliert)

Versuch 74, $p = 4.0 \text{ MPa}$, $t_{\beta} = 861 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{az} = 47 \text{ K}$, Aufheizrate = 9.5 K/s

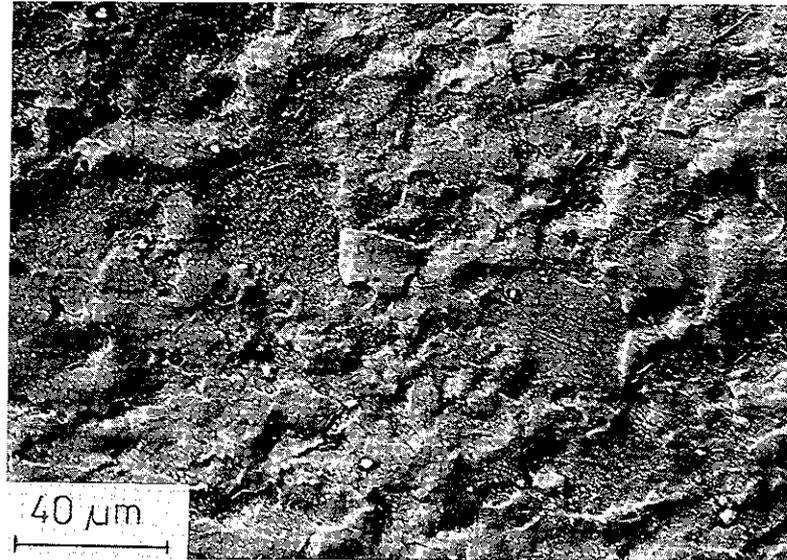


Versuch 166, $p = 6.0 \text{ MPa}$ 900 °C , $\varepsilon = 38.3 \%$

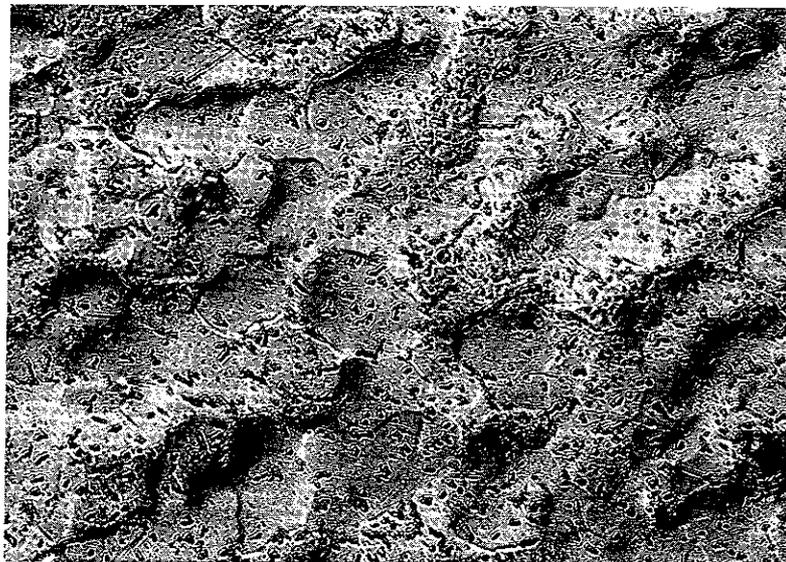


Versuch 173, $p = 4.0 \text{ MPa}$, $t_{\beta} = 950 \text{ °C}$, $\varepsilon = 39.5 \%$

Abb. 35: Gefüge im Berstquerschnitt von Zircaloy-4, Aufheizrate 10 K/s (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast)



Versuch 717, $p = 6.0 \text{ MPa}$, $t_{\beta} = 821 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 91.6 \%$, Aufheizrate = 1 K/s



Versuch 103, $p = 9.7 \text{ MPa}$, $t_{\beta} = 820 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 92.5 \%$, Aufheizrate = 10 K/s

Abb. 36: Gefüge im Berstquerschnitt von Zircaloy-4 (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast)

