

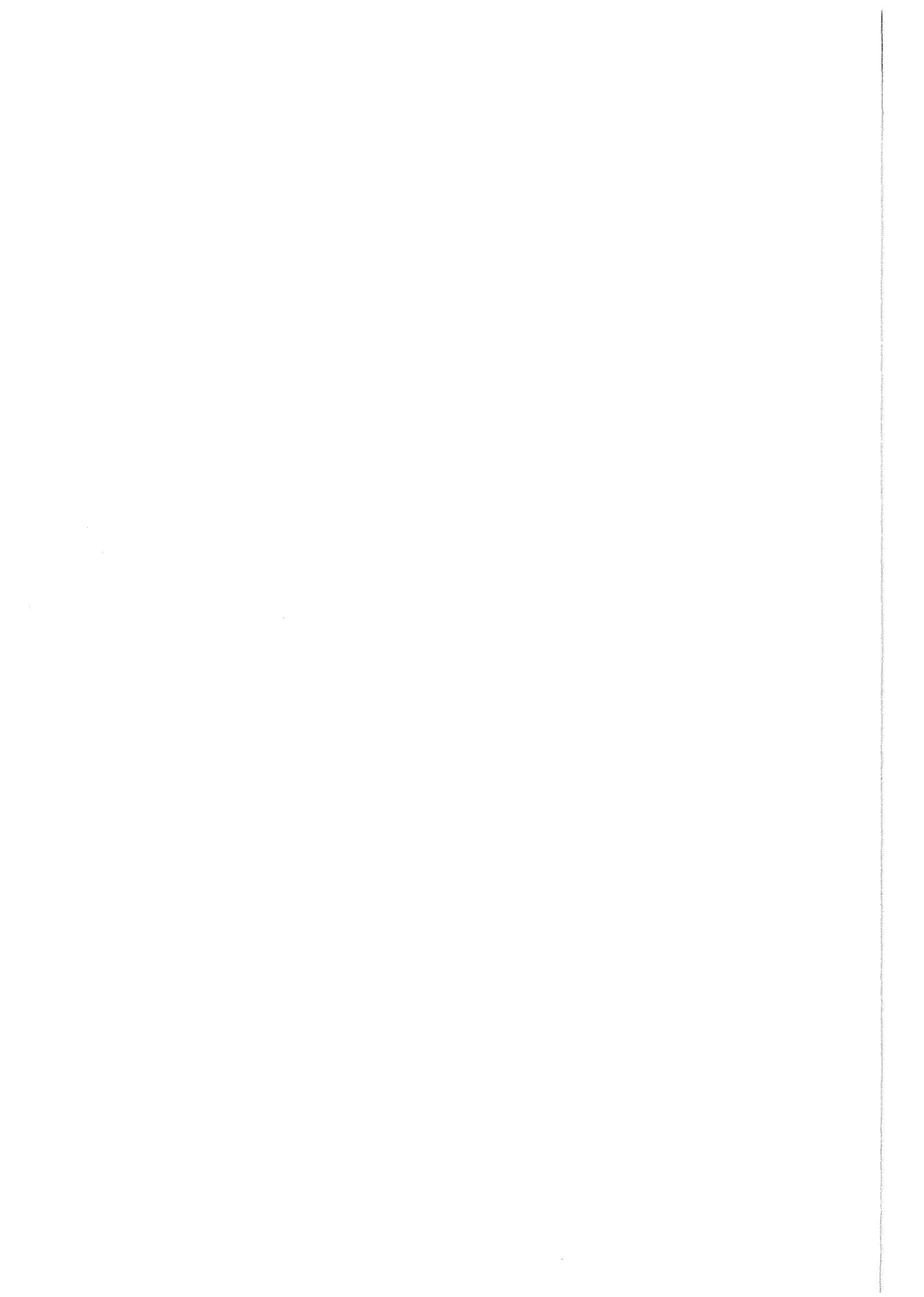
Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5676

Experimentelle Ermittlung der Gleichgewichtsspannung bei viskoplastischen Materialien

S. Erlenmaier, Ch. Tsakmakis
Institut für Materialforschung

Oktober 1996



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5676

**Experimentelle Ermittlung der
Gleichgewichtsspannung bei viskoplastischen
Materialien**

S. Erlenmaier
Ch. Tsakmakis
Institut für Materialforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1996

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Kurzfassung

Im vorliegenden Bericht werden eindimensionale Betrachtungen zweier Viskoplastizitätsmodelle mit unterschiedlich definierten Überspannungen diskutiert. Die jeweilige Gleichgewichtsspannung ergibt sich beim ersten Modell als ein geschwindigkeitsunabhängiges Funktional vom Plastizitätstyp, wobei die momentane Gleichgewichtsspannung von der gesamten vergangenen Dehnungsgeschichte abhängt. Beim zweiten Modell geht die Gleichgewichtsspannung aus der Bestimmungsgleichung der statischen Spannung hervor. Hierin ergibt sich die Gleichgewichtsspannung als diejenige Spannung, auf die die aktuelle Spannung und die statische Spannung relaxiert wären, wenn man die Gesamtdehnung konstant gehalten hätte. Es werden Unterschiede hinsichtlich des Verlaufs der Gleichgewichtsspannung bei Variation der Dehnungsgeschichte gezeigt. Die experimentellen Untersuchungen an verschiedenen metallischen Werkstoffen kommen zu dem Ergebnis, daß Bronze, Zirkalloy und die gewählten Stähle am besten mit der Modellvorstellung mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung, Reinaluminium und Aluminiumlegierungen eher durch das Viskoplastizitätsmodell mit Überspannung bezogen auf die Gleichgewichtsspannung zu beschreiben sind.

Experimental determination of the equilibrium stress in the case of viscoplasticity.

Using strain controlled uniaxial loading histories, two viscoplasticity laws, formulated by means of two different so called overstresses, are discussed. According to the first viscoplasticity law the equilibrium stress is defined to be a rate independent functional of the strain history. In the second viscoplasticity law the equilibrium stress is related to the so called static stress. This equilibrium stress can be determined by the property that during a relaxation experiment the actual stress, the static stress and the equilibrium stress converge to the same limit value. It is shown that the two viscoplasticity laws predict different responses for strain controlled loadings.

In order to examine the capabilities of the two viscoplasticity laws, uniaxial tension-compression tests including hold time periods have been carried out. It turns out that the material behavior of bronze, zirkalloy and three stainless steels can be described more accurately by the first viscoplasticity law. On the other hand the material response of unalloyed aluminium and an aluminium alloy can be represented better by the second viscoplasticity law.

Vorwort

In den meisten Fällen kann das Stoffverhalten von metallischen Werkstoffen mittels Viskoplastizitätsmodellen beschrieben werden. Insbesondere werden sehr oft Viskoplastizitätsmodelle, die mittels sogenannter Überspannungen formuliert sind, zur Darstellung der Materialeigenschaften verwendet. Von der großen Menge der Viskoplastizitätsmodelle werden in der vorliegenden Arbeit zwei auf ihre speziellen Eigenschaften hin untersucht. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wird demonstriert, wie man anhand experimenteller Ermittlungen die Tauglichkeit von Materialmodellen, die ansonsten eine ähnliche Struktur aufweisen, überprüfen kann.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	
1.1 Einleitung und Zielsetzung	2
2 Viskoplastizitätsmodelle	
2.1 Einführende Erläuterungen	4
2.2 Modellaufbau mit Überspannung bezogen auf die Gleichgewichtsspannung	6
2.3 Modellaufbau mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung	12
2.4 Spannungsantwort bei Parametervariation und Variation der Dehnungsgeschichte	16
2.4.1 Variation der Dehnungsgeschichte bei dem Viskoplastizitätsmodell nach Kap. 2.2	17
2.4.2 Variation der Dehnungsgeschichte bei dem Viskoplastizitätsmodell nach Kap. 2.3	21
3 Experimente	
3.1 Experimenteller Aufbau	25
3.1.1 Probenmaterial	27
3.1.2 Systematik der Versuche	29
3.2 Versuchsergebnisse	32
3.2.1 Ergebnisse der Versuchsreihe an Zirkalloy (ZrY)	32
3.2.2 Ergebnisse der Versuchsreihe an AISI 316	37
3.2.3 Ergebnisse der Versuchsreihe an 1.4571	40
3.2.4 Ergebnisse der Versuchsreihe an 1.4914	43
3.2.5 Ergebnisse der Versuchsreihe an Bronze	45
3.2.6 Ergebnisse der Versuchsreihe an Al 5N	47
3.2.7 Ergebnisse der Versuchsreihe an AlMgSi	50
4 Zusammenfassung	52
5 Literaturverzeichnis	55

Kapitel 1

Einführung

1.1 Einleitung und Zielsetzung

Materialmodelle sind Dehnungs-Spannungs-Beziehungen, welche das Verhalten von materiellen Körpern beschreiben. Dabei kann man geschwindigkeitsabhängige und geschwindigkeitsunabhängige Materialmodelle unterscheiden. Ein Materialmodell ist geschwindigkeitsabhängig bzw. geschwindigkeitsunabhängig, wenn z.B. für eine vorgegebene Dehnungsgeschichte die Spannungsantwort davon abhängt bzw. nicht davon abhängt, mit welcher Geschwindigkeit ein und derselbe Dehnungsweg durchlaufen wird. Die Materialgleichungen sind im allgemeinen Funktionale, die durch Systeme von gewöhnlichen linearen oder nichtlinearen Differentialgleichungen dargestellt werden können. Sie enthalten Materialparameter, die für jeden speziellen Stoff ermittelt werden müssen.

Gegenstand dieser Arbeit ist die experimentelle Überprüfung der Tauglichkeit zweier Modellbildungen der Viskoplastizität. Als wesentlich wird dabei die Beobachtung von Gleichgewichtszuständen erachtet. Diese können experimentell durch Einfügen von Relaxationsphasen in den Verlauf des Prozesses erfaßt werden. Werden alle Gleichgewichtszustände graphisch miteinander verbunden, erhält man die sogenannte Gleichgewichtskennlinie. Das Ziel dieser Arbeit besteht nun in der experimentellen Ermittlung der Gleichgewichtskennlinie für bestimmte Belastungsprozesse und verschiedene metallische Werkstoffe. Dabei beschränken sich die Betrachtungen auf homogene eindimensionale Beanspruchungen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, eine flexible Dehnungssteuerung für eine Zugprüfmaschine zu programmieren, die in der Lage ist, im Prinzip beliebige Dehnungsgeschichten mit bereichsweiser konstanter Dehnrates zu realisieren. An sieben

verschiedenen Materialien sollte systematisch das Materialverhalten in Bezug auf die vorgestellten Viskoplastizitätsmodelle überprüft werden. Außerdem waren beide Materialmodelle eindimensional im Rechner zu implementieren und verschiedene Lastgeschichten mit Materialparametervariationen zu rechnen.

Kapitel 2

Viskoplastizitätsmodelle

2.1 Einführende Erläuterungen

Viskoplastizitätsmodelle zeichnen sich durch folgende grundlegenden Eigenschaften aus:

1.: Die Materialantwort für eine vorgegebene Lastgeschichte (z.B. Dehnungsgeschichte) ist stets abhängig von der vergangenen Lastgeschichte und insbesondere von ihrer Geschwindigkeit. Geschwindigkeitsabhängigkeit bedeutet, daß der Spannungswert im betrachteten Dehnungszustand variabel ist, je nachdem mit welcher Geschwindigkeit das Material bis zu diesem Dehnungswert belastet worden ist

2.: Jeder Zustandstrajektorie wird eine Gleichgewichtstrajektorie zugeordnet. Dabei ist die Spannung, anders als bei Viskoelastizitätsmodellen, nicht eine Funktion der Dehnung, sondern ein Funktional der vergangenen Dehnungsgeschichte.

Die Zustandstrajektorie ergibt sich anhand eines geschwindigkeitsabhängigen Funktionals der gesamten vergangenen Dehnungsgeschichte. Dabei bilden die Zustandsvariablen ein System von Materialgleichungen. Sind die momentanen Werte der Zustandsvariablen bekannt, können alle folgenden Zustandswerte aus den Evolutionsgleichungen ermittelt werden. Eine mit der Zeit parametrisierte Auftragung der Werte aller Zustandsvariablen führt dann zur sogenannten Zustandstrajektorie. Insbesondere bezeichnet man das stetige Bild von entsprechenden Zustandswerten im Spannungs-, Dehnungsdiagramm als (ϵ, σ) -Bahn.

Die zugeordnete Gleichgewichtstrajektorie im Spannungs-, Dehnungsdiagramm ergibt sich nun auf zweierlei Weise:

- a) Zu jedem Zeitpunkt denkt man sich die Gesamtdehnung konstant gehalten, und zum momentanen Zustand wird ein Gleichgewichtszustand ermittelt, d.h. ein Gleichgewichtszustand wird mit Hilfe von Relaxationsprozessen als derjenige Grenzzustand definiert, der sich ergibt, wenn man eine unendlich lange Relaxationsdauer gewählt hätte. Alle Gleichgewichtszustände zusammen bilden die Gleichgewichtstrajektorie (im folgenden als $(\varepsilon, \sigma^{(G)})$ - Bahn bezeichnet).
- b) Die Gleichgewichtstrajektorie ergibt sich, wenn man die Lastgeschichte mit unendlich langsamer Geschwindigkeit durchlaufen hätte. Praktisch relaxiert die Spannung bei unendlich langsamer Dehnungsgeschwindigkeit je nach Anfangsbedingungen sofort auf ihren Gleichgewichtswert.

2.2 Modellaufbau mit Überspannung bezogen auf die Gleichgewichtsspannung

Grundlage für den Aufbau der hier betrachteten Viskoplastizitätsmodelle ist die Zerlegung der Gesamtdehnung ε in einen elastischen ε_e und einen geschwindigkeitsabhängigen inelastischen Anteil ε_i . Dabei wird für den elastischen Anteil das Hook'sche Elastizitätsgesetz mit dem Elastizitätsmodul E verwendet:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_i \quad \Rightarrow \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_i \quad , \quad (2.1)$$

$$\sigma = E \varepsilon_e \quad \Rightarrow \quad \dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon}_e \quad . \quad (2.2)$$

Insbesondere wird die inelastische Dehnrates $\dot{\varepsilon}_i$ proportional zur Überspannung $\left[\sigma - \sigma^{(G)} \right]$ gesetzt:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\eta}{E} \left[\sigma - \sigma^{(G)} \right] \quad , \quad (2.3)$$

woraus folgt, daß

$$\dot{\sigma} = E \left[\dot{\varepsilon} - \frac{\eta}{E} \left[\sigma - \sigma^{(G)} \right] \right] \quad , \quad (2.4)$$

η : Positive Materialkonstante.

Dieses System von Gleichungen erzeugt ein Viskoplastizitätsmodell, wenn für die Gleichgewichtsspannung $\sigma^{(G)}$ ein geschwindigkeitsunabhängiges Funktional Φ vom Plastizitätstyp verwendet wird. Dabei können bei zyklischer Steuerung der Dehnung zu einem Dehnungswert i. a. mehrere Spannungswerte gehören.

$$\sigma^{(G)} = \Phi \left(\varepsilon(\tau) \right) \quad , \quad 0 \leq \tau \leq t$$

Viskoplastizitätsmodelle mit einem solchen Aufbau wurden zuerst in [1-3] vorgeschlagen und später in [4-7] diskutiert bzw. weiterentwickelt. Die folgenden Ausführungen entsprechen den Darstellungen in [4,5].

Bei einem Plastizitätsmodell hängt die momentane Gleichgewichtsspannung, in geschwindigkeitsunabhängiger Form, von der gesamten vergangenen Dehnungsgeschichte ab. Je nach Belastungsgeschichte und angenommenen Verfestigungshypothesen können dabei offene oder geschlossene Hystereseschleifen entstehen.

Die Grundstruktur eines solchen Plastizitätsmodells weist eine Zerlegung der Gesamtdehnung ε in einen elastischen $e_e^{(G)}$ und einen plastischen Anteil $e_p^{(G)}$ auf, wobei für den elastischen Anteil in Analogie das Hook'sche Elastizitätsgesetz mit dem Gleichgewichtsmodul $E^{(G)}$ gewählt wird:

$$\varepsilon = e_e^{(G)} + e_p^{(G)} \quad \Rightarrow \quad \dot{\varepsilon} = \dot{e}_e^{(G)} + \dot{e}_p^{(G)} \quad , \quad (2.5)$$

$$\sigma^{(G)} = E^{(G)} e_e^{(G)} \quad \Rightarrow \quad \dot{\sigma}^{(G)} = E^{(G)} \dot{e}_e^{(G)} \quad . \quad (2.6)$$

Die Materialgleichung für $e_p^{(G)}$

Zur Berechnung des momentanen Wertes von $e_p^{(G)}$ gehören weitere sogenannte plastische innere Variablen. Sie stellen die Verfestigungseigenschaften dar. Die Materialgleichungen für die plastischen inneren Variablen realisieren den Einfluß der Belastungsgeschichte. Ihre Gleichungen sind jeweils in der Verzerrungsgeschwindigkeit positiv homogen vom Grade eins, was die Geschwindigkeitsunabhängigkeit zum Ausdruck bringt. Sie stellen gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung nach der Zeit dar und heißen auch Evolutionsgleichungen. In diesem Beispiel wird ein Plastizitätsmodell mit nichtlinearer kinematischer und nichtlinearer isotroper Verfestigung behandelt, wobei $\xi^{(G)}$ und $k^{(G)}$ die jeweiligen plastischen inneren Variablen bedeuten.

Um in diesem Viskoplastizitätsmodell elastische von viskoplastischen Belastungen zu unterscheiden, wird eine Fallunterscheidung definiert.

Viskoplastische Belastung liegt vor, wenn folgende Bedingungen für vorgegebenes $\dot{\varepsilon}$ (Dehnungssteuerung) erfüllt sind:

$$F(t) = 0 \quad \& \quad B_D(t) > 0 \quad (2.7)$$

mit

$$F(t) = \bar{F} \left[\sigma^{(G)}(t), \xi^{(G)}(t), k^{(G)}(t) \right] ,$$

$$\bar{F} \left[\sigma^{(G)}, \xi^{(G)}, k^{(G)} \right] := \bar{f} \left[\sigma^{(G)}, \xi^{(G)} \right] - k^{(G)} ,$$

$$f(t) = \bar{f} \left[\sigma^{(G)}(t), \xi^{(G)}(t) \right] := \left| \sigma^{(G)} - \xi^{(G)} \right| ,$$

$$B_D(t) = \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} \left[E^{(G)} \dot{\varepsilon} \right] .$$

Um die Zuwachsrichtung der plastischen Dehnungsgeschwindigkeit richtig zu erfassen, setzt man das Vorzeichen von $\dot{e}_p^{(G)}$ gleich dem von $\frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}}$:

$$\dot{e}_p^{(G)} = \begin{cases} \dot{s}^{(G)} \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (2.8)$$

wobei die Bogenlänge $s^{(G)}$ definiert ist durch

$$s^{(G)} = s^{(G)}(t) := \int_0^t \left| \dot{e}_p^{(G)}(\tau) \right| d\tau \quad \Rightarrow \quad \dot{s}^{(G)} = \left| \dot{e}_p^{(G)} \right| \quad (2.9)$$

Es sind noch die Gleichungen für $\dot{s}^{(G)}$, $\dot{\xi}^{(G)}$ und $\dot{k}^{(G)}$ zu bestimmen. Für die kinematische Verfestigung $\xi^{(G)}$ nimmt man eine Evolutionsgleichung an, die auf Armstrong und Frederick zurückgeht:

$$\dot{\xi}^{(G)} = \begin{cases} \frac{3c}{2} \dot{e}_p^{(G)} - b \dot{s}^{(G)} \xi^{(G)} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.10)$$

Für die isotrope Verfestigung soll folgende Gleichung herangezogen werden:

$$\dot{k}^{(G)} = \begin{cases} \beta \left[\gamma - k^{(G)} \right] \dot{s}^{(G)} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.11)$$

Die Evolutionsgleichung für die isotrope Verfestigung (für viskoplastische Belastung) kann analytisch gelöst werden:

$$\int_{k_0^{(G)}}^{k^{(G)}} \frac{1}{\gamma - \bar{k}^{(G)}} d\bar{k}^{(G)} = \int_0^{s^{(G)}} \beta d\bar{s}^{(G)}$$

Durch Integration erhält man

$$k^{(G)} = \gamma + \left[k_0^{(G)} - \gamma \right] e^{-\beta s^{(G)}} \quad (2.12)$$

b, c, β, γ : positive Materialkonstanten.

Dabei gelten die Anfangsbedingungen

$$\begin{aligned} \xi^{(G)}(t=0) &= 0 & \text{für} & \quad e_p^{(G)}(t=0) = 0, \\ k^{(G)}(t=0) &= k_0^{(G)} < \gamma \end{aligned}$$

Die Gleichung für $\dot{s}^{(G)}$ folgt aus der sogenannten Konsistenzbedingung, die bei viskoplastischer Belastung stets erfüllt sein muß:

$$\dot{F} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{f} = \dot{k}^{(G)} \quad , \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\sigma^{(G)} - \xi^{(G)} \right]^2 = \frac{d}{dt} k^{(G)^2} \quad . \quad (2.14)$$

Im Falle einer Spannungssteuerung ergibt sich $\dot{s}^{(G)}$ zu

$$\dot{s}^{(G)} = \frac{\frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} \dot{\sigma}^{(G)}}{N_S} \quad , \quad (2.15)$$

mit

$$N_S := \frac{3c}{2} - b \xi^{(G)} \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} + \beta \left[\gamma - k^{(G)} \right] \quad .$$

Bei Dehnungssteuerung, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ergibt sich $\dot{s}^{(G)}$ zu

$$\dot{s}^{(G)} = \frac{\frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} E^{(G)} \dot{\epsilon}^{(G)}}{N_D} \quad , \quad \text{mit} \quad N_D = N_S + E^{(G)} \quad (2.16)$$

und damit

$$\dot{\sigma}^{(G)} = \begin{cases} E^{(G)} \left[1 - \frac{E^{(G)}}{N_D} \right] \dot{\epsilon}^{(G)} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ E^{(G)} \dot{\epsilon}^{(G)} & \text{sonst} \end{cases} \quad . \quad (2.17)$$

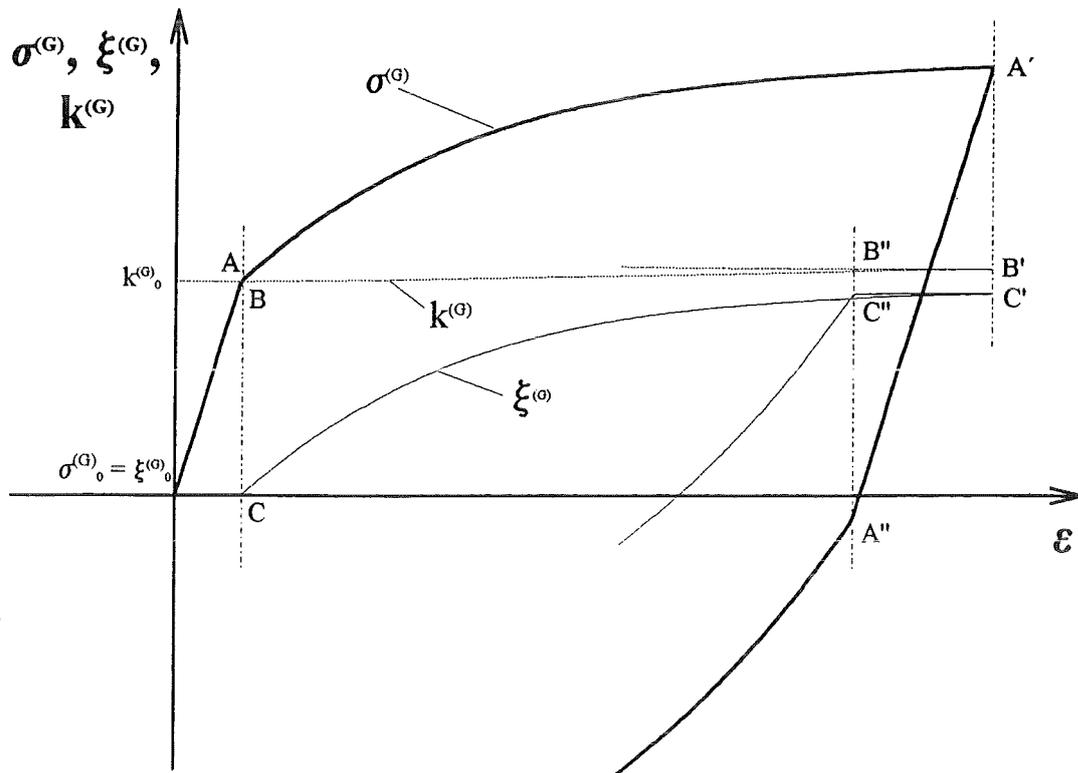


Bild 2.1: Verlauf der Gleichgewichtsspannung bei oben beschriebenem Plastizitätsmodell mit kinematischer und isotroper Verfestigung für dehnungsgesteuerte Zugbelastung mit anschließender Druckbelastung.

Dabei gilt:

- Bis zum Erreichen der erstmaligen Fließgrenze $k_0^{(G)}$ nimmt $\sigma^{(G)}$ linear elastisch zu, $k^{(G)}$ und $\xi^{(G)}$ bleiben konstant.
- Bei viskoplastischer Belastung weisen $\sigma^{(G)}$ (A-A'), $k^{(G)}$ (B-B') und $\xi^{(G)}$ (C-C') qualitativ den dargestellten Verlauf auf.
- Bei einer Entlastung bleiben $k^{(G)}$ (B'-B'') und $\xi^{(G)}$ (C'-C'') konstant, bis die Bedingung für viskoplastisches Fließen wieder erfüllt ist. Dabei nimmt $\sigma^{(G)}$ (A'-A'') linear elastisch ab.

Für den Sonderfall $E = E^{(G)}$ wurden verschiedene Lastgeschichten nach diesem Materialmodell gerechnet (siehe Bild 2.2 und 2.3).

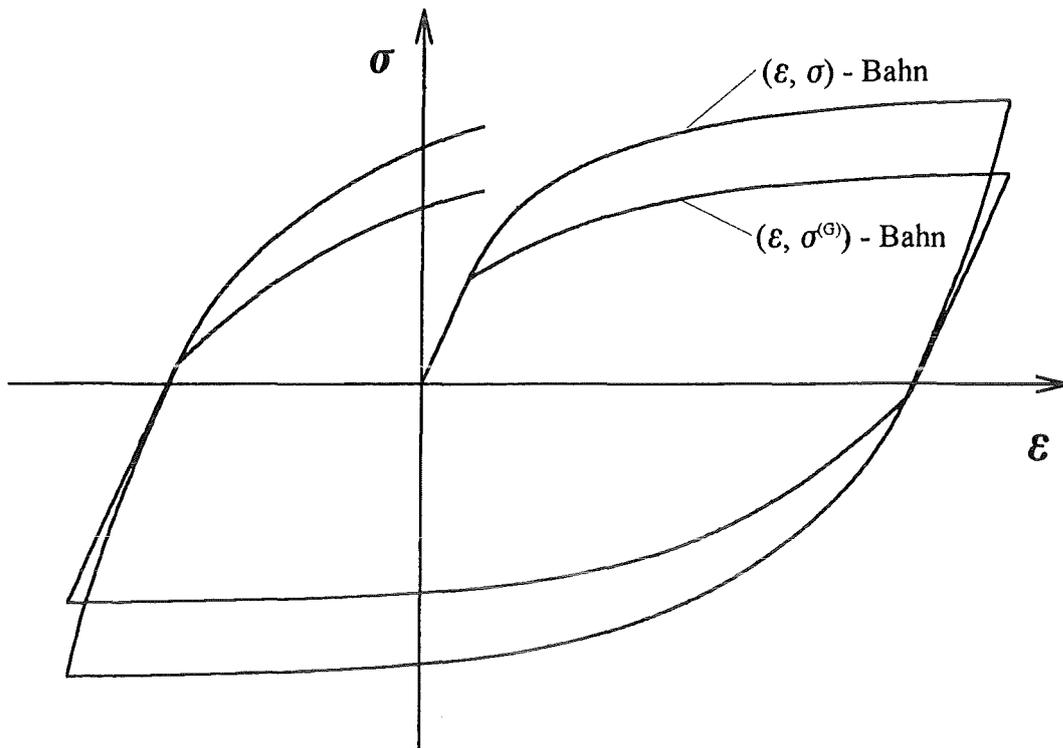


Bild 2.2: Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse für eine dehnungsgesteuerte Belastungsgeschichte mit betragsmäßig konstanter Dehnungsgeschwindigkeit.

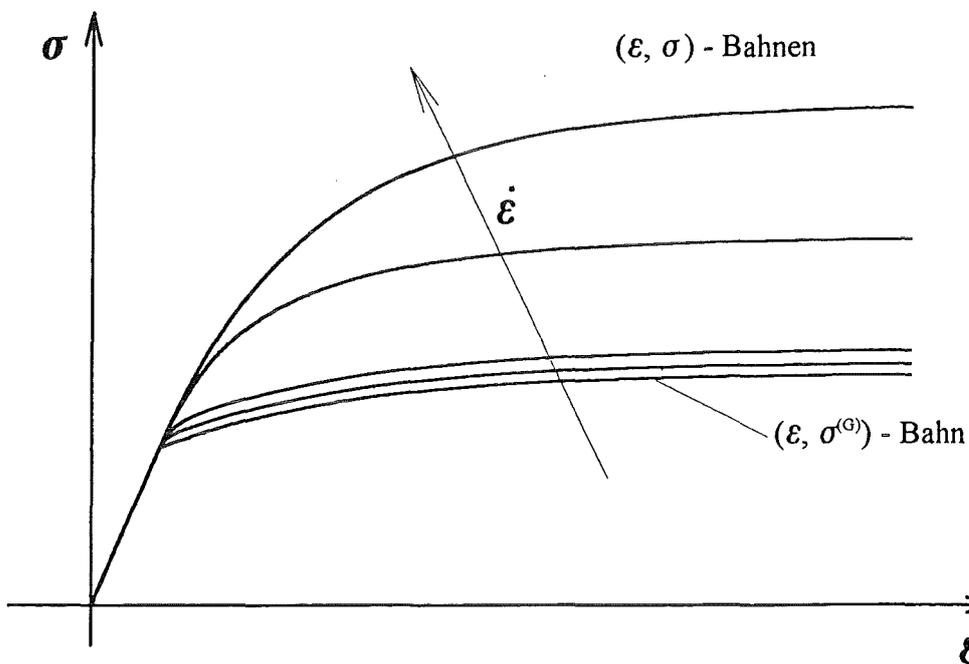


Bild 2.3: Dehnungs-Spannungs-Verläufe bei dehnungsgesteuerter Zugbeanspruchung für vier verschiedene konstante Dehnungsgeschwindigkeiten.

2.3 Modellaufbau mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung

Als Beispiel wird ein Viskoplastizitätsmodell mit nichtlinearer kinematischer und isotroper Verfestigung betrachtet. Als Überspannung wird die Differenz zwischen der aktuellen Spannung und der statischen Spannung definiert. Das erhaltene Materialmodell entspricht dem Viskoplastizitätsmodell nach Chaboche (in diesem Zusammenhang siehe [4,5] und die darin zitierte Literatur).

Die statische Spannung $\sigma^{(S)}$ ist diejenige Gleichgewichtsspannung, die man erhalten hätte, wenn man das System mit unendlich schneller Geschwindigkeit vom aktuellen Zustand zu einem Gleichgewichtszustand gebracht hätte. Sie ergibt sich also als Schnittpunkt zwischen der spontanen elastischen Geraden durch den aktuellen Spannungspunkt und der zugeordneten Gleichgewichtsbahn (s. Bild 2.4).

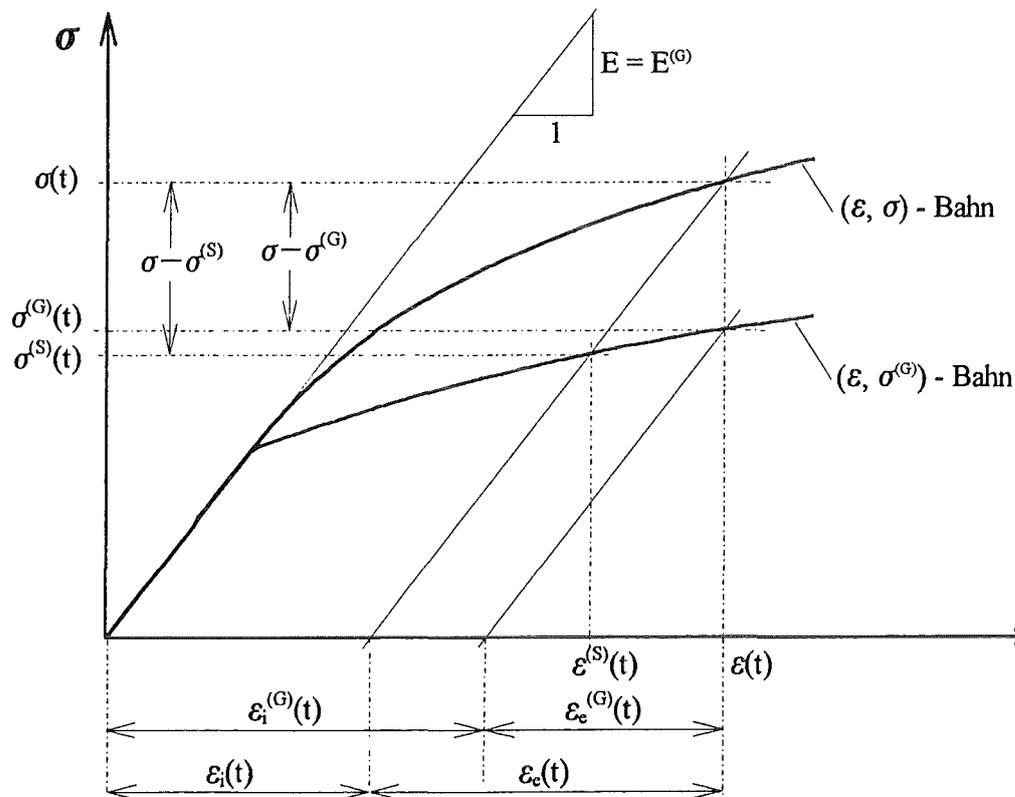


Bild 2.4: Dehnungs-Spannungs-Beziehungen für ein Viskoplastizitätsmodell mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung.

Ausgehend von der Zerlegung der Deformation in einen elastischen und einen inelastischen Anteil kann man bezüglich der Spannung folgende Materialgleichungen angeben.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_i \quad \Rightarrow \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_i \quad , \quad (2.18)$$

$$\sigma = E \varepsilon_e \quad \Rightarrow \quad \dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon}_e = E (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_i) \quad , \quad (2.19)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{1}{r} \left[\sigma - \sigma^{(S)} \right] \quad (r = \text{konst.} > 0) \quad . \quad (2.20)$$

Im Gegensatz zur Viskoelastizität, bei der $\sigma^{(S)}$ als Funktion von ε_i gegeben ist (siehe [4]), wird $\sigma^{(S)}$ bei Viskoplastizität als ein Funktional von ε_i definiert:

$$\dot{\sigma}^{(S)} = \begin{cases} \dot{\xi} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ \dot{\sigma} & \text{sonst} \end{cases} \quad , \quad (2.21)$$

oder nach Integration mit der Integrationskonstanten k ($\text{sign}(\sigma - \xi)$),

$$\sigma^{(S)} = \begin{cases} \xi + k \frac{\sigma - \xi}{|\sigma - \xi|} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ \sigma & \text{sonst} \end{cases} \quad . \quad (2.22)$$

Dabei wird viskoplastische Belastung definiert als

$$|\sigma - \xi| > k \quad . \quad (2.23)$$

Für die kinematische und isotrope Verfestigung k und ξ sollen gelten:

$$\dot{\xi} = \begin{cases} \frac{3c}{2} \dot{\varepsilon}_i - b |\dot{\varepsilon}_i| \xi & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad , \quad (2.24)$$

$$\dot{k} = \begin{cases} \beta (\gamma - k) |\dot{\varepsilon}_i| & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad , \quad (2.25)$$

b, c, β, γ : Materialkonstanten.

Es gilt

$$\sigma - \sigma^{(S)} = \langle |\sigma - \xi| - k \rangle \frac{\sigma - \xi}{|\sigma - \xi|} \quad (2.26)$$

wobei

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Damit gelingt es, $\sigma^{(S)}$ völlig zu eliminieren und die Materialgleichung für σ lautet dann:

$$\dot{\sigma} = E (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_i) \quad (2.27)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{1}{r} \langle |\sigma - \xi| - k \rangle \frac{\sigma - \xi}{|\sigma - \xi|} \quad (2.28)$$

Bestimmung der zugeordneten Gleichgewichtsbahn

Die Gleichung für $\sigma^{(S)}$ wird zu einer Bestimmungsgleichung für die Gleichgewichtsspannung $\sigma^{(G)}$ umgewandelt, indem $\sigma = \sigma^{(S)} = \sigma^{(G)}$ und $\dot{\sigma} = \dot{\sigma}^{(S)} = \dot{\sigma}^{(G)}$ gesetzt wird. Dadurch wird berücksichtigt, daß die momentane Gleichgewichtsspannung diejenige Spannung ist, auf die die aktuelle Spannung σ und die statische Spannung $\sigma^{(S)}$ relaxiert wären, wenn man die Gesamtdehnung konstant gehalten hätte.

Es gilt (siehe 4,5,8):

$$\varepsilon = \varepsilon_e^{(G)} + \varepsilon_i^{(G)} \quad \Rightarrow \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e^{(G)} + \dot{\varepsilon}_i^{(G)} \quad , \quad (2.29)$$

$$\sigma^{(G)} = E \varepsilon_e^{(G)} \quad \Rightarrow \quad \dot{\sigma}^{(G)} = E \dot{\varepsilon}_e^{(G)} = E \left[\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_i^{(G)} \right] \quad , \quad (2.30)$$

$$\dot{\varepsilon}_i^{(G)} = \dot{\varepsilon}_i^{(G)} \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} \quad , \quad (2.31)$$

mit

$$\dot{\varepsilon}_i^{(G)} = \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} E \dot{\varepsilon}$$

$$N_D^{(G)} = \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} E \dot{\varepsilon}$$

und

$$N_D^{(G)} = E + \frac{3c}{2} - b \xi^{(G)} \frac{\sigma^{(G)} - \xi^{(G)}}{k^{(G)}} + \beta \left[\gamma - k^{(G)} \right].$$

Für die kinematische und isotrope Verfestigung der Gleichgewichtsspannung sollen folgende Gleichungen gelten:

$$\dot{\xi}^{(G)} = \begin{cases} \frac{3c}{2} \dot{\varepsilon}_i^{(G)} - b \dot{\xi}^{(G)} \xi^{(G)} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (2.32)$$

$$\dot{k}^{(G)} = \begin{cases} \beta \left[\gamma - k^{(G)} \right] \dot{\varepsilon}^{(G)} & \text{für viskoplastische Belastung} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (2.33)$$

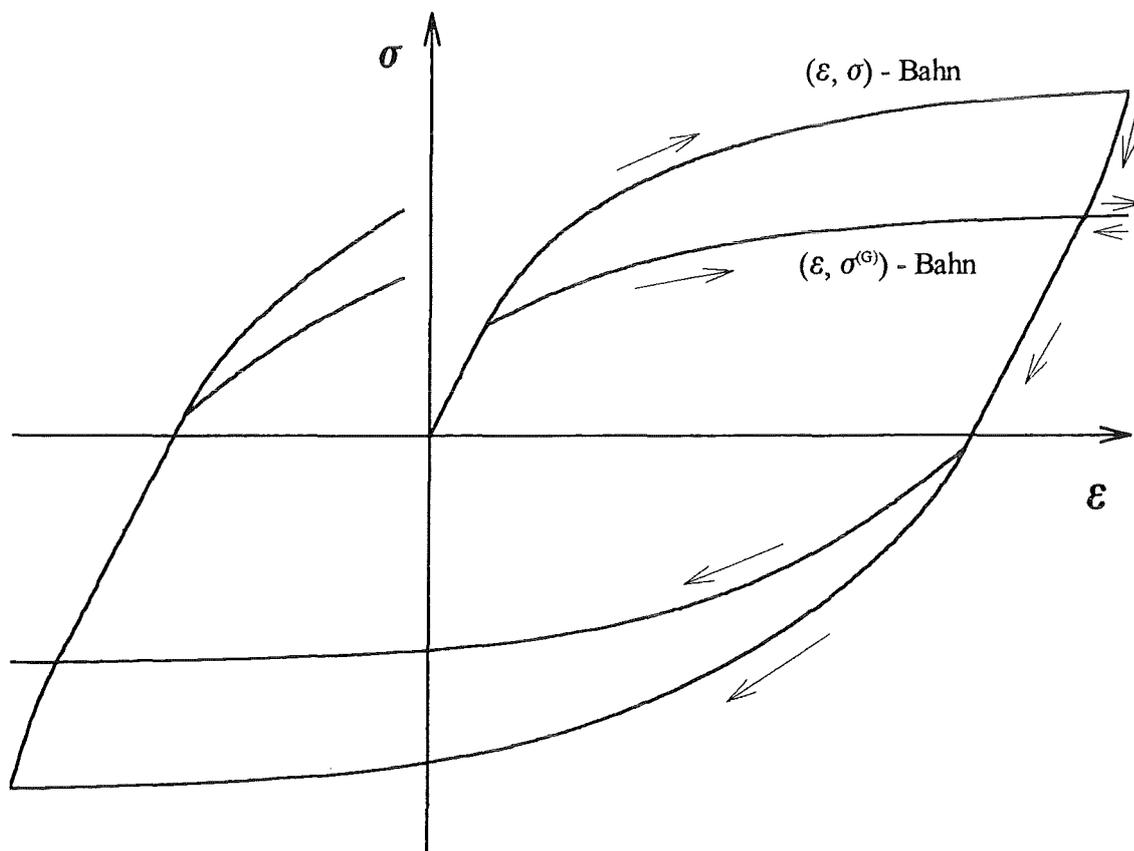


Bild 2.5: Eigenschaften des Materialmodells dargestellt anhand einer dehnungsgesteuerten Belastungsgeschichte ($|\dot{\varepsilon}| = \text{konst.}$).

2.4 Spannungsantwort bei Variation der Dehnungsgeschichte

In den nachfolgenden Kapiteln sollen die wesentlichen Unterschiede der in 2.2 und 2.3 erläuterten Modellbildungen und deren Auswirkungen auf den Dehnungs-Spannungs-Verlauf und auf das Relaxationsverhalten dargestellt werden. Um Vergleiche zu ziehen, wurden daher für beide Modelle identische Dehnungsgeschichten zugrundegelegt. Dazu wurden beide Viskoplastizitätsmodelle mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens integriert

2.4.1 Variation der Dehnungsgeschichte bei dem Viskoplastizitätsmodell nach Kap. 2.2:

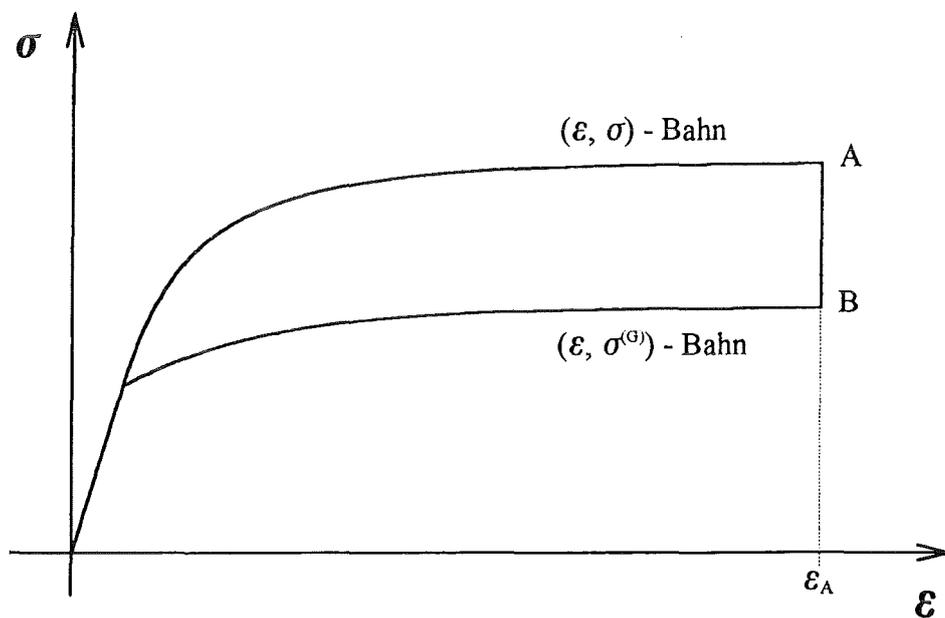
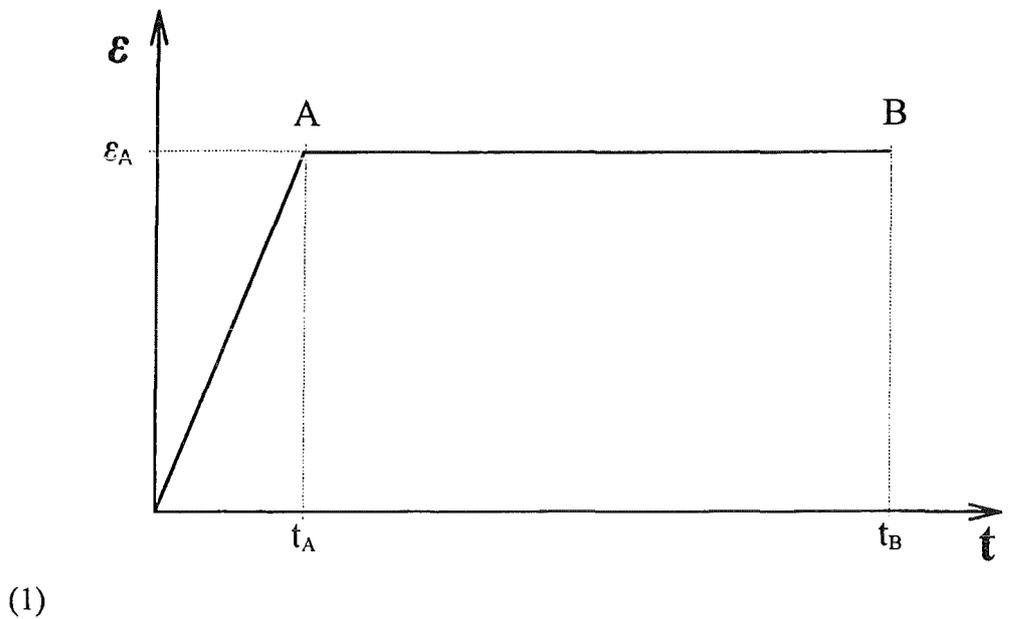
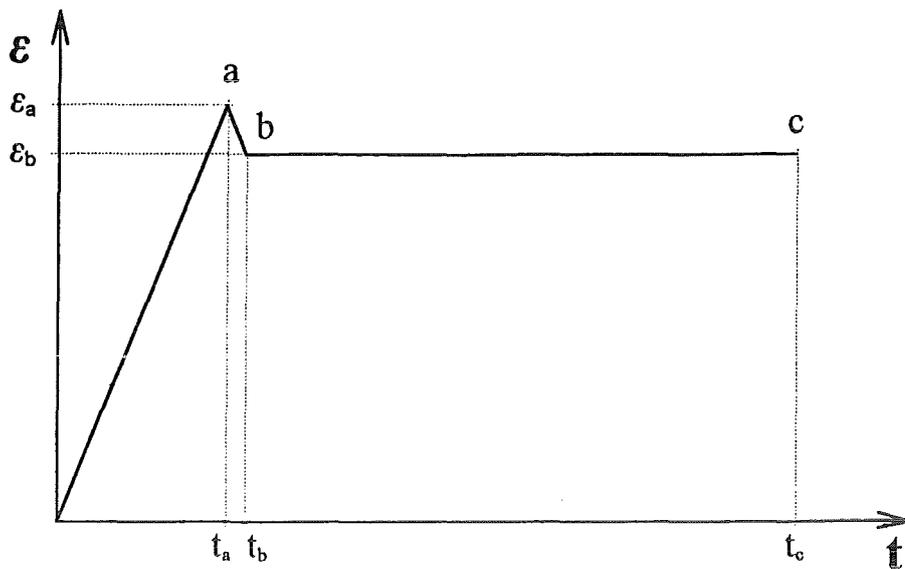
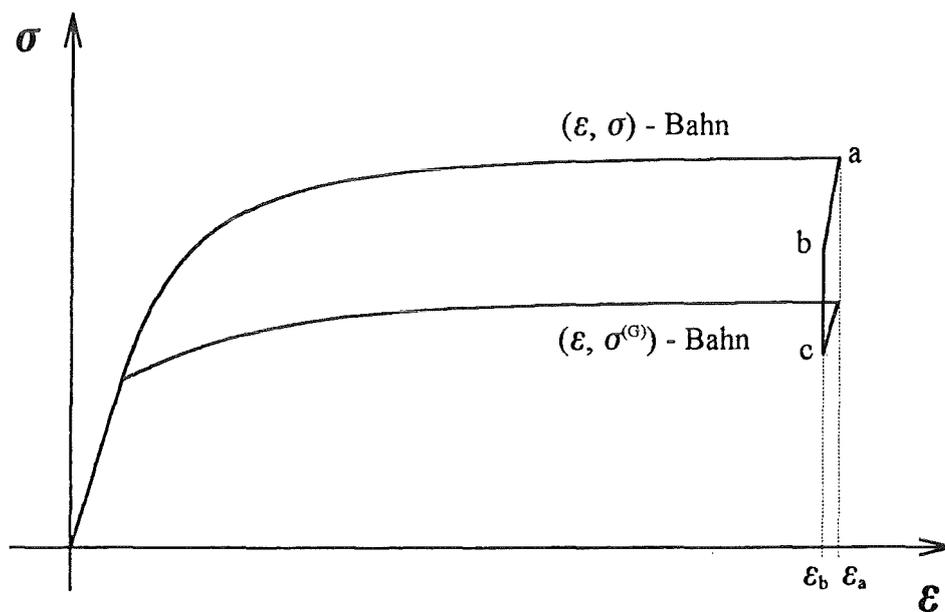


Bild 2.6 (1,2): Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse (2) für eine Dehnungsgeschichte (1) mit monotoner Zugbelastung ($\dot{\epsilon} = \text{konst.}$) und anschließender Relaxation.



(3)



(4)

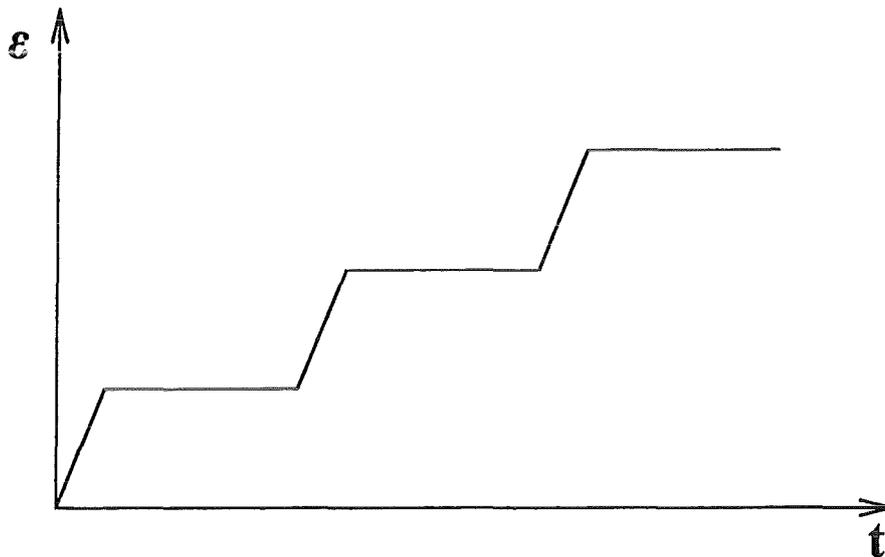
Bild 2.6 (3,4): Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse (4) für eine Dehnungsgeschichte (3) mit Zugbelastung ($\dot{\varepsilon} = \text{konst.}$) und Relaxation nach kurzer Entlastung.

Erläuterung zu Bild 2.6 (1,2):

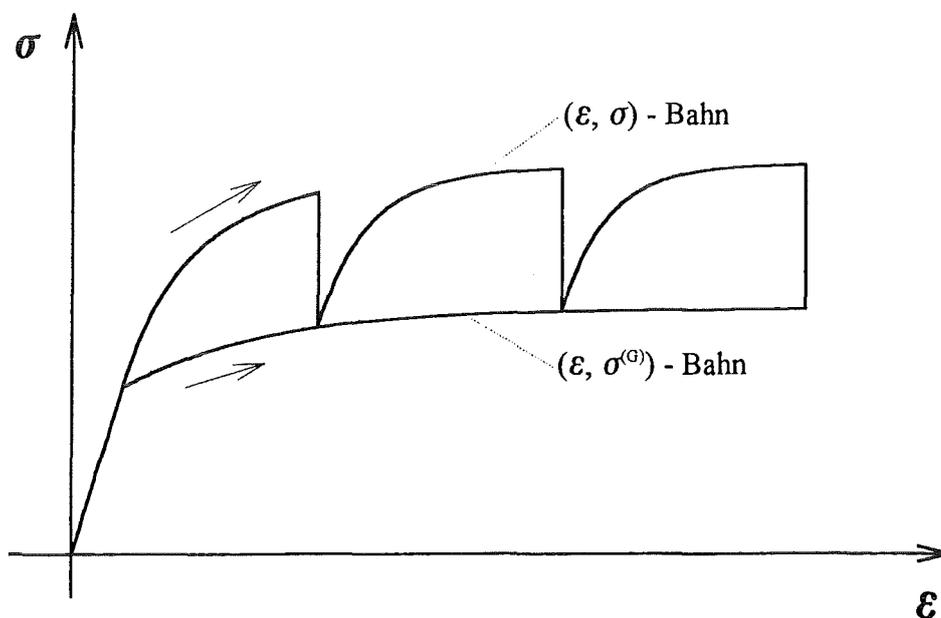
Wird nach monotoner Belastung über die Fließgrenze hinaus die Dehnung konstant gehalten so relaxiert die Spannung auf diejenige Spannung der zugeordneten Gleichgewichtsbahn.

Erläuterung zu Bild 2.6 (3,4):

Erfolgt nach monotoner Belastung eine kleine Entlastung, und zwar so, daß der Dehnungs-Spannungs-Punkt zu Beginn des Relaxationsprozesses oberhalb der Gleichgewichtsspannung liegt, so beträgt die Spannungsabnahme der Gleichgewichtsspannung $\Delta \sigma = E^{(G)} \Delta \varepsilon$ (unter der Voraussetzung, daß viskoplastische Belastung während der kurzen Entlastung nicht erreicht wird).

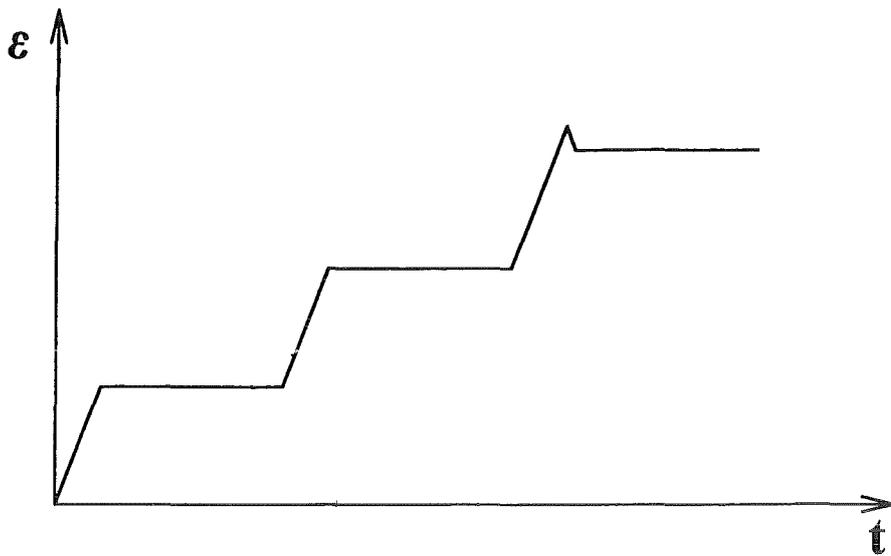


(5)

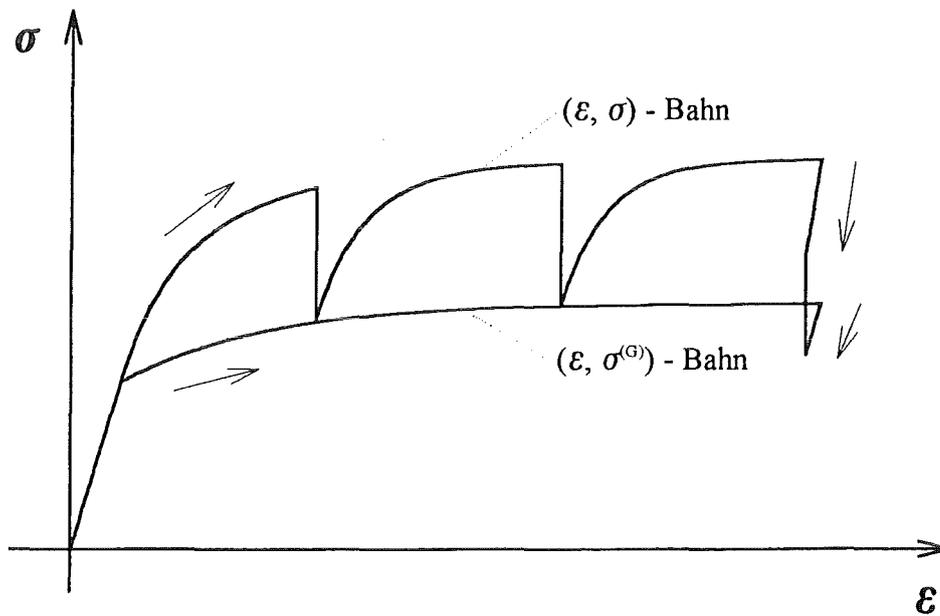


(6)

Bild 2.6 (5,6): Dehnungs-Spannungverhältnisse (6) für eine Dehnungsgeschichte (5) mit monotoner Zugbelastung und Haltezeiten ($\varepsilon = \text{konst.}$).



(7)



(8)

Bild 2.6 (7,8): Dehnungs-Spannungsverhältnisse (8) für eine Dehnungsgeschichte (7) mit monotoner Zugbelastung und Haltezeiten; bzw. Haltezeit nach kurzer Entlastung.

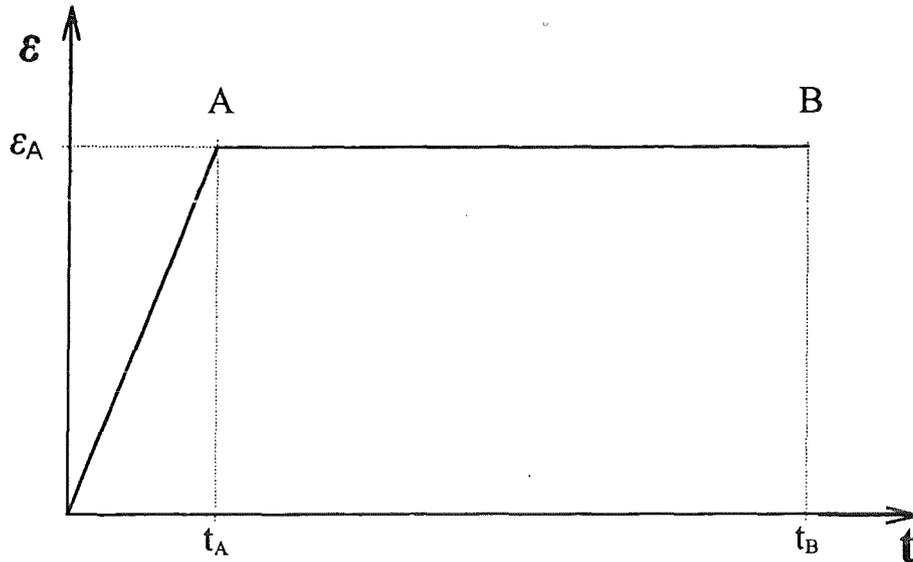
Erläuterung zu Bild 2.6 (5,6):

Die zugeordnete Gleichgewichtsbahn kann ermittelt werden, indem man in den Dehnungs-Spannungs-Punkten Haltezeiten einfügt, bei der die Spannung auf die Gleichgewichtsspannung relaxiert.

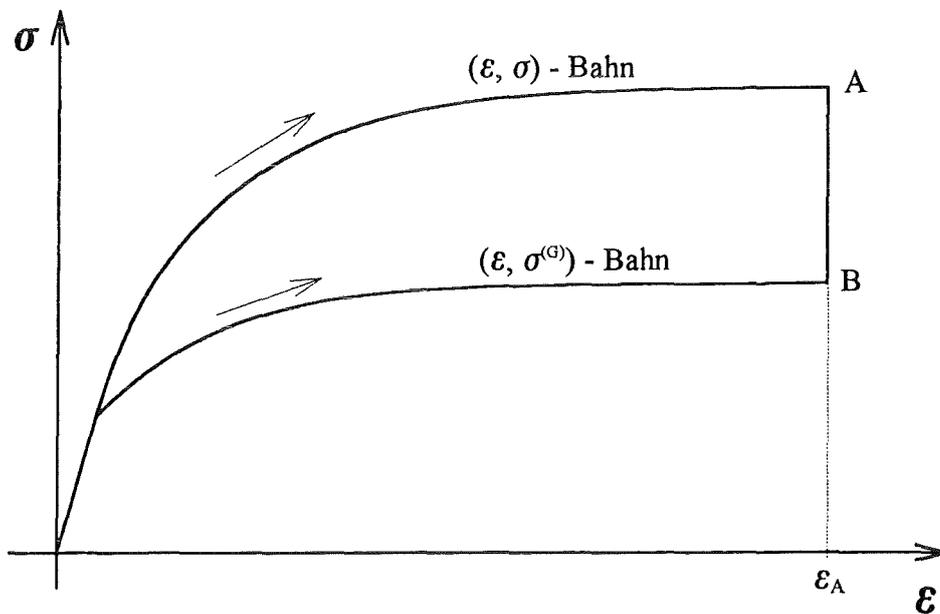
Erläuterung zu Bild 2.6 (7,8):

Kombination der Dehnungsgeschichte aus Bild 2.6 (3,4) und Bild 2.6 (5,6).

2.4.2 Variation der Dehnungsgeschichte bei dem Viskoplastizitätsmodell nach Kap. 2.3

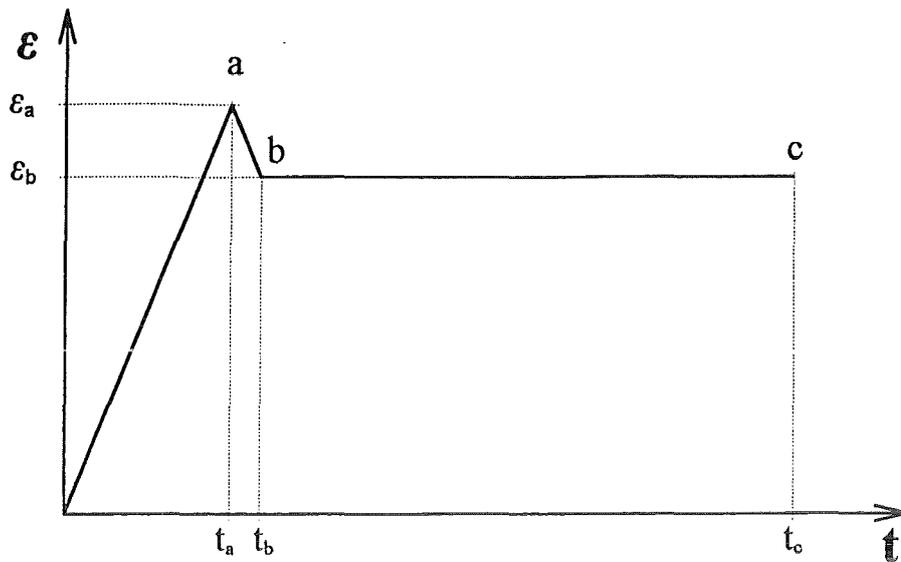


(1)

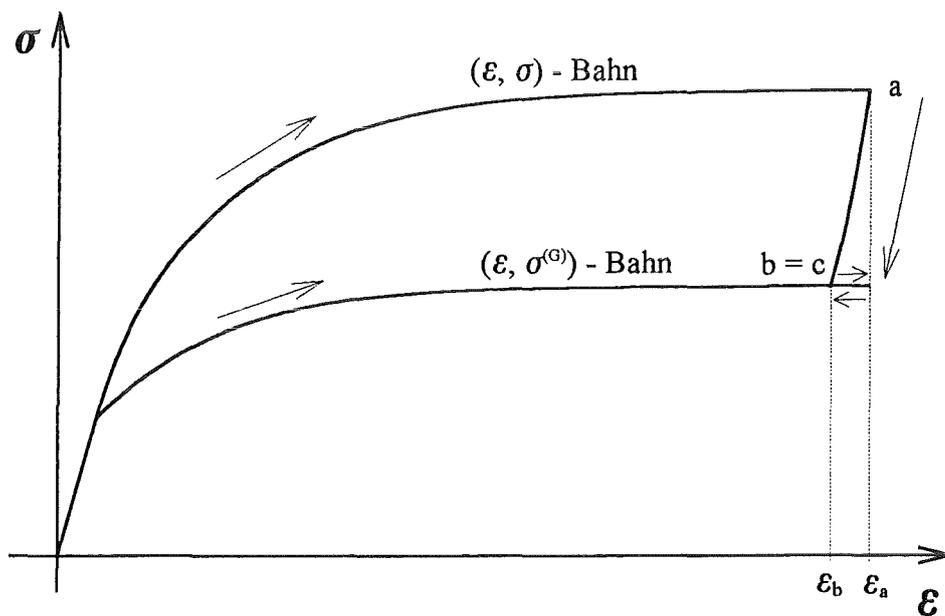


(2)

Bild 2.7 (1,2): Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse (2) für eine Dehnungsgeschichte (1) mit monotoner Zugbelastung ($\dot{\varepsilon} = \text{konst.}$) und anschließender Relaxation.



(3)



(4)

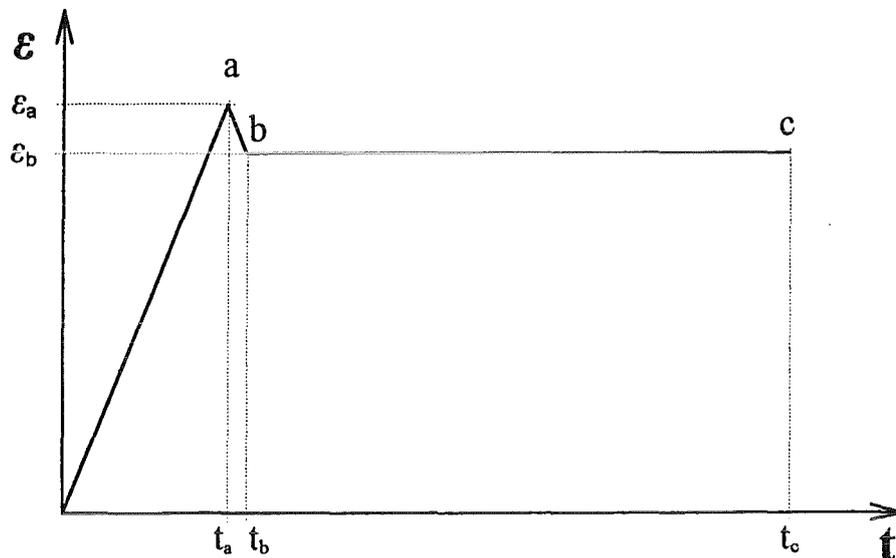
Bild 2.7 (3,4): Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse (4) für eine Dehnungsgeschichte (3) mit monotoner Zugbelastung ($\dot{\epsilon} = \text{konst.}$) und anschließender Entlastung auf die Gleichgewichtsspannung. Bei der nachfolgenden Relaxation verändert sich der Dehnungs-Spannungspunkt nicht mehr.

Erläuterungen zu den Bildern 2.7:

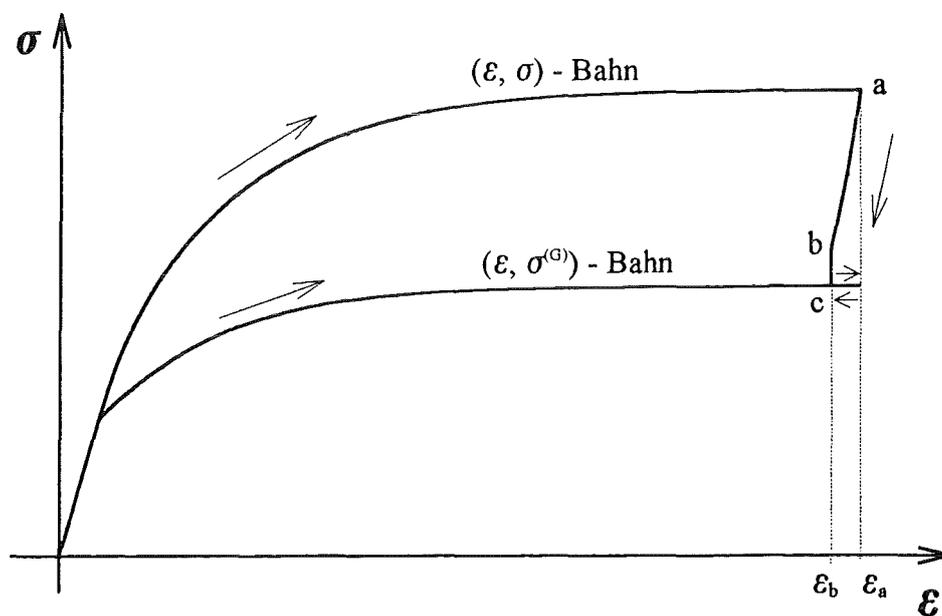
Erfolgt nach monotoner Zugbelastung ein Relaxationsprozeß, so nimmt die Überspannung $\sigma - \sigma^{(G)}$ ähnlich dem Viskoplastizitätsmodell nach Kap. 2.2 ab, bis sie verschwindet (vgl. Bild 2.6(1,2)). Wird allerdings entlastet, so bewegt sich der Dehnungs-Spannungs-Punkt der

Gleichgewichtsspannung zunächst solange auf derselben Bahn zurück, bis keine Überspannung im Sinne von Kap.2.4 mehr vorhanden ist.

Selbstverständlich kann auch bei diesem Modell die Bahn der Gleichgewichtsspannung durch Einfügen von Haltezeiten ermittelt werden.

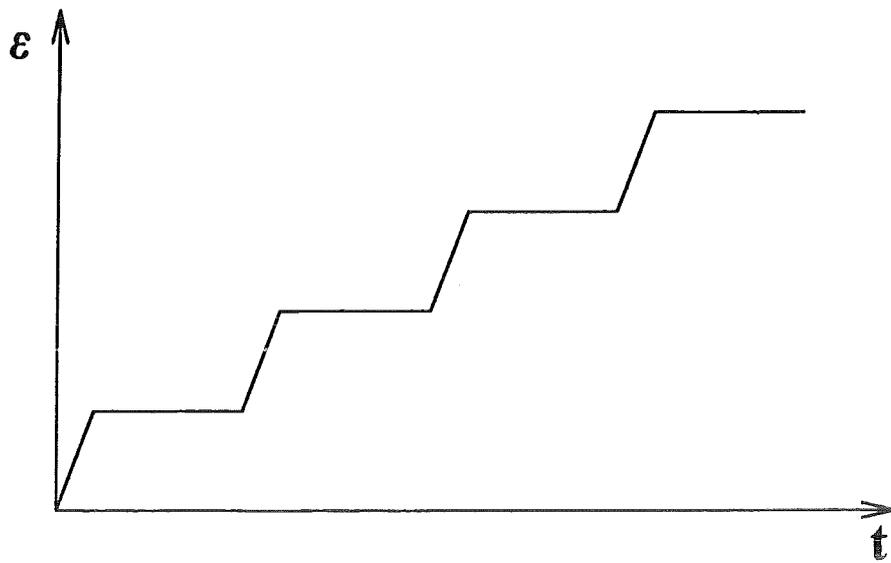


(5)

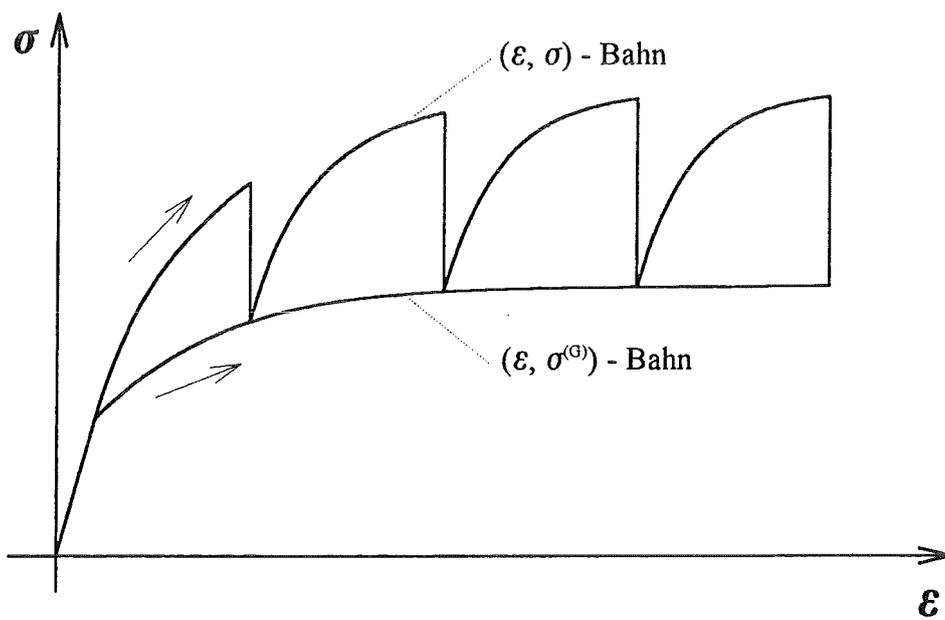


(6)

Bild 2.7 (5,6): Dehnungs-Spannungs-Verhältnisse (6) für eine Dehnungsgeschichte (5) mit Zugbelastung ($\dot{\epsilon} = \text{konst.}$) und Relaxation nach kurzer Entlastung.



(7)



(8)

Bild 2.7 (7,8): Dehnungs-Spannungverhältnisse (8) für eine Dehnungsgeschichte (7) mit monotoner Zugbelastung und Haltezeiten ($\epsilon = \text{konst.}$).

Kapitel 3

Experimente

3.1 Experimenteller Aufbau

Systembeschreibung:

Sämtliche Versuche wurden an einem "Low Cycle Fatigue Testsystem (Serie 1362) der Fa. Instron mit elektromechanischem Antrieb **bei Raumtemperatur** durchgeführt. Die Höchstlast beträgt ± 100 kN, wobei in diesem Fall eine Kraftmeßdose mit einer maximalen Lastaufnahme von ± 10 kN eingebaut wurde. Der Lastrahmen weist eine Steifigkeit von 450 kN/mm auf, an dessen Rückseite der Leistungsverstärker montiert ist. Die Steuerkonsole enthält die Regelmoduln für Last-, Dehnungs- und Wegsteuerung, wobei der Wegregler mit einem Regelverstärker ausgestattet ist. Last- und Dehnungsregler besitzen keinen eigenen Verstärker und benutzen den des Wegreglers mit. Dies ist eine wichtige Eigenschaft in Bezug auf die Kalibration der einzelnen Regler. Um einwandfrei messen zu können, muß daher zuerst der Wegregler und anschließend Last- und Dehnungsregler kalibriert werden.

Das Testsystem verwendet ein Sollwertsignal, welches in diesem Fall durch den Rechner über eine DA/AD- Karte mittels des SKT-Eingangs in den Dehnungsregler eingespeist wird. Ein auf der Probe fixiertes Extensometer (Meßlänge: ± 1 mm) erzeugt das Istwertsignal für die Dehnungsregelung. Der Istwert wird vom jeweiligen Sollwert subtrahiert. Die Differenz bildet das Steuersignal. Das resultierende Signal entspricht der Regelabweichung, wird verstärkt und bewegt den Antriebszylinder in die Richtung minimalster Abweichung. Die Ausgangswerte der Last-, Weg- und Dehnungskanäle können abgegriffen, digitalisiert und vom Rechner gespeichert werden. Ein digitales Voltmeter ermöglicht die Messung von Eingangs- und Ausgangswerten, um insbesondere bei Versuchsbeginn einen Nullabgleich von Last und

Dehnung zu ermöglichen. Zusätzlich kann mit Hilfe eines Oszilloskops der Regelkreis optimiert werden.

Um eventuell fatale Auswirkungen bei Fehlbedienung des Systems zu vermeiden, wurden am Lastregler sogenannte Limits gesetzt. Ein Erreichen des oberen oder unteren Limits löst sofort die Abtrennung von der Steuerung aus, womit Schäden am Gestänge oder der Einspannung vermieden werden können.

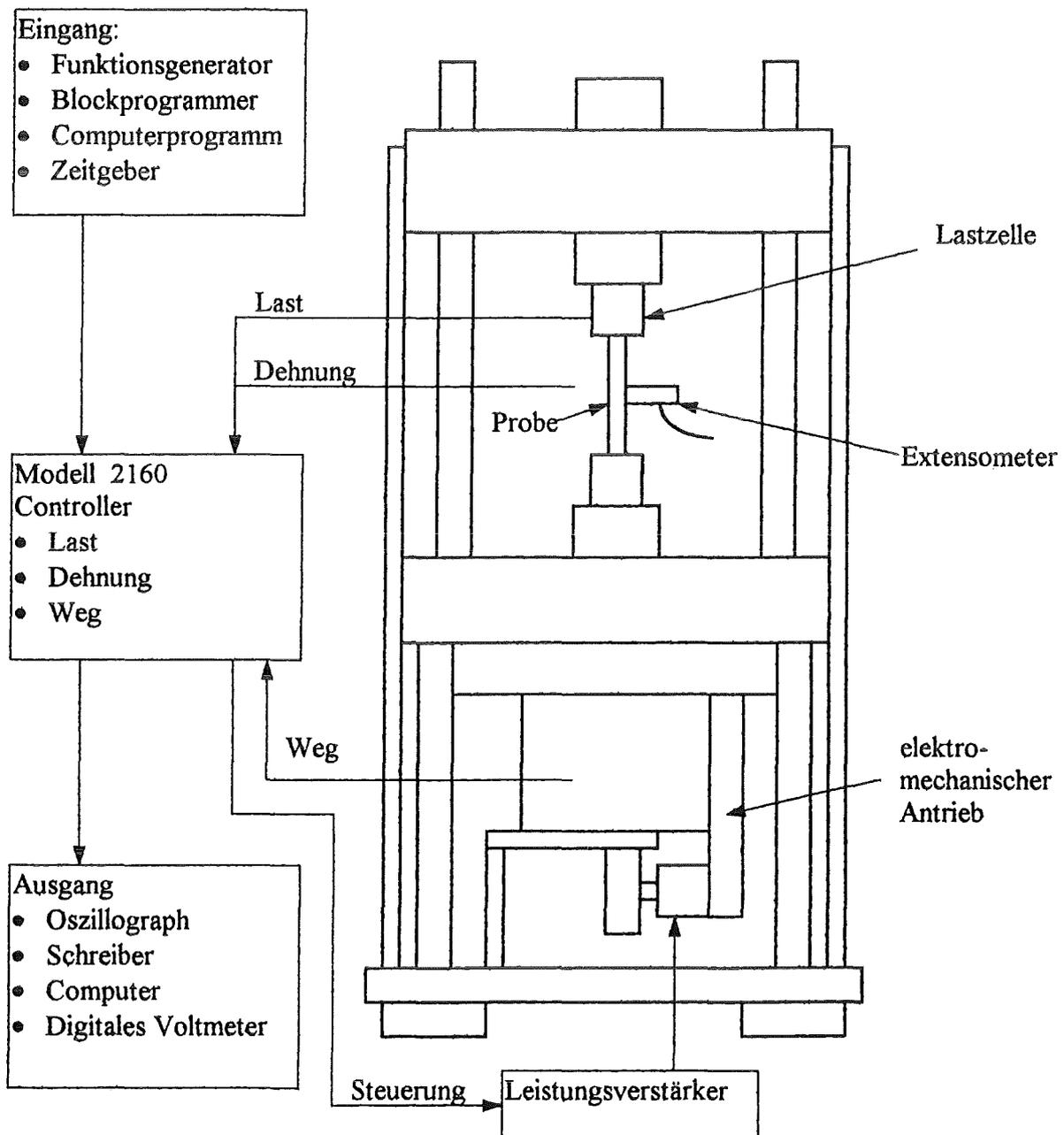


Bild 3.1: Blockdiagramm des Low Cycle Fatigue Testsystems der Serie 1362 der Fa. Instron.

Kalibration des Dehnungskanals:

Das Kalibrieren des Dehnungskanals erfolgte mit Hilfe eines angeschlossenen Extensometers über den Abgleich der entsprechenden Meßwerte bei genau definierten Längenänderungen. Für diesen Abgleich wurde eine hochauflösende Kalibriervorrichtung (Auflösung 1 μm) verwendet. Vor dem Nullabgleich des Dehnungskanals muß sich das System in Wegsteuerung befinden und die Dehnungslimits müssen ausgeschaltet sein. Um mit größtmöglicher Genauigkeit zu arbeiten, wurde die Kalibriervorrichtung senkrecht mit der Mikrometerschraube nach unten auf eine plane Fläche gestellt. Das Extensometer wurde spielfrei mit den Meßzungen verspannt. Mit Hilfe des Potentiometers "Balance Control" auf der Oberseite des Dehnungsreglers wurde ein Nullabgleich durchgeführt, wobei gleichzeitig der am Oszilloskop gemessene Wechselspannungsanteil minimiert werden mußte. Durch Verdrehen der Mikrometerschraube um einen definierten Betrag (in diesem Fall 0,4 mm) wurde der Regler mittels eines Potentiometers auf eine größtmögliche Anzeige gebracht. Anschließend erfolgte eine Korrektur des Maximalwertes auf die Full Range Anzeige von 10 V. Durch Nachfahren der Kalibriervorrichtung konnte die Genauigkeit und Linearität des Signals überprüft werden.

Einspannung der Proben:

Die Einspannung der Proben erfolgte mit Hilfe von Kardangelenken, die Mittigkeit und Parallelität gewährleisten. Diese Art der Einspannung hat für einachsige Zugversuche den Vorteil, daß eine unerwünschte Überlagerung von Biegespannungen vermieden werden kann. Die Messung der Axialkraft erfolgte mit einer auf DMS-Basis arbeitenden Meßdose, die sich in der Lastzelle befindet. Zur Erfassung der Weggrößen wurde bei allen Experimenten ein Extensometer mit einer freien Meßlänge von 25 mm und einem Meßweg von ± 1 mm benutzt.

3.1.1 Probenmaterial

Alle Proben wurden vor den Experimenten in Vakuumatmosphäre spannungsfrei geglüht. Spannungsfreiglühen dient zur Beseitigung bzw. zum Abbau von Makro-eigen-spannungen sowie zur Reduzierung von Mikro-eigen-spannungen. Beide Eigen-spannungsarten entstehen dabei schon während des Herstellungsprozesses. Die Haltetemperaturen T_G wurden beim Spannungsarmglühen oberhalb oder im Bereich der Rekristallisationstemperaturen gewählt. Bei hinreichend langer Glühzeit t_G erfolgen plastische Verformungen, die zum Abbau und schließlich zum Ausgleich der Makro-eigen-spannungen führen können. Die Abkühlung der

Proben von der Haltetemperatur muß hinreichend langsam erfolgen, um keine neuen Eigenspannungen während des Abkühlprozesses zu indizieren. Tabelle 2 liefert eine Übersicht der getesteten Materialien und deren Wärmebehandlung.

Tabelle 2:

Werkstoff	TG[°C]	tG[h]
AlMgSi	340	1
Bronze	700	1
1.4571	750	1
Zirkalloy (ZrY)	540	1
Al 5N	340	1
AISI 316 L	600	60000
1.4914	730	1

Bei den Experimenten wurden Rundproben ($d_0 = 5 \text{ mm}$) mit einer maximalen zylindrischen Meßlänge von 30 mm verwendet.

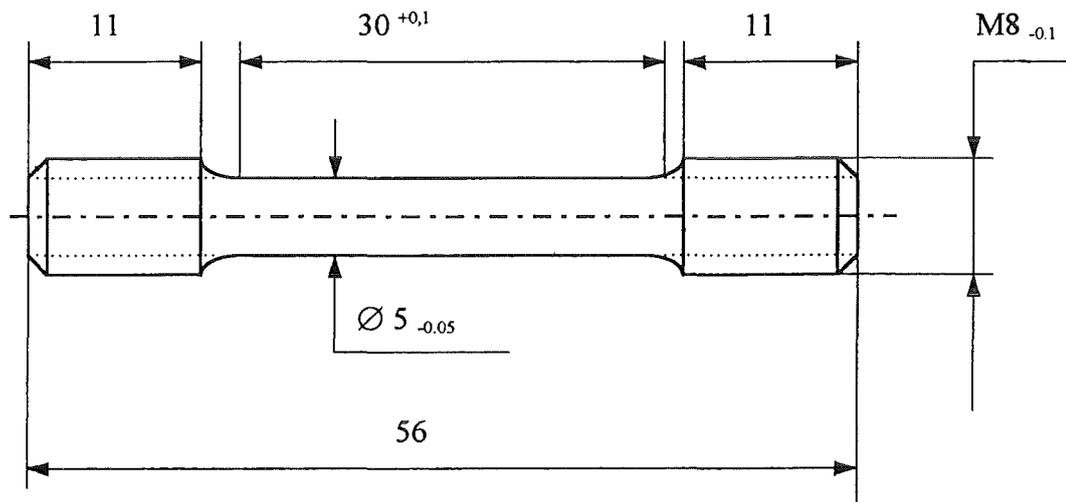


Bild 3.2: Probengeometrie; M 2:1

3.1.2 Systematik der Versuche

Zur Steuerung der Experimente und zur Meßdatenerfassung wurde ein mit entsprechender Hard- und Software ausgestatteter 80386 Personalcomputer eingesetzt. Die Hardware bestand im wesentlichen aus einer Ausgabe- (D/A-Wandler) sowie einer Datenerfassungskarte (A/D-Wandler). Für die Software zur Steuerung wurde ein GFA-BASIC-Programm geschrieben. Dabei wurde besonderen Wert darauf gelegt, eine vernünftige Anzahl der einzulesenden Meßdaten und Flexibilität der geplanten Dehnungssteuerung zu gewährleisten. Daher erfolgte die Einteilung Dehnungsgeschichte in einzelne Segmente mit bereichsweise konstanter Dehnrates. Die Datenerfassung wurde auf 500 bzw. 1000 Meßpunkte je Segment festgelegt. Um besonders bei Langzeitversuchen den Einfluß von Netzstörungen auf die Versuchsführung klein zu halten, wurden der Personalcomputer und die Steuerkonsole der Prüfmaschine von einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung gespeist.

Im wesentlichen konzentrierten sich die Experimente auf vier verschiedene Versuchsarten mit qualitativ unterschiedlichen Dehnungsgeschichten.

1. Verschiedene Proben werden nach Versuchsart 1 mit unterschiedlichen Dehnrates

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \text{konst.} \quad \text{bis zu einer Dehnung } \epsilon_A \text{ belastet. Ziel ist es, die}$$

Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannungsantwort zu erfassen.

Versuchsart 1:

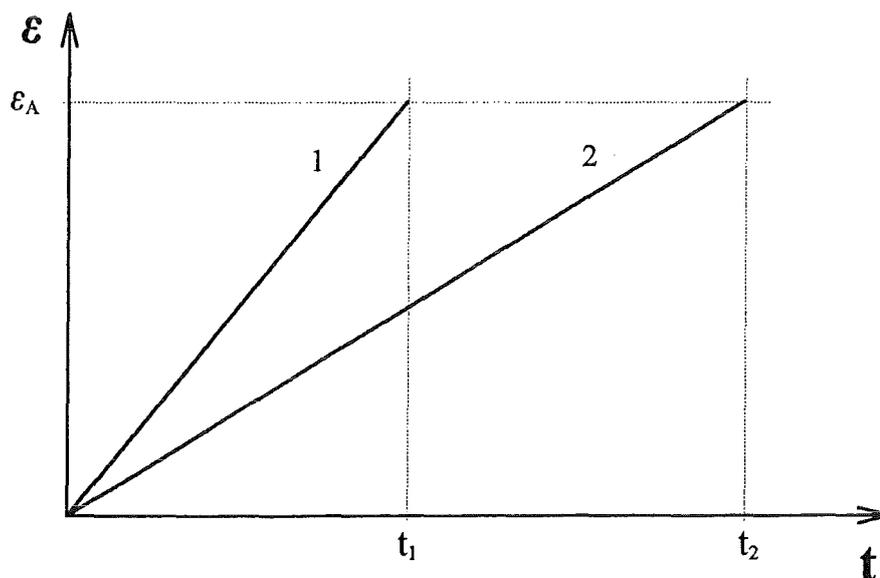


Bild 3.3: Dehnungsgeschichte (qualitativ) der Versuchsart 1 für zwei verschiedene Proben.

2. Bei der Versuchsart 2 werden Proben bis zur Dehnung ε_A belastet. Anschließend wird die Gesamtdehnung bei ε_A konstant gehalten ($\varepsilon_A = \varepsilon_B$). Ziel ist es, das Relaxationsverhalten des Materials zu bestimmen und dieses mit dem Relaxationsverhalten der Versuchsart 3 zu vergleichen. Die Haltezeiten $t_B - t_A$ (s. Bild 3.4) bzw. $t_c - t_b$ (s. Bild 3.5) wurden konstant gleich 3600 s gewählt.

Versuchsart 2:

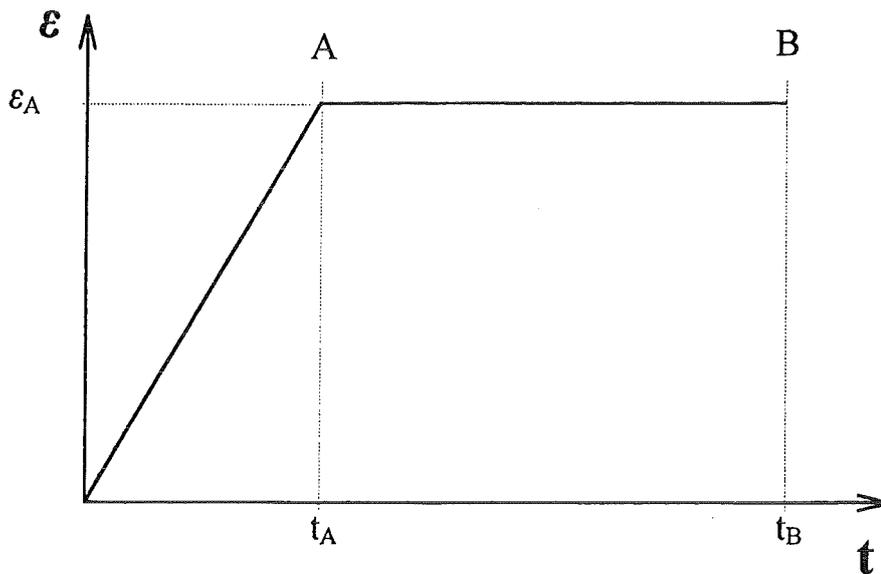


Bild 3.4: Dehnungsgeschichte (qualitativ) der Versuchsart 2.

3. Das Material wird bei Versuchsart 3 mit derselben Dehnrates wie bei Versuchsart 2 bis zu einer Dehnung $\varepsilon_a > \varepsilon_A$ so belastet, daß bei einer anschließenden Entlastung auf die Dehnung $\varepsilon_b = \varepsilon_A$ die Spannung $\sigma|_{\varepsilon=\varepsilon_b} > \sigma|_{\varepsilon=\varepsilon_b}$ bleibt. Anschließend wird die Gesamtdehnung bei ε_b für dieselbe Haltezeit wie bei Versuchsart 2 konstant gehalten. Es sollen Vergleiche mit Voraussagen der vorgestellten Viskoplastizitätsmodelle gezogen werden.
4. Bei Versuchsart 4 wird der Belastungsverlauf durch Haltezeiten (3600 s) unterbrochen. Es sollen Dehnungs-Spannungs-Punkte ermittelt werden, die in der Nähe der Gleichgewichtszustände liegen. Auch sollen am Ende oder während des Belastungsverlaufs Teilentlastungen vorgenommen werden.

Anmerkung: Den Dehnungen ε_A , ε_a und ε_b werden im Kap. 3.2 Spannungen zugeordnet, denen für die Auswertung der Versuche Bedeutung zukommt (vgl. 3.2.1 - 3.2.7).

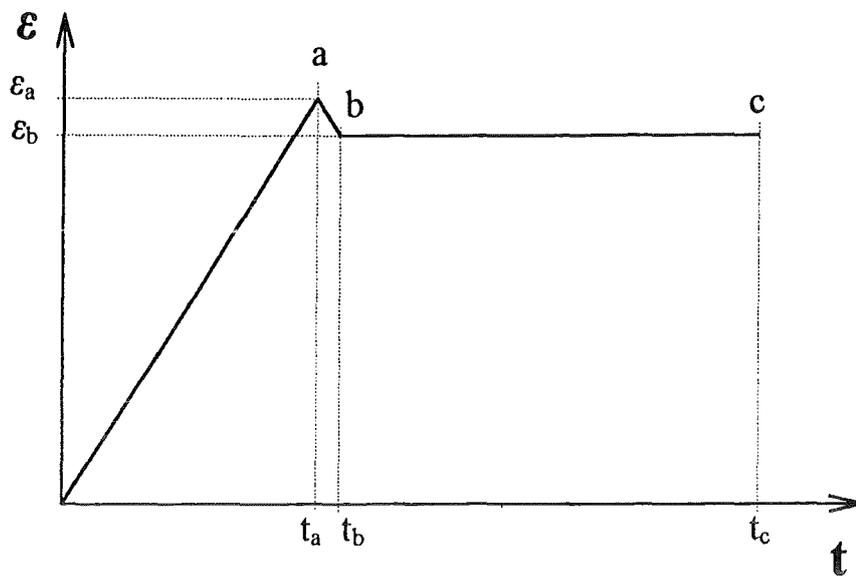
Versuchsart 3:

Bild 3.5: Dehnungsgeschichte (qualitativ) der Versuchart 3.

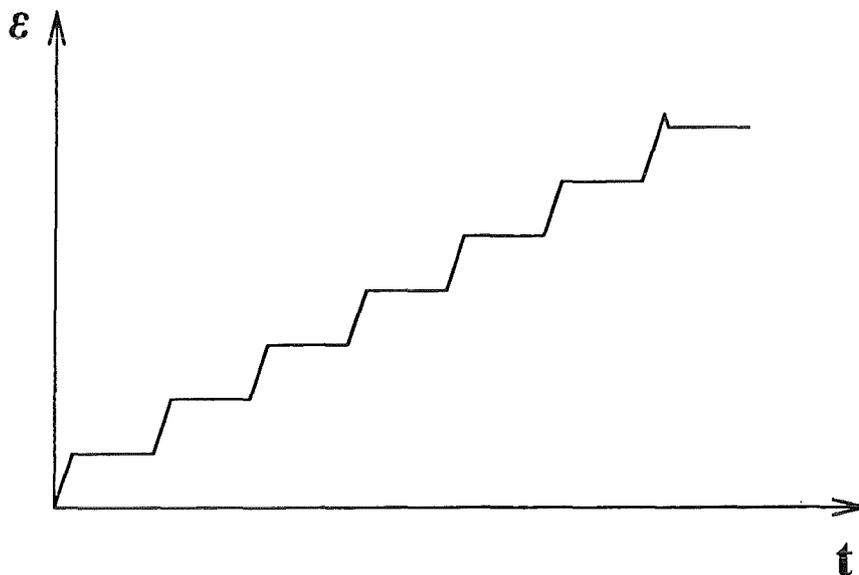
Versuchsart 4:

Bild 3.6: Dehnungsgeschichte (qualitativ) der Versuchart 4.

3.2 Versuchsergebnisse

Im folgenden werden die experimentellen Ergebnisse aus dehnungsgesteuerten eindimensionalen Zugbelastungen mit und ohne Haltezeiten analysiert, die nach den Versuchsarten 1-4 durchgeführt wurden (vgl. Kap. 3.1.2). Um zu entscheiden, welches Viskoplastizitätsmodell am besten zu dem betreffenden Material paßt, wurde bei der Auswertung der Relaxationskurven eine auf die Spannung σ^* bezogene Darstellung gewählt und die Zeitachse in logarithmischer Darstellung aufgezeichnet:

Hierin bedeutet σ^* stets:

$$\sigma^* = \begin{cases} \sigma_A & \text{für Experimente ohne Teilentlastung (Versuchsart 2)} \\ \sigma_a & \text{für Experimente mit Teilentlastung (Versuchsart 3)} \end{cases}$$

Anmerkung: Zur besseren Übersichtlichkeit wurde bei den Diagrammen "Einzelheit Z" die Dehnung während der Relaxationsphase nachträglich bearbeitet und auf einen konstanten Mittelwert gesetzt. Infolge der Digitalisierung und der geringen Schwankungen wären ansonsten bei einer solch hochauflösenden Darstellung die aufgetretenen Effekte nur undeutlich zu erkennen gewesen.

3.2.1 Ergebnisse der Versuchsreihe an Zirkalloy (ZrY)

Zirkalloy (ZrY) weist eine deutliche Abhängigkeit der Spannungsantwort von der Dehnrates auf (vgl. Bild 3.7). Der linear elastische Bereich bis zur Fließgrenze ist geschwindigkeitsunabhängig. Dies äußert sich dadurch, daß in diesem Bereich keine Relaxation festzustellen ist. Außerdem ist nur eine minimale Streuung der Dehnungs-Spannungs-Kurven von unterschiedlichen Proben mit gleicher Dehnungsgeschichte zu verzeichnen.

In Bild 3.8 sind die Spannungsantworten nach Versuchsart 2 und 3 aufgetragen. Bis zur Dehnung $\epsilon(A)$ verhalten sich beide Proben nahezu identisch. Nach einer Relaxationszeit von 3600 s weisen beide Proben den nahezu gleichen Spannungswert auf. Diese Tatsache ist auch dem Zeit-Spannungs-Diagramm 3.10 zu entnehmen.

Bei den Experimenten nach Versuchsart 4 zeigt sich, daß sich nach jeder Haltezeit der Dehnungs-Spannungs-Punkt asymptotisch demjenigen aus Versuchsart 1 annähert. Man

beobachtet weiterhin, daß zu Beginn jeder neuen Belastungsphase die Steigung etwa den gleichen Wert hat wie zu Versuchsbeginn und insbesondere unabhängig von der Dehnung ist. Insgesamt deuten also die experimentellen Ergebnisse darauf hin, daß das Materialverhalten von Zirkalloy am besten im Rahmen des Materialmodells mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung beschrieben werden kann (vgl. Kap. 2.3).

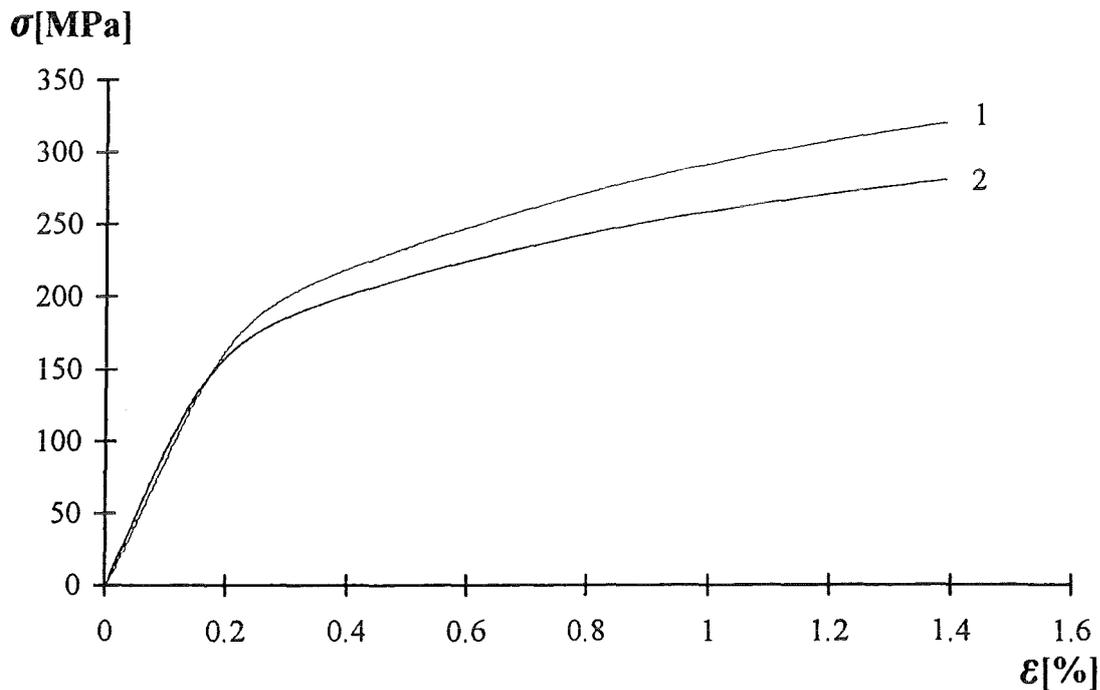


Bild 3.7: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 1 an ZrY.
($\dot{\epsilon}_1 = 0,001$ 1/s ; $\dot{\epsilon}_2 = 0,000001$ 1/s)

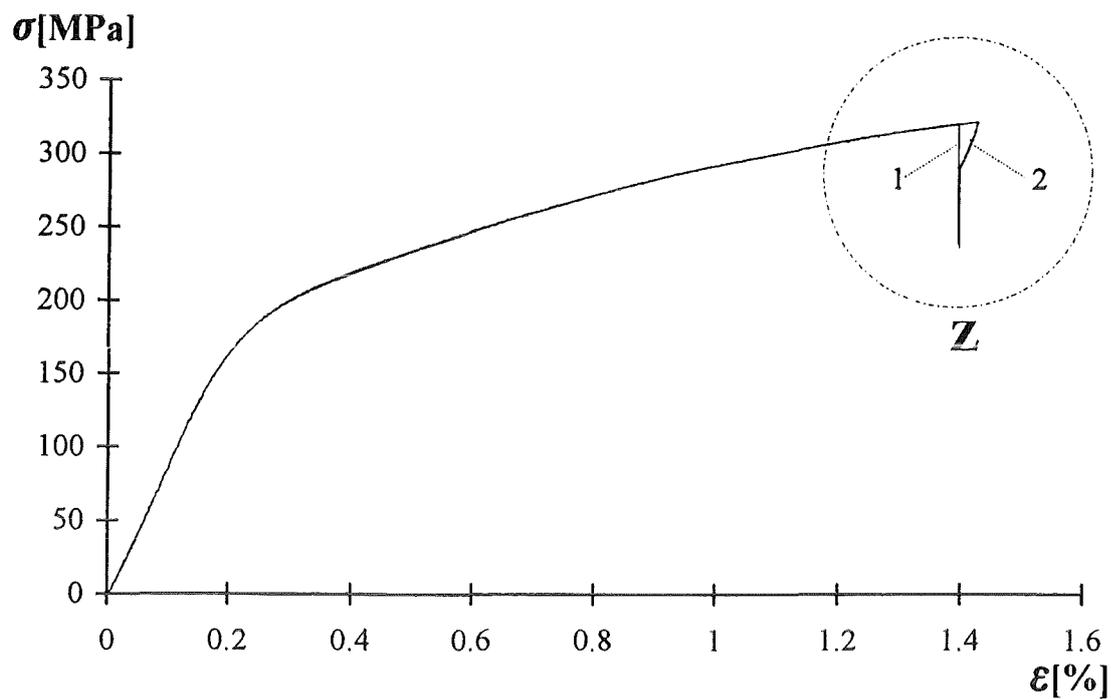


Bild 3.8: Dehnungs-Spannungs-Verhalten von ZrY nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2). ($\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s)

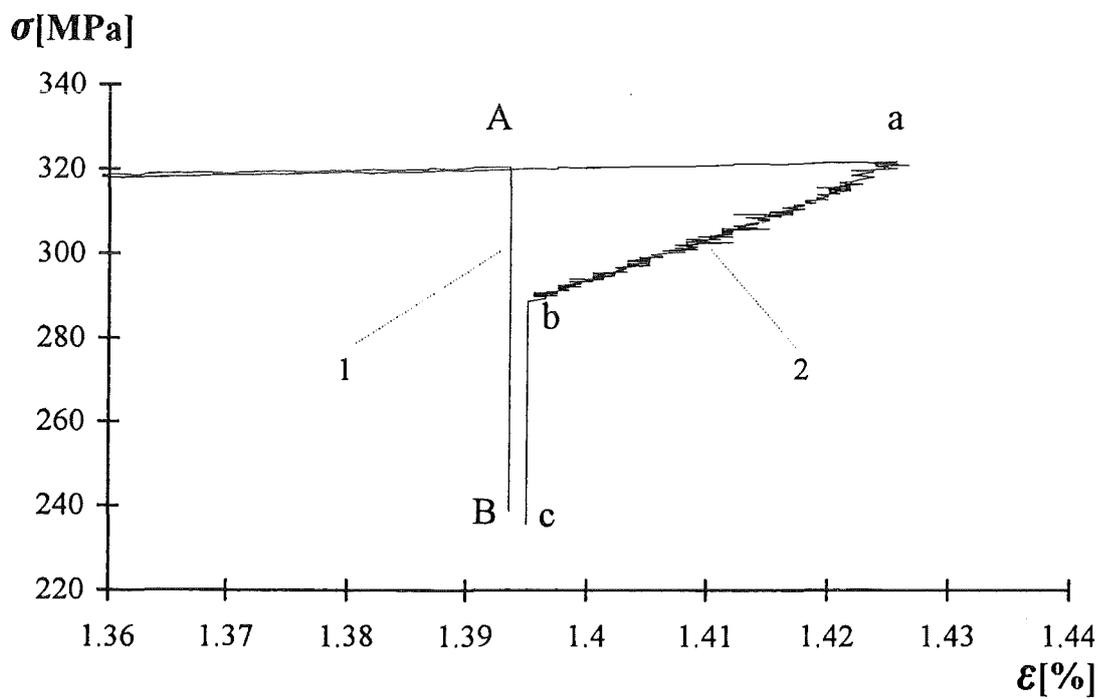


Bild 3.9: Einzelheit Z.

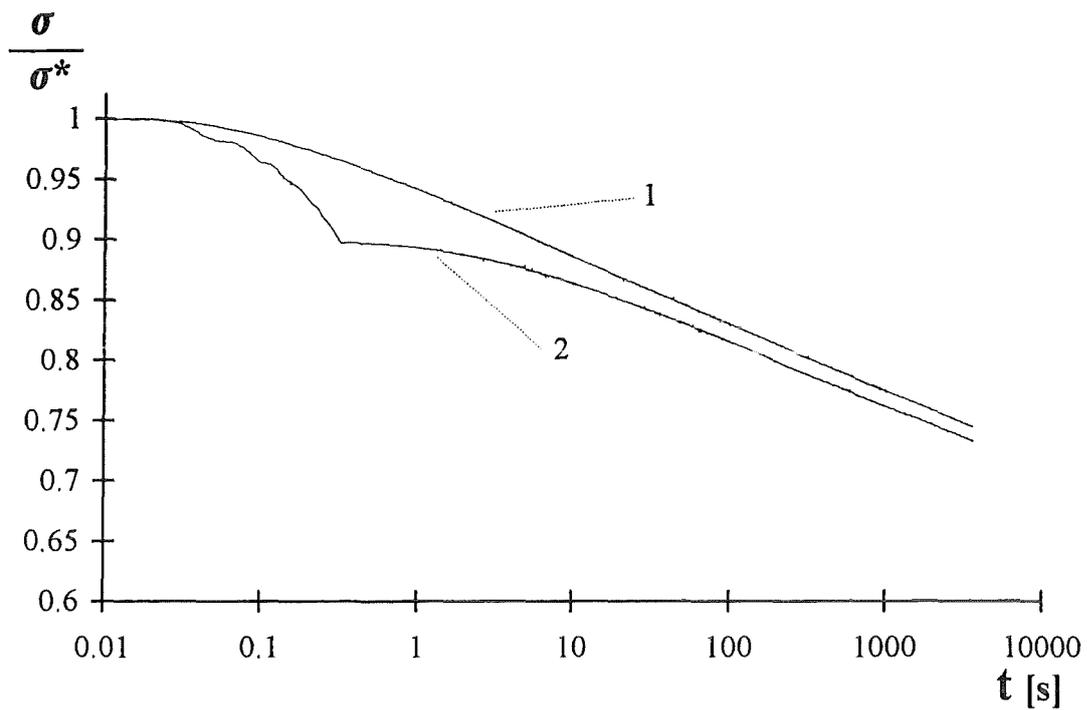
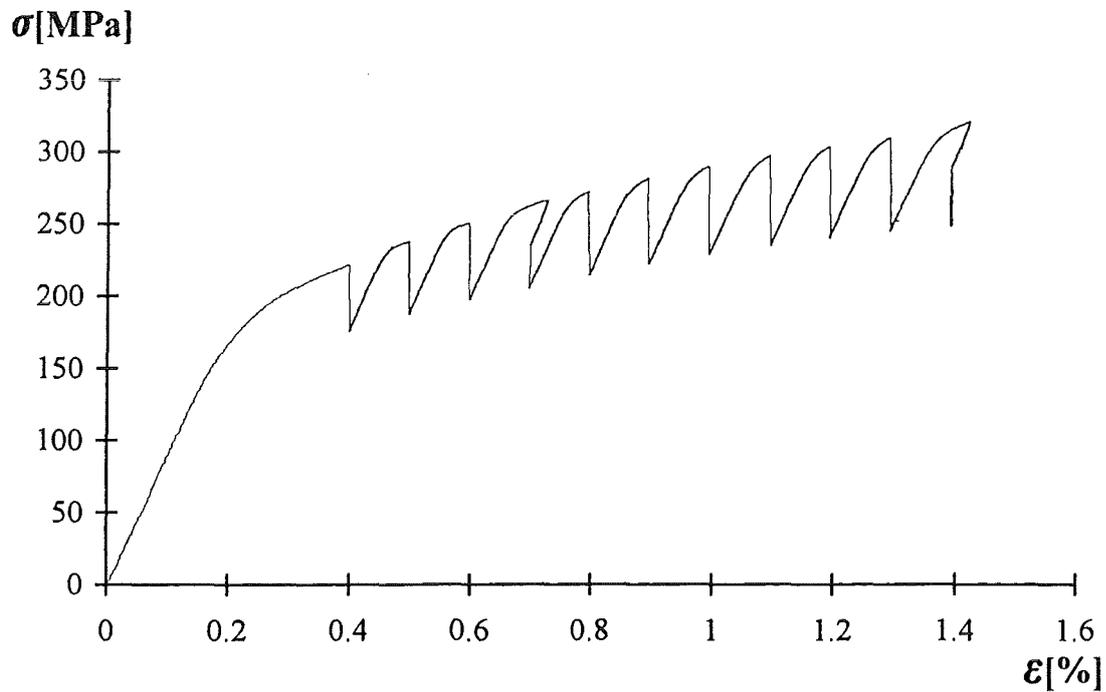


Bild 3.10: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.9.

Bild 3.11: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an ZrY für $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s.

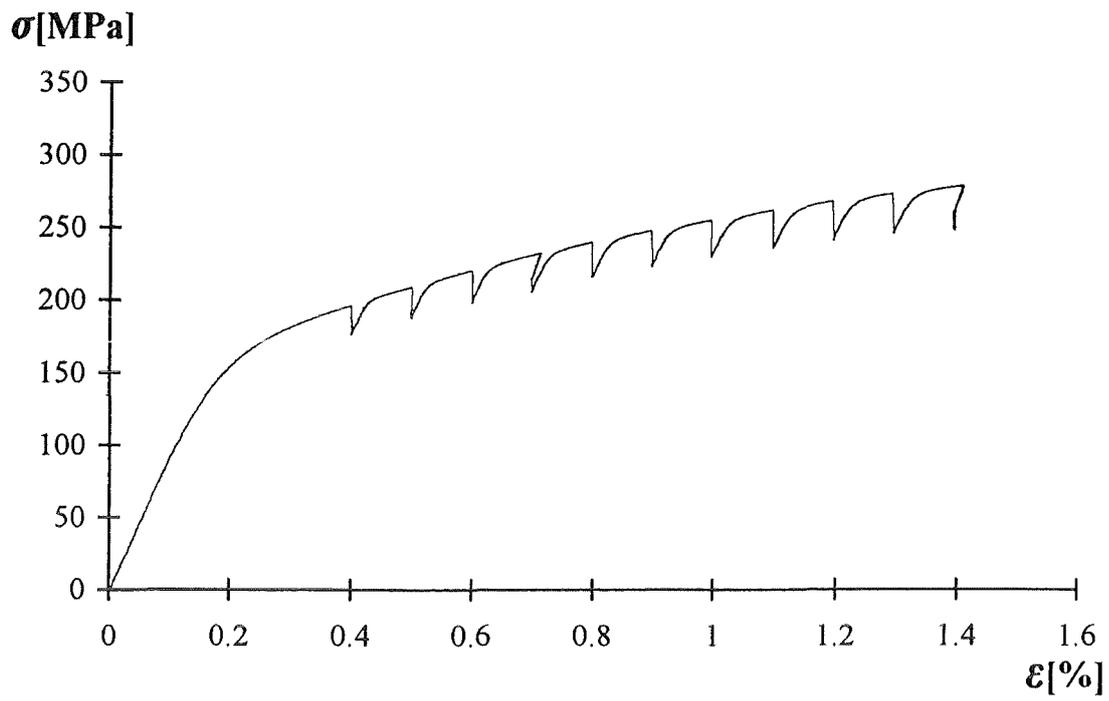


Bild 3.12: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an ZrY für $\dot{\epsilon} = 0,000001$ 1/s.

3.2.2 Ergebnisse der Versuchsreihe an AISI 316

Die Experimente an dem austenitischen Stahl mit der amerikanischen Bezeichnung AISI 316 weisen ähnliche Eigenschaften wie Zirkalloy auf. Die Streuung der Meßergebnisse ist jedoch weitaus größer. Hier erweist sich aber bei der Darstellung der Relaxationsvorgänge die Normierung als äußerst nützlich (vgl. Bild 3.15). Man erkennt, daß Proben nach Versuchsart 2 und 3 sich relativ etwa demselben Grenzwert nähern. Insgesamt beträgt die prozentuale Spannungsabnahme während der Relaxation weniger als bei Zirkalloy und ist nahezu beendet. Verbindet man gedanklich die Abbruchpunkte der Relaxationsvorgänge aus Bild 3.16, so reiht sich der letzte Abbruchpunkt gewissermaßen nahtlos darin ein, obwohl zuvor eine Teilentlastung erfolgte. Daraus aber kann gefolgert werden, daß sich das Materialverhalten auch hier am besten im Rahmen des Viskoplastizitätsmodells mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung beschreiben läßt (vgl. Kap.2.3).

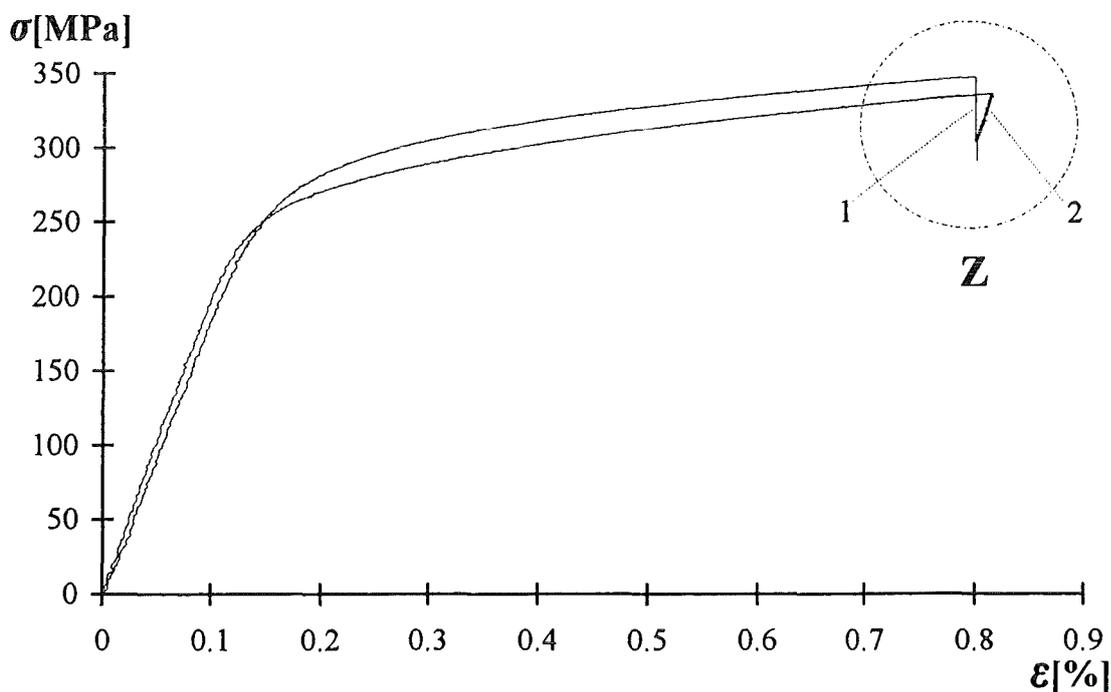


Bild 3.13: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an AISI 316 nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2). ($\dot{\epsilon} = 0,0001$ 1/s; Relaxationszeit 3600 s)

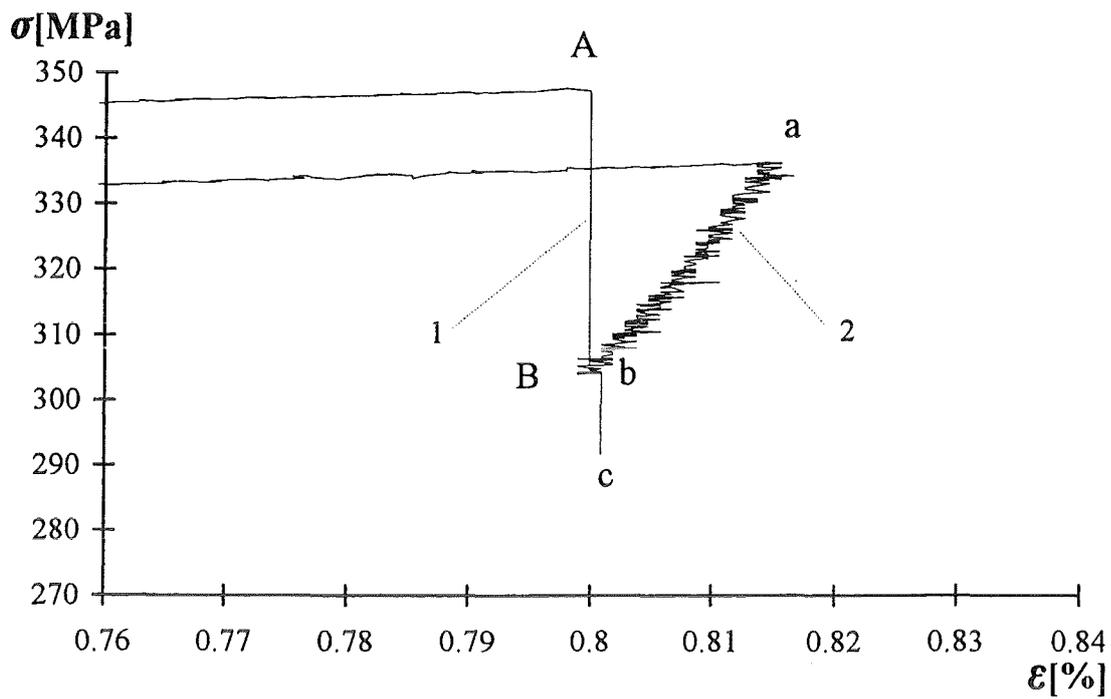


Bild 3.14: Einzelheit Z.

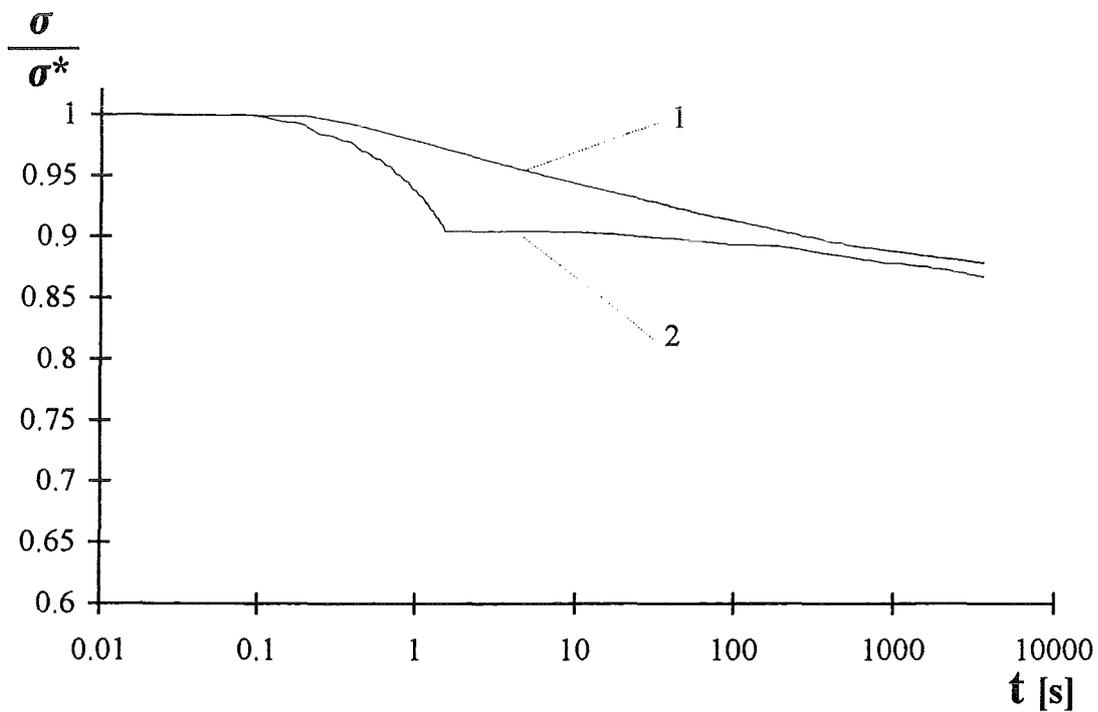


Bild 3.15: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.14 (Relaxationszeit 3600 s).

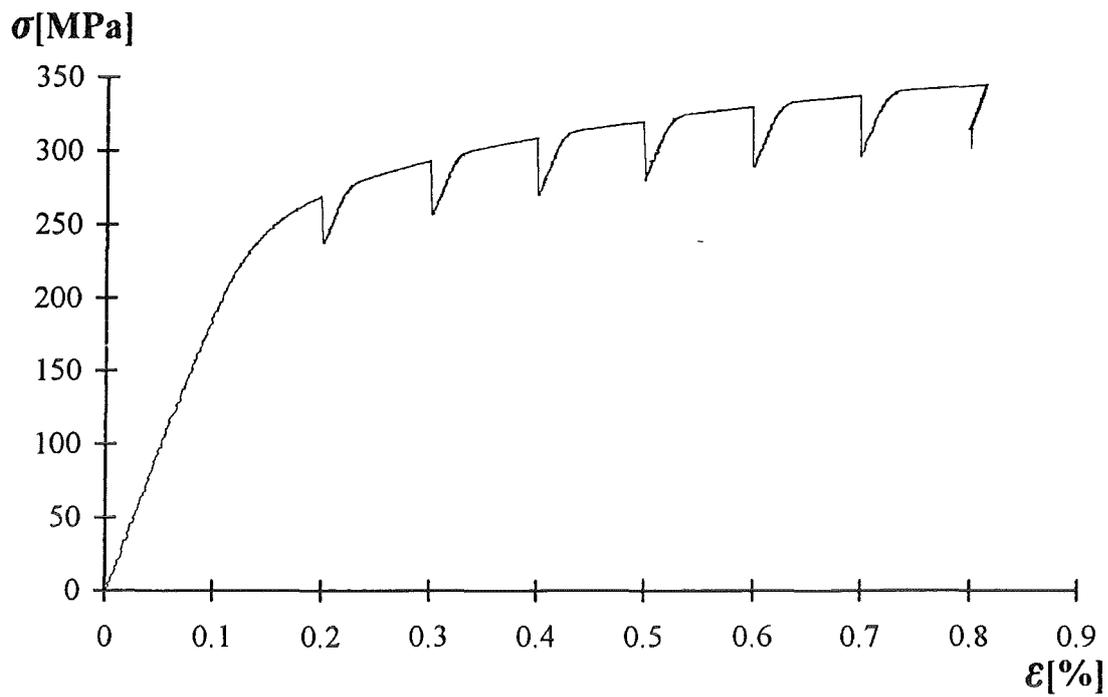


Bild 3.16: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an AISI 316.
($\dot{\epsilon} = 0,0001$ 1/s; Haltezeiten: je 3600 s)

3.2.3 Ergebnisse der Versuchsreihe an 1.4571

Die Versuchsergebnisse für die Stahlsorten mit der Werkstoffnummer 1.4517 und 1.4914 können folgendermaßen zusammengefaßt werden. Proben nach Versuchsart 2 und 3 weisen nach der Haltezeit von 3600 s praktisch dieselben Dehnungs-Spannungs-Werte auf. Beide Stähle zeigen unterhalb der Fließspannung kein Relaxationsverhalten. Bei den Experimenten nach Versuchsart 4 liegen alle Abbruchpunkte der Relaxationsprozesse in einer gedachten Linie, unabhängig davon, ob zuvor eine Teilentlastung stattfindet oder nicht. Obwohl die Streuung der Ergebnisse bei 1.4914 etwas höher ist, kann trotzdem davon ausgegangen werden, daß beide Materialien gut durch die Modellvorstellung mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung beschrieben werden können.

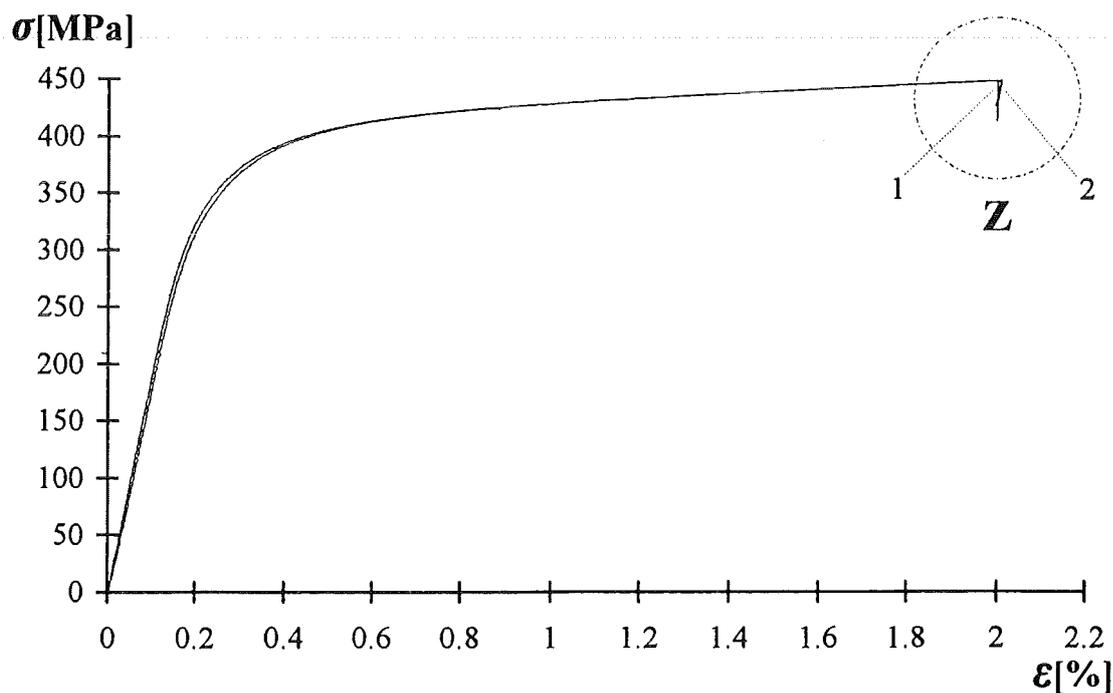


Bild 3.17: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an 1.4571 nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2). ($\dot{\epsilon} = 0,0002 \text{ 1/s}$, Relaxationszeit 3600 s)

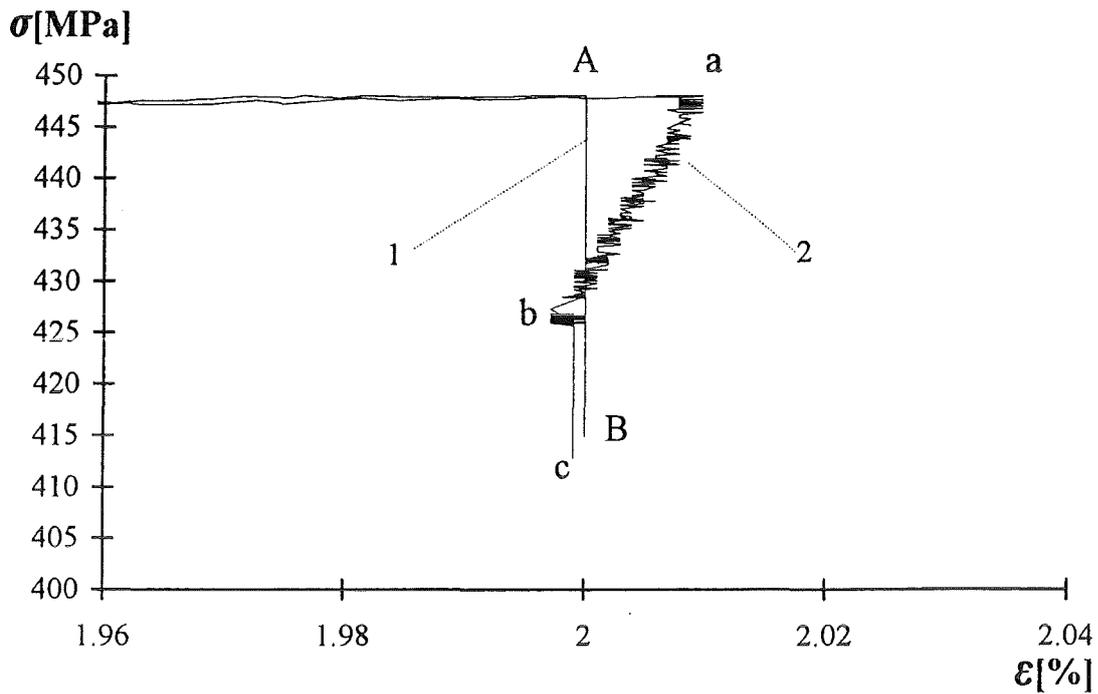


Bild 3.18: Einzelheit Z.

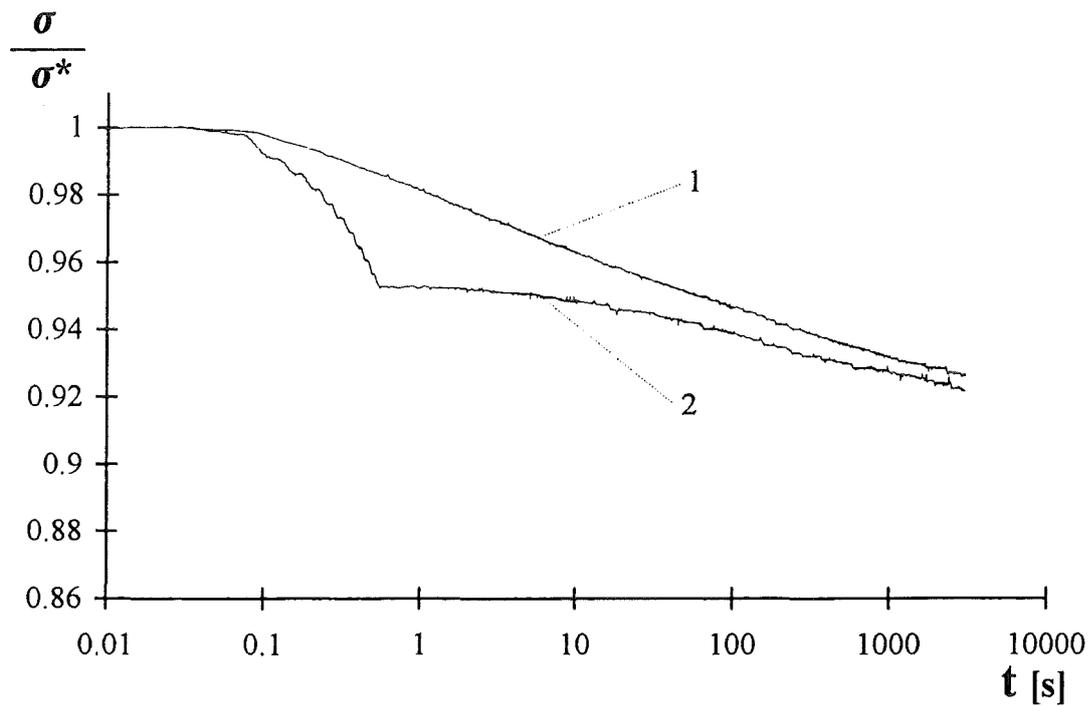


Bild 3.19: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.18 (Relaxationszeit 3600 s).

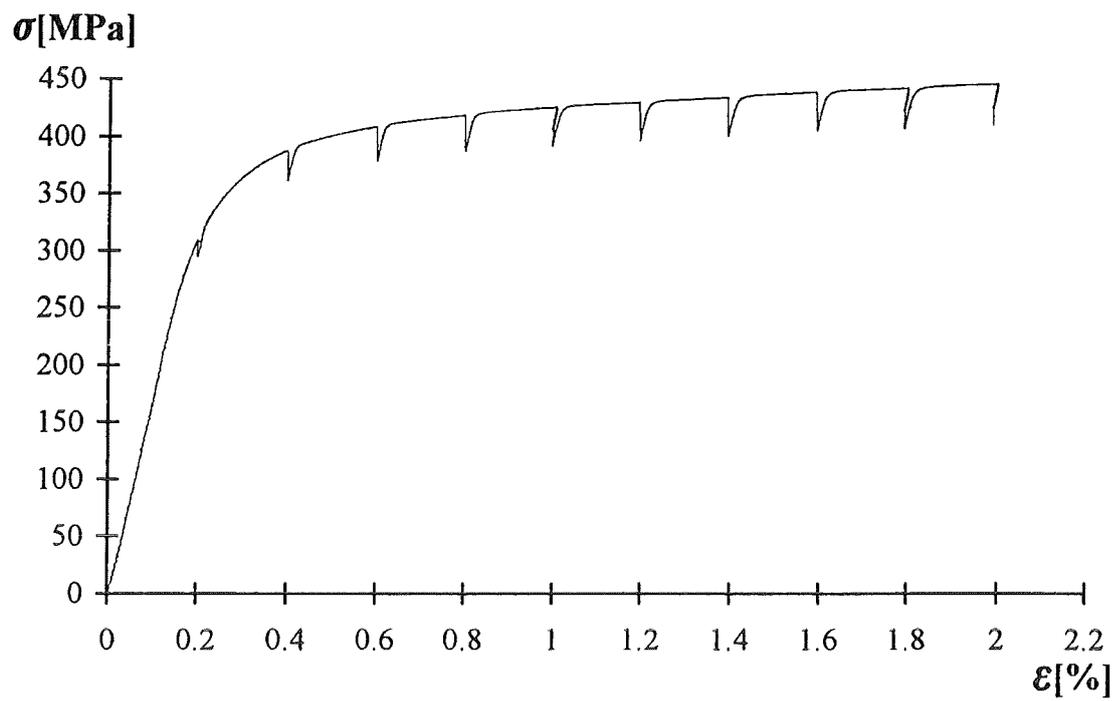


Bild 3.20: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an 1.4571.
($\dot{\epsilon} = 0,0002$ 1/s, Haltezeiten: je 3600 s)

3.2.4 Ergebnisse der Versuchsreihe an 1.4914

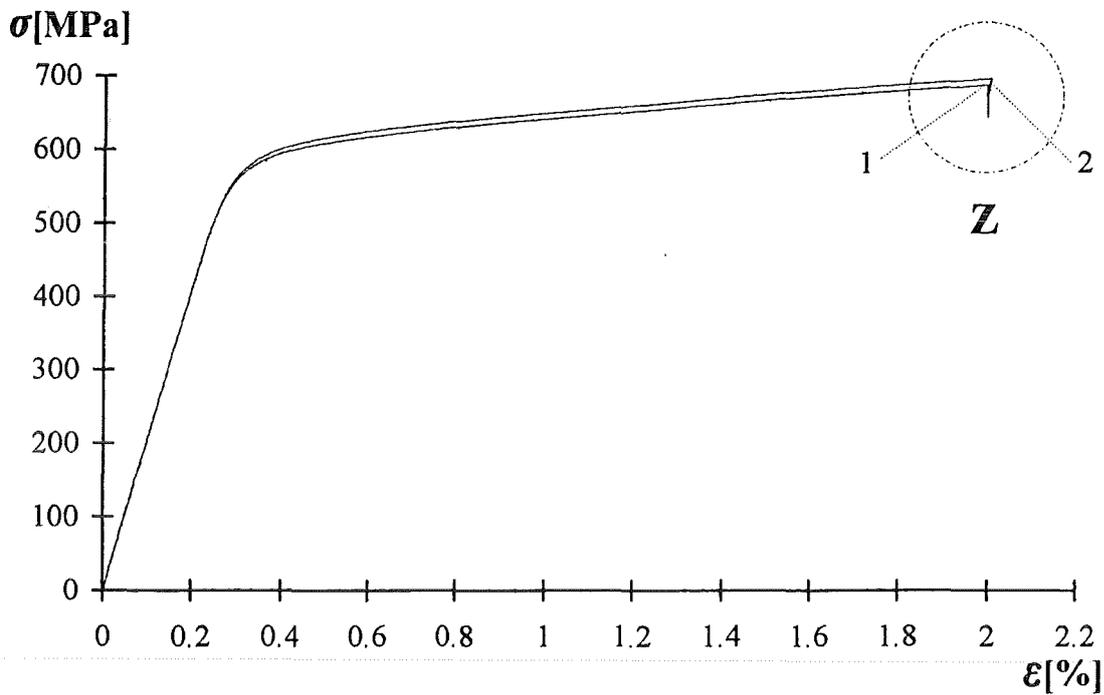


Bild 3.21: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an 1.4914 nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2). ($\dot{\epsilon} = 0,0001$ 1/s, Relaxationszeit 3600 s)

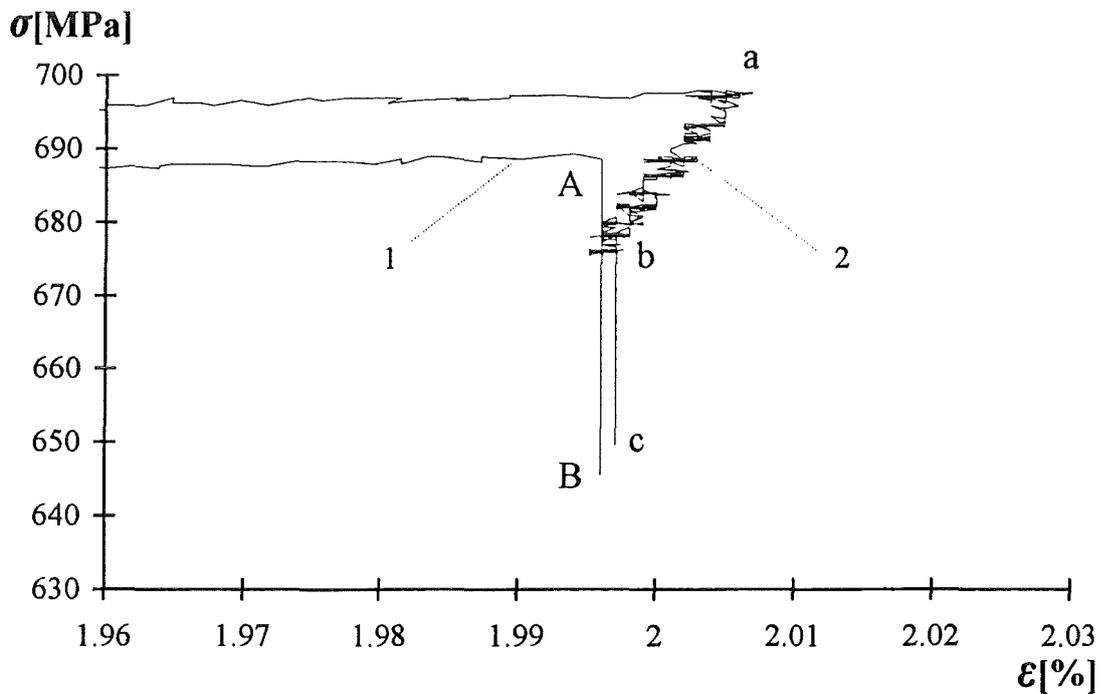


Bild 3.22: Einzelheit Z.

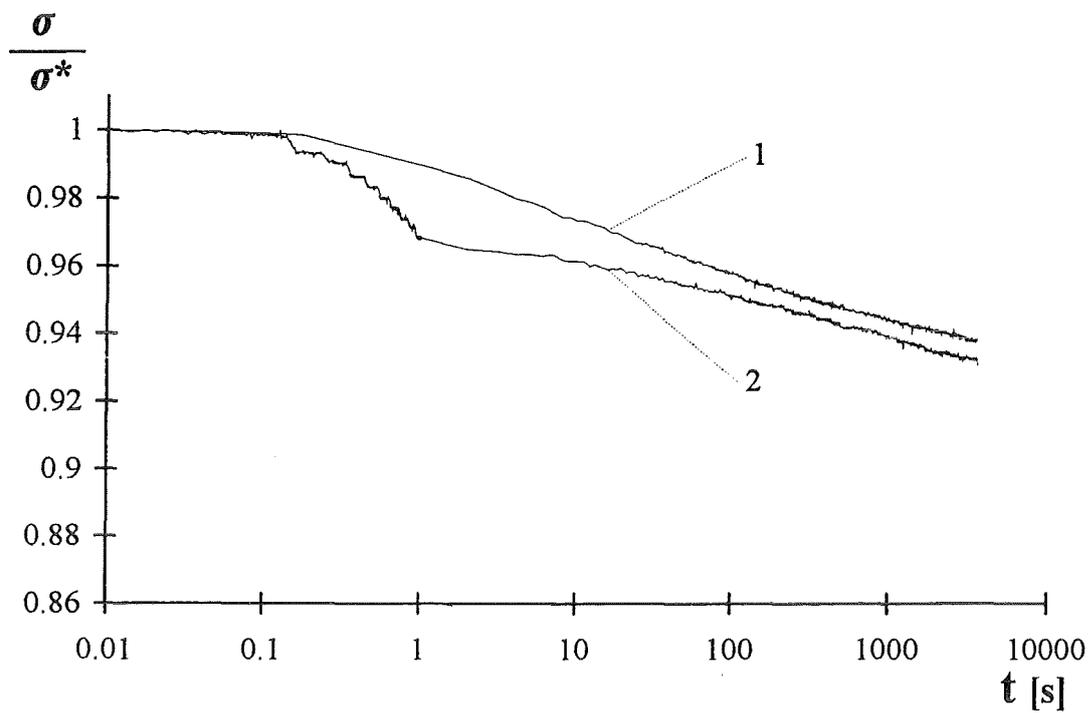
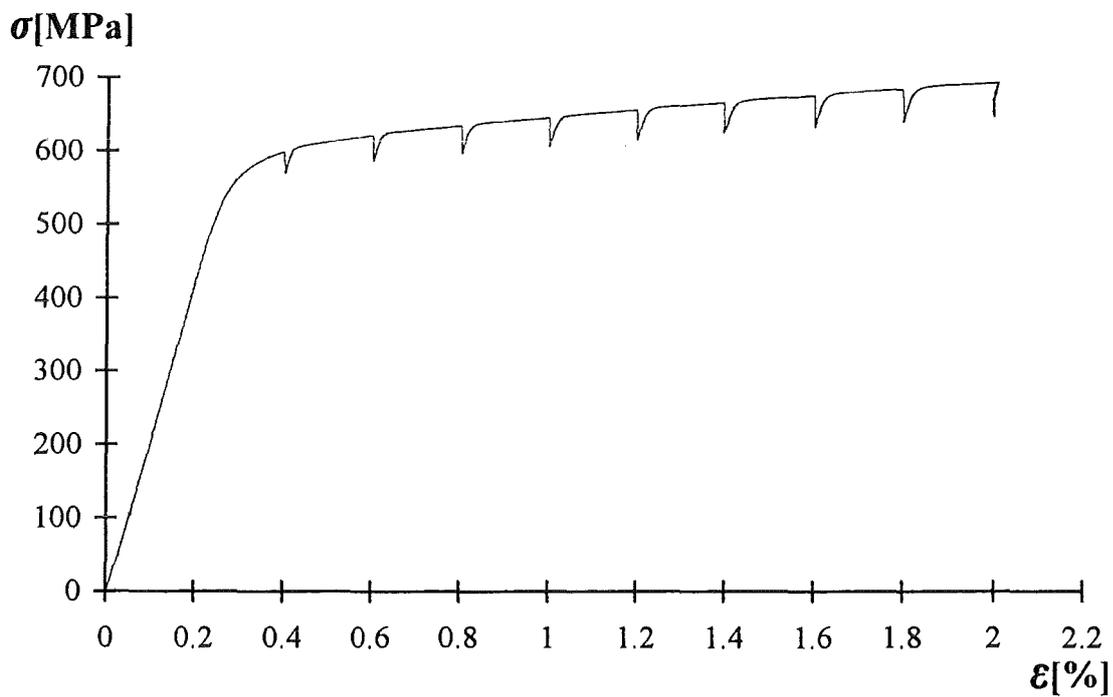


Bild 3.23: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.22 (Relaxationszeit 3600 s).

Bild 3.24: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an 1.4914.
($\dot{\epsilon} = 0,0001$ 1/s, Haltezeiten: je 3600 s)

3.2.5 Ergebnisse der Versuchsreihe an Bronze

Die Spannungsantwort bei Bronze nach Versuchsart 1 (vgl. Bild 3.25 Kurve 1, 4 und 5) weist unterhalb der ausgeprägten Fließgrenze eine geringe Abhängigkeit von der gewählten Dehnrage auf, oberhalb der Fließgrenze ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit dagegen stark ersichtlich und unterlinear. Bronze weist von allen anderen vorgestellten Materialien am deutlichsten ein Relaxationsverhalten auf, wie es die Modellvorstellung mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung vorhersagt. In Bild 3.27 erkennt man, daß die Probe nach Versuchsart 3 ziemlich genau zu einem Gleichgewichtszustand entlastet worden ist, während die Probe nach Versuchsart 1 diesem Spannungswert deutlich entgegenstrebt. Die Abbruchpunkte der Relaxationsprozesse nach Versuchsart 4 liegen unterhalb der monotonen Kurve 5 mit der niedrigsten Dehnrage. Insbesondere liegen sie in einer gedachten Linie, deren Verlauf unabhängig davon zu sein erscheint, ob vor den Relaxationsprozessen eine Teilentlastung erfolgt oder nicht.

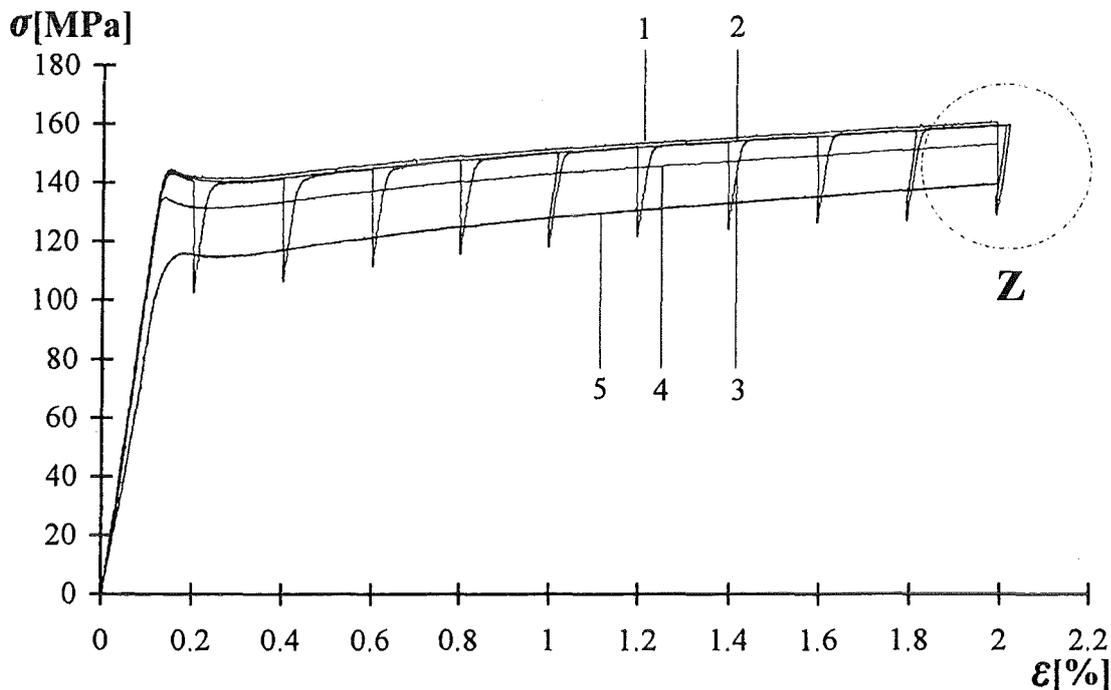


Bild 3.25: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an Bronze nach Versuchsart 1 (Kurve 1, 4 und 5), 2 (Kurve 1), 3 (Kurve 2) und 4 (Kurve 3). (Haltezeiten (Kurve3): je 3600 s
 $\dot{\epsilon}_{1,2,3} = 0,001 \text{ 1/s}$; $\dot{\epsilon}_4 = 0,0001 \text{ 1/s}$; $\dot{\epsilon}_5 = 0,000001 \text{ 1/s}$)

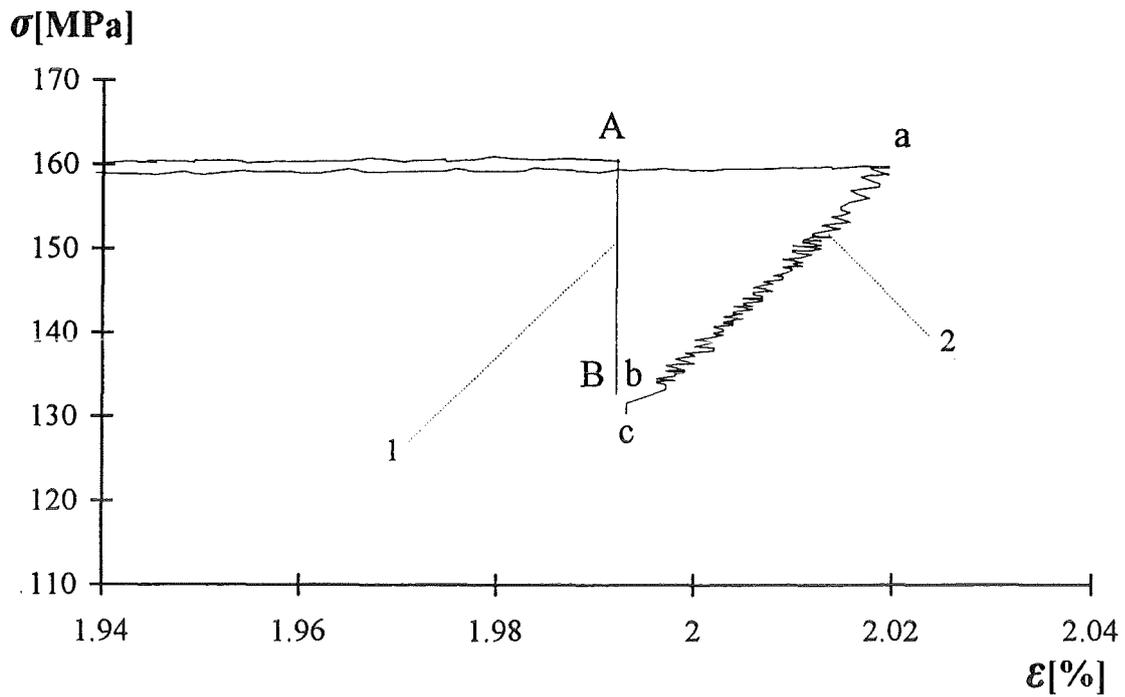


Bild 3.26: Einzelheit Z der Kurven 1 und 2 aus Bild 3.25.

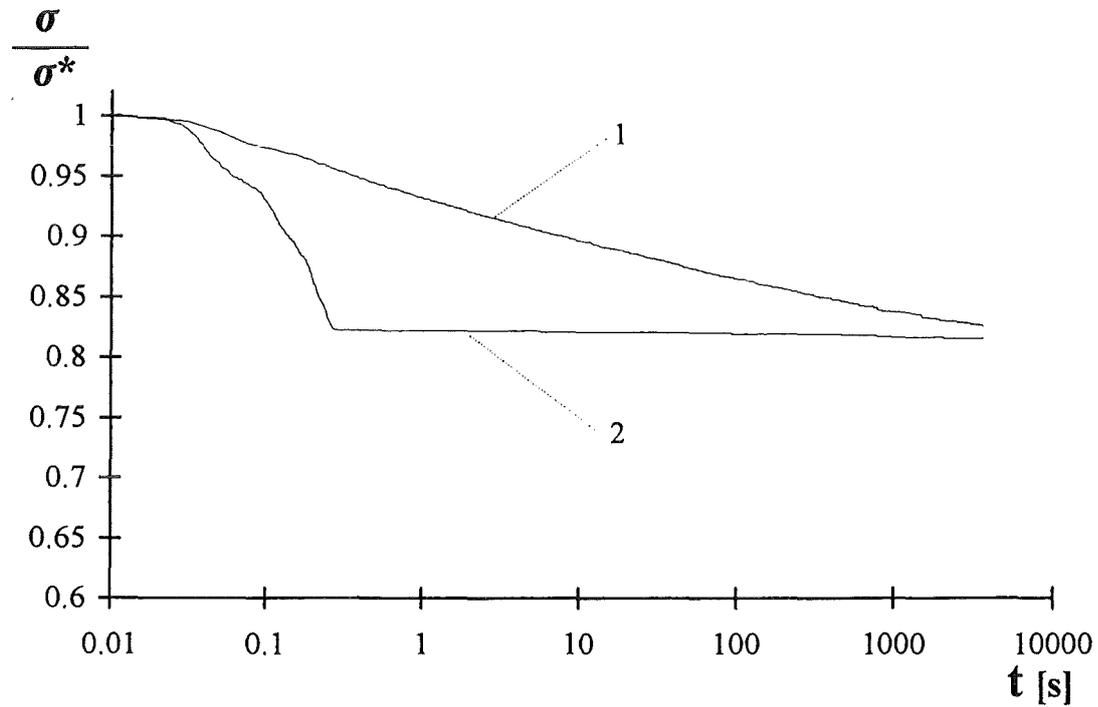


Bild 3.27: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.26.

3.2.6 Ergebnisse der Versuchsreihe an Al 5N

Bei Reinaluminium ist es versuchstechnisch schwierig, die gewünschten Effekt zu realisieren, da das Material eine sehr niedrige Fließgrenze besitzt und der Elastizitätsmodul relativ hoch ist. Dennoch sind Unterschiede gegenüber den bisher erläuterten Ergebnissen im Materialverhalten von Al 5N zu erkennen. Proben, die Dehnungsgeschichten nach Versuchsart 2 und 3 erfahren haben (vgl. Bilder 3.28 - 3.30), weisen ein unterschiedliches Relaxationsverhalten auf. Es kann nicht mehr davon ausgegangen werden, daß derselbe Gleichgewichtszustand erreicht wird. Ebenso ist festzustellen, daß die Spannungsabnahme nach der gewählten Haltezeit offenbar noch nicht abgeschlossen ist. Daher ist eine abschließende Bewertung des Relaxationsverhaltens nicht möglich. Verbindet man die Abbruchpunkte der Relaxationsphasen in Bild 3.31 bis auf den letzten, so wird eine Kennlinie gebildet, deren Extrapolation durch diesen letzten Abbruchpunkt (nach Teilentlastung und Haltezeit) deutlich unterschritten wird. Daher scheint die Modellvorstellung mit Überspannung bezogen auf die Gleichgewichtsspannung eher zur Beschreibung des Materialverhaltens von Reinaluminium geeignet.

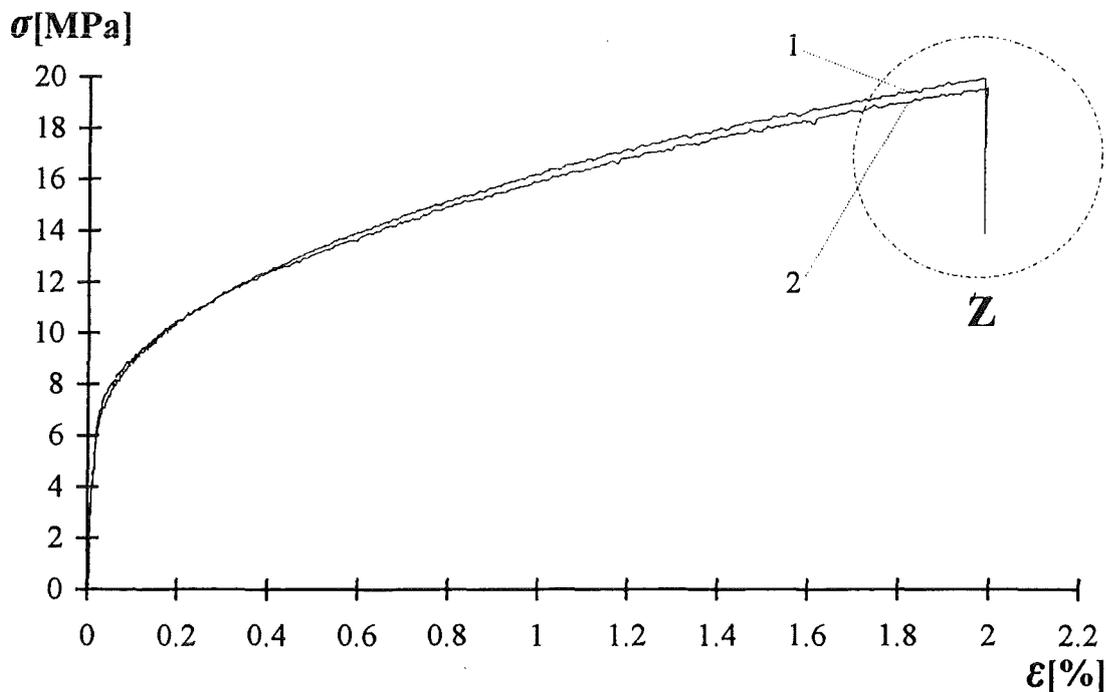


Bild 3.28: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an Al 5N nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2). ($\dot{\epsilon} = 0,0005 \text{ 1/s}$, Relaxationszeit 3600 s)

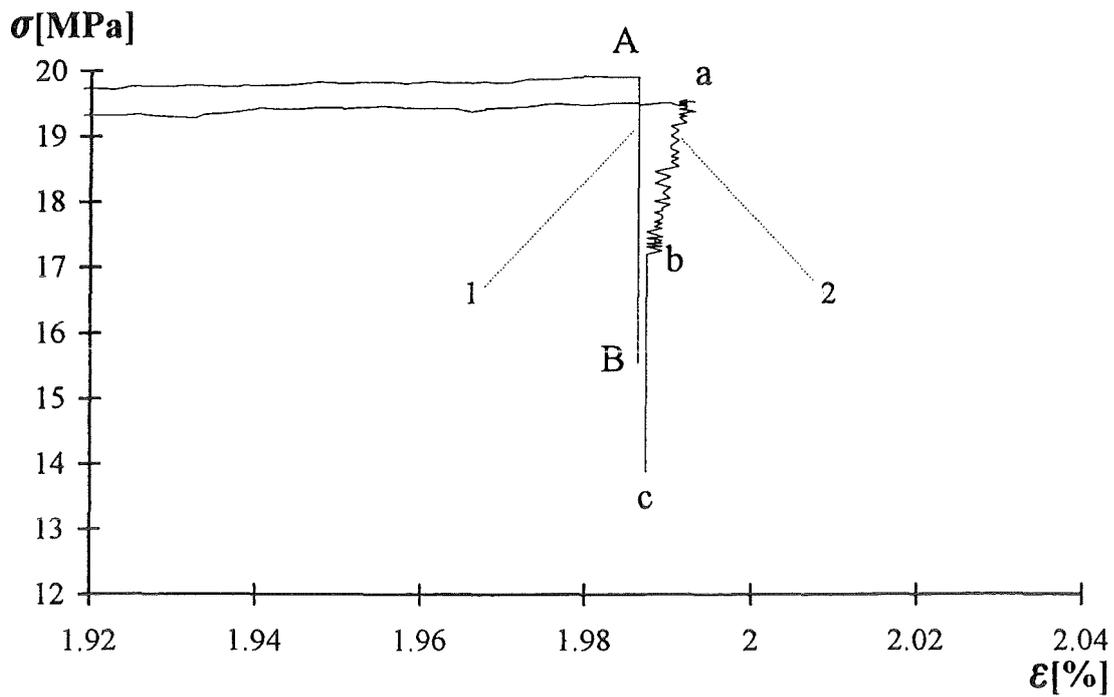


Bild 3.29: Einzelheit Z.

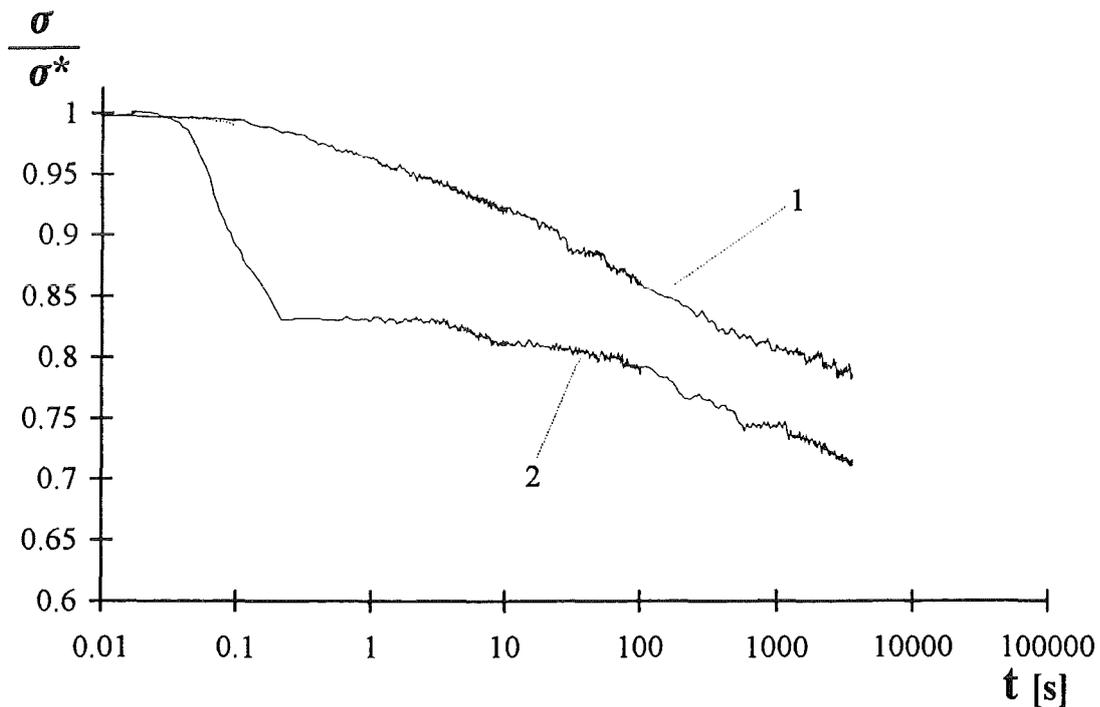


Bild 3.30: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.29 (Relaxationszeit 3600 s).

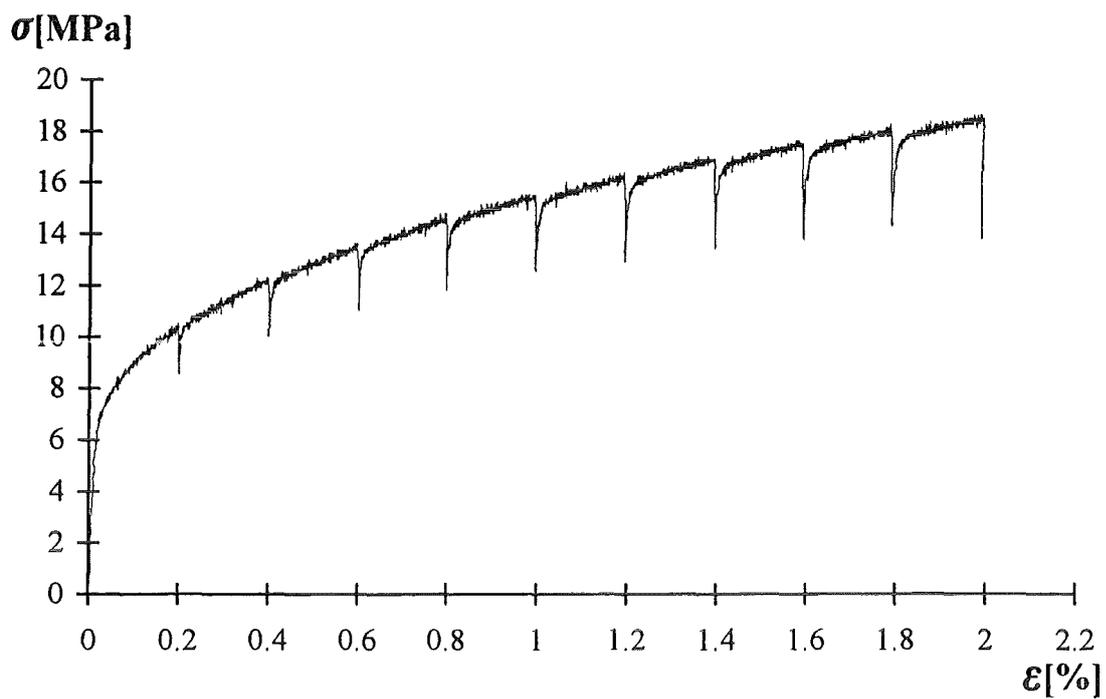


Bild 3.31: Dehnungs-Spannungs-Verhalten nach Versuchsart 4 an Al 5N.
($\dot{\epsilon} = 0,0005$ 1/s, Haltezeiten: je 3600 s)

3.2.7 Ergebnisse der Versuchsreihe an AlMgSi

Ebenso wie Reinaluminium zeigt auch die Al - Legierung AlMgSi die Tendenz bei Versuchsart 2 und 3 zu verschiedenen Gleichgewichtszuständen zu streben (vgl. Bilder 3.32 - 3.34). Offensichtlich ist auch hier die Spannungsabnahme nach der Relaxationszeit von 3600 s noch nicht abgeschlossen. Experimente nach Versuchsart 4 weisen bei diesem Material auch bei kleinen Dehnraten Reckalterungseffekte auf, so daß sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

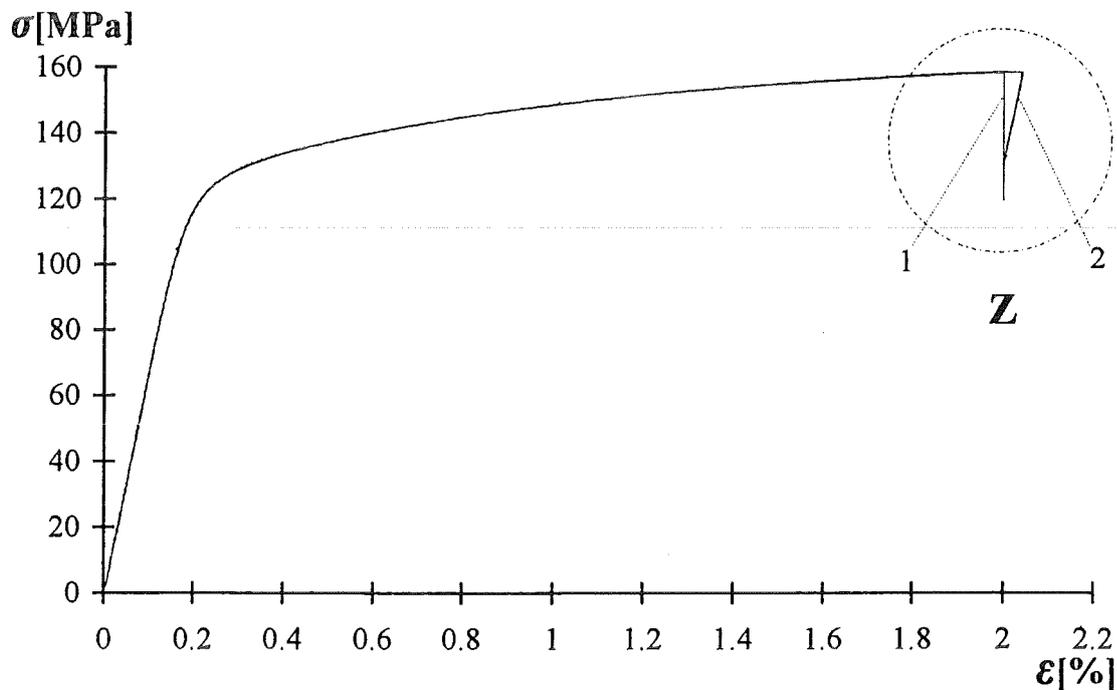


Bild 3.32: Dehnungs-Spannungs-Verhalten an AlMgSi nach Versuchsart 2 (Kurve 1) und 3 (Kurve 2).
($\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s, Haltezeit 3600 s)

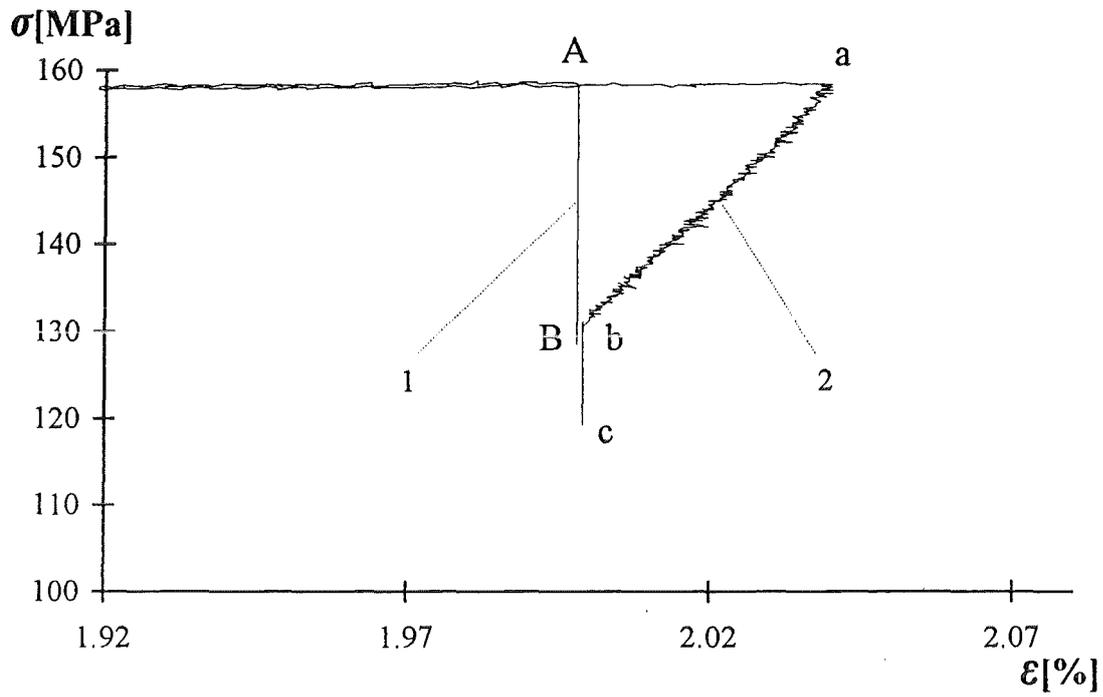


Bild 3.33: Einzelheit Z.

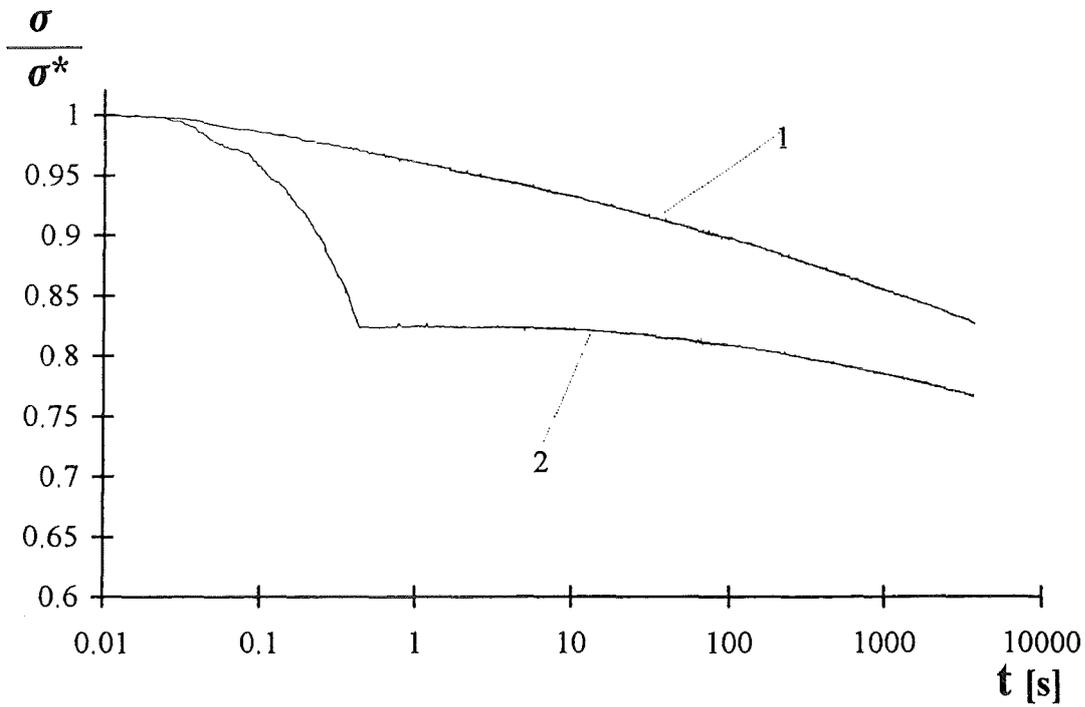


Bild 3.34: Relaxationsverhalten der Proben aus Bild 3.33 (Relaxationszeit 3600 s).

Kapitel 4

4. Zusammenfassung

Diese Arbeit stützt sich im wesentlichen auf drei Schwerpunktbereiche, die mit den folgenden Stichwörtern bezeichnet werden können:

- Eindimensionale Betrachtungen zweier Viskoplastizitätsmodelle für den Sonderfall $E=E(G)$.
 - Spannungsantwort beider Modellvorstellungen bei Variation der Dehnungsgeschichte
 - Experimentelle Ermittlung der Gleichgewichtsspannung an verschiedenen Materialien und qualