

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

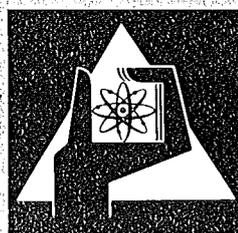
April 1974

KFK 1963

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Beschreibung der Kriechkurven zweier austenitischer Stähle
aus Zeitstandversuchen mit konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit

L. Schäfer, K.D. Closs



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK - 1963

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Beschreibung der Kriechkurven zweier austenitischer Stähle aus Zeit-
standversuchen mit konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit

von

L. Schäfer

K.D. Closs

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Übersicht

Beschreibung der Kriechkurven zweier austenitischer Stähle aus Zeitstandversuchen mit konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit

Es wird über drei Methoden berichtet, nach denen Kriechkurven aus Zeitstandversuchen mit linear ansteigender Last beschrieben werden können. Die Zeitstandversuche wurden durchgeführt an unbestrahlten Rohren aus dem austenitischen Stahl 1.4981 im ein- und mehrachsigen Spannungszustand und an unbestrahlten und bestrahlten Flachproben aus dem austenitischen Stahl 1.4970. Die drei Beschreibungsmethoden sind ein grafisches Verfahren, eine Analyse der Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Spannung und dem Lastanstieg und die Anwendung der time-fraction Regel auf Dehngrenzlinien. Die verschiedenen Verfahren führen zu etwa gleichwertigen Ergebnissen, haben aber andere Vor- und Nachteile, die diskutiert werden.

Abstract

Creep behaviour of two austenitic stainless steels under increasing load.

Creep tests under linear increasing stress have been performed on unirradiated tubular specimens under uniaxial and biaxial stress conditions (steel No. 1.4981) and on unirradiated and irradiated sheet tensile specimens (steel No. 1.4970). Three methods have been evaluated for describing the creep curves under increasing stress. The three methods are: a graphic representation, an analysis of the creep rate as a function of stress and stress rate, and the application of the time-fraction rule for creep strength curves. The different methods give similar results. The advantages and disadvantages of the three methods are discussed.

I n h a l t

1. Einleitung
2. Versuchsdurchführung und Versuchsmaterial
3. Methoden zur Beschreibung der Kriechkurven
 - 3.1 Grafische Methode
 - 3.2 Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit
 - 3.3 Time-fraction Regel
4. Versuchsergebnisse
 - 4.1 Rohre aus dem Stahl 1.4981 bei Zugbelastung
 - 4.2 Rohre aus dem Stahl 1.4981 bei Belastung durch Innendruck
 - 4.3 Flachproben aus dem Stahl 1.4970
 - 4.4 Flachproben aus dem Stahl 1.4970 im bestrahlten Zustand
5. Diskussion der Ergebnisse
6. Bezeichnung der Symbole und Anmerkung
7. Literatur
8. Tabellen und Abbildungen

1. Einleitung

Im Institut für Material- und Festkörperforschung wurden Zeitstandversuche mit konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit durchgeführt. Solche Zeitstandversuche sind kein Materialprüfverfahren, durch das allgemeingültige oder weiter übertragbare Meßergebnisse erzielt werden können. Sie stellen lediglich die Simulation eines speziellen Anwendungsfalles dar, der aus den vorhandenen Daten des klassischen Zeitstandversuches mit konstanter Last nicht ausreichend genau berechnet werden kann. Der hier vorliegende Anwendungsfall ist gegeben durch den Druckanstieg infolge Spaltgasfreisetzung in einem Schnellbrüter-Brennstab. Es wird angenommen, daß der Spaltgasdruck bei Null beginnend in 10.000 h linear auf 80 at ansteigt, was bei den Hüllrohrabmessungen von 6 x 0,38 mm einer Anstiegsgeschwindigkeit der Vergleichsspannung in der Rohrwand von etwa $\dot{\sigma}_v = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kp/mm}^2 \cdot \text{h}$ entspricht. Versuche mit so kleinen Lastanstiegsgeschwindigkeiten konnten aus Zeitgründen und wegen der geringen zu erwartenden Dehnung nicht durchgeführt werden. Daher wurden Lastenanstiegsgeschwindigkeiten gewählt, die mindestens eine Dekade größer waren als in dem beschriebenen Anwendungsfall. Die gemessenen Kriechkurven werden nach drei Methoden dargestellt, mit deren Hilfe Kriechkurven beliebiger Lastanstiegsgeschwindigkeiten berechnet werden können.

Es handelt sich dabei um ein rein grafisches Verfahren, um eine Analyse der Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Spannung und dem Lastanstieg und um eine Berechnung nach der eingetretenen Materialschädigung entsprechend der time-fraction Regel.

2. Versuchsdurchführung und Versuchsmaterial

Der in der Einleitung beschriebene Anwendungsfall beinhaltet einen bestimmten Druckaufbau in einem Rohr. Entsprechende Simulationsversuche sind an dem Stahl 1.4981 mit Lastanstiegsgeschwindigkeiten zwischen 2,5 und 80 at/Tag durchgeführt worden. In den Tabellen 1 und 2 sind die Daten über die chemische Zusammensetzung des Stahles, über seinen Vorbehandlungszustand, über den Versuchsablauf und die sich ergebenden Meßwerte zusammengefaßt. Abb. 1 zeigt die verwendete Probenform B. Die Dehnung der Rohrproben wurde über zwei induktive Wegaufnehmer, die in radialer Richtung gegenüberliegend angeordnet sind, gemessen und als Durchmesserzunahme auf einem Schreiber registriert. Die Dehnungsmessung an Rohren mit einem Außendurch-

messer von nur 6 mm ist wegen der geringen Meßlänge schwierig. Daher wurden gleiche Rohre auch in Längsrichtung auf Zug beansprucht, um eine ausreichend große Meßlänge von 30 mm zur Verfügung zu haben. Probenform A und Meßdaten sind wiederum in Abb. 1 und Tabelle 1 und 2 dargestellt. Die Meßergebnisse aus den Versuchen mit ein- und mit mehrachsigen Spannungszustand lassen sich bei Verwendung einer geeigneten Festigkeitshypothese ineinander umrechnen. Im realen Anwendungsfall wird das Hüllmaterial durch Neutronen bestrahlt. Um möglicherweise Bestrahlungseinflüsse auf das Kriechverhalten unter ansteigender Last mit zu erfassen, wurde der Stahl 1.4970 sowohl im bestrahlten als auch im unbestrahlten Zustand untersucht. Einzelheiten über die Versuchsdurchführung, die Versuchsergebnisse und über das Versuchsmaterial sowie die Probenform C sind in den Tabellen 1 und 2 und in Abb. 1 dargestellt. Die Versuche wurden in den Heißen Zellen der GfK in Zusammenarbeit mit dem IMF durchgeführt.

Zur Versuchsdurchführung sei erwähnt, daß der Lastanstieg nicht kontinuierlich erfolgte wie der Spaltgasdruckaufbau in einem Brennstab, sondern aus versuchstechnischen Gründen in Stufen hochgeregelt wird. Die Versuchsergebnisse werden dadurch nicht beeinflußt. In Vorversuchen an verschiedenen austenitischen Stählen (1.4961, 1.4981, 1.4988) wurden die Versuchsparameter Lasterhöhung, Belastungszeit je Laststufe und Lastanstiegsgeschwindigkeit systematisch variiert. Dabei ergaben sich in dem Bereich von großen bis zu sehr kleinen Laststufen keine unterschiedlichen Ergebnisse, so daß dasselbe auch für einen stufenlos kontinuierlichen Lastanstieg zu erwarten ist. - Die Versuchstemperatur betrug in allen hier behandelten Fällen 700°C . Die Versuche wurden in Normalatmosphäre durchgeführt.

3. Methoden zur Beschreibung der Kriechkurven

Die hier dargestellten Methoden zur Beschreibung der gemessenen Kriechkurven sind sehr verschieden voneinander, um echte Alternativen darzustellen. Variationen von ihnen sind möglich, wurden z.T. auch erprobt, sind aber in der Anwendung meist schwieriger.

3.1 Grafische Methode

Die Ergebnisse von Zeitstandversuchen mit ansteigender Last lassen sich ebenso wie solche mit konstanter Last in einen Zeitstanddiagramm darstellen. Zur Unterscheidung beider ist es lediglich angebracht, bei Versuchen mit ansteigender Last den zeitlichen Anstieg der nominellen Spannung mit einzuzichnen (Abb. 3, 7, 10 u. 13). Auf diesen stufenförmigen Linien werden die jeweils erreichten Dehnungen markiert. Die Verbindung zwischen Punkten gleicher Dehnung stellen die Dehngrenzlinien dar. Auf diese Weise läßt sich bei jeder beliebigen Lastanstiegsgeschwindigkeit für jede Belastungszeit die Dehnung abgreifen und eine entsprechende Kriechkurve zeichnen.

3.2 Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit

Aus den gemessenen Kriechkurven der Abbildungen 2, 6, 9 und 12 wurde für jede Laststufe und Lastanstiegsgeschwindigkeit die mittlere Kriechgeschwindigkeit bestimmt. Sie ergibt sich als Kriechverformung während der Belastungsstufe dividiert durch die Belastungszeit

$$\dot{\epsilon} = \Delta\epsilon/\Delta t.$$

Diese Kriechgeschwindigkeiten wurde für jede Spannungsanstiegsgeschwindigkeit gesondert in Abhängigkeit von der jeweils herrschenden nominellen Spannung dargestellt.

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma, \dot{\sigma})$$

In doppeltlogarithmischer Darstellung erhält man für die verschiedenen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten eine Kurvenschar, von der jede Einzelkurve sich durch ein zweigliedriges Polynom folgender Form darstellen läßt:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^B + C \cdot \sigma^D$$

Dieses Polynom beschreibt eine Kurve, die an beiden Enden asymptotisch in Geraden ausläuft. Im Rahmen der experimentellen Meßgenauigkeit kann die Annahme getroffen werden, daß sich alle Kurvenenden auf je einer Seite solchen Geraden asymptotisch nähern, die die gleiche Steigung haben. Dadurch werden in dem Polynom die Exponenten B und D echte Konstanten und die Fak-

toren A und C sind die alleinigen Informationsträger über die Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit. A und C sind die Teil-Kriechgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}_1$ und $\dot{\epsilon}_2$, die bei der Spannung $\sigma = 1$ herrschen. Trägt man ihre Abhängigkeit von der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit im doppeltlogarithmischen Maßstab auf, so ergeben sich in guter Näherung Geraden mit folgender Beschreibung:

$$A = a_1 \cdot \dot{\sigma}^{b_1} \text{ und } C = a_2 \cdot \dot{\sigma}^{b_2}$$

Damit ist die Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Spannung und der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit gegeben durch den Ausdruck

$$\dot{\epsilon} = a_1 \cdot \dot{\sigma}^{b_1} \cdot \sigma^B + a_2 \cdot \dot{\sigma}^{b_2} \cdot \sigma^D. \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung des zeitlich linearen Anstiegs der nominellen Spannung $\sigma = \dot{\sigma} \cdot t$ erhält man nach Integration die Funktion für die gemessenen Kriechkurven:

$$\epsilon = a_1 \cdot \dot{\sigma}^{b_1} + B \cdot \frac{1}{B+1} \cdot t^{B+1} + a_2 \cdot \dot{\sigma}^{b_2} + D \cdot \frac{1}{D+1} \cdot t^{D+1} \quad (2)$$

3.3 Time-fraction Regel

Die entwickelte Methode zur Erstellung von Kriechkurven bei ansteigender Last basiert auf einer Überlegung von Robinson [1], die in bereits abgewandelter Form folgendes beinhaltet:

Wird eine Zeitstandprobe wechselnden Spannungen unterworfen, so erfährt sie bei jeder einzelnen Spannung eine bestimmte Schädigung. Diese Schädigung wird definiert als der Quotient aus der Belastungszeit bei der betrachteten Spannung und der Standzeit, die die Probe im Zeitstandversuch bei der gleichen Spannung erreicht hätte. Addiert man alle aufeinanderfolgenden Schädigungen, so wird die Probe dann brechen, wenn als Summe der Einzelschädigungen die Gesamtschädigung 1 erreicht ist.

$$\frac{t_1}{t_{1,Br.}} + \frac{t_2}{t_{2,Br.}} + \dots + \frac{t_n}{t_{n,Br.}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_{i,Br.}} = 1$$

Die Gesamtstandzeit unter wechselnden Belastungen ist die Summe der einzelnen Belastungszeiten.

$$t_{\text{Br.}} = \sum_{i=1}^n t_i$$

Bisher wurden die einzelnen Belastungszeiten jeweils auf die Standzeiten bezogen. Hier wird vorgeschlagen, die einzelnen Belastungszeiten auf die entsprechenden Dehnzeiten zu beziehen, wobei analog zur Zeitbruchlinie jede Dehngrenzlinie gesondert behandelt wird. Addiert man alle aufeinanderfolgenden Schädigungen, die unter Verwendung einer Dehngrenzlinie berechnet wurden, so wird eben diese Dehnung dann erreicht, wenn als Summe der Einzelschädigungen die Gesamtschädigung 1 erreicht ist.

$$\frac{t_1}{t_{1,\epsilon_j}} + \frac{t_2}{t_{2,\epsilon_j}} + \dots + \frac{t_n}{t_{n,\epsilon_j}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_{i,\epsilon_j}} = 1$$

Zum Erreichen einer bestimmten Dehnung ϵ_j ist unter wechselnder Belastung die Dehnzeit t_{ϵ_j} erforderlich.

$$t_{\epsilon_j} = \sum_{i=1}^n t_i$$

Aus einer Vielzahl solcher Dehnungen ϵ_j und den entsprechenden Dehnzeiten t_{ϵ_j} kann man punktförmig die Kriechkurven für wechselnde Belastung berechnen.

In dem hier beschriebenen allgemeinen Fall mit wechselnder Belastung ist der spezielle Fall einer stufenförmig ansteigenden Last mit enthalten. Würde man voraussetzen, daß bei Zeitstandversuchen unter wechselnder Last eine bestimmte Dehnung dann erreicht wird, wenn als Summe der Einzelschädigungen der Wert 1 erreicht ist, so könnte man aus den Dehngrenzlinien von Kriechversuchen mit konstanter Last unmittelbar die Kriechkurven für Versuche unter wechselnder Last punktweise berechnen. Vorversuche mit verschiedenen austenitischen Stählen haben aber gezeigt, daß die Gesamtschädigung beim Bruch der Probe meist ungleich 1 ist [2]. Dieses Verhalten wird besonders bei thermodynamisch instabile Legierungen [3], [4] beobachtet. Der Grund

dafür sind Strukturänderungen des Werkstoffes, wie sie bei der Erholung von Kaltverformungen oder beim Ausscheiden neuer Phasen ablaufen und unterschiedliche Bruchmechanismen. Daher muß für jeden Werkstoff zunächst untersucht werden, bei welchen Gesamtschädigungen die verschiedenen Dehnungen bzw. der Bruch der Probe eintreten. Dazu addiert man alle Einzelschädigungen, die beispielsweise unter Bezugnahme auf eine bestimmte Dehngrenzlinie errechnet wurden, bis die entsprechende Dehnung unter wechselnder Last erreicht ist. Die Summe der Einzelschädigungen ist dann die Gesamtschädigung, bei der die betrachtete Dehnung eintritt. Ferner wird untersucht, ob bei allen Dehnungsbeträgen und beim Bruch der Probe die gleiche Gesamtschädigung erreicht wird, oder ob es eine Abhängigkeit der Gesamtschädigung von der Größe der Dehnung und in den hier behandelten Fällen von der Lastanstiegsgeschwindigkeit gibt.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Rohre aus dem Stahl 1.4981 bei Zugbelastung

Die gemessenen Kriechkurven sind in Abb. 2 dargestellt. Die Meßwerte können oberhalb 0,1% Dehnung als genau angesehen werden. Darunter ist die echte Kriechdehnung nur schwierig zu ermitteln, weil die von der Gesamtdéhnung abzuziehende Belastungsdehnung meßtechnisch schwer zu erfassen ist.

a) Grafische Methode

In Abb. 3 sind die Dehngrenzlinien für 0,05%; 0,1%; 0,2%; 0,5%; 2% und 10% Dehnung sowie die Zeitbruchlinie eingezeichnet. Hieraus läßt sich für beliebige Lastanstiegsgeschwindigkeiten die Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit grafisch entnehmen. Daß die Dehngrenzlinien richtig gezeichnet wurden, läßt sich in Abb. 2 kontrollieren, wo für die gemessenen Lastanstiegsgeschwindigkeiten Kriechkurven aus den Dehngrenzlinien eingezeichnet sind, die gut mit den gemessenen Kriechkurven übereinstimmen.

b) Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit der mittleren Kriechgeschwindigkeit von der momentan herrschenden Spannung und der eingestellten Spannungsanstiegsgeschwindigkeit dargestellt. Die Kurven lassen sich durch Gleichung (1) beschreiben,

wobei die Konstanten folgende Werte haben:

$$a_1 = 3,1 \cdot 10^{-13}$$

$$a_2 = 4,5 \cdot 10^{-5}$$

$$b_1 = -0,86$$

$$b_2 = 0,61$$

$$B = 7,4$$

$$D = 0,49$$

Die daraus errechneten Kriechkurven stimmen mit den gemessenen gut überein, wie aus Abb. 2 ersichtlich ist.

c) Time-fraction Regel

Aus Kriechkurven bei konstanter Last werden die Dehngrenzlinien und die Zeitbruchlinie bestimmt. Diese dienen als Bezugsgrößen für die Berechnung der Einzelschädigungen. Addiert man alle Einzelschädigungen, die bis zum Erreichen einer bestimmten Dehnung bzw. des Bruches angesammelt wurden, so erhält man die Gesamtschädigung, die für das betrachtete Ereignis bei einer bestimmten Lastanstiegsgeschwindigkeit gilt. Abb. 5 zeigt die einzelnen Gesamtschädigungen in Abhängigkeit von der Dehnung und der Lastanstiegsgeschwindigkeit. Eine systematische Abhängigkeit ist nicht erkennbar. Daher wird der Mittelwert $S = 0,46$ zur Berechnung einzelner Kriechkurvenpunkte benutzt. Es wurden nur einzelne Werte als Stichproben berechnet. Sie sind in Abb. 2 durch Kreuze markiert. Sie stimmen gut mit den gemessenen Kriechkurven überein.

4.2 Rohre aus dem Stahl 1.4981 bei Belastung durch Innendruck

Die gemessenen Kriechkurven sind in Abb. 6 dargestellt. Die Meßwerte können oberhalb 0,3% Dehnung als ausreichend genau angesehen werden.

a) Grafische Methode

In Abb. 7 sind die Dehngrenzlinien für 0,2%; 0,5%; 1% und 2% eingezeichnet. Die Dehngrenzlinien für höhere Dehnungen und die Zeitbruchlinie decken sich fast mit der 2% Dehngrenzlinie. Aus dieser Darstellung läßt sich für beliebige Lastanstiegsgeschwindigkeiten die Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit grafisch entnehmen. Zur Kontrolle, daß die Dehngrenzlinien richtig gezeichnet wurden, sind in Abb. 6 Kriechkurven für die im Experiment angewendeten Lastanstiegsgeschwindigkeiten eingezeichnet, die sich mit den gemessenen Kriechkurven gut decken.

b) Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit

In Abb. 8 ist die Abhängigkeit der mittleren Kriechgeschwindigkeit von der momentan herrschenden Last (Druck) und der eingestellten Lastanstiegsgeschwindigkeit dargestellt.

Die Kurven werden durch Gleichung (1) beschrieben.

Darin haben die Konstanten folgende Werte:

$$\begin{array}{ll} a_1 = 2,8 \cdot 10^{-57} & a_2 = 0,0465 \\ b_1 = -2,68 & b_2 = 0,72 \\ B = 24 & D = 0,2 \end{array}$$

Die daraus errechneten Kriechkurven stimmen mit den gemessenen gut überein, wie aus Abb. 6 ersichtlich ist.

c) Time-fraction Regel

Die Anwendung des beschriebenen Rechenverfahrens ist auch hier möglich. Die Ergebnisse bedürfen aber noch einer weiteren experimentellen Überprüfung, weil sich im Gegensatz zu anderen Experimenten eine eindeutige Abhängigkeit von der Dehnung und der Lastanstiegsgeschwindigkeit gezeigt hat. Die Schädigung nimmt mit zunehmender Dehnung ab, bis sie bei der Bruchdehnung etwa den Wert erreicht hat, der für die gleichen Rohre im einachsigen Spannungszustand gefunden wurde.

4.3 Flachproben aus dem Stahl 1.4970

Die gemessenen Kriechkurven sind in Abb. 9 dargestellt. Die Meßwerte können oberhalb 0,1% Dehnung als ausreichend genau angesehen werden. Die Kurve mit 1 kp/mm² konnte erst ab 200 µm Dehnung ausgewertet werden.

a) Grafische Methode

In Abb. 10 sind ausgewählte Dehnungsgrenzlinien und die Zeitbruchlinie dargestellt. Da der Werkstoff nur eine geringe Bruchdehnung hat, ist die Streuung der Meßpunkte bei kleinen Dehnungen relativ groß. Trotzdem scheint die Lage der Dehnungsgrenzlinien richtig zu sein, denn die Kriechkurven in Abb. 9 lassen sich aus ihnen ausreichend gut rekonstruieren. Die stärkeren Abweichungen im unteren Dehnungsbereich bei den ^{beiden} Kurven mit den höchsten Span-

nungsanstiegsgeschwindigkeiten könnten auf Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Belastungsdehnung zurückzuführen sein.

b) Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit

Aus den Kriechkurven der Abb. 9 wurden die mittleren Kriechgeschwindigkeiten für jede Laststufe und jede Lastanstiegsgeschwindigkeit bestimmt und in Abb. 11 in Abhängigkeit von der jeweils herrschenden Spannung und der eingestellten Spannungsanstiegsgeschwindigkeit als Parameter dargestellt. Die Kurven lassen sich durch Gleichung (1) mit den Konstanten

$$\begin{array}{ll} a_1 = 2,86 \cdot 10^{-23} & a_2 = 2,57 \cdot 10^{-1} \\ b_1 = 0 & b_2 = 0,81 \\ B = 15,85 & D = 0,72 \text{ beschreiben.} \end{array}$$

Die daraus errechneten Kriechkurven stimmen mit den gemessenen innerhalb der Meß- bzw. Probenabweichung überein wie aus Abb. 9 ersichtlich ist.

c) Time-fraction Regel

Die vorgeschlagene Rechenmethode nach einer time-Fraction Regel sollte auch in diesem Beispiel anwendbar sein. Sie wurde nicht ausgeführt, weil die gemessenen Ausgangsdaten zu ungenau waren und zu Fehlinterpretationen über den Zahlenwert und die Abhängigkeit der Schädigung von der betrachteten Dehnung und der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit führen könnten.

