



KfK 2773

Mai 1979

**Das Zeitstand- und  
Kriechverhalten von Rohren  
aus dem austenitischen Stahl  
X8 CrNiMoNb 16 16  
(Werkstoff-Nr. 1.4981)  
bei Belastung durch  
Innendruck**

L. Schäfer, F. Polifka, H. Kempe  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

KfK 2773

Das Zeitstand- und Kriechverhalten von Rohren aus dem austenitischen  
Stahl X 8 CrNiMoNb 16 16 (Werkstoff-Nr. 1.4981) bei Belastung durch  
Innendruck

L. Schäfer, F. Polifka und H. Kempe

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

### Zusammenfassung:

An Röhren aus drei Schmelzen des Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkstoff-Nr. 1.4981) mit verschiedenen Kaltverformungsgraden wurden Zeitstand- und Kriechversuche bei 600, 650, 700 und 750°C durchgeführt. Die Rohrproben wurden mit Innendruck belastet und ihre tangentiale Kriechaufweitung gemessen. Die Meßwerte wurden als Zeitdehnlinsen, Zeitbruchlinien und Dehngrenzlinien dargestellt. Ferner wurden mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten errechnet, in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt und analog zum Nortonschen Kriechgesetz beschrieben. Inter- und Extrapolationen der Zeitbruchfestigkeit und der Zeitdehngrenzen sind möglich aus den Darstellungen eines Zeit-Temperatur-Parameters nach Larson und Miller.

The creep and stress-rupture behaviour under internal pressure of tubes made from austenitic stainless steel X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Material No. 1.4981).

### Abstract

Creep and stress rupture tests have been performed at 600, 650, 700 and 750°C on tubes made from three different heats from the austenitic stainless steel X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Material No. 1.4981). The tubes were loaded by internal pressure and the tangential (hoop) creep strain was measured continuously. The results are presented in form of creep curves, stress-time to rupture curves and curves for a creep limit. The average and minimum creep rates as a function of the applied stress have been evaluated and are described with a creep law analogous to Norton's creep law. An interpolation and extrapolation of the stress-rupture-strength and the creep strength are possible using the time-temperature-parameter-plot after Larson and Miller.



## I n h a l t

1. Einleitung
2. Versuchsmaterial
3. Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung
4. Probenform und Auswertungsverfahren
5. Versuchsergebnisse und Diskussion
6. Literaturübersicht und Nomenklatur
7. Anhang:  
Berechnung der Spannungen und Dehnungen
8. Tabellen, graphische Darstellungen und  
metallographische Schlifffbilder





## 1. Einleitung

Der niobstabilisierte austenitische Stahl X8 CrNiMoNb 1616 mit der Werkstoff-Nr. 1.4981 war in der engeren Auswahl als Hüll- und Kastenmaterial für den SNR 300. Als Hüllmaterial wurde er von dem kriechfesteren titanstabilisierten austenitischen Stahl X10 NiCrMoTiB1515 mit der Werkstoff-Nr. 1.4970 vorläufig verdrängt. Möglicherweise wird er aber auch dafür wieder interessant, wenn im Zuge der Rationalisierung Hülle und Kasten der Brennelemente aus dem gleichen Material hergestellt werden sollen. Gegenwärtig ist dieser Stahl für den SNR 300 als Kastenmaterial und für einen gasgekühlten Brutreaktor als Hüllmaterial vorgesehen.

In dem vorliegenden Bericht sind die IMF-Arbeitsberichte Nr. 228/75 und 253/76 zusammengefaßt und durch neue Ergebnisse von allen Schmelzen ergänzt.

Die Ergebnisse werden dargestellt in Zeitdehnlinien, Zeitbruchlinien, Dehngrenzlinien, Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitstandfestigkeit und die Zeitdehngrenzen und in den Abhängigkeiten der minimalen und der mittleren tangentialen Kriechgeschwindigkeit von der Tangentialspannung.

## 2. Versuchsmaterial

Das Versuchsmaterial sind nahtlose Präzisionsrohre mit einem Außendurchmesser von 6 mm. Die Rohre wurden vom Hersteller gemäß den allgemeinen Lieferbedingungen und vom Abnehmer nach den modernsten Methoden bezüglich Maßhaltigkeit und Fehlerfreiheit geprüft(1). Nur fehlerfreie Rohrabschnitte wurden zu Zeitstandproben verarbeitet.

Der Werkstoff ist der niobstabilisierte austenitische Stahl X8 CrNiMoNb 1616 mit der Werkstoff-Nr. 1.4981 aus den Schmelzen Nr. 51857, HV 139 und 70 015 von Mannesmann. Die Legierungszusammensetzung und die Zugeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

### 3. Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

Die Zeitstandanlage für Rohrinndruckversuche besteht aus einer Druckversorgungsanlage, den Zeitstandöfen mit Temperaturregelung und den Wegaufnehmern mit Schreibern zur Registrierung der Dehnung. In der Druckversorgungsanlage wird das Druckübertragungsmedium Argon in Kompressoren verdichtet und in Autoklaven gespeichert. Von dort wird jede Probe einzeln über eine Druckleitung versorgt und von je einem Manometer mit Widerstandsferngeber kontrolliert. Der Druck wird je nach der Güteklasse der Manometer auf 1 bis 4 atü genau gemessen und manuell geregelt.

Die Zeitstandöfen sind vertikal hängende Rohröfen mit je drei Heizwicklungen, die automatisch geregelt werden. Die Netzspannung wird mit Spannungsreglern stabilisiert, und der Laborraum ist durch eine Klimaanlage temperiert, so daß die Probertemperatur auf  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  konstant bleibt. Die Kriechaufweitung der mit Innendruck belasteten Rohrproben wird mit der in Abb. 1 skizzierten Dehnungsmeßeinrichtung gemessen. Der Außendurchmesser der Probe wird von zwei gegenüberliegenden und radial zur Rohrprobe angeordneten induktiven Wegaufnehmern kontinuierlich gemessen und auf einem Schreiber registriert.

Die Taststäbe der Wegaufnehmer haben keine besonders ausgebildeten Meßschneider, sondern sie berühren die Proben nur auf einer Länge, die dem Durchmesser der Taststäbe entspricht. Damit wird verhindert, daß beim vertikalen Verkanten der Meßschneiden gegenüber der Probe ein stärkerer Meßfehler auftritt. Dabei wird bewußt darauf verzichtet, die Stelle der größten Kriechaufweitung in jedem Fall zu erfassen. Das ist auch der Grund dafür, daß die in den Tabellen 2 bis 5 angegebene Bruchdehnung im allgemeinen größer ist als die Dehnung am Ende der in den Abbildungen 2 bis 19 dargestellten Kriechkurven. Die Kriechproben werden in den kalten Ofen eingebaut, etwa einen Tag bis auf Solltemperatur aufgeheizt und dann mit dem Prüfdruck belastet. Die Standzeit der Probe ist der Zeitraum zwischen der Belastung mit Druck und dem Beginn des Druckabfalles, der bei Gefügebrauchung langsam und beim Aufplatzen des Rohres plötzlich eintritt.

Die berichteten Versuche wurden an Normalatmosphäre durchgeführt.

#### 4. Probenform und Auswertungsverfahren

Die Probenform ist in Abb. 1 dargestellt. Die Rohrlänge ist durch Vergleichsuntersuchungen zu einem umfangreichen Bestrahlungsexperiment (Mol 2) mit 45 mm vorgegeben. Durch Vorversuche war aber festgestellt worden, daß bei Probenlängen ab 25 mm die gemessene Standzeit und die Bruchdehnung von der Probenlänge unabhängig sind (2). Zur Bestimmung der Bruchdehnung wird an der abgekühlten Probe mit einer Mikrometerschraube an der Stelle der stärksten Ausbeulung der Außendurchmesser zweimal vermessen, wobei die Probe azimuthal um 90° gedreht wird. Die Dehnung wird als technische Tangentialdehnung der Rohraußenwand angegeben:

$$\epsilon_{t,a} = \frac{\Delta d_a}{d_{a,0}} \cdot 100 (\%)$$

Manche Proben platzen am Ende der Standzeit an der Stelle mit der stärksten Ausbeulung auf, so daß die eigentliche Bruchdehnung nicht erfaßt werden kann. Diese Proben werden an beiden Enden des gewöhnlich in Längsrichtung liegenden Schadensrisses vermessen, wobei die größere der beiden Dehnungen als Bruchdehnung angegeben wird.

Zur Feststellung der Bruchart und des Gefügebildes wird in der Höhe der Rißmitte oder an der Stelle der größten Ausbauchung ein Querschleiff der Probe metallographisch untersucht.

#### 5. Versuchsergebnisse und Diskussion

Die einzelnen Ergebnisse der Zeitstand- und Kriechversuche sind in den Tabellen 2 bis 5, nach den Versuchsbedingungen geordnet, zusammengestellt. Bei Versuchen, die mit "Z" gekennzeichnet sind, ist der Kriechvorgang nicht aufgezeichnet worden.

Die unmittelbar gemessenen isothermen und quasiisobaren Zeitdehnlinien,  $\epsilon_{\sigma,T}(t)$ , sind in den Abbildungen 2 bis 19 dargestellt. Es handelt sich um normale Kriechkurven mit Primär- und Tertiärbereich, was aus der doppeltlogarithmischen Darstellung nicht ohne weiteres erkennbar ist. Die Belastungsdehnung ist in den dargestellten Durchmesserzunahmen nicht enthalten.

Diese Kurven werden nicht weiter interpretiert. Sie stellen sozusagen das Rohmaterial dar, aus dem die Meßwerte extrahiert werden, die Aussagen über das Zeitstand- und Kriechverhalten des Werkstoffes zulassen.

In den Abbildungen 20 bis 25 sind die isoplasten und isothermen Dehngrenzlinsen,  $\sigma_{\epsilon, T}(t)$ , dargestellt. Vergleicht man die Spannungen miteinander, die bei 700°C in 1000h zu einer Dehnung von 0,5% (=Auslegungsgrenze) führen, so ist die Schmelze 51857 den anderen überlegen und die günstigste Kaltverformung beträgt 10%. Bei hohen Temperaturen fallen die Dehngrenzlinsen mit der Zeit stark ab, woraus zu schließen ist, daß der Werkstoff instabil wird und die Einsatztemperatur niedriger zu wählen ist.

Das Zeitstandverhalten ist in den Abbildungen 26 bis 32 in Form von Zeitbruchlinien und mittels der Bruchdehnung dargestellt. Interessant ist die Bruchdehnung, weil sie ein gutes Maß für die Duktilität des Werkstoffes darstellt, und weil sie in anwendungsnahen Tests mit mehrachsigen Spannungszustand gewonnen wurde. Im allgemeinen sind die Duktilität und die Kriechfestigkeit alternativ zueinander. Man kann nur eines von beiden optimieren. Betrachtet man die Spannung, die nach 1000 Std. zu einer Dehnung von 0,5% führt zusammen mit der Bruchdehnung, so ist die Schmelze Nr. 51857 im 10% kaltverformten Zustand bei 650° und 700°C den anderen Schmelzen und Zuständen überlegen und bei 600° und 750°C mindestens gleichwertig.

Zur Beschreibung des Kriechverhaltens werden die mittlere und die minimale Kriechgeschwindigkeit folgendermaßen berechnet:

$$\dot{\epsilon}_j(\%) = \frac{\epsilon_j}{t_j} ; \quad \dot{\epsilon}_{\min} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t}$$

Sie sind in den Abbildungen 33 bis 38 dargestellt und in den Tabellen 7 bis 11 aufgelistet. In doppeltlogarithmischer Darstellung zeigen beide Kriechgeschwindigkeiten in weiten Bereichen eine lineare Abhängigkeit von der Spannung. Daher kann man sie analog zum Nortonschen Kriechgesetz (3) beschreiben:

$$\dot{\epsilon}_t = k \sigma_t^n$$

Bei abgeknickten Geraden ist hier der Bereich mit den niedrigeren Spannungen ausgewertet worden, weil er dem Anwendungsfall eher entspricht. Die Kriechparameter sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Man kann sie mit

denen des Nortonschen Kriechgesetzes  $\dot{\epsilon} = k_N \sigma^n$  vergleichen. Die n-Werte sind gleich und  $k \approx k_N \cdot (\sqrt{3}/2)^{n+1}$ .

Ein Vergleich der verschiedenen Werkstoffe anhand der minimalen Kriechgeschwindigkeit ergibt bei 700°C die Überlegenheit der Schmelze 51857 im 10% kaltverformten Zustand und bei 600°C die Gleichwertigkeit der Schmelze 70015.

Die Aktivierungsenergie Q (Kcal/Mol) der minimalen tangentialen Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{\min,t}$  (1/h) der Schmelze 51857 ist folgende:

Temperaturbereiche	10% KV	15% KV	20% KV
600 - 650°C	74	43	65
650 - 700°C	98	75	82
700 - 750°C	94	103	123

Sie wurde berechnet nach dem Ansatz von Arrhenius und unter der Voraussetzung, daß für jeden Temperaturbereich der Faktor A konstant ist.

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp - Q/RT$$

Für eine Abschätzung der Zeitstandfestigkeit und des Kriechverhaltens bei Temperaturen, die bis  $\pm 50^\circ\text{C}$  von der Prüftemperatur abweichen und bei Spannungen, die den gesamten mit Meßpunkten belegten Bereich aller Prüftemperaturen überdecken, sind die Zeitstandfestigkeiten und die Zeitdehngrenzen als Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller (4) in den Abbildungen 18 und 19 dargestellt worden.

Dieses Extrapolationsverfahren wurde ausgewählt, weil es nach den Untersuchungen von Bungardt und Schmidt (5) noch am besten geeignet erscheint.

Ein Materialvergleich ist hier nicht möglich, weil die verschiedenen Schmelzen und Zustände auch verschiedene Konstanten in dem Parameter haben. Es ist aber auffallend, daß mit zunehmender Kaltverformung die Konstante für die Zeitbruchlinie kleiner wird.

Die Abbildungen 52 bis 59 sind metallographische Schlifffbilder in 200-facher Vergrößerung vom Ausgangs- und vom Bruchgefüge.

Bezüglich der Bruchart gilt auch hier ganz allgemein, daß sie mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit und abnehmender Temperatur vom interkristallinen über den gemischten zum transkristallinen Bruch tendiert. Daher findet man im Bruchbild mit zunehmender Temperatur immer größere interkristalline Anrisse an der Rohrrinnen- und Außenwand. Lediglich die Rohrwandmitte reißt bei Temperaturen bis  $600^{\circ}\text{C}$  am Ende der Standzeit wegen der stark angestiegenen Tangentialspannung mit hoher Verformungsgeschwindigkeit in transkristalliner Art. Bei einer Prüftemperatur von  $750^{\circ}\text{C}$  ist die Korngrenzenfestigkeit gegenüber der Kornfestigkeit schon so gering, daß im gesamten Gefüge die senkrecht zur Hauptspannungsrichtung (Tangentialspannung) liegenden Korngrenzen aufreißen und eine erhebliche Gefügeauflockerung bewirken. Das liefert einen deutlichen Beitrag zur Bruchdehnung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß unter Berücksichtigung aller hier geprüften mechanischen Eigenschaften die 10% kaltverformte Version der Schmelze 51857 für den Einsatz bei hohen Temperaturen ( $700^{\circ}\text{C}$ ) am geeignetsten ist. Für  $600^{\circ}\text{C}$  ist die Schmelze 70015 gleichwertig. Für die Unterschiede sind keine weiteren Gründe ersichtlich als die normale Abweichung von Schmelze zu Schmelze (heat to heat variation).

## 6. Literaturübersicht und Nomenklatur

- (1) Vollath, D., Jacobi, O.: XV. Qualitätskontrolle an Brennstoffen, Hüllrohren und Brennstäben. In: Böhm, H., Dienst, W., Kummerer, K. (Hrsg.) : Arbeiten zur Brennelemententwicklung für den schnellen Brutreaktor SNR-300. KFK 1999 (1974), S. 251-270
- (2) Polifka, F., Schäfer, L.: Einfluß der Probenlänge auf das Zeitstandverhalten von Hüllrohren bei Belastung durch Innendruck. (1970) unveröffentlicht
- (3) Norton, F.H.: The Creep of Steel at High temperatures. McGraw-Hill Publ. Co. Ltd. 1929
- (4) Larson, F.R., Miller, J.: A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep-Stresses. Transactions of the ASME, 74 (1952) S. 765
- (5) Bungardt, K., Schmidt, W.: DEW-Technische Berichte, Bd. 1, Nr. 3 (1961)
- (6) Lamé, G.: Lecons sur la Théorie Mathématique de L'Elasticité des Corps Solides. Paris: Bachelier 1852
- (7) Wellinger, K., Dietmann, H.: Festigkeitsberechnungen. Stuttgart: Alfred Kröner 1968
- (8) Dietmann, H.: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten. MPA Stuttgart, Techn.-wiss. Bericht, Heft 68-04 (1968)
- (9) Cloß, K.D., Schäfer, L.: 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
- (10) Soderberg, C.R.: The Interpretation of Creep Tests for Machine Design. Transactions of the ASME, 58 (1936) S. 733
- (11) Finnie, I., Heller, W.R.: Creep of Engineering Materials. New York: McGraw-Hill 1959
- (12) Soderberg, C.R.: Interpretation of Creep Tests on Tubes. Transactions of the ASME, 63 (1941) S. 737-748

Symbole

A	-	Strukturfaktor
d	-	Durchmesser des Rohres
P	-	Druck
s	-	Wandstärke
$\sigma$	-	Spannung
$\epsilon$	-	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	-	Kriechgeschwindigkeit
LG	-	lösungsgeglüht
KV	-	kaltverformt
Chg.	-	Charge, Schmelze
$\delta$	-	Bruchdehnung
t	-	Zeit
R	-	universelle Gaskonstante
Q	-	Aktivierungsenergie
Z	-	Zeitstandprobe

Indizes

o	-	Anfangsbedingungen Nominalwerte
a	-	auf die Außenwand bezogen
i	-	auf die Innenwand bezogen
m	-	auf die Wandmitte bezogen
ax	-	axial
t	-	tangential
r	-	radial
V	-	Vergleichs-
j	-	beliebige Zahl
N	-	Norton
B	-	Bruch



## 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 (6). 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 dünnwandiger 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  $P_i$  - Rohrinndruck,  $d_a$  und  $d_i$  - Rohraußen- und -innendurchmesser.)

Für einen Vergleich der Belastungsfälle, hier der Zeitstandfestigkeit, aus Versuchen mit unterschiedlichem Spannungszustand, beispielsweise bei Zug- und Rohrinndruckbelastung, ist es notwendig, aus den drei genannten Hauptspannungen eine Vergleichsspannung  $\sigma_V$  zu berechnen. Diese gibt an, welche Spannung im einaxialen Zugversuch das gleiche Materialverhalten, z.B. den Fließbeginn oder eine bestimmte Verformungsgeschwindigkeit, bewirkt wie beispielsweise 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 (7), (8) 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 unstabilisierte austenitische Stähle ist dies nachgewiesen worden (9). 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  $\sigma_{ax} \approx 0,5 \cdot \sigma_t$  und  $\sigma_r \approx 0$

ergibt sich die Näherungslösung:

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

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 (10)

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

Kriechgeschwindigkeit bzw. Dehnung des Rohres, sofern es isotrope mechanische Eigenschaften hat, gleich Null ist, d.h. das Rohr wird beim Kriechen nicht länger. (11)

$$\epsilon_{ax} = \frac{2}{3} C \{ \sigma_{ax} - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_t) \} = 0$$

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 (12) bei dünnwandigen Rohren die mittlere Tangentialdehnung  $\epsilon_{t,m}$  aus der meßbaren äußeren  $\epsilon_{t,a}$  berechnet werden.

$$\epsilon_{t,m} = \left( 1 + \frac{s_0}{d_a - s_0} \right)^2 \cdot \epsilon_{t,a}$$

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



Tabelle 1:

Chemische Zusammensetzung der verschiedenen Sorten des Stahles  
X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkstoff-Nr. 1.4981)

Charge	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	Al	ppm B	Ta/Nb	N <sub>2</sub>
51857	.057	.44	1.37	15.75	16.03	1.78			.040	10	.73	
HV 139	.07	.58	.97	17.0	16.60	1.64	.04	.08	.09	4	.70	.02
70015	.05	.37	1.11	16.5	16.5	1.76	.002	≤ .01		18	.81	.01

Kurzzeitfestigkeit und Behandlungszustand

Charge	Behandlungszustand	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> (MPa)	0,2 Dehngrenze R <sub>p0,2</sub> (MPa)	Bruchdehnung A ( % )	Härte HV1
51857	LG + 10% KV	734	585	28.8	228
51857	LG + 15% KV	759	670	21.2	238
51857	LG + 20% KV	789	720	17.0	240
HV 139	LG + ≤5% KV	638	368	46.6	152
70015	LG	581	285	48.1	141
70015	LG + 12%KV	702	591	26.1	239
70015	LG + 18% KV	770	682	21.0	245

Tabelle 2:

Zeitstandergebnisse des austenitischen Stahles

X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkstoff-Nr. 1.4981) Charge HV 139

	600 °C			650 °C			700 °C				
	$\sigma_t$	$t_B$	$\delta_t$	$\sigma_t$	$t_B$	$\delta_t$	$\sigma_t$	$t_B$	$\delta_t$		
	(MPa)	(h)	(%)	(MPa)	(h)	(%)	(MPa)	(h)	(%)		
Z	359	26		Z	270	48	13,6		203	26	9.0
Z	338	84	13,7	Z	250	71	11,8	Z	203	32	11.7
	325	173	7.2	Z	236,5	154	8.5	Z	169	132	12.5
	304	318	6.8	Z	203	516	6.5		169	107	4.3
Z	304	310	11,5	Z	169	1624	8.0	Z	135	296	13.6
	270	489	6.0	Z	135	3205	19.3		135	369	5.0
	257								122	328	3.7
Z	250	1475	7.8						101		
Z	203	6759	6.5					Z	101	1435	22.8
								Z	67	4635	19.0

Tabelle 3

Zeitstandergebnisse des austenitischen Stahles X 8 CrNiMoNb 16 16 (Werkstoff-Nr. 1.4981)  
Charge 51857

Zustand	600 °C			650 °C			700 °C			750 °C		
	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)
LG+10% KV	338	42	7.3	310	32	4.8	Z203	98	2.5	169	50	3.3
	324	51	3.5	310	30		189	30	4.8	155	63	3.3
	304	320	6.7	284	86	3.7	169	135	8.8	135	96	2.2
	270	890	4.0	Z270	127	3.8	135	232	16.1	122	224	2.8
	244	1260	2.2	270	113	4.5	128	684	9.2	103	289	2.7
				Z270	43	8.7	115	1474	9.5	103	233	2.2
				Z270	24	7.7	Z103	781	4.7	88	528	2.7
				256	190	1.8	67	1103	abgebr.	61	1752	2.3
				256	131	3.8						
				Z236	299	3.2						
				236	182	9.5						
				Z216	329	1.3						
				Z203	349	4.8						
				203	398	0.8						
				Z182	379	6.5						
				Z176	964	2.0						
				169	1504	2.0						
			Z162	2352								
			Z155	819	5.2							
			Z135	2461	6.2							

Tabelle 3. (Fortsetzung 1):

Zustand	600 °C			650 °C			700 °C			750 °C		
	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)
LG+15% KV	365	48	2.5	Z270	47	3.8	Z203	60	5.0	149	50	4.2
	338	101	2.3	Z270	79	4.6	189	76	2.5	115	156	4.7
	324	89	3.8	270	86	2.8	189	44	3.8	61	940	6.0
	311	216	3.3	257	79	4.2	169	127	5.0			
	304	374	4.0	Z236	88	2.5	149	209	3.2			
	284	192	4.7	236	110	4.5	Z149	200	3.6			
	Z284	264	2.5	216	147	1.5	Z149	211	2.2			
	270	247	3.0	203	274	2.8	Z135	433	3.5			
	270	268	6.2	182	330	2.8	Z122	614	3.2			
	Z256	375	3.7	Z162	727	2.3	Z122	472	3.0			
	244	405	3.7	149	1058	2.7	122	786	4.7			
	Z230	996	3.8				108	1588	5.0			
	Z210	1218	1.7				101	1152	4.0			
							Z101	1763	7.5			
							Z101	1176	4.2			



Tabelle 3 (Fortsetzung 2):

Zustand	600 °C			650 °C			700 °C			750 °C		
	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)
LG+20% KV	311	59	3.0	Z270	72	2.5	Z236	18	7.2	169	24	5.5
	297	76	1.0	256	53	5.0	223	41	4.2	135	61	7.0
	270	102	1.2	236	124	3.2	Z203	39	6.0	103	190	9.8
	256	118	0.8	216	84	2.3	169	110	3.7	88	159	9.0
	Z230	448	0.7	Z216	88	0.7	Z135	315	5.0	79	380	10.8
	216	781	2.7	Z203	234	3.2	128	363	6.5	67	466	5.5
	203	434	1.3	189	146	0.7	108	877	7.0	54	1624	15.0
	189	1750	2.2	Z189	180	0.8	88	1692	7.8			
				Z169	549	4.3	74.5	1500 abgebr.				
				169	237	2.7						
			149	529	1.2							
			122	1778	1.2							

Tabelle 4: Zeitstandergebnisse des austenitischen Stahles  
X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkstoff-Nr. 1.4981)  
Charge 70015, Zustand: LG + 12% KV.

	600°C				700°C		
	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)		$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)
Z	405,5	89	3,5		67,5	1512	
Z	405,5	84	1,2	Z	135	203	
Z	405,5	56	3,8	Z	108	2064	3,7
Z	405,5	3	-	Z	150	135	2,0
Z	325	104	0,7	Z	169	188	1,3
Z	325	97	1,5	Z	135	625	2,8
Z	304	131	1,3	Z	189	34	2,7
Z	284	616	1,5	Z	155,5	108	2,3
Z	473	10	3,1	Z	135	189	1,3
Z	216	208	0,5	Z	155,5	120	2,8
Z	203	625	0,8	Z	149	115	1,3
Z	338	250	1,3	Z	155,5	64	2,8
Z	372	146	1,3		108	710	1,0
Z	304	479	2,2		169	74	1,3
	325	288	1,1		189	54	1,0
	325	329	1,7		209,5	80	5,5
Z	304	135	4,2		122	395	2,7
Z	304	589	1,8		135	282	1,2
	237	409	0,5		135	954	4,3
Z	325	91	2,2				
	338	129	2,7				
	270	183	3,2				
Z	372	43	1,5				
	304	667	2,5				
	338	115	4,7				
	338	117	4,3				
Z	270	988	1,2				
Z	304	587	2,2				
	372	15	3,6				
	270	907	1,5				
	243	1619	2,3				

Tabelle 5      Zeitstandergebnisse des austenitischen Stahles  
X8 CrNiMoNb 16 16 (Werkstoff-Nr. 1.4981)  
Charge 70015

Zustand	600 °C			650 °C			700 °C		
	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$t_B$ (h)	$\delta_t$ (%)
LG+18% KV	Z392	61		Z270	11	1.0	Z203	65	6.0
	Z338	258	3.3	Z236	136	4.7	Z189	81	6.7
	Z324	268	2.0	Z223	164	4.0	Z169	164	5.0
	Z304	146	3.7	Z203	274	2.8	Z156	252	4.2
	Z284	552	2.3	Z176	492	2.5	Z135	537	6.8
	Z270	642	2.0	Z156	784	2.7	Z135	659	4.5
	Z257	704	3.3	Z142	1524	3.2	Z122	881	6.5
	Z243	445	1.5	Z135	732	2.8	Z108	1464	5.0
	Z243	983							
	Z216	2131	2.5						
LG	324	20	13.9				Z203	2	15.3
	304	110	8.5				169	20	11.7
	Z304	7	13.0				156	38	12.8
	Z284	69	10.8				Z156	16	24.2
	Z284	427	8.9				Z135	104	14.4
	Z270	601	5.7				135	129	9.4
	Z270	500	8.5				Z122	121	24.0
	Z270	433	7.5				108	315	abgebr.
	257	672	6.5				Z108	245	16.2
	237	2084	8.3				Z101	454	23.3
						81	456		
						Z 81	1057	22.5	
						54	1200	abgebr.	

Tabelle 6:

Kriechparameter der minimalen tangentialen Kriechgeschwindigkeit des austenitischen Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616  
(Werkstoff-Nr. 1.4981).

Zustand (Charge)	Kriech- parameter	600°C	650°C	700°C	750°C
LG + 10% KV (51857)	n	10	7,0	2,7	2,04
	k	$4,81 \cdot 10^{-30}$	$5,27 \cdot 10^{-22}$	$9,57 \cdot 10^{-12}$	$1,46 \cdot 10^{-9}$
LG + 15% KV (51857)	n	5,7	4,0	3,6	2,9
	k	$1,89 \cdot 10^{-19}$	$7,30 \cdot 10^{-15}$	$3,48 \cdot 10^{-13}$	$1,27 \cdot 10^{-10}$
LG + 20% KV (51857)	n	5,94	4,52	4,38	3,08
	k	$7,79 \cdot 10^{-20}$	$9,87 \cdot 10^{-16}$	$1,71 \cdot 10^{-14}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$
LG (70015)	n	11,4		7,06	
	k	$1,56 \cdot 10^{-32}$		$1,41 \cdot 10^{-19}$	
LG + 12% KV (70015)	n	7,74		3,3	
	k	$7,51 \cdot 10^{-25}$		$4,44 \cdot 10^{-12}$	
LG + $\leq$ 5% KV (HV 139)	n	8,7		8,2	
	k	$1,25 \cdot 10^{-26}$		$1,37 \cdot 10^{-22}$	

Tabelle 7: Mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten des austenitischen Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkstoff-Nr. 1.4981) Charge 51857, Zustand: LG + 10% KV

$\sigma_t$ (MPa)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,2\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,5\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{1,0\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (1/h)	$\bar{T}$ (°C)
338	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	600
324	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	600
305	$7,69 \cdot 10^{-5}$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	600
271	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	600
244	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$8,06 \cdot 10^{-6}$	$9,71 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	600
310	$8,33 \cdot 10^{-4}$	$2,86 \cdot 10^{-4}$	$3,45 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	650
310	$2,67 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	650
284	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$9,40 \cdot 10^{-5}$	650
270	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$7,12 \cdot 10^{-5}$	650
257	$6,15 \cdot 10^{-5}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$7,69 \cdot 10^{-5}$	$3,10 \cdot 10^{-5}$	650
257	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$3,80 \cdot 10^{-5}$	650
236	$2,90 \cdot 10^{-5}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	650
203	$7,55 \cdot 10^{-6}$	-----	-----	$7,50 \cdot 10^{-6}$	650
169	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-6}$	650
189	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$6,94 \cdot 10^{-4}$	$7,41 \cdot 10^{-4}$	$6,30 \cdot 10^{-4}$	700
169	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	700
135,5	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$8,90 \cdot 10^{-5}$	700
128,5	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,40 \cdot 10^{-5}$	700
115	$4,18 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-6}$	-----	$3,10 \cdot 10^{-5}$	700
67	$8,70 \cdot 10^{-7}$	-----	-----	$8,15 \cdot 10^{-7}$	700
169	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	750
155	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	-----	$8,33 \cdot 10^{-5}$	750
135	$8,88 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$7,91 \cdot 10^{-5}$	750
122	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$4,76 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$	750
103	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	750
103	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$	-----	$1,83 \cdot 10^{-5}$	750
88	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	750
61	$9,52 \cdot 10^{-6}$	$7,69 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$	$6,66 \cdot 10^{-6}$	750

**Tabelle 8:** Mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten  
des austenitischen Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkst.-Nr. 1.4981)  
Charge 51857, Zustand: LG + 15% KV

$\sigma_t$ (MPa)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,2\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,5\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{1,0\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (1/h)	$\bar{T}$ (°C)
366	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	600
339	$8,70 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	600
325	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	600
312	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$4,65 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	600
305	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	600
284	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	600
271	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	600
271	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	600
244	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	600
271	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$9,99 \cdot 10^{-5}$	650
257	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$	-----	$4,60 \cdot 10^{-5}$	650
237	$4,55 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-5}$	-----	$2,12 \cdot 10^{-5}$	650
217	$1,90 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	-----	$1,70 \cdot 10^{-5}$	650
183	$1,38 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	650
149	$5,26 \cdot 10^{-6}$	$7,14 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$	650
190	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	700
190	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	700
169	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	700
149	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$7,14 \cdot 10^{-5}$	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$6,60 \cdot 10^{-5}$	700
122	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	700
108	$8,70 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$	$9,52 \cdot 10^{-6}$	$7,34 \cdot 10^{-6}$	700
101	$7,55 \cdot 10^{-6}$	$7,46 \cdot 10^{-6}$	$9,09 \cdot 10^{-6}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$	700
149	$9,09 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$	750
115	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	750
61	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	750

Tabelle 9:

## Mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten

des austenitischen Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616

(Werkst.-Nr. 1.4981) Charge 51857, Zustand: LG + 20% KV

$\sigma_t$ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{0,2\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{0,5\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{1,0\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (1/h)	T (°C)
311	$7,40 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$5,00 \cdot 10^{-5}$	600
297	$6,06 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$4,38 \cdot 10^{-5}$	600
270	$2,35 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$1,73 \cdot 10^{-5}$	600
256	$2,10 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$1,60 \cdot 10^{-5}$	600
216	$9,45 \cdot 10^{-6}$	-----	-----	$7,50 \cdot 10^{-6}$	600
203	$5,00 \cdot 10^{-6}$	-----	-----	$3,60 \cdot 10^{-6}$	600
257	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	650
236	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$8,93 \cdot 10^{-5}$	$5,25 \cdot 10^{-5}$	650
216	$3,57 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$3,25 \cdot 10^{-5}$	650
189	$1,43 \cdot 10^{-5}$	-----	-----	$1,20 \cdot 10^{-5}$	650
169	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	-----	$1,65 \cdot 10^{-5}$	650
149	$9,52 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	-----	$8,00 \cdot 10^{-6}$	650
122	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$	-----	$2,42 \cdot 10^{-6}$	650
224	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$5,88 \cdot 10^{-4}$	$5,20 \cdot 10^{-4}$	700
169	$9,09 \cdot 10^{-5}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-5}$	700
129	$7,02 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-5}$	700
108	$3,77 \cdot 10^{-5}$	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	700
88	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-5}$	700
74,5	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$2,17 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$	700
169	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-4}$	750
135	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$	750
102	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$	$9,09 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	750
88	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$	750
79	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$7,40 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	750
67	$4,78 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-5}$	750
54	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	750

**Tabelle 10:** Mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten des austenitischen Stahles X8-Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkst.-Nr. 1.4981)  
Charge 70015; Zustand: LG

$\sigma_t$ (MPa)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,2\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{0,5\%}$ (1/h)	$\bar{\dot{\epsilon}}_{1,0\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (1/h)	$T$ (°C)
169	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$8,11 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-4}$	700
156	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$9,61 \cdot 10^{-4}$	$7,69 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	700
135	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$	700
108	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$6,89 \cdot 10^{-5}$	700
81	$5,55 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-5}$	700
54	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	700
324	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$7,33 \cdot 10^{-4}$	600
304	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	600
257	$3,45 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$5,28 \cdot 10^{-5}$	600
237	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	600

Charge 70015; LG + 12% KV

209	-----	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$2,94 \cdot 10^{-4}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$	700
189	-----	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	700
169	$9,09 \cdot 10^{-4}$	$2,56 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	700
135	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$9,52 \cdot 10^{-5}$	$7,29 \cdot 10^{-5}$	700
135	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	700
122	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$9,09 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$4,81 \cdot 10^{-5}$	700
108	$3,84 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	700
67,5	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-6}$	$7,14 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	700
372	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	-----	$1,66 \cdot 10^{-4}$	600
372	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	-----	$9,02 \cdot 10^{-5}$	600
338	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$5,20 \cdot 10^{-5}$	-----	$4,16 \cdot 10^{-5}$	600
338	$5,71 \cdot 10^{-5}$	$5,20 \cdot 10^{-5}$	-----	$4,25 \cdot 10^{-5}$	600
338	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$4,76 \cdot 10^{-5}$	-----	$3,52 \cdot 10^{-5}$	600
325	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	600
304	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$	-----	$8,66 \cdot 10^{-6}$	600
304	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	600
270	$7,69 \cdot 10^{-6}$	$7,69 \cdot 10^{-6}$	-----	$5,49 \cdot 10^{-6}$	600
270	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$	-----	$4,65 \cdot 10^{-6}$	600
243	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$2,12 \cdot 10^{-6}$	-----	$1,43 \cdot 10^{-6}$	600



Tabelle 11: Mittlere und minimale Kriechgeschwindigkeiten des austenitischen Stahles X8 Cr Ni Mo Nb 1616 (Werkst.-Nr. 1.4981)

Charge HV 139; Zustand: LG +  $\leq$  5% KV

$\sigma_t$ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{0,2\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{0,5\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{1,0\%}$ (1/h)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (1/h)	$\bar{T}$ (°C)
203	-----	-----	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	700
169	-----	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	700
135	-----	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-5}$	700
122	-----	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	700
101	-----	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-6}$	700
47,4	-----	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-6}$	700
324	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	700
304	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	$5,55 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-5}$	700
270	$9,09 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	700
257	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	700