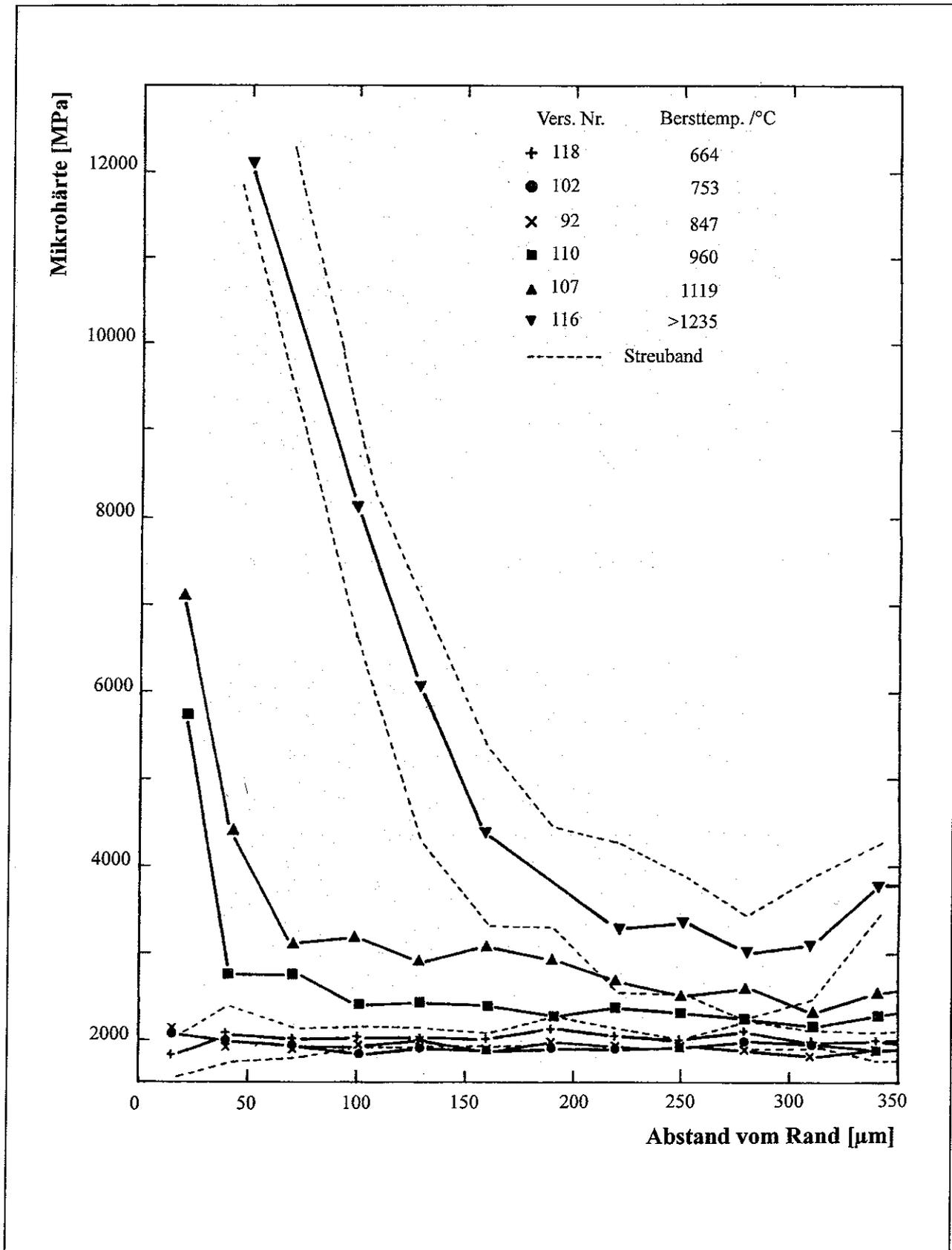


Abb. 37: REBEKA-Einzelstabberstversuche an ZrNb1-Rohren (Mikrohärte nach Rampe)

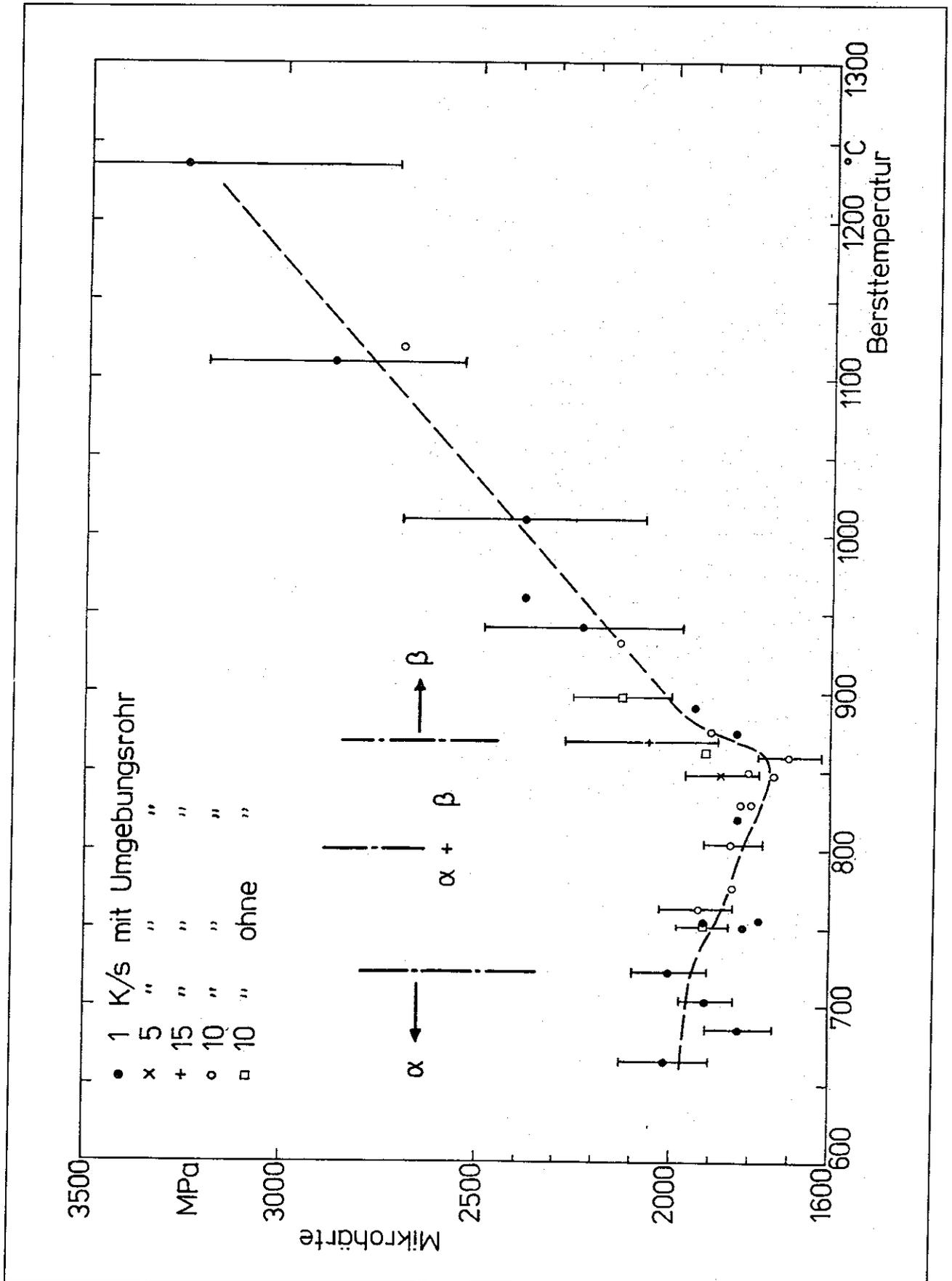
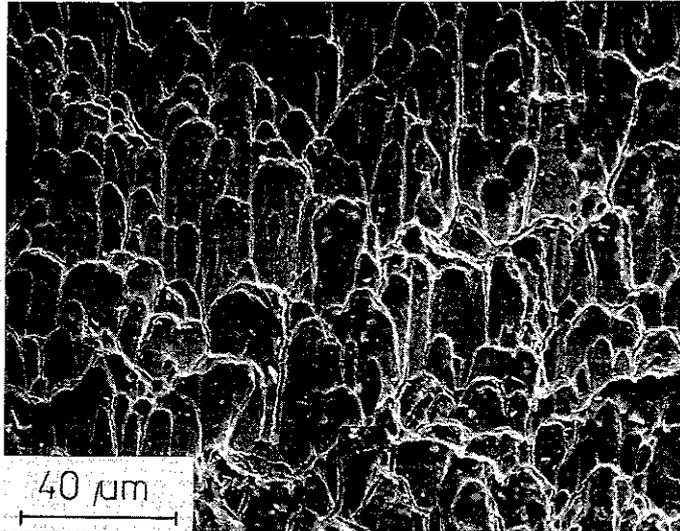
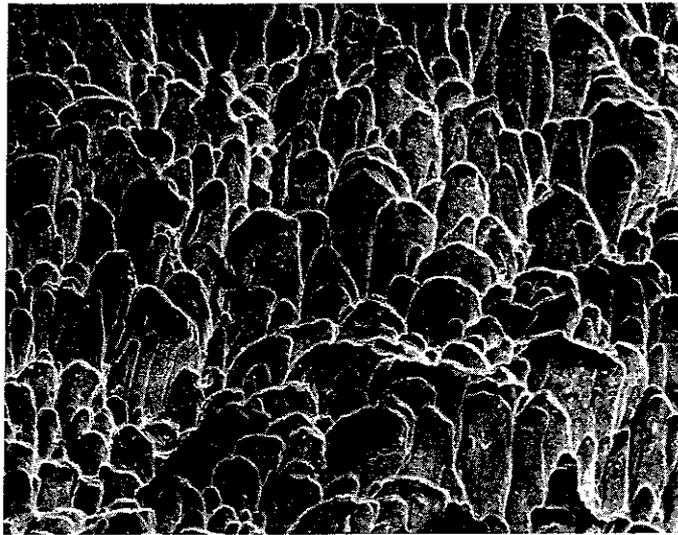


