

# Ausgleichsrechnungen von Kriechversuchen warmfester Stähle

W. Seifert

## 1. Der Kriechversuch

Im **Zeitstandversuch** nach TGL 11 224 [1] werden Probestäbe mit konstanter Kraft bei erhöhter (konstanter) Temperatur bis zum Bruch geprüft. Temperatur und Nennspannung werden im Anwendungsbereich des Werkstoffes vorgegeben. Beim Versuch laufen zeitabhängige, irreversible Vorgänge im Material ab. Als Ergebnis der Zeitstandversuche werden Zeitstandfestigkeit, Zeitdehngrenze sowie weitere Werkstoffkennwerte bestimmt [2] und in TGL 38 571 [3] gesetzlich fixiert.

Wird beim Zeitstandversuch während der Beanspruchungsdauer auch zeitabhängig die Länge des Probestabes oder eines dauerhaft markierten Teiles (Meßlänge) bestimmt, so gilt er als **Kriechversuch**. Die Längenmessung kann im Ofen unter Belastung (ununterbrochener Versuch) oder im Labor nach Entlasten und Abkühlen (unterbrochener Versuch) durchgeführt werden. Das Belastungsregime und damit auch der Schädigungsvorgang beider Versuchsarten ist prinzipiell ungleichartig. Momentan werden die Ergebnisse gleichberechtigt ausgewertet, eine Grundsatzuntersuchung (nach TGL 11 224 besteht Kennzeichnungspflicht) steht noch aus.

Als Ergebnis des Kriechversuches sind für jeden Probestab (charakterisiert durch Werkstoff, Vorbehandlung, Temperatur und Nennspannung) Wertepaare  $\epsilon$ ,  $t$  verfügbar. Die Dehnung  $\epsilon$  wird nach der linearen Definition aus Ursprungslänge  $L_0$  und Länge  $L$  zum Zeitpunkt  $t$  seit Versuchsbeginn bestimmt:

$$\epsilon(t) = (L(t) - L_0) / L_0 \quad (1)$$

Kriechkurve  $\epsilon(t)$  und ihre Zeitableitungen (Kriechgeschwindigkeit, -beschleunigung)

$$\dot{\epsilon}(t) = d\epsilon(t)/dt, \quad \ddot{\epsilon}(t) = d^2\epsilon(t)/dt^2 \quad (2)$$

werden üblicherweise in 3 Bereiche (Bild 1) mit unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten unterteilt:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Primärkriechen, I,} \quad \ddot{\epsilon} < 0 \\ \text{Sekundärkriechen, II,} \quad \ddot{\epsilon} = 0 \\ \text{Tertiärkriechen, III,} \quad \ddot{\epsilon} > 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Unmittelbar vor dem Bruch können durch wesentliche Querschnittsänderungen (Einschnürung) deutlich steilere Verläufe auftreten, die u. U. beim Glätten der Ergebnisse unberücksichtigt bleiben müssen.

Wesentlich am Typ der Meßergebnisse ist, daß die Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  wegen ihrer geringen Größe ( $\approx 10^{-6}/h$ ) nicht direkt bestimmt werden kann. Sie muß durch Differenzenbildung oder Differentiation berechnet werden, wobei sich Meßfehler bzw. -unsicherheiten aufschaukeln.