4.4 Flachproben aus dem Stahl 1.4970 im bestrahlten Zustand

Die Zeitstandversuche mit ansteigender Last wurden nicht mit der Anfangsspannung Null, sondern mit $\sigma_0 = 3 \text{ kp/mm}^2$ begonnen. Die Kriechkurven der Abb. 12 und die Dehngrenzlinien in Abb. 13 wurden so gezeichnet, als wäre der Spannungsanstieg bei Null begonnen worden und als hätte in dem weggelassenen Spannungsbereich von Null bis 3 kp/mm^2 keine Dehnung stattgefunden. Das entspricht hinreichend genau den Realitäten. Die Proben sind im Reaktor BR2 in Mol/Belgien bei einer Temperatur von etwa $650 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zu einer Dosis von $9,4 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0,1 \text{ MeV}$) bestrahlt worden. Die gemessenen Kriechkurven sind abzüglich der jeweiligen Belastungsdehnung in Abb. 12 dargestellt. Die Meßwerte sind wegen der geringen Dehnung von weniger als $100 \text{ } \mu\text{m}$ wahrscheinlich mit einem relativ großen Fehler behaftet, was man

auch aus dem ungleichmäßigen Kurvenverlauf schließen muß. Die Probe mit der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von $3 \text{ kp/mm}^2 \cdot 7\text{d}$ ist nicht in der Meßlänge, sondern im Probenkopf gerissen, weshalb sie bei der Auswertung nur zur Darstellung der Dehngrenzlinien benutzt werden konnte und ansonsten unberücksichtigt bleibt.

a) Grafische Methode

In Abb. 13 sind ausgewählte Dehngrenzlinien und die Zeitbruchlinie dargestellt. Die Streuungen der Meßpunkte ist aus der geringen Dehnung des bestrahlten Werkstoffes verständlich. Trotzdem sind die Dehngrenzlinien genau genug, um die Kriechkurven der Abb. 12 zu rekonstruieren und gegebenenfalls Inter- und Extrapolationen zu nicht gemessenen Lastanstiegsgeschwindigkeiten vorzunehmen.

b) Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit

Aus den gemessenen Kriechkurven der Abb. 12 wurde für jede Laststufe und Lastanstiegsgeschwindigkeit die mittlere Kriechgeschwindigkeit bestimmt und in Abb. 14 in Abhängigkeit von der jeweils herrschenden Spannung und der eingestellten Spannungsanstiegsgeschwindigkeit dargestellt. Die berechneten Werte streuen sehr stark und es war schwierig, sie in Kurven auszudrücken. Andererseits ist es interessant zu prüfen, ob dieses Verfahren auch unter sehr ungünstigen Bedingungen geeignet ist, eine brauchbare Beschreibung der gemessenen Kriechkurven zu liefern. Die in Abb. 14 dargestellten Kurven werden durch Gleichung (1) beschrieben:

Die Zahlenwerte der Konstanten sind:

$$\begin{array}{ll} a_1 = 1,56 \cdot 10^{-19} & a_2 = 2 \cdot 10^{-3} \\ b_1 = 0 & b_2 = 0,83 \\ B = 13,5 & D = 1,49 \end{array}$$

Daraus werden entsprechend Abschnitt 3.2 Kriechkurven mit den im Experiment verwendeten Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten berechnet. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Kurven ist trotz der schwierigen Auswertung der Meßergebnisse gut wie aus Abb. 12 zu ersehen ist.

c) Time-fraction Regel

Gemäß Abschnitt 3.3 werden die Schädigungen in Abhängigkeit von der Dehnung und der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit bestimmt und in Abb. 15 dargestellt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird für die Rechnung bei Dehnungen zwischen 0,01 und 0,1% der Mittelwert der Schädigung $S = 0,3$ und für den Bruch der Mittelwert $S = 0,9$ verwendet. Die so errechneten Kriechkurven sind entsprechend Abb. 12 dem gemessenen Kurvenverlauf insbesondere bei kleinen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten gut angepaßt.

5. Diskussion der Ergebnisse

Zunächst sollen die drei alternativen Methoden beurteilt werden, die zur Beschreibung von Kriechkurven bei konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit benutzt wurden. Die Ergebnisse sind in erster Näherung gleichwertig, daher müssen auch andere Beurteilungskriterien herangezogen werden.

a) Die grafische Methode ist am einfachsten zu handhaben und am leichtesten auf Fehlerquellen zu durchschauen. An der Streuung der Meßpunkte kann man unmittelbar abschätzen, welche Abweichungen vom betrachteten Mittelwert etwa möglich sind, und bei fünf oder mehr Lastanstiegsproben sollte auch eine einfache statistische Beurteilung möglich sein.

b) Die Beschreibung der Kriechkurven durch eine Analyse der mittleren Kriechgeschwindigkeiten und ihrer Abhängigkeiten wäre, sofern genügend Versuche mit ansteigender Last vorlägen, für eine Auslegungsrechnung am ehesten geeignet. Die Analyse läßt sich sicher durch weitere oder andere Abhängigkeiten wie z.B. $\dot{\epsilon} = f(\sigma, \epsilon)$ oder $\dot{\epsilon} = f(\sigma, \dot{\sigma}, \epsilon)$ verbessern. Ebenso können genauere mathematische Beschreibungen für die gefundenen Abhängigkeiten benutzt werden, z.B. ein dreigliedriges Polynom oder der \sin^n .

c) Am wenigsten genau scheint die Methode nach der time-fraction Regel zu sein. Ihr Nachteil besteht darin, daß zusätzlich zu den vorliegenden Ergebnissen aus Zeitstandversuchen mit ansteigender Last noch solche aus Zeitstandversuchen mit konstanter Last einschließlich der ihnen anhaftenden Ungenauigkeiten verwendet werden müssen, um eine Schädigung zu bestimmen, deren Abhängigkeiten weder qualitativ noch quantitativ bisher bekannt und wahrscheinlich bei verschiedenen Werkstoffen auch verschieden sind. Andererseits ist es oft garnicht notwendig, den genauen Zahlenwert der Schädigung zu kennen. Im Normalfalle würde eine um den Faktor zehn falsch bestimmte Schädigung bei der Berechnung der Dehn- bzw. Standzeit nur eine Ab-

weichung um den Faktor 1,5 und im Extremfalle um den Faktor 2,2 bedingen. Diese Methode ist sicher in solchen Anwendungsfällen angebracht, wo Lastwechsel in unstetiger Weise stattfinden und die zeitliche Änderung der Spannung nicht als einfache Funktion darstellbar ist.

Zeitstandversuche mit ansteigender Last sind weniger gut geeignet, um den Einfluß unterschiedlicher Spannungszustände auf das Kriechverhalten eines Werkstoffes systematisch zu untersuchen oder um Aussagen über den Bestrahlungseinfluß zu machen. Solche Effekte sind viel eindeutiger an der Änderung des stationären Kriechens erkennbar, das hier in reiner Form aber nie auftritt. Trotzdem sollen die Beobachtungen kurz mitgeteilt werden. Die Kriechkurven von Rohren unter Längszug und Innendruck können mit der Festigkeitshypothese von v. Mises ineinander umgerechnet werden. Die Bestrahlung bewirkte bei Spannungen bis etwa 20 kp/mm^2 eine Erniedrigung der Kriechgeschwindigkeit, wie bereits in [5] berichtet, und darüber eine Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit. Im übrigen werden Standzeit und Bruchdehnung erniedrigt, was aus Tabelle 2 hervorgeht.

6. Bezeichnung der Symbole

A, B, C, D	Konstanten	} Gleichg. (1) u. (2)
a_1, a_2, b_1, b_2	Konstanten	
d	- Tag (24h)	
s	- Schädigung	
t	- Zeit	
$t_{Br.}$	- Standzeit	
t_e	- Dehnzeit	
ϵ	- Dehnung	
$\dot{\epsilon}$	- Kriechgeschwindigkeit	
σ	- Spannung	
$\dot{\sigma}$	- Spannungsanstiegsgeschwindigkeit	

Anmerkung

Die Kriechversuche mit ansteigender und mit konstanter Last wurden von folgenden Mitarbeitern des IMF betreut.

Herr Kempe: 1.4981 - Rohre im mehrachsigen Spannungszustand

Herr Schirra: 1.4981 - Rohre im einachsigen Spannungszustand

Herr Wassilew: 1.4970 - Flachproben, bestrahlt und unbestrahlt

Vorversuche wurden von Herrn Polifka und Herrn Müller durchgeführt.

Die Autoren danken allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit.

7. Literatur

[1] E. L. Robinson, N. Y. Schenectady
Trans. ASME 60 (1938) S. 253 und
Trans. ASME 74 (1952) S. 777-781

[2] L. Schäfer et al., unveröffentlicht

[3] M.M. Abo El Ata, J. Finnie
Trans. ASME No 71-WA/Met-1, Jan. 1972

[4] D.A. Woodford, Conf. on Properties of Creep-Resistant
Steels, VDEh, Düsseldorf, 1972

[5] H. Böhm, C. Wassilew, IEA Symposium on Fuel and Fuel
Elements for Fast Reactors
2.-6. Juli 1973, Brüssel

Tabelle 1

Werkstoff Nr.	1.4981	1.4970
DIN-Bezeichng.	X8CrNiMoNb 1616	X10NiCrMoTiB 1515
Hersteller	Mannesmann	Sandvik
Werksbezeichnung	16/16 (AN 15)	12 R 72 HV
Charge Nr.	HV 139	8-29053
Behandlungszustand	lg+ $\leq 5\%$ kv	1150 ^o 30'+10%kv+850 ^o 2h + Bestrahlung bzw. + 620 ^o 5334 h
Abmessungen	Rohr 6 x 0,38	0,5 mm-Flachproben (Meßlänge 25x4 mm)

Legierungszusammensetzung [%]

C	0,07	0,1
Si	0,58	0,43
Mn	0,97	1,94
Cr	17,0	14,48
Ni	16,6	14,97
Mo	1,64	1,3
Ti	0,08	0,58
ppm B	4	80
Ta/Nb	0,7	

Tabelle 2 Versuchsdaten

Werkstoff Nr.	Zustand	Belastung durch	Spannungs- anstieg	Standzeit t [h]	Bruchdehng. δ [%]
1.4981	unbestr.	Zug	$\frac{4 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 1\text{d}}$	104	26,7
			"	125	31,4
			$\frac{2 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 1\text{d}}$	204	34,7
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 1\text{d}}$	369	30,3
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 2\text{d}}$	683	29,7
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 4\text{d}}$	1077	15,0
			$\frac{0,5 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 4\text{d}}$	abgebr.	abgebr.
1.4981	unbest.	Innen- druck	80 at/d	78	16,7
			"	76	11,9
			"	76	21,3
			40 at/d	159	10,3
			"	154	13,5
			20 at/d	294	12,5
			"	297	11,5
			10 at/d	530	> 7,5
			"	548	16,3
			5 at/d	960	18,3
			"	952	19,5
2,5 at/d	1730	24,7			
1.4970	unbestr.	Zug	$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 0,5\text{d}}$	357	6,1
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 1\text{d}}$	677	~ 3,5
			$\frac{3 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 7\text{d}}$	1396	2
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 3\text{d}}$	1918	3
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 7\text{d}}$	4.214	1
1.4970	bestr.	Zug	$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 0,5\text{d}}$	306	0,51
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 1\text{d}}$	556	0,16
			$\frac{3 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 7\text{d}}$	967	0,29
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 3\text{d}}$	1322	0,15
			$\frac{1 \text{ kp}}{\text{mm}^2 \cdot 7\text{d}}$	2762	0,17