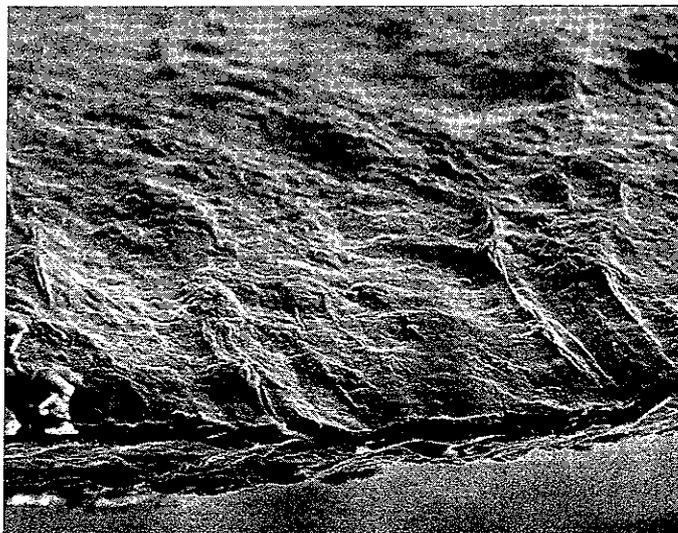
Abb. 38: REBEKA-Einzelstabberstversuche an ZrNb1-Rohren
(Mikrohärte im Kern, Abhängigkeit von der Bersttemperatur)



$t_{\beta} = 721 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $p = 13.09 \text{ MPa}$
1 K/s
Versuch 119



$t_{\beta} = 776 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $p = 13.91 \text{ MPa}$
10 K/s
Versuch 60



$t_{\beta} = 869 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $p = 2.67 \text{ MPa}$
15 K/s
Versuch 95

Abb. 39: Bruchfläche von ZrNb1 (Berstproben, REM-Aufnahmen)

6 Zusammenfassung

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Einzelstabversuche zum temperaturtransienten Kriechberstverhalten von ZrNb1-Hüllrohren durchgeführt und ausgewertet. Die Versuche wurden an der Versuchsanlage REBEKA des FZK durchgeführt. Die Durchführung der Experimente unter gleichen Versuchsbedingungen wie die der Zry4-Experimente erlaubte einen fundierten Vergleich zwischen dem Berstverhalten von ZrNb1- und Zry4-Hüllrohren.

Die wesentliche Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Toleranzen:

Bei den Versuchen mit Zry4-Hüllrohren wurden nur solche Hüllrohre verwendet, deren Wandstärkeschwankungen kleiner als 30 μm waren. Dies war bei den Versuchen mit ZrNb1-Hüllrohren in Folge der zu geringen Anzahl der zur Verfügung stehenden Hüllrohre nicht möglich.

2. Bersttemperaturen:

Aufheizrate 1 K/s: Bei Berstdrücken von ca. 2 MPa bis ca. 10 MPa sind Bersttemperaturen der ZrNb1-Hüllrohre geringer als die der Zry4-Hüllrohre, während das Verhalten oberhalb von 10 MPa annähernd identisch ist.

Aufheizrate 10 K/s: Bei Berstdrücken von ca. 2 MPa bis ca. 7 MPa sind die Bersttemperaturen der ZrNb1-Hüllrohre geringer als die der Zry4-Hüllrohre, während das Verhalten oberhalb von 7 MPa auch annähernd identisch ist.

3. Aufheizrate:

Der Einfluß der Aufheizrate auf die Bersttemperatur ist bei ZrNb1-Hüllrohren nicht so ausgeprägt. Die höhere Aufheizrate führt auch zur höheren Bersttemperatur.

4. Berstdehnung:

Die Berstumfangsdehnungen der ZrNb1-Hüllrohre sind im niedrigen Temperaturbereich kleiner als die der Zry4-Hüllrohre. Der Einfluß der Aufheizrate auf die Berstdehnung ist ähnlich der bei Zry4. Der tendenzielle Verlauf der Berstdehnung über der Bersttemperatur mit seinen Maxima und Minima ist beim ZrNb1 zu niedrigen Bersttemperaturen hin verschoben. Eine Abhängigkeit der Berstdehnung von der azimuthalen Temperaturdifferenz konnte im untersuchten Bersttemperaturbereich der ZrNb1-Hüllrohre nicht festgestellt werden.