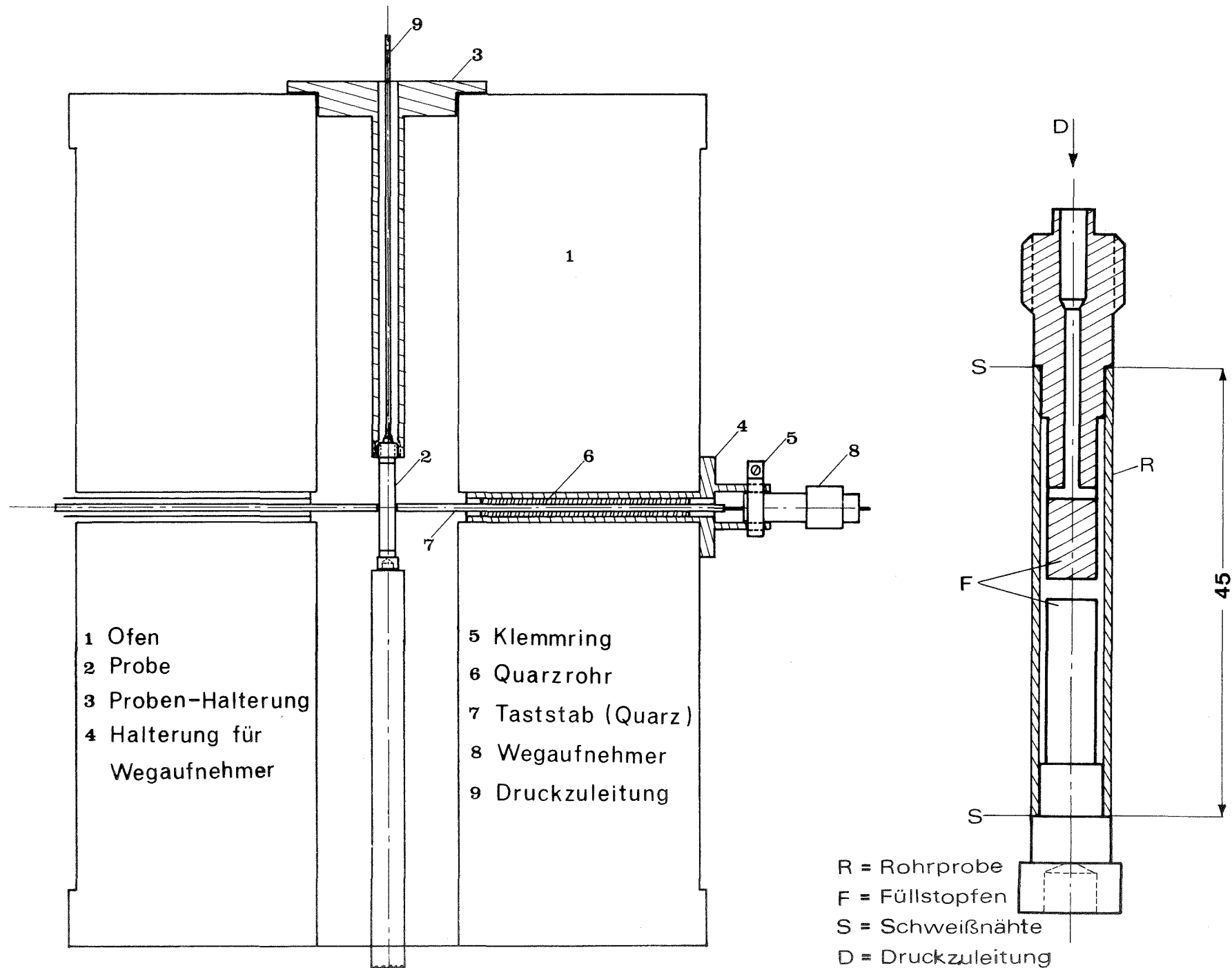


Abb. 1: Dehnungsmeßeinrichtung und Probenform für Zeitstand- und Kriechversuche

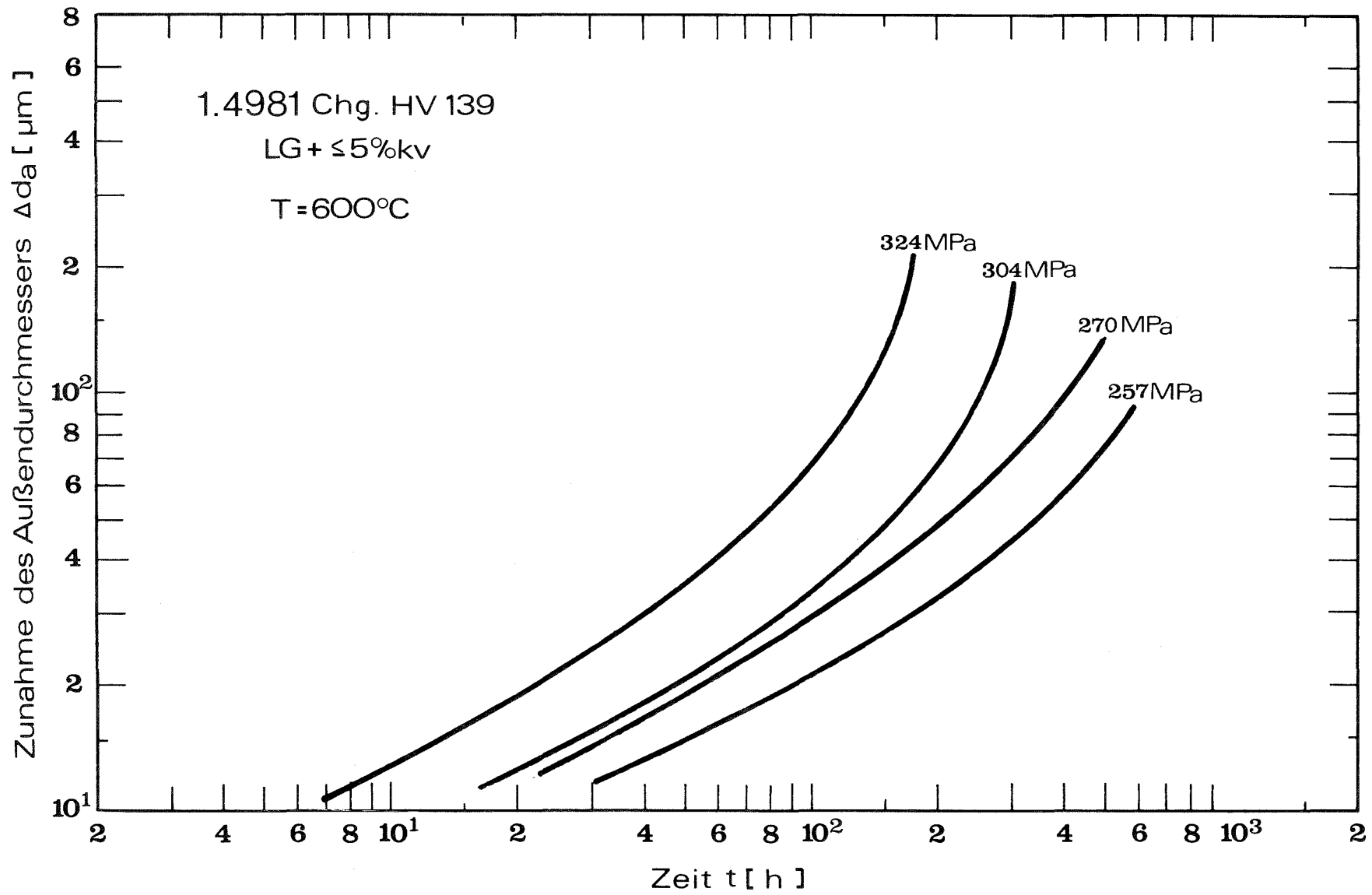


Abb. 2: Zeitdehnlinien des Stahles 1,4981, Chg. HV 139, bei 600°C.

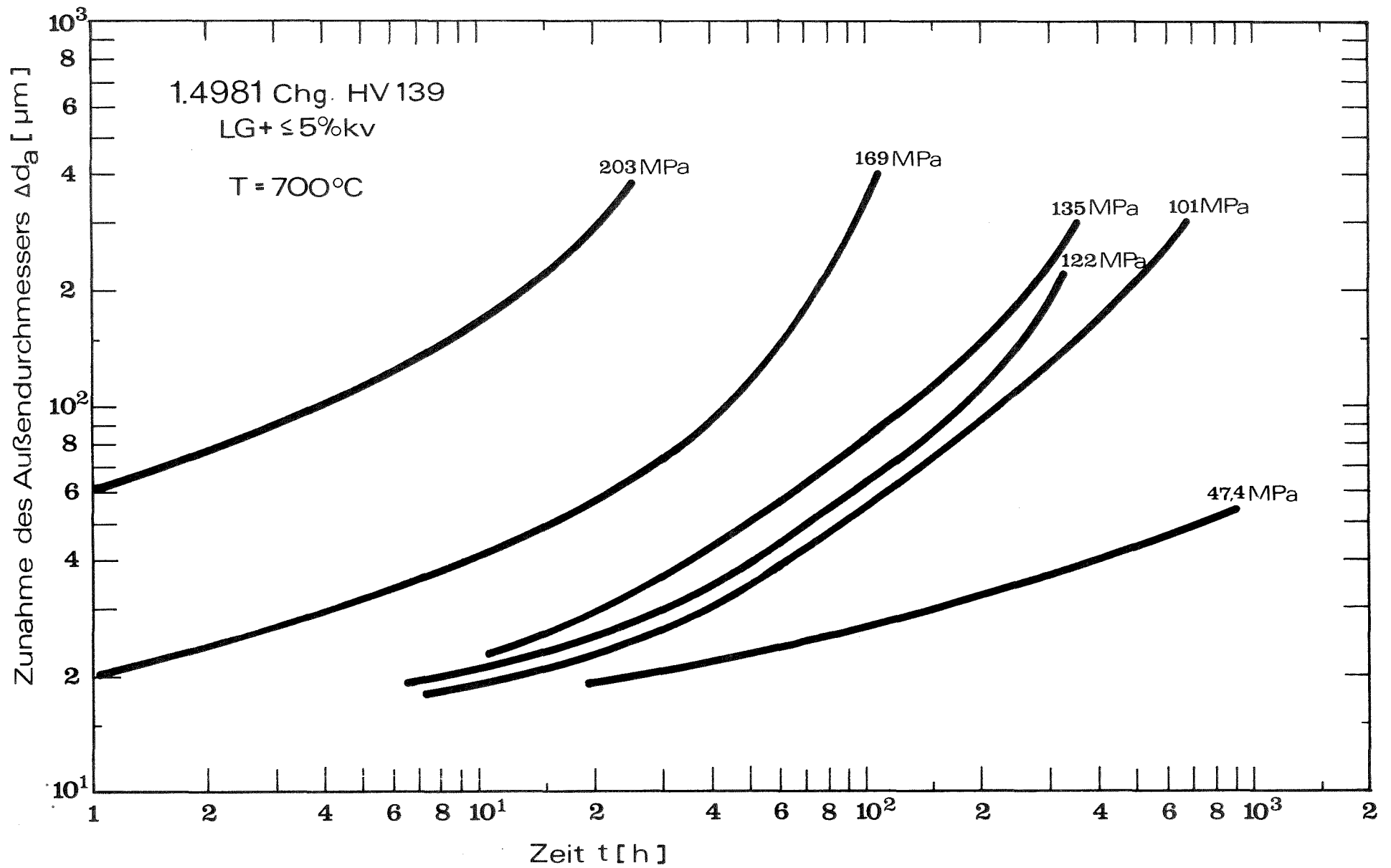


Abb. 3: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. HV 139, bei 700°C.

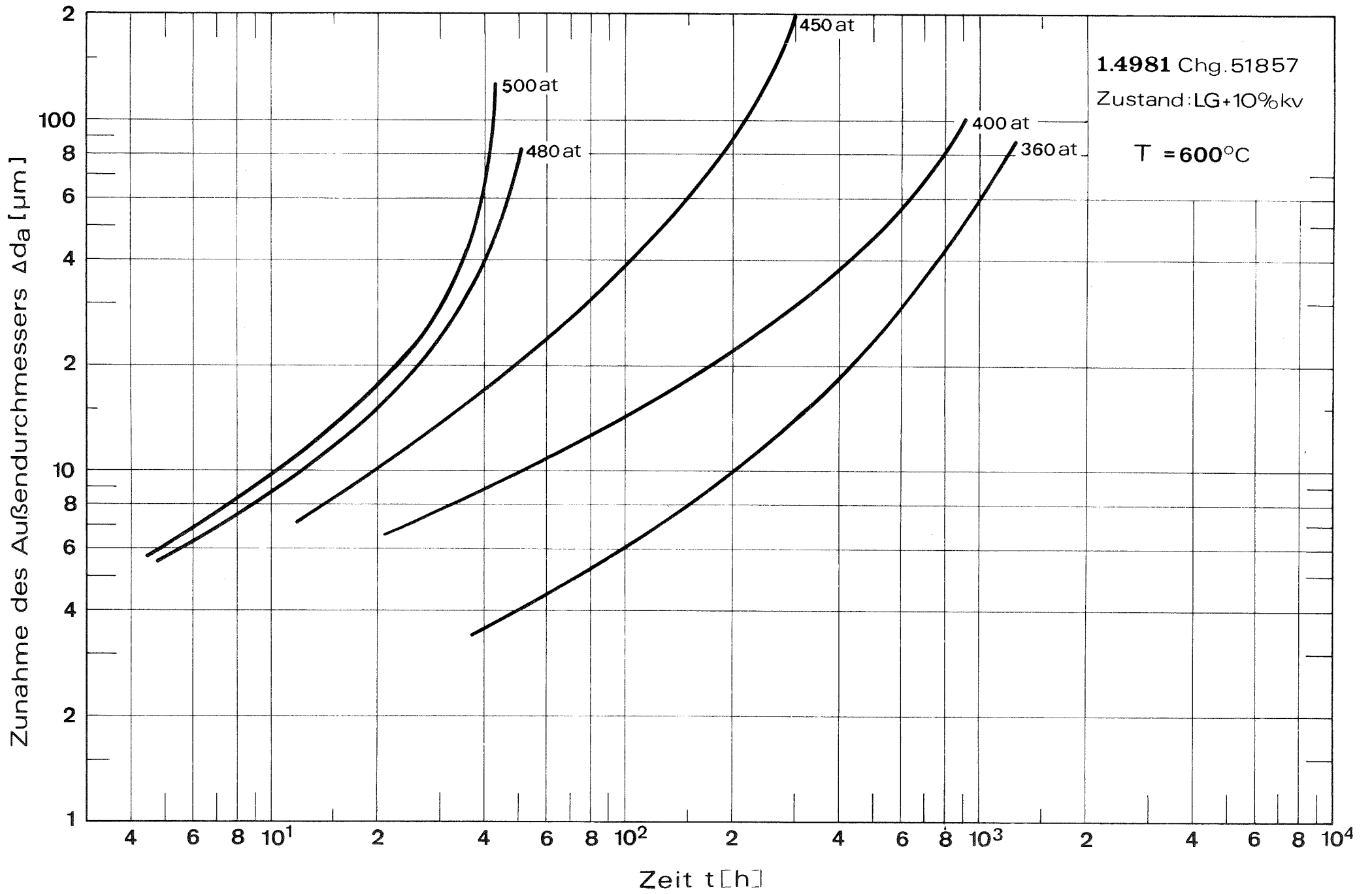


Abb. 4: Zeitdehnlängen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV) bei 600°C.

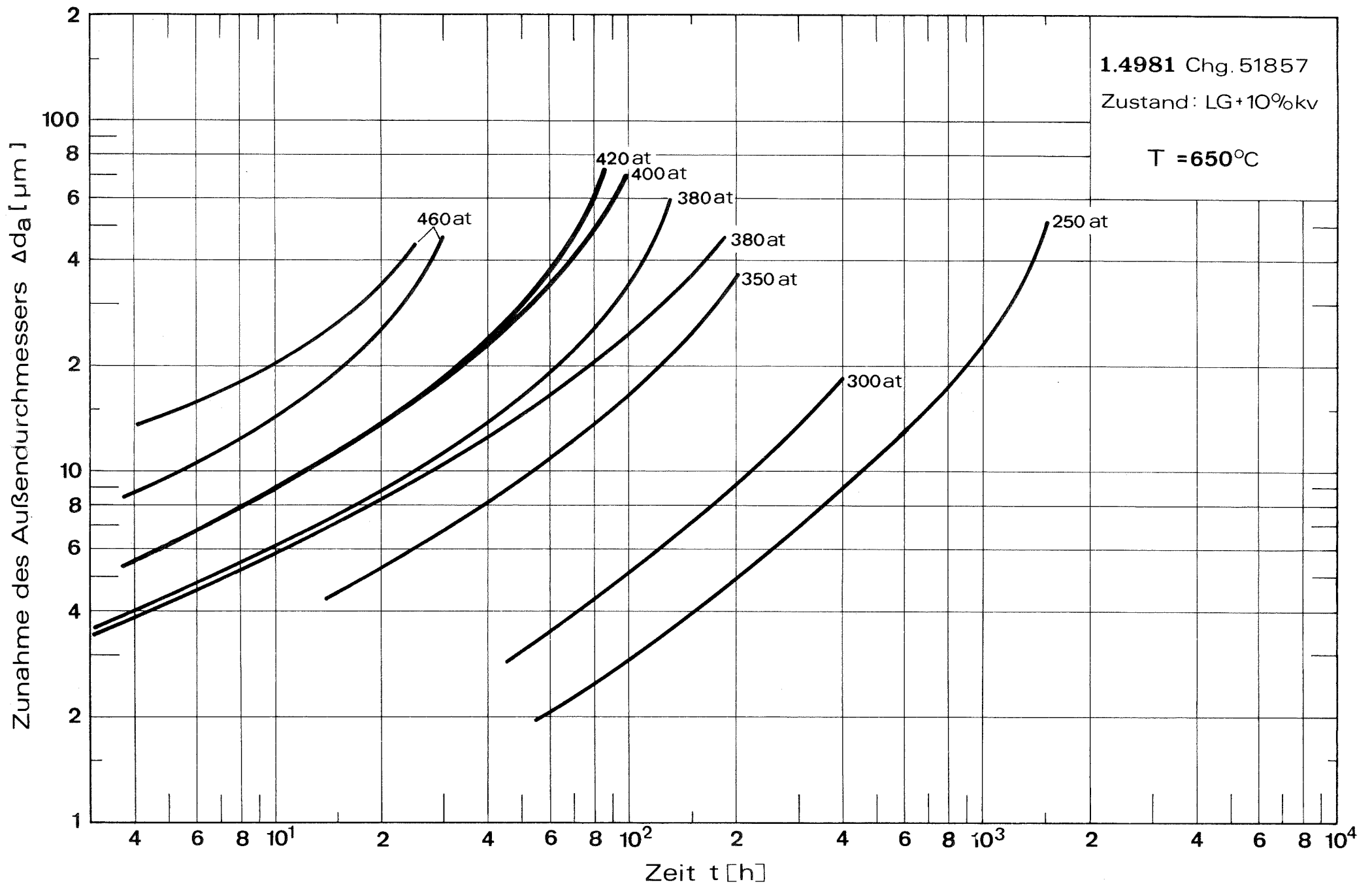


Abb. 5: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV) bei 650°C.

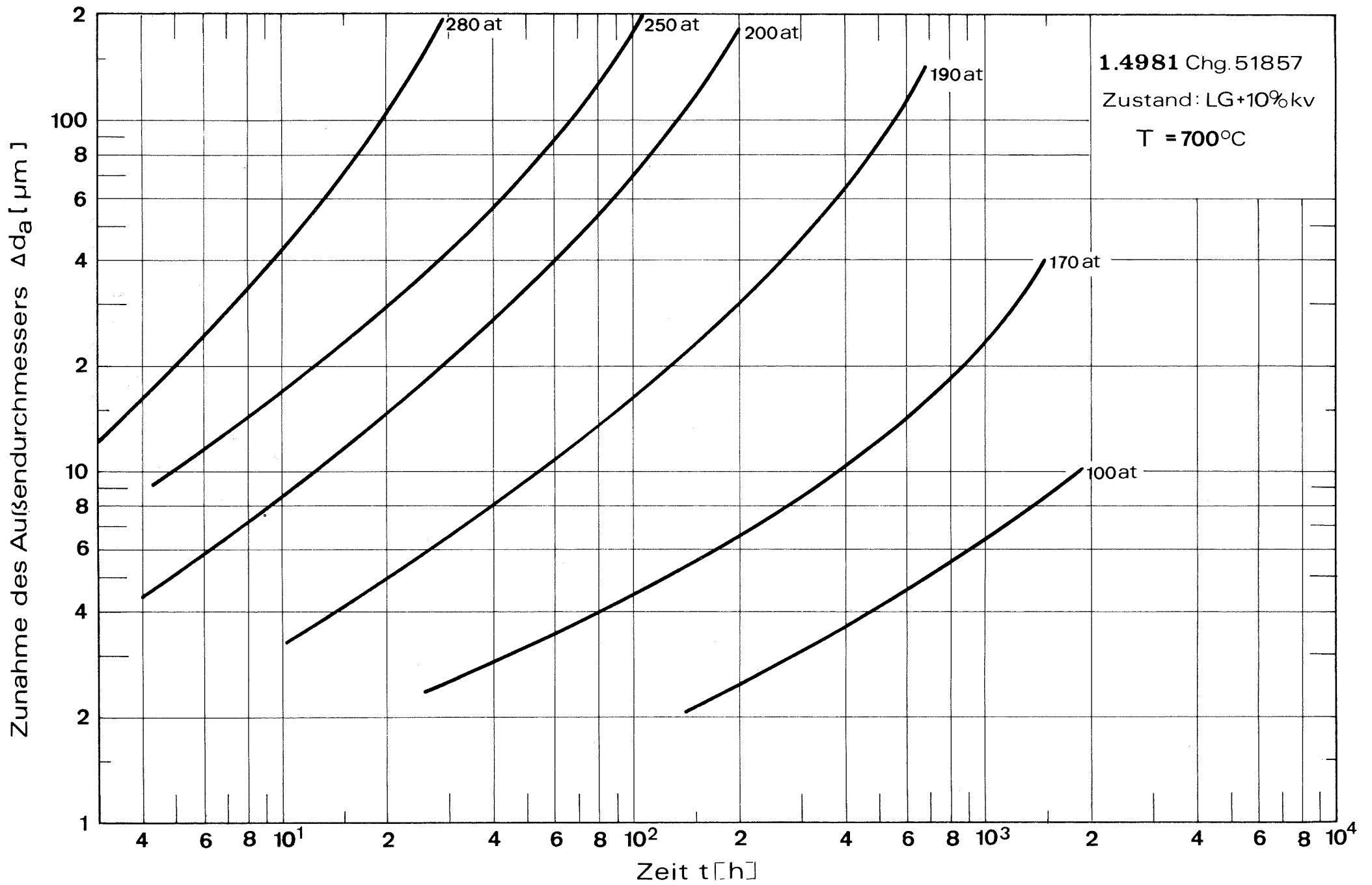


Abb. 6: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV) bei  $700^\circ\text{C}$ .



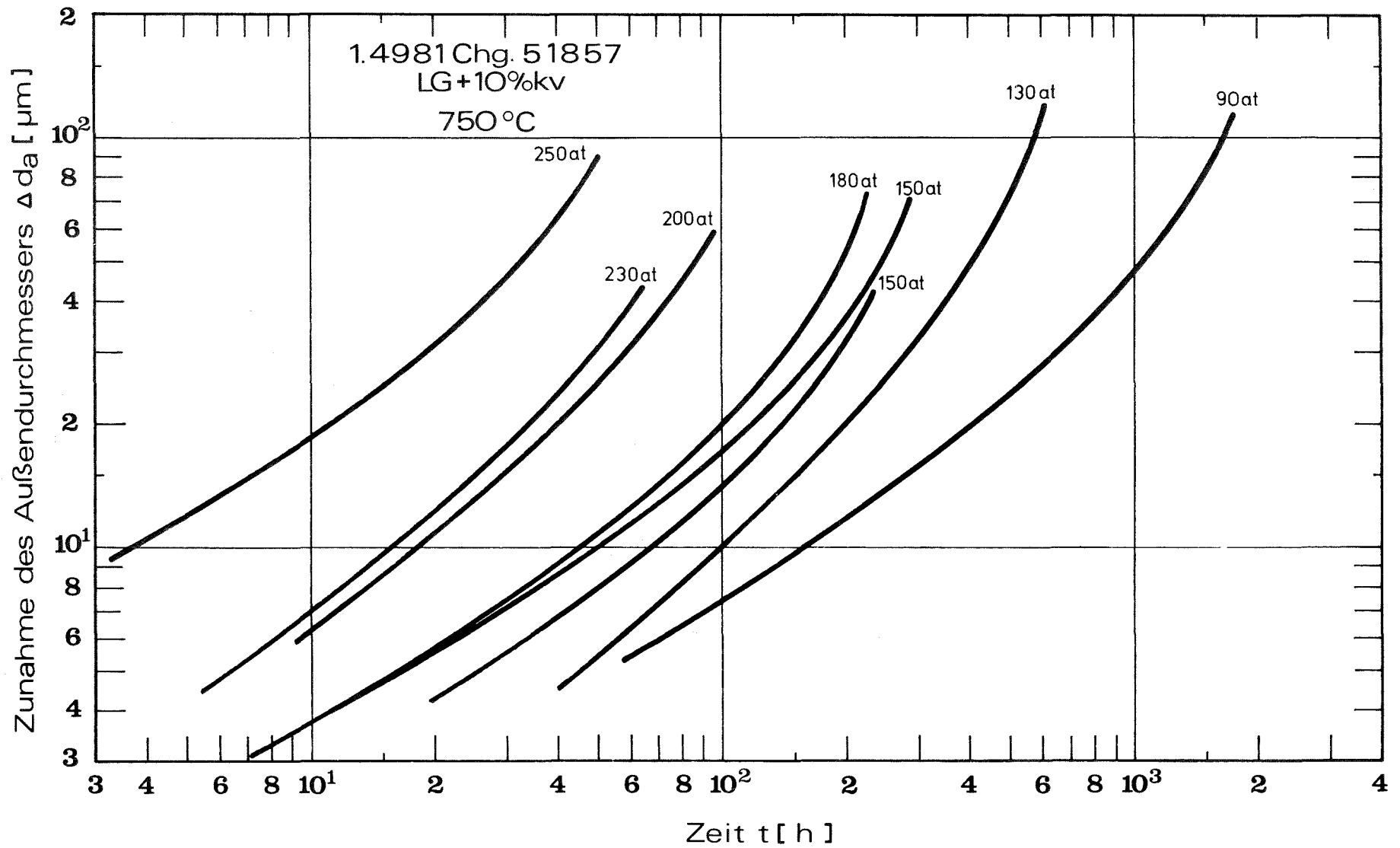


Abb. 7: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV) bei 750°C.

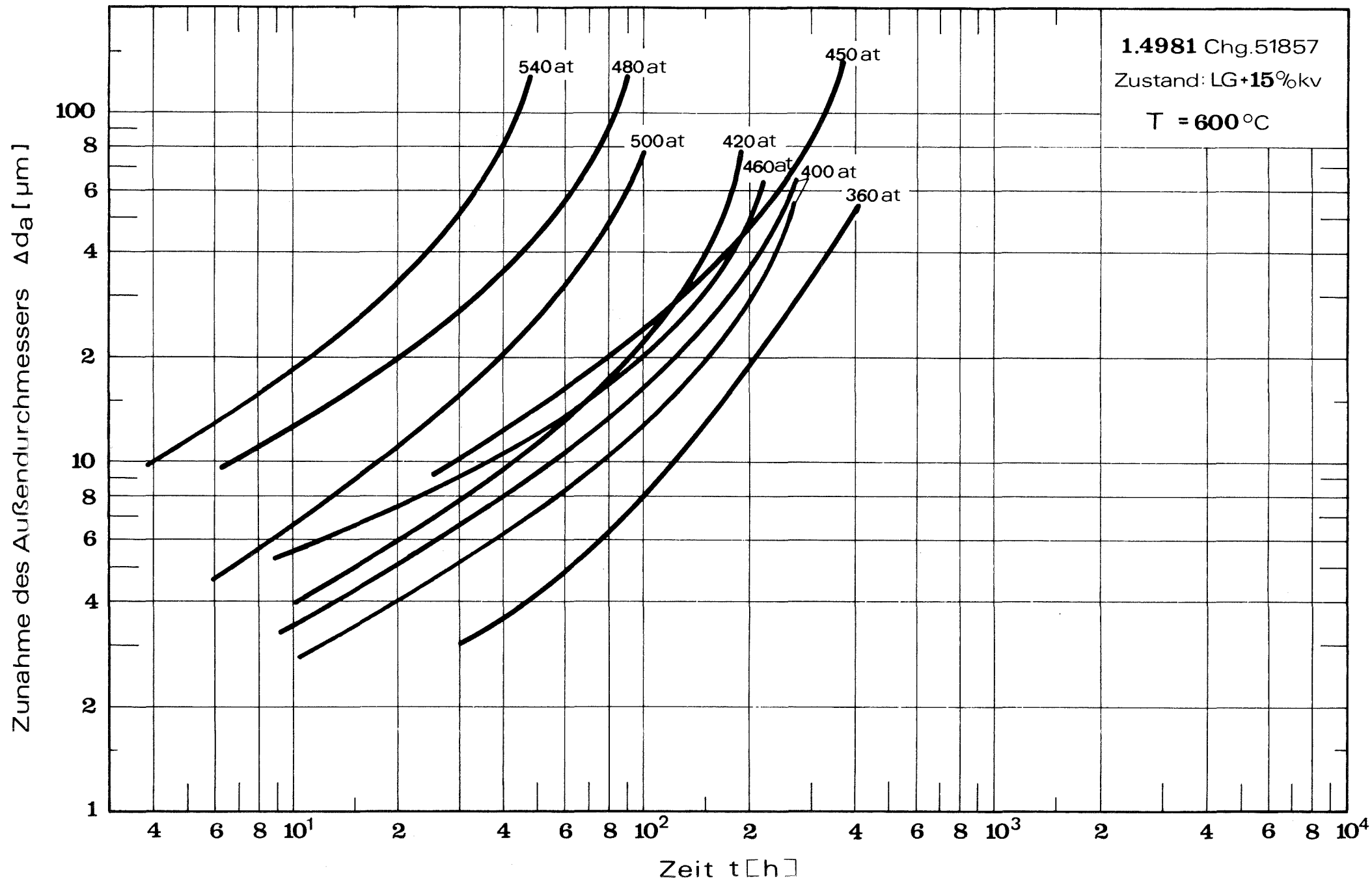


Abb. 8: Zeitdehnlinsen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV) bei 600°C.

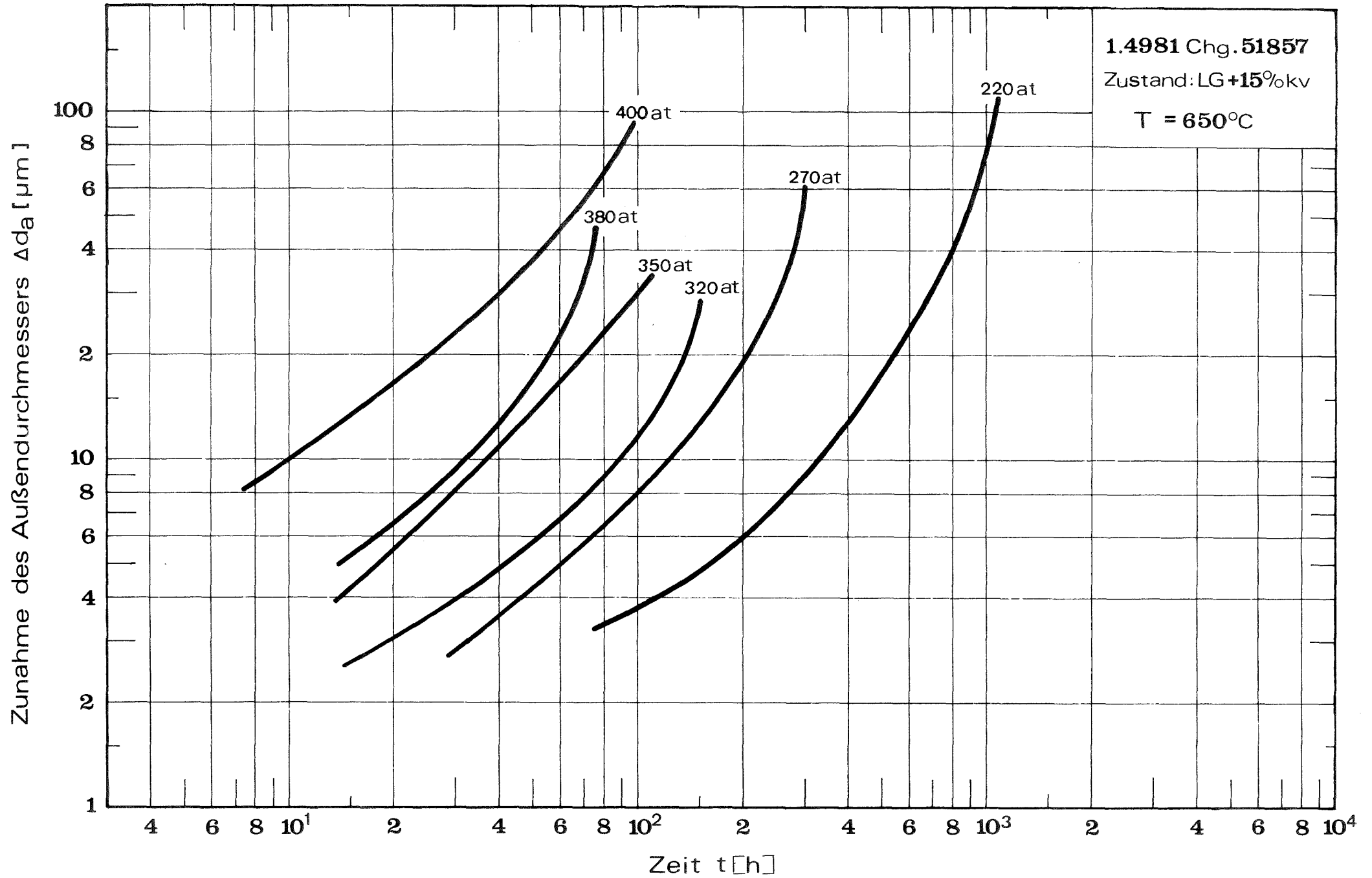


Abb. 9: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV) bei 650°C.

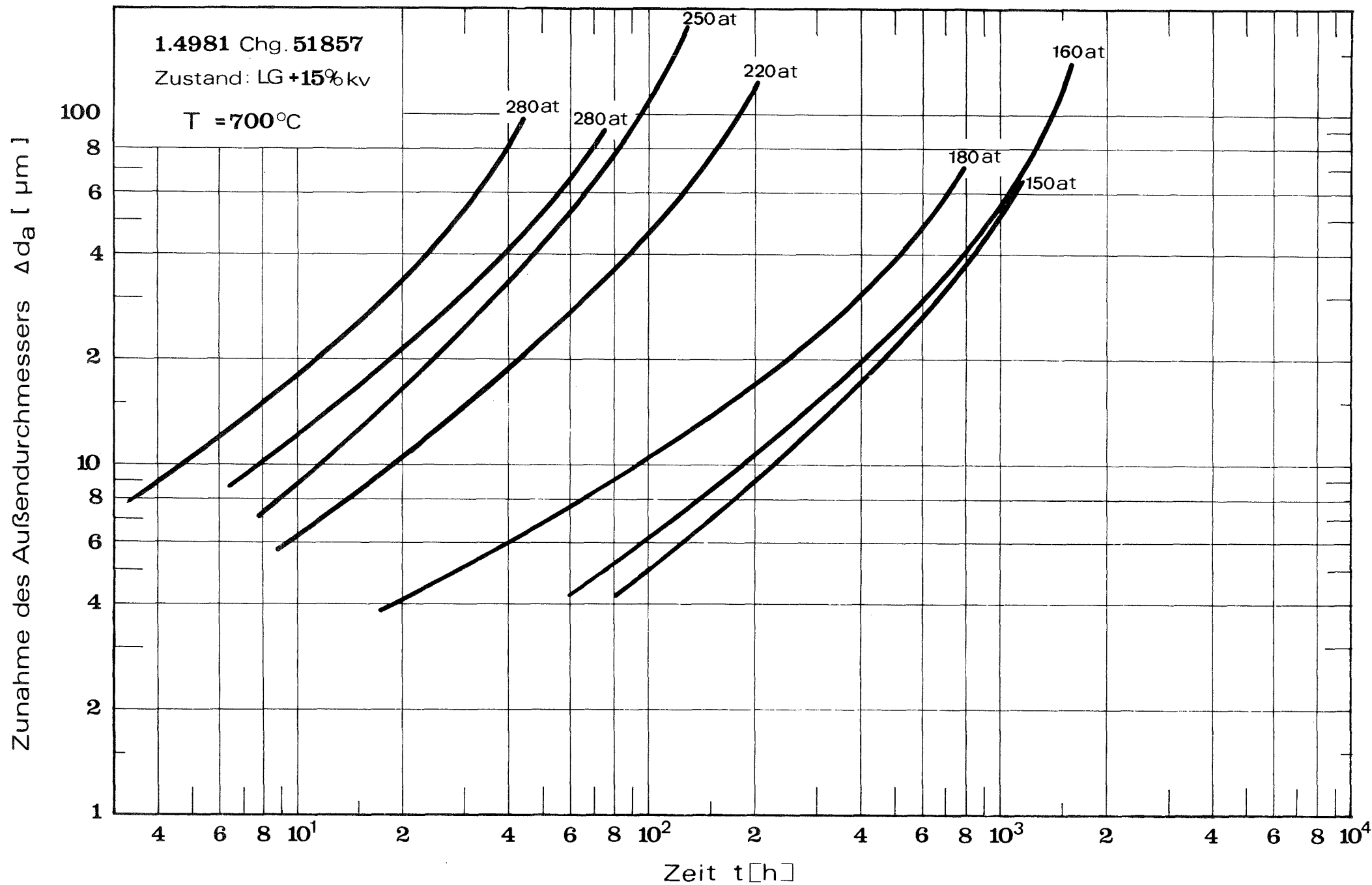


Abb. 10: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV) bei 700°C.