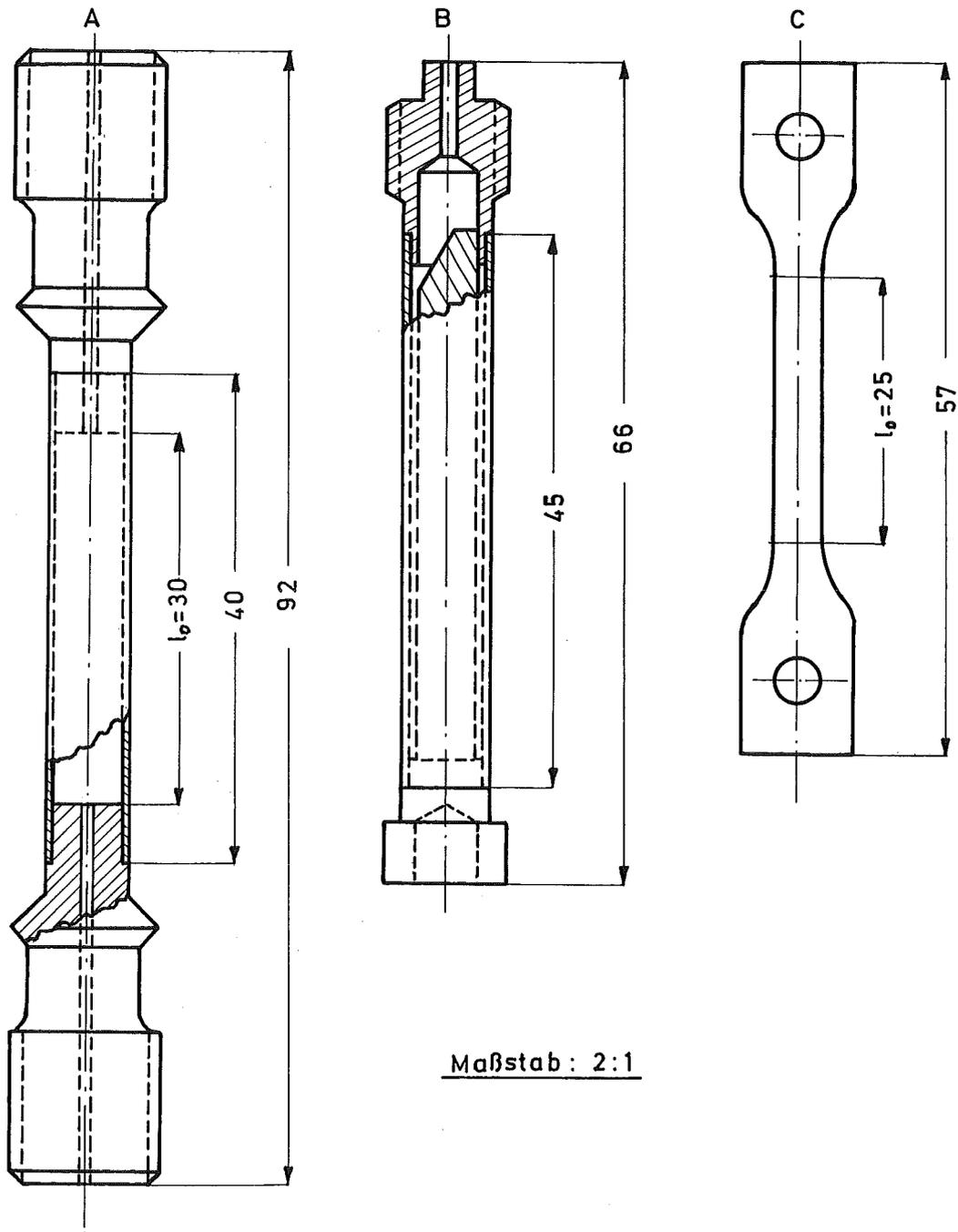


Abb.1 Probenformen

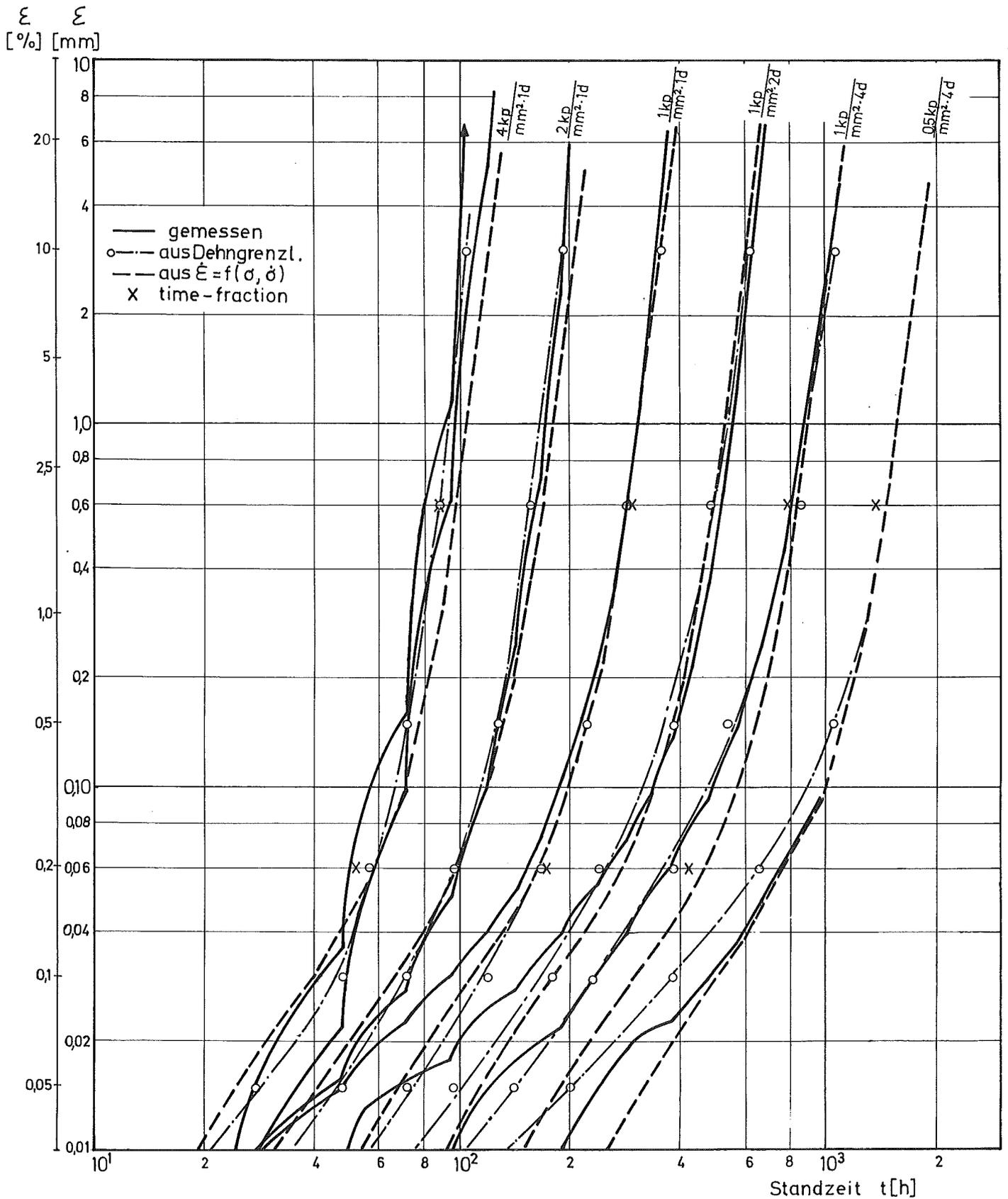


Abb. 2 Gemessene und berechnete Kriechkurven des Stahles 1.4981 im einachsigen Spannungszustand unter ansteigender Last.

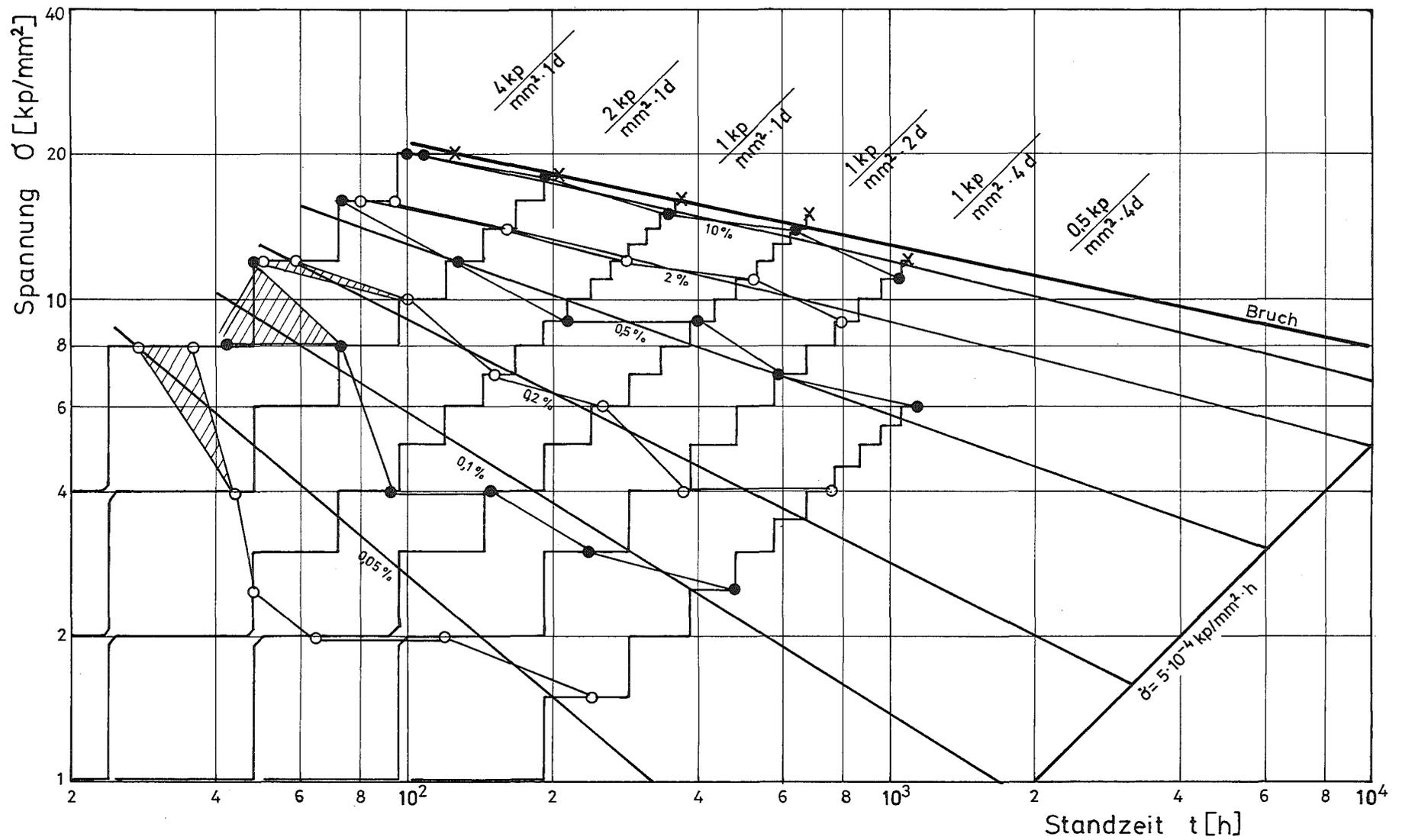


Abb.: 3 Zeitstandschaubild des Stahles 1.4981 aus Versuchen unter ansteigender Last im einachsigen Spannungszustand .