5. Dehnungsgeschwindigkeit:

Die an nur wenigen ZrNb1-Versuchen ermittelten Dehnungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich von der Zry4-Versuchen. Bei den Zry4-Versuchen erfolgt die Dehnung später und damit steiler zur gleichen Berstdehnung wie bei ZrNb1-Versuchen.

6. Phasenumwandlung:

Die Phasenumwandlungstemperaturen liegen beim ZrNb1 bis zu 100K niedriger als beim Zircaloy-4. Bis ca. 730 °C liegt bei ZrNb1 α -Gefüge vor, danach erfolgt ein sehr allmählicher Übergang in die ($\alpha + \beta$)-Phase. Reines Mischgefüge liegt im Temperaturbereich von 800 bis 860 °C vor. Ab ca. 875 °C erfolgt der Übergang in die β -Phase.

7 Diskussion

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Ergebnisse gestatten eine Einschätzung des ZrNb1-Brennstabhüllrohrverhaltens und einen Vergleich zum Zry4-Verhalten.

Für eine umfassende Beschreibung des ZrNb1-Hüllrohrverhaltens und einen gesicherten Vergleich zum Zry4-Materialverhalten sind noch folgende weitere Untersuchungen erforderlich:

1. Weitere Versuche bei Bersttemperaturen um 700 °C und um 1000 °C.
2. Isotherme-isobare Kriechberstuntersuchungen zur exakten Bestimmung der Dehngeschwindigkeiten als Funktion der Temperatur. Solche Versuche sind auch für die Ermittlung des Anisotropieverhaltens (Bestimmung der Parameter der NORTON-Gleichung) des ZrNb1-Materials wichtig.
3. Versuche mit Kühlmittelverluststörfall-typischem Temperaturverlauf, d.h. Versuche mit vorangegangenen drucklosen Temperaturpeak.
4. Weiterentwicklung und Verifikation von Programmsystemen (z.B. SSYST, KESS u.a.) für ZrNb1-Brennstabhüllrohre anhand der vorliegenden Ergebnisse.

8 Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Dresden, dem Forschungszentrum Rossendorf und dem Forschungszentrum Karlsruhe.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Müller, Leiter des Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik, danken wir für die Möglichkeit zur Durchführung der Experimente mit der Versuchstechnik in seinem Institut.

Den Mitarbeitern Herrn Jacobi und Herrn Hill des Instituts für Materialforschung danken wir für die Unterstützung bei der Vermessung der Rohrgeometrie.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik, die durch ihre kollegiale Zusammenarbeit zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, gilt unser Dank. Stellvertretend für viele sollen hier Herr Arnold und Herr Vollmer (Wartung: Meß-, Steuer- und Regeltechnik), Herr Politzky (Computertechnik, Programmierung), Herr Arheidt (Standardsoftware) und Herr Just (Versuchstechnik) genannt sein.

Frau Adrian (FZR) danken wir für die Ausführung der metallografischen Arbeiten.

9 Literaturverzeichnis

- [1] J. Böhmert, J. Linek und M. Dietrich, *Phasenumwandlungstemperaturen bei ZrNb1*, ZfK-interner Forschungsbericht, Oktober 1990
- [2] F.J. Erbacher, *Experimentelle Untersuchungen zur Hüllrohrdeformation und Kernnotkühlung eines Druckwasserreaktors beim Kühlmittelverluststörfall*, KfK 3562, März 1990
- [3] R. Häusler, *Grundlagen zu temperaturtransienten Brennelementhüllrohr-Experimenten unter Auslegungsstörfallbedingungen*, TU Dresden, Diplomarbeit, 1990
- [4] KAB Radebeul, *Technisches Projekt „WWER-1000“*, VDS RA 3/159/78
- [5] KWU Siemens, *Spezifikationen zu Zircaloy-4 Hüllrohren*
- [6] M.E. Markiewicz und F.J. Erbacher, *Experiments on Balloning in Pressurised and transiently Heated Zircaloy-4 Tubes*, KfK 4343, Februar 1988
- [7] H. Steinkopf et al., *Brennelementsicherheit*, ZfK-interner Forschungsbericht, Dez. 1990
- [8] K. Wiehr und He. Schmidt, *Out-of-pile Versuche zum Aufblähvorgang von Zircaloy-Hüllen - Ergebnisse aus Vorversuchen mit verkürzten Brennstabsimulatoren*, KfK 2345, Oktober 1977
- [9] F.J. Erbacher, H.J. Neitzel, H. Rosinger, H. Schmidt, K. Wiehr, *ASTM Fifth International Conference on Zirconium in the Nuclear Industry*, August 4-7 1980, Boston, Massachusetts, USA, pp 271 - 283
- [10] H.J. Neitzel, H.E. Rosinger, *The Development of a Burst Criterion for Zircaloy Fuel Cladding under LOCA Conditions*, KfK 2893, AECL-6420, Oktober 1980
- [11] F.J. Erbacher, H.J. Neitzel, K. Wiehr, *Cladding Deformation and Emergency Core Cooling of a Pressurized Water Reaktor in a LOCA*, KfK 4781, August 1990

10 Anhang I: Tabellen

Tab. I: Meßergebnisse der Ausgangsrohre (2 m Länge)