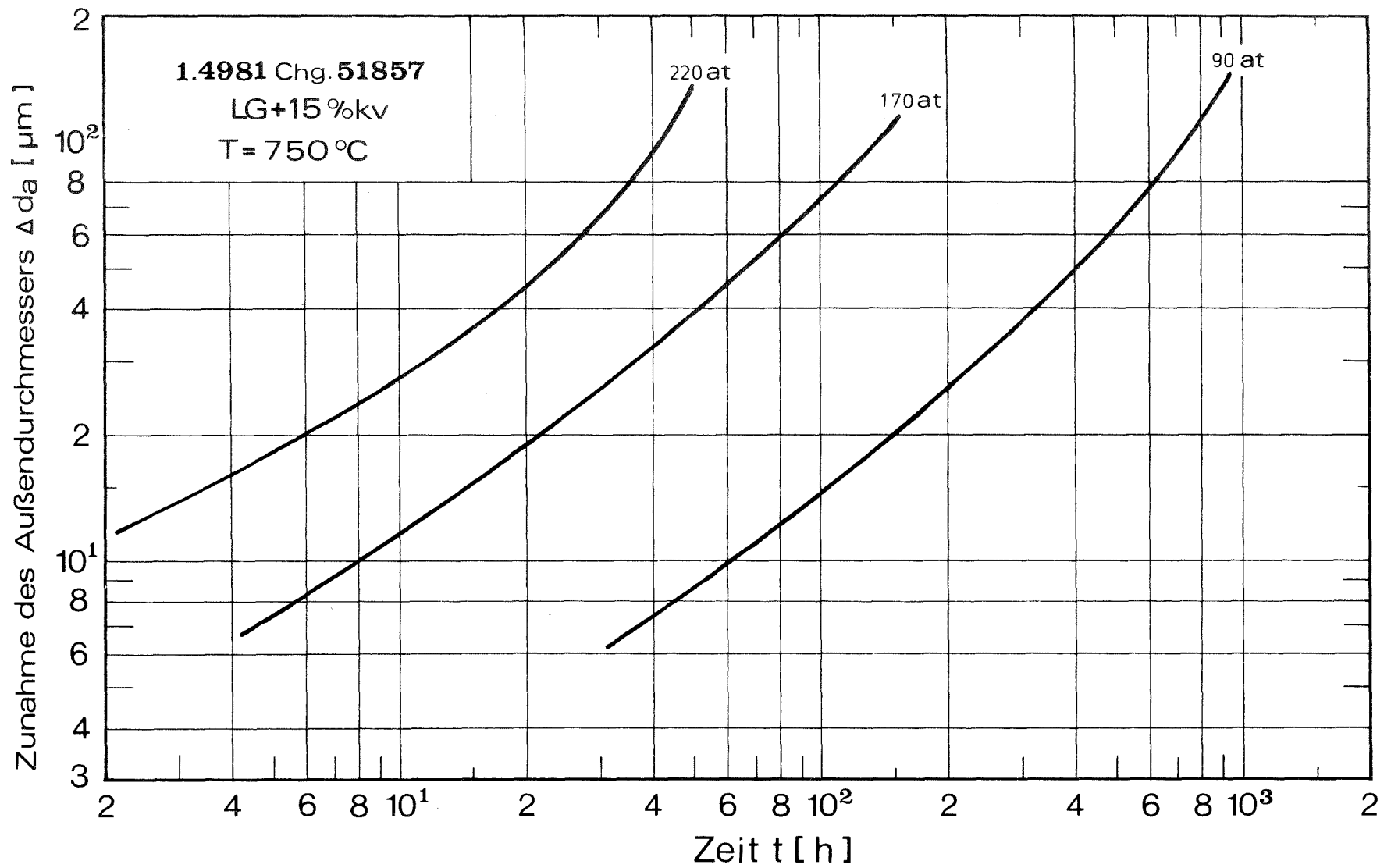


Abb. 11: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV) bei 750°C.

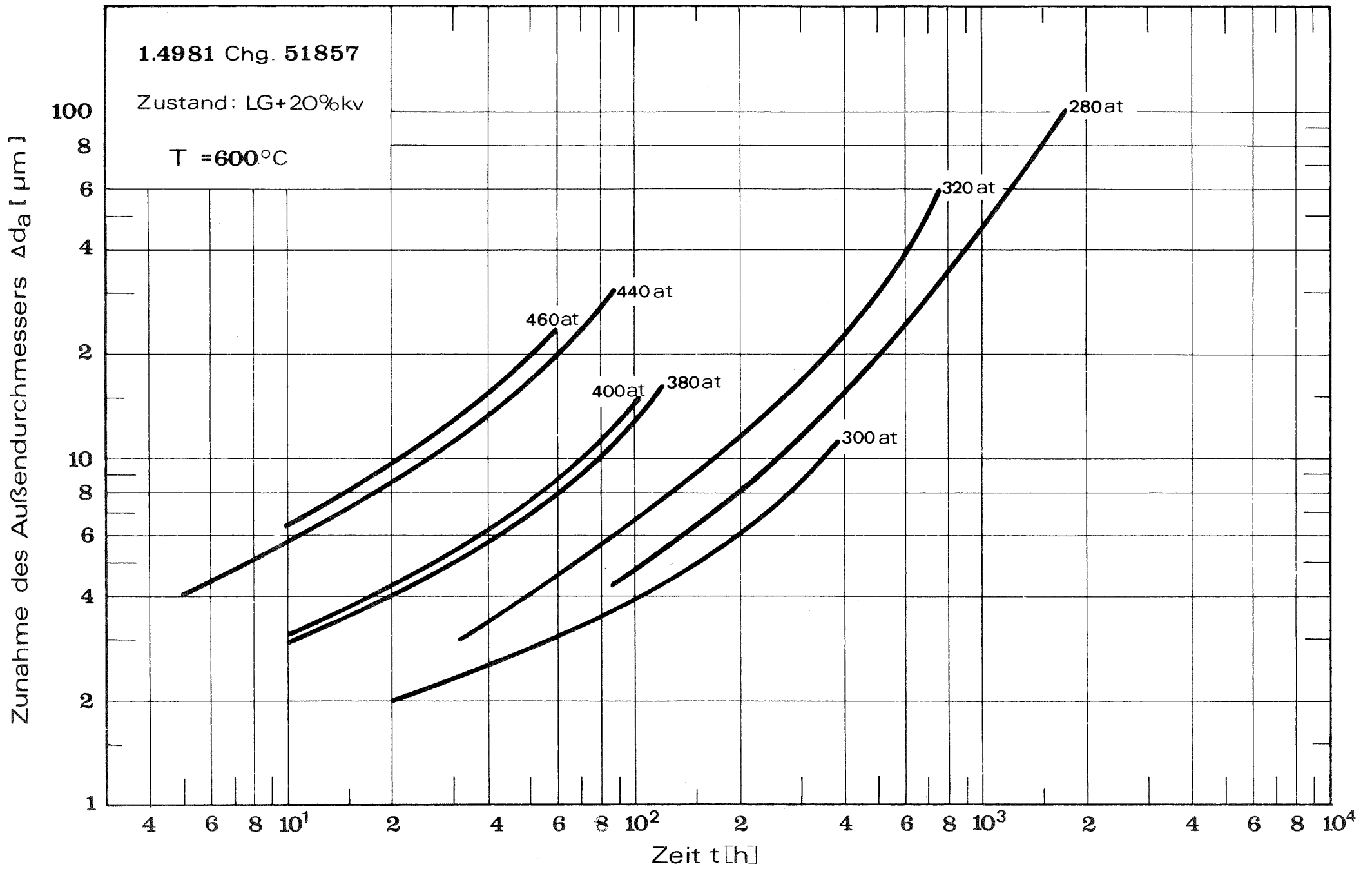


Abb. 12: Zeitdehnlinien des Stahle 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV) bei 600°C.

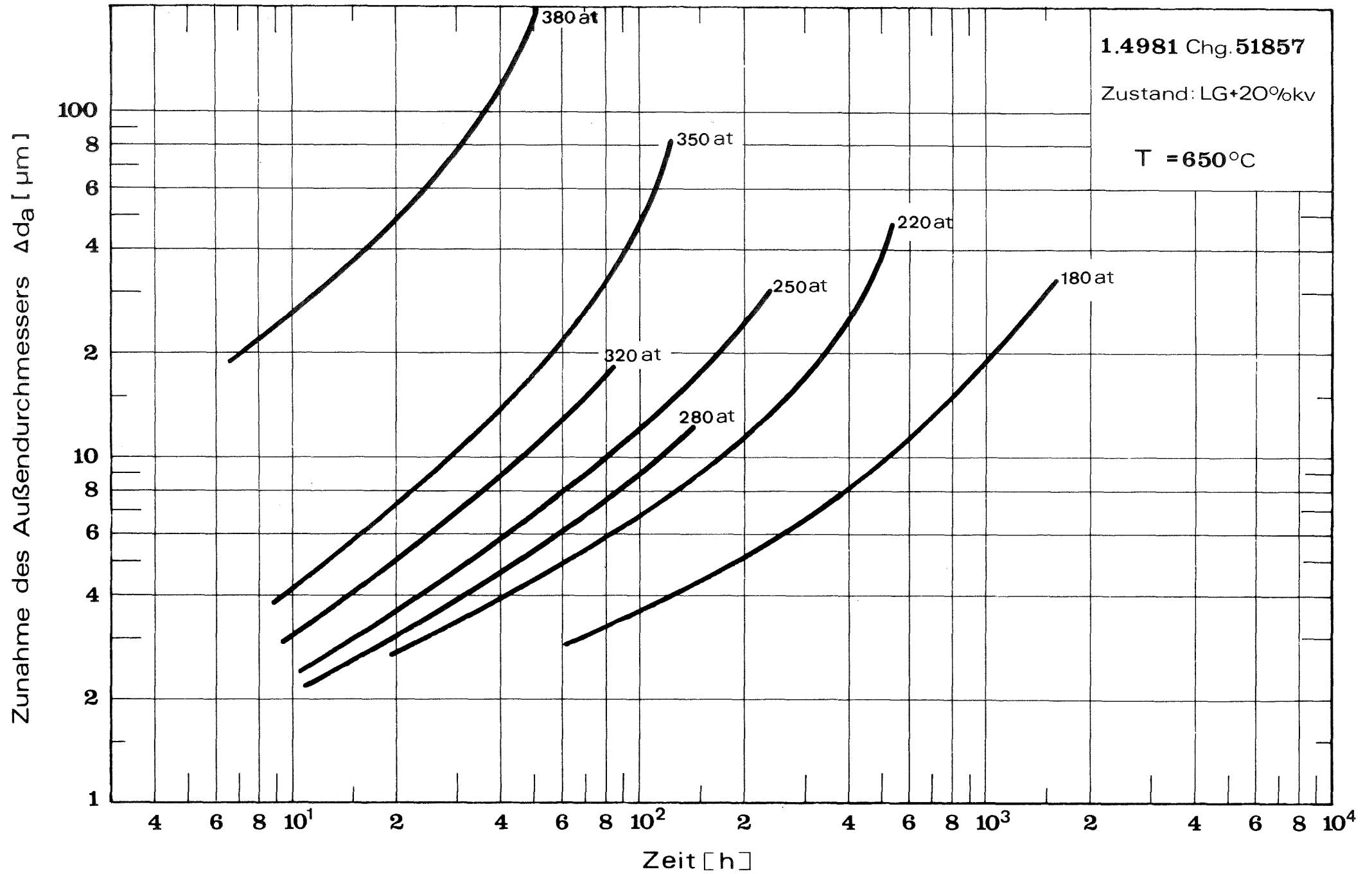


Abb. 13: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV) bei 650°C.

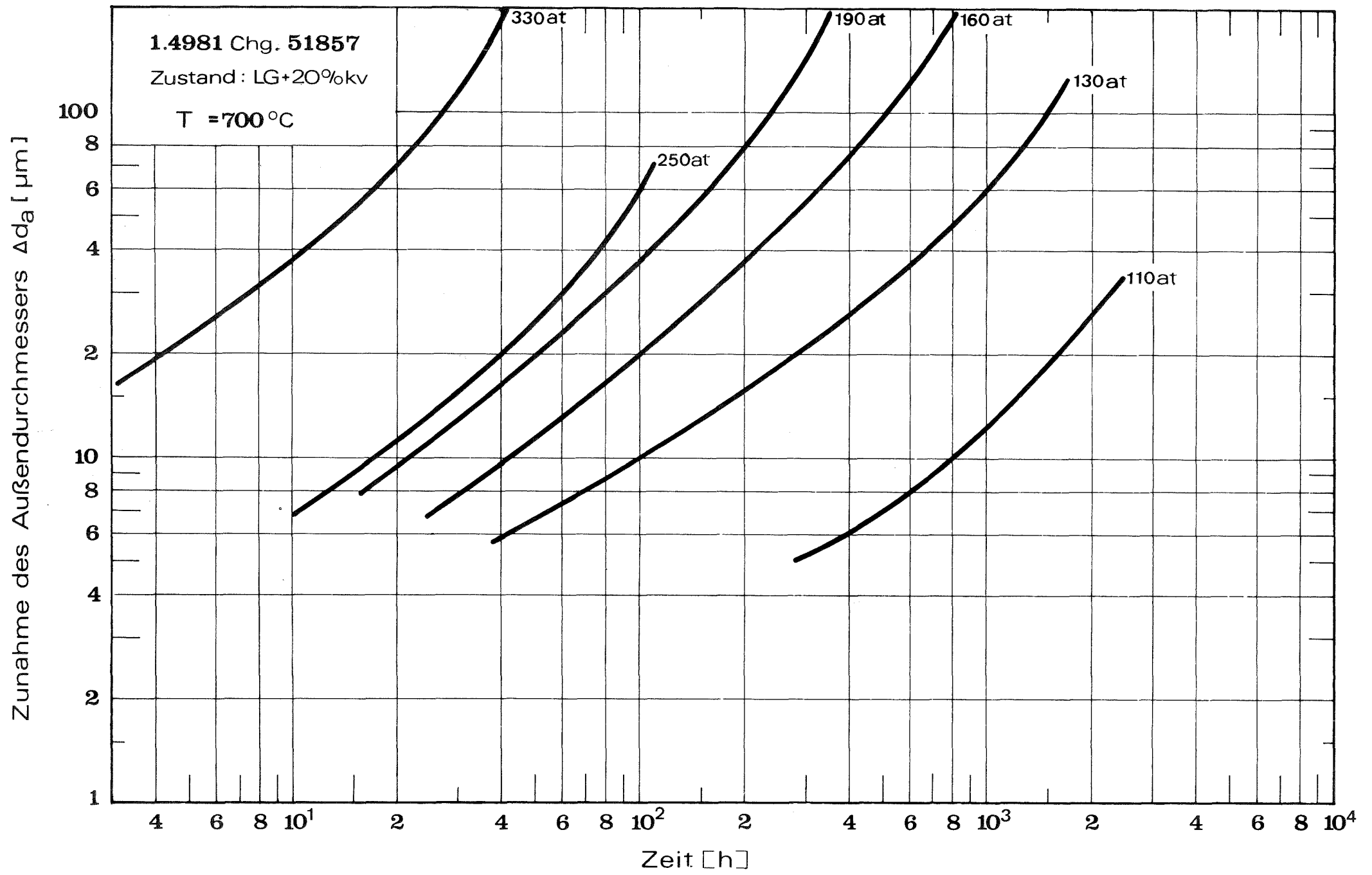


Abb. 14: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV) bei 700°C.



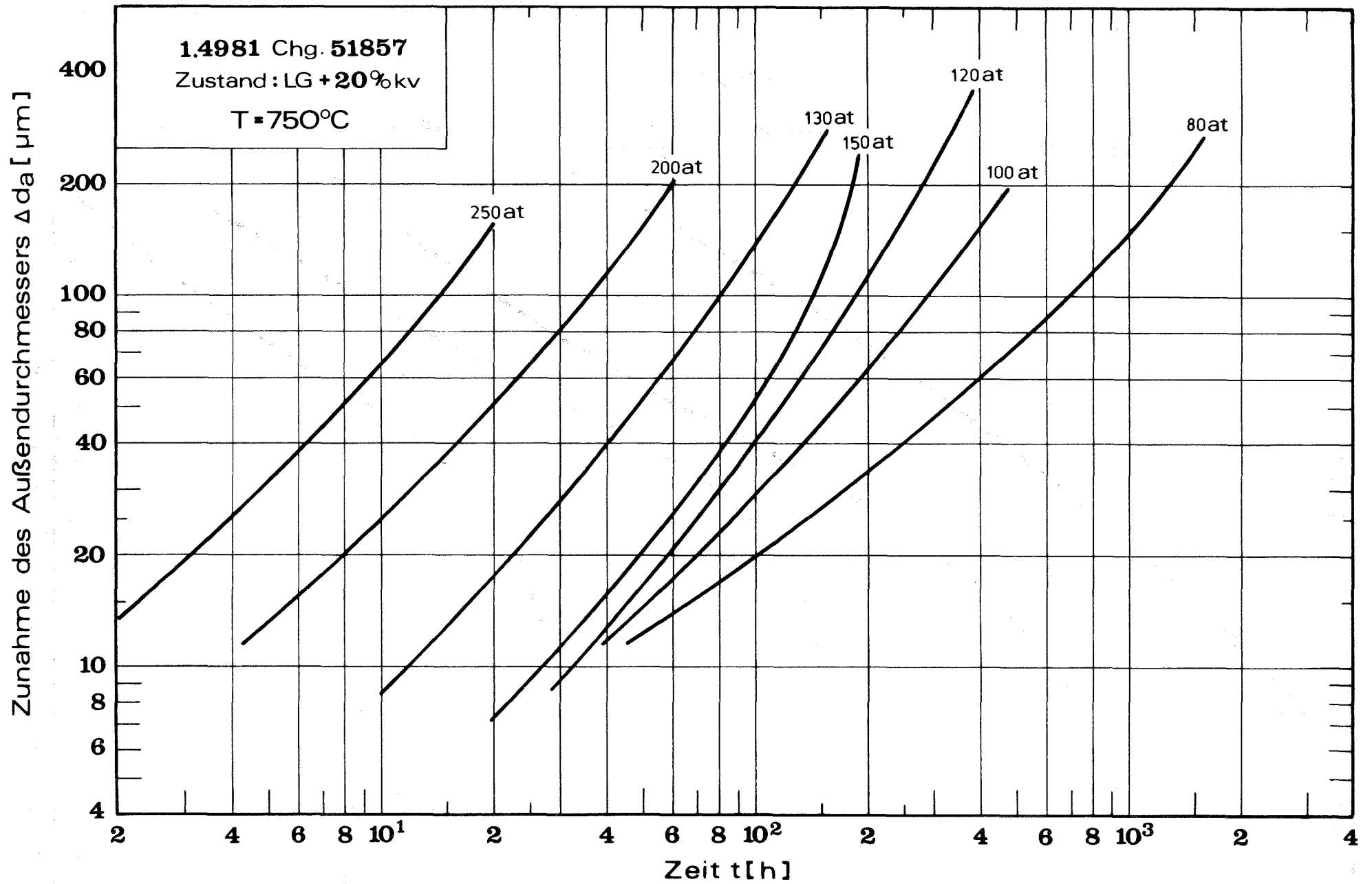


Abb. 15: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV) bei 750°C.

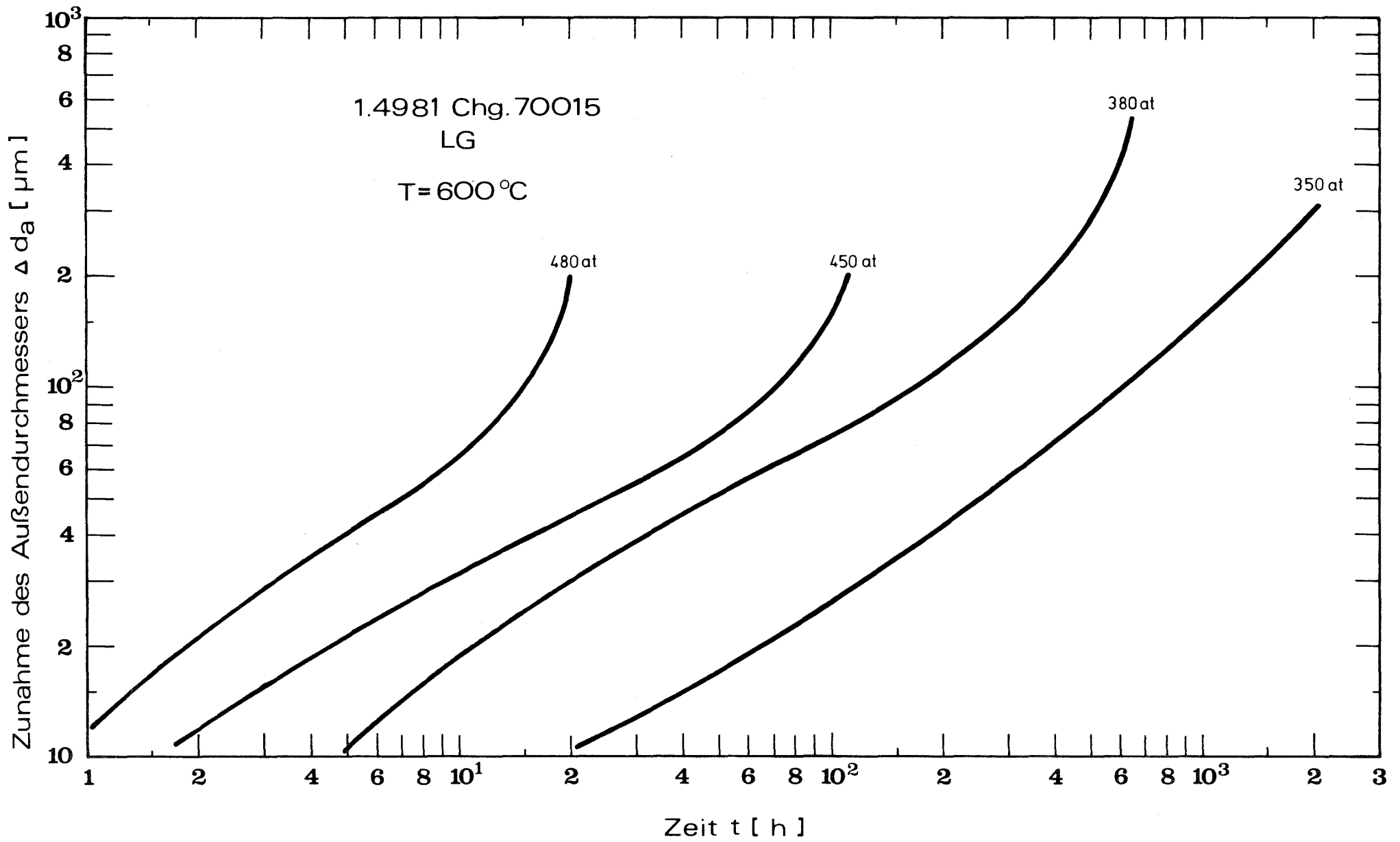


Abb. 16: Zeitdehnlängen des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG) bei 600°C.

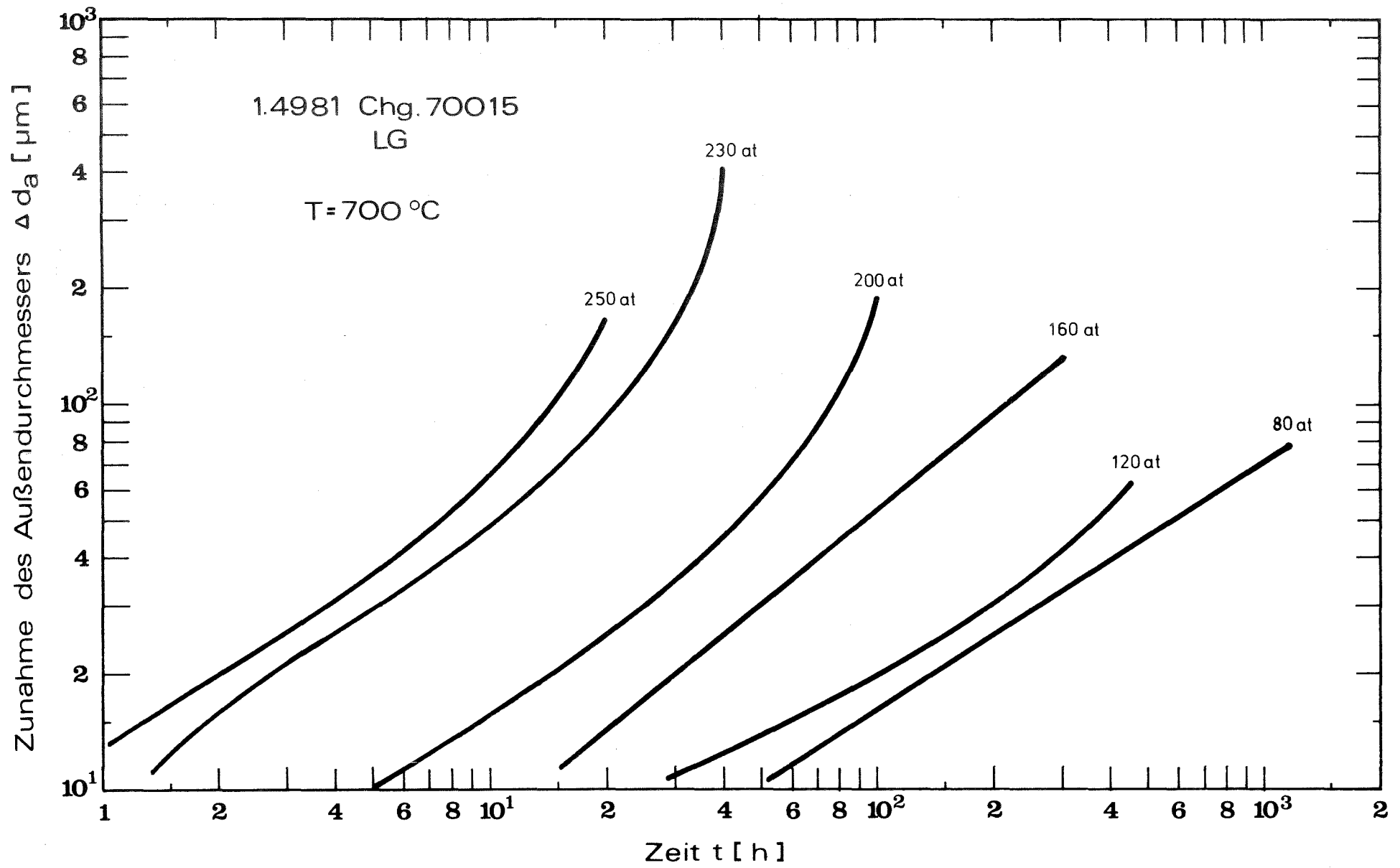


Abb. 17: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG) bei 700°C.

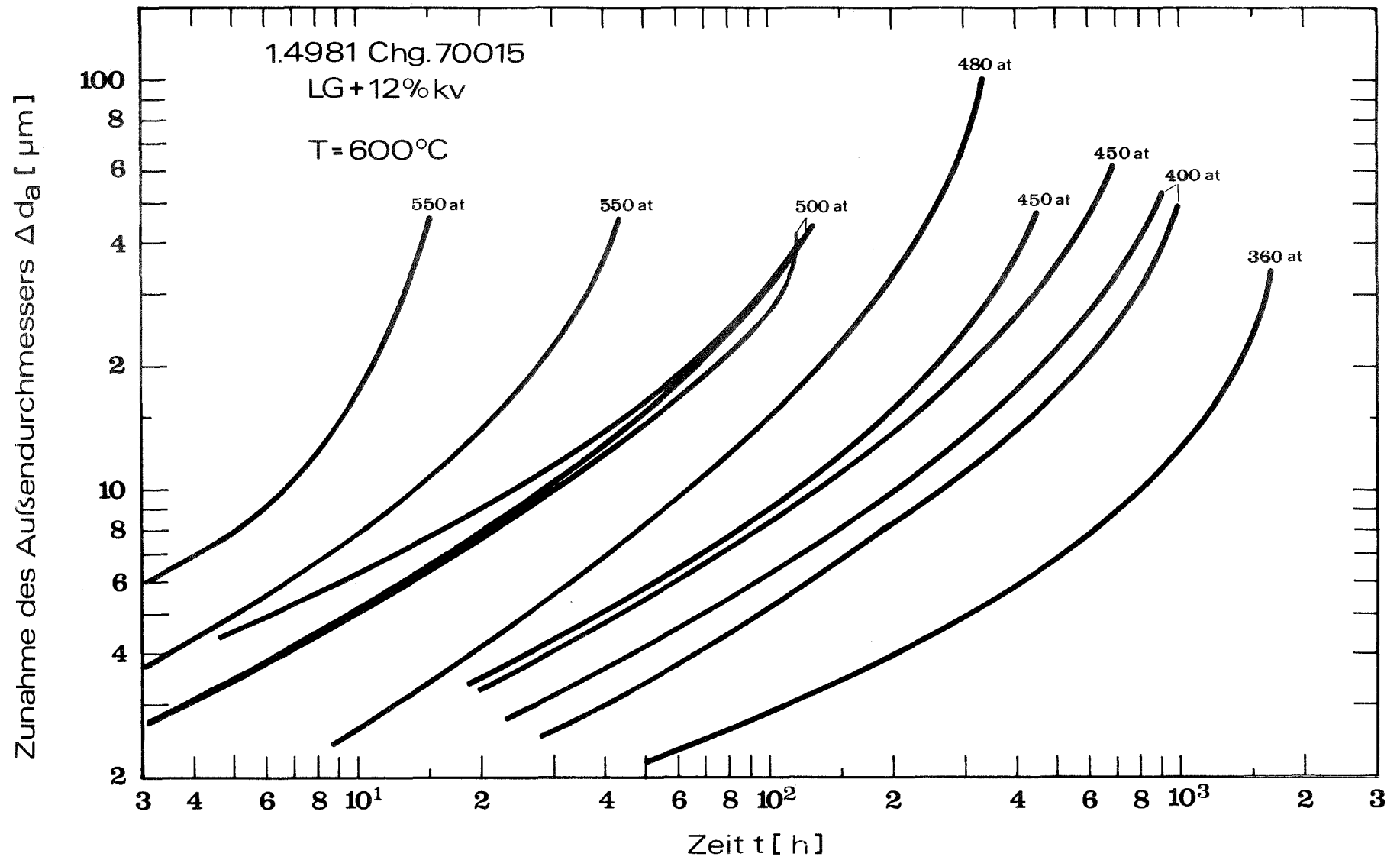


Abb. 18: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 12% KV) bei 600°C.

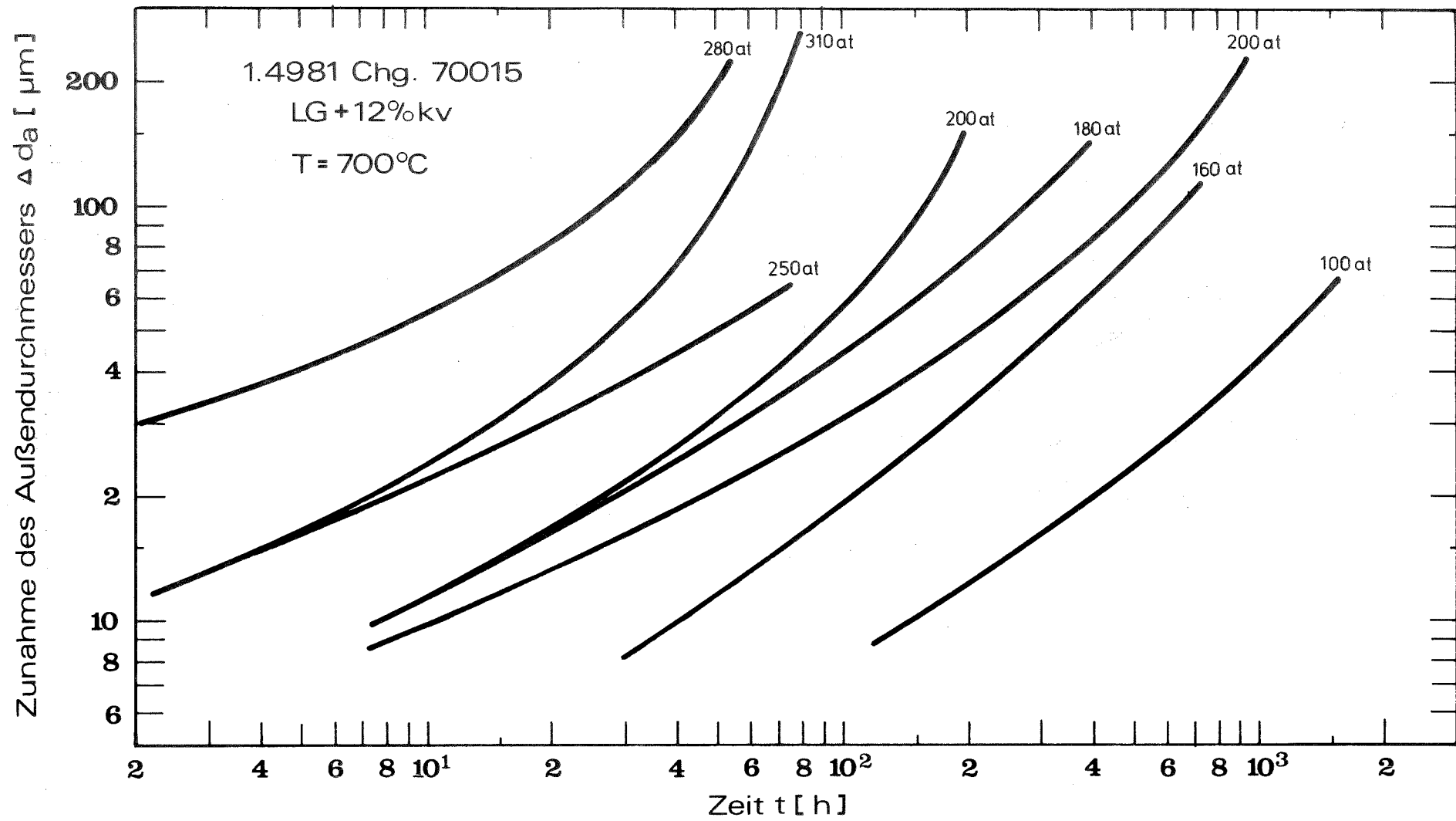


Abb. 19: Zeitdehnlinien des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 12% KV) bei 700°C.

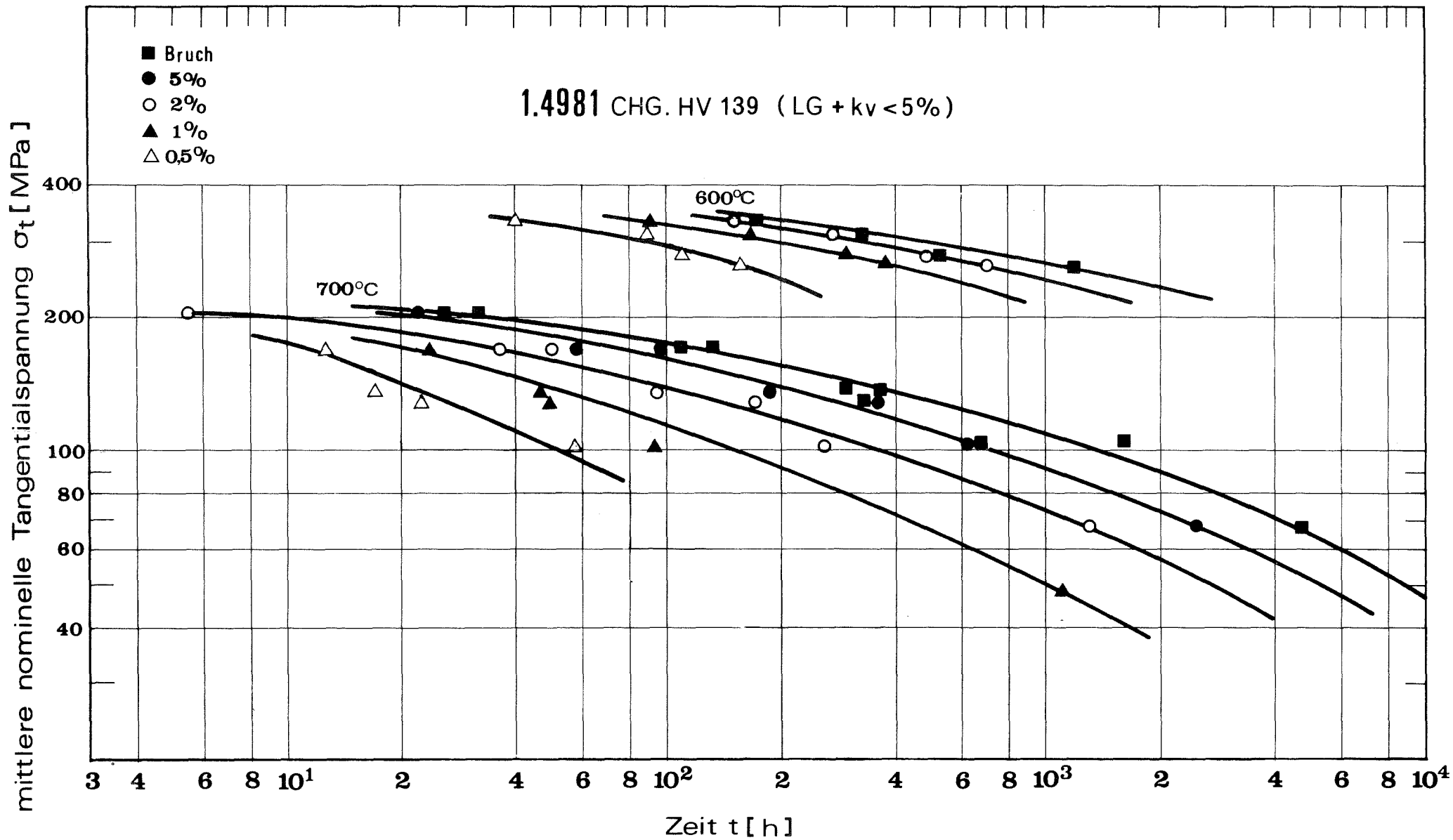


Abb. 20: Dehngrenzl原因en des Stahles 1.4981, Chg. HV 139.

