

KfK 4569

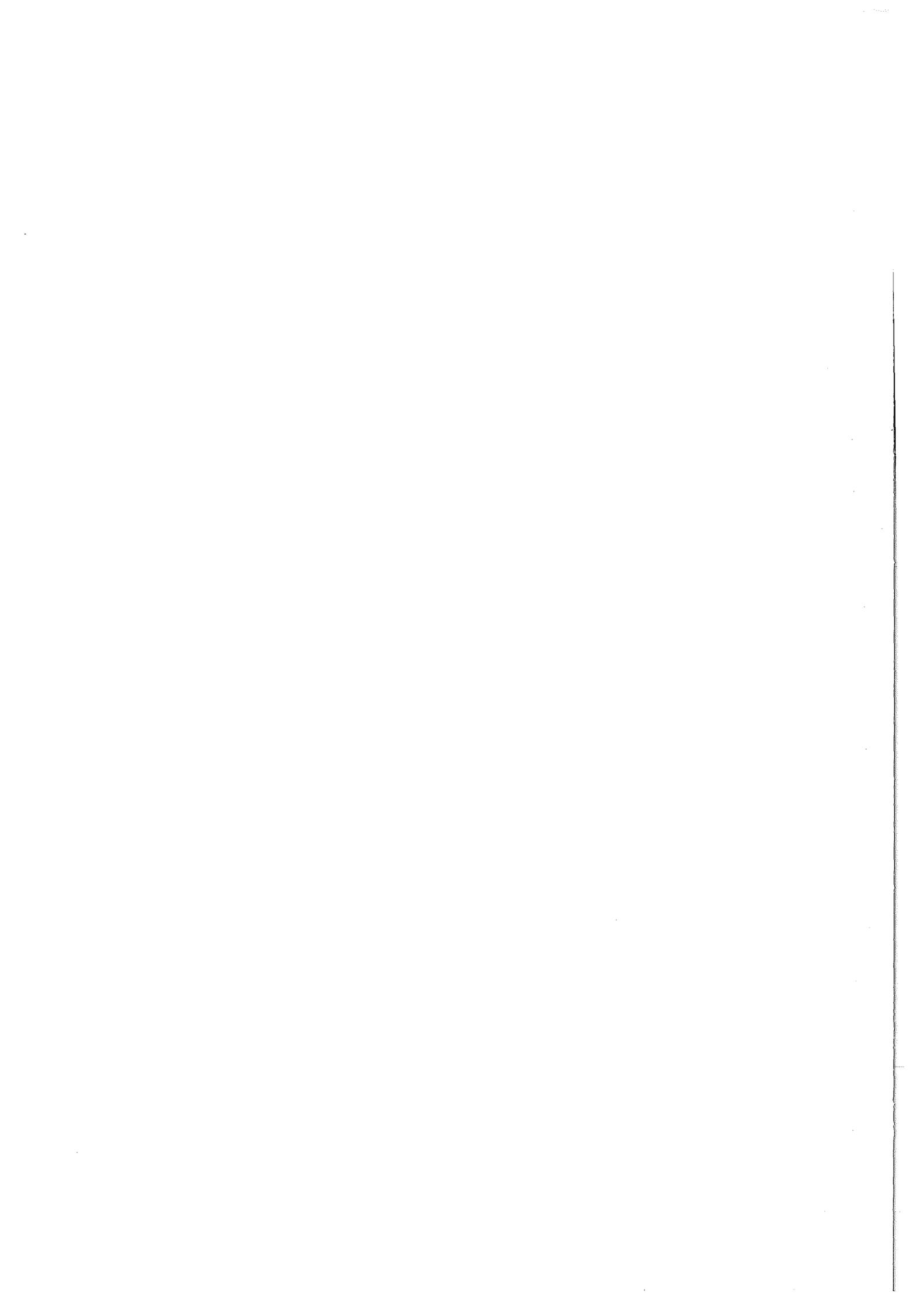
Mai 1989

**Lebensdauerberechnungen mit
Hilfe der Life Fraction Rule
für den Werkstoff 1.4948
im Temperaturbereich
550 bis 650° C**

**W. Baumgärtner, M. Boček, M. Pfeifenroth,
W. Scheibe, R. Schmitt**

**Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter**

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KfK 4569

**Lebensdauerberechnungen mit Hilfe der Life Fraction Rule für den
Werkstoff 1.4948 im Temperaturbereich 550 bis 650°C**

W. Baumgärtner, M. Boček, M. Pfeifenroth, W. Scheibe, R. Schmitt

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt den Einfluß der Temperatur und der Haltezeit auf das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes 1.4948 im Temperaturbereich 450 bis 850°C. Es wird gezeigt, daß das Relaxationsverhalten während der Haltezeit den lebensdauerbestimmenden Faktor darstellt, wobei die Reduzierung der Bruchlastwechselzahl N_f von der Temperatur abhängig ist.

Als Schadensmodell wird die Life Fraction Rule (LFR) vorgestellt, mit deren Hilfe Lebensdauerberechnungen von Versuchen mit Haltezeiten im Temperaturbereich 550 bis 650°C durchgeführt wurden. Es ergab sich in allen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung von Rechnung und experimentellen Ergebnissen.

Life Time Calculations by means of the Life Fraction Rule for Material 1.4948 in the Temperature Range between 550^o C and 650^o C

Summary

The report describes the influence of temperature and hold-time upon the low-cycle fatigue-behaviour of material 1.4948 in the temperature range of 450 up to 850^oC. It is shown that stress-relaxation behaviour during hold-time is life determining. Furthermore the reduction of number of cycles to fracture N_f depends upon temperature.

The Life Fraction Rule (LFR) is presented as a damage model which has been applied for life time calculations of hold-time tests for 550 and 650^oC. The results show a rather good agreement between calculated N_f -values and experimental data.

Gliederung

	Seite
1. Einleitung	1
2. Experimentelle Ergebnisse	
2.1 Einfluß der Haltezeitart auf N_f	1
2.2 Einfluß der Temperatur auf N_f	2
2.3 Relaxationsverhalten	3
2.4 Ergebnisse von Relaxationsversuchen	4
3.) Life fraction rule (LFR)	
3.1 "Stress relaxation"-Modell	6
3.2 Vergleich Experiment - Rechnung Versuche KfK	7
3.3 Vergleich Experiment - Rechnung Versuche Interatom	8
4. Literatur	10

1 Tabelle

17 Abbildungen

1. Einleitung

Die stationären und instationären Betriebsbedingungen eines natriumgekühlten schnellen Brütters rufen sowohl Kriech- als auch Ermüdungsschädigungen hervor. Diese Bedingungen wurden durch dehnungs- und spannungskontrollierte Versuche mit Haltezeiten vorwiegend in der Zugphase im Temperaturbereich 450 bis 850 °C simuliert. Der Einfluß der Haltezeit auf die Zahl der Zyklen bis zum Bruch N_f wird durch ein von Boček et al. entwickeltes Schadens-Modell erklärt [1]. Für die Versuche wurde eine "hourglass"-förmige Rundprobe von 77 mm Länge verwendet, deren kleinster Durchmesser in der Probenmitte 8,8 mm beträgt.

2. Experimentelle Ergebnisse

2.1 Einfluß der Haltezeitart auf die Bruchlastwechselzahl N_f

Der Einfluß der unterschiedlichen Haltezeitarten auf die Bruchlastwechselzahl für den Werkstoff 1.4948 ist in Abb. 1 zu sehen. Die Abbildung zeigt, daß die Reduzierung des N_f -Wertes entscheidend davon beeinflußt wird, ob eine Zug-, eine Druckhaltezeit oder eine symmetrische Haltezeit aufgebracht wird. Es ist offensichtlich, daß unter vergleichbaren Bedingungen die Zughaltezeit der am stärksten schädigende Belastungstyp ist, hervorgerufen durch die Kriechschädigung während der Relaxationsphase. Für Haltezeiten in der Druckphase sowie symmetrische Haltezeiten entsteht im Vergleich zu den Zughaltezeiten wesentlich weniger Kriechschädigung. In diesen beiden Fällen ist die Bruchlastwechselzahl im Vergleich zu der Zughaltezeit deutlich höher. Der

Grund dafür ist, daß in der Druckphase des Zyklus der hervorgerufene Kriechschadens-Anteil entweder unverändert bleibt oder sogar durch Sintern der Poren verringert wird.

2.2 Einfluß der Temperatur auf N_f

Den Einfluß der Temperatur und der Haltezeit auf die Zahl der Zyklen bis zum Bruch N_f zeigt die Abb. 2. Es ist zu erkennen, daß bei den rein zyklischen Versuchen (ohne Haltezeit) N_f mit steigender Temperatur abnimmt. Dies ist ein Anzeichen dafür, daß das Bruchverhalten im wesentlichen von der Kriechschädigung beeinflusst wird. Bei niedrigeren Temperaturen ($<500^{\circ}\text{C}$) ist für kurze Haltezeiten der N_f -Wert nahezu unabhängig von der Länge der Haltezeit, um dann mit zunehmender Haltezeit stärker abzufallen.

Für Versuchstemperaturen oberhalb von 550°C ist das N_f - t_h -Verhalten prinzipiell anders. Bei diesen hohen Temperaturen reduziert sich die Bruchlastwechselzahl mit der Haltezeit nur bei kurzen Haltezeiten. Für längere Haltezeiten bleibt der N_f -Wert nahezu unverändert, wenn die Haltezeitdauer erhöht wird. Für 550°C zeigt die N_f - t_H -Kurve einen Übergang zwischen dem Hoch- und Tieftemperaturverhalten: Bis zu Haltezeiten von etwa 180 Minuten reduziert sich N_f mit der Haltezeit.

Während eines Versuchs mit einer Zughaltezeit ist das Material sowohl Kriechbeanspruchungen (während der Haltezeit) als auch Ermüdungsbelastungen (während des Zyklierens) ausgesetzt. Für Temperaturen unterhalb von 550°C wird erwartet, daß allein die Ermüdungsschädigung die Bruchlastwechselzahl beeinflusst. Mit

steigender Temperatur jedoch wird die Kriechschädigung mehr und mehr dominierend. Es wird deshalb vorausgesetzt, daß für Temperaturen oberhalb von 550°C die Kriechschädigung die lebensdauerbestimmende Schädigungsart ist. Das bedeutet, daß die Spannung und nicht die Dehnung die geeignete Variable für die Beschreibung der infrage kommenden Experimente ist.

2.3 Relaxationsverhalten

In der Abbildung 3 sind zwei Arten der Relaxation während eines dehnungskontrollierten Haltezeitversuchs zu erkennen. Für niedrige Temperaturen ergibt sich nur eine schwache Relaxation, bei der die Spannung während der Haltezeit nur wenig abnimmt und somit eine relativ große Schädigung bei jedem Zyklus akkumuliert wird. Deshalb zeigt sich vermutlich auch in diesem Fall bei längeren Haltezeiten eine verstärkte Abnahme der Zyklen bis zum Bruch. Für höhere Temperaturen ($>550^{\circ}\text{C}$) erfolgt während der Haltezeit eine starke Abnahme der Spannung. Dies hat zur Folge, daß für lange Haltezeiten die Kriechschädigung nur noch schwach zunimmt und deshalb nur noch eine sehr geringe Abnahme der Bruchlastwechselzahl zu erwarten ist.

Falls diese Modellvorstellung richtig ist, müßten spannungs- und dehnungskontrollierte Versuche mit Haltezeiten bei gleicher Temperatur ein sehr unterschiedliches N_f-t_H -Verhalten zeigen. In Abb. 4 ist ein Vergleich beider Versuchsarten für 650°C zu sehen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß bei spannungskontrollierter Versuchsdurchführung eine Verlängerung der Probe eintritt, während im anderen Falle (Dehnungskontrolle) die Gesamtlänge der Probe konstant bleibt. Im Gegensatz zu den

dehnungskontrollierten Versuchen (offene Symbole), wo eine starke Relaxation erfolgt und demzufolge der N_f -Wert nahezu unabhängig von der Haltezeitlänge ist, zeigt sich bei der gleichen Temperatur(!) für die spannungskontrollierten Versuche (geschlossene Symbole) eine kontinuierliche Reduzierung der Bruchlastwechselzahl mit zunehmender Haltezeit. Dieses Verhalten mit unterdrückter Relaxation infolge der konstant gehaltenen Spannung entspricht dem N_f - t_H -Verlauf von dehnungskontrollierten Versuchen, durchgeführt bei niedrigeren Temperaturen, wo nur eine schwache Relaxation erfolgt. Dieses Verhalten konnte an den zwei austenitischen Werkstoffen 1.4948 (Kreise) und am 1.4919 (Dreiecke) beobachtet werden.

2.4 Ergebnisse von Relaxationsversuchen

Aus den zuvor gemachten Ausführungen ist zu erkennen, daß die Bruchlastwechselzahl von dem Relaxationverhalten während der Haltezeit stark beeinflusst wird. Will man nun die Lastwechselzahl für sehr lange Haltezeiten berechnen, so ist von entscheidender Bedeutung, ob die Spannung während der Haltezeit kontinuierlich abfällt oder im Gegensatz dazu ggf. wieder ansteigt. Im ersteren Falle (stetige Spannungsabnahme) würde dann - wie bereits erwähnt- die Kriechschädigung pro Zyklus nur noch schwach zunehmen und somit zu keiner nennenswerten Abnahme des N_f -Wertes führen. Falls allerdings die Spannung einmal wieder zunehmen sollte, würde dies eine verstärkte Abnahme der Bruchlastwechselzahl bedeuten, da infolge der höheren Spannung auch dann wieder mehr Lebensdaueranteile konsumiert werden. Eine Auswertung von Relaxationsversuchen bei 550 und 650°C ergibt jedoch, daß bis zu 1000 Stunden Haltezeit ein Anstieg der Span-

nung nicht zu erwarten ist.

Abb. 5 zeigt das Ergebnis eines japanischen Versuchs am SUS 304 bei 550°C, bei dem nach monotoner Dehnungsbelastung (0.2%) bis nahezu 2000 Stunden ein ausgeprägter Spannungsabfall während der Relaxationszeit eintritt [2]. Weiterhin wurde festgestellt, daß die Spannungswerte bei der zyklischen Relaxation höher sind im Vergleich zu der monotonen Dehnungsbelastung, da die Anfangsspannung entscheidend von der Dehnungsgeschwindigkeit und der Dehnungsamplitude beeinflußt wird [2]. Wie die Abb. 6 zeigt, ist der prozentuale Spannungsabfall jedoch in beiden Fällen etwa gleich: nach 10 Stunden Relaxationszeit ist die Spannung etwa um 20-25% -bezogen auf den jeweiligen Anfangswert- abgefallen. Wie aus Abb. 7 anhand von englischen Versuchen zu erkennen ist, erfolgt auch bei dem austenitischen Werkstoff 316L (UK) bei 575°C ein relaxationsbedingter Abfall bis sogar 10'000 Stunden, der für $\epsilon_t=0.15\%$ sehr ausgeprägt ist [3].

Ein relativ umfangreiches Programm zum monotonen Relaxationsverhalten am 1.4948 wurde bei dem Metaalinstituut TNO in Apeldoorn im Auftrag der KfK durchgeführt [4]. Die Abb. 8 und 9 zeigen in zwei Beispielen, daß bei 650 aber auch bei 550°C bis 1000 Stunden Relaxationszeit ein deutlicher Spannungsabfall erfolgt. Zwei Relaxationsversuche mit 0.5% Anfangsdehnung an der Charge 402 des Werkstoffes 1.4948, die in unserem eigenen Labor durchgeführt wurden, bestätigen -wie die Abbildungen 10 und 11 zeigen- ebenfalls diese Tendenz, d. h. bei 650°C ergibt sich eine starke Relaxation und bei 550°C ist immer noch ein relativ deutlicher Spannungsabfall zu beobachten. Selbst beim bestrahlten Werkstoff 1.4948 (Dosis: $1,7 \cdot 10^{21}$ n/cm², E>0,1 MeV) erfolgt bis 48 Stunden Haltezeit eine ausgeprägte Relaxation. Die Abb.12

zeigt, daß bereits nach 2% der Haltezeit die Spannung auf etwa die Hälfte des Endwertes abgefallen ist. In keinem Falle kam es jedoch während der Relaxationszeit zu einem erneuten Spannungsanstieg. Dies bedeutet aber, daß die Bruchlastwechselzahl mit größer werdender Haltezeit nur noch unwesentlich abnimmt und somit bei längeren Haltezeiten keinesfalls eine verstärkte Reduzierung von N_f zu erwarten ist.

3. Life fraction rule (LFR)

3.1 "Stress relaxation"- Modell

Die Spannungsrelaxation kann als ein Spezialfall eines Kriechversuchs betrachtet werden, bei dem die Spannung stetig abnimmt. Dies führt zu einem Verbrauch an Lebensdauer während der Spannungsrelaxation. Die Gleichung (1) in Abb. 13 zeigt die Life fraction rule [5] als das Integral des Zeitintervalls über $\tau(t)$. $\tau(t)$ ist die Lebensdauerfunktion (Gl. 2), in der das Zeitstandverhalten und die Belastungsbedingungen enthalten sind. Da die Spannung nicht konstant ist, wird eine Spannungsrelaxationsfunktion benötigt, die in Gleichung (3) beschrieben ist. Hierbei ist der Parameter Alpha ein Maß für die Stärke der Relaxation: Je stärker die Spannung pro Zeiteinheit abfällt, umso größer ist der Wert für Alpha. Setzt man die Gleichung (3) in (2) ein, so folgt daraus die Lebensdauer-Funktion für Spannungsrelaxation (Gl. 4) in Abb. 14. Schließlich erhält man das Schadens-Integral q als eine Funktion der Haltezeit (Gl. 5). Der Reziprokwert von q ergibt dann -wie Gleichung (6) zeigt- die entsprechende Zahl der Zyklen bis zum Bruch.

3.2 Vergleich Experiment - Rechnung KfK-Haltezeitversuche

Mit dieser Gleichung (6) wurden Ergebnisse von Haltezeitversuchen am 1.4948 bei 650°C nachgerechnet [5]. Wie aus Abb. 15 zu erkennen ist, ergibt sich -speziell für Haltezeiten von größer 10 Minuten- eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment. Auch die Rechnung zeigt, daß N_f nur noch geringfügig abfällt, wenn die Haltezeit deutlich verlängert wird. Bei 550°C - dem Übergang zwischen Hoch- und Tieftemperaturverhalten- ist für kleine Haltezeiten der Alpha-Wert relativ niedrig (0.08). Dies wird auch in einer verstärkten Abnahme von N_f bei kleinen Haltezeiten sichtbar. Für längere Haltezeiten erhöht sich der Wert der Konstanten Alpha auf etwa 0.15, da sich in diesem Fall der Spannungsabfall verstärkt. Wie die Abb. 16 zeigt, ändert sich bei diesem relativ kleinen Alpha-Wert die Bruchlastwechselzahl nicht mehr, wenn die Haltezeit 600 Minuten (10 Stunden) übersteigt. Experimente mit noch vertretbaren Versuchszeiten (bei 1% Gesamtdehnung) liegen allerdings nur bis Haltezeiten von 180 Minuten vor. Ein Vergleich zwischen Rechnung und Experiment zeigt, daß die LFR für kurze Haltezeiten zu hohe N_f -Werte vorhersagt. Dies hat seinen Grund darin, daß die LFR nur die Kriechschädigung berücksichtigt. Bei relativ kurzen Haltezeiten ist aber der Ermüdungsanteil noch relativ hoch, so daß sich im Experiment eine geringere Bruchlastwechselzahl als berechnet ergibt. Erst bei längeren Haltezeiten, wo die Ermüdungskomponente gegenüber dem Kriechschädigungsanteil relativ klein wird, kommt es zu einer besseren Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Werten.

3.3 Vergleich Experiment - Rechnung Haltezeitversuche Interatom

Aufgrund einer Vereinbarung zwischen Interatom und KfK [6] wurden die bei Interatom durchgeführten Haltezeitversuche [7] am Werkstoff 1.4948, Charge 402, mit Hilfe der LFR bei KfK nachgerechnet. Die zur Berechnung benötigten Daten basieren auf Zeitstandversuchen, die im IMF/II an der Charge 402 des Werkstoffes 1.4948 durchgeführt wurden [8]. Die im Experiment erzielten Bruchlastwechselzahlen und die berechneten N_f -Werte sind in Tabelle I dargestellt. Für Gesamtdehnungen von 0,4 bis 1% und Haltezeiten von 30 bis 360 Minuten zeigt sich auch bei dieser Charge eine sehr gute Übereinstimmung von Rechnung und Experiment.

Für eine Extrapolation zu langen Haltezeiten wurde in [9] die Relaxationskurve (10'001. Zyklus) eines rein zyklischen Versuchs mit 0,4% Gesamtdehnung verwendet, bei dem nach einer gewissen Zahl von Zyklen jeweils eine Haltezeit von 240 Stunden eingelegt wurde. Für verschiedene Extrapolationsmethoden wurden folgende Bruchlastwechselzahlen errechnet [9]:

Methode	N_f (berechnet)
"log N_f -log t_H "-Methode	2150
Strain range partitioning	960
Normalisierte Relaxationsspannung	930
Lineare Summenregel (ASME-Code)	890
Extrapolation über Zeitstandverhalten	330

Die zur Berechnung verwendete Relaxationskurve (Versuch 1791) ist in Abb. 17 aufgezeichnet [7]. Die Spannung zu Beginn der Haltezeit beträgt 172,6 MPa. Nach 240 Stunden ist ein Spannungsabfall von etwa 63 MPa auf 110,2 MPa erfolgt. Aufgrund dieser Werte ergibt sich für $t_H < 1036$ Minuten ein α -Wert von 0.028, für größere Zeiten steigt der Wert auf 0.15 an. Da α ein Maß für die Stärke der Relaxation ist, wird dieser Wert auch zwangsläufig größer, wenn mit zunehmender Relaxationszeit ein erhöhter Spannungsabfall zu beobachten ist. Die mit der LFR errechnete Bruchlastwechselzahl für die zuvor beschriebene Relaxationskurve liegt bei 1637 Lastwechseln. Legt man den nach der linearen Summenregel des ASME-Codes ermittelten N_f -Wert mit 890 Zyklen als den konservativsten Wert zugrunde [8], so liegt der nach der LFR ermittelte Wert noch innerhalb eines Streubandes von einem Faktor 2. Dies ist bei solchen Extrapolationsmethoden auch das übliche Streuband zwischen Rechnung und Experiment [9]. Ein Grund für den nach der LFR berechneten höheren N_f -Wert könnte die Tatsache sein, daß bei der LFR ein Werkstoff-Versagen angenommen wird, wenn das "Damage-Integral" (Gleichung 5) einen kritischen Wert von 1 angenommen hat. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die nach der linearen Summenregel berechnete Kriechschädigung D_C für längere Haltezeiten Werte von größer als 1 annimmt [6].

4. Literatur

- [1] M. Boček, A. Armas, D. Piel
Journal of Nuclear Materials 115, 1983, pp. 159-168
- [2] Y. Wada, I. Nihei, A. Yoshitoshi
Specialist's Meeting on Mechanical Properties of Structural Materials Including Environmental Effects, Chester, England, 10- 14.Oktober 1983, IWGFR 49, pp. 1009-1018.
- [3] D. S. Wood
CEC Study Contract on Relaxation Analysis, UKAEA Data on 316 SS, June 1985
- [4] B. G. M. Elens
TNO-Bericht 81M/35/0179/Elle/REV, Februar 1981.
- [5] M. Boček, C. Petersen, R. Schmitt
Specialist's Meeting on Mechanical Properties of Structural Materials Including Environmental Effects, Chester, England, 10-14.Oktober 1983, IWGFR 49, pp. 351-385
- [6] H. Breitling, Fa. Interatom, persönliche Mitteilung, 19.8.1985
- [7] H.P. Meurer, Fa. Interatom, persönliche Mitteilung, 4.10.1985
- [8] M. Schirra, B. Seith
KfK-Primärbericht, August 1983
- [9] H. P. Meurer, H. Breitling, E. D. Grosser
Nuclear Engineering and Design 83(1984), pp. 355-366
- [10] R. W. Weeks, D. R. Diercks, C. F. Cheng
Argonne National Laboratory, Argonne, ANL-8009, p.33, November 1973

Proben- nummer	Temperatur [°C]	Dehnungs- amplitude [%]	Halte- zeit [min]	N _f experi- mentell	N _f berech- net
1833	550	1.0	30	810	590
1668	550	1.0	120	710	828
1674	550	1.0	360	585	620
1825	550	0.6	30	3900	3880
1828	550	0.4	30	15500	14829

Tabelle I: Vergleich dehnungskontrollierter Haltezeitver-
suche [7] am Werkstoff 1.4948, Charge 402, mit
Lebensdauerberechnungen

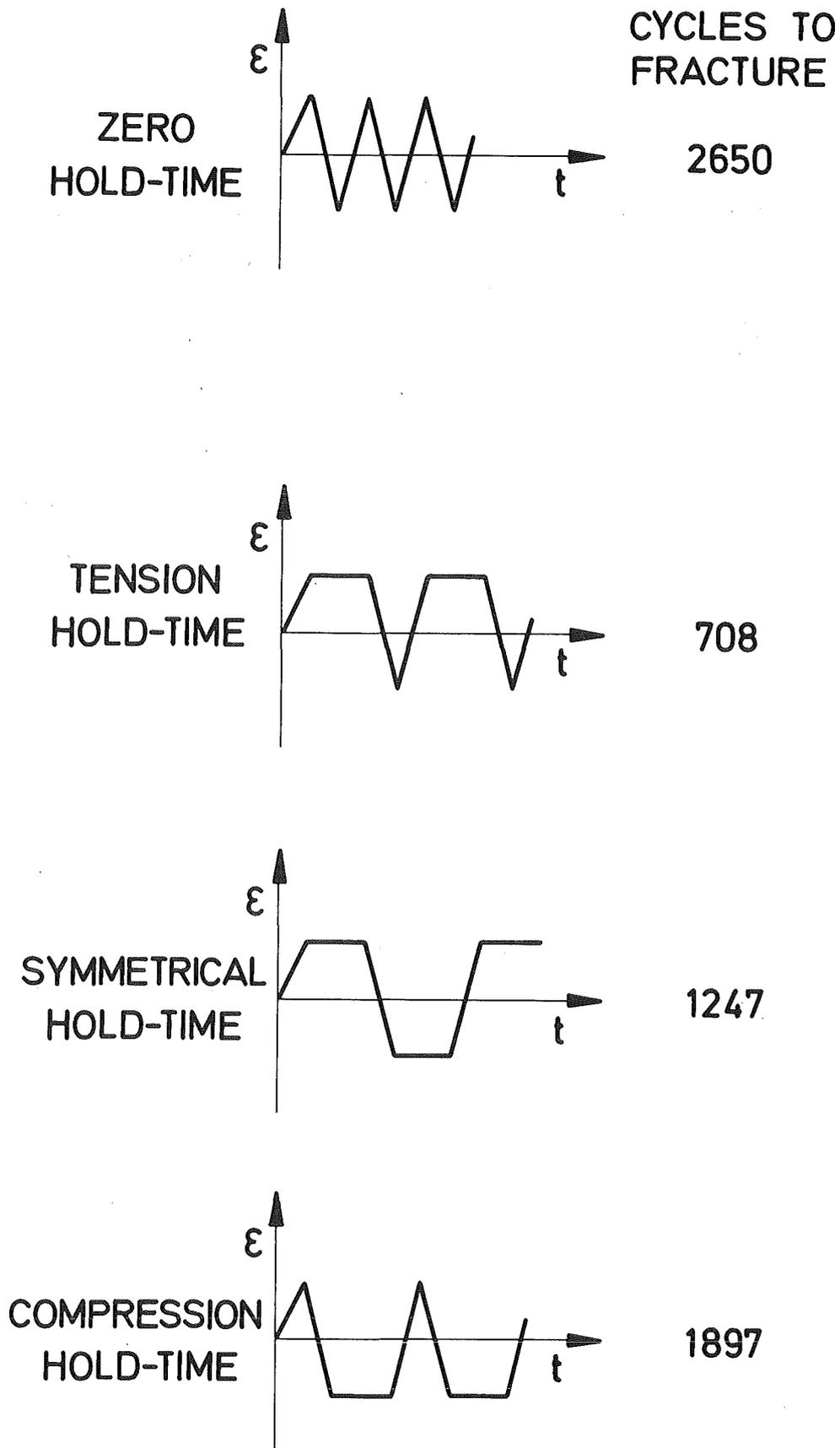


Abb. 1 Einfluß der Haltezeitart auf die Bruchlastwechselzahl des Werkstoffes 1.4948, $T=550^{\circ}\text{C}$, $\Delta\epsilon_t=1\%$, $\dot{\epsilon}=3 \cdot 10^{-3}/\text{s}$

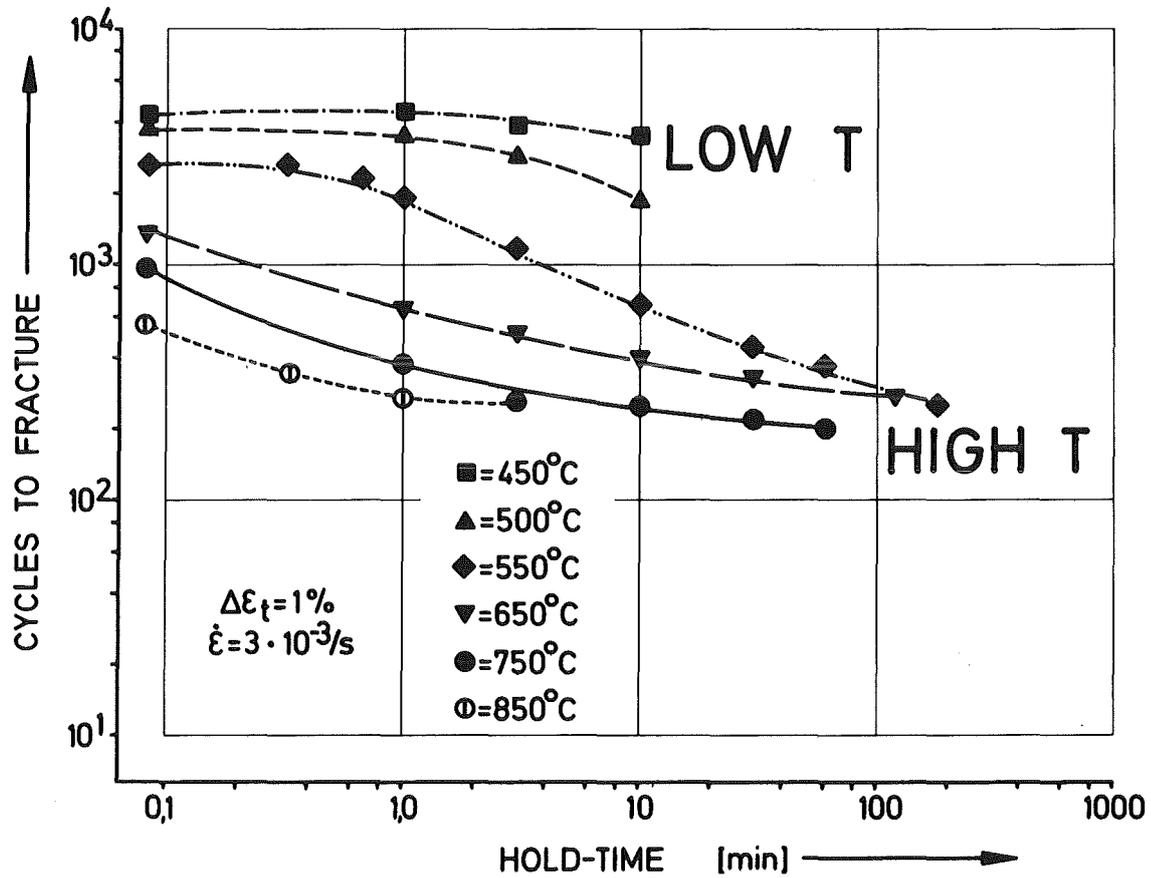


Abb. 2 Bruchlastwechselzahlen des Werkstoffes 1.4948 in Abhängigkeit von Temperatur und Haltezeit