Rohr Nr.	Außendurchmesser			Wandstärke		
	max. [mm]	min. [mm]	diff. [μm]	max. [mm]	min. [mm]	diff. [μm]
1	9.164	9.133	31.	0.706	0.679	27.
2	9.192	9.154	38.	0.718	0.679	39.
3	9.182	9.128	54.	0.718	0.670	48.
4	9.180	9.132	48.	0.724	0.672	52.
5	9.188	9.144	44.	0.715	0.675	40.
6	9.167	9.126	41.	0.711	0.679	32.
7	9.200	9.146	54.	0.726	0.679	47.
8	9.186	9.146	40.	0.718	0.686	32.
9	9.184	9.158	26.	0.726	0.684	42.
10	9.186	9.140	46.	0.729	0.670	59.
11	9.162	9.125	37.	0.718	0.666	52.
12	9.172	9.131	41.	0.720	0.679	41.
13	9.182	9.142	40.	0.718	0.686	32.
14	9.192	9.150	42.	0.733	0.668	65.
15	9.182	9.140	42.	0.720	0.672	48.
16	9.180	9.146	34.	0.713	0.684	29.
17	9.168	9.132	36.	0.711	0.666	45.
18	9.190	9.148	42.	0.713	0.686	27.
19	9.184	9.146	38.	0.718	0.684	34.
20	9.158	9.127	31.	0.704	0.682	22.
21	9.193	9.150	43.	0.722	0.684	38.
22	9.176	9.136	40.	0.731	0.668	63.
23	9.192	9.154	38.	0.726	0.684	42.
24	9.186	9.152	34.	0.724	0.672	52.
25	9.160	9.128	32.	0.713	0.666	47.
26	9.176	9.154	22.	0.720	0.679	41.
27	9.184	9.144	40.	0.718	0.686	32.
28	9.192	9.153	39.	0.733	0.668	65.
29	9.203	9.158	45.	0.722	0.682	40.
30	9.184	9.144	40.	0.729	0.677	52.
31	9.185	9.150	35.	0.718	0.679	39.
32	9.182	9.144	38.	0.713	0.679	34.

Tab. II: Abmessungen der Versuchsrohre

Rohr Nr.	gem. Außendurchmes. [mm]	gemittelte Wandstärke [mm]	Fehleranzahl		Rohr Nr.	gem. Außendurchmes. [mm]	gemittelte Wandstärke [mm]	Fehleranzahl	
			I	II				I	II
1.1.	9.147	0.690	2	1	11.1.	9.144	0.690	0	0
1.2.	9.148	0.690	1	0	11.2.	9.144	0.690	0	0
1.3.	9.149	0.690	-1	0	11.3.	9.141	0.690	0	0
1.4.	9.149	0.690	-1	0	11.4.	9.147	0.695	1	0
2.1.	9.168	0.700	0	0	12.1.	9.152	0.702	4	0
2.2.	9.170	0.700	0	0	12.2.	9.155	0.702	3	0
2.3.	9.172	0.702	2	0	12.3.	9.153	0.702	5	0
2.4.	9.166	0.700	1	0	12.4.	9.154	0.702	5	0
3.1.	--	--	--	--	13.1.	9.165	0.706	0	0
3.2.	--	--	--	--	13.2.	9.165	0.706	4	0
3.3.	9.162	0.697	2	2	13.3.	9.166	0.706	3	0
3.4.	9.166	0.700	0	0	13.4.	9.166	0.704	2	0
4.1.	9.153	0.702	11	0	14.1.	9.173	0.702	1	0
4.2.	9.154	0.702	5	1	14.2.	9.173	0.702	4	0
4.3.	9.154	0.702	9	1	14.3.	9.174	0.702	4	0
4.4.	9.152	0.706	9	2	14.4.	9.171	0.702	2	0
5.1.	9.164	0.706	6	4	15.1.	9.162	0.697	1	0
5.2.	9.168	0.706	4	12	15.2.	9.163	0.697	0	0
5.3.	9.168	0.706	5	11	15.3.	9.164	0.697	0	0
5.4.	9.166	0.706	7	7	15.4.	9.162	0.700	2	0
6.1.	9.150	0.693	1	0	16.1.	9.164	0.697	1	0
6.2.	9.154	0.695	1	0	16.2.	9.163	0.697	0	0
6.3.	9.144	0.693	-1	0	16.3.	9.161	0.697	0	0
6.4.	9.142	0.693	1	0	16.4.	9.160	0.697	1	0
7.1.	9.174	0.700	5	0	17.1.	9.150	0.690	1	0
7.2.	9.176	0.702	10	0	17.2.	9.152	0.690	0	0
7.3.	9.175	0.702	7	0	17.3.	9.152	0.690	0	0
7.4.	9.178	0.702	9	0	17.4.	9.152	0.690	1	0
8.1.	9.169	0.704	1	0	18.1.	9.169	0.700	1	0
8.2.	9.169	0.704	7	0	18.2.	9.171	0.700	1	0
8.3.	9.167	0.704	2	0	18.3.	9.171	0.697	3	0
8.4.	9.165	0.702	4	0	18.4.	9.169	0.697	3	0
9.1.	9.172	0.706	1	0	19.1.	9.164	0.704	0	0
9.2.	9.173	0.706	-1	0	19.2.	9.164	0.702	0	0
9.3.	9.172	0.706	-1	0	19.3.	9.165	0.704	0	0
9.4.	9.172	0.706	-1	0	19.4.	9.164	0.702	0	0
10.1.	9.161	0.704	1	0	20.1.	9.145	0.693	0	0
10.2.	9.162	0.704	8	0	20.2.	9.144	0.693	1	0
10.3.	9.168	0.702	9	2	20.3.	9.144	0.693	-1	0
10.4.	9.170	0.702	8	1	20.4.	9.144	0.693	0	0

Rohr Nr.	gem. Außen- durchmes. [mm]	gemittelte Wandstärke [mm]	Fehler- anzahl		Rohr Nr.	gem. Außen- durchmes. [mm]	gemittelte Wandstärke [mm]	Fehler- anzahl	
			I	II				I	II
21.1.	9.172	0.700	2	0	27.1.	9.166	0.704	2	0
21.2.	9.172	0.700	2	0	27.2.	9.168	0.704	5	0
21.3.	9.172	0.702	7	1	27.3.	9.168	0.704	5	1
21.4.	9.167	0.706	11	1	27.4.	9.166	0.704	7	0
22.1.	9.158	0.706	4	0	28.1.	9.171	0.706	1	0
22.2.	9.158	0.706	4	3	28.2.	9.172	0.706	2	0
22.3.	9.157	0.706	11	1	28.3.	9.173	0.706	3	0
22.4.	9.156	0.706	11	0	28.4.	9.172	0.704	2	0
23.1.	9.174	0.706	1	0	29.1.	9.174	0.704	0	0
23.2.	9.176	0.706	6	0	29.2.	9.174	0.704	0	0
23.3.	9.174	0.706	2	0	29.3.	9.172	0.704	-1	0
23.4.	9.171	0.706	3	0	29.4.	9.169	0.704	-1	0
24.1.	9.170	0.702	6	0	30.1.	9.163	0.702	0	0
24.2.	9.172	0.702	8	0	30.2.	9.167	0.702	0	0
24.3.	9.171	0.702	2	0	30.3.	9.166	0.702	0	0
24.4.	9.169	0.700	10	0	30.4.	9.163	0.702	0	0
25.1.	9.147	0.693	3	0	31.1.	9.169	0.704	1	1
25.2.	9.147	0.693	0	0	31.2.	9.169	0.704	2	0
25.3.	9.147	0.693	1	0	31.3.	9.168	0.702	1	1
25.4.	9.147	0.693	2	0	31.4.	9.166	0.702	6	0
26.1.	9.158	0.700	4	0	32.1.	9.164	0.697	2	0
26.2.	9.158	0.700	6	0	32.2.	9.163	0.697	0	0
26.3.	9.157	0.702	2	1	32.3.	9.160	0.697	0	0
26.4.	9.154	0.702	4	2	32.4.	9.160	0.697	0	0