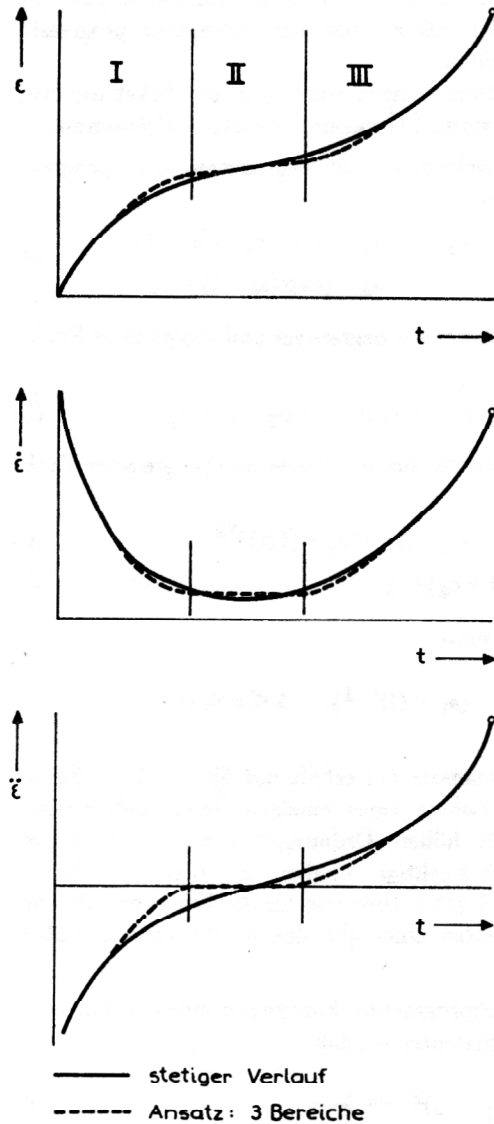


Bild 1  
Kriechkurve und Zeitableitungen

## 2. Ansätze

Das Einteilen der Kriechkurve in 3 Bereiche führt an den Bereichsgrenzen zu Problemen der Stetigkeit. Die Zeiten der Bereichsgrenzen (nur die stetige Kriechkurve kann gemessen werden) sind recht unsicher. Deshalb wird für die EDV-Auswertung dieses Konzept verlassen. Für die Kriechkurve werden stetige Ansätze  $\epsilon(t)$  vorgegeben. Die zeitabhängige Spannung (Querdehnung und insbesondere Einschnürung) müßte durch Korrekturterme berücksichtigt werden, deren Formulierung aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen versucht werden soll.

Diese Ansätze sollen das prinzipielle Ergebnis konventioneller Betrachtung (Sekundärkriechen) durch

- Wendepunkt der Kriechkurve
- Minimum der Geschwindigkeit
- Nulldurchgang der Beschleunigung

abbilden, also dem Sekundärkriechen die Zeitdauer  $\Delta t \rightarrow 0$  zuordnen. Bei flachem Minimum der Geschwindigkeit dürften die Meßergebnisse (linearer Teil oder Wendepunkt der Kriechkurve) mit der Meßgenauigkeit verträglich gleichberechtigt interpretierbar sein. Die Ansätze  $\epsilon(t)$  müssen also degressive und progressive Terme enthalten.

Aus Voruntersuchungen wurden in das Paket der Ausgleichsprogramme [4] folgende Ansätze aufgenommen:

- Exponentialsumme mit degressivem und progressivem Glied:

$$\bar{\epsilon}_1 = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot (1 - \exp(-a_5 \cdot t)) + a_4 \cdot (\exp(a_6 \cdot t) - 1) \quad (4)$$

- Produktansatz aus degressiver und progressiver Funktion

$$\bar{\epsilon}_2 = (t/t_0)^{b_3} \cdot \exp(b_1 + b_2 \cdot t) + b_4 \quad (5)$$

- Summenansatz aus degressiver und progressiver Funktion

$$\bar{\epsilon}_3 = c_1 \cdot \ln(f(t)) + c_2 \cdot (f(t))^{c_3} \quad (6)$$

$$f(t) = (t + c_4)/c_5$$

- Polynomansatz

$$\bar{\epsilon}_4 = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot (t)^{i-1}), \quad 4 \leq n \leq 10 \quad (7)$$

Der Polynomansatz (7) erfüllt nur für  $n = 4$  die Forderung der Existenz eines einzigen Geschwindigkeitsextrimums, für höhere Ordnungen müssen Zusatzbedingungen berücksichtigt werden. Er dient Vergleichszwecken und sollte Hinweise für die Funktion der Taylor-Koeffizienten eines globalen nichtlinearen Ansatzes liefern.

Die Ausgleichsprogramme korrigieren einen Anfangsvektor der Koeffizienten so, daß

$$\phi = \sum_{ij=1}^m (\epsilon_j - \bar{\epsilon}_j)^2 \rightarrow \text{Min} \quad (8)$$

strebt.

Wegen der endlichen Korrekturschrittzahl und der Genauigkeit der Zahlendarstellung im Rechner sind verschiedene Algorithmen zum Aufbau des Anfangsvektors und dessen Korrektur aktivierbar. Aus den Ergebnissen von Variantenrechnungen wird die jeweilige „Bestlösung“ des Versuches bestimmt, die Zusatzbedingungen erfüllen und mit der Meßgenauigkeit verträglich sein muß.

### 3. Datensätze

Die Meßwerte (Datenpaare  $\epsilon, t$  der Probestäbe) sind den Protokollen der Prüflabors entnommen, eigene Versuche existieren nicht. Es werden nur Standardversuche nach TGL 11 224 [1] berücksichtigt. Die Anzahl der Meß-

punkte muß mindestens der Anzahl der freien Koeffizienten des Ansatzes gleich sein. Datensätze mit groben „Ausreißern“, unstetigem Dehnungsverlauf (Rück-Kriechen) oder vielen gleichen Dehnungswerten wurden ausgeschlossen. Alle Versuchsergebnisse entstammen Routineuntersuchungen mit standardisierten Werkstoffen; Legierungsanteile und Wärmebehandlung der einzelnen Chargen streuen innerhalb der zulässigen Schranken.