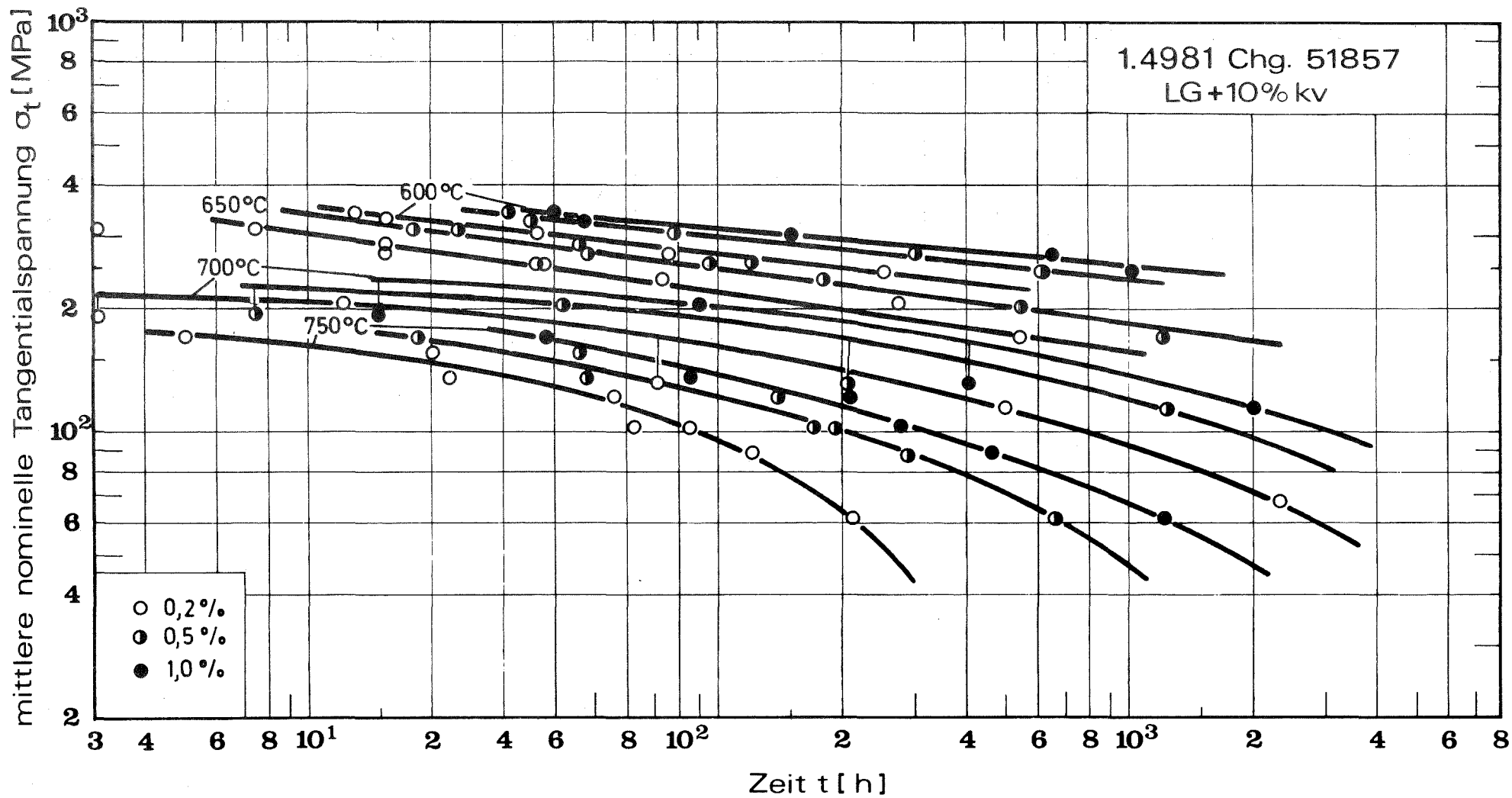


Abb. 21: Dehngrenzl原因 des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).

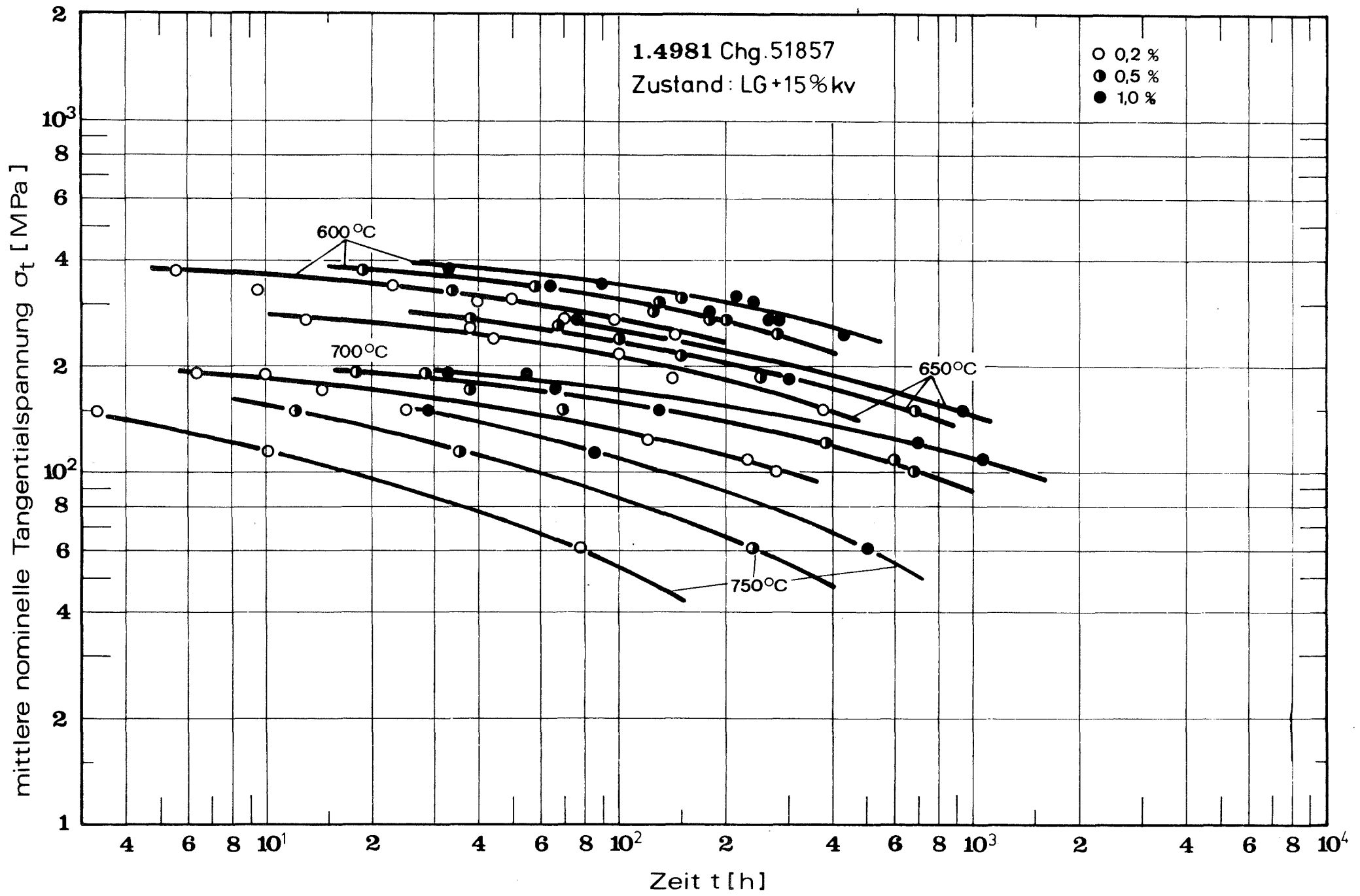


Abb. 22: Dehngrenzzlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).



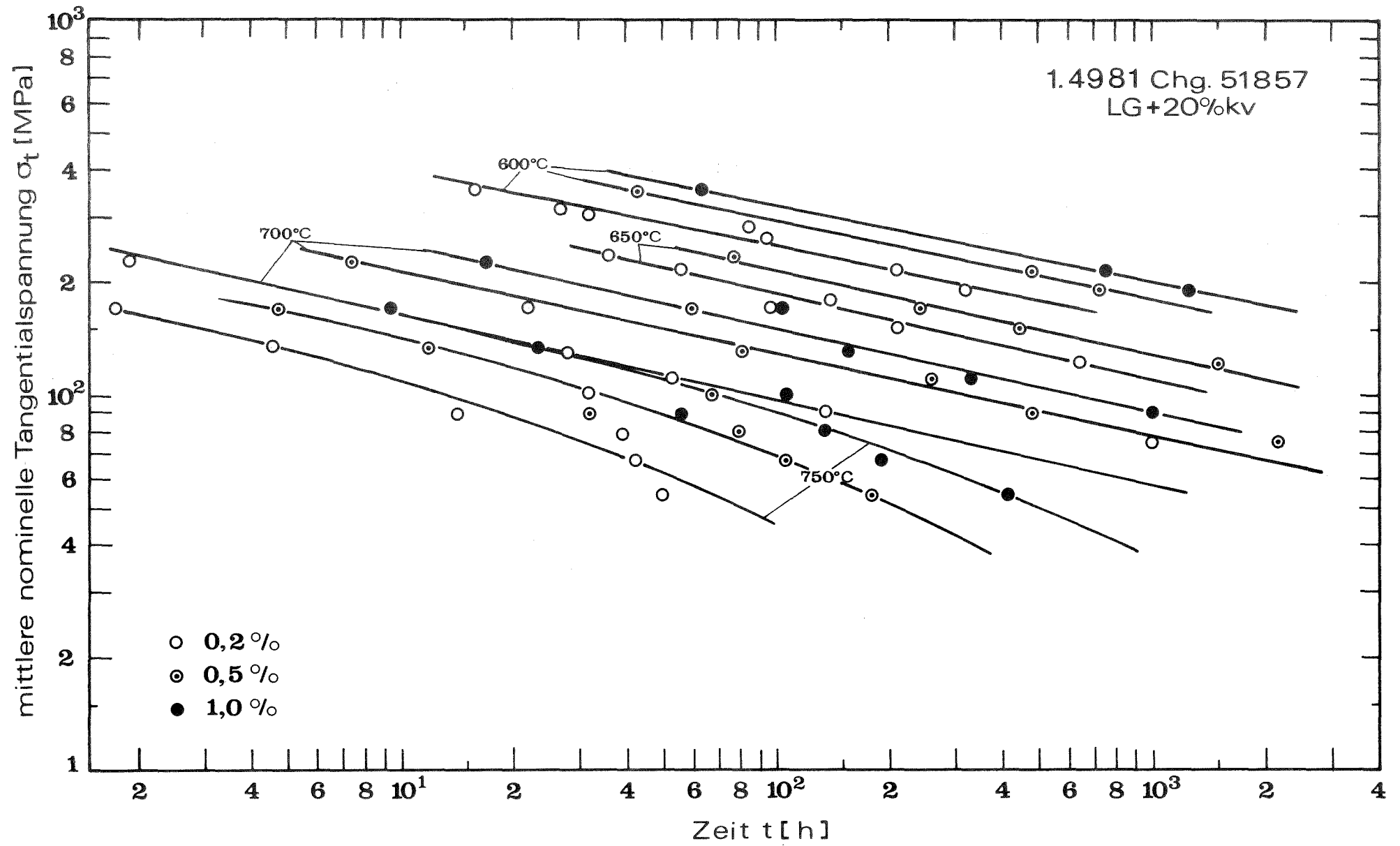


Abb. 23: Dehngrenzlinien des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).

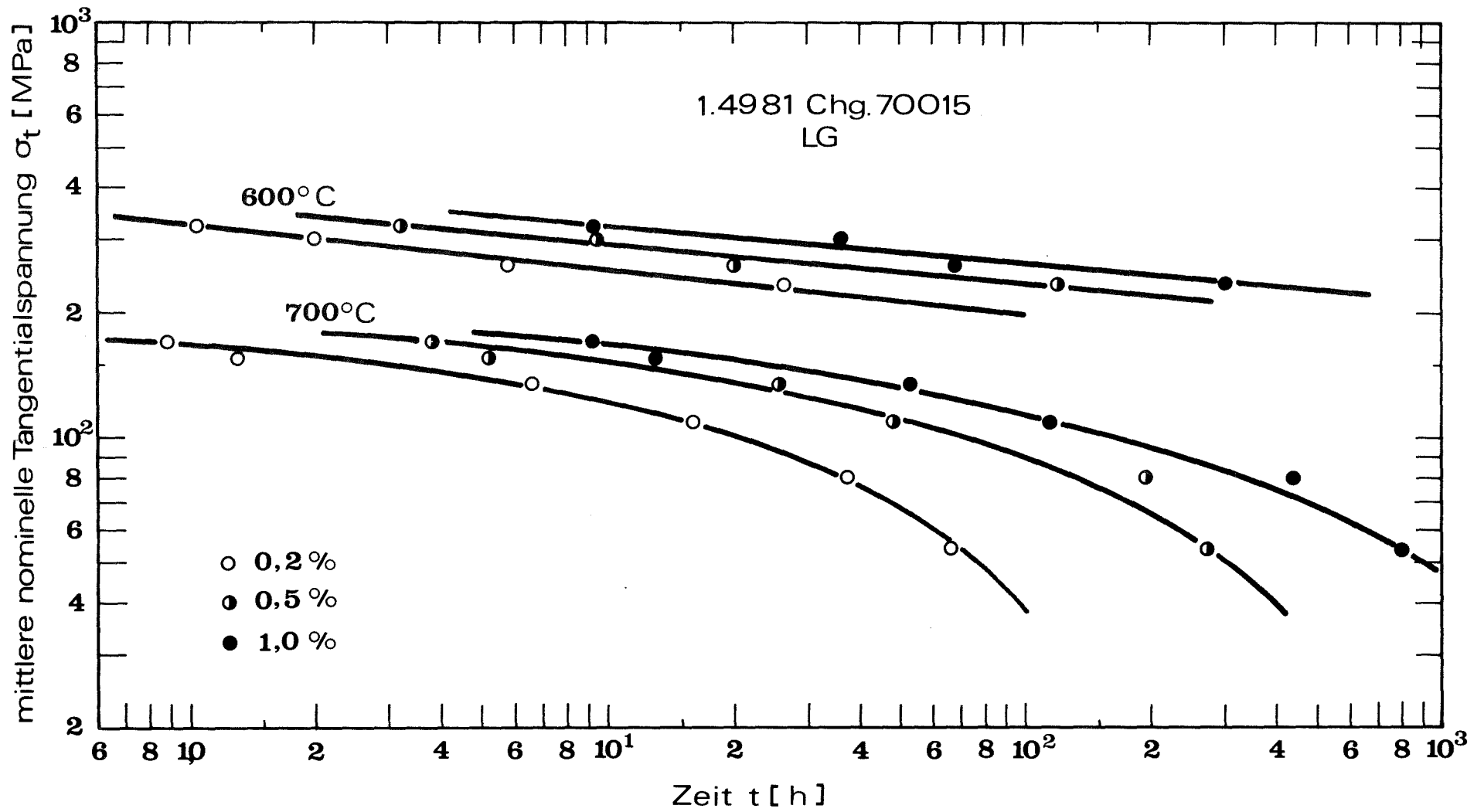


Abb. 24 : Dehngrenzzlinien des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG).

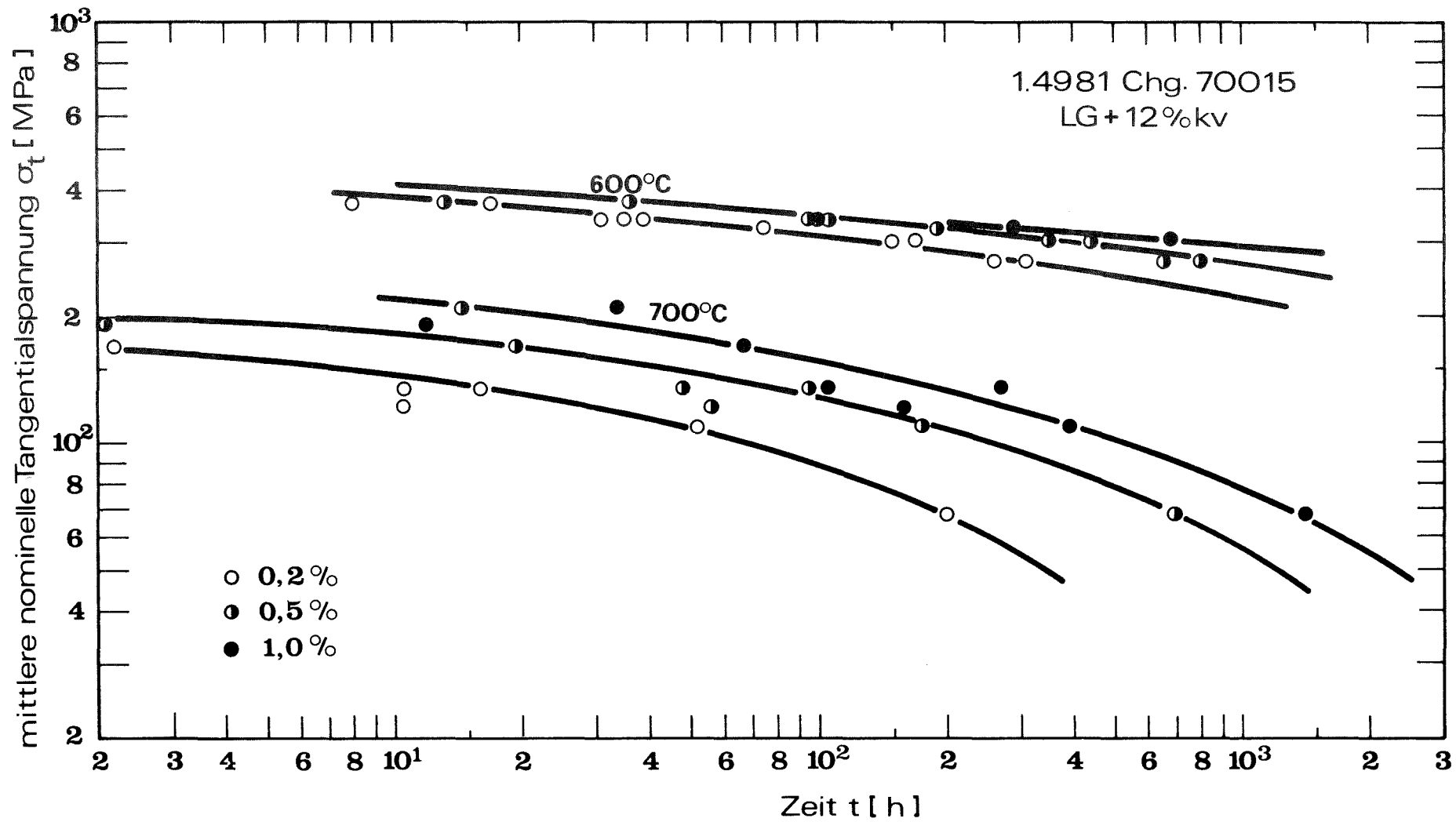


Abb. 25: Dehngrenzlinien des Stahles 1.4981, Chg. 70015, LG + 12% KV).

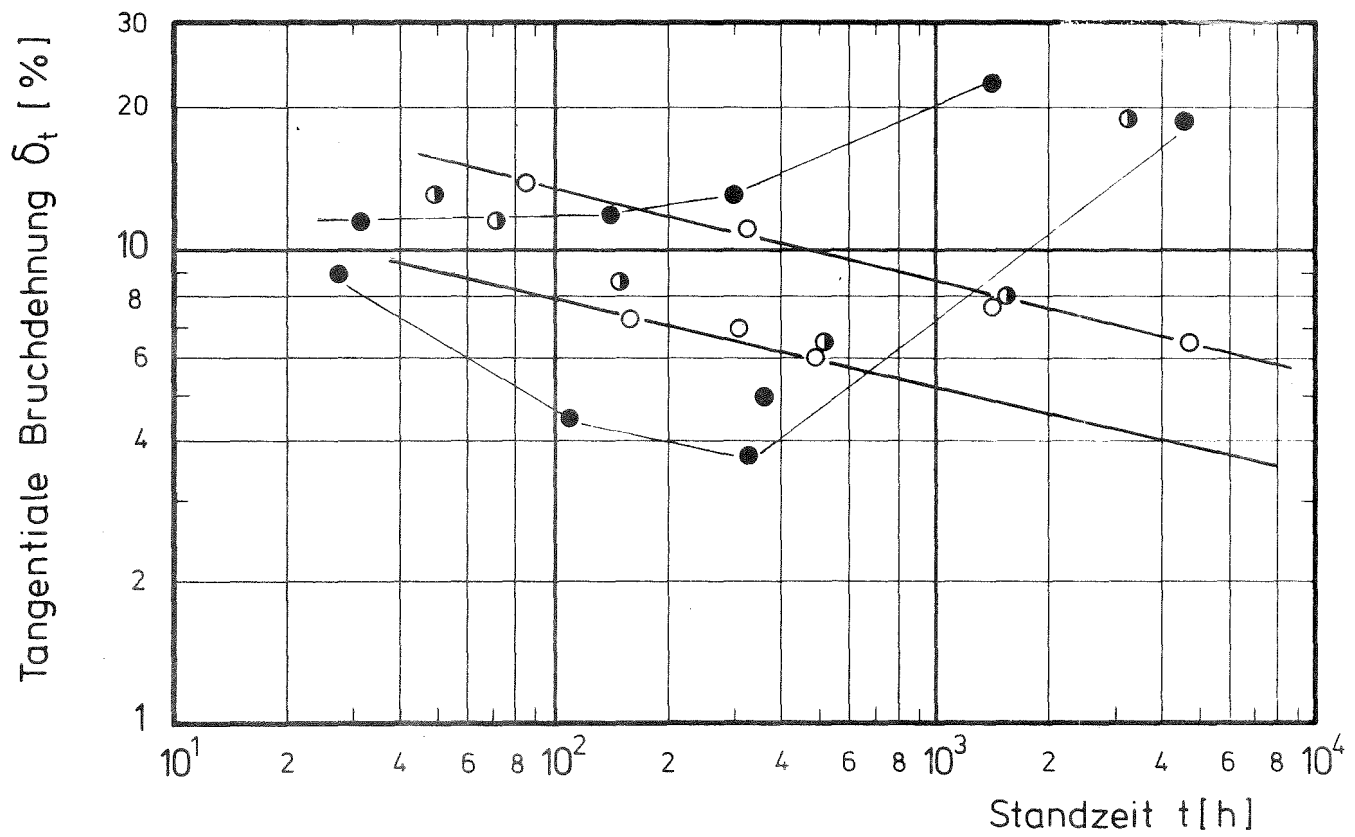
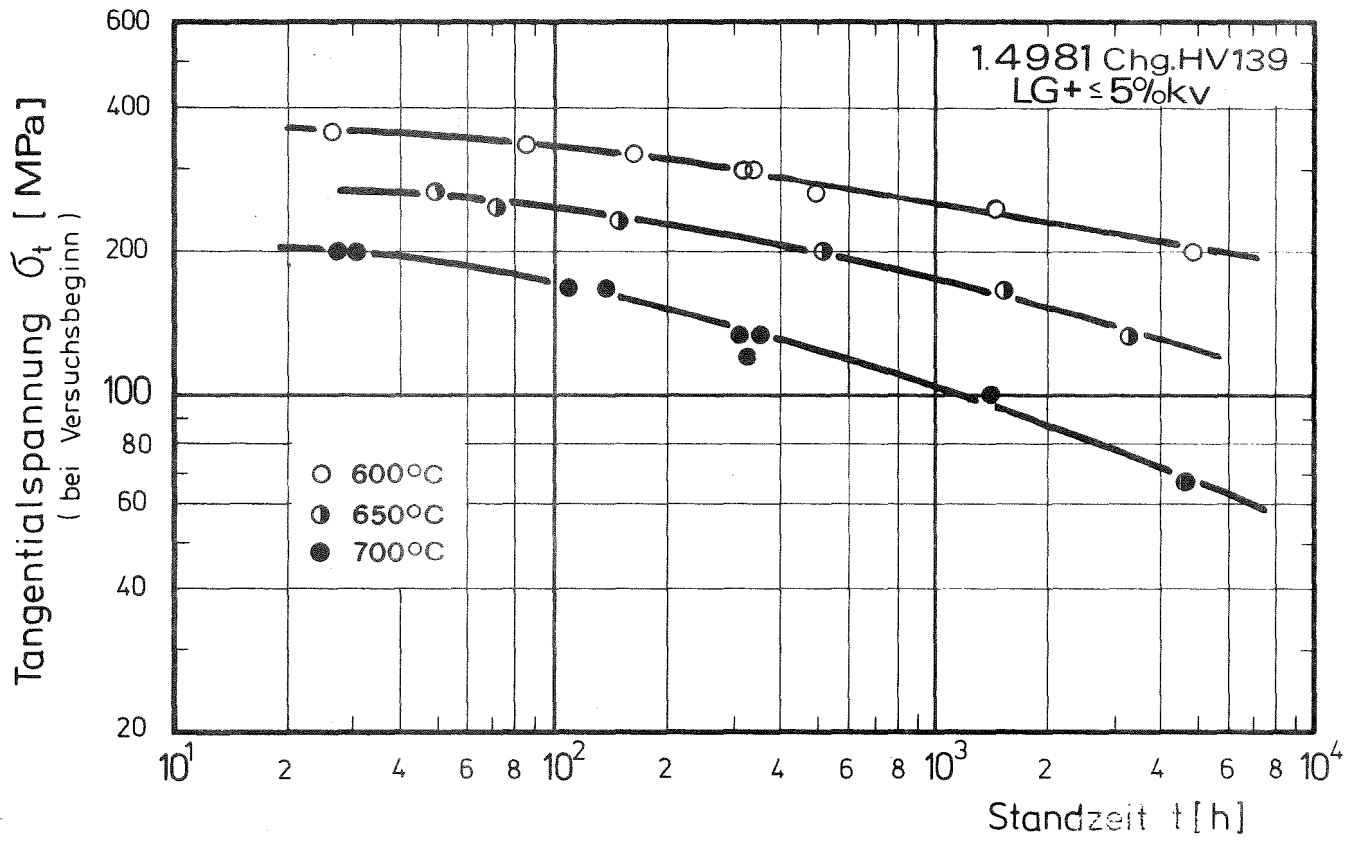


Abb. 26: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981, Chg. HV 139.

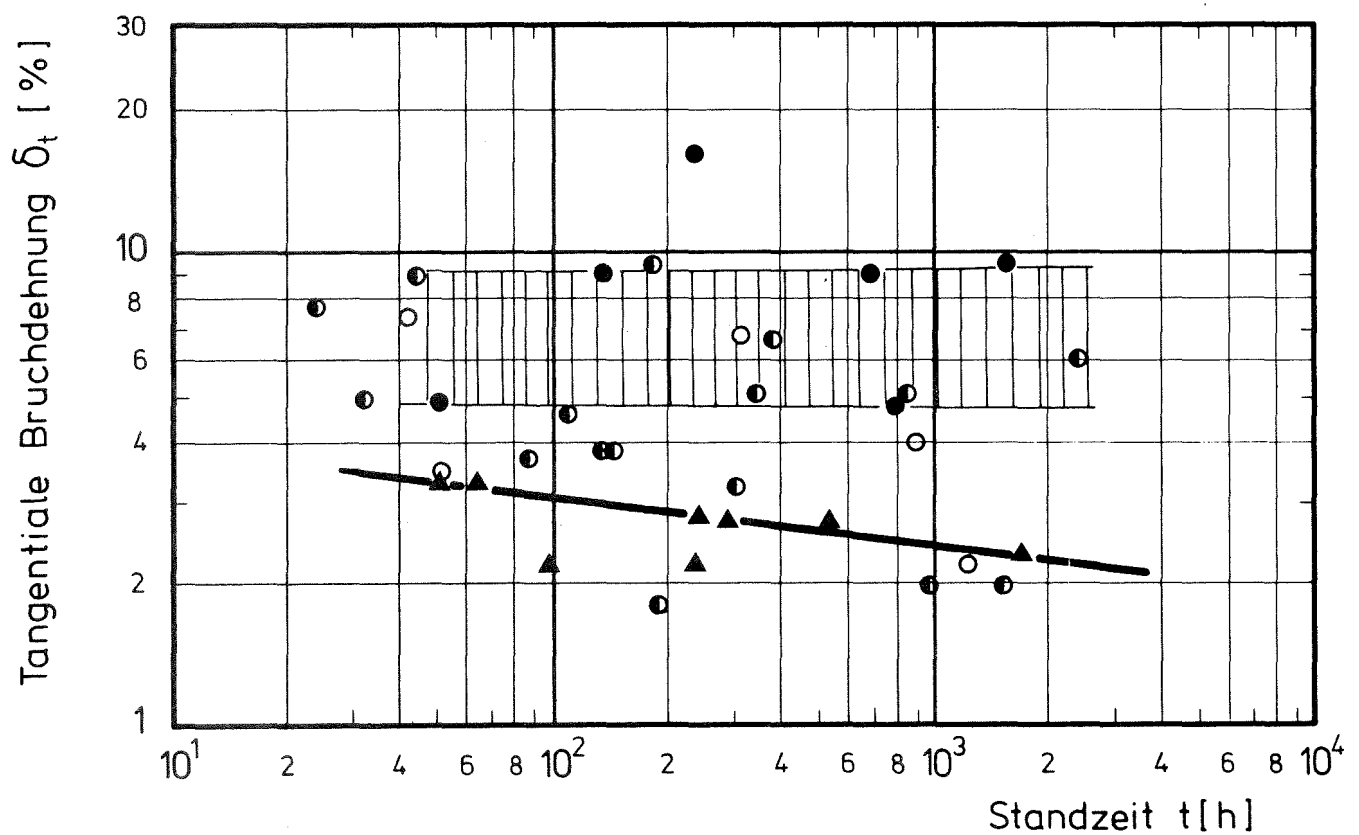
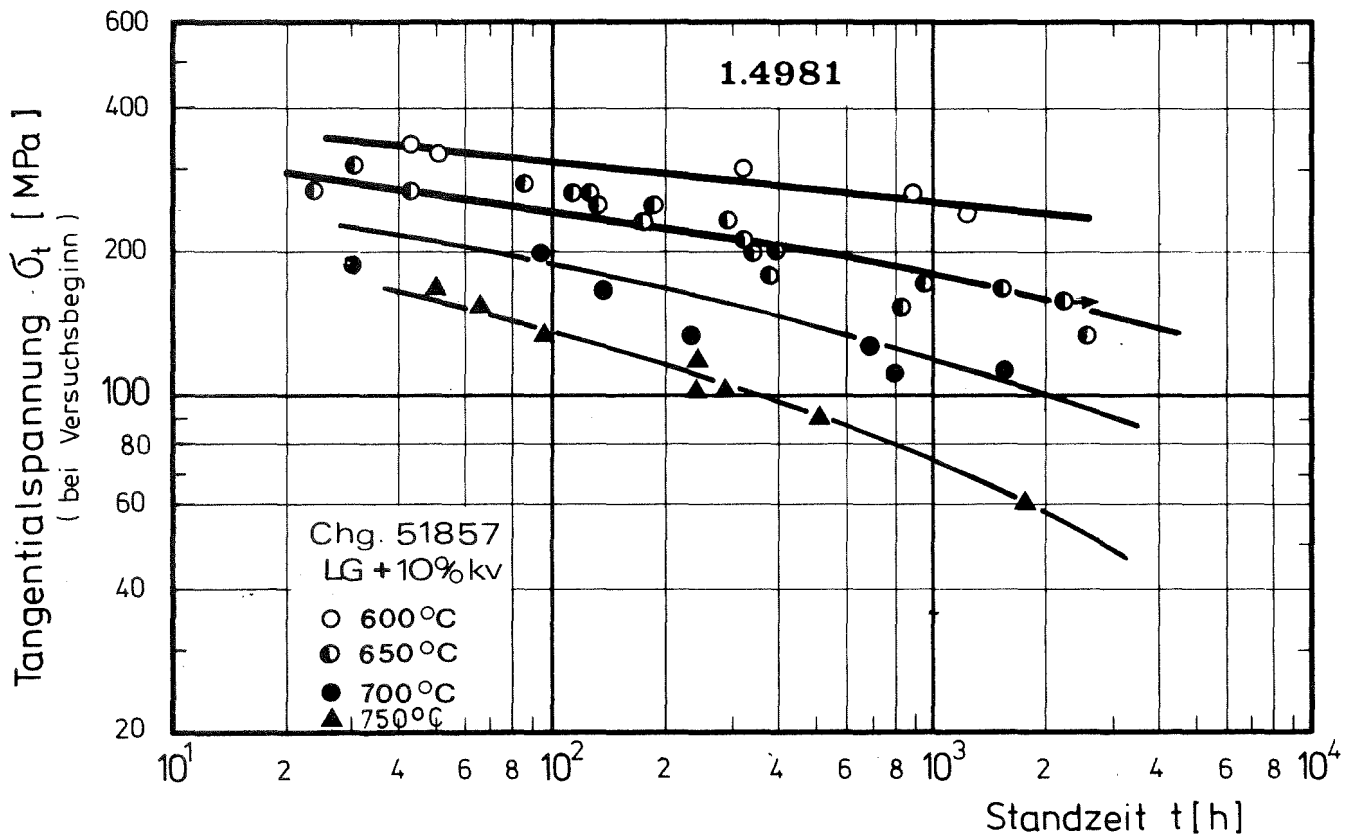
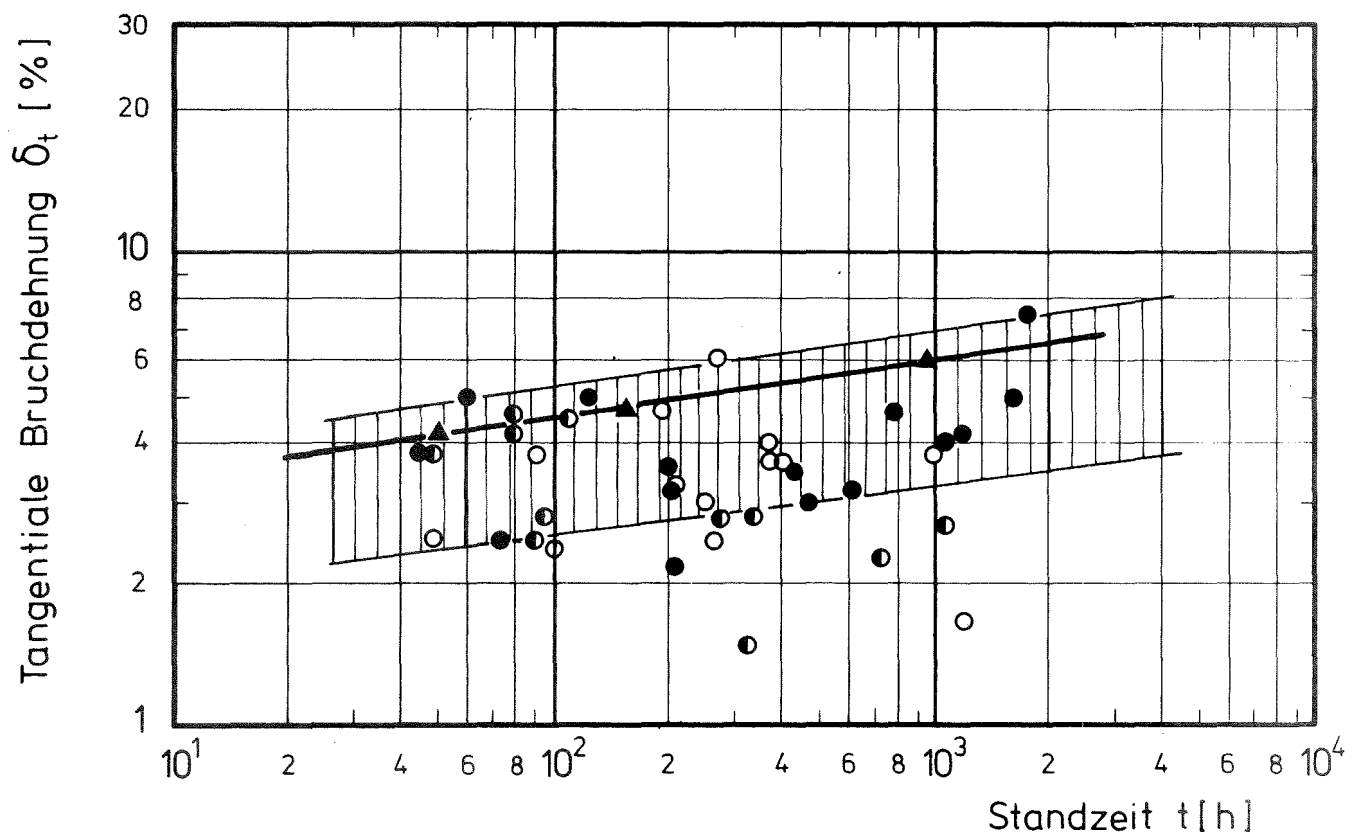
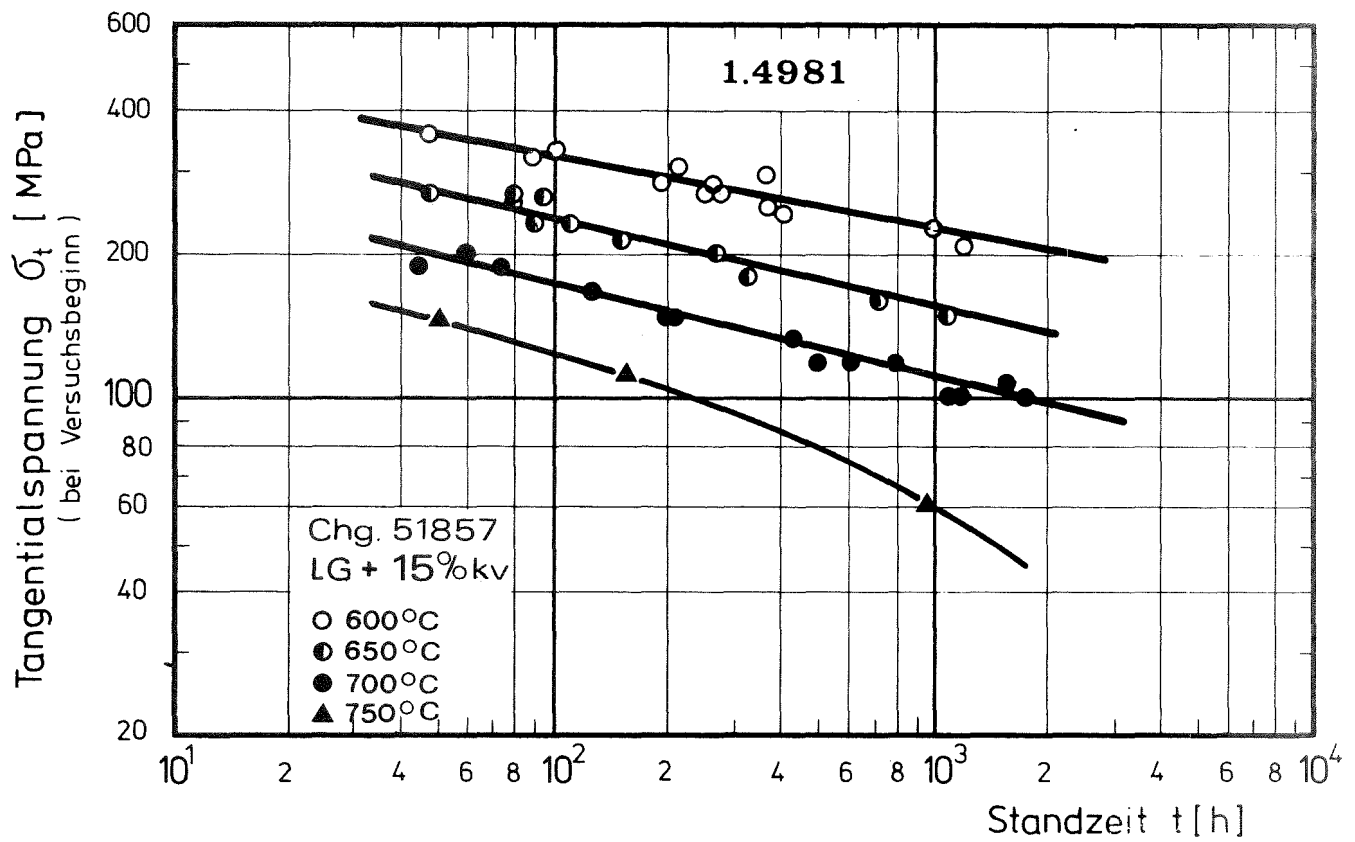


Abb. 27: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).