-1 : Rohre mit einem Fehler kleiner als 40 μm

Tab. III: Versuchsmatrix

Aufheiz- rate [K/s]	Brennstabhüllrohr-Innendruck [MPa]																						
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,7	4,2	5,6	6,6	7,5	8,8	10,1	12,1	13,1	14,1	15,6	17,1			
1	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
5												+	+	+									
10										+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

+ Versuche mit beheiztem Umgebungsrohr
 o Versuche mit unbeheiztem Umgebungsrohr

Tabelle IV: Versuchsergebnisse

Vers. Nr.	Aufheiz- rate	Berst- druck	Deh- nung	Berst- temp.	TE Nr.	Temperaturen						Rohr Nr.	ΔT_{azi} °C
						TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6		
	K/s	MPa	%	°C		°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C
1	0,96	16	85	703	5	688	694	696	688	703	678	1.1.	8
2	1,02	16	59	685	3	#	681	685	675	680	665	1.2.	4
3	0,97	16	86	685	3	#	683	685	672	680	679	2.1.	2
4	1,01	16	94	694	1	694	691	685	690	685	679	2.2.	9
5	0,96	10,1	25	785	3	780	775	785	781	770	772	2.3.	10
6	1,00	10,1	1	790	4	784	788	788	790	784	778	2.4.	4
8	0,92	7,5	42	777	3	772	775	777	763	-	756	4,2	5
7	0,96	10,1	2	783	4	776	779	781	783	774	776	4.1.	5
9	0,93	7,51	46	819	4	818	819	817	819	807	811	4.3.	2
10	0,93	8	48	818	2	814	818	817	812	815	809	4.4.	4
11	0,91	8	49	830	4	825	817	827	830	819	822	5.1.	10
12	0,95	7	48	840	3	#	836	840	838	832	831	5.2.	4
13	0,94	6,6	1	841	4	837	840	839	841	833	835	5.3.	3
14	0,96	6	49	833	5	#	825	826	816	833	797	5.4.	1
15	0,70	6,6	3	829	2	819	829	825	824	833	#	6.1.	10
16	0,95	6,6	0	849	4	841	843	842	849	837	847	6.2.	2
17	0,93	6	47	850	4	837	843	841	850	837	843	6.3.	6
18	0,95	5,6	3	841	2	834	841	840	840	839	839	7.1.	7
19	0,93	4	15	856	2	843	856	849	850	854	846	6.4.	13
20	0,92	4	27	853	2	850	853	853	851	849	846	7.2.	3
21	0,95	4	17	854	3	850	852	854	851	848	845	7.3.	4
22	0,95	2,6	4	874	3	870	870	874	867	867	857	8.1.	4
23	0,96	2,6	1	871	3	869	869	871	869	862	865	7.4.	2
24	0,96	2,7	2	870	5	866	866	869	862	870	851	8.2.	3
25	0,96	1,7	1	890	3	887	888	890	886	880	873	8.3.	3
26	0,99	1,7	2	890	1	890	885	889	886	880	874	8.4.	5
27	0,97	1,7	68	890	3	886	887	890	890	883	872	9.1.	4
28	0,98	1,2	1	941	5	931	940	932	938	941	928	9.2.	9
29	0,97	1,2	0	946	4	#	943	945	946	937	#	9.3.	2
30	0,99	1,2	0	940	3	938	936	940	934	935	925	9.4.	4
31	0,99	0,7	35	1184	-	1170	1182	1181	1184	1181	1171	10.1	12
34	10,50	1,7	1	932	6	904	898	910	927	899	932	10.2.	12
35	10,70	1,7	0	931	3	921	922	931	927	922	892	10.3.	10
36	10,70	1,8	3	925	1	925	924	919	919	923	889	11.1.	6
37	9,30	2,6	58	884	2	883	884	878	871	881	833	10.4.	6
38	9,60	2,7	59	875	1	875	872	871	870	856	834	11.2.	4
39	9,5	2,7	3	869	2	#	869	865	861	871	821	11.3.	4
40	9,50	4	18	858	2	856	858	847	849	857	803	11.4.	11
41	9,40	4	18	861	3	861	860	861	865	845	828	12.1.	1
42	9,50	4,2	0	867	2	865	867	844	#	855	806	12.2.	23

