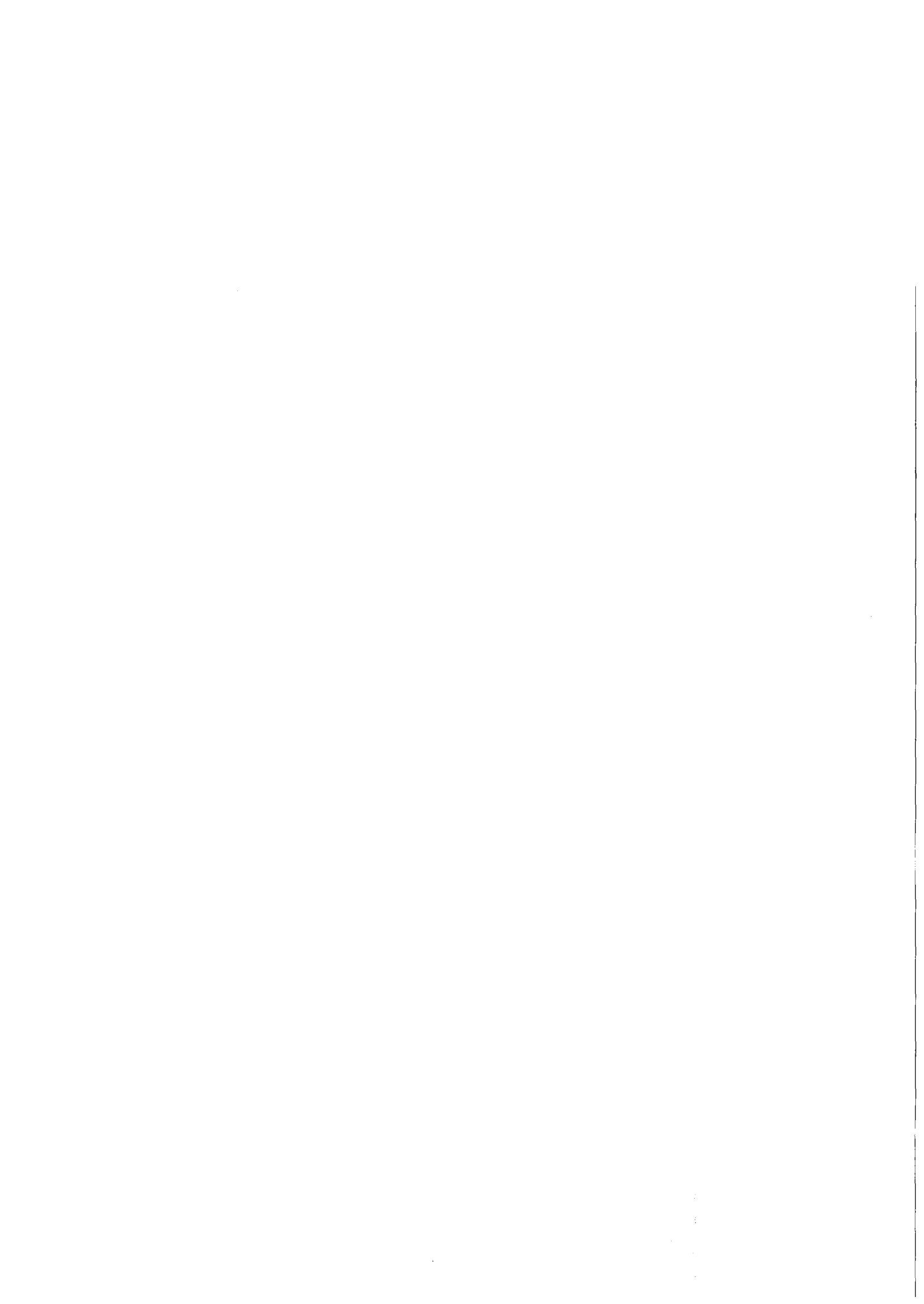


KfK 3029
August 1980

**Mechanische
Eigenschaften der Hüllrohre
aus dem Stahl 1.4970
nach dem Einsatz im
Bündelbestrahlungsexperiment
Rapsodie**

L. Schäfer
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KfK 3029

Mechanische Eigenschaften der Hüllrohre aus dem Stahl 1.4970
nach dem Einsatz im Bündelbestrahlungsexperiment Rapsodie

L. Schäfer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1. Einleitung

2. Zielsetzung

3. Ergebnisse

4. Diskussion

5. Zusammenfassung

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

6. Literaturverzeichnis

Zusammenfassung

In Zug- und Zeitstandversuchen wurden die mechanischen Eigenschaften von Hüllrohrabschnitten aus dem Bündelbestrahlungsexperiment Rapsodie geprüft. Die Ergebnisse von zwei Sorten des titanstabilisierten austenitischen Stahles 1.4970 werden berichtet. In Zugversuchen wurde die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Bestrahlungs- bzw. Prüftemperatur, von der Dosis schneller Neutronen und von der Verformungsgeschwindigkeit geprüft. Die Ergebnisse sind konventionell bis auf ein Streckgrenzenmaximum bei 400°C und einer Neutronendosis von $2 \cdot 10^{22}$ (n_g/cm^2). In Zeitstandversuchen wurde festgestellt, daß die schwächste Stelle des Brennstabes am heißen Ende der Brennstoffsäule liegt. Dort beträgt die Zeitstandfestigkeit infolge Korrosion mit Spaltprodukten und anderer Einflüsse nur noch 60 % von der eines unbestrahlten Rohres. Eliminiert man rechnerisch den Korrosionseinfluß, so stimmen die Zeitstandfestigkeiten der Brennstababschnitte mit denen von Proben aus reinen Materialbestrahlungsexperimenten überein. Die Bruchdehnungen liegen im Zeitstandversuch über 0,2 % und im Zugversuch über 0,5 %.

Abstract

Mechanical properties of cladding tubes made from type 1.4970 SS after irradiation in a Rapsodie-bundle.

The mechanical properties of pin sections are tested in tensile and stress-rupture tests. The dependence of the tensile properties of the irradiation temperature, of the dosis of fast neutrons and of the deformation rate is described. The results are as expected except for a maximum of the yield strength at 400°C and a fluence of $2 \cdot 10^{22}$ (n_g/cm^2). Stress-rupture tests have shown that the weakest part of the pin is at the hot end of the fuel column. There the stress-rupture strength is only 60 % of the strength of an unirradiated tube, because of corrosion with fission products and other influences. Taking into account the loss of cross section due to corrosion, the stress-rupture strength of pin sections agrees with that of specimens from material irradiation experiments. The ductility is above 0,2 % in the stress rupture test and above 0,5 % in the tensile test.

I n h a l t

1. Einleitung
2. Bestrahlungsbedingungen und Versuchsmaterial
3. Versuchsdurchführung und Probenvorbereitung
4. Versuchsergebnisse und Diskussion
 - 4.1 Zugversuche
 - 4.2 Zeitstandversuche
5. Zusammenfassung
6. Literaturübersicht und Nomenklatur
7. Anhang
 - Berechnungen von Spannungen und Dehnungen
8. Tabellen, graphische Darstellungen und Bilder

1. Einleitung

Das erfolgreiche Bündelbestrahlungsexperiment Rapsodie hat u.a. nachgewiesen, daß der titanstabilisierte austenitische Stahl 1.4970 als Hüllmaterial für einen Schnellen Brüter geeignet ist. In dem Bemühen, die Eignung zu quantifizieren, wurden Nachbestrahlungsuntersuchungen vorgenommen, um den Zustand der Rohre an deren mechanischen Eigenschaften und der Mikrostruktur festzustellen. Von den mechanischen Eigenschaften wurden diejenigen geprüft, die für die Lebensdauer der Brennstäbe relevant sind. Das sind die Festigkeit und die Duktilität bei Reaktorbetriebstemperaturen und bei praxisnahen Verformungsgeschwindigkeiten. Dafür wurden der Zugversuch mit einachsigen und der Zeitstandversuch mit mehrachsigen Spannungszustand (= Rohrrinnendruckversuch) ausgewählt. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits früher veröffentlicht. /15/

2. Bestrahlungsbedingungen und Versuchsmaterial

Die Bestrahlungsbedingungen wurden einem Bericht der Firma Belgonucleaire entnommen /1/. Auszüge daraus sind in Abb. 1 dargestellt. Die gleichen Daten sind in Abb. 2 anders dargestellt, um übersichtlich zu zeigen, aus welchem Temperatur- und Dosisbereich Proben zur Verfügung standen. Die Bestrahlungsdosis bezieht sich dabei auf die Reihe 3 des Subassemblies. Abweichungen einzelner Proben bis etwa 10 % des Mittelwertes sind möglich, wurden bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften aber nicht berücksichtigt.

Die Hüllrohre des Subassemblies 103 sind aus zwei Sorten des titanstabilisierten und bordotierten austenitischen Stahles 1.4970 hergestellt. Die chemische Zusammensetzung und einige Werkstoffdaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die mechanisch-thermische Behandlung des Werkstoffes wird in den Abbildungen durch die Symbole M und T bzw. CW und A ausgedrückt, wobei für eine Kaltverformung M bzw. CW und für eine Auslagerung T bzw. A steht.

3. Versuchsdurchführung und Probenvorbereitung

Alle Zeitstand- und Zugproben wurden zunächst gereinigt, indem der Brennstoff bzw. Brutstoff aus den Stababschnitten herausgebohrt und der am Hüllrohr anhaftende Rest mit Salpetersäure aufgelöst wurde. Die Zeitstandproben wurden an den Enden mit Endstopfen verschweißt und mit einer Druckzuleitung versehen. Vor dem Einbau in den Zeitstandofen wird zur Dimensionskontrolle ein Durchmesser-Wendelschrieb angefertigt. Im Zeitstandofen werden die Proben in etwa drei Stunden auf die Solltemperatur aufgeheizt und anschließend mit Innendruck belastet. Der Druck wird kontrolliert und registriert. Sein Abfall zeigt das Ende des Zeitstandversuches an. Danach wird erneut der Außendurchmesser der Rohrproben mittels Wendelschrieb vermessen, und die Bruchstelle der Probe wird fotografiert.