**Abb. 28:** Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).

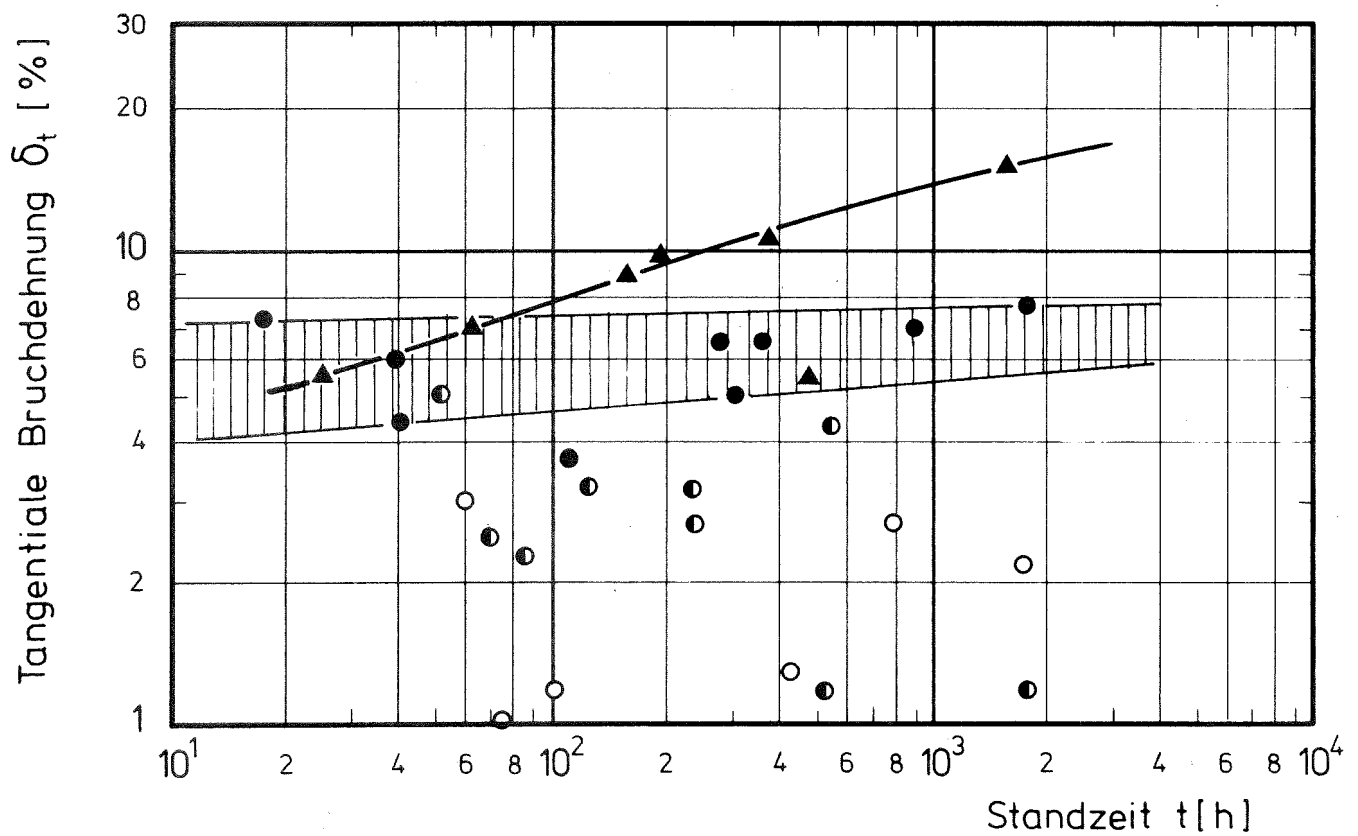
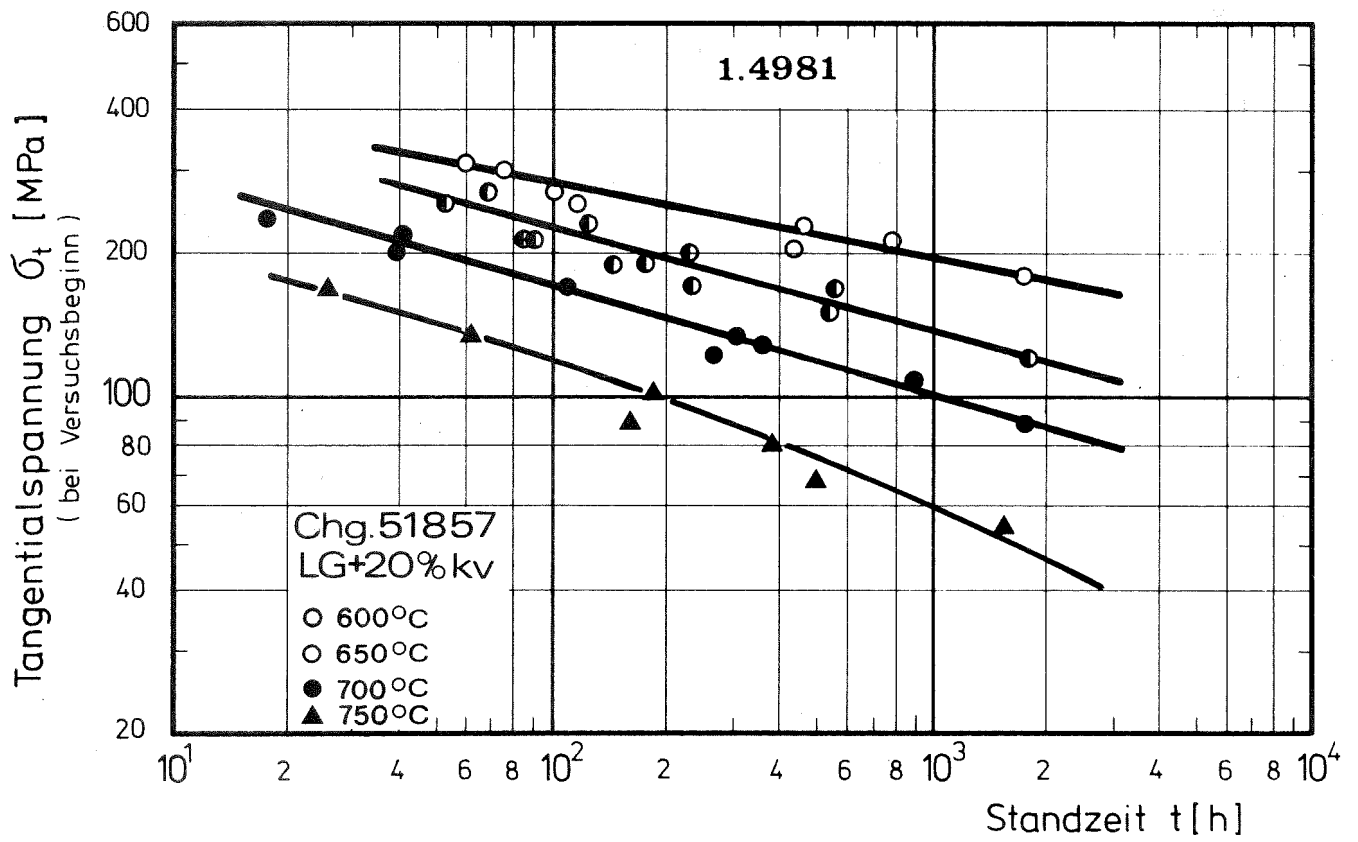


Abb. 29: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).

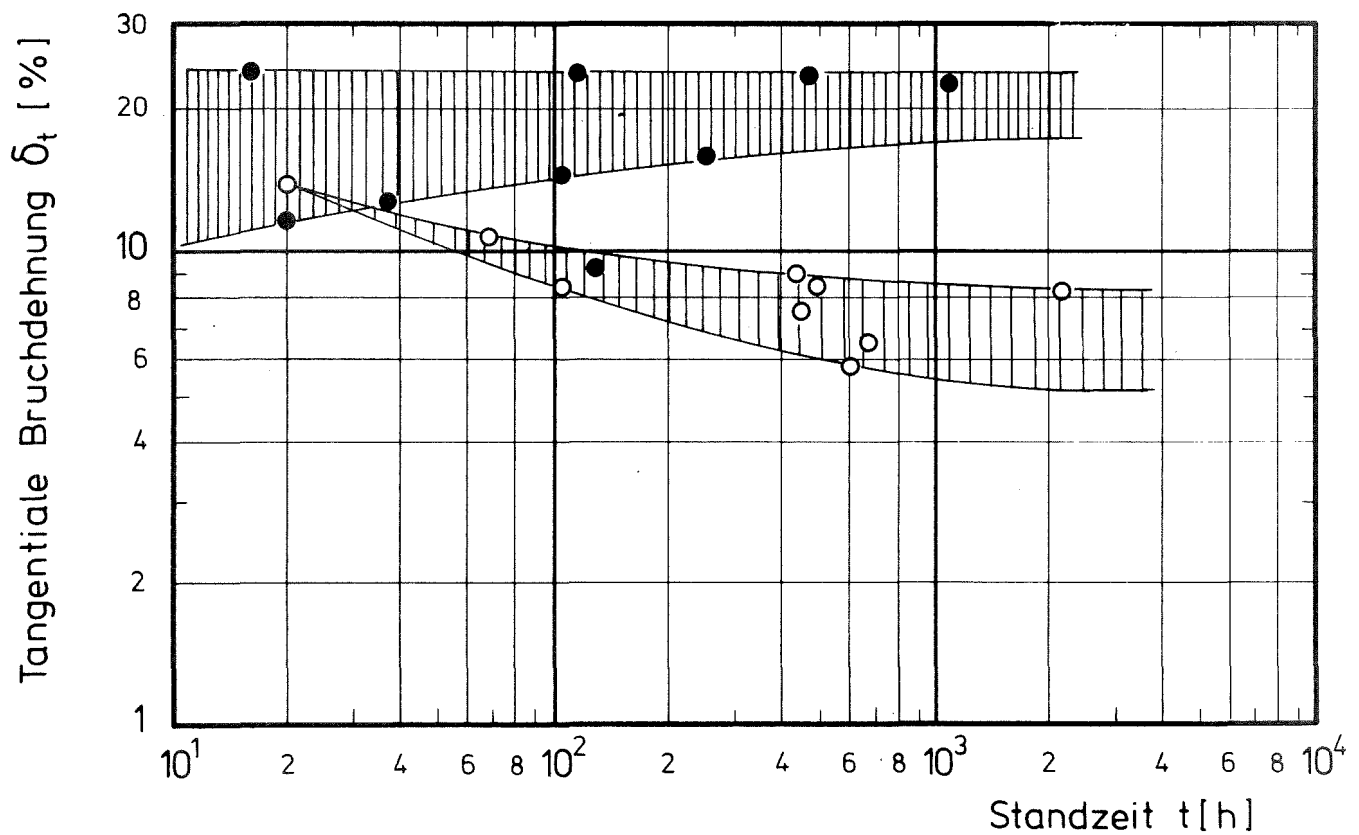
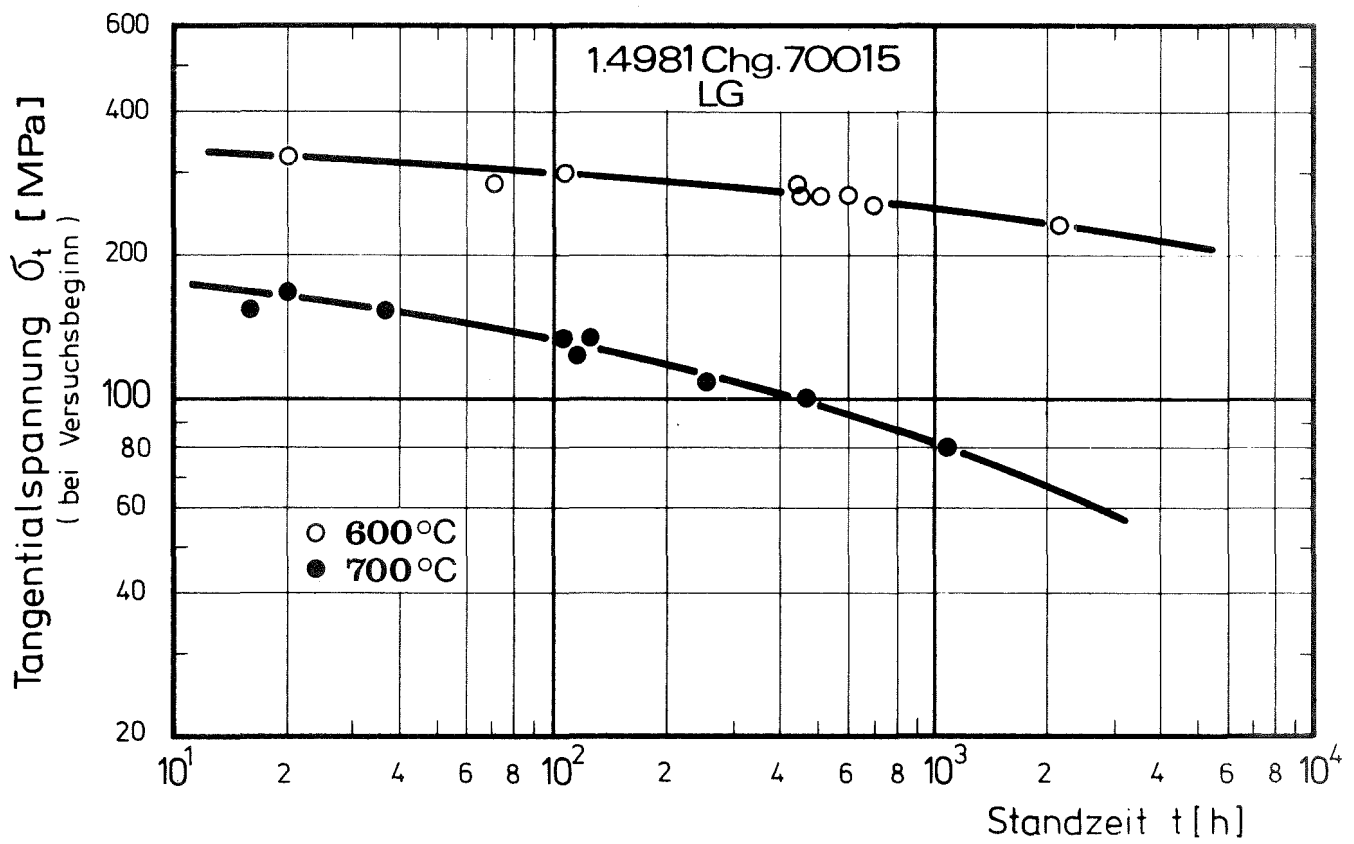


Abb. 30: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG).



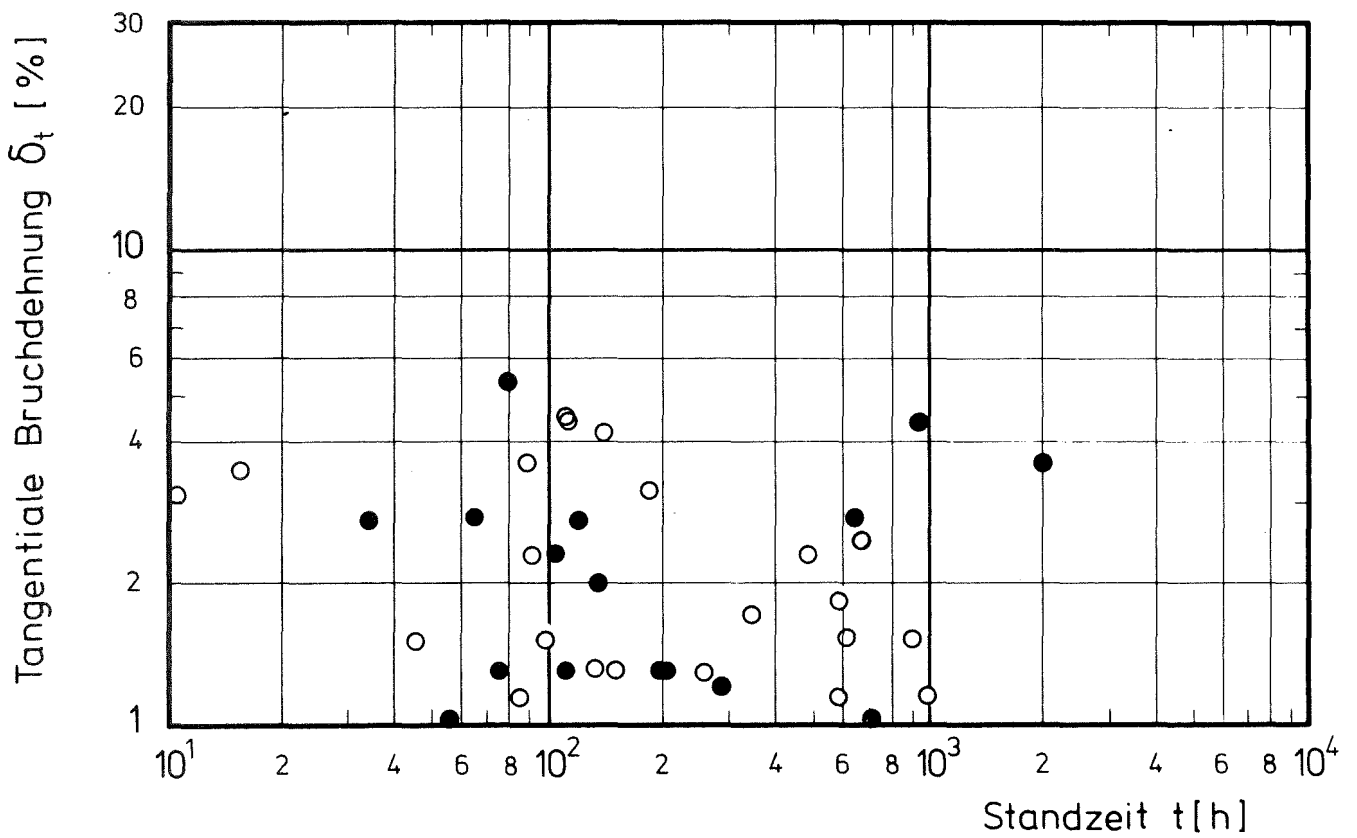
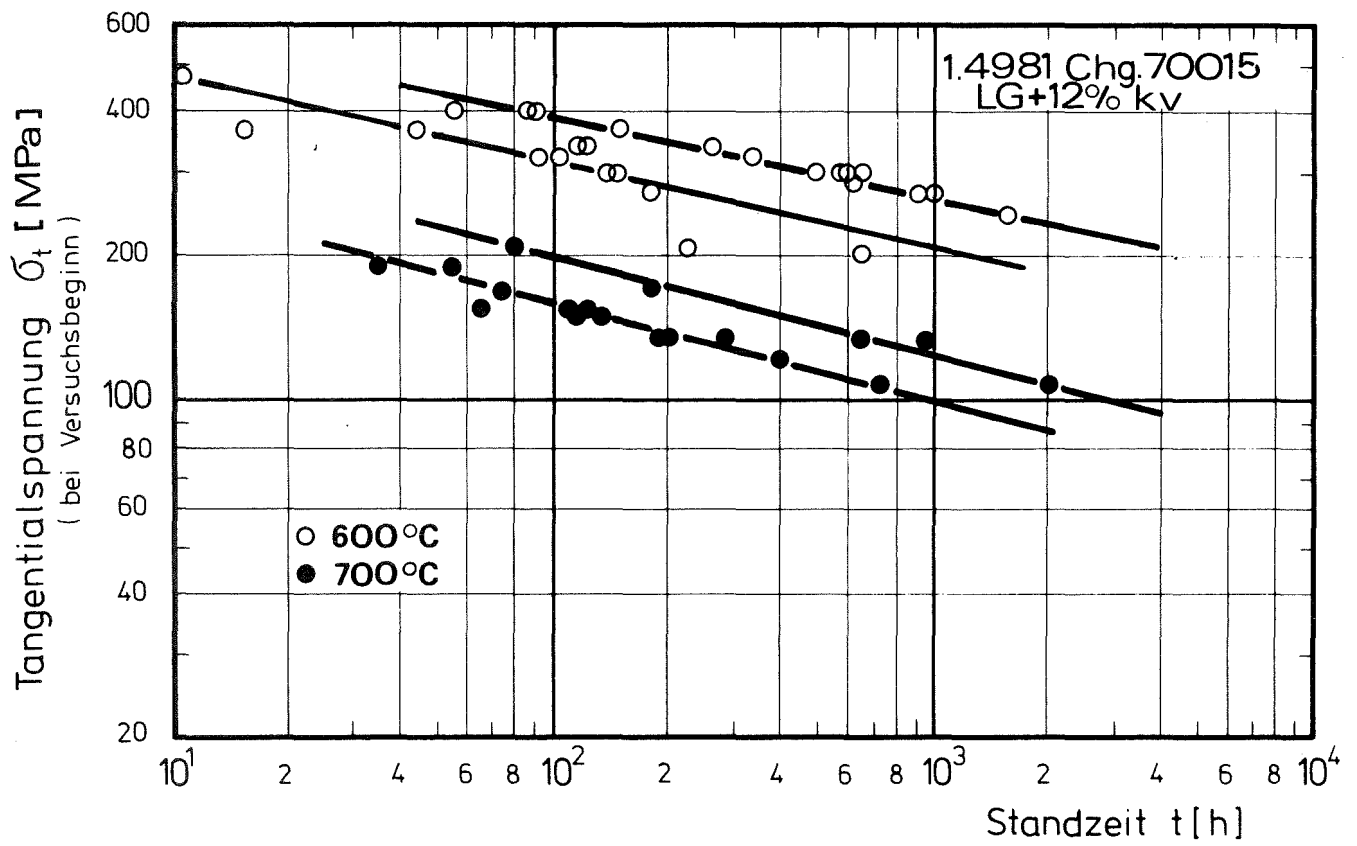


Abb. 31: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981 Chg. 70015, (LG + 12% KV).

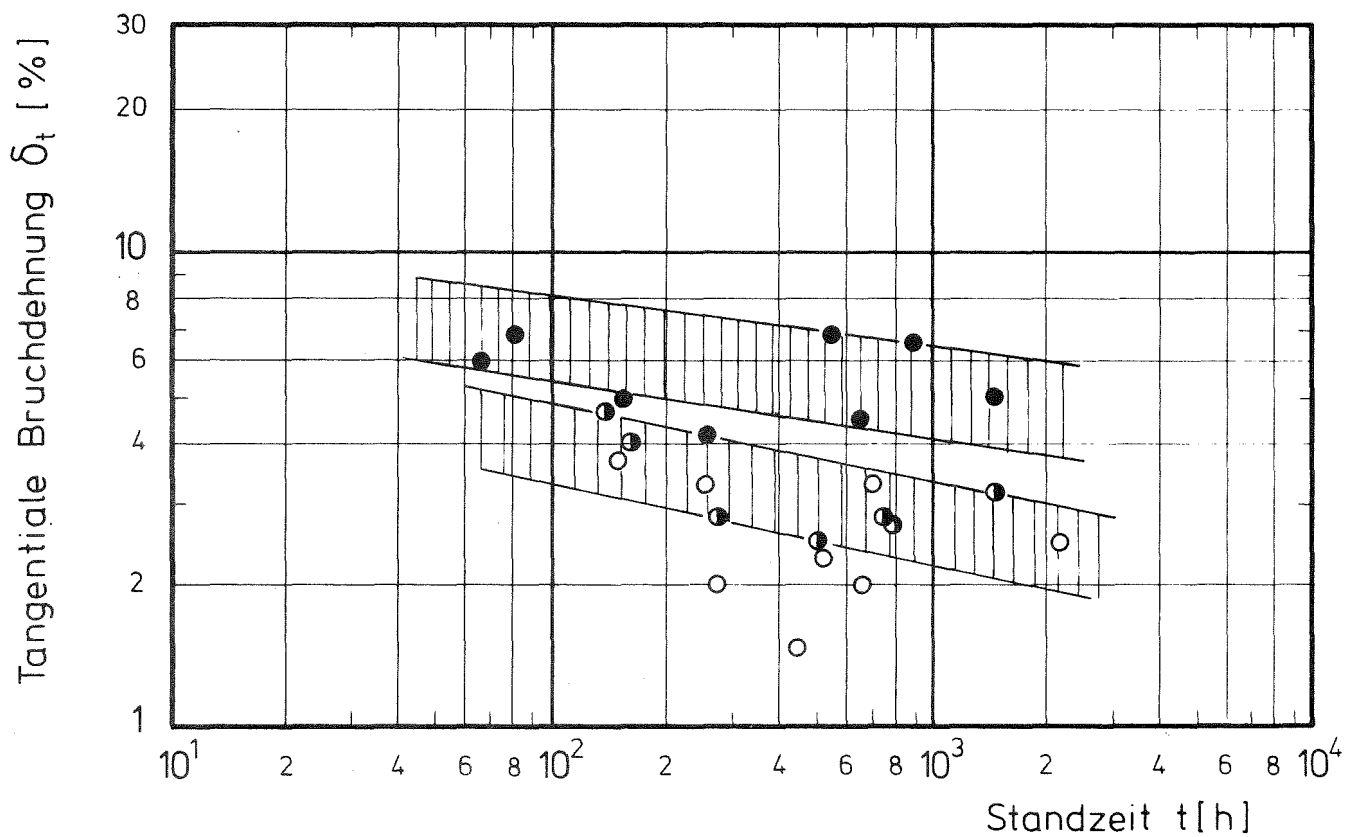
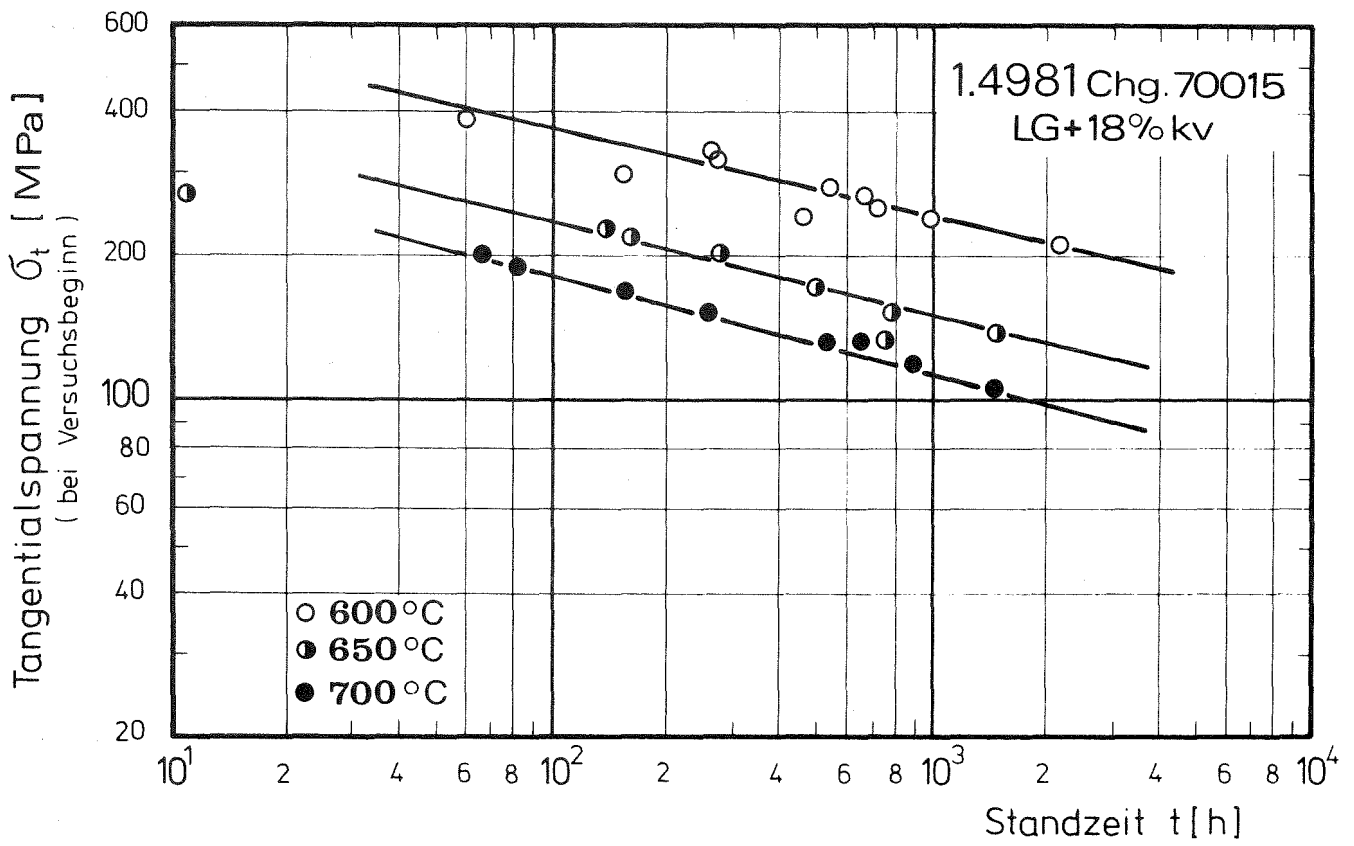


Abb 32.: Zeitbruchlinien und Bruchdehnungen des Stahles 1.4981 Chg. 70015, (LG + 18% KV).

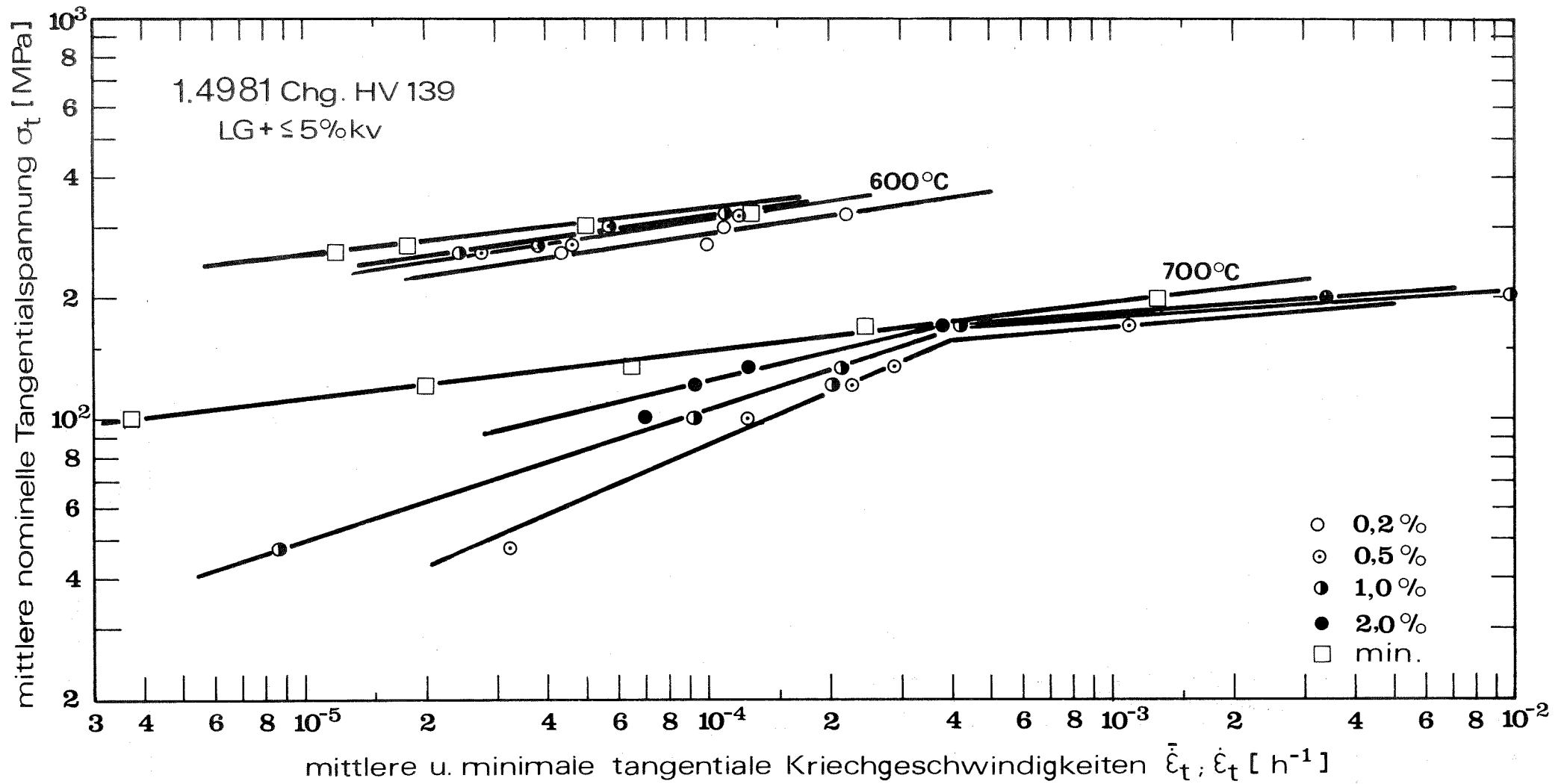


Abb. 33: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. HV 139.