Vers. Nr.	Aufheiz- rate K/s	Berst- druck MPa	Deh- nung %	Berst- temp. °C	TE Nr.	Temperaturen						Rohr Nr.	ΔT_{azi} °C
						TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6		
						°C	°C	°C	°C	°C	°C		
43	9,00	6,5	0	845	2	839	845	844	827	847	799	12.3.	6
44	9,60	6,6	5	848	1	848	847	844	#	839	805	12.4.	4
45	9,50	6,5	0	846	4	844	836	839	846	833	813	13.1.	8
46	9,40	7,5	0	845	1	845	841	837	840	834	807	13.2.	8
47	9,20	7,6	1	844	1	844	834	830	838	825	791	13.3.	14
48	9,30	7,6	2	847	2	841	847	832	842	838	812	14.1.	15
49	9,70	8,8	1	838	1	838	833	832	823	829	817	13.4.	6
50	9,60	8	69	837	1	837	831	830	827	828	772	14.2.	7
51	9,90	8,7	1	828	1	828	824	827	824	830	789	14.3.	4
52	10,10	10,0	1	818	1	818	816	816	813	813	779	14.4.	2
53	10,10	10,8	4	819	2	816	819	803	816	814	789	15.1.	16
54	9,90	9,0	96	828	2	820	828	#	#	831	770	15.2.	8
55	10,10	10,0	1	829	1	829	825	808	820	826	783	15.3.	21
56	9,90	11,0	99	790	2	#	790	#	793	783	751	15.4.	-
57	10,10	12,0	2	801	2	781	801	800	798	804	756	16.1.	20
58	9,80	12,0	3	803	1	803	795	791	782	800	747	16.2.	12
59	9,70	14,0	0	773	3	754	743	773	758	758	728	16.3.	28
60	10,10	14,0	86	776	2	#	776	767	764	765	751	16.4.	9
61	9,10	12,0	0	758	3	757	746	758	734	765	772	17.1.	12
62	9,40	11,0	99	749	3	#	725	749	750	751	729	17.2.	24
63	9,30	10,0	2	788	3	785	768	788	784	783	774	17.3.	20
64	9,50	10,0	2	804	2	765	804	774	785	798	799	18.1.	39
65	9,50	8,7	67	807	3	777	813	807	781	807	790	18.2.	36
66	9,50	8,7	2	798	2	778	798	807	761	829	806	18.3.	29
69	9,59	7,5	35	802	3	791	773	802	794	793	798	19,1	29
67	9,70	7,5	4	815	4	815	803	813	815	824	810	18.4.	12
70	9,80	7,6	2	811	3	793	816	811	788	794	788	19.2.	23
71	7,83	6,4	34	804	2	798	804	766	764	785	808	19,4	38
72	9,60	6,6	1	819	2	805	819	810	805	808	806	19.3.	14
73	9,40	4,0	15	851	3	848	848	851	841	851	833	20.1.	3
74	9,50	3,5	33	861	3	853	815	861	822	848	815	20.2.	47
75	10,20	2,5	2	850	3	873	850	850	837	880	838	20.3.	23
76	10,00	2,0	59	879	4	875	875	749	879	871	840	21.1.	26
77	10,10	1,7	1	880	4	884	843	860	880	905	862	21.2.	41
78	9,70	1,7	1	906	1	906	834	874	#	900	864	21.3.	72
79	9,90	2,0	9	896	1	896	877	888	887	874	843	22.1.	19
80	10,10	2,0	5	881	2	891	881	890	873	#	#	22.2.	10
81	10,60	2,2	1	904	3	#	#	904	893	906	836	21.4.	-
82	0,97	1,4	36	943	4	#	936	929	943	922	940	22.3.	7
83	0,96	1,4	1	903	1	903	899	895	894	897	880	22.4.	8
84	0,96	1,5	2	889	2	887	889	891	886	893	865	23.1.	4
85	1,01	1,5	1	865	3	851	858	864	#	871	861	23.2.	14

Vers. Nr.	Aufheiz- rate	Berst- druck	Deh- nung	Berst- temp.	TE Nr.	Temperaturen						Rohr Nr.	ΔT_{azi} °C
						TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6		
						°C	°C	°C	°C	°C	°C		
86	1,00	1,4	39	846	2	859	846	844	865	874	868	23.3.	15
87	0,89	2,5	37	841	3	850	862	841	805	845	859	24.1.	21
88	0,97	2,6	59	838	2	#	838	838	848	858	825	24.2.	0
89	0,97	1,0	97	962	2	961	962	963	959	#	948	24.3.	2
90	4,78	6,5	0	843	2	840	843	840	845	841	833	25.1.	3
91	4,85	6,6	4	847	4	842	844	838	847	840	830	25.2.	6
92	4,87	6,6	2	847	2	843	847	842	842	844	832	26.1.	5
93	16,09	2,0	66	857	3	841	961	857	854	862	777	25.3.	20
94	15,46	2,0	69	866	4	847	869	874	866	855	810	25.4.	27
95	15,14	2,6	2	869	1	869	877	879	874	871	833	26.2.	10
96	8,78	15,7	3	745	3	702	717	745	709	696	654	26.3.	43
97	8,71	15,6	0	741	3	736	734	741	737	737	714	26.4.	7
98	9,72	14,0	3	780	4	759	768	766	780	761	747	27.2.	9
99	0,95	14,0	3	711	2	710	711	709	699	706	694	27.3.	2
100	0,96	14,0	5	705	2	706	705	705	705	699	700	27.4.	1
101	0,95	12,0	0	741	5	742	741	737	733	741	719	28.2.	5
102	0,97	12,0	1	753	1	753	741	742	740	739	731	28.3.	11
103	0,95	11,0	97	750	1	750	747	744	740	736	737	29.2.	6
104	0,96	14,0	5	703	4	703	705	701	703	694	694	28.4.	4
105	9,19	15,0	1	758	1	758	739	736	706	729	722	29.3.	22
106	9,86	15,0	68	762	1	762	721	754	740	744	708	29.4.	41
107	10,17	1,2	4	1119	1	1119	1112	1087	#	1106	#	27.1.	32
108	9,96	1,1	1	1087	1	1087	1088	1083	1065	1086	1066	30.1.	5
109	10,37	1,1	0	1117	1	1117	1111	1110	1105	1117	1072	30.2.	7
110	0,96	1,0	1	960	1	960	959	960	957	953	942	28.1.	1
111	0,97	0,9	4	1110	2	1106	1110	1108	1106	1102	1091	29.1.	4
112	0,97	0,8	78	1103	2	1102	1103	1087	1100	1107	1089	30.3.	16
113	0,95	0,8	0	1097	1	1097	1081	1078	1094	1090	1087	30.4.	19
114	0,93	0,9	0	1010	3	994	1012	1010	1009	1006	998	31.1.	18
115	0,93	1,0	3	959	1	959	960	960	956	950	946	31.2.	1
116	0,96	0,8	33	>1235	-	1233	1235	1230	1233	1226	1223	31,3	5
117	0,94	17,0	2	665	3	671	665	665	662	658	651	31.4.	6
118	0,97	17,0	6	664	1	664	664	662	662	659	654	32.2.	2
119	0,92	13,0	5	721	1	721	719	720	716	712	708	32.3.	2
120	0,92	12,0	96	722	3	723	720	722	#	716	708	32.4.	3
121	0,96	13,0	1	726	1	726	719	690	718	714	707	32.1.	36