In den Datensätzen sind 15 verschiedene warmfeste Werkstoffe enthalten. Die 105 Chargen verteilen sich auf 2 bis 21 je Werkstoff. Die Anzahl der Proben schwankt zwischen 14 und 99 für den Einzelwerkstoff, ihre Gesamtzahl beträgt 790.

Die Belastung hängt vom Anwendungsbereich des Werkstoffes ab. Die Nennspannungen liegen zwischen 30 und 440 MPa, wobei sehr viele Einzelwerte auftreten. Die Prüftemperaturen betragen 400 bis 700 °C, es wurden 2 bis 6 Temperatur-Stufen pro Werkstoff untersucht. Einzelheiten zur Datenherkunft und zur Parameter-Verteilung sind in [5] zusammengefaßt.

### 4. Globale Ergebnisse

Von den 790 Probestäben ergaben nur 496 gültige Lösungen (keine negative Geschwindigkeit, kein Geschwindigkeitsmaximum im Meßbereich) mit kubischen Parabeln.

Für die nichtlinearen Ansätze (4) bis (6) sind schärfere Nebenbedingungen gesetzt:

- Existenz eines Geschwindigkeitsminimums bei positiver Zeit mit positiver Dehnung und Geschwindigkeit
- Fehlerquadrat  $\phi$  (8) und Minimal-Geschwindigkeit kleiner als nach linearem Ansatz

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 + \dot{\epsilon}_m \cdot t. \quad (9)$$

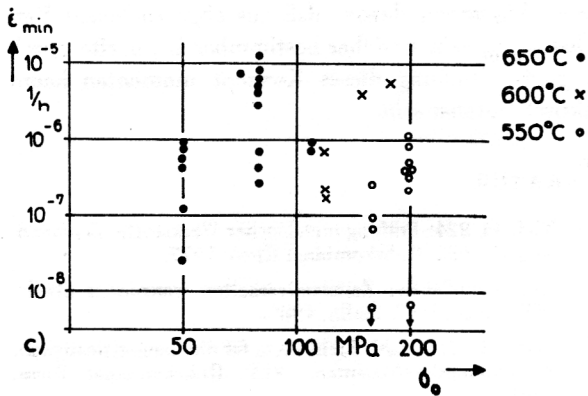
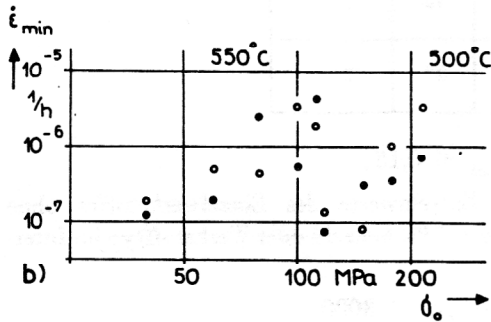
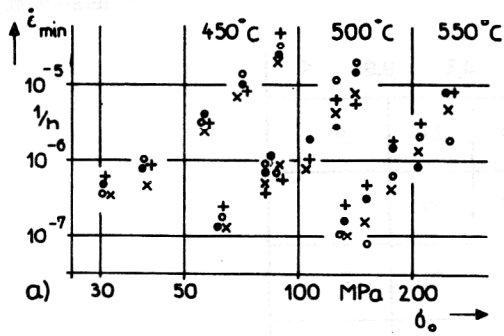
In Tabelle 1 ist summarisch die Lösungsmenge der bisherigen Rechnungen mit den nichtlinearen Ansätzen zusammengefaßt. Hier und im folgenden sind die seit der Auswertung [5] erreichten besseren Ergebnisse mit berücksichtigt. Die Anzahl der möglichen Lösungen hängt von der Zahl der freien Koeffizienten ab. Die Mehrzahl der Datensätze ergab gültige Lösungen, wozu häufig Sonderalgorithmen des Programmes eingesetzt werden mußten. Lediglich 2 Datensätze konnten bisher noch nicht gelöst werden. Die besten Lösungen (kleinstes  $\phi$ ) wurden überwiegend aus dem Ansatz (4) mit 6 freien Koeffizienten erreicht, oft brachten aber auch Ansätze mit weniger freien Koeffizienten deutlich bessere Lösungen.

Alle folgenden Aussagen beziehen sich auf die jeweiligen Bestlösungen der einzelnen Probestäbe.