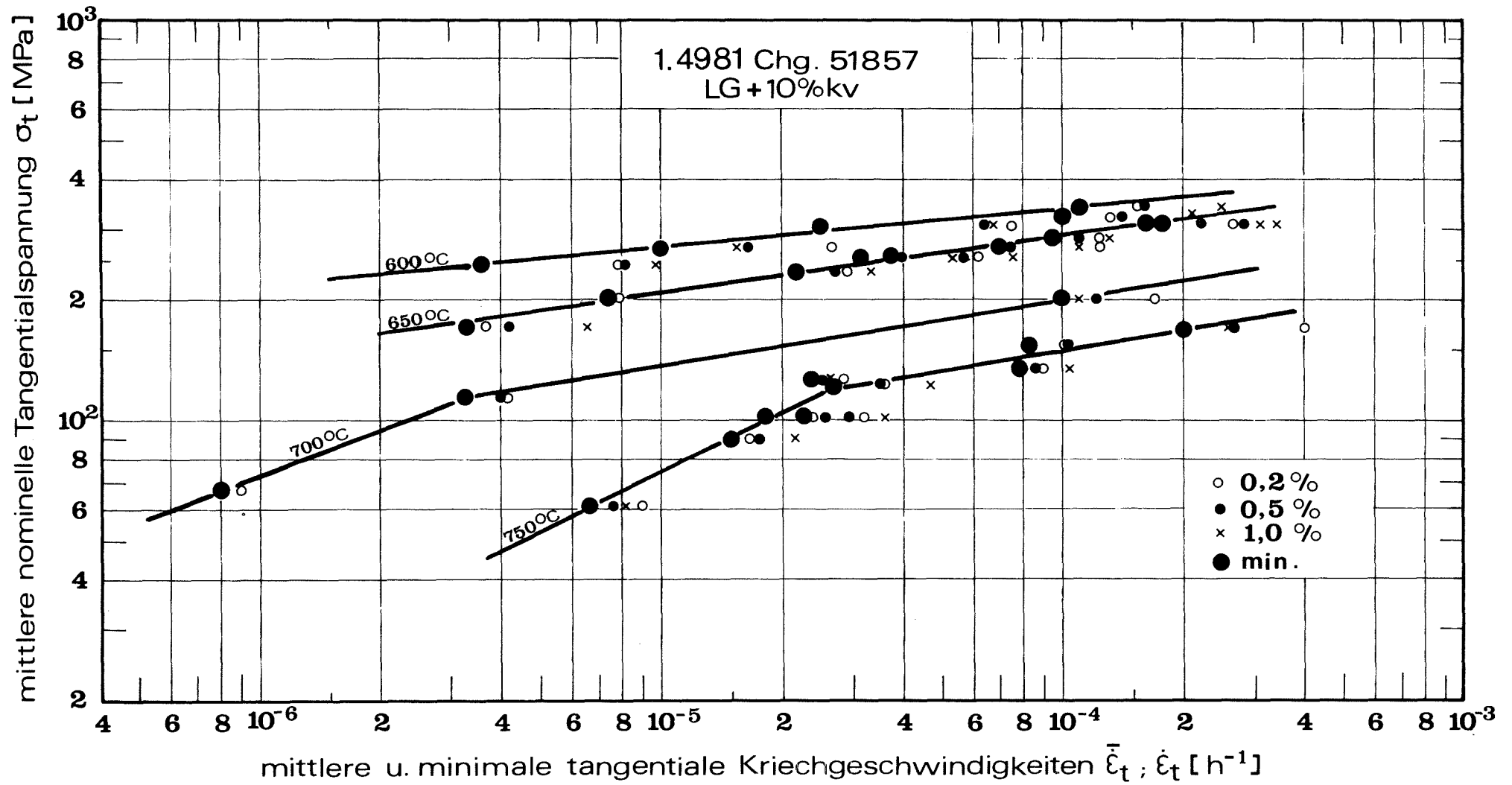


Abb. 34: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).

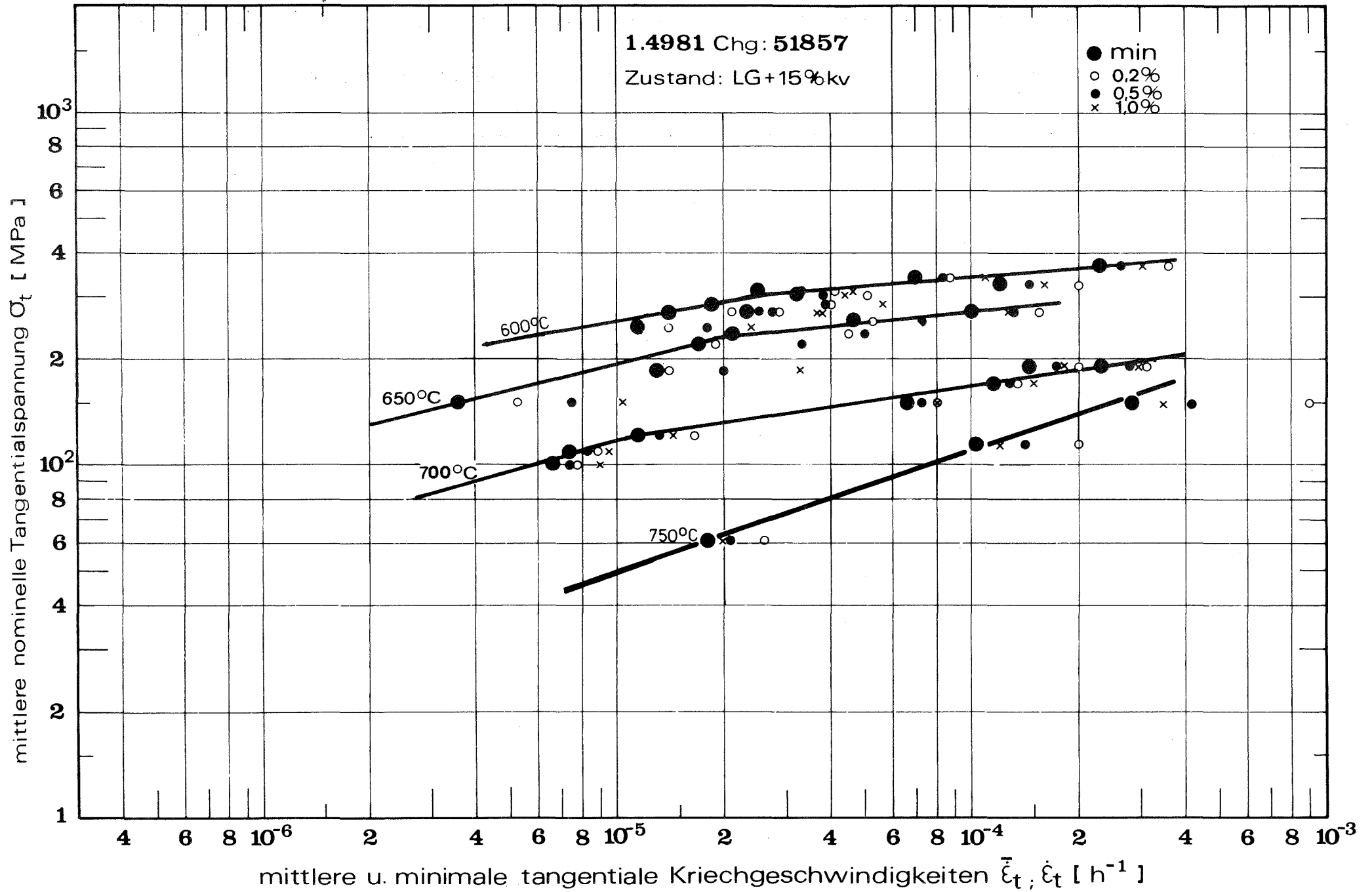


Abb. 35: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).

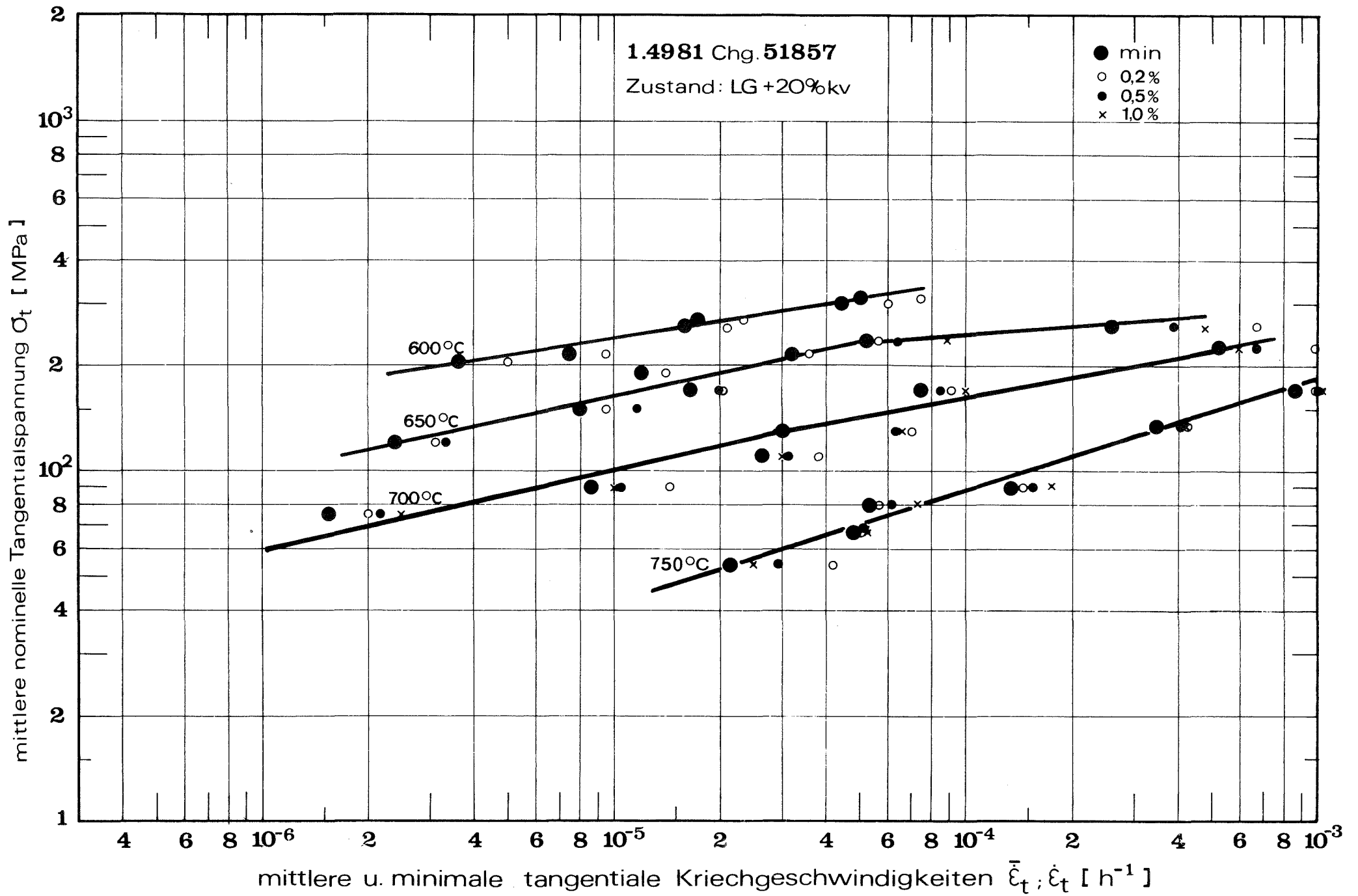


Abb. 36: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).

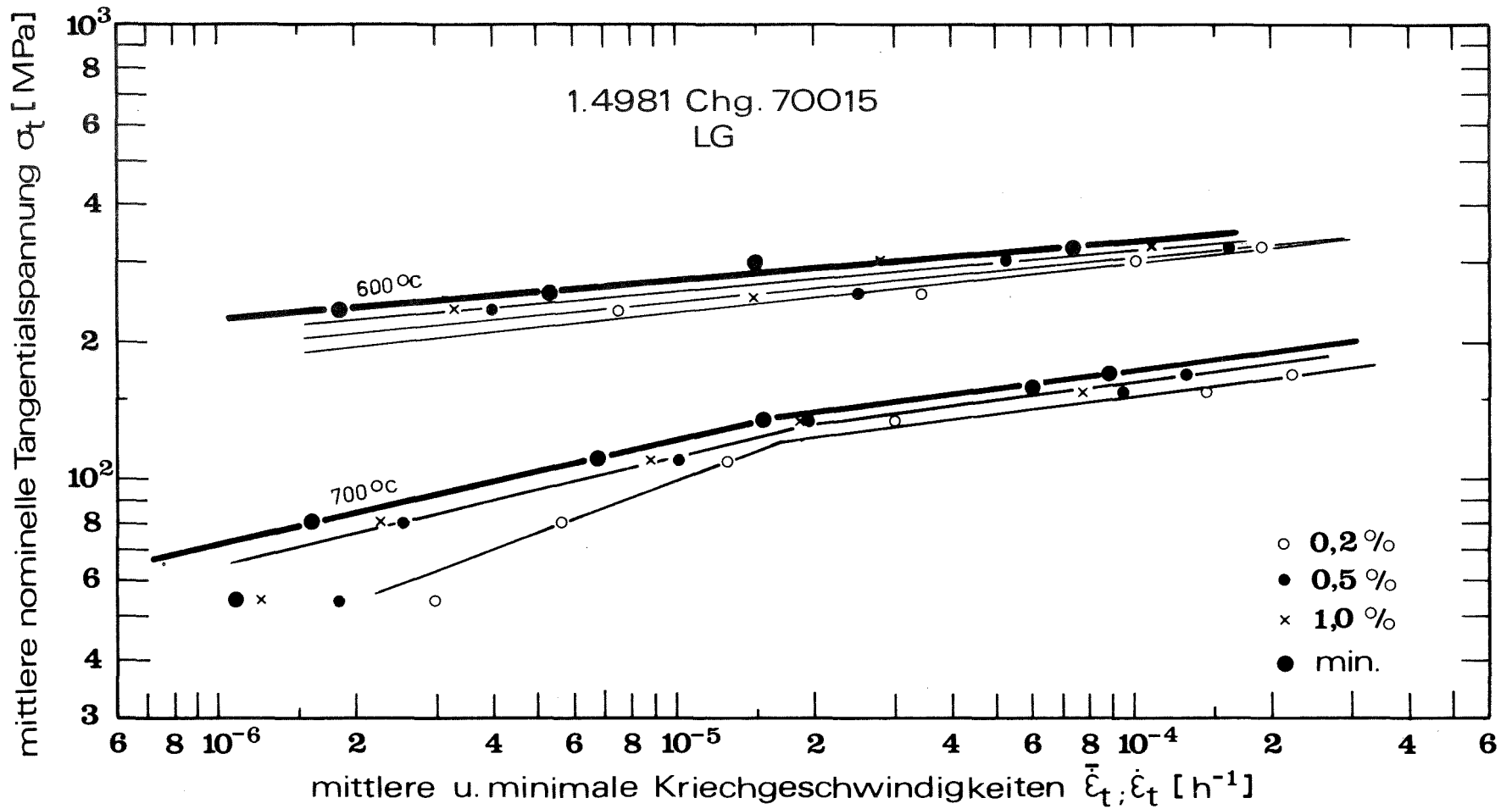


Abb. 37: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG).

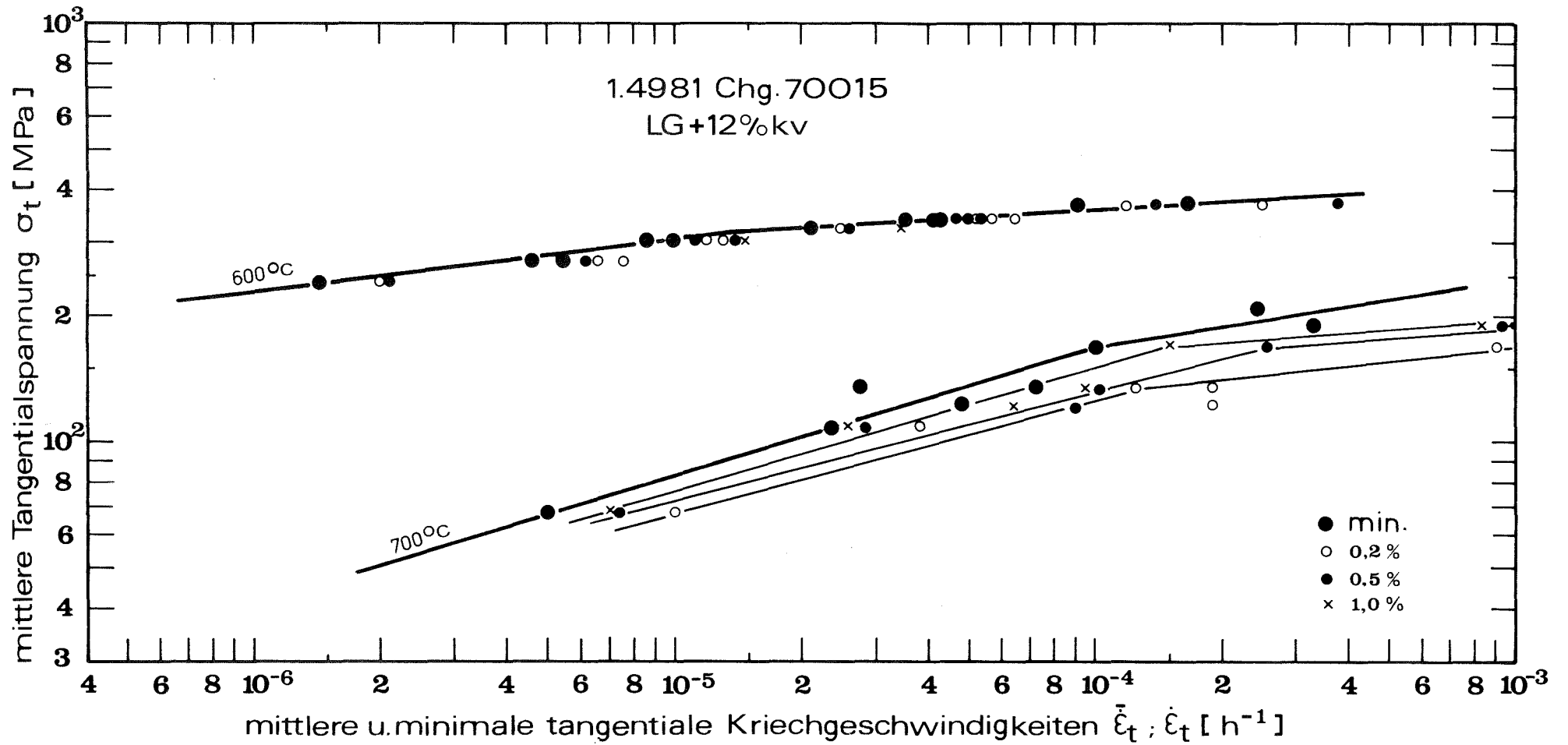


Abb. 38: Mittlere und minimale tangentielle Kriechgeschwindigkeit des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 12% KV).



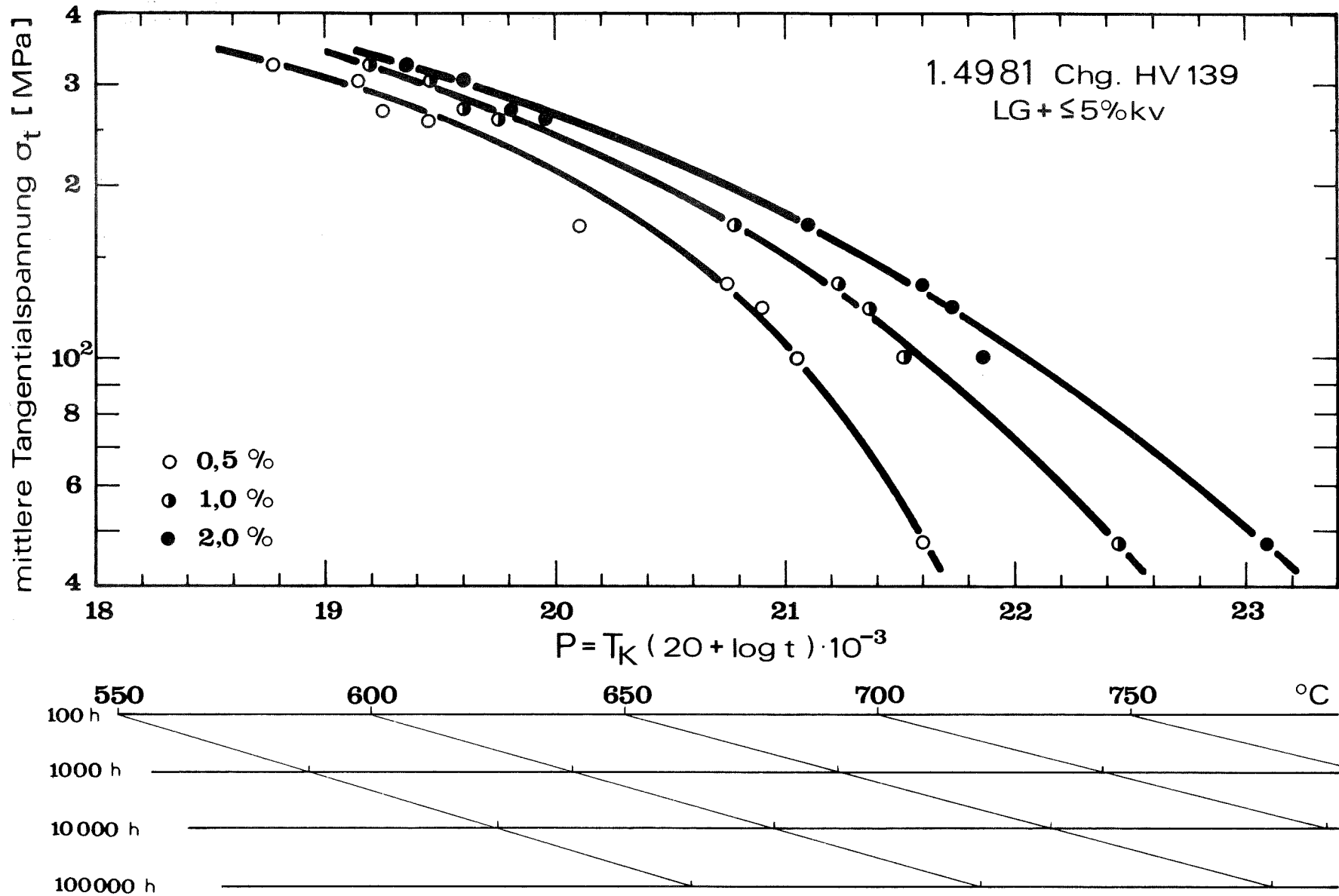


Abb. 39: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur, Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehngrenzen des Stahles 1.4981, Chg. HV 139.

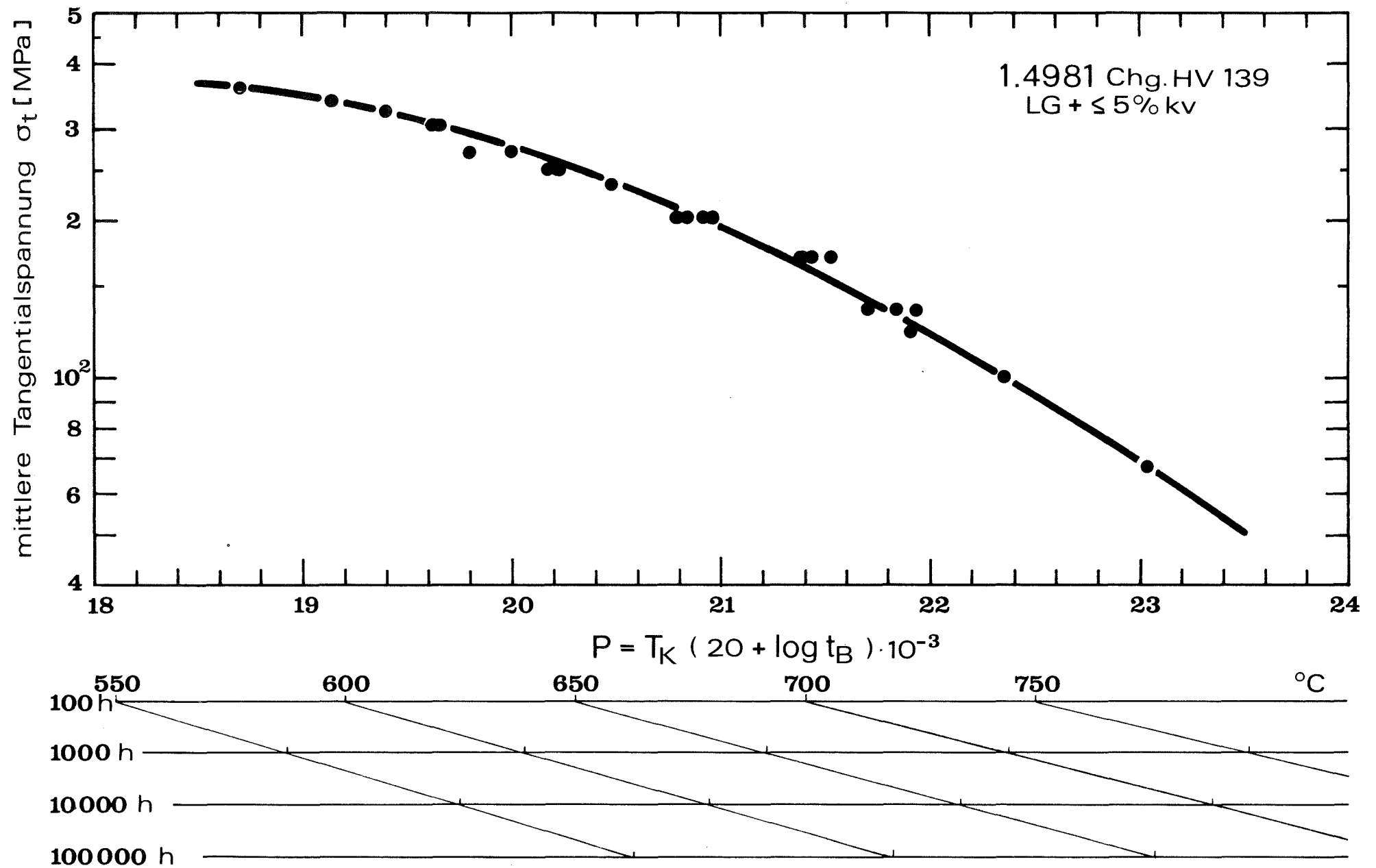


Abb. 40: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. HV 139.

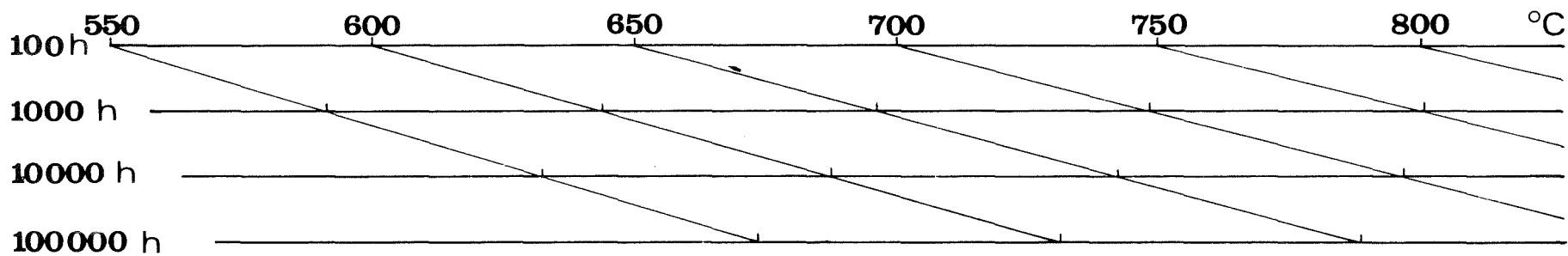
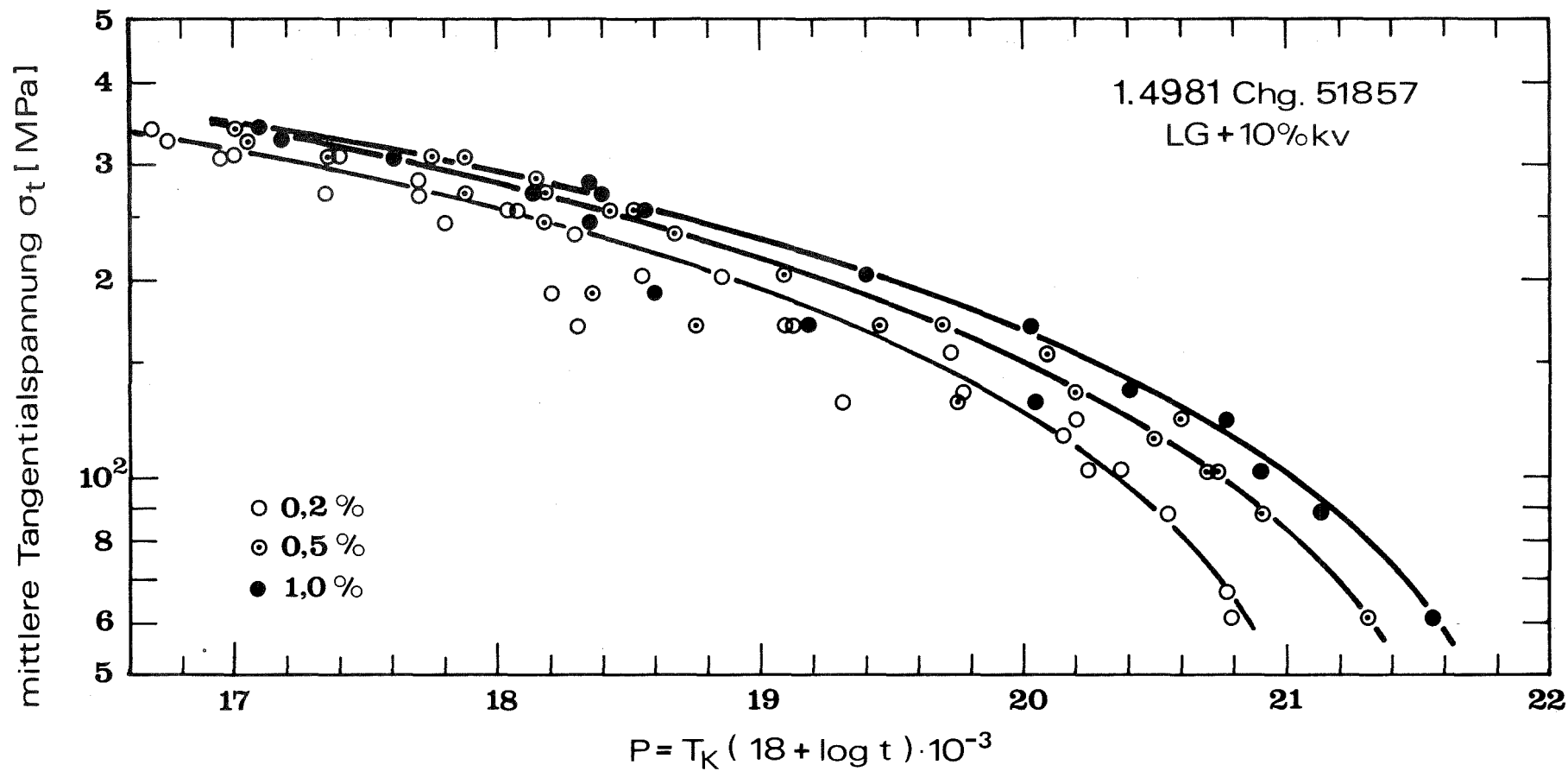


Abb. 41: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehn-  
grenzen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).

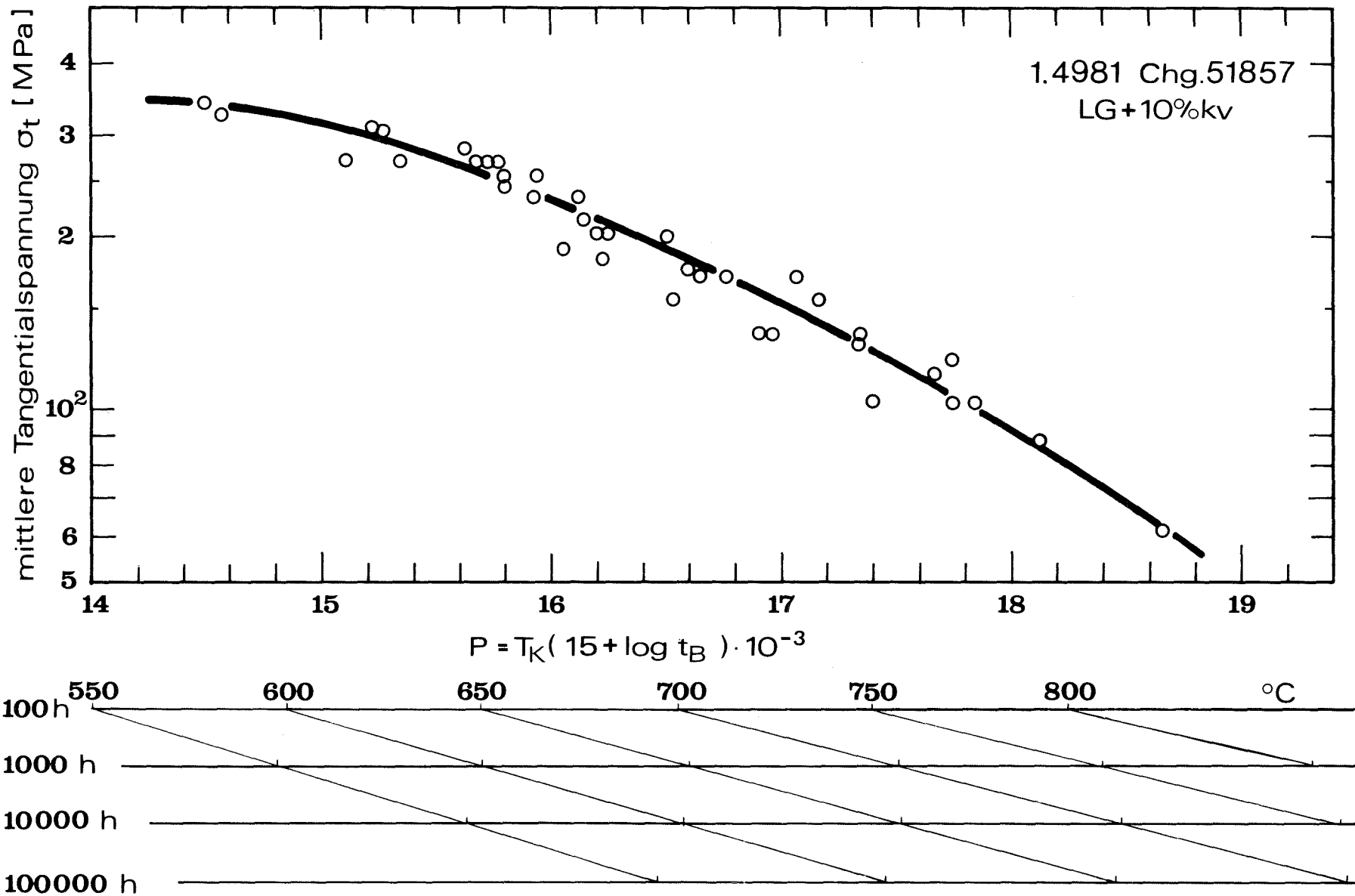


Abb. 42: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).

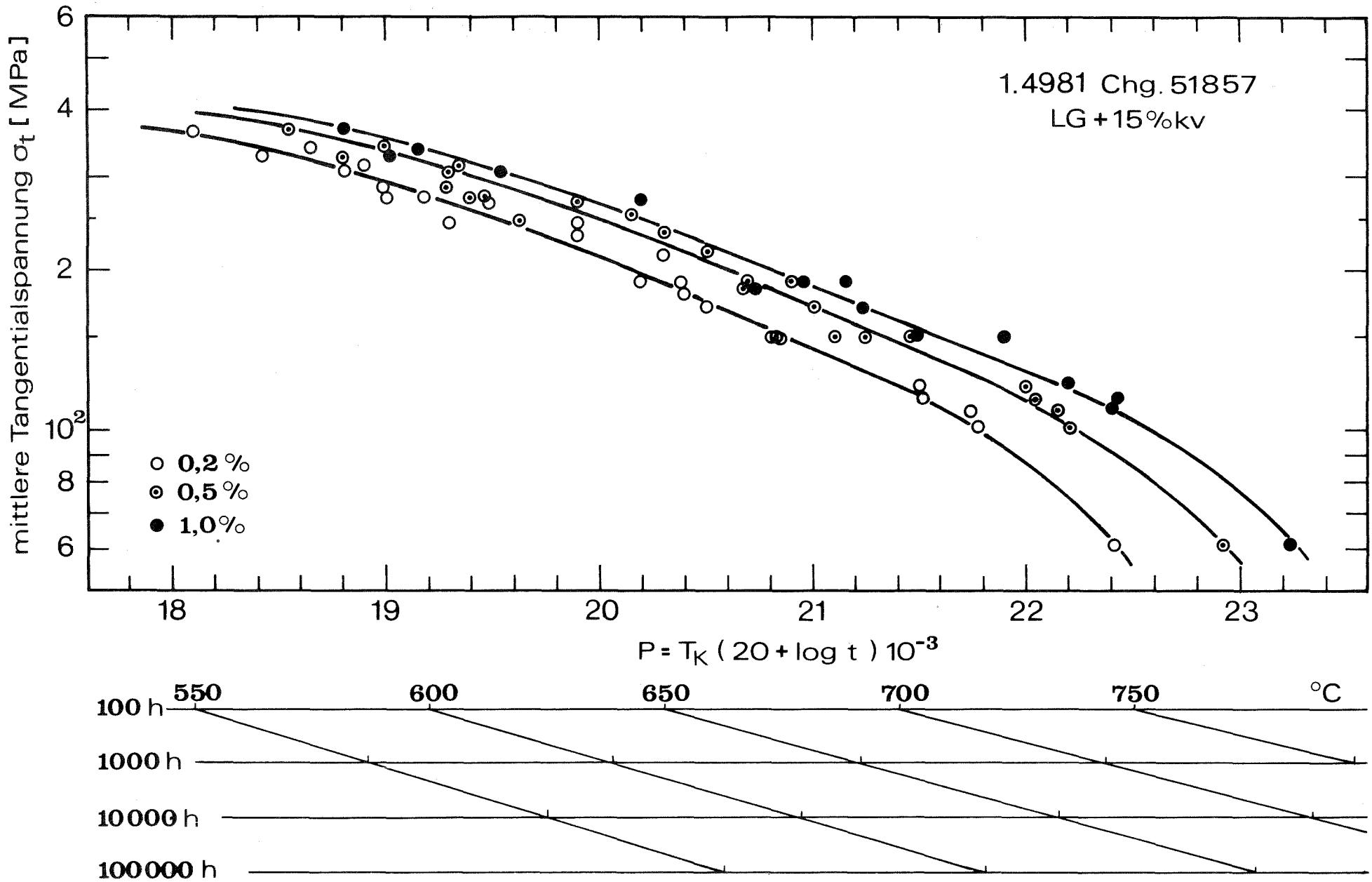


Abb. 43: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehn-  
grenzen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).

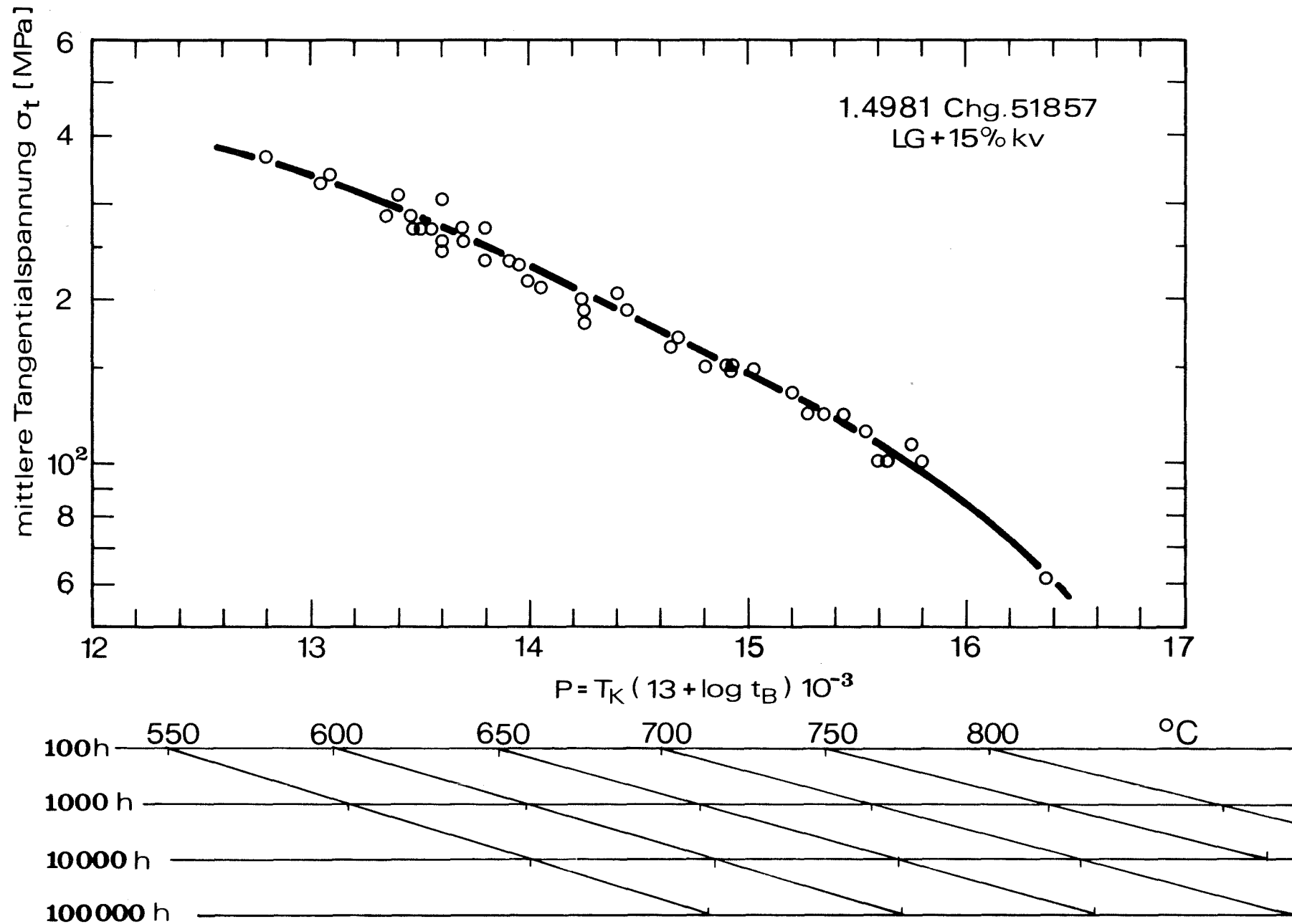


Abb. 44: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).

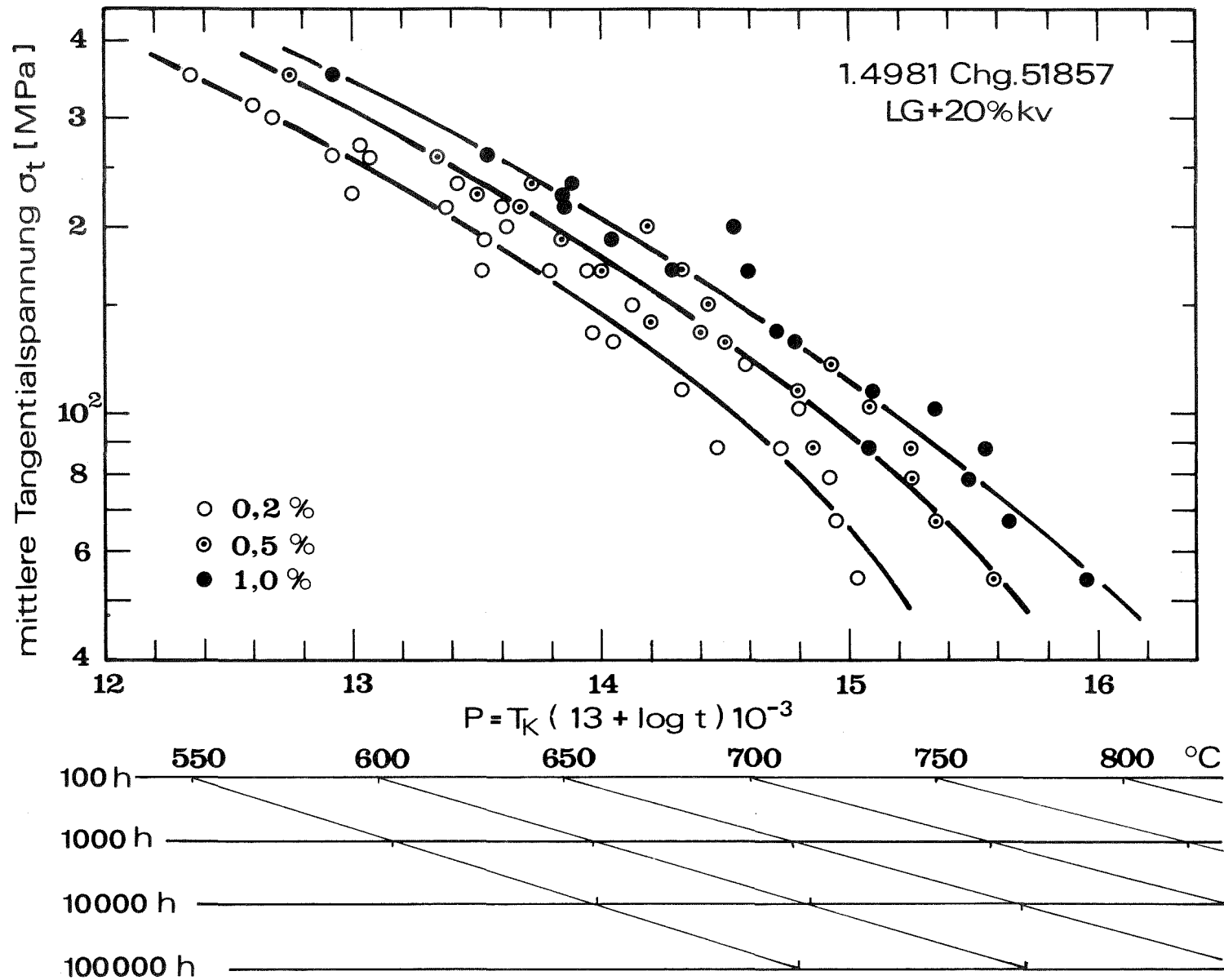


Abb. 45: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehn-  
grenzen des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).

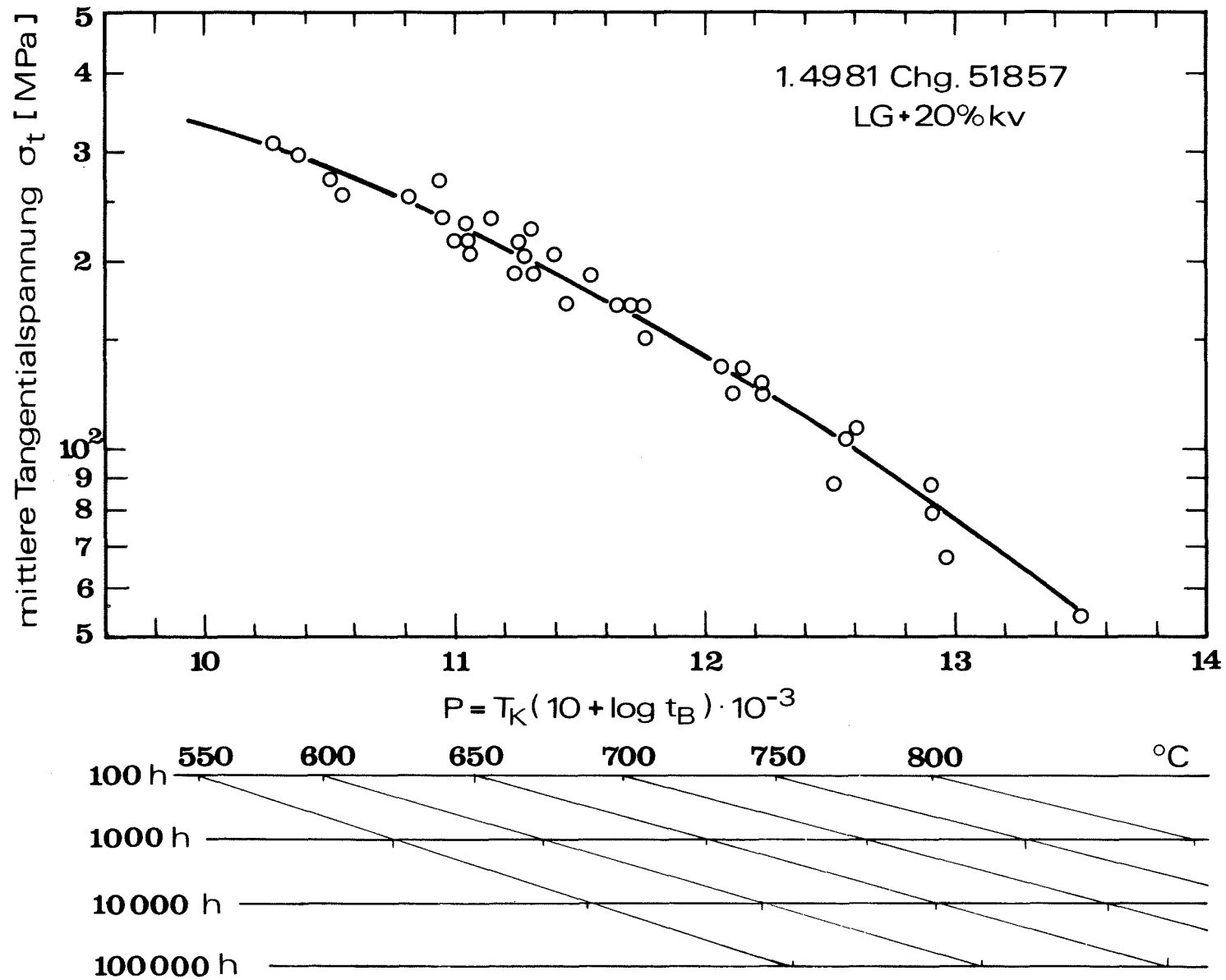


Abb. 46: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).



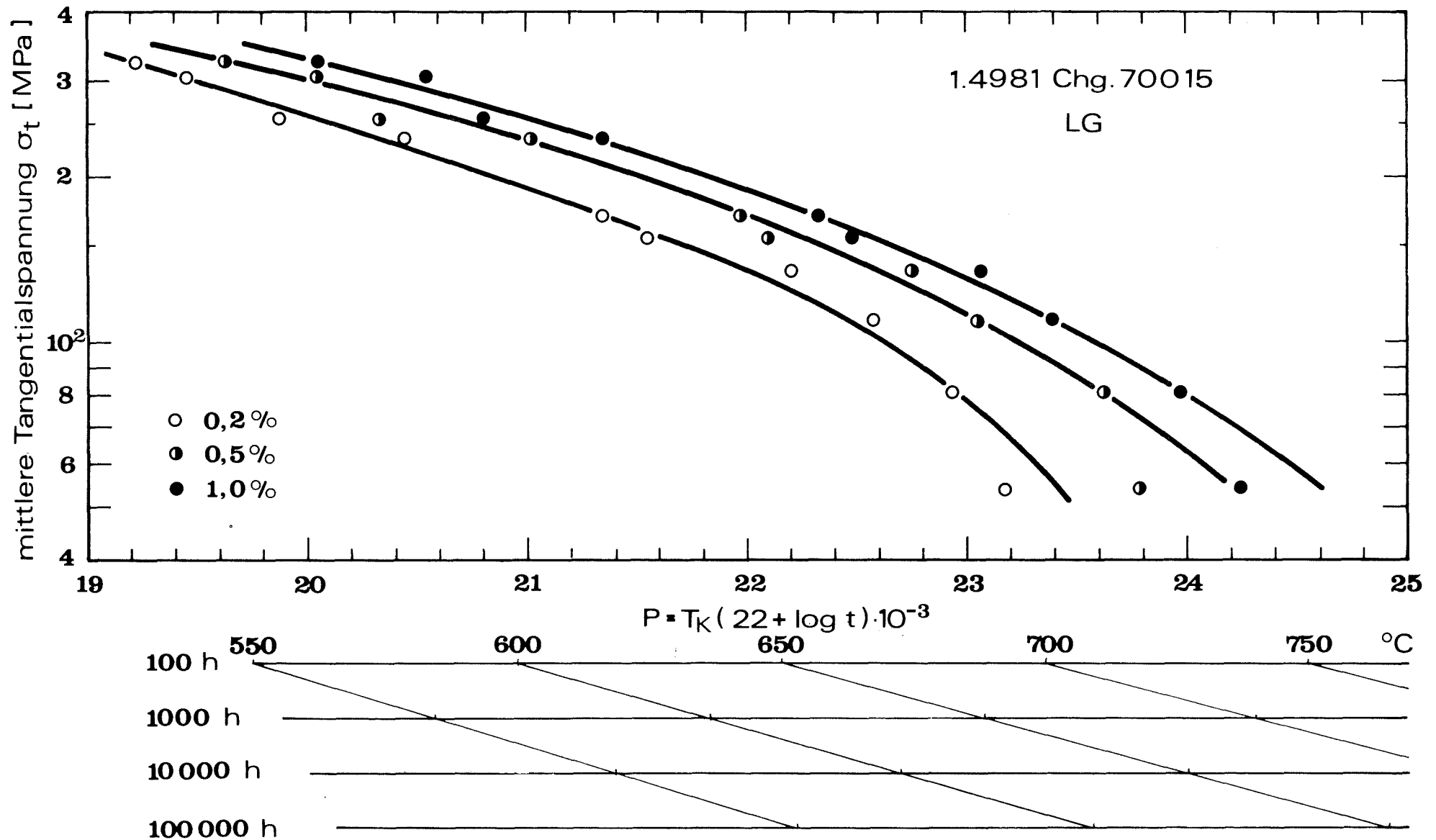


Abb. 47: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehngrenzen des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG).

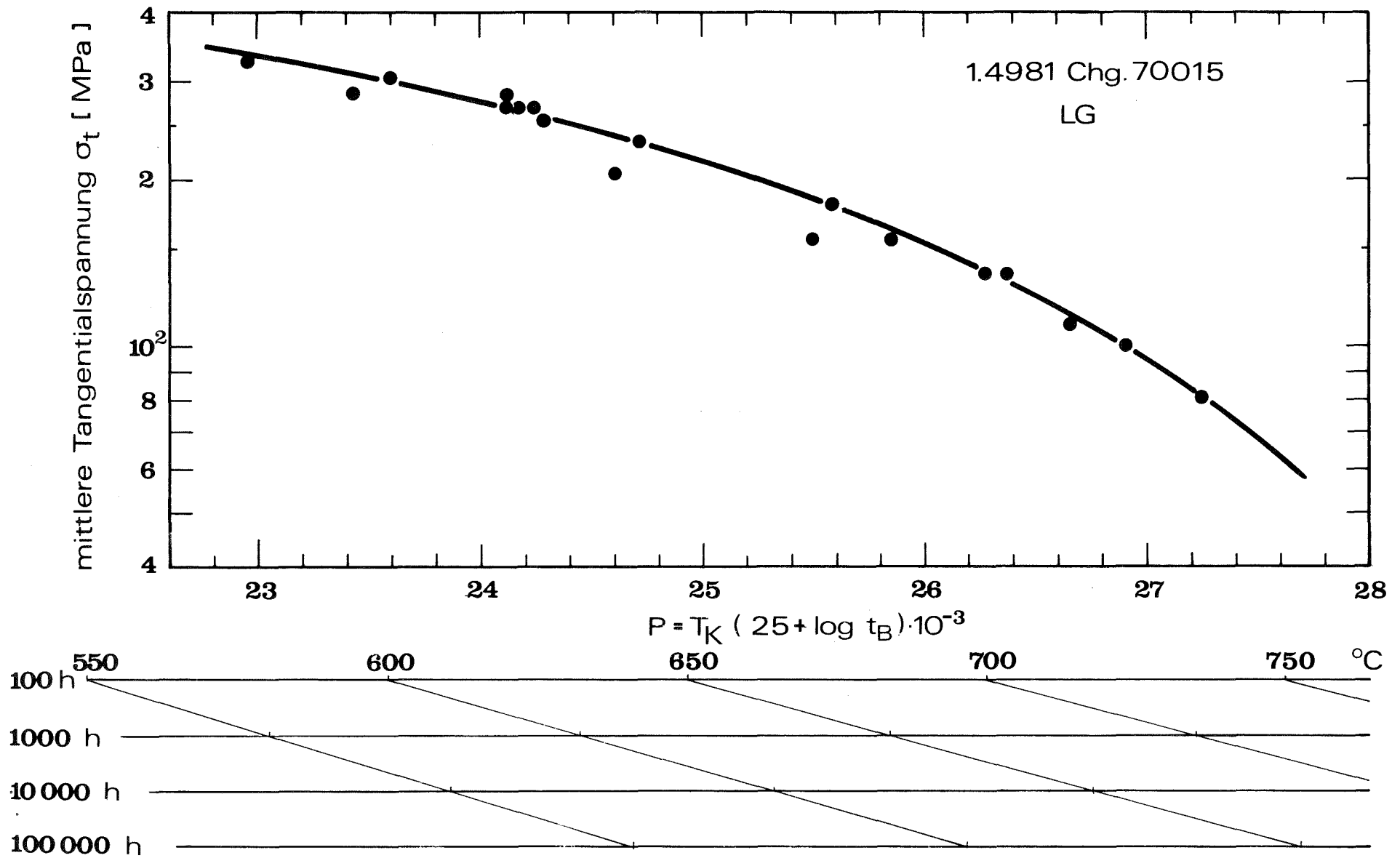


Abb. 48: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 70015, (LG).

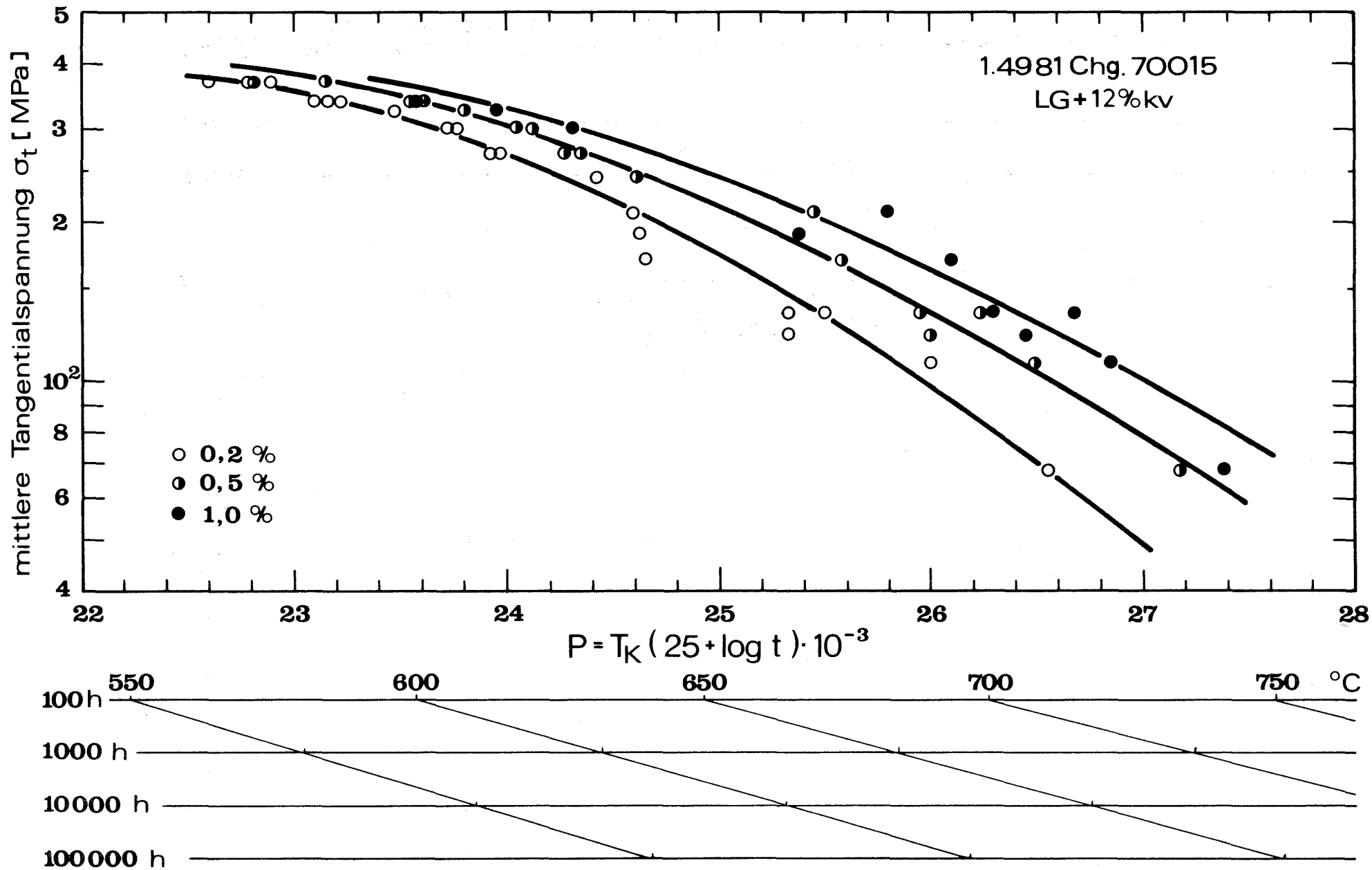


Abb. 49: Hauptkurvennach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für die Zeitdehn-  
grenzen des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 12% KV).

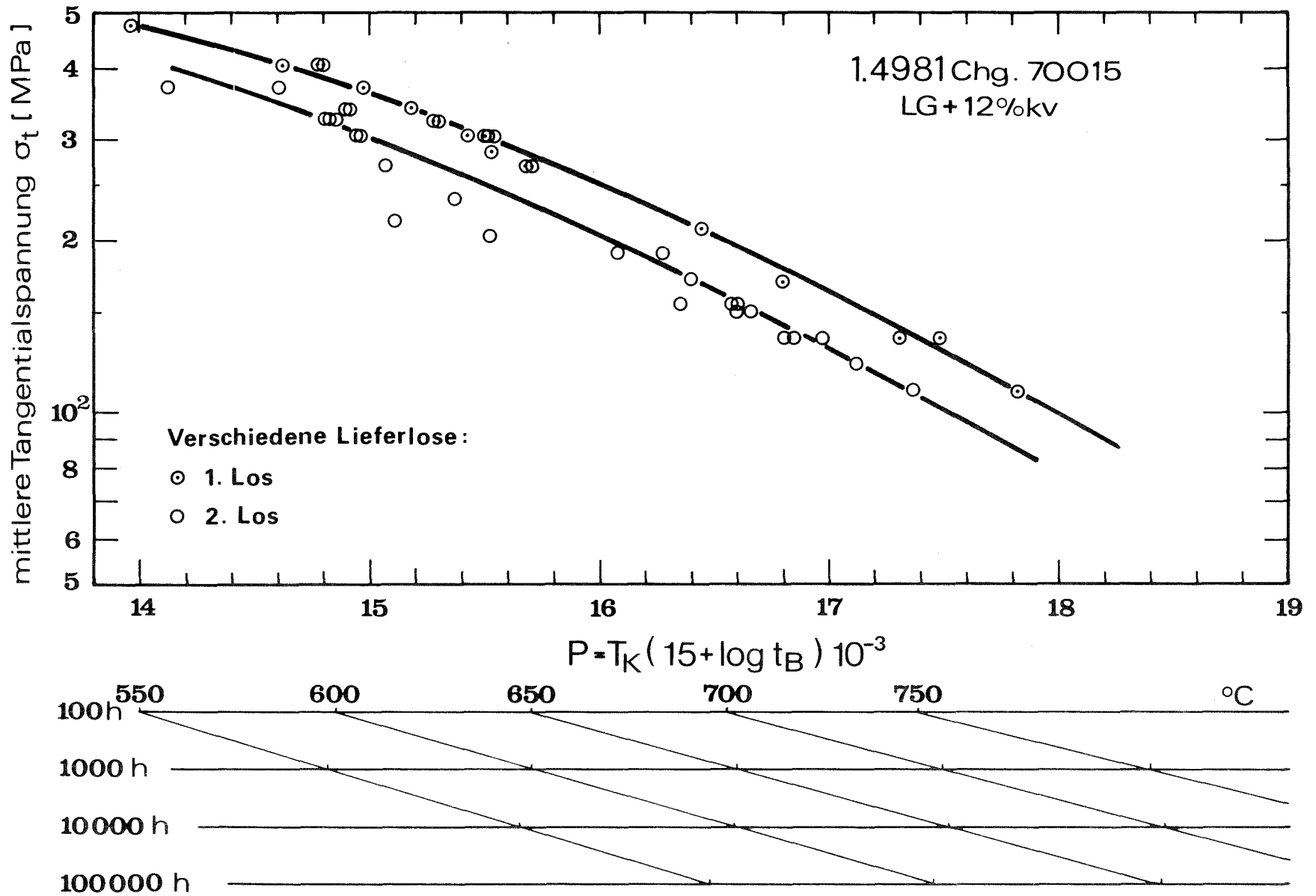


Abb. 50: Hauptkurven nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 70015 (LG + 12% KV).

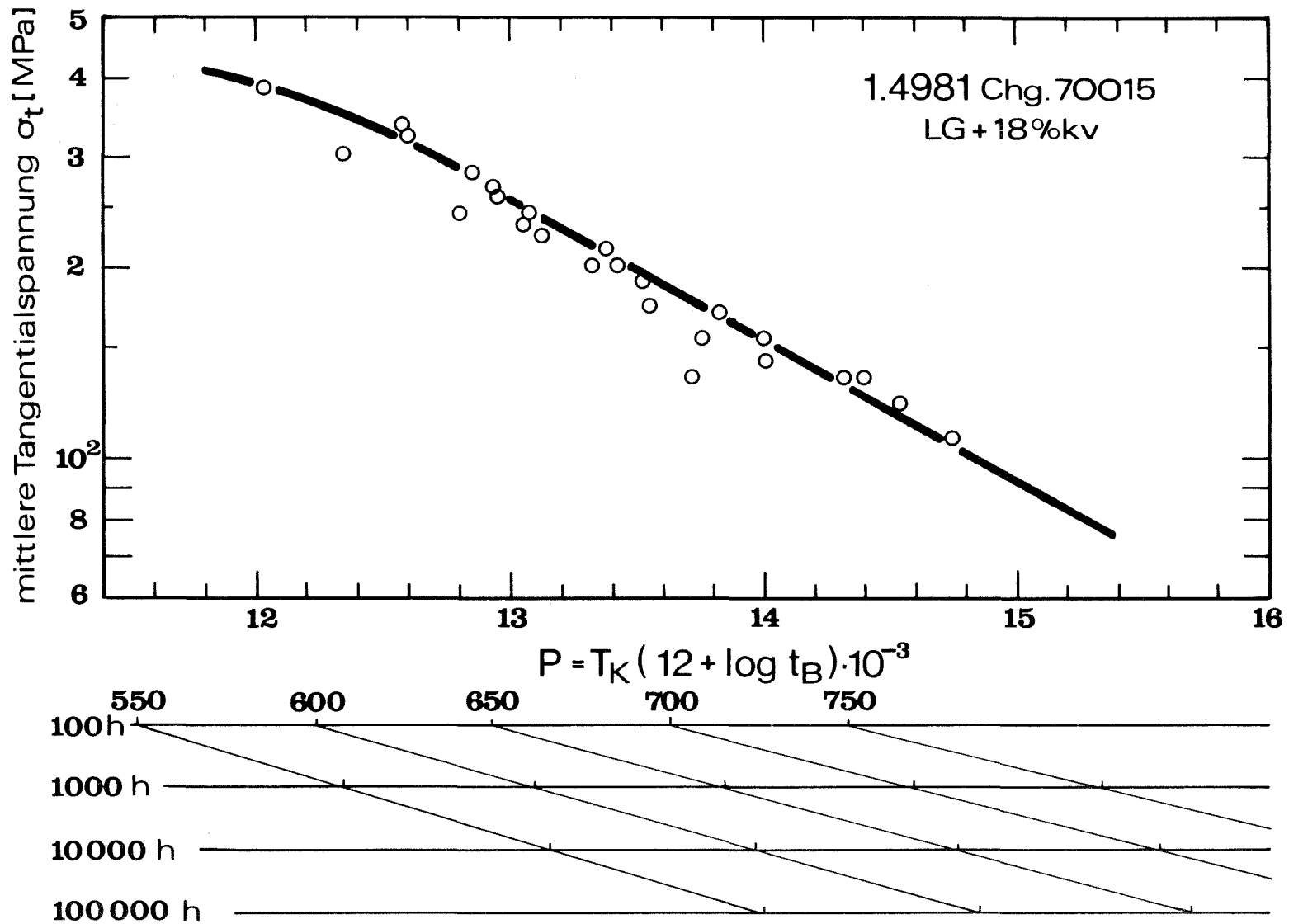
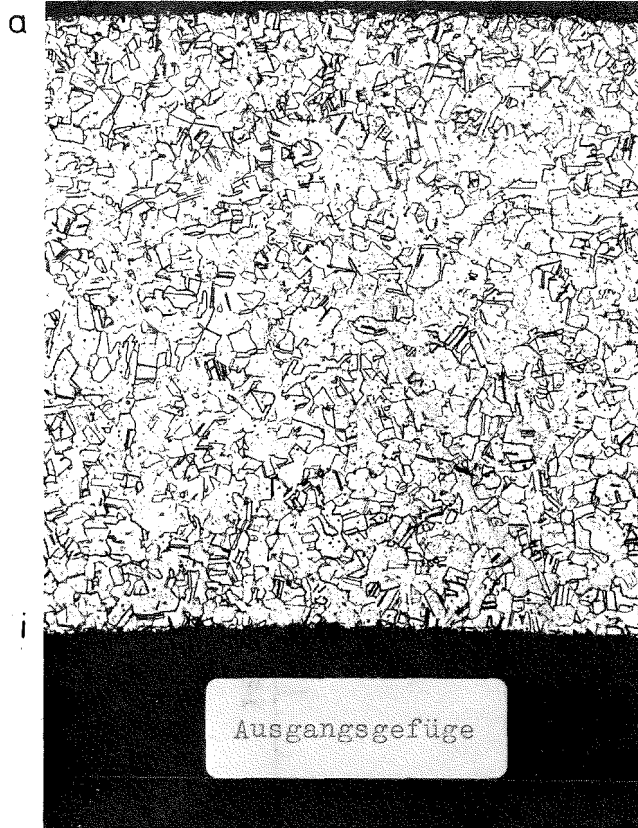


Abb. 51: Hauptkurve nach dem Zeit-Temperatur-Parameter von Larson und Miller für den Stahl 1.4981, Chg. 70015, (LG+18% KV).



200 x

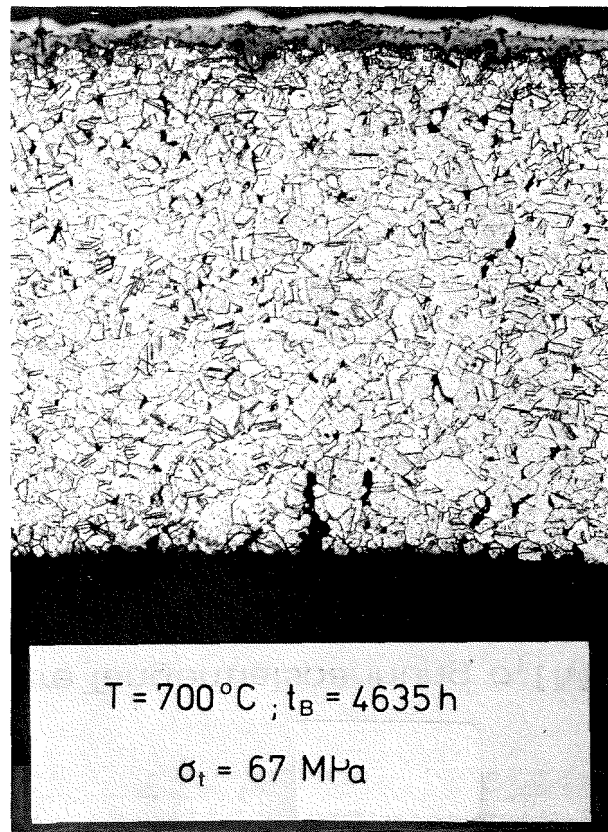
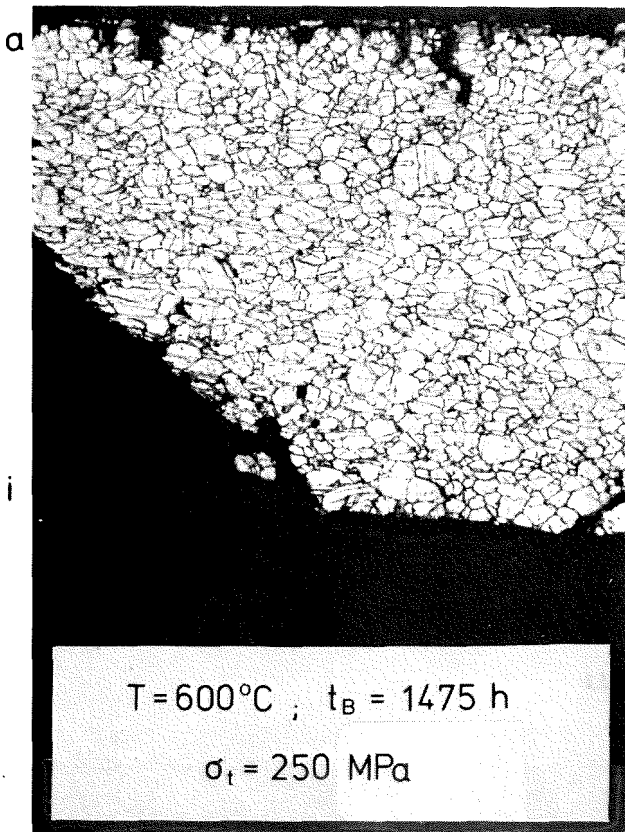


Abb. 52: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. HV 139.

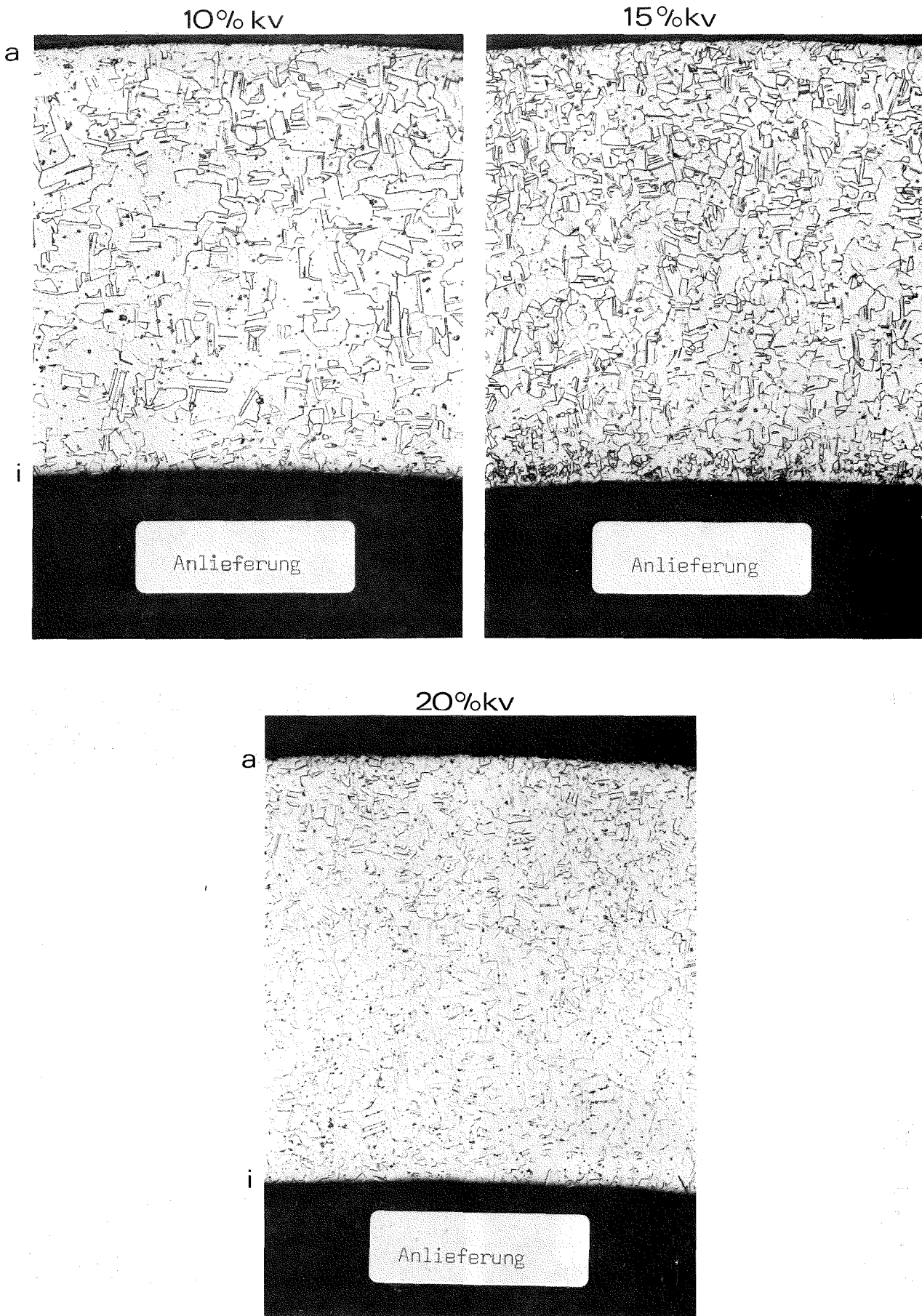


Abb. 53: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 51857, im Anlieferungszustand.

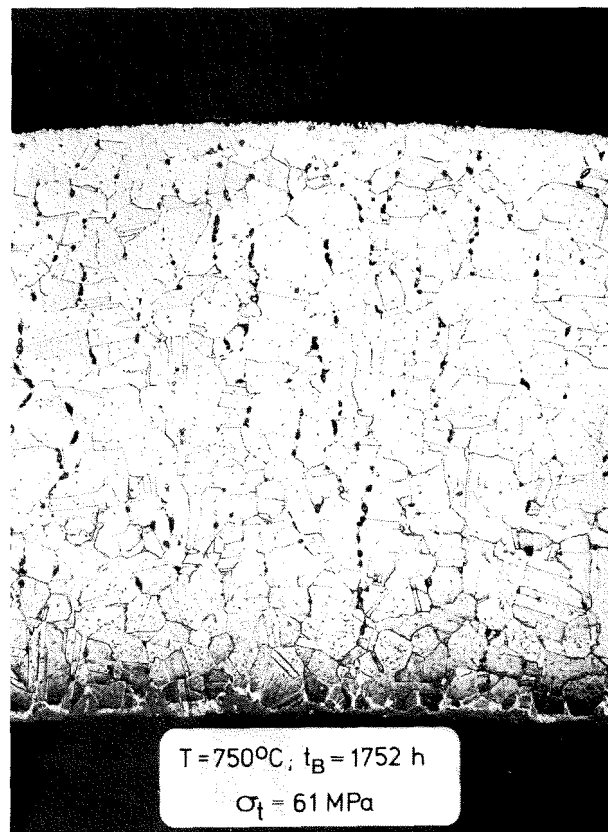
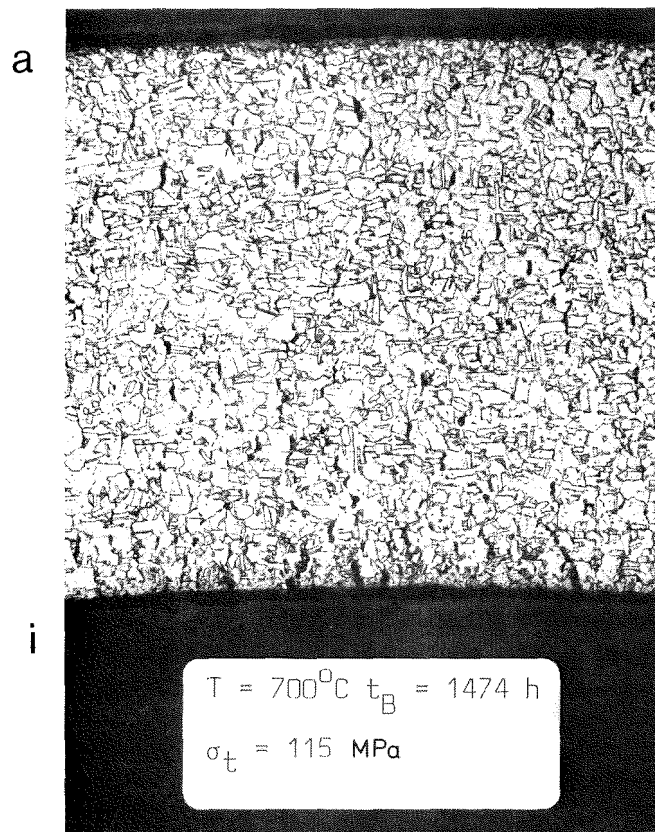
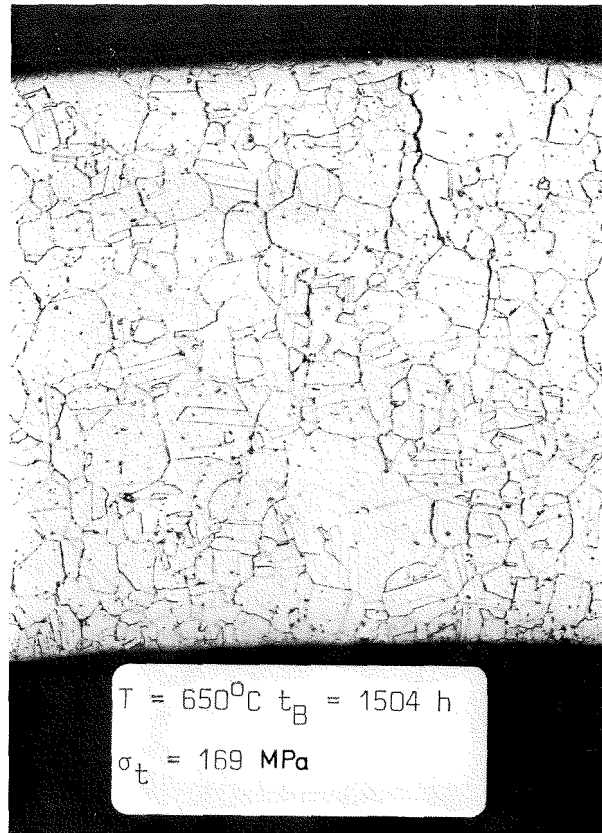
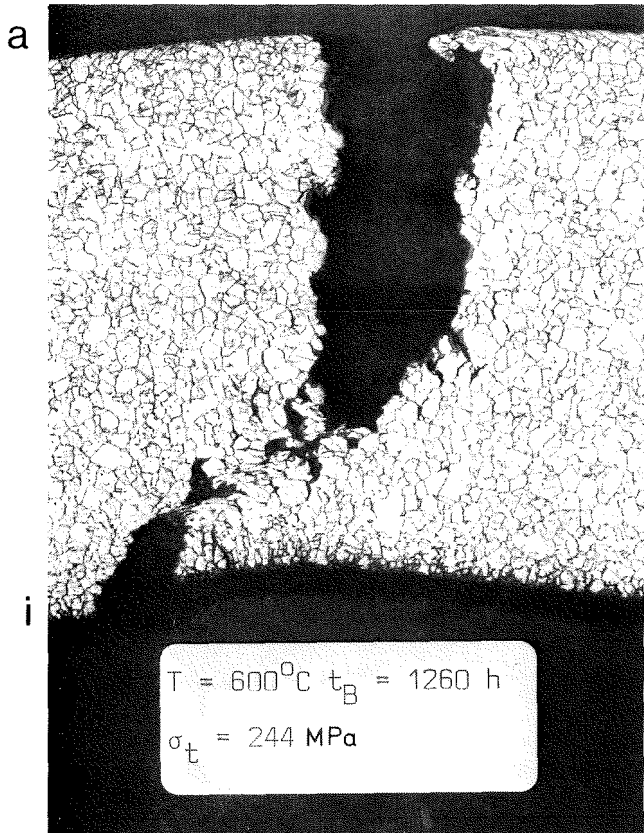


Abb. 54: Metallographische Schlifffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 10% KV).



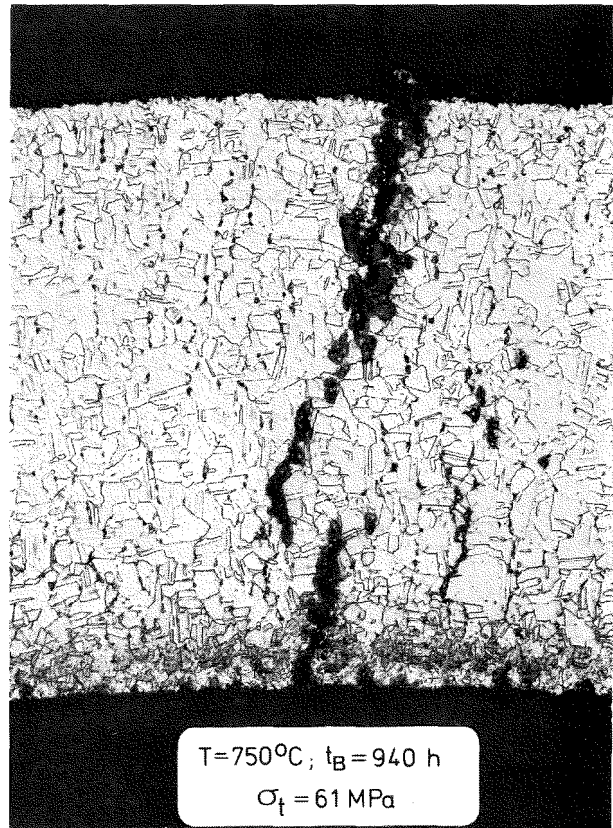
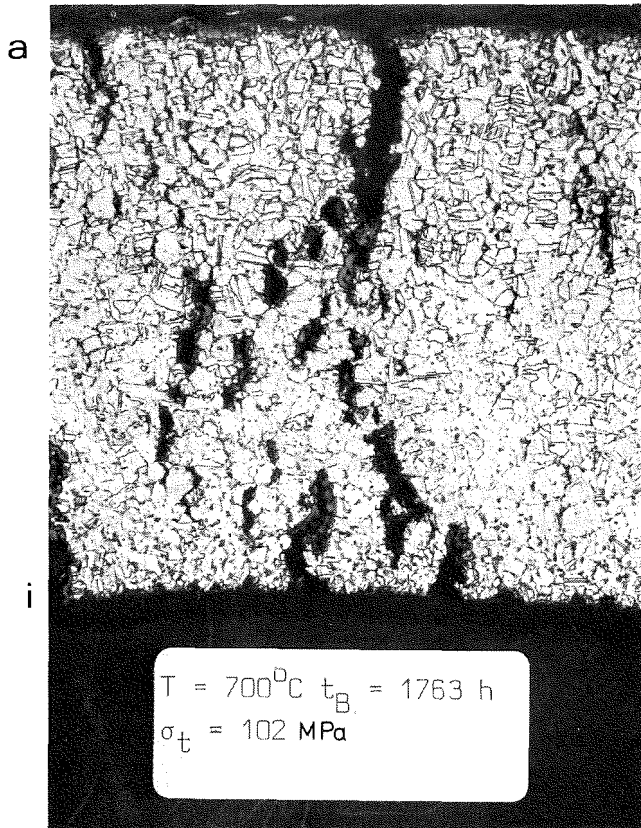
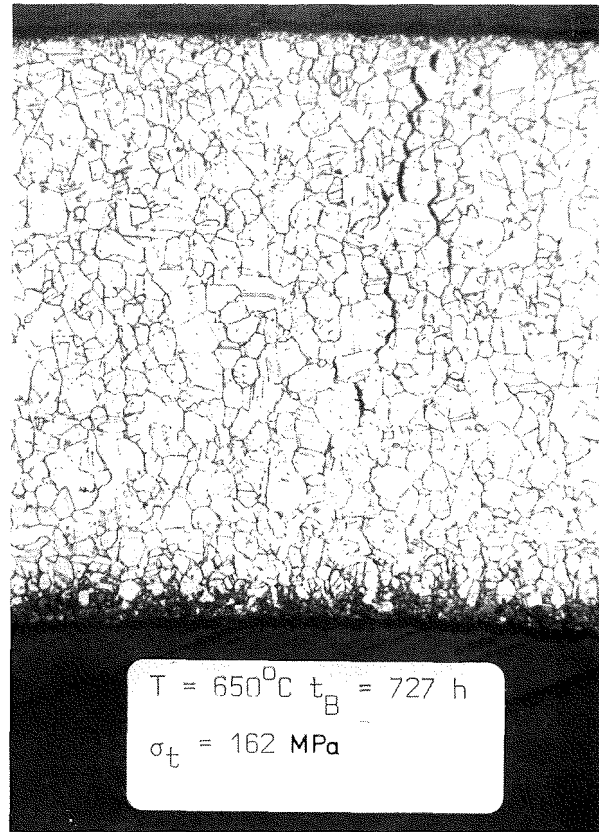
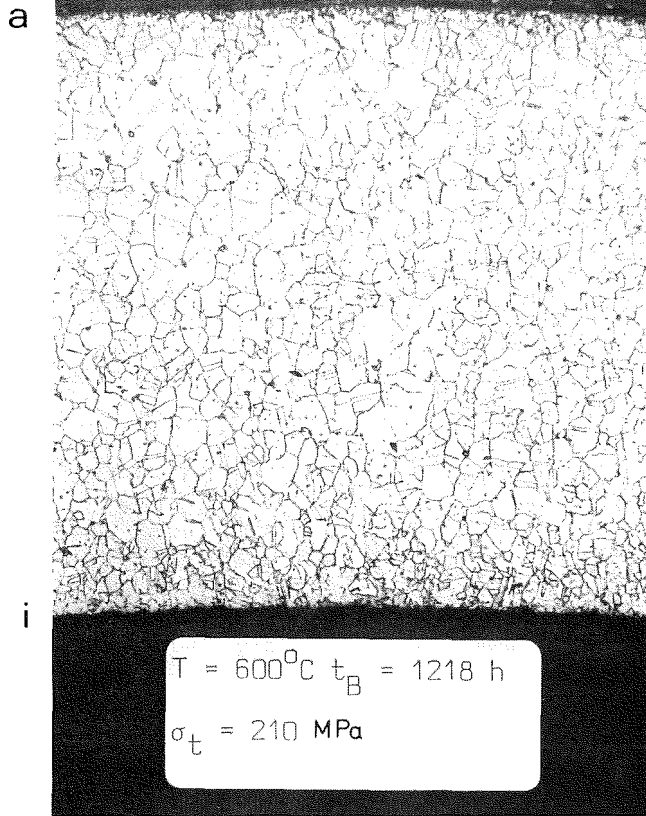
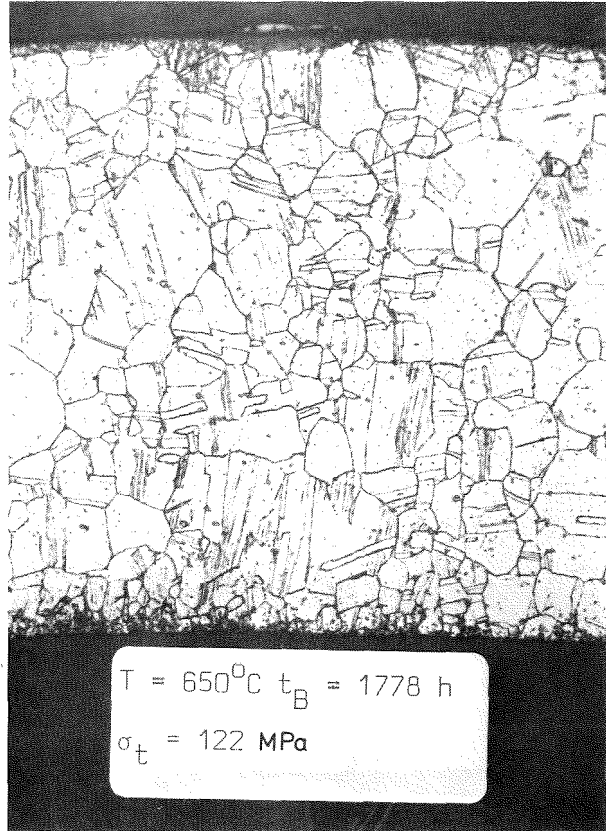
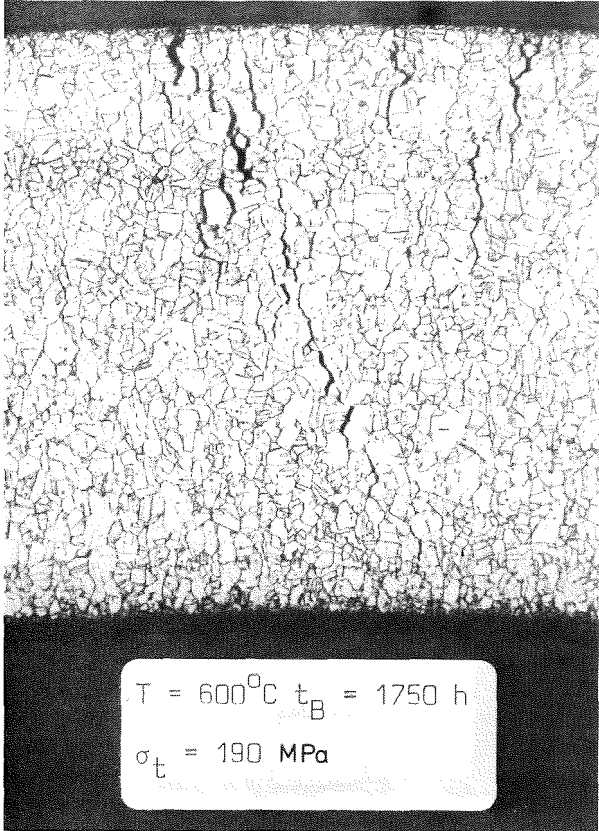


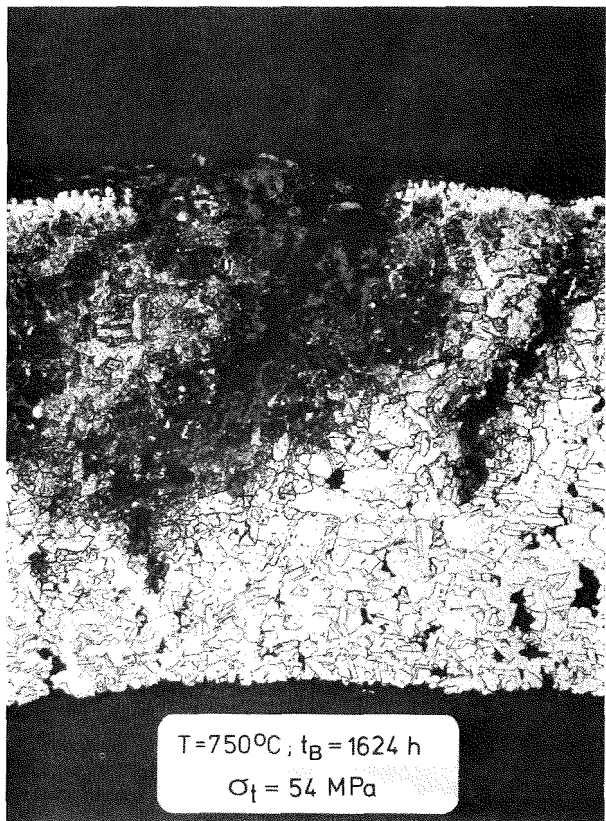
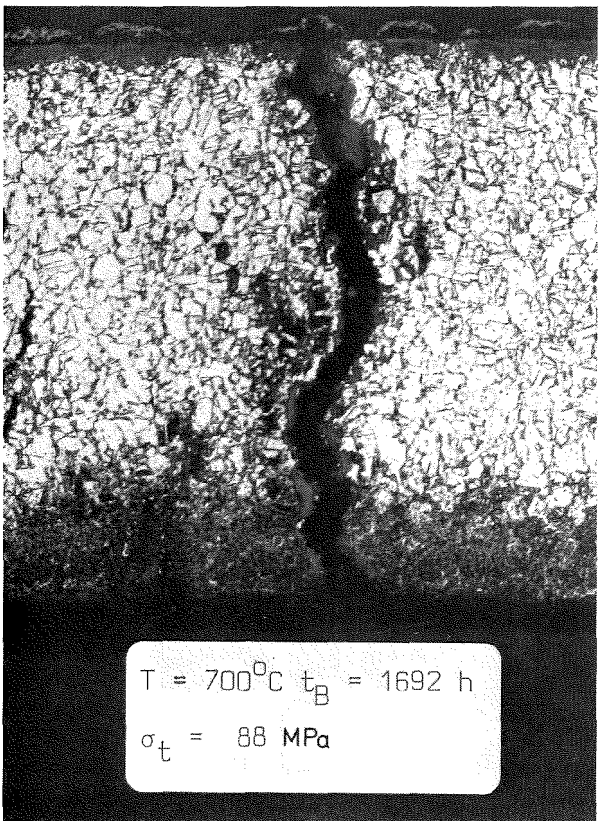
Abb. 55: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 15% KV).

a



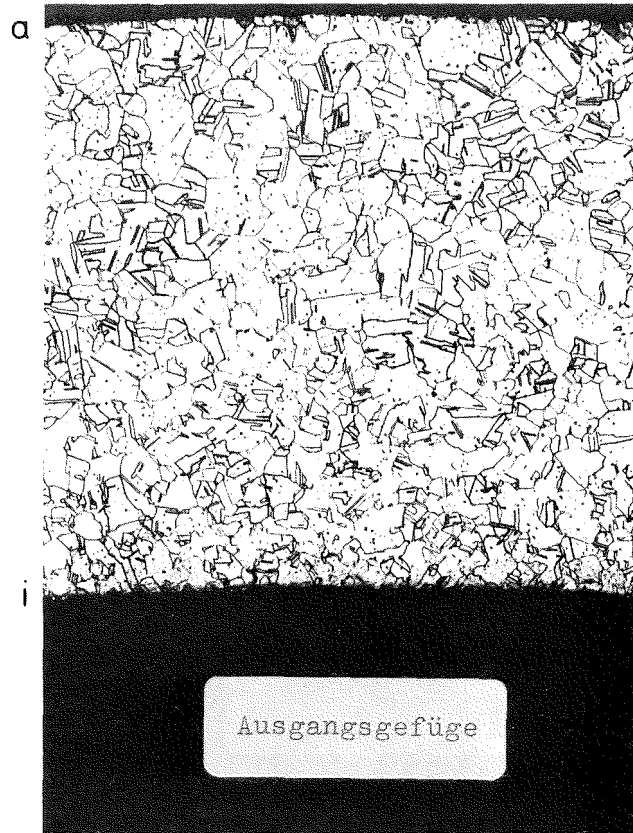
i

a



i

Abb. 56: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 51857, (LG + 20% KV).



200 X

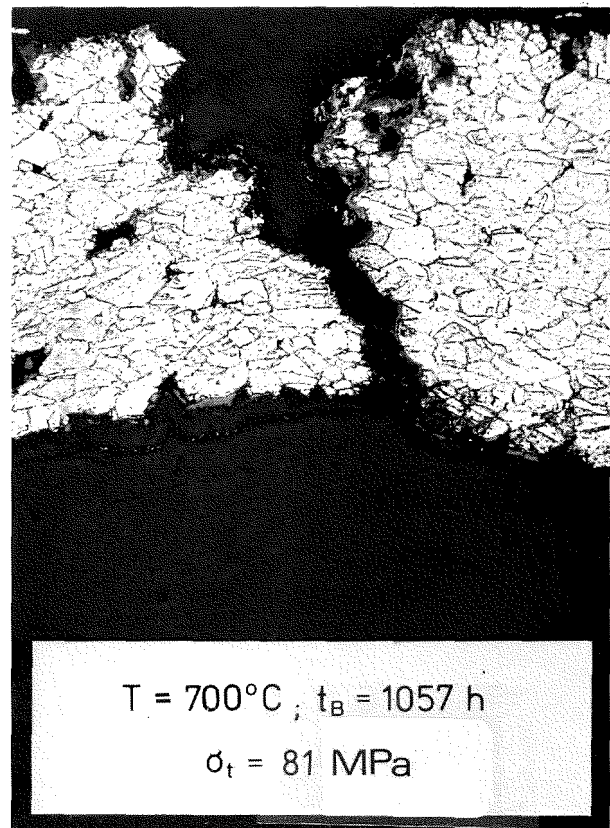
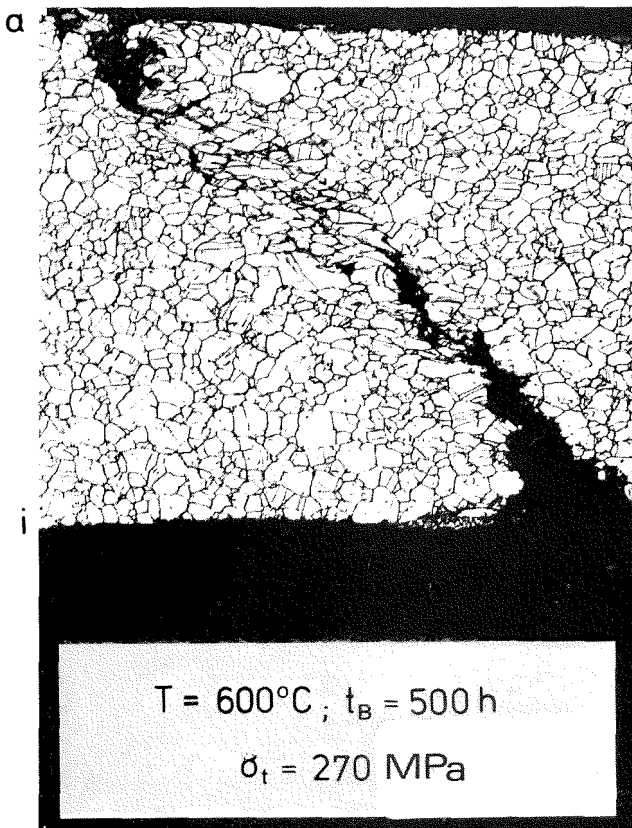
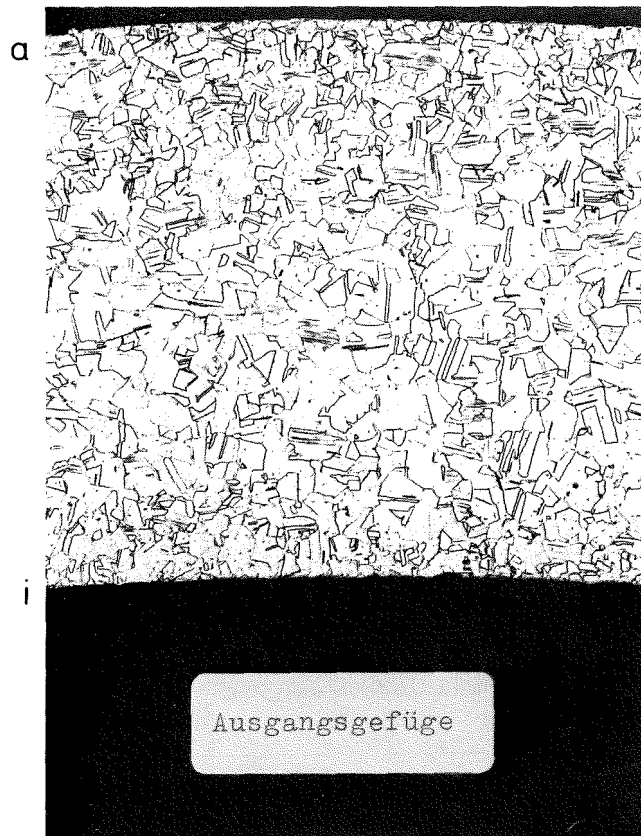


Abb. 57: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG).

1.4981 CHG.70015 (LG + 12%kv)



200 X

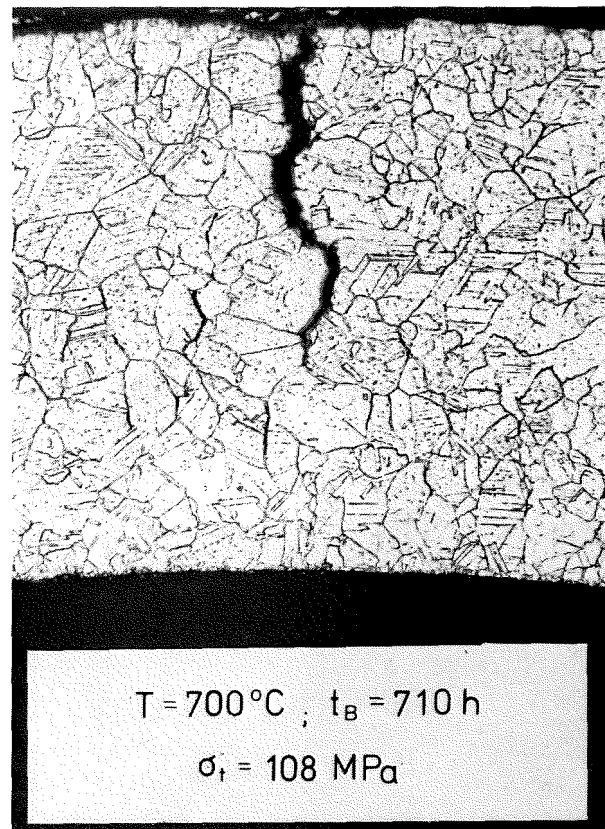
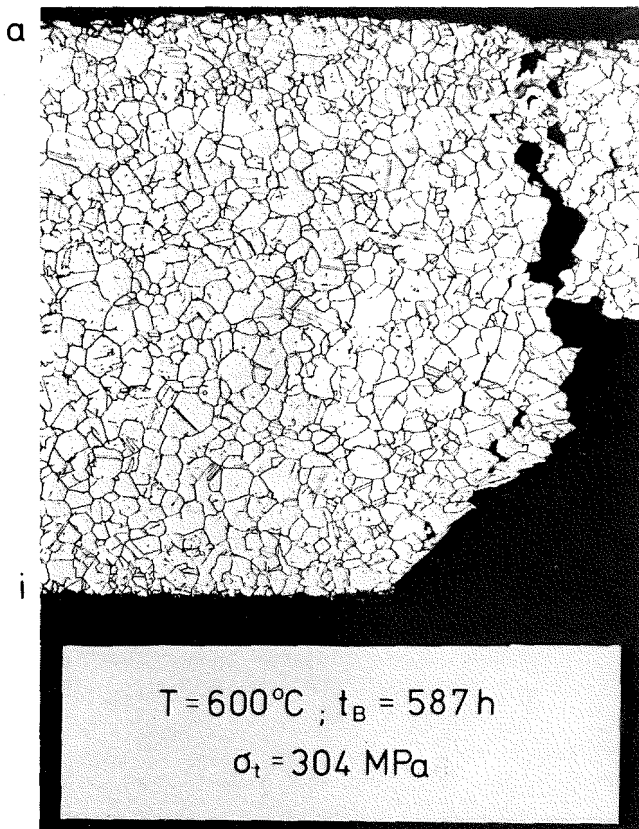


Abb. 58: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 12% KV).

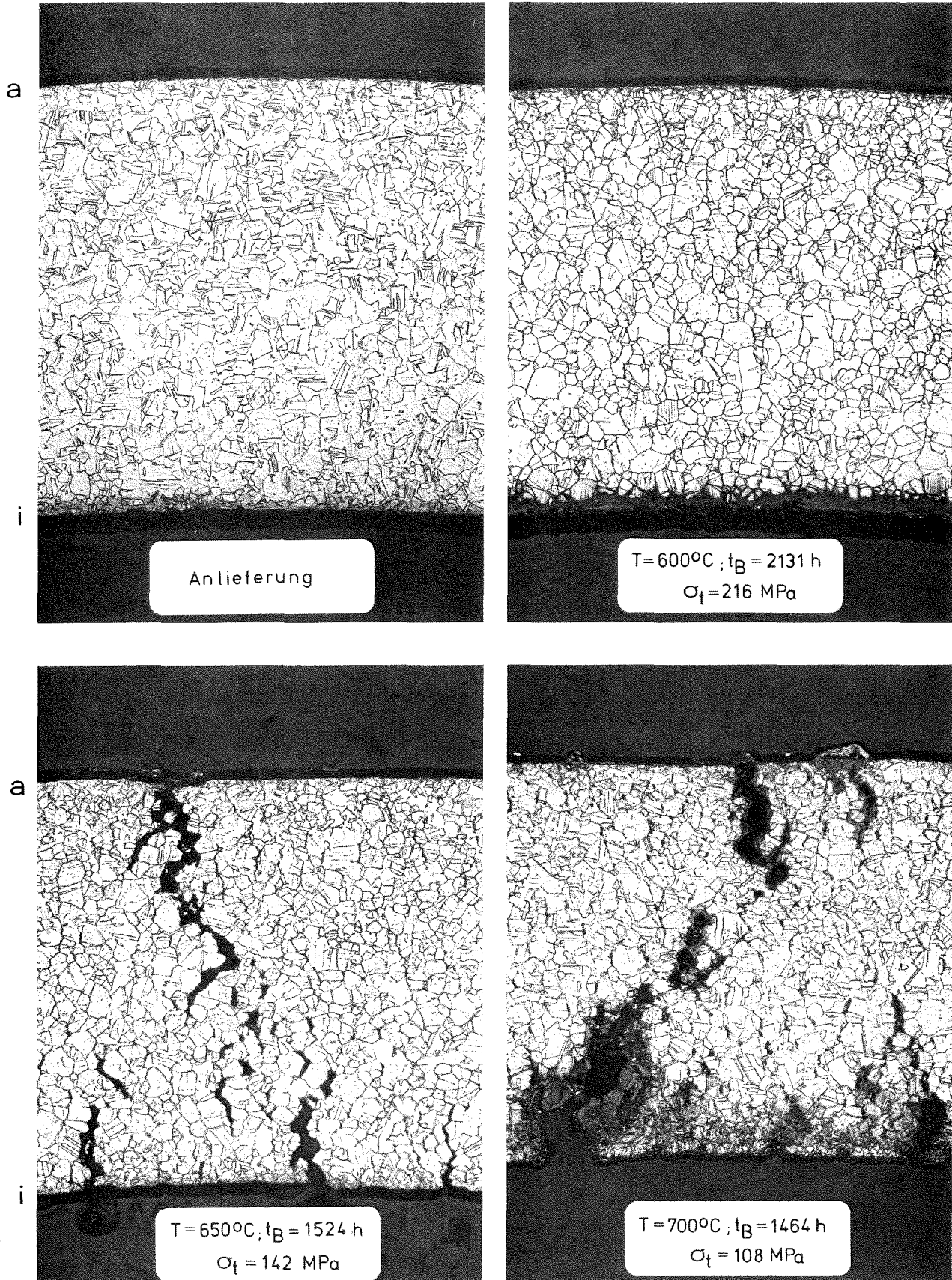


Abb. 59: Metallographische Schliffbilder des Stahles 1.4981, Chg. 70015, (LG + 18% KV).