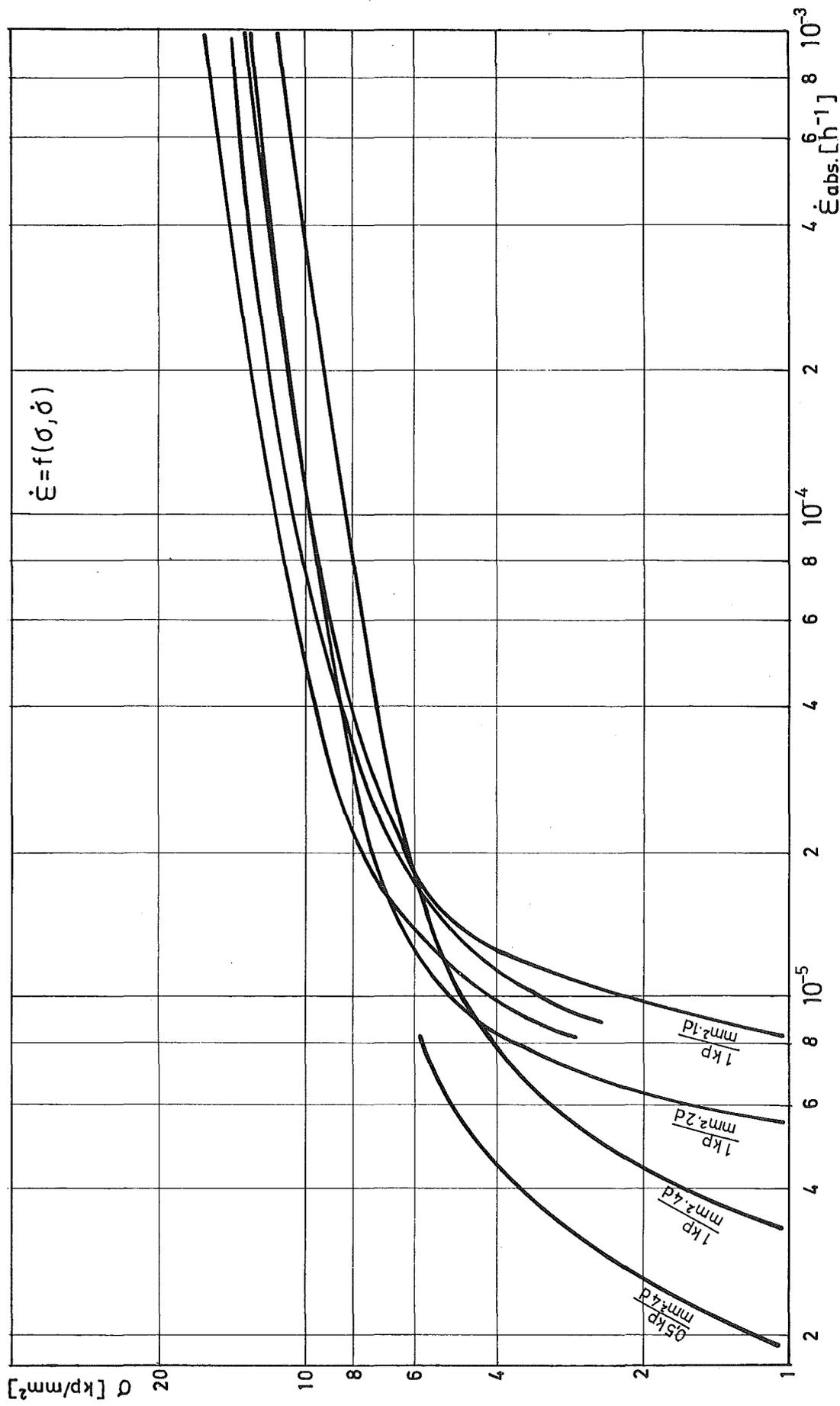


Abb. 4 Mittlere Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981 aus Versuchen unter ansteigender Last im einachsigen Spannungszustand.

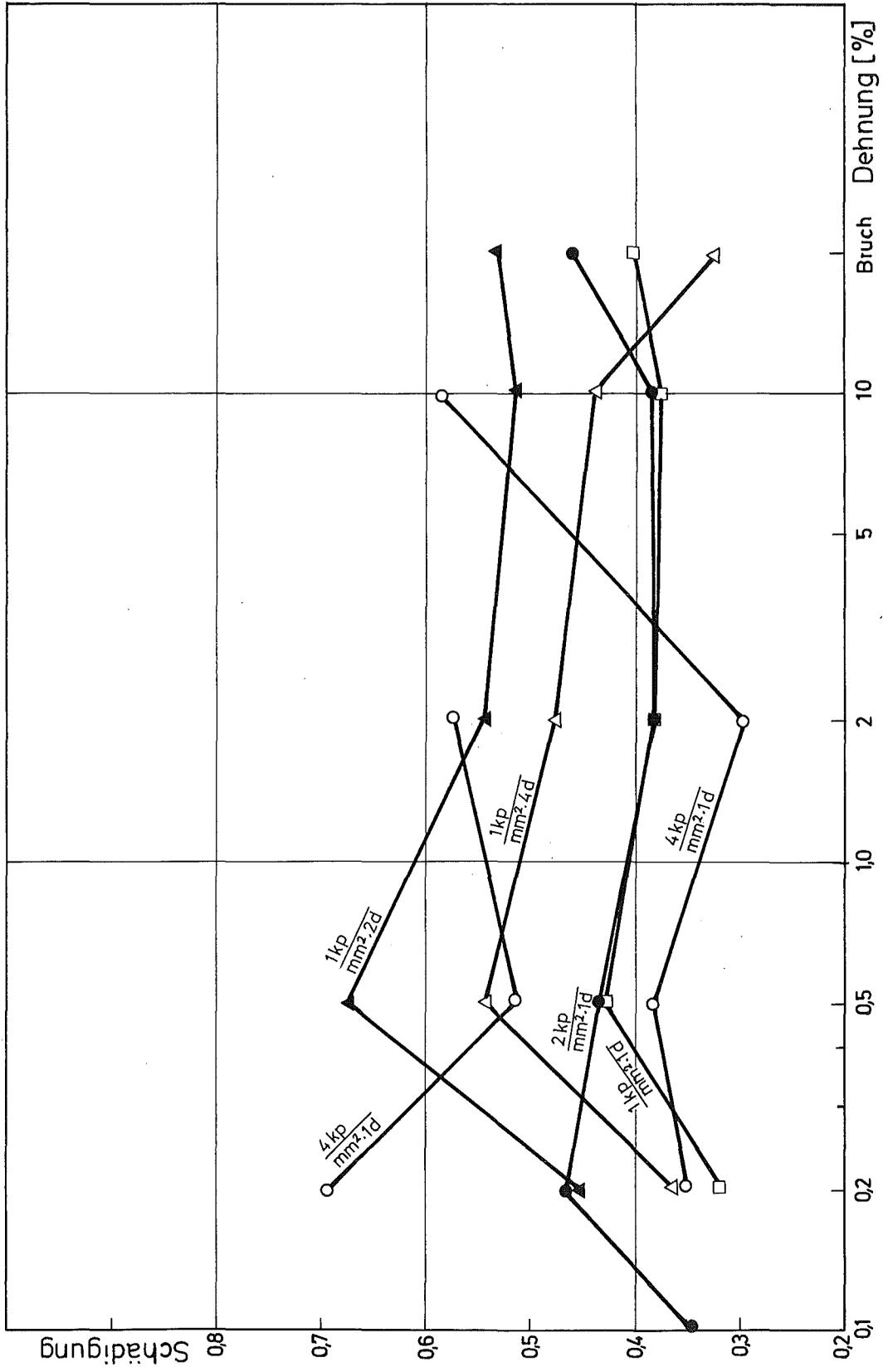


Abb. 5 Berechnete Schädigung des Stahles 1.4981 im einachsigen Spannungszustand .

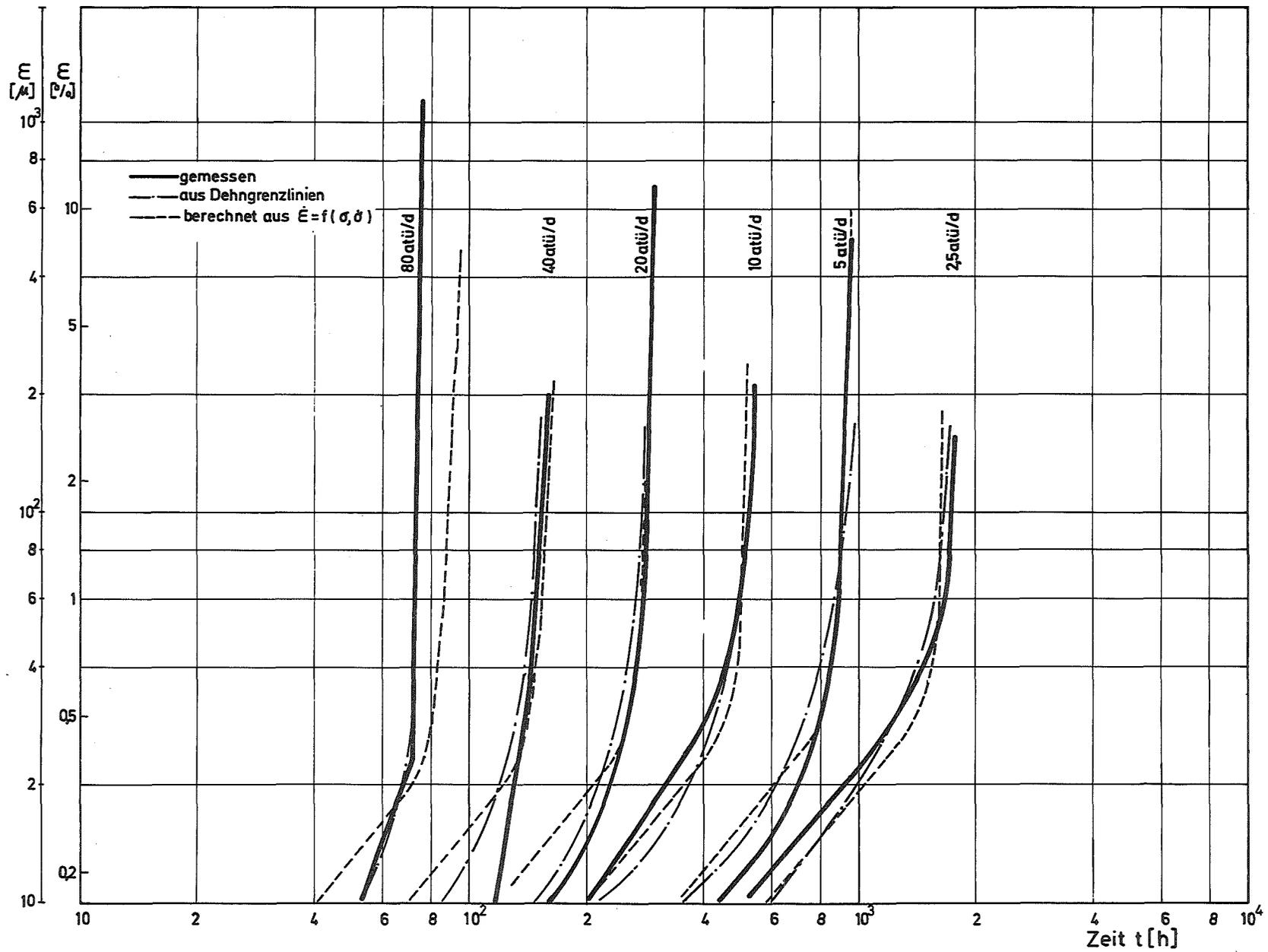


Abb. 6 Gemessene und berechnete Kriechkurven des Stahles 1.4981 im mehrachsigen Spannungszustand unter ansteigender Last.