11 Anhang II: Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Meßschieb zur Bestimmung der Wandstärke und des Außendurchmessers (siehe Anhang Tabelle I, II und IV).....	3
Abb. 2: Meßschieb der Wirbelstrommessungen.....	5
Abb. 3: Radialer Aufbau des Brennstabsimulators.....	7
Abb. 4: Eingebauter Brennstabsimulator.....	8
Abb. 5: Position der Thermoelemente.....	9
Abb. 6: Versuchsstand für Einzelstabversuche (schematisch).....	10
Abb. 7: Druck- und Temperaturverlauf eines Versuches mit einer Druckbelastung von 15.6 MPa und einer Temperaturtransiente von 1 K/s (Monitorbild, 100 % = 1000 °C).....	11
Abb. 8: Bersttemperatur über Berstdruck (Aufheizrate: 1, 5, 10 und 15 K/s).....	14
Abb. 9 a und b: Einfluß der azimuthalen Temperaturdifferenz (Bersttemperatur über Berstdruck).15	
Abb. 10: Häufigkeit der Berstwinkel der Versuche mit beheiztem Umgebungsrohres.....	16
Abb. 11: Bersttemperatur über Initialspannung, Vergleich: ZrNb1 mit Zry4 bei 1 K/s.....	18
Abb. 12: Bersttemperatur über Initialspannung, Vergleich: ZrNb1 mit Zry4 bei 10 K/s.....	19
Abb. 13 a: Berstdehnung über Bersttemperatur	20
Abb. 13 b: Berstdehnung über Bersttemperatur.....	20
Abb. 14: Vergleich der beiden Aufheizraten der ZrNb1-Versuche.....	21
Abb. 15 a: Berstdehnung über Bersttemperatur (Aufheizrate 1 K/s).....	22
Abb. 15 b: Berstdehnung über Bersttemperatur (Aufheizrate 10 K/s).....	22
Abb. 16 a: Berstdehnung über Bersttemperatur (ZrNb1 - 1 K/s, REMOD).....	24
Abb. 16 b: Berstdehnung über Bersttemperatur (ZrNb1 - 10 K/s, REMOD).....	24
Abb. 17: Zeitlicher Deformationsvorgang mit Mikrodensitometrischer Hüllrohrvermessung. ...	25
Abb. 18: Dehnungsverlauf bis zum Bersten (ZrNb1).....	26
Abb. 19: Dehnungsverlauf bis zum Bersten (ZrNb1/Zry4).....	27
Abb. 20: Berststellenansicht von ZrNb1-Hüllrohren (Aufheizrate 1 K/s).....	29
Abb. 21: Berststellenansicht von ZrNb1-Hüllrohren (Aufheizrate 10 K/s).....	30
Abb. 22: Querschnitte in der Berstmittelebene von ZrNb1 Hüllrohren Aufheizrate: 1 K/s Zahlenangaben: Versuchsnummer, Berstdruck [MPa] und Bersttemperatur [°C].	31
Abb. 23: Querschnitte in der Berstmittelebene von ZrNb1 Hüllrohren Aufheizrate: 10 K/s Zahlenangaben: Versuchsnummer, Berstdruck [MPa] und Bersttemperatur [°C].	32
Abb. 24: Makroaufnahme der Oxydschicht in der Berstmittelebene (ZrNb1, poliert, Hellfeld, Aufheizrate 1 K/s, Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]).	33
Abb. 25: Makroaufnahme der Oxydschicht in der Berstmittelebene (ZrNb1, poliert, Hellfeld, Aufheizrate 10 K/s, Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]).	34
Abb. 26: Oxidschicht, Vergleichsaufnahme zu Abb. 24, gleiche Stelle im polarisierten Licht Zahlenangaben: Bersttemperatur [°C]	35
Abb. 27: Oxidschicht nach isothermer und transientser Wasserdampfoxidation (ZrNb1, kein Innendruck).....	36

Abb. 28: REBEKA-Berstexperimente: Vergleich von gerechneter und gemessener Oxidschichtdicke von ZrNb1-Rohren.	37
Abb. 29: REBEKA-Berstexperimente an Zircaloy-4-Rohr. Einfluß von Bersttemperatur und Aufheizgeschwindigkeit auf die Oxidschichtdicke (poliert, Hellfeld).....	40
Abb. 30: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur. Die Bilder zeigen die Umwandlungen von α über $\alpha + \beta$ bis zur β -Phase (ZrNb1, Aufheizrate 1 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht).....	41
Abb. 31: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur. Die Bilder zeigen die Umwandlungen von α über $\alpha + \beta$ bis zur β -Phase (ZrNb1, Aufheizrate 10 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht).....	42
Abb. 32: Gefüge im Berstquerschnitt in Abhängigkeit von der Bersttemperatur nach vollständiger α - β -Umwandlung (ZrNb1, Aufheizrate 1 K/s, wischpoliert, polarisiertes Licht).	43
Abb. 33: Azimutale Unterschiede in der Gefügeausbildung von ZrNb1. Versuch 74, $p = 4.0$ MPa, $t_{\beta} = 861$ °C, $\Delta t_{\alpha\beta} = 47$ K, Aufheizrate = 9.5 K/s (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast)..	44
Abb. 34: Hydridausscheidung bei ZrNb1 (wischpoliert).....	45
Abb. 35: Gefüge im Berstquerschnitt von Zircaloy-4, Aufheizrate 10 K/s (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast).....	46
Abb. 36: Gefüge im Berstquerschnitt von Zircaloy-4 (wischpoliert, Interferenzphasenkontrast).	47
Abb. 37: REBEKA-Einzelstabberstversuche an ZrNb1-Rohren (Mikrohärte nach Rampe)	48
Abb. 38: REBEKA-Einzelstabberstversuche an ZrNb1-Rohren (Mikrohärte im Kern, Abhängigkeit von der Bersttemperatur)	49
Abb. 39: Bruchfläche von ZrNb1 (Berstproben, REM-Aufnahmen).....	50