Die Standard-Zugversuche wurden an einer Wolpert-Zerreißmaschine bei Bestrahlungstemperatur und einer Prüfgeschwindigkeit von 0,2 mm/min (≈ 1 %/min) durchgeführt. Die Probeneinspannung besteht aus handelsüblichen Klemmring-Rohrverschraubungen (z.B. Swagelok-fittings) mit einem speziell entwickelten formschlüssigen Stützstopfen.

4. Versuchsergebnisse und Diskussion

4.1 Zugversuche

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 2 aufgelistet und in den Abbildungen 3, 4 und 5 dargestellt. In diesen Abbildungen sind auch einige Punkte aus anderen Bestrahlungsexperimenten (DFR 397 und Mol 3B) enthalten, in denen der gleiche Stahl, aber aus anderen Schmelzen, eingesetzt war. Ebenso wurden Ergebnisse der CEA aus der Rapsodie-Material und Rapsodie-Monitor Bestrahlung mit verwendet, um die nicht ganz einfache Interpretation etwas mehr abzusichern. In Abb. 3 sind die Abhängigkeiten der Gleichmaßdehnung und der 0,2-Dehngrenze (Streckgrenze) von der Dosis schneller Neutronen ($E > 0,1$ MeV) dargestellt. Die bei 400°C bestrahlten und geprüften Proben scheinen bei einer Dosis von etwa $2 \cdot 10^{22}$ schnellen Neutronen ein Maximum der 0,2-Dehngrenze zu haben, was auch entsprechend Bild 12(a, b und c) mit der Versetzungsdichte übereinstimmt. Setzt man voraus, daß Streckgrenze und Gleichmaßdehnung einander umgekehrt proportional sind, so ist dies ein Indiz dafür, daß die Gleichmaßdehnung mit zunehmender Bestrahlungsdosis nicht gegen Null geht.

Bemerkenswert ist ferner, daß die 0,2-Dehngrenze bei einer Bestrahlungstemperatur von 575°C nicht merklich abfällt, obwohl das Material kaltverformt ist und eine Erholung wie beim Stahl AISI 316 möglich wäre. (Abb.11)

Die Gleichmaßdehnung fällt mit zunehmender Neutronendosis ab. Wie weit der Abfall bei hohen Dosen geht, läßt sich wegen der starken Streuung der Meßwerte nur schlecht abschätzen. Man kann annehmen, daß 0,5 % nicht unterschritten werden, solange sich der Bruchmechanismus nicht ändert.

In Abb. 4 sind die Abhängigkeiten von Gleichmaßdehnung und 0,2-Dehngrenze von der Prüf- bzw. Bestrahlungstemperatur, die annähernd gleich sind, dargestellt. Der Kurvenverlauf ist konventionell. Die Gleichmaßdehnung ist oberhalb 550°C überwiegend von der Hochtemperaturversprödung und unterhalb 550°C von der Tieftemperaturversprödung beeinflusst. Dazwischen liegt ein Duktilitätsmaximum.

In Abb. 5 sind die Abhängigkeiten von Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und Gleichmaßdehnung sowohl von Proben, die bei 400°C als auch von solchen, die bei 590°C bestrahlt und geprüft worden sind, in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit, dargestellt. Die 400°C-Proben haben gegenüber den 590°C-Proben wegen der stark ausgeprägten Tieftemperaturversprödung bei annähernd gleicher Neutronendosis die höhere Festigkeit und geringere Duktilität. Ansonsten unterscheiden sich die Zugeigenschaften beider Probensorten nicht stark voneinander, zumal sie auch die gleichen Tendenzen in der Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit zeigen. Auffallend ist, daß die Duktilität beider Probenarten bei Verformungsgeschwindigkeiten unter 10^{-3} (min^{-1}) stark abfällt. Offenbar wechselt hier die Bruchart vom transkristallinen zum interkristallinen Bruch. Die beiden im Bündelbestrahlungsexperiment Rapsodie eingesetzten Sorten des Stahles 1.4970 unterscheiden sich in ihren im Zugversuch meßbaren mechanischen Eigenschaften nicht. Nach hohen Neutronendosen dürften sich ohnehin die verschiedenen austenitischen Stähle im Zugversuch gleich verhalten /3/.

4.2 Zeitstandversuche

Die Ergebnisse der Zeitstandversuche sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die angegebene Vergleichsspannung σ_v ist berechnet nach /4/:

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(1 + \frac{s}{2r_i}\right) \cdot \frac{r_i}{s} \cdot P_i$$

Darin bedeuten s die Wandstärke des Rohres, r_i der Rohrrinnenradius und P_i der Innendruck. Manche Zeitstandproben, deren Zeitstandfestigkeit bei Versuchsbeginn unterschätzt worden ist, wurden nachträglich mit einem höheren Innendruck belastet, um den Bruch der Probe in angemessener Zeit herbeizuführen. Für diese Proben wurde nach einer Methode /5/, die auf der life-fraction-Regel von Robinson /6/ fußt, eine Ersatzstandzeit berechnet, deren Wert in der Tabelle mit einem Kreuz (+) gekennzeichnet ist.

Die Bestrahlungsbedingungen der Brennstäbe sind nach Abb. 1 und 2 entlang der Stabachse unterschiedlich. Entsprechend variieren auch die Zeitstandeigenschaften. Wollte man sie genau beschreiben, so wäre für jede Probenposition eine komplette Zeitstand- und Bruchdehnungskurve notwendig. Nun interessiert aber zunächst nur die Frage welcher Teil des Brennstabes die geringste Zeitstandfestigkeit hat. Dazu genügt es, aus allen Stabbereichen eine begrenzte Probenzahl zu entnehmen und sie einer Belastung zu unterziehen, die zu angemessenen Standzeiten führt. Die Zeitstandfestigkeit der bestrahlten Brennstababschnitte wird dann dadurch normiert, daß sie durch die Zeitstandfestigkeit des unbestrahlten Materials geteilt wird, die zur gleichen Standzeit gehört, wie sie bei der bestrahlten Probe gemessen wurde. Diese dimensionslose Zahl gibt an, welcher Bruchteil Zeitstandfestigkeit des unbestrahlten Materials nach der Bestrahlung als Rest-Zeitstandfestigkeit noch vorhanden ist.

In den Abbildungen 6 und 7 sind die normierten Zeitstandfestigkeiten der beiden Rohrorten in Abhängigkeit von der Probenposition, also als Stabprofil, dargestellt und in Tabelle 3 aufgelistet. Die schwächste Stelle der Brennstäbe liegt eindeutig bei der Probenposition 600 mm. Hier beträgt die Rest-Zeitstandfestigkeit nur noch etwa 60 % des unbestrahlten Materials. Bei Prüftemperaturen, die über der den Bestrahlungsbedingungen am besten angepaßten Prüftemperatur von 600°C liegen, ist die normierte Zeitstandfestigkeit noch geringer. Die Hauptursache für den Abfall der Zeitstandfestigkeit liegt in der chemischen Wechselwirkung der Spaltprodukte mit der Hülle. Es bildet sich eine Korrosionsschicht, die in erster Näherung keine Festigkeit mehr besitzt. Wahrscheinlich wird auch die Duktilität des Hüllrohres erniedrigt. /7/. Weitere Einflüsse auf die Zeitstandfestigkeit und Duktilität rühren her von der Neutronenbestrahlung, von der Korrosion mit Kühlmittelresten, von der Probenreinigung in Salpetersäure sowie von mechanischen Beschädigungen im Bündel und bei der Bündeldemontage.

Berücksichtigt man die gesamte Korrosion der Proben dadurch, daß man nach dem Zeitstandversuch die unkorrodierte Restwandstärke im metallografischen Schliffbild feststellt und die Spannung mit diesem Restquerschnitt berechnet, so läßt sich der Zeitstandfestigkeitsverlust feststellen, der überwiegend durch die Bestrahlung hervorgerufen worden ist. Für alle Proben mit Bestrahlungstemperaturen oberhalb 550°C ist die Zeitstandfestigkeit in dieser Art in Abb. 8 in Abhängigkeit von dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller /8/ dargestellt. Die Zeitstandfestigkeit ist angegeben als effektive Tangential-Spannung des lasttragenden Restquerschnittes der Probe bzw. als fiktiver Innendruck, der bei einer unkorrodierten Probe geherrscht haben müßte, um die gleiche Tangentialspannung wie in der gemessenen korrodierten Probe zu erzeugen. Die Zeitstandfestigkeit der Proben aus der Schmelze 8-29052 ist infolge der Neutronenbestrahlung stärker abgefallen als die der Rohre aus der Schmelze 71087. Da sie aber im unbestrahlten Zustand sehr viel höher war, ist im bestrahlten Zustand noch ein kleiner Festigkeitsvorsprung geblieben.

Abb. 9 zeigt das Streuband aller bestrahlten Rohre aus dem Stahl 1.4970. Die hier berichteten Werte der Schmelze 8-29052 liegen bevorzugt im oberen Teil und die der Schmelze 71087 im mittleren Teil des Streubandes. Beide Rohrarten sind natürlich im unbestrahlten und im bestrahlten Zustand dem ebenfalls im Rapsodie-Bündelbestrahlungsexperiment eingesetzten Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4988 überlegen.