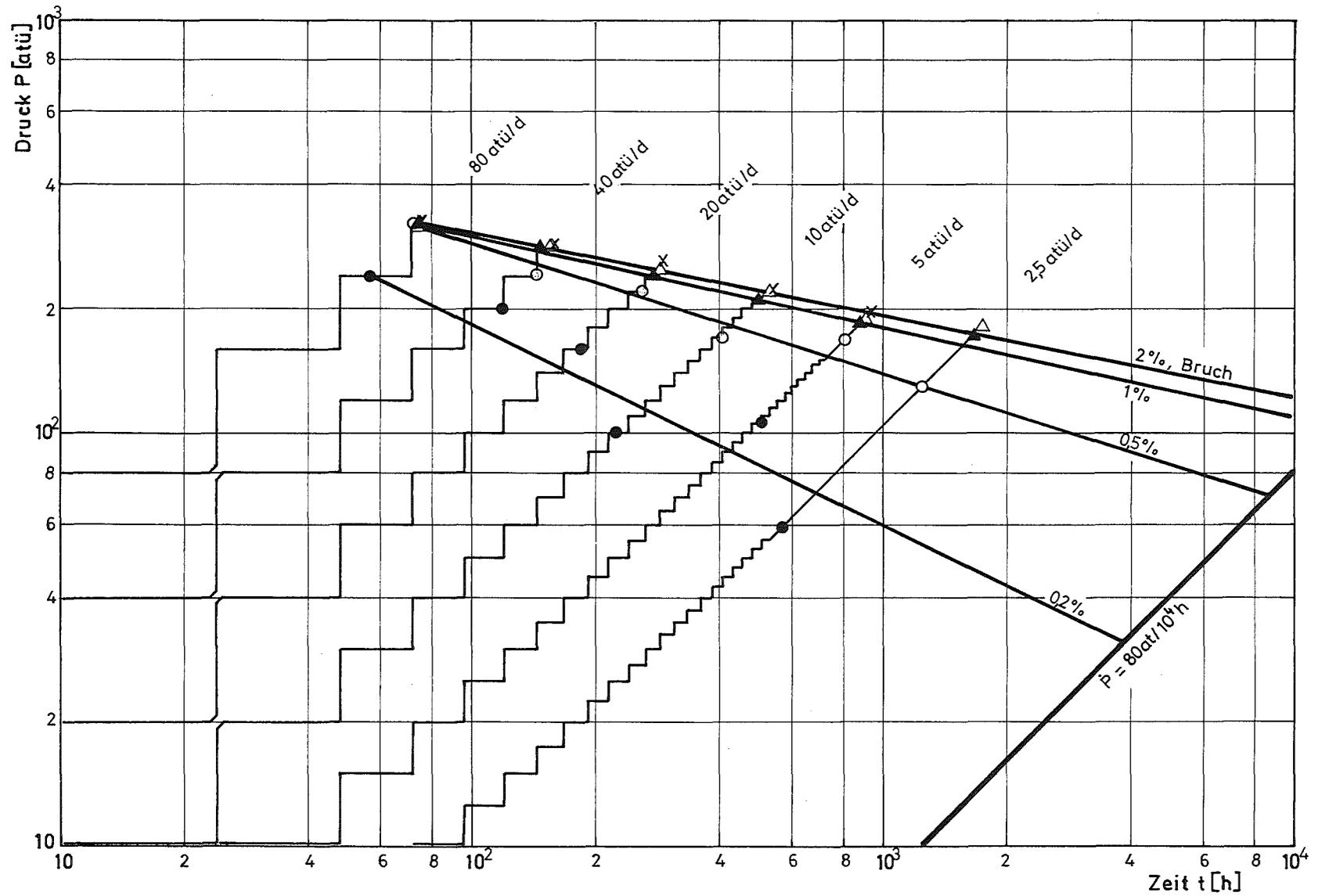


Abb. 7 Zeitstandschaubild des Stahles 1.4981 aus Versuchen im mehrachsigen Spannungszustand unter ansteigender Last.

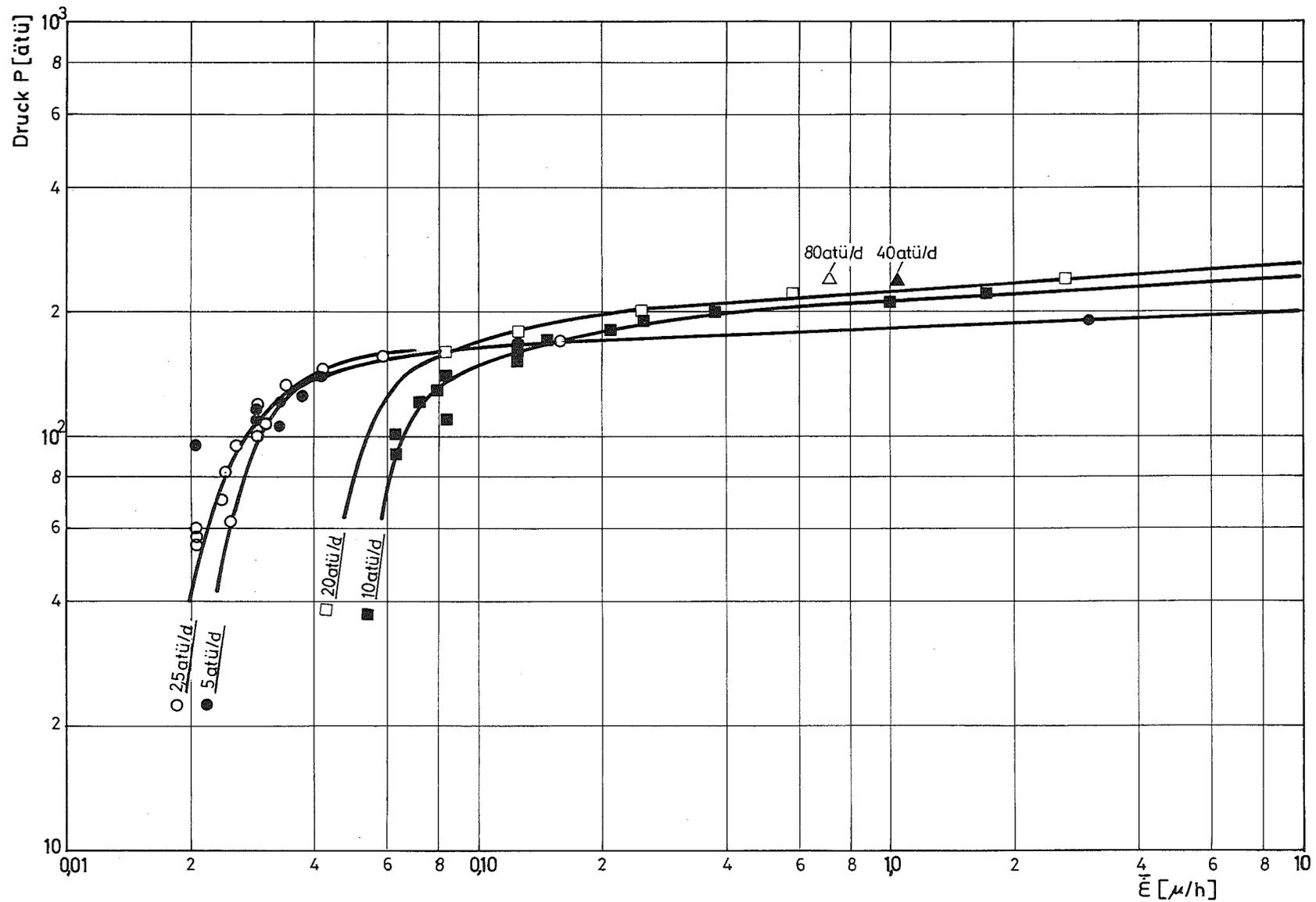


Abb.8 Mittlere Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981 aus Versuchen im mehrachsigen Spannungszustand unter ansteigender Last bei 700°C

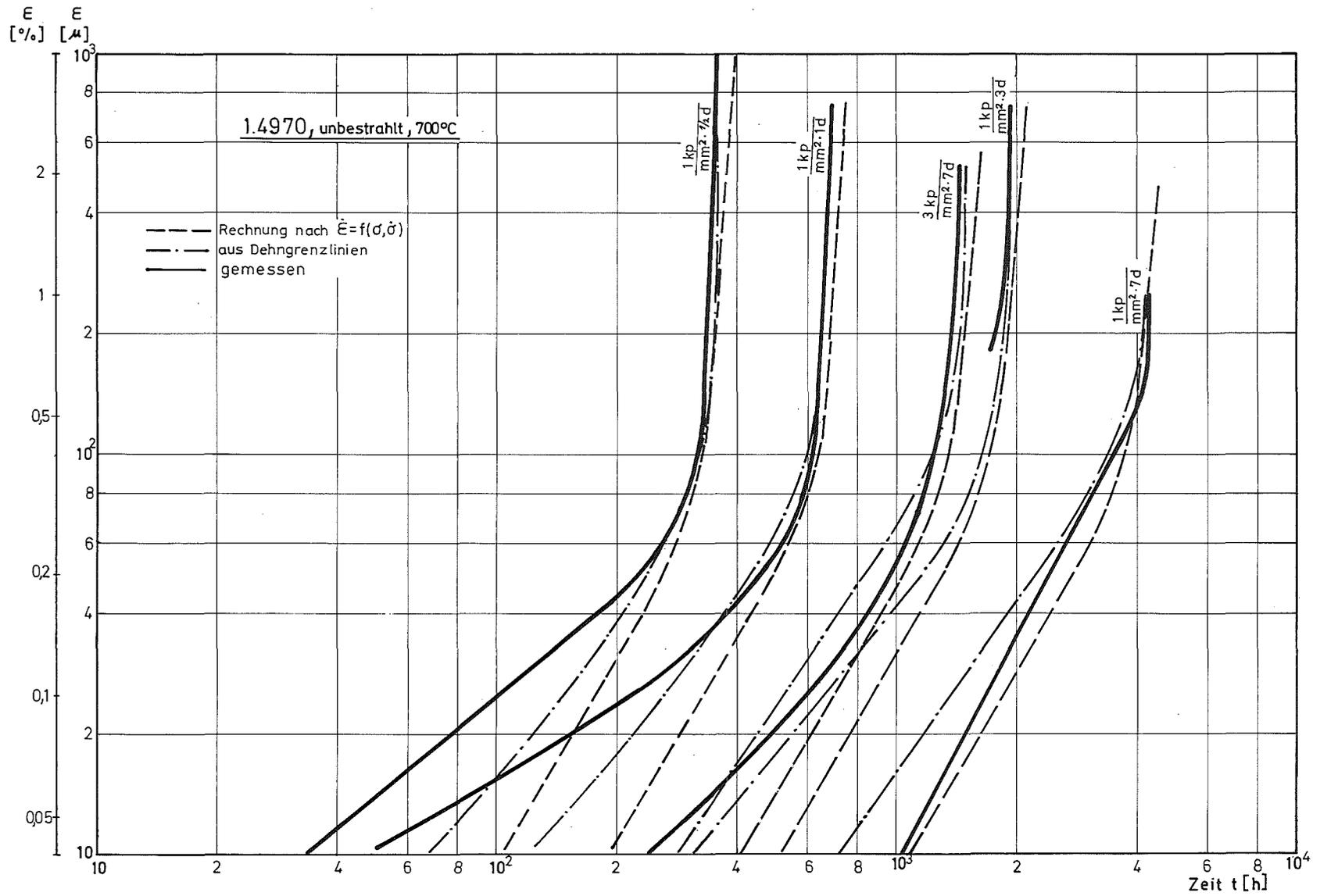


Abb. 9 Gemessene und berechnete Kriechkurven des Stahles 1.4970 unter ansteigender Last.