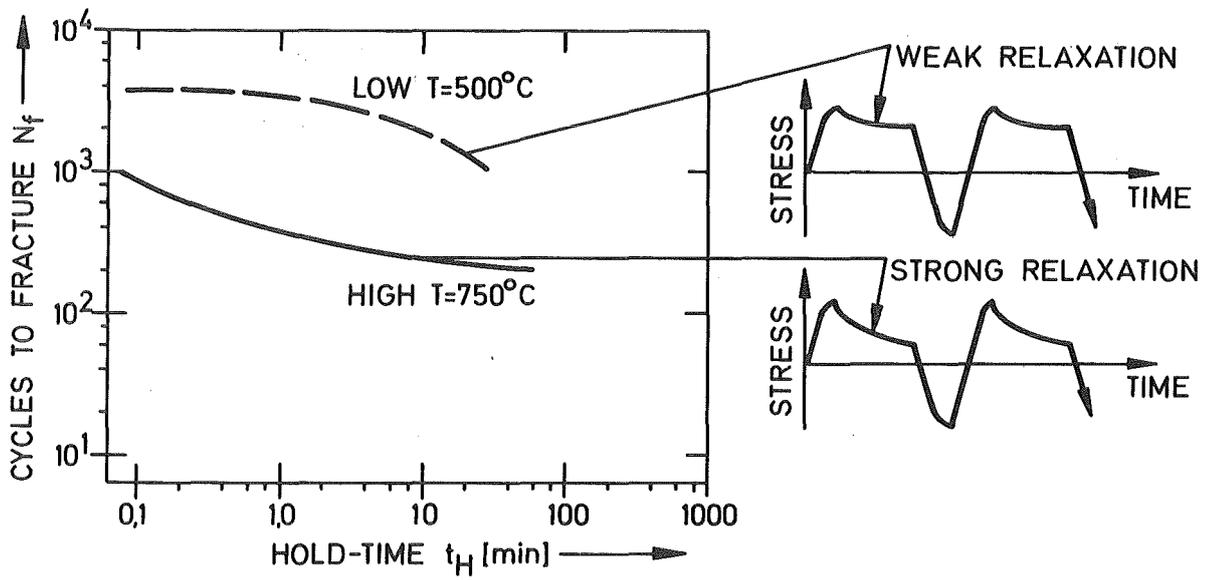


Abb. 3 N_f - t_H -Verlauf in Abhängigkeit von Temperatur und Relaxation

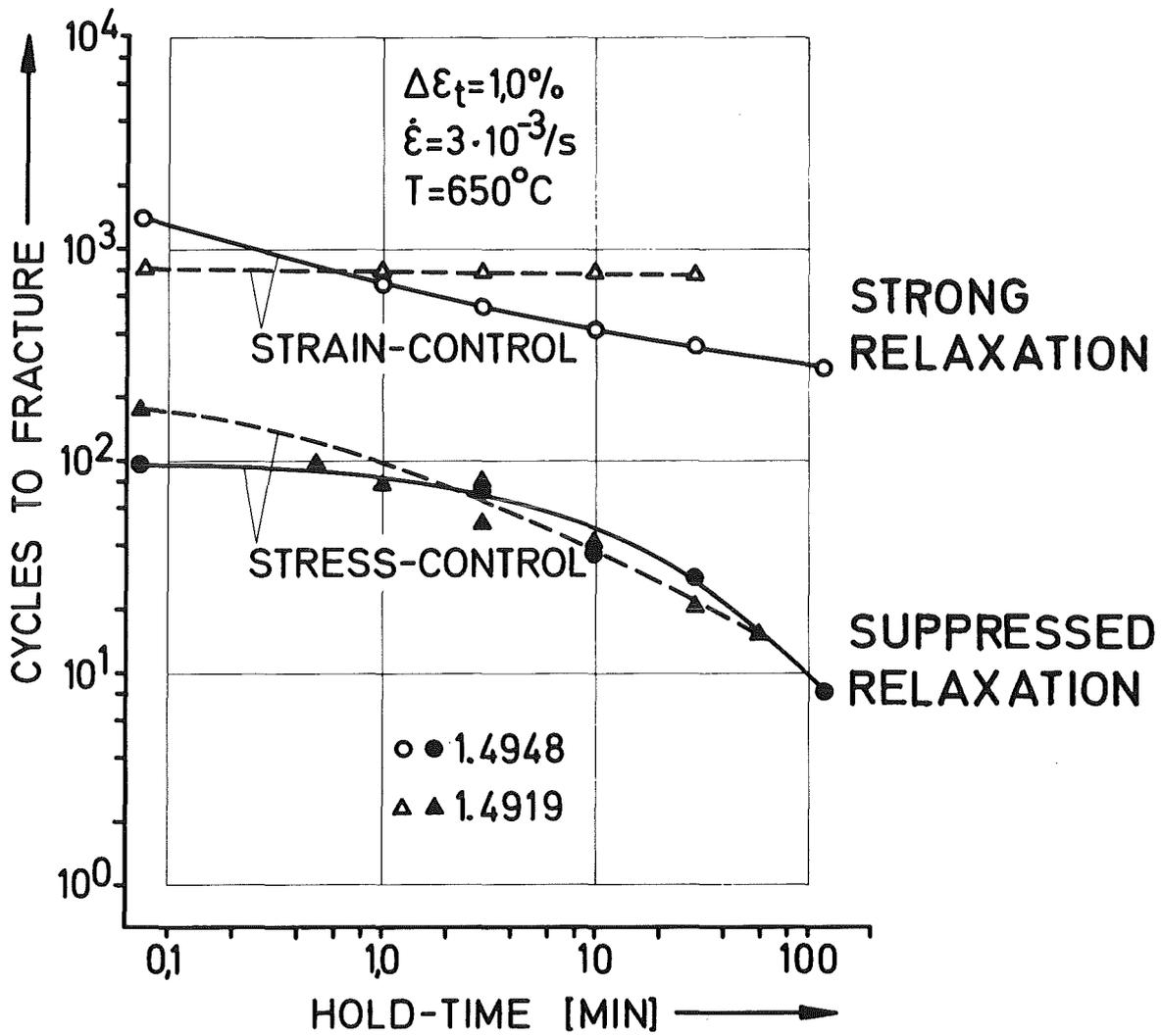


Abb. 4 Bruchlastwechselzahl in Abhängigkeit der Haltezeit für spannungs- und dehnungskontrollierte LCF-Versuche

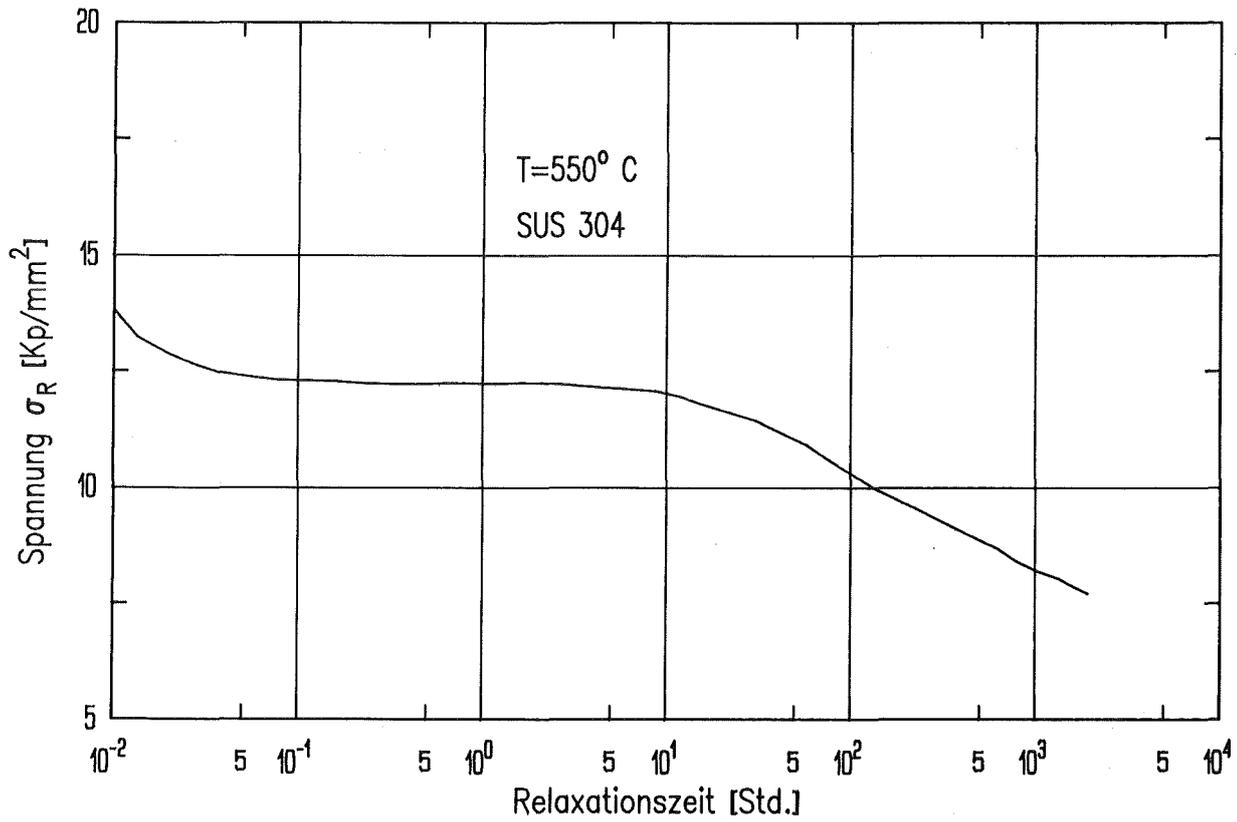


Abb. 5 Relaxationskurve des Werkstoffes SUS 304 [2],
 $t_r=2000$ h, $\epsilon_a=0,2\%$

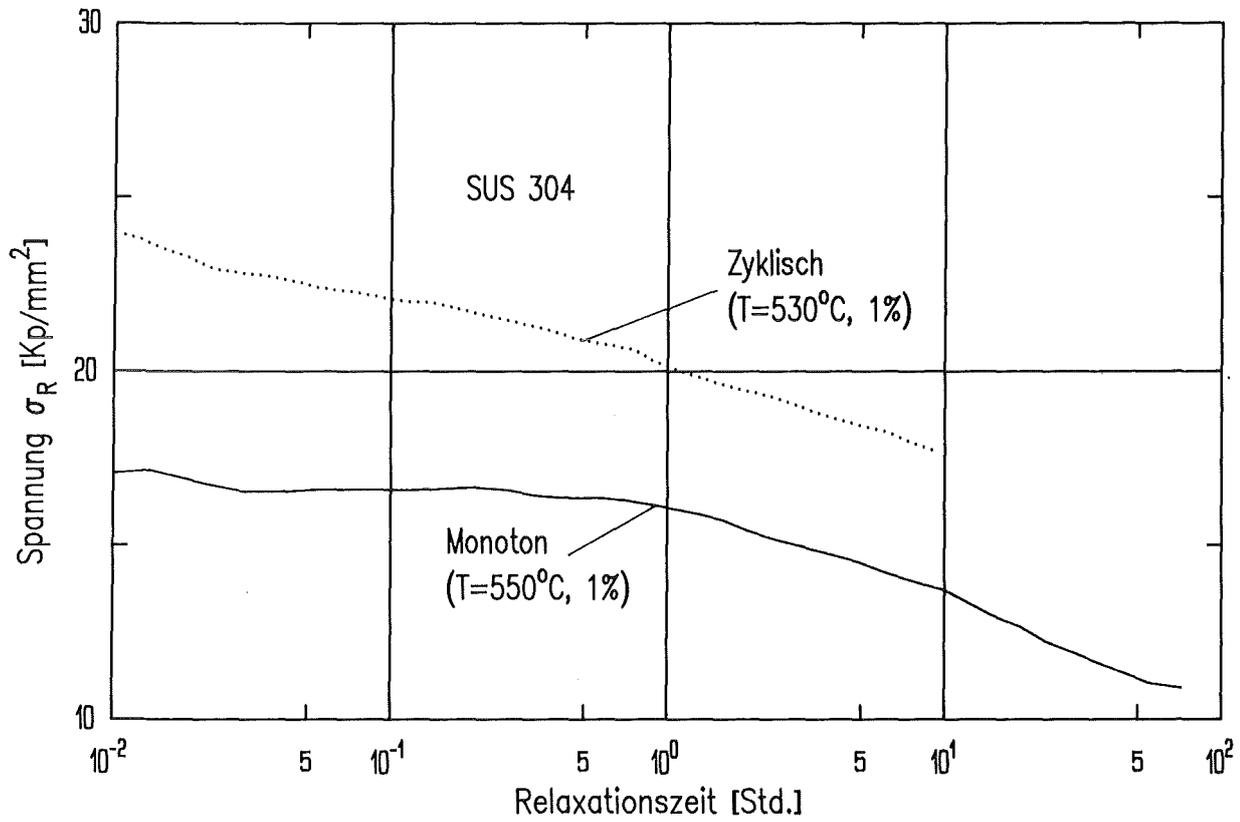


Abb. 6 Vergleich zyklischer und monotoner Relaxationskurven für SUS 304 [2]