Die tangentielle Bruchdehnung wird aus den Wendelschrieben der Rohre vor und nach dem Zeitstandversuch berechnet. Sie enthält also nicht die plastische Dehnung, die schon während der Bündelbestrahlung stattgefunden hat, sondern nur die Restduktilität, die allerdings der größere Anteil ist. In Abb. 10 ist die tangentielle Bruchdehnung von Proben, die bei etwa 570°C bestrahlt worden sind, in Abhängigkeit von der Dosis schneller Neutronen ($E > 0,1 \text{ MeV}$) dargestellt. Die Bruchdehnung nimmt mit zunehmender Dosis ab und mit zunehmender Prüftemperatur zu, weil bei höheren Temperaturen ein Teil der in den Proben enthaltenen Gitterdefekte, die zur Tieftemperaturversprödung führen, ausgeheilt. Das Ausheilen ist auch zeitabhängig, weshalb gleichartige Zeitstandproben mit längeren Standzeiten eine höhere Bruchdehnung haben.

5. Zusammenfassung

Die Zugversuche ergaben:

1. Es gibt Anzeichen für eine "Erholung" der Tieftemperaturversprödung von 400°C bei Neutronendosen über $2 \cdot 10^{22} [\text{n}_g/\text{cm}^2]$. (Streckgrenzenmaximum, Abb. 3)
2. Die Gleichmaßdehnung fällt wahrscheinlich auch bei hohen Dosen nicht unter 0,5 % ab. (Abb. 3)
3. Der Stahl 1.4970 zeigt bei 575°C im Gegensatz zu dem ebenfalls kaltverformten Stahl AISI 316 noch keine deutliche thermische Erholung. (Abb. 12)
4. Die Gleichmaßdehnung zeigt bei etwa 550°C in dem Bereich, wo die Hoch- und die Tieftemperaturversprödung jeweils nur schwach wirksam ist, ein Maximum. (Abb. 4)
5. Bei Verformungsgeschwindigkeiten unter $10^{-3} (\text{min}^{-1})$ fällt die Duktilität ab, weil der Bruchmechanismus wahrscheinlich vom transkristallinen zum interkristallinen Bruch wechselt. (Abb. 5)

Die Zeitstandversuche ergaben:

1. Die schwächste Stelle der Brennstabhülle liegt am heißeren Ende der Brennstoffsäule. Sie hat dort noch 60 % der Zeitstandfestigkeit des unbestrahlten Materials. (Abb. 6 + 7).
2. Der Verlust an Zeitstandfestigkeit ist im wesentlichen auf die Neutronenbestrahlung und auf die innere Korrosion mit Spaltprodukten zurückzuführen. (Abb. 9).
3. Die Bruchdehnung ist dosis- und temperaturabhängig und liegt nicht unter 0,2 %. (Abb. 10).

6. Literaturübersicht und Nomenklatur

/1/ D. Haas:

Rapsodie, two mixed oxide fuel subassemblies irradiation report;
BN 7402-05, 308, 84 100/n/786.

/3/ K.D. Closs et al.:

VII. Einfluß der Bestrahlung auf die Festigkeitseigenschaften von Hüllwerkstoffen; in KfK 1999 (Sept. 1974).

/4/ K.D. Closs, L. Schäfer:

Untersuchungen über das Zeitstand- und Kriechverhalten von Hüllrohrproben mit und ohne Bestrahlung. In: Dalle Donne, M., Kummerer, K., Schroeter, K. (Hrsg.): Proceedings of an International Meeting on Fast Reactor Fuel and Fuel Elements, Karlsruhe, September 28. - 30. 1970.
Karlsruhe: Gesellschaft für Kernforschung mbH. 1970. S. 675 - 698

/5/ L. Schäfer: unveröffentlichte Ergebnisse

/6/ E.L. Robinson, N.Y. Schenectady:

Trans. ASME 60 (1938) S. 253 und Trans. ASME 74 (1952) S. 777 - 781.

/7/ L. Schäfer, P. Hofmann:

Zugeigenschaften des austenitischen Stahls 1.4981 nach Korrosion durch UO_{2+x} und Spaltprodukte, Journal of Nuclear Materials, 67, No. 1,2 (1977) S. 88 - 96.

/8/ F.R. Larson, J. Miller:

A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses,
Trans. ASME 74 (1952) S. 765 - 775.

/9/ Lamè, G.:

Lecons sur la Théorie Mathématique de L'Elasticité des Corps Solides.
Paris: Bachelier 1852

/10/ Wellinger, K., Dietmann, H.:

Festigkeitsberechnungen. Stuttgart: Alfred Kröner 1968

/11/ Dietmann, H.:

Spannungszustand und Festigkeitsverhalten. MPA Stuttgart, Techn.-wiss. Bericht, Heft 68-04 (1968).

/12/ Soderberg, C.R.:

The Interpretation of Creep Tests for Machine Design. Transactions of the ASME, 58 (1936) S. 733.

/13/ Finnie, I., Heller, W.R.:

Creep of Engineering Materials. New York: McGraw-Hill 1959.

/14/ Soderberg, C.R.:

Interpretation of Creep Tests on Tubes. Transactions of the ASME, 63 (1941) S. 737 - 748.

/15/ K. Anderko, L. Schäfer, C. Wassilew, K. Ehrlich, H.J. Bergmann;
Mechanical Properties of Irradiated Austenitic Stainless Steel 1.4970.
In: Bleiberg, M.L., Bennet, J.W. (Ed.): International Conference:
Radiation Effects in Breeder Reactor Structural Materials, Comelback Inn,
Scottsdale, Arizona, June 19.-23. 1977. New York: AIME 1977, S. 65-82.

Nomenklatur

Indizes

d	-	Durchmesser des Rohres	o	-	Anfangsbedingungen, Nominalwerte
r	-	Radius des Rohres	a	-	auf die Außenwand bezogen
P	-	Druck	i	-	" " Innenwand "
s	-	Wandstärke	m	-	" " Wandmitte "
σ	-	Spannung	ax	-	axial
ϵ	-	Dehnung	t	-	tangential
$\dot{\epsilon}$	-	Kriechgeschwindigkeit	r	-	radial
$\bar{\epsilon}$	-	mittlere "	V	-	Vergleichs-
LG	-	lösungsgeglüht	j	-	beliebige Zahl
KV	-	kaltverformt	N	-	Norton
Chg.	-	Charge, Schmelze	B	-	Bruch
δ	-	Bruchdehnung			
t	-	Zeit			
RT	-	Raumtemperatur			

7. Anhang

Berechnung der Spannungen und Dehnungen

In einem Rohr, das unter Innendruckbelastung steht, werden Spannungen erzeugt, die in drei senkrecht aufeinanderstehenden Hauptspannungsrichtungen zusammengefaßt werden können. Die drei Hauptspannungsrichtungen liegen entsprechend der Rohrgeometrie in tangentialer, axialer und radialer Richtung. Die drei Hauptspannungen können aus dem Innendruck und den Rohrabmessungen für jeden Ort der Rohrwand berechnet werden /9/. Damit können gleiche Belastungsfälle bei unterschiedlichen Rohrabmessungen berechnet werden. Bei den hier vorliegenden relativ dünnwandigen Rohren genügt es allerdings, die mittleren Spannungen zu berechnen und die Ortsabhängigkeit zu vernachlässigen. Je dünner ein Rohr ist, desto geringer sind bei gleicher Materialbeanspruchung die Spannungsunterschiede in der Rohrwand. Daher sind die Spannungsumlagerungen beim plastischen Kriechen des Materials auch vernachlässigbar. Für jeden elastisch-plastischen Zustand haben die mittleren Hauptspannungen folgende Größe:

$$\text{Tangentialspannung} \quad \sigma_t = P_i \frac{d_i}{d_a - d_i}$$

$$\text{Axialspannung} \quad \sigma_{ax} = P_i \frac{1}{(d_a/d_i)^2 - 1}$$

$$\text{Radialspannung} \quad \sigma_r = -\frac{1}{2} P_i$$

(Darin bedeuten P_i - Rohrrinnendruck, d_a und d_i - Rohraußen- und Innendurchmesser.)

Für einen Vergleich der Belastungsfälle, hier der Zeitstandfestigkeit, aus Versuchen mit unterschiedlichem Spannungszustand, beispielsweise bei Zug- und Rohrrinnendruckbelastung, ist es notwendig, aus den drei genannten Hauptspannungen eine Vergleichsspannung σ_v zu berechnen. Diese gibt an, welche Spannung im einaxialen Zugversuch das gleiche Materialverhalten, z.B. den Fließbeginn oder eine bestimmte Verformungsgeschwindigkeit, bewirkt wie bei-

spielsweise in dem innendruckbelasteten Rohr, aus dessen Hauptspannungen sie berechnet wurde. Zur Berechnung der Vergleichsspannung muß eine Festigkeitshypothese ausgewählt werden, die dem Material, insbesondere seinem Bruchverhalten, am besten entspricht. Nach den Beschreibungen von Wellinger und Dietmann /10/, /11/ sollte für den vorliegenden Werkstoff die Gestaltsänderungsenergiehypothese am geeignetsten sein, da sie für verformungsfähige Werkstoffe gilt, die durch das Auftreten unzulässig großer plastischer Deformationen versagen. Für andere stabilisierte und ungestabilisierte austenitische Stähle ist dies nachgewiesen worden /4/. Daher wird angenommen, daß die Gestaltsänderungsenergiehypothese (von Mises yield criterion) auch hier anwendbar ist. Sie lautet in der Anwendung auf ein mit Innendruck belastetes Rohr:

$$\sigma_V = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_t - \sigma_{ax})^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_{ax} - \sigma_r)^2]^{1/2}$$

Mit den Vereinfachungen $\sigma_{ax} = 0,5 \sigma_t$ und $\sigma_r = 0$ ergibt sich die Näherungslösung:

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_t = \frac{\sqrt{3}}{2} P_i \frac{1}{(d_a/d_i)-1}$$

Analog gilt für die Vergleichsdehnung

$$\epsilon_V = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_t - \epsilon_{ax})^2 + (\epsilon_t - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_{ax} - \epsilon_r)^2]^{1/2}$$