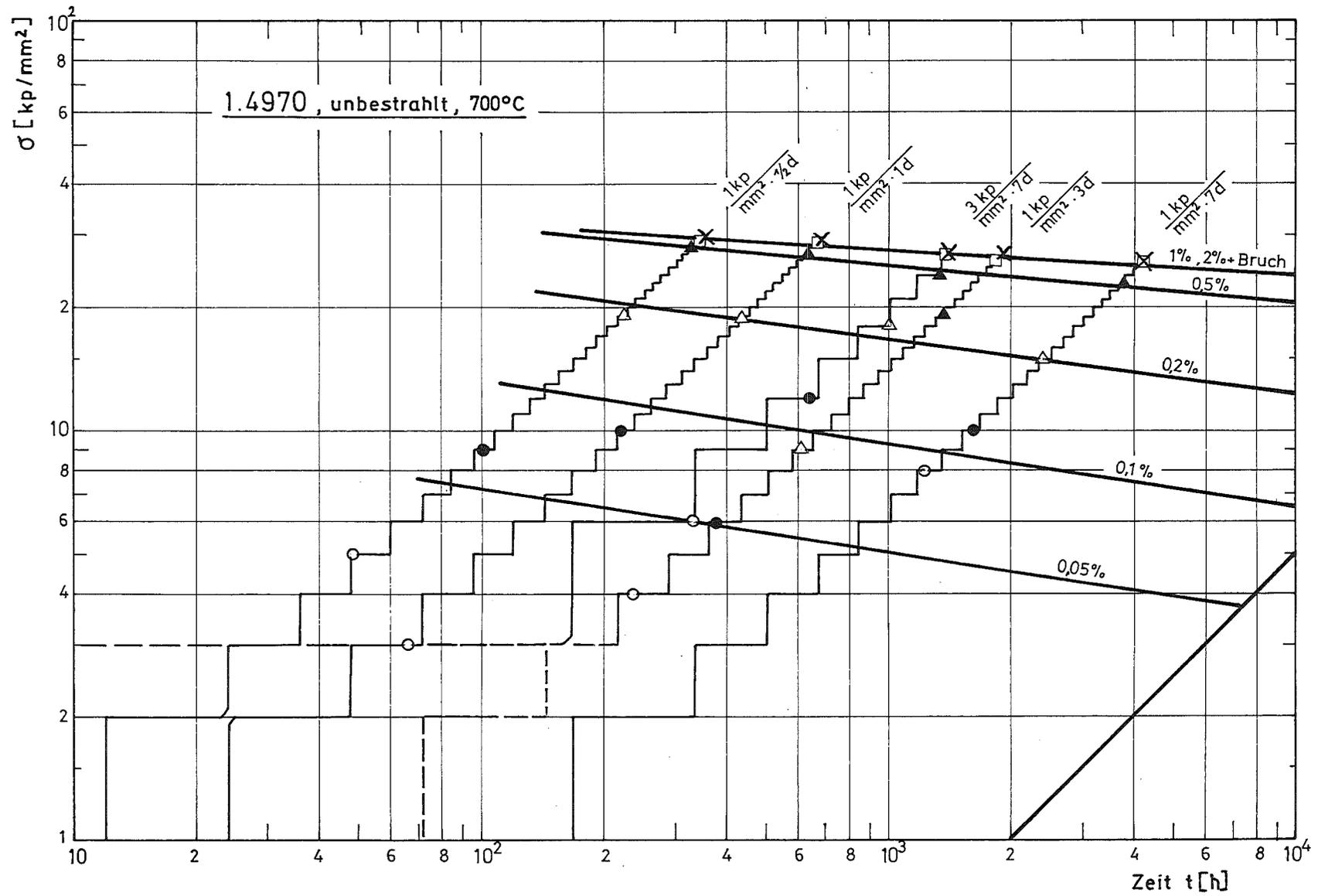


Abb. 10 Zeitstandschaubild des Stahles 1.4970 aus Versuchen mit ansteigender Last

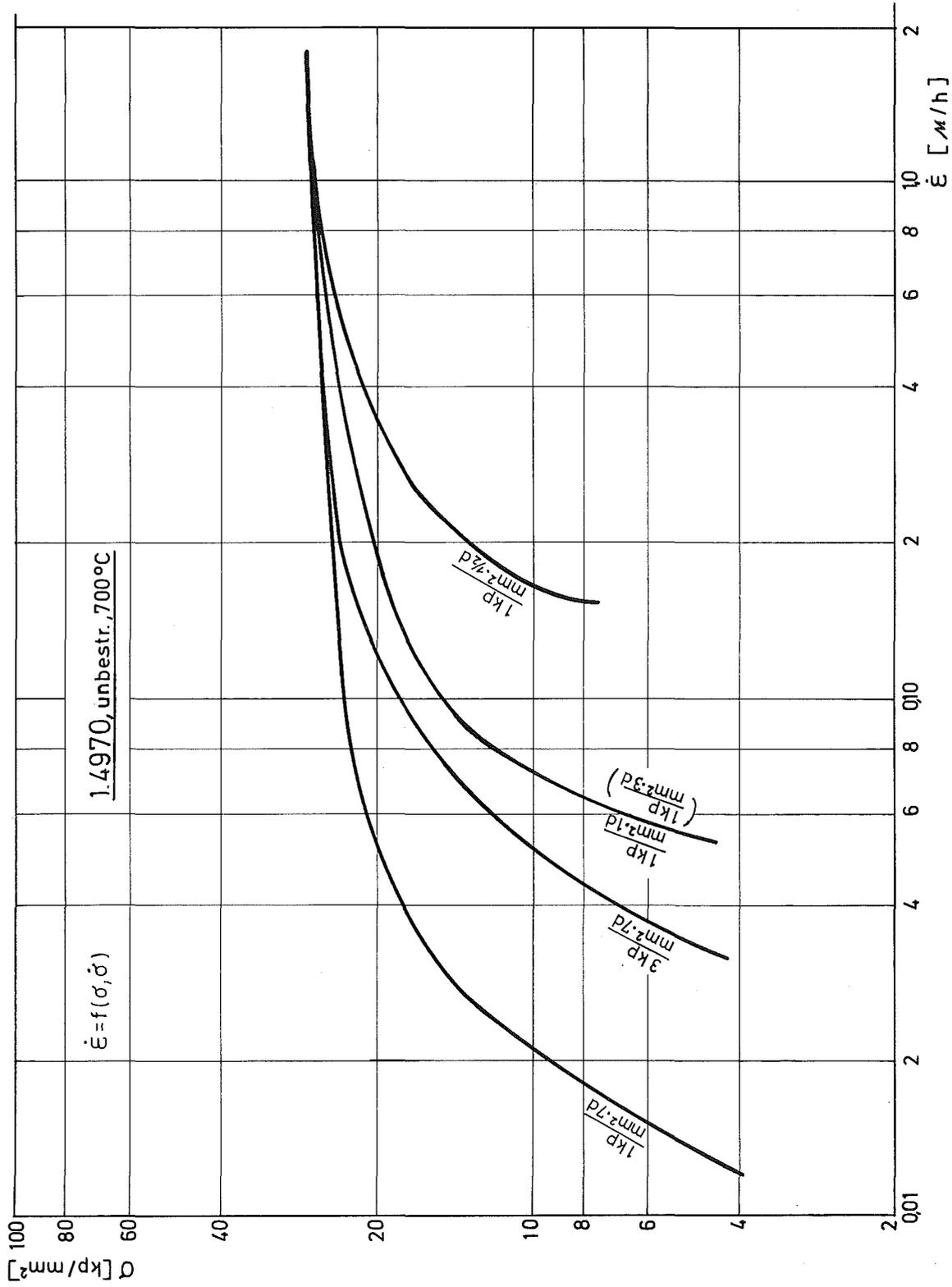


Abb. 11 Mittlere Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4970 aus Versuchen mit ansteigender Last.

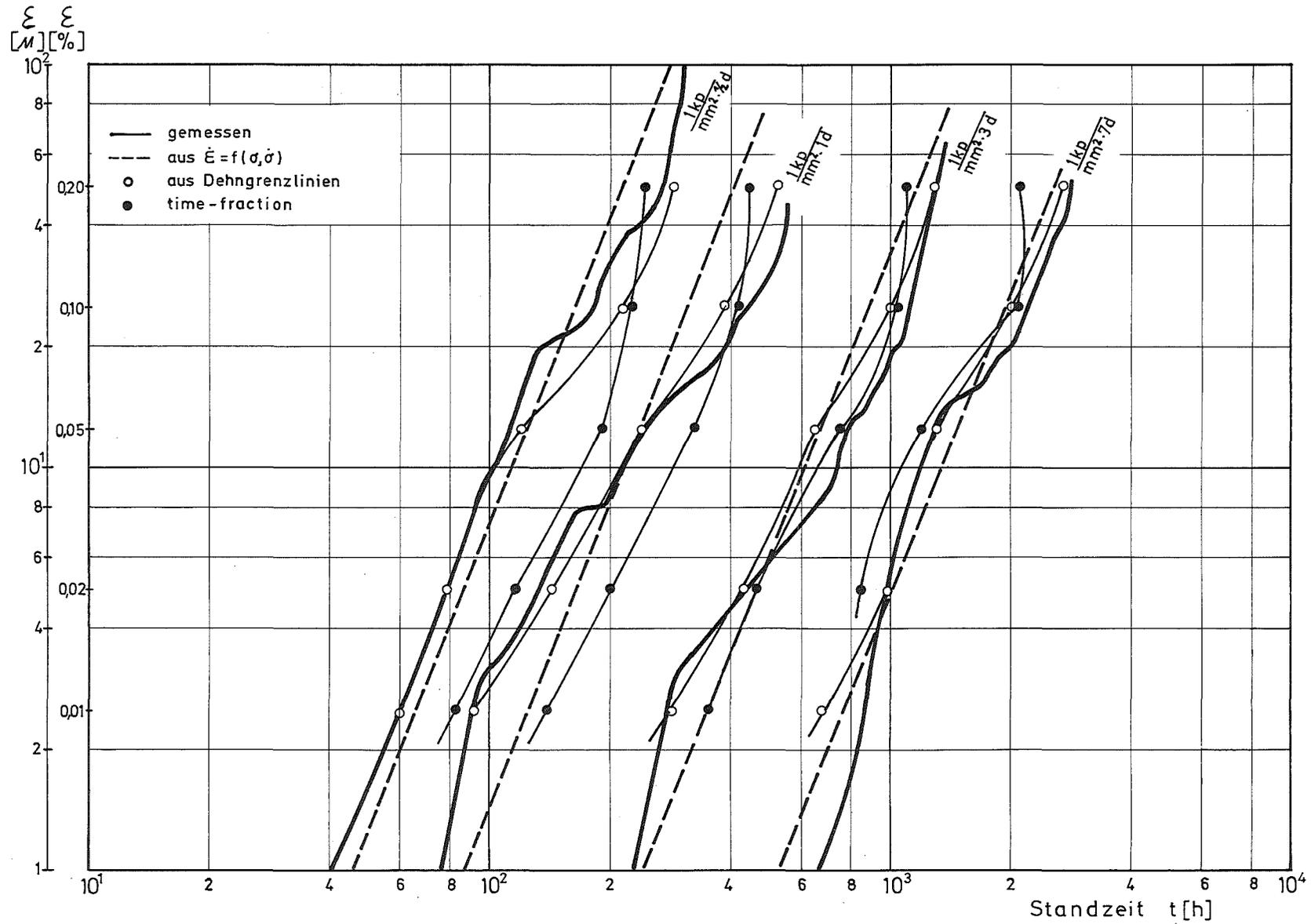


Abb.12 Gemessene und berechnete Kriechkurven des Stahles 1.4970 im bestrahlten Zustand unter ansteigender Last.