Die diskutierten Einflüsse der Lastparameter Nennspannung  $\sigma_0$  und Temperatur T sind für die einzelnen Werk-

Tabelle 1  
Lösungen der Ansätze

Ansatz	möglich	gültig	beste
(5)	790	750	57
(6)	784	772	125
(4)	754	715	606



**Bild 2**  
minimale Kriechgeschwindigkeit  
a) St 52-3, Symbole Chargen  
b) 15 ChM, Symbole Chargen  
c) X 8 Cr Ni Mo Ti, 9 Chargen

stoffe recht unterschiedlich ausgeprägt. Bei einigen Werkstoffen sind die Ergebnisse temperaturabhängig deutlich getrennt, und die Abhängigkeit von der Nennspannung zeigt eine klare Tendenz.

Bei anderen Werkstoffen überschneiden sich die Temperaturbereiche und/oder die Streuung bei fester Nennspannung ist von ähnlicher Größenordnung wie die Gesamtstreuung.

Mitunter ordnen sich die Ergebnisse der Einzelcharge recht gut, während die Aussage für den Werkstoff unsicher wird:

Die nach den Werkstoffstandards zulässigen Schranken der Legierungsbestandteile und der Wärmebehandlung können zu deutlich unterschiedlichem Kriechverhalten führen!

Die minimale Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{\min}$  wächst mit den Belastungsparametern. Der Norton'sche Ansatz für den Spannungseinfluss

$$\dot{\epsilon}_{\min} = \hat{\epsilon}_{\min} \cdot (\sigma_o / \hat{\sigma}_o)^N \quad (10)$$

repräsentiert die Ergebnisse recht gut. Bild 2 zeigt einige Beispiele.

Für eine Bezugsspannung  $\hat{\sigma}_o = 100 \text{ MPa}$ , die nicht für alle Werkstoffe im Anwendungsbereich liegt, ergibt sich die Bezugsgeschwindigkeit

$$\approx 10^{-16} / \text{h} \leq \hat{\epsilon}_{\min} \leq 4 \cdot 10^{-3} / \text{h}.$$

Sie steigt sehr stark mit der Temperatur, der Exponent  $N$  sinkt mit der Temperatur. Einige (grafisch ausgeglichene) Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Einfluss von Ansatz-Gleichung und Anzahl der Meßpunkte ist kaum bemerkbar.

**Tabelle 2**  
Koeffizienten des Norton-Ansatzes

Werkstoff	T	$\hat{\epsilon}_{\min}$	N
	°C	$10^{-6} / \text{h}$	
Stahl 20	420	0,06	12,5
	450	5	7,5
	500	10	5,5
St 52-3	400	0,02	6
	450	2	5
	500	40	4
13 CrMo 4.4	500	0,025	7
	550	10	5
15 ChM	500	0,02	5,5
	550	1,6	3,5
21 CrVMoW 11	500	(0,0001)	(8)
	525	0 002	8
	550	0,15	3
	575	0,8	2,7
X8 CrNiMo Ti 18.11	550	(0,01)	(5)
	600	(0,2)	(5)
	650	8	5
X10 NiCr WTi 36.15	550	$10^{-10}$	20
	600	$10^{-5}$	12
	650	0,06	4,5
	700	1,2	4,5

Die Zeit des Geschwindigkeitsminimums  $t(\dot{\epsilon}_{\min})$  sinkt mit den Belastungsparametern. Analog zu (10) läßt sich formulieren

$$t(\dot{\epsilon}_{\min}) = \hat{t} \cdot (\hat{\sigma}_o / \sigma_o)^M.$$

Die Bezugszeit  $\hat{t}$  sinkt stark mit der Temperatur, der Exponent  $M (> 0)$  wird von der Temperatur wenig beeinflusst.

Wegen der größeren Streuung wird vorerst auf Zahlenangaben verzichtet. Die verschiedenen Ansätze ergeben deutlich unterschiedliche Zeiten, was wohl auf prinzipiell unterschiedlicher „Steilheit“ der Abbildung des Geschwindigkeitsminimums beruht.

Bei Bezug auf die Maximalzeit des Datensatzes  $t_{\max}$ , die nicht immer mit der Bruchzeit identisch ist, ergibt sich kein ausgeprägter Einfluss der Lastparameter. In Tabelle 3 ist für jeweils etwa 100 Probestäbe (lediglich unter „niedriglegiert“ sind 270 zusammengefasst) der Anteil der relativen Zeiten innerhalb grober Intervalle zusam-

Tabelle 3  
 $t(\dot{\epsilon}_{\min})/t_{\max}$

Anteil in % im Intervall

Werkstoff-Typ	> 1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,01	<
unlegiert	11	13	7	35	13	17	4
niedriglegiert	3	4	22	35	10	20	6
24 CrMo V 5.5	2	6	20	24	17	24	7
X22CrMo V 12.1	10	8	24	34	10	12	2
Austenit	4	4	8	22	27	33	2

mengefaßt. Das Geschwindigkeitsminimum wird überwiegend bei weniger als 40 % der Standzeit (bei den Austeniten noch früher) erreicht:

der Beginn des Anstieges der Kriechgeschwindigkeit muß noch nicht das Erreichen der Lebensdauer signalisieren.

Das Beschränken des Kriechgesetzes auf Primärkriechen sinkender Geschwindigkeit ist für metallische Werkstoffe überwiegend nicht gerechtfertigt.

Die Dehnung beim Geschwindigkeitsminimum  $\epsilon(\dot{\epsilon}_{\min})$  zeigt, sofern überhaupt Tendenzen erkennbar sind, einen äußerst uneinheitlichen Einfluß der Lastparameter. Mit der Nennspannung kann die Dehnung schwach sinken oder stark wachsen, der Temperatureinfluß kann synchron oder entgegengesetzt wirken.

Die Extrapolation des Sekundärkriechens auf Maximalzeit ([6], Abs. 3)

$$\epsilon_1 = \epsilon(\dot{\epsilon}_{\min}) + \dot{\epsilon}_{\min} \cdot (t_{\max} - t(\dot{\epsilon}_{\min})) \quad (11)$$

soll eine Aussage über maximal zulässige Dehnung bei quasistatischer Belastung gestatten. Dieser Kennwert wurde überwiegend (90 % der ausgewerteten Proben) im Bereich

$$0,2\% \leq \epsilon_1 \leq 10\%$$

mit starker Konzentration (60 % der Proben) im Intervall

$$1\% \leq \epsilon_1 \leq 5\%$$

ermittelt. Die unlegierten Stähle ergeben relativ hohe, der Werkstoff X22 Cr Mo V 12.1 und die Austenite relativ niedrige Werte für  $\epsilon_1$ .

Der Schluß von der minimalen Kriechgeschwindigkeit auf die Standzeit

$$\dot{\epsilon}_{\min} \cdot t_{\max} = K, \quad (12)$$

wobei K dem Dehnungswachs während der Lebensdauer bei konstanter Minimalgeschwindigkeit entspräche, konnte nicht bestätigt werden. K steigt überwiegend mit der Temperatur, der Einfluß der Nennspannung ist werkstoffabhängig. Die bisher ausgewerteten Rechnungen ergaben

$$10^{-8} < K < 0,3.$$

Die Mittelwerte der Werkstoffe liegen (ohne Orientierung auf den Werkstoff-Typ) im Bereich

$$0,003 \leq K_m \leq 0,15,$$

wobei die Extremwerte des Einzelwerkstoffes ohne Orientierung auf Probenzahl oder Werkstofftyp im Intervall

$$3 \leq K_{\max}/K_{\min} \leq 3000$$

liegen. Abgesehen davon, daß aus abgebrochenen Versuchen  $\dot{\epsilon}_{\min}$  sehr unsicher bestimmbar ist, dürfte durch die große Streuung dieses Konzept momentan kaum praktisch nutzbar sein.

#### LITERATUR

- [1] TGL 11 224: Prüfung metallischer Werkstoffe. Zeitstandversuch. VEB Rohrkombinat Riesa, 1977.
- [2] Autorenkollektiv: Zeitstandverhalten warmfester Stähle. MWG in der KdT, Berlin, 1980.
- [3] TGL 38 571: Stahl, Richtwerte für die Langzeitfestigkeit, Berechnungskoeffizienten. VEB Rohrkombinat Riesa, 1985.
- [4] Göldner, H.; Seifert, W.: Ausgleich von Meßwerten der Kriechdehnung. Programmbeschreibung, TU Dresden, Sektion 13, HFR FKM, 1983.
- [5] Göldner, H.; Seifert, W.: Auswertung von Kriechkurven. Arbeitsbericht, TU Dresden, Sektion 13, HFR FKM, 1984.
- [6] Sähn, S.: Ein Beitrag zum Bruchverhalten von Konstruktionswerkstoffen. Dissertation B, TU Dresden, Sektion 13, 1981.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. W. Seifert  
 Technische Universität Dresden  
 Sektion Grundlagen des Maschinenwesens  
 Mommsenstr. 13  
 Dresden  
 8027