Die Bedingung für Volumenkonstanz $\epsilon_t + \epsilon_{ax} + \epsilon_r = 0$ und die Forderung, daß die drei Hauptscherdehnungen proportional zu den drei Hauptscher-
spannungen sind /12/

$$\frac{\epsilon_t - \epsilon_{ax}}{\sigma_t - \sigma_{ax}} = \frac{\epsilon_{ax} - \epsilon_r}{\sigma_{ax} - \sigma_r} = \frac{\epsilon_r - \epsilon_t}{\sigma_r - \sigma_t} = C \quad \text{bedingen, daß die axiale}$$

Kriechgeschwindigkeit bzw. Dehnung des Rohres, sofern es isotrope mechanische Eigenschaften hat, gleich Null ist, d. h. das Rohr wird beim Kriechen nicht länger /13/.

$$\epsilon_{ax} = \frac{2}{3} c \left[\sigma_{ax} - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_t) \right] = 0$$

Daraus ergibt sich, daß die tangentiale und die radiale Kriechgeschwindigkeit bzw. Dehnung gleich groß sind ($\epsilon_t = -\epsilon_r$) und daß für die Vergleichsdehnung folgende Näherungslösung gilt:

$$\epsilon_V = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \epsilon_t$$

Aus technischen Gründen kann nur die Tangentialdehnung und diese auch nur an der Rohraußenwand gemessen werden. Für genauere Berechnungen der Vergleichsdehnung kann nach Soderberg /14/ bei dünnwandigen Rohren die mittlere Tangentialdehnung $\epsilon_{t,m}$ aus der meßbaren äußeren $\epsilon_{t,a}$ berechnet werden.

$$\epsilon_{t,m} = \left(1 + \frac{s_o}{d_a - s_o} \right)^2 \cdot \epsilon_{t,a}$$

In dieser Arbeit wird die Bruchdehnung als technische Tangentialdehnung der Rohraußenwand angegeben. Ebenso wird die nominelle, d. h. die auf die Ausgangsabmessungen des Rohres bezogene Spannung verwendet, weil die wahre Spannung von der Dehnung und damit von der Zeit abhängig ist.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung und Materialdaten

Werkstoff-Nr.	1.4970		
DIN-Bezeichnung	X10NiCrMoTiB 1515		
erschmolzen bei	Sandvik	DEW	
Charge-Nr.	8-29052	71087	
Hersteller der Rohre	Sandvik	MRW	
Behandlungszustand	1120°C/10'+KV = 14 % + 800°C	1060°C/5'+KV = 10 % + 800°C	
R _{p0,2} [N/mm ²] bei RT	553	461	
Korngröße ASTM Nr.	9		
Legierungszusammensetzung			
[Gew.%]	C	0,1	0,09
	Si	0,4	0,45
	Mn	1,95	1,62
	Cr	14,8	15,25
	Ni	15,1	15,73
	Mo	1,2	1,16
	Ti	0,5	0,43
	N ₂	< 0,01	-
ppm	B	60	52

Tabelle 2: Ergebnisse der Zugversuche an Hüllrohrabschnitten aus dem Bündelbestrahlungsexperiment Rapsodie
(Material: 1.4970)

Schmelze Nr.	Stab Nr.	Probe Nr.	Position [mm]	Neutronen- dosis [10^{21} n/cm ²] (E>0,1 MeV)	Temperatur [°C] Bestrahlung Test	Prüfgeschwin- digkeit [min ⁻¹]	0,2-Dehngrenze [N/mm ²]	Zugfestig- keit [N/mm ²]	Bruchdeh- nung [%]	Gleichmaß- dehnung [%]	
	BU 14	22	305	34	410	400	0,017	750	763	3,5	2,4
	"	23	250	24	400	400	0,017	756	883	3,4	2,5
	"	18	180	15	400	400	0,04	701	716	4,0	3,0
	"	20	100	7,5	400	400	0,039	685	713	6,9	5,2
	"	21	50	2,5	400	400	0,028	621	679	8,4	7,0
	AU 24	2	795	14	590	590	0,01	416	470	9,3	8,3
	"	3	745	19	590	590	0,012	409	470	10,4	8,4
	"	4	700	25	590	590	0,012	439	488	12,8	8,3
	"	12	620	43	600	600	0,009	378	399	1,9	1,1
	"	13	525	61,5	555	550	0,009	402	458	3,2	3,2
	"	14	445	61	500	500	0,009	545	618	5,3	4,7
	"	15	370	49	455	450	0,011	659	709	4,4	4,1
	"	17	265	25	400	400	0,9	746	772		
	AU 02	4	685	28	590	590	0,0006	407	430	1,7	0,7
	"	15	365	48	445	445	0,012	651	692	2,0	2,0
	"	18	260	25	400	400	0,0008	779	779	0,3	0,2
	AU 04	3	700	25	590	590	0,09	417	498	9,0	8,5
	"	12	470	62,5	515	515	0,01	492	571	1,0	1,0
	"	14	420	58	480	480	0,01	513	596	1,6	1,6
	"	19	255	24	400	400	0,0025	754	805	4,1	2,6
	AU 21	3	700	25	590	590	0,89	407	505	11,5	8,3
	"	18	250	23,5	400	400	0,09	776	816	3,2	2,6
	BU 16	2	750	18,5	555	550	0,01	442	542	12,6	10,9
	"	3	695	26	555	550	0,014	456	508	3,7	3,4
	"	6	615	45	565	565	0,008	358	358		
	BU 09	19	260	25	400	400	1,68	715	756	3,6	2,8
	AU 20	15	520	62	550	550	0,02	374	377		0,4
	"	16	445	61	500	500	0,01	552	563	1,0	
	AU 37	18	325	39	410	400	0,016	750	769	4,7	3,1
	"	19	280	28	400	400	0,015	756	779	4,8	2,6
	"	20	240	22	400	400	0,016	737	768	5,3	3,1
	"	21	200	17,5	400	400	0,017	750	791	6,1	4,1
	"	22	155	12,5	400	400	0,017	729	771	7,6	4,6
	"	23	105	7,5	400	400	0,007	670	734	6,9	5,5
	"	24	50	3	400	400	0,01	610	673	5,5	5,5
	AU 38	2	755	18	570	570	0,006	403	460	4,4	4,4
	"	3	700	25	570	570	0,014	435	490	4,4	4,3

8-29052

71087

Tabelle 3: Ergebnisse von Zeitstandversuchen an Hüllrohrabschnitten aus dem Stahl 1.4970 (Chg. 71087)

Stab Nr.	Probe Nr.	Position [mm]	Tangentialspannung σ_t [MPa]	Vergleichspannung σ_v [MPa]	Temperatur T_p [°C]	Standzeit t_B [h]	Parameter $T_K(20+\lg t_B)$	normierte Zeitstandfestigkeit	tangentiale Bruchdehnung δ_t [%]
AU 20	1	802	276	256	600	498 ⁺	$19,81 \cdot 10^3$	0,89	
"	2	763	276	256	"	397 ⁺	$19,73 \cdot 10^3$	0,88	
"	4	700	262	243	"	866 ⁺	$20,02 \cdot 10^3$	0,85	
"	5	660	300	275	"	155 ⁺	$19,37 \cdot 10^3$	0,72	
"	19	320	285		"	150 ⁺		0,89	
"	20	280	258		"	1.620 ⁺		0,87	2,6
"	21	230	278		"	735		0,91	1,25
"	22	180	278		"	738		0,91	1,0
"	23	140	278		"	392		0,90	0,68
"	24	100	278		"	1.319		0,93	1,02
AU 37	1	790	276	256	"	482	$19,80 \cdot 10^3$	0,89	1,72
"	2	742	276	256	"	934	$20,05 \cdot 10^3$	0,90	1,62
"	3	700	276	256	"	6	$18,14 \cdot 10^3$	0,8	0,5
"	4	657	300	275	"	22	$18,63 \cdot 10^3$	0,69	0,37
"	6	610	260	238	"	13	$18,43 \cdot 10^3$	0,61	0,2
"	8	560	260	238	"	182	$19,43 \cdot 10^3$	0,64	0,2
"	10	510	204		"	205		0,65	0,38
"	12	460	204		"	716		0,67	
"	14	415	244		"	3		0,72	
"	16	370	258		"	23		0,78	
AU 38	1	805	303	282	"	199	$19,47 \cdot 10^3$	0,94	1,6

Tabelle 3: (Fortsetzung 1) Ergebnisse von Zeitstandversuchen an Hüllrohrabschnitten aus dem Stahl 1.4970 (Chg. 8-29052)

Stab Nr.	Probe Nr.	Position [mm]	Tangentialspannung σ_t [MPa]	Vergleichspannung σ_v [MPa]	Temperatur T_p [°C]	Standzeit t_B [h]	Parameter $T_K(20+lg t_B)$	normierte Zeitstandfestigkeit	tangentiale Bruchdehnung δ_t [%]
AU 02	1	792	48,3	44,8	800	769	$24,56 \cdot 10^3$	0,707	11,7
"	3	730	55,2	51,2	"	$>5 \cdot 051^+$	$>25,43 \cdot 10^3$	$>1,194$	$>0,17$
"	8	555	39,1	36,0	"	458	$24,32 \cdot 10^3$	0,454	3,65
"	13	422	37,9		"	631		0,534	2,13
"	16	320	51,4		"	12		0,313	0,65
"	19	220	58,2		"	190		0,548	6,05
"	21	140	68,3		"	129		0,694	7,4
"	23	48	61,6		"	192		0,682	8,83
AU 03	1	800	41,4	38,4	"	1.434	$24,85 \cdot 10^3$	0,69	3,95
"	2	750	165	154	700	>1.000	$>22,38 \cdot 10^3$	$>0,75$	0,68
AU 22	1	805	303	282	600	401^+	$19,73 \cdot 10^3$	0,746	
"	2	768	276	256	"	1.014^+	$20,08 \cdot 10^3$	0,72	
"	4	702	276	256	"	2.202^+	$20,38 \cdot 10^3$	0,727	1,43
"	5	660	300	275	"	704^+	$19,95 \cdot 10^3$	0,60	
BU 14	1	795	82,7	76,9	800	46^+	$23,24 \cdot 10^3$	0,67	4,2
"	2	752	303	282	600	978^+	$20,07 \cdot 10^3$	0,793	
"	3	710	276	256	600	3.321^+	$20,53 \cdot 10^3$	0,784	
BU 19	1	800	179	167	700	117	$21,47 \cdot 10^3$	0,65	1,77
"	2	760	152	141	"	529	$22,11 \cdot 10^3$	0,641	
"	3	717	207	192	"	221	$21,74 \cdot 10^3$	0,8	3,17
"	9	530	153	126	"	644	$22,19 \cdot 10^3$	0,537	1,65
"	12	470	122		"	243		0,486	0,82
"	15	368	143		"	489		0,609	2,18
"	18	260	190		"	1.171		0,881	
"	20	180	156		"	167		0,59	1,04
"	21	140	237		"	1.190		1,108	
"	23	52	237		"	3		0,7	1,95