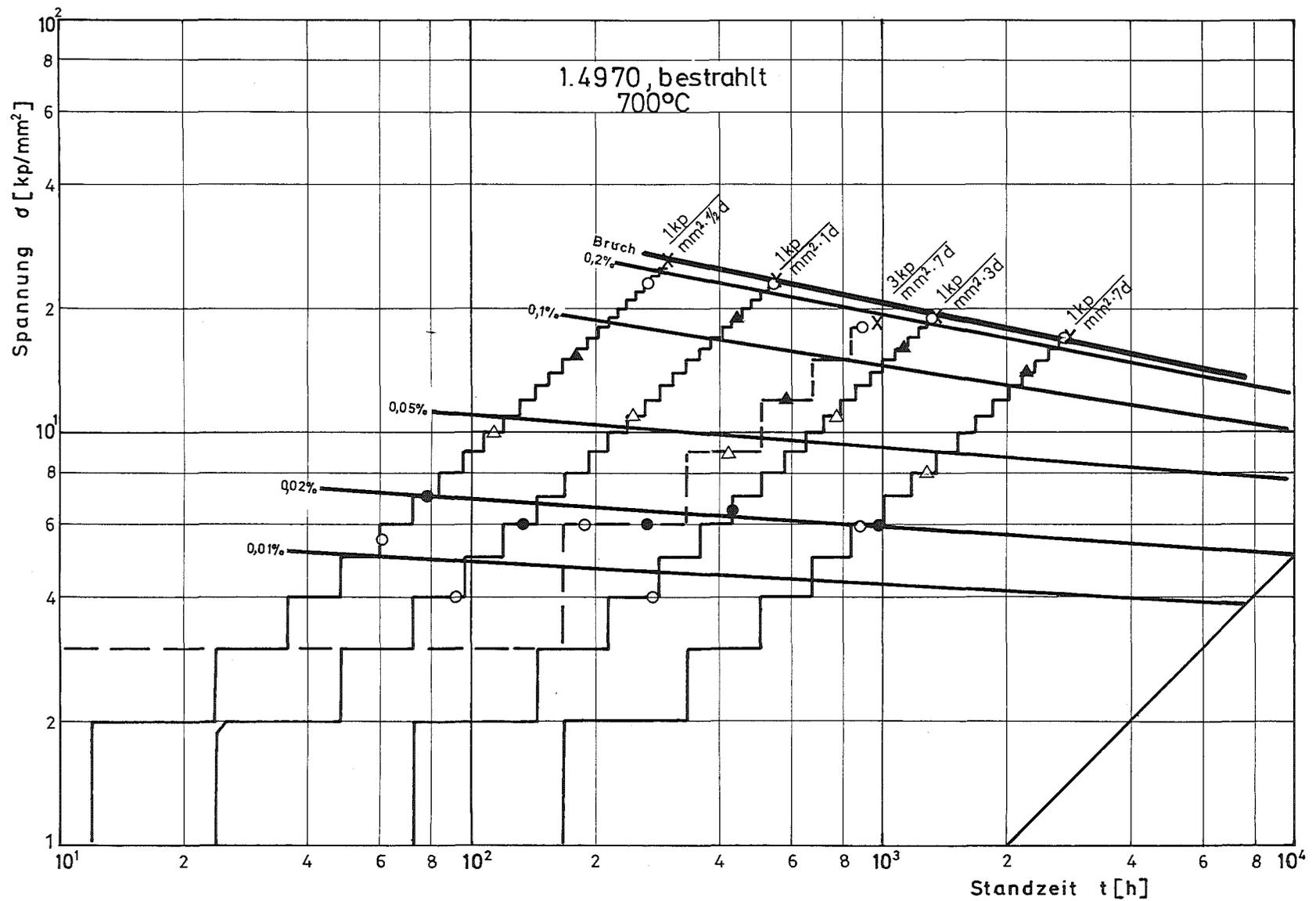


Abb.13 Zeitstandschaubild des Stahles 1.4970 im bestrahlten Zustand aus Versuchen unter ansteigender Last.

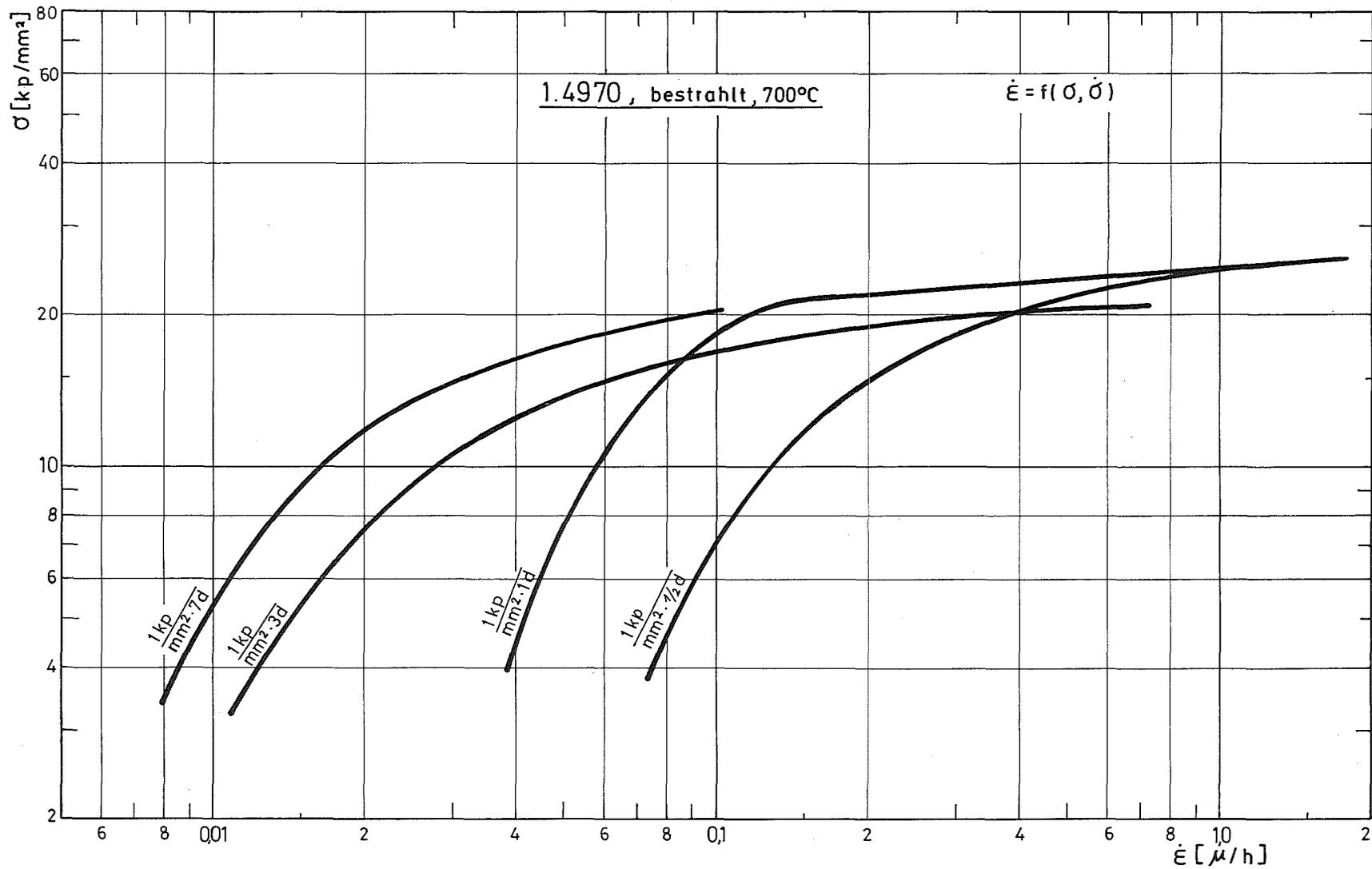


Abb. 14 Mittlere Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4970 im bestrahlten Zustand aus Versuchen unter ansteigender Last.

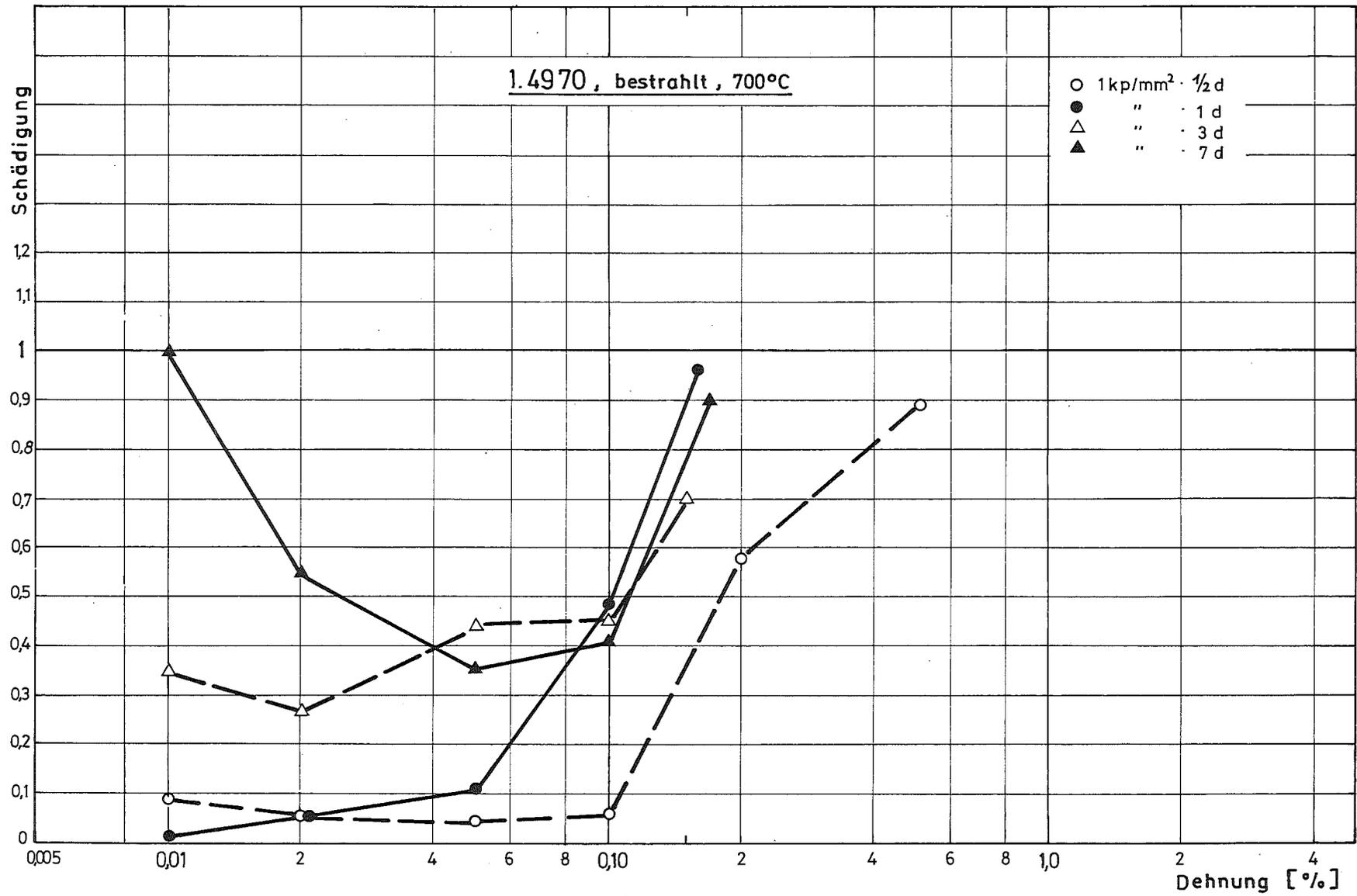


Abb. 15 Berechnete Schädigung des Stahles 1.4970 im bestrahlten Zustand