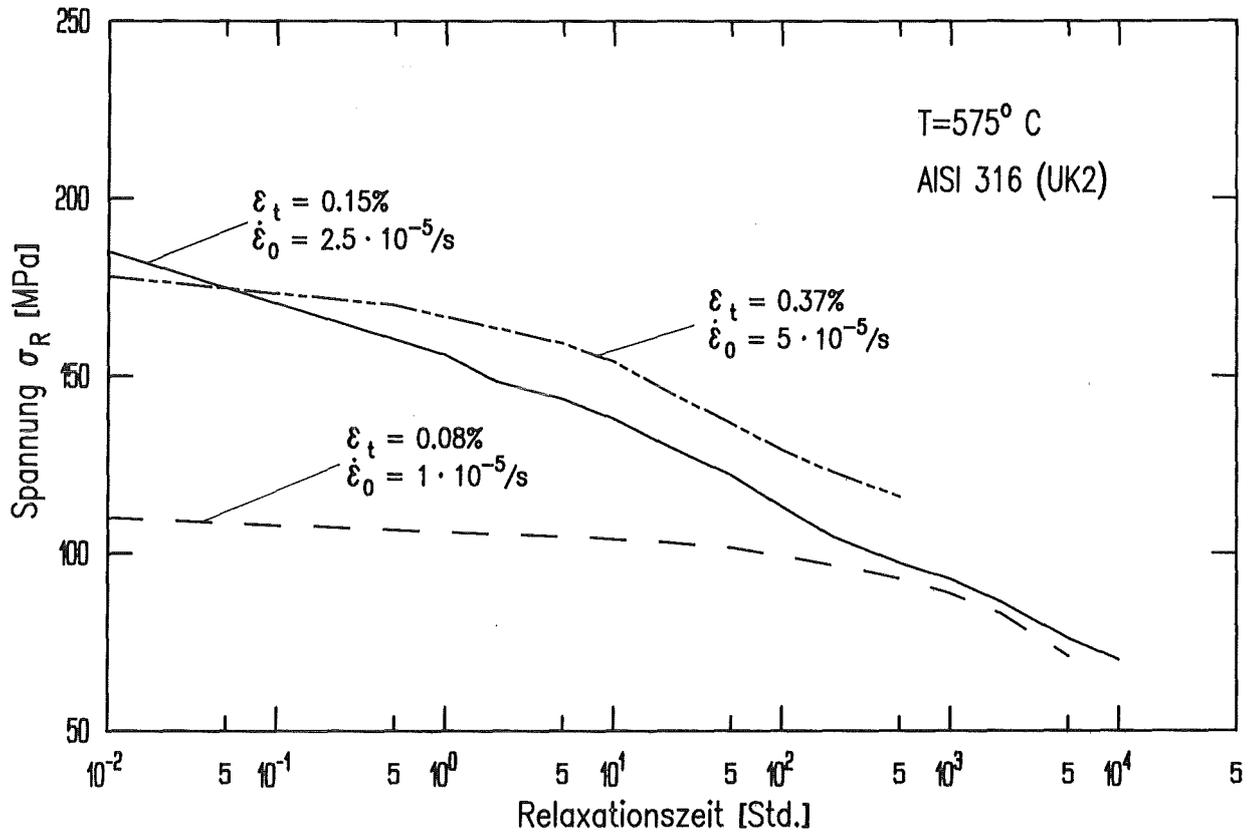


Abb. 7 Relaxationskurve des Werkstoffes AISI 316 (UK) [3]

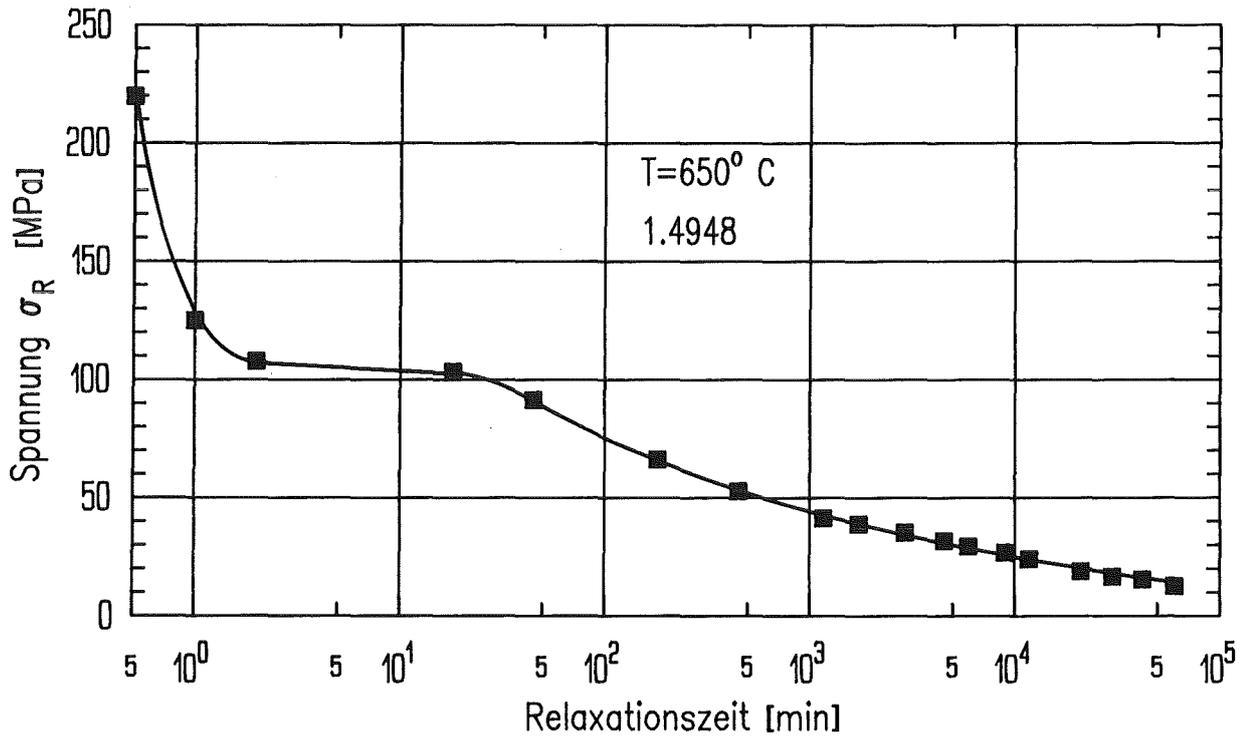


Abb. 8 Relaxationskurven des Werkstoffes 1.4948 [4],
 $t_r=1000$ h, $\epsilon_a=5,4\%$

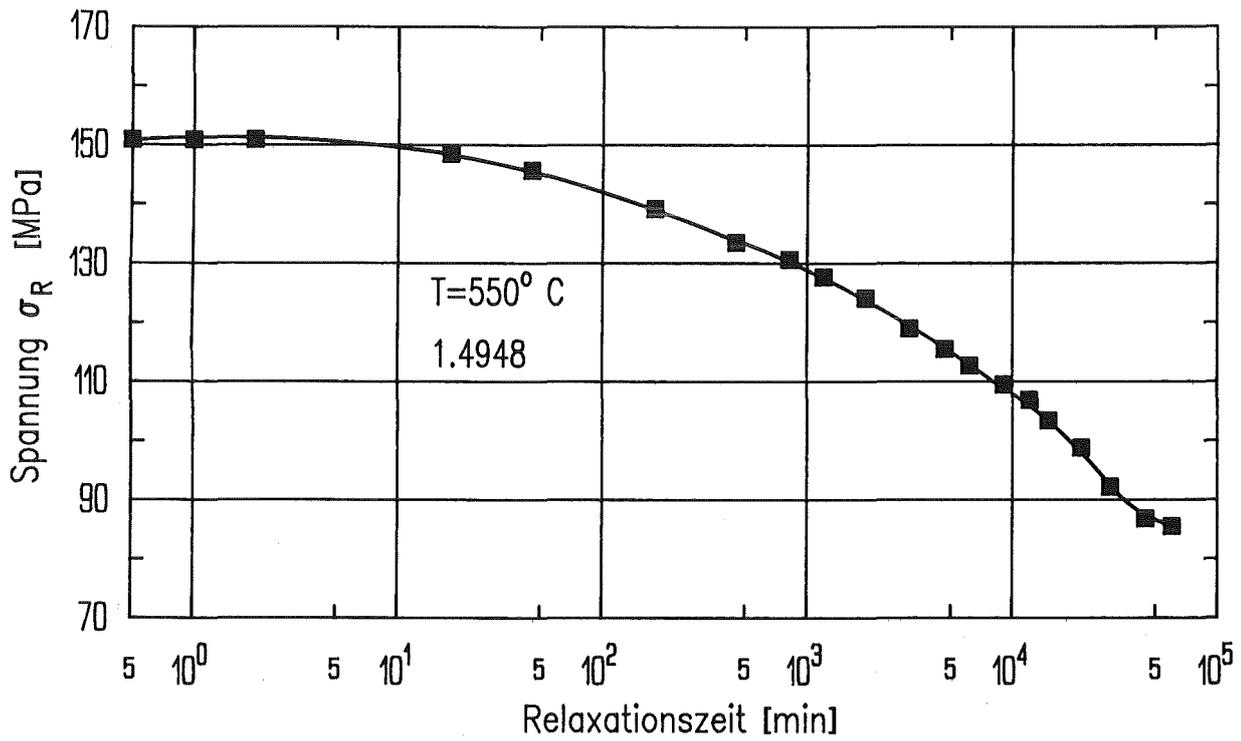


Abb. 9 Relaxationskurve des Werkstoffes 1.4948 [4],
 $t_r=1000$ h, $\epsilon_a=1,0\%$

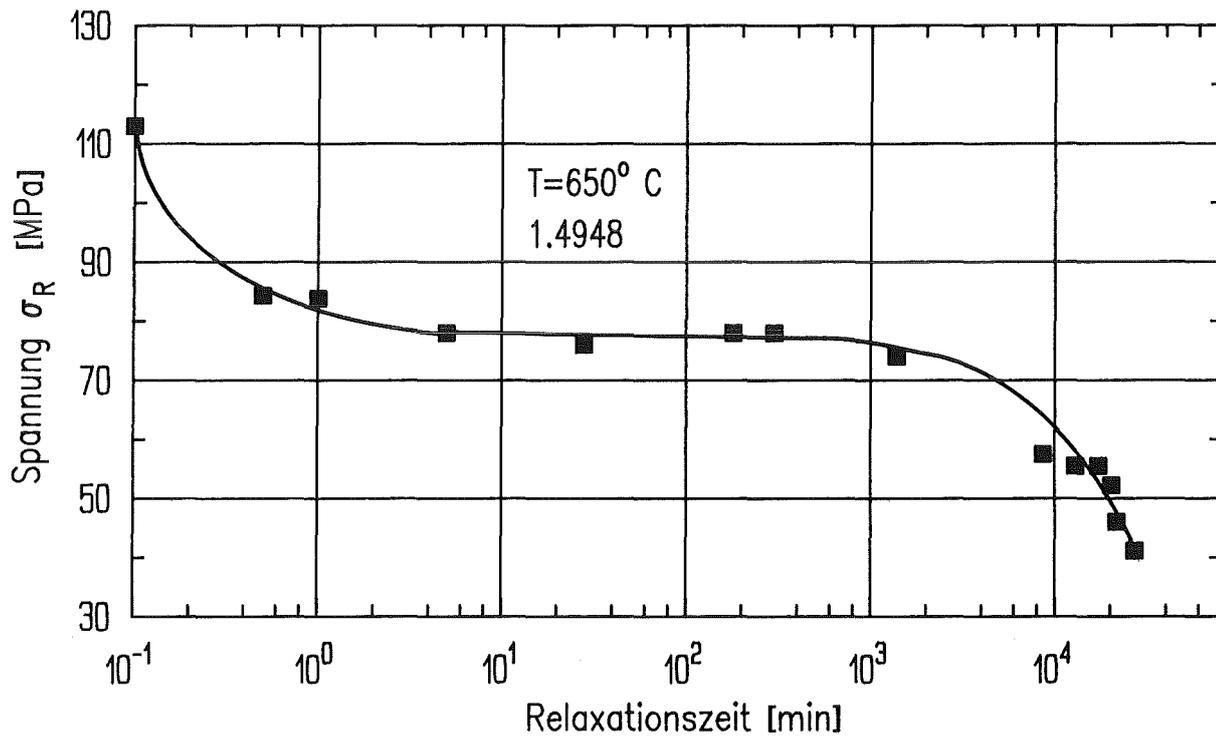


Abb. 10 Relaxationskurve des Werkstoffes 1.4948,
 $t_r=454$ h, $\epsilon_a=0,5\%$

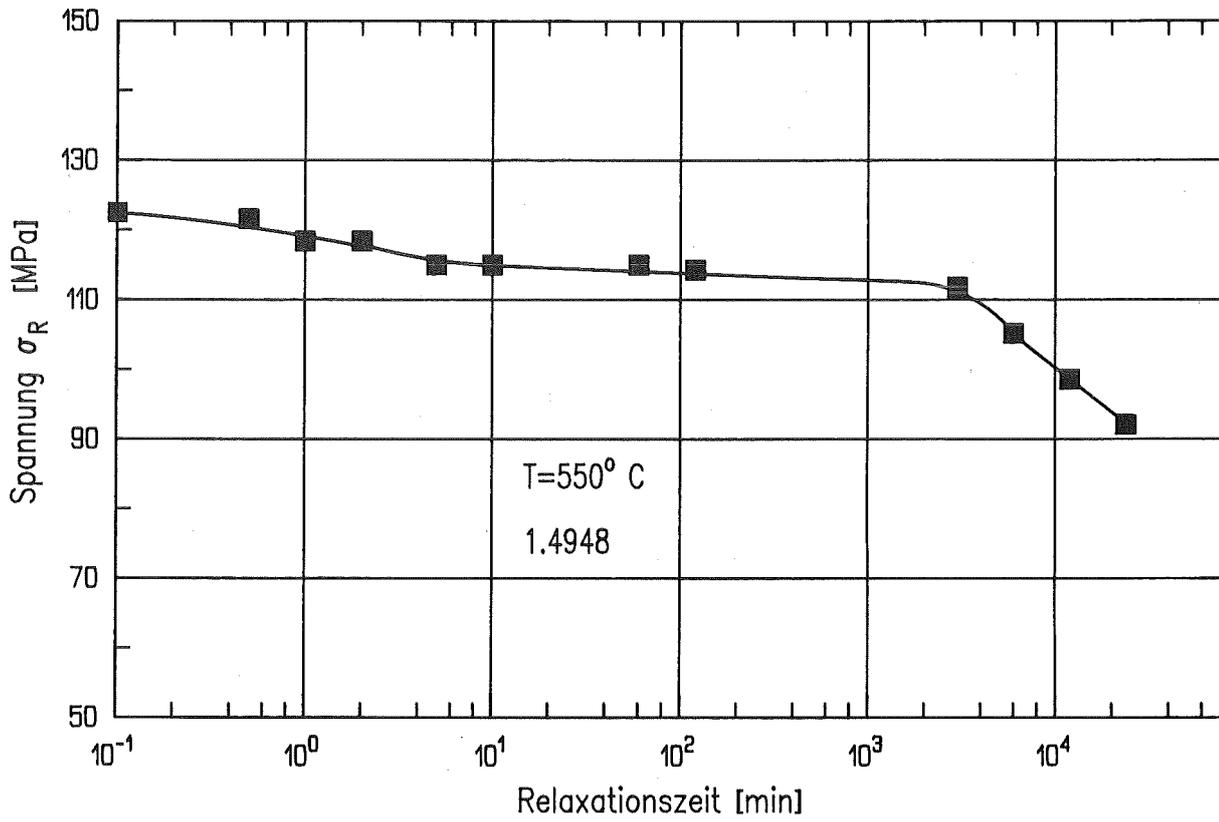


Abb. 11 Relaxationskurve des Werkstoffes 1.4948,
 $t_r=400$ h, $\epsilon_a=0,5\%$

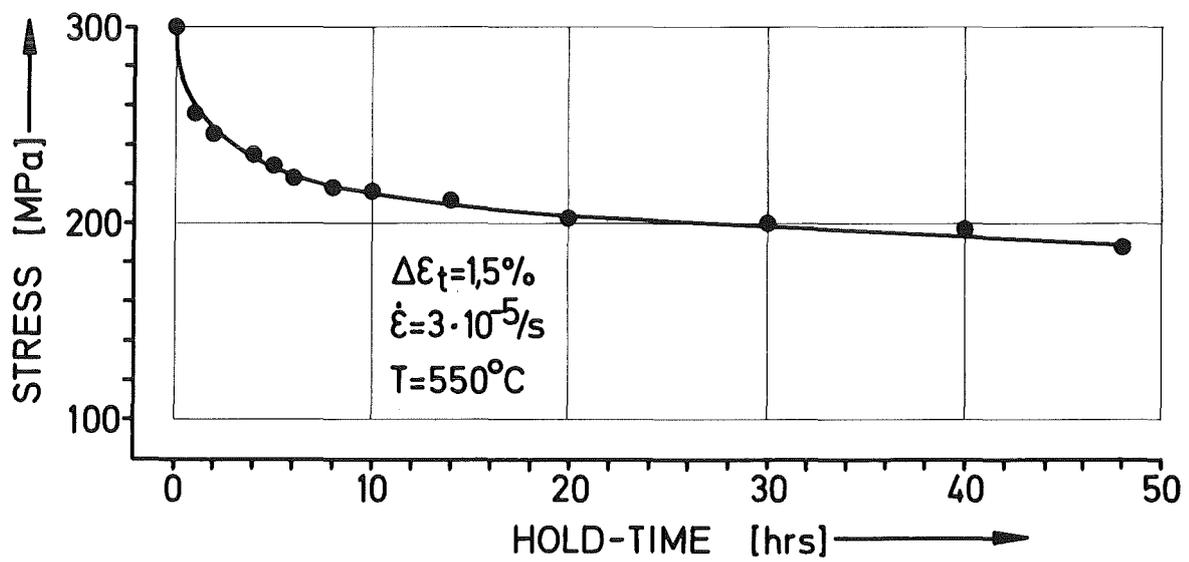


Abb. 12 Relaxationskurve des bestrahlten Werkstoffes 1.4948,
Dosis: $1,7 \cdot 10^{21}$ n/cm², $E > 0,1$ MeV

LIFE FRACTION RULE:

$$\int_{t=0}^t \frac{dt}{\tau(t)} \equiv q(t), \quad \bullet \text{ LFR} \quad (1)$$

• LIFE TIME FUNCTION:

$$\bullet \tau(t) \equiv t_f [\sigma(t)] = t_{f,0} (\sigma_0 / \sigma(t))^n, \quad (2)$$

• STRESS RELAXATION FUNCTION:

$$\bullet \frac{\sigma(0) - \sigma(t)}{\sigma(0)} \equiv \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma(0)} = \alpha \log(1 + tv^*), \quad (3)$$

Abb. 13 Gleichungen zur Berechnung der Lebensdauer (I)

LIFE TIME FUNCTION FOR STRESS RELAXATION:

$$\tau(t) = t_{f,0} \left(\sigma_0 / \sigma(0) \right)^n \cdot \left[1 - \alpha \log(1 + tv^+) \right]^{-n}$$

Choosing $\sigma_0 = \sigma(0)$

we have

$$\tau(t) = t_{f,0} \left[1 - \alpha \log(1 + tv^+) \right]^{-n} \quad (4)$$

DAMAGE INTEGRAL:

$$q(t_H) = \frac{1}{t_{f,0}} \int_0^{t_H} \left[1 - \alpha \log(1 + tv^+) \right]^n dt. \quad (5)$$

NUMBER OF "CYCLES" TO FAILURE:

$$N_f(t_H) = 1/q(t_H). \quad (6)$$

Abb. 14 Gleichungen zur Berechnung der Lebensdauer (II)

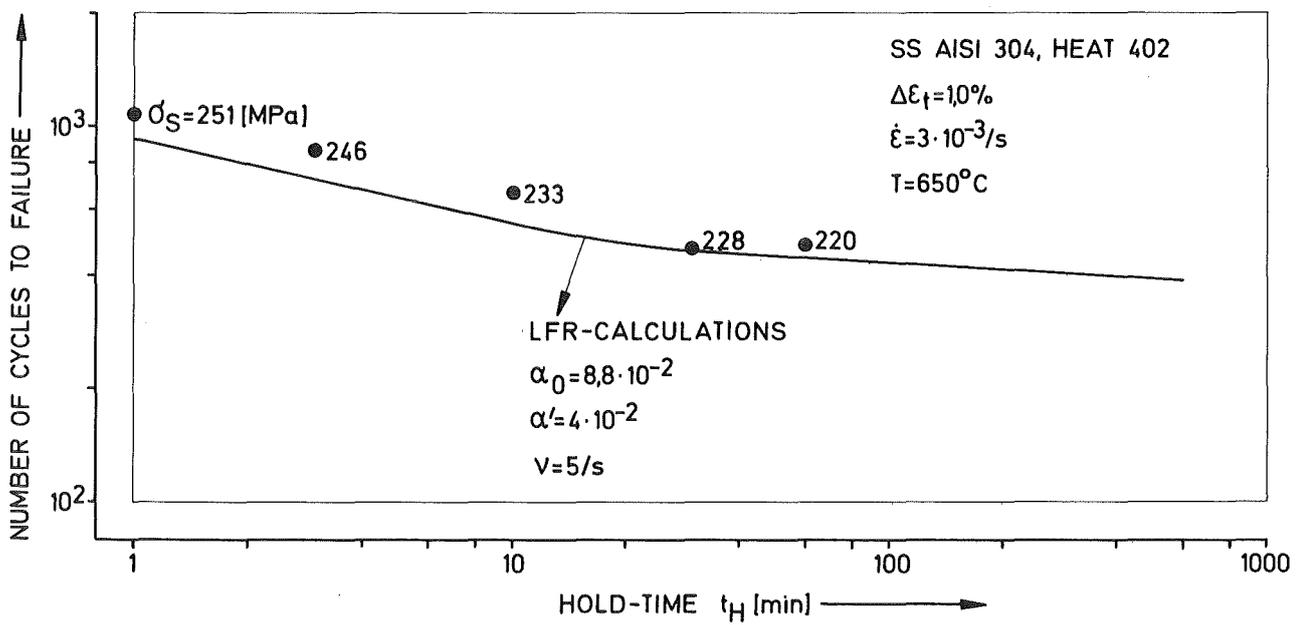


Abb. 15 Vergleich dehnungskontrollierter Haltezeitversuche am Werkstoff 1.4948, Charge 402, mit Lebensdauerberechnungen

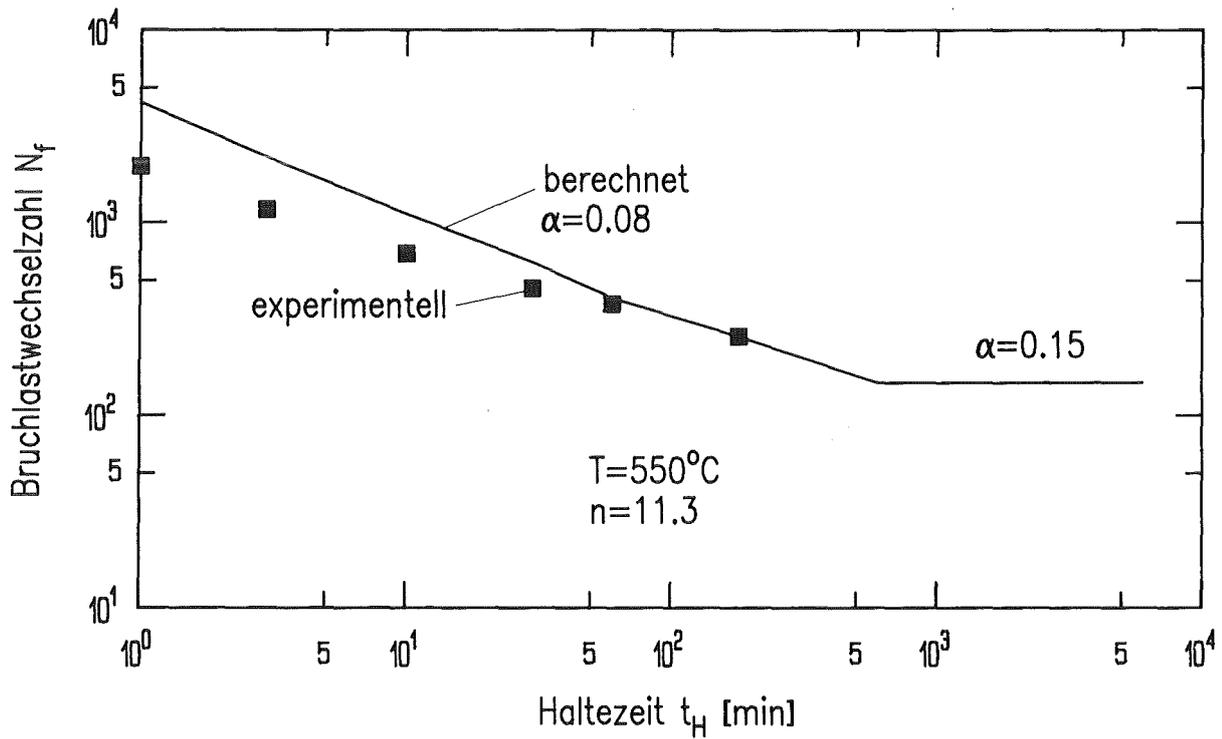


Abb. 16 Vergleich dehnungskontrollierter Haltezeitversuche am Werkstoff 1.4948, Charge 325, mit Lebensdauerberechnungen ($\Delta\epsilon_t=1,0\%$, $\dot{\epsilon}=3\cdot 10^{-3}/\text{s}$)

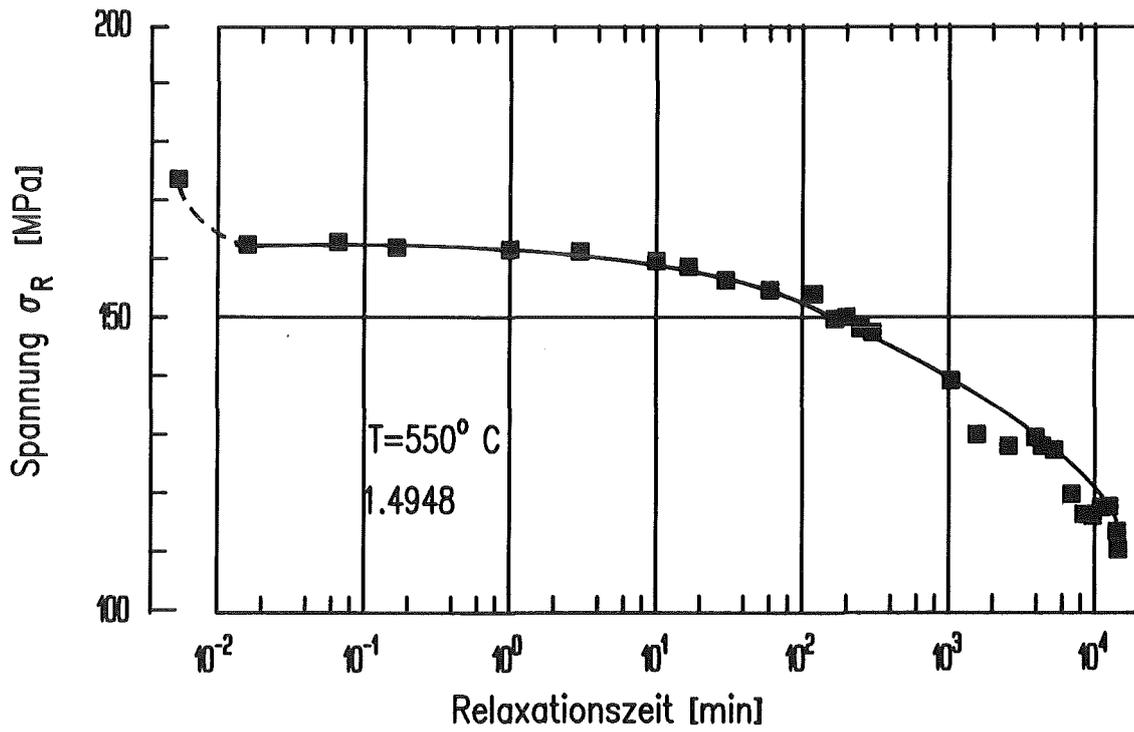


Abb. 17 Relaxationskurve des Werkstoffes 1.4948, Charge 402, $t_H=240$ h, Proben-Nummer: 1791 [7]