Tabelle 3: (Fortsetzung 2) Ergebnisse von Zeitstandversuchen an Hüllrohrabschnitten aus dem Stahl 1.4970 (Chg.8-29052)

Stab Nr.	Probe Nr.	Position [mm]	Tangentialspannung σ_t [MPa]	Vergleichsspannung σ_v [MPa]	Temperatur T_p [°C]	Standzeit t_B [h]	Parameter $T_K(20+lg t_B)$	normierte Zeitstandfestigkeit	tangentiale Bruchdehnung δ_t [%]
AU 26	1	790	317	295	600	4.045 ⁺	$20,61 \cdot 10^3$	0,911	0,6
"	2	740	317	295	"	1.274 ⁺	$20,17 \cdot 10^3$	0,844	0,33
"	3	700	317	295	"	300 ⁺	$19,62 \cdot 10^3$	0,767	0,33
"	4	658	268	246	"	589	$19,88 \cdot 10^3$	0,557	0,23
"	6	600	268	246	"	4.740 ⁺	$20,67 \cdot 10^3$	0,64	0,85
"	11	450	244		"	3,414 ⁺		0,71	0,43
"	13	380	271		"	4.232 ⁺		0,80	0,57
"	16	305	285		"	1.112 ⁺		0,764	0,22
"	17	265	298		"	2.225 ⁺		0,838	0,1
"	19	182	295		"	3.148 ⁺		0,845	0,23
"	20	140	295		"	2.794 ⁺		0,837	0,32
"	21	100	325		"	>1.780 ⁺		>0,9	0,15
"	22	50	295		"	4.824 ⁺		0,87	0,55
BU 16	1	805	193	179	700	69	$21,25 \cdot 10^3$	0,667	0,92
"	20	230	156		"	479		0,66	1,43
"	21	190	156		"	156		0,59	2,24
AU 14	1	795	149		"	817		0,67	3,47
"	2	745	149		"	789		0,67	1,33
"	3	690	149		"	840		0,67	1,73
AU 15	1	800	149		"	600		0,65	1,42
"	2	755	149		"	408		0,63	0,92
"	3	710	149		"	360		0,62	0,68

(Anmerkung: Die mit einem Kreuz (+) gekennzeichneten Standzeiten wurden aus Zeitstandversuchen mit unterschiedlicher Last berechnet. Die Vergleichsspannung wurde nach [4] berechnet. AU 14 und 15 sind Versuche mit periodischem Überdruck).

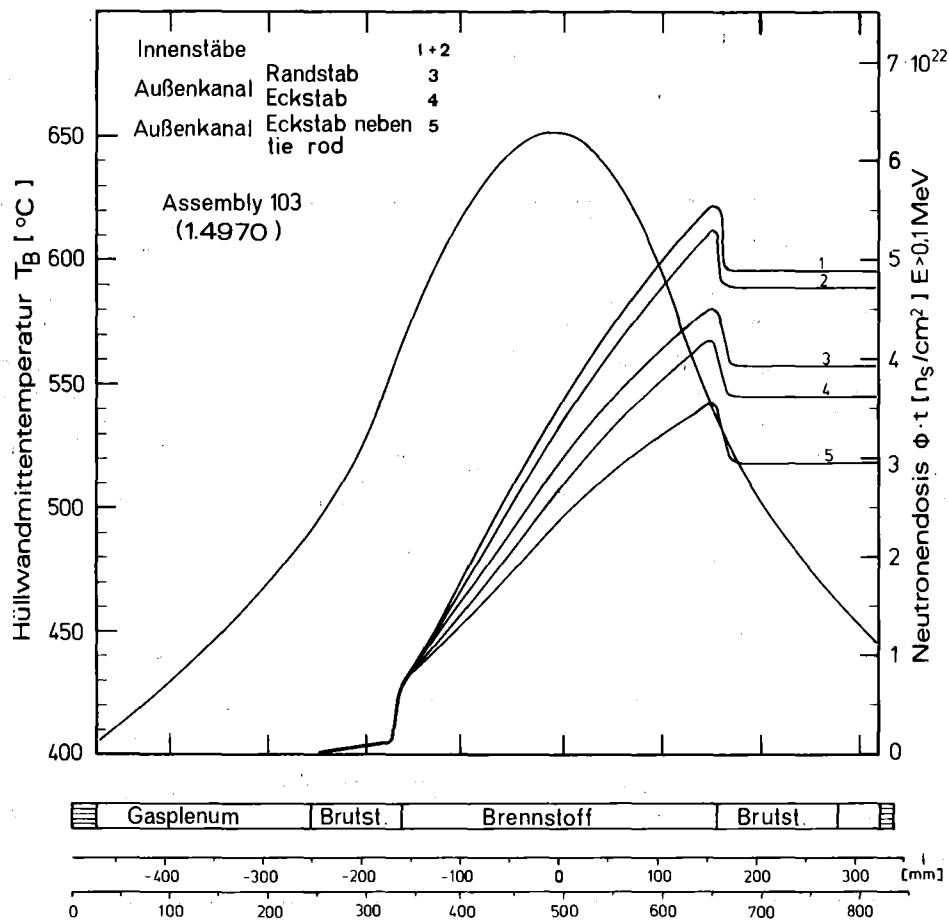


Abb. 1: Axialer Verlauf der Dosis schneller Neutronen und der Hüllwandmittentemperatur.

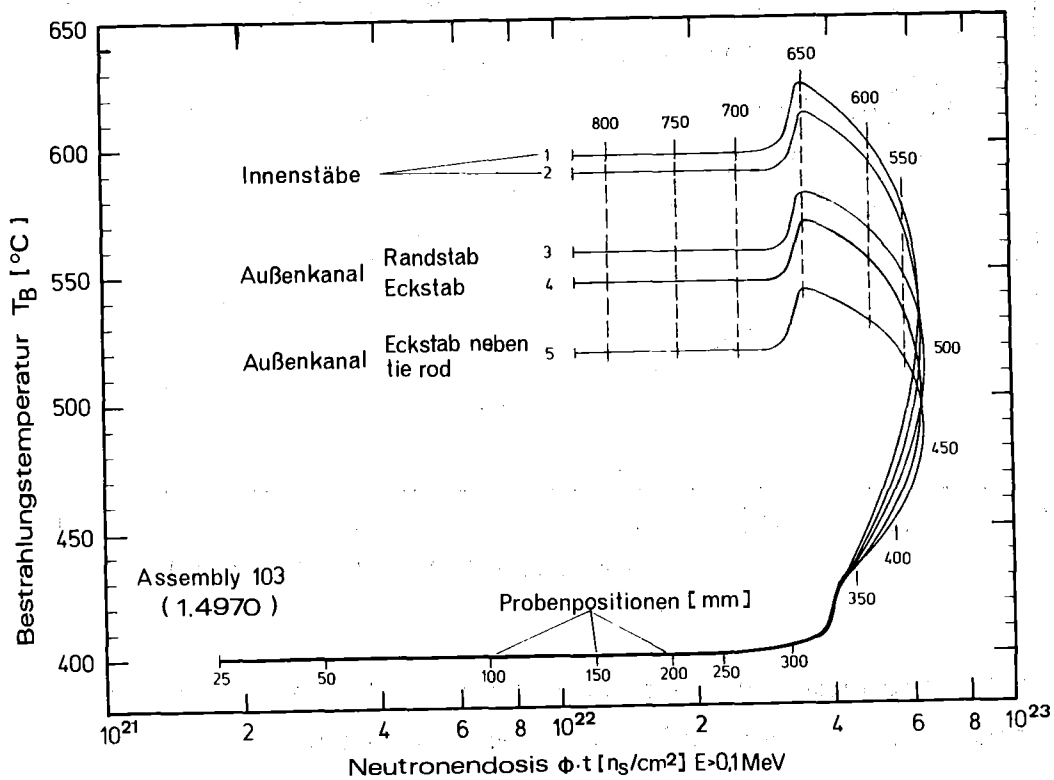


Abb. 2: Bestrahlungsbedingungen der Proben.

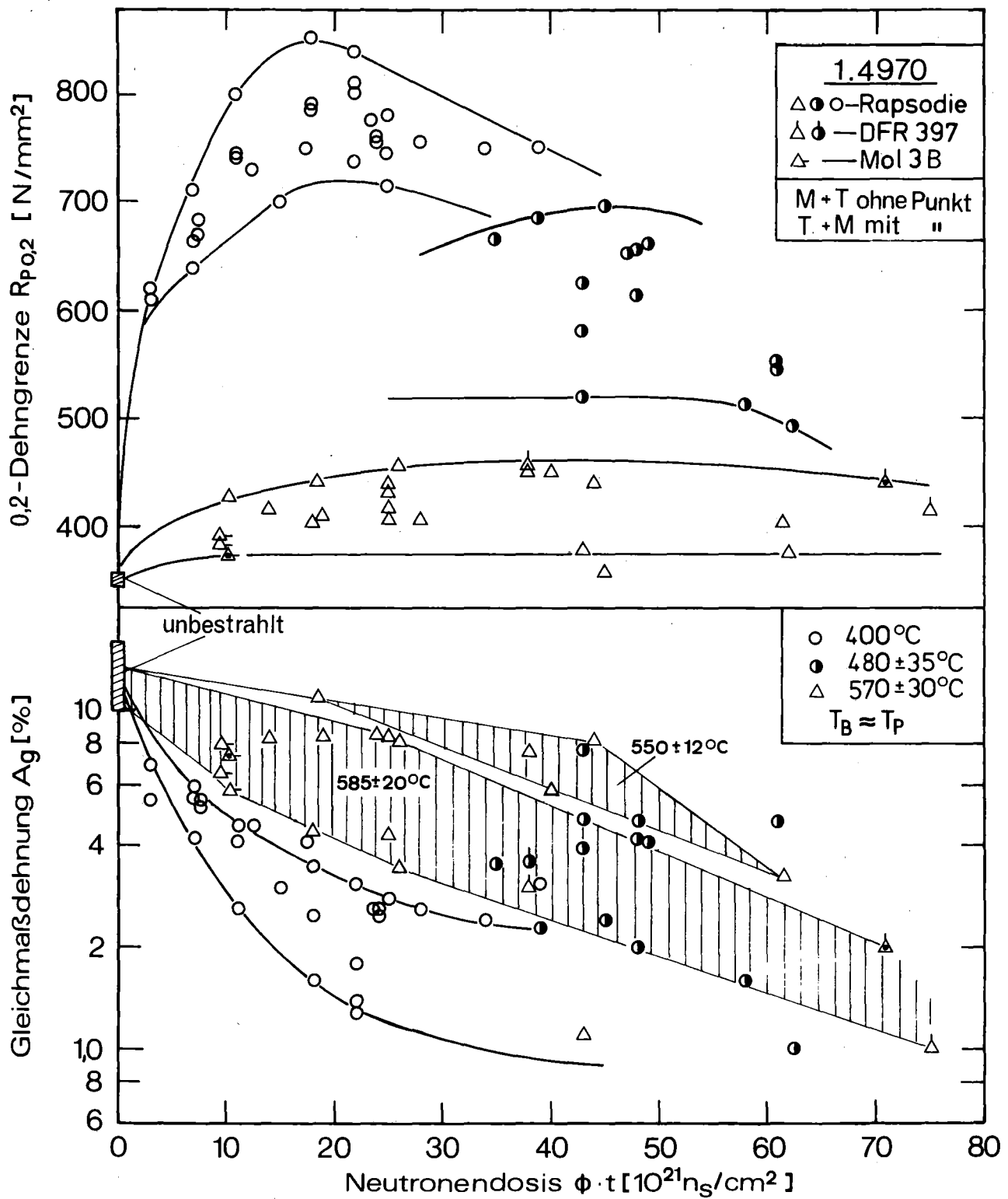


Abb. 33: 0,2-Dehngrenze und Gleichmaßdehnung des Stahles 1.4970 in Abhängigkeit von der Dosis schneller Neutronen.

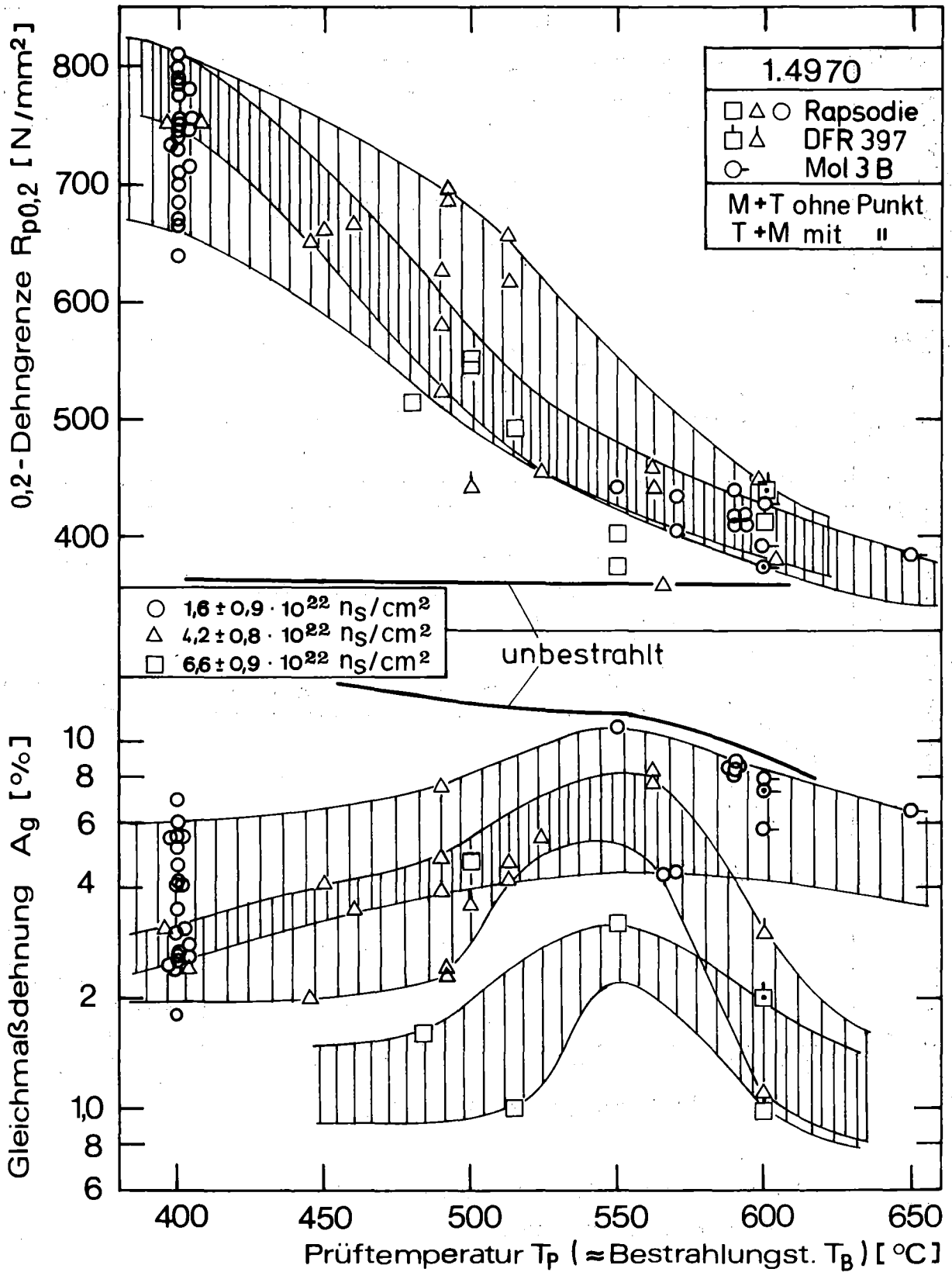


Abb. 4: 0,2-Dehngrenze und Gleichmaßdehnung des Stahles 1.4970 in Abhängigkeit von der Prüf- bzw. Bestrahlungstemperatur.

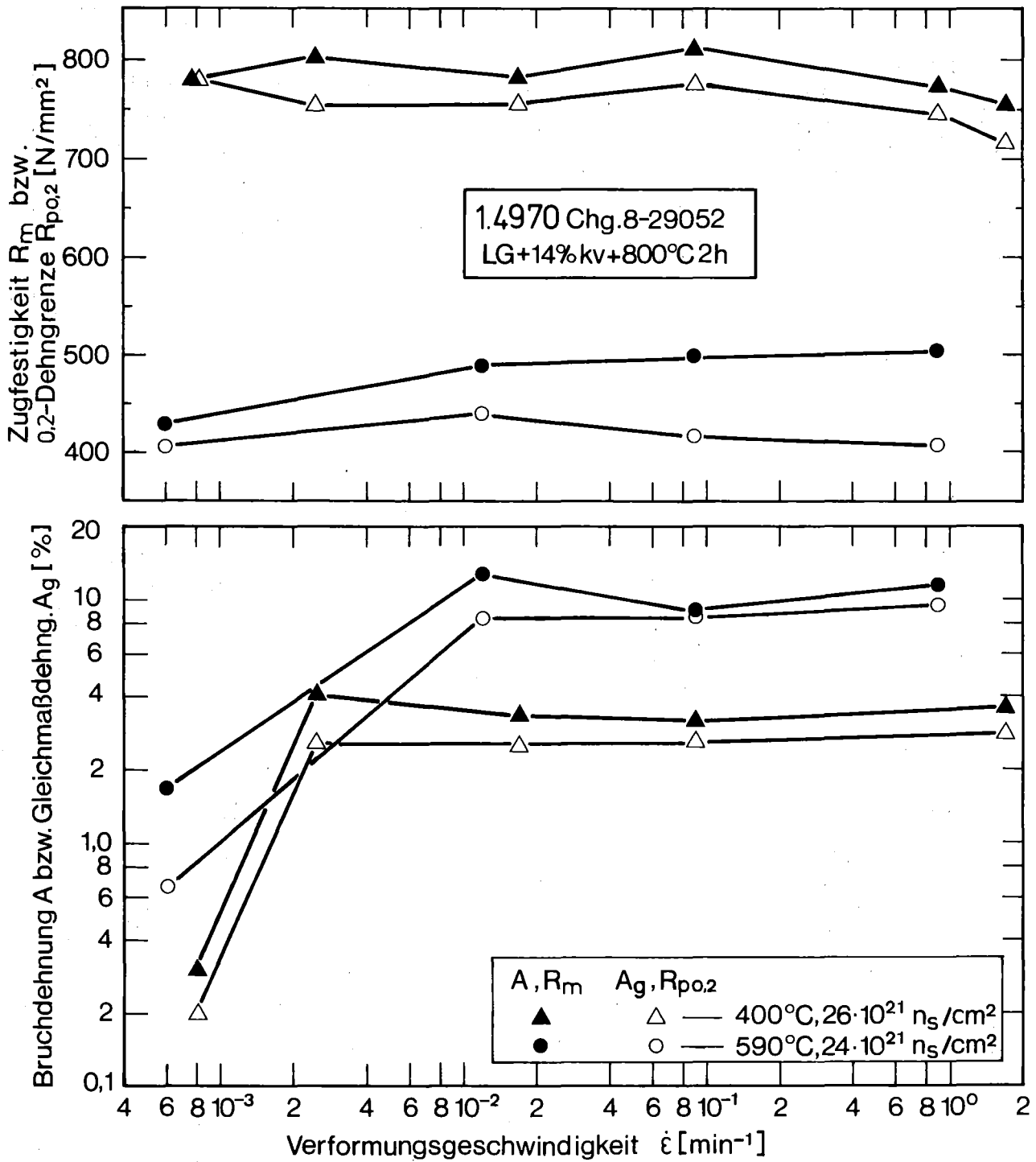


Abb. 5: Abhängigkeit der Zugeigenschaften des Stahles 1.4970 von der Verformungsgeschwindigkeit.

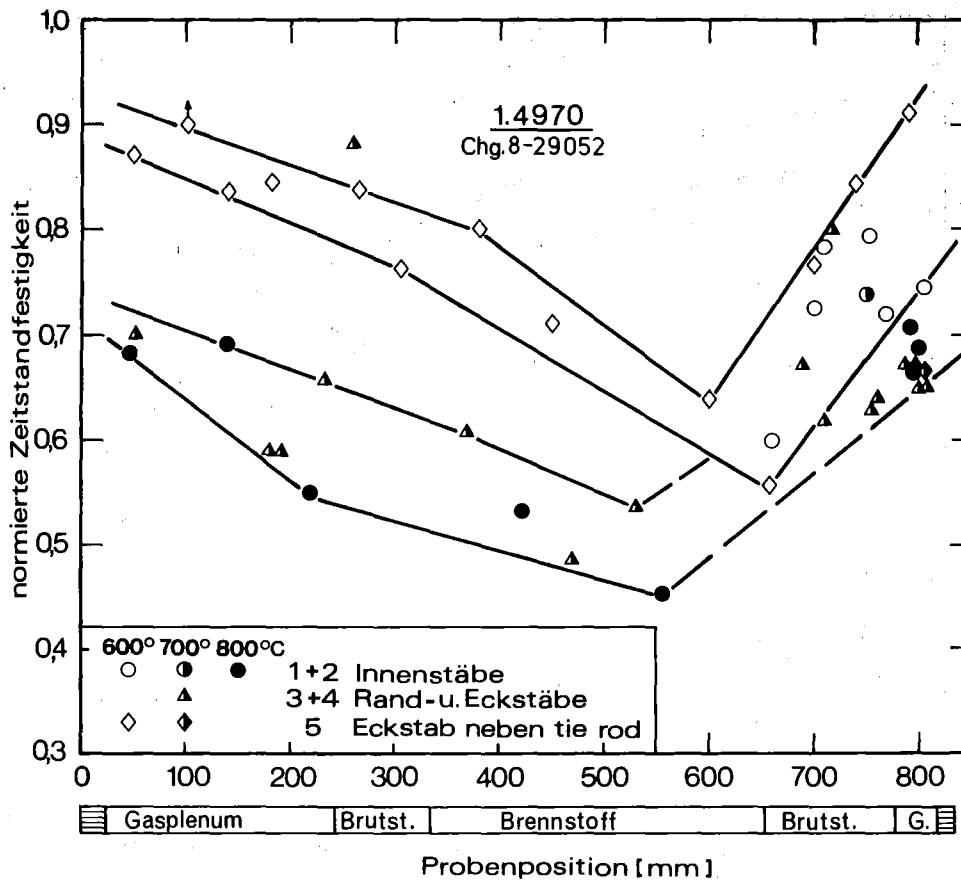


Abb. 6: Abhängigkeit der normierten Zeitstandfestigkeit des Stahles 1.4970 (Chg. 8-29052) von der Probenposition.

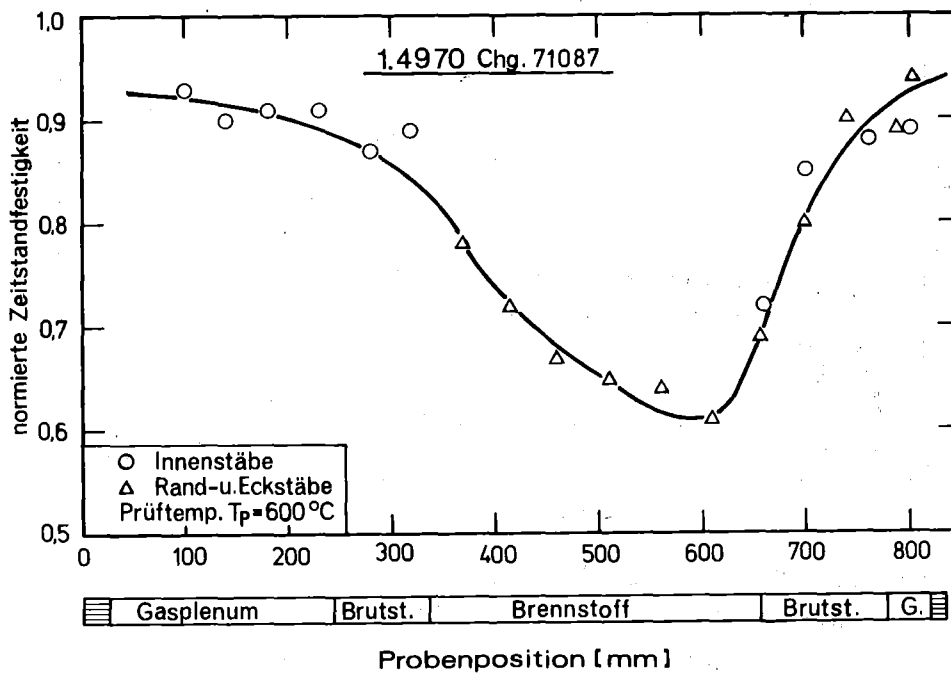


Abb. 7: Abhängigkeit der normierten Zeitstandfestigkeit des Stahles 1.4970 (Chg. 71087) von der Probenposition.

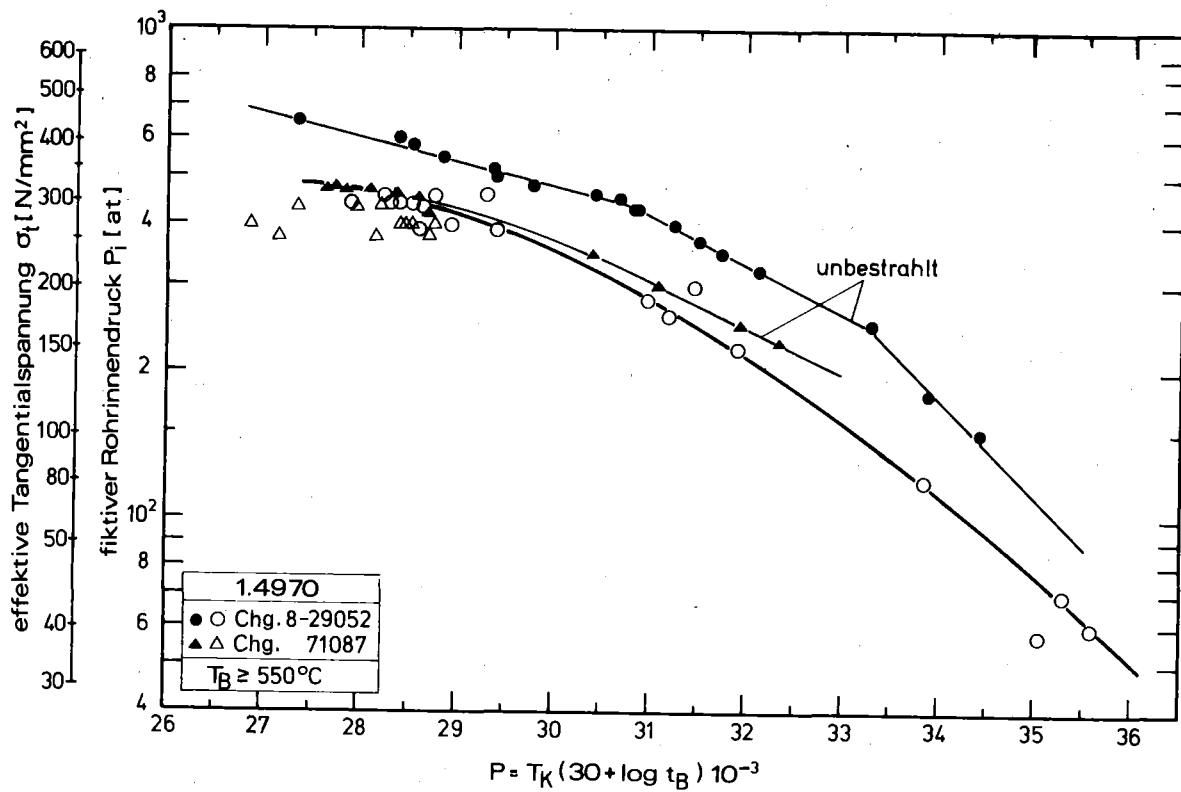


Abb. 8: Zeitbruchlinien des Stahles 1.4970 in bestrahltem und unbestrahltem Zustand dargestellt nach dem Parameter von Larson und Miller.

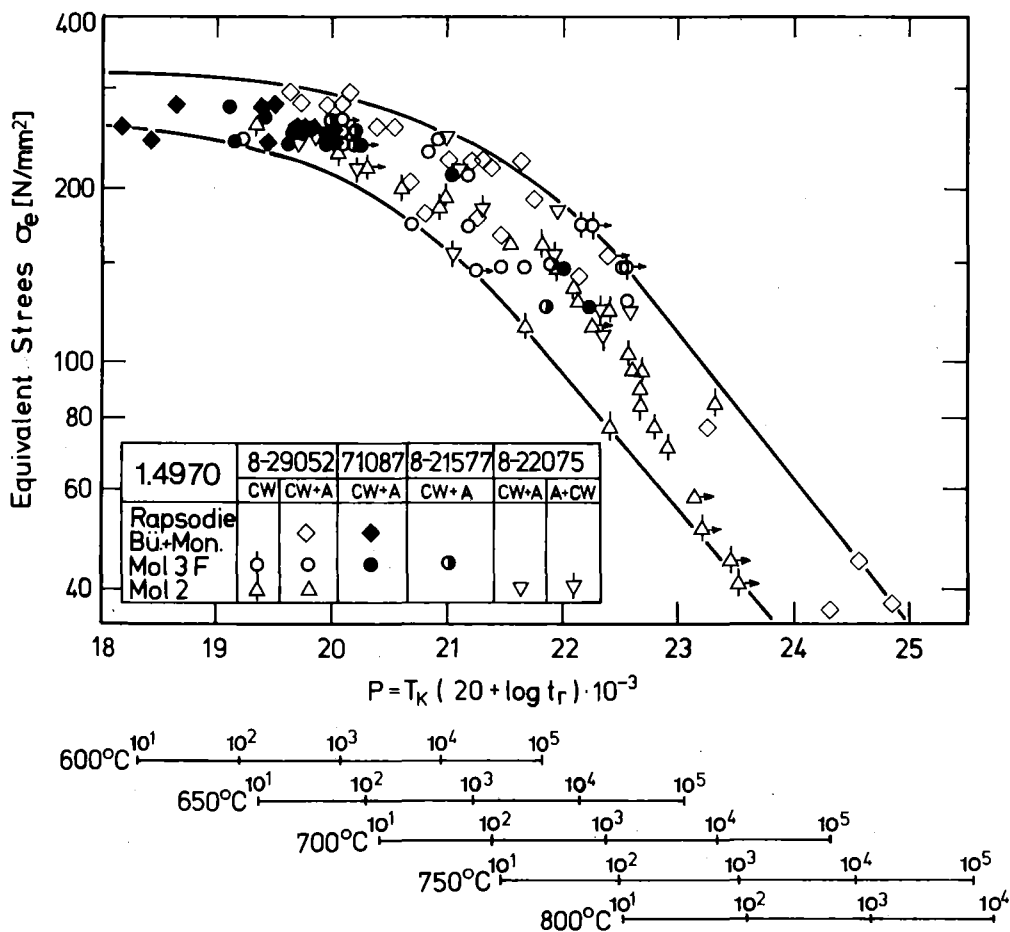


Abb. 9: Streuband der Zeitstandfestigkeitswerte aus Rohrinneindruckversuchen von bestrahlten Rohren aus dem Stahl 1.4970 dargestellt nach dem Parameter von Larson und Miller.

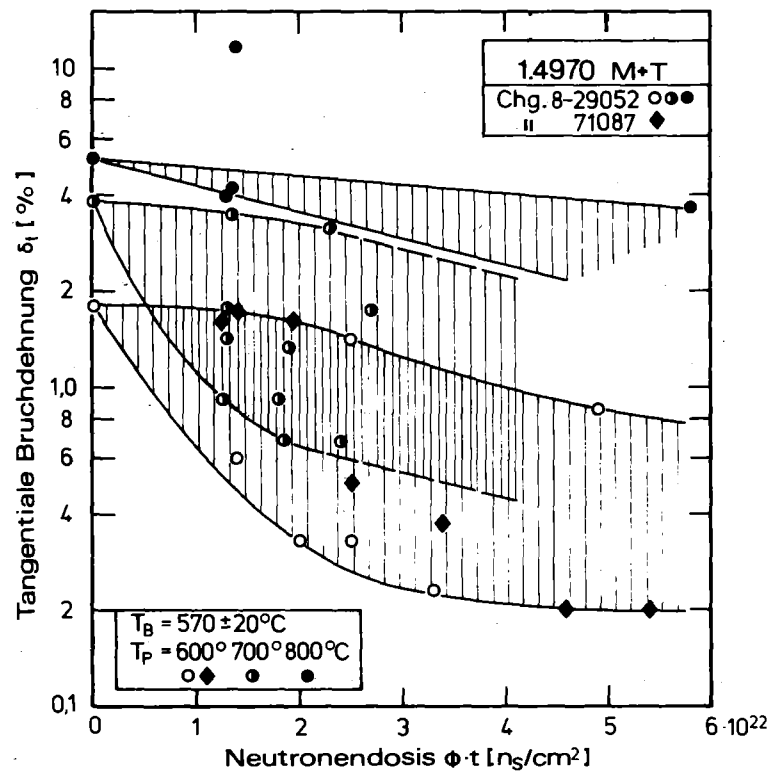


Abb. 10: Tangentielle Bruchdehnung aus Rohrinne-
druckzeitstandversuchen des Stahles
1.4970 in Abhängigkeit von der Dosis
schneller Neutronen.

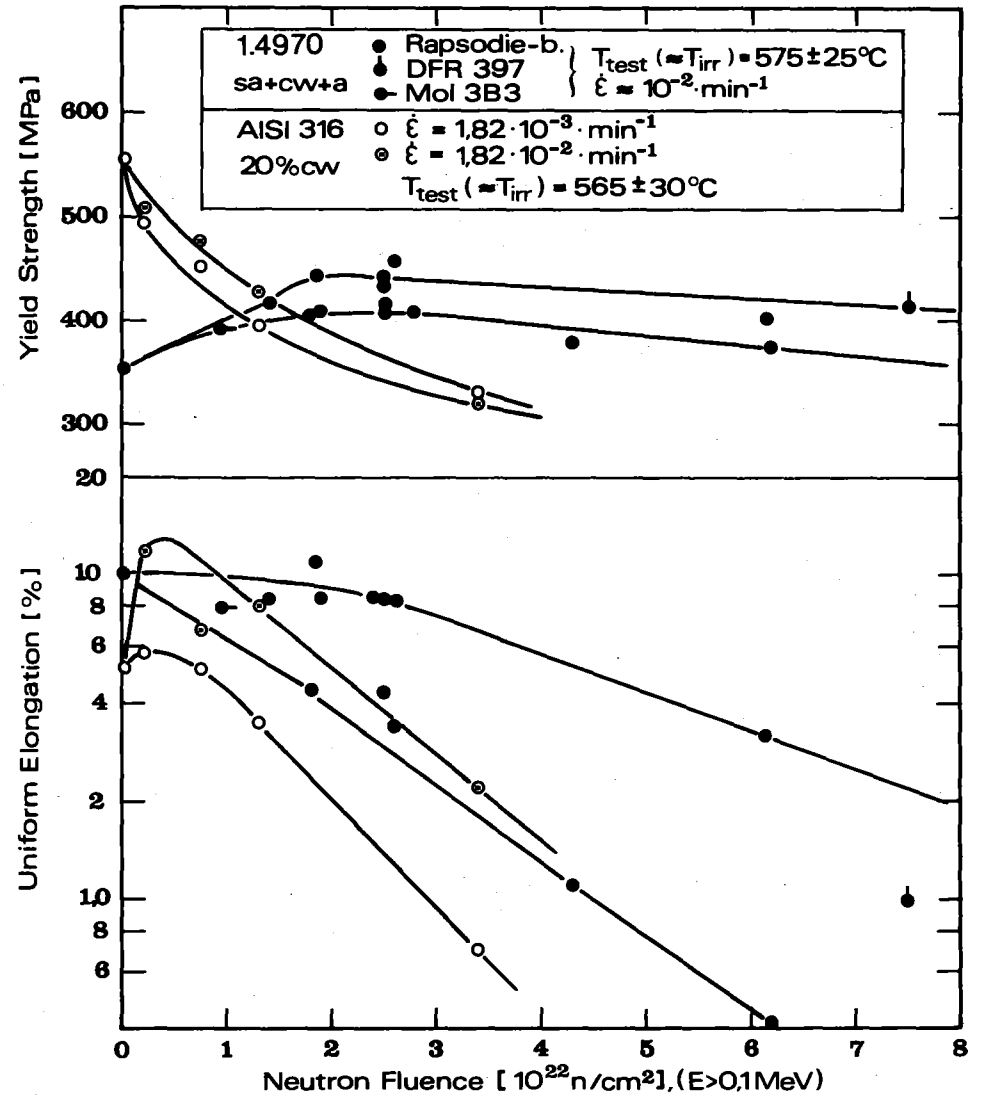


Abb. 11: 0,2-Dehngrenze und Gleichmaßdehnung der Stähle
1.4970 und AISI 316 (HEDL-TME 76-13) in Ab-
hängigkeit v. d. Dosis schneller Neutronen.



$$\phi \cdot t = 3 \cdot 10^{21} \text{ n}_s/\text{cm}^2$$



$$\phi \cdot t = 15 \cdot 10^{21} \text{ n}_s/\text{cm}^2$$



$$\phi \cdot t = 31 \cdot 10^{21} \text{ n}_s/\text{cm}^2$$

Bild 12: Versetzungsdichte nach Neutronenbestrahlung ($E > 0.1 \text{ MeV}$) bei 400°C (Vergr. 120.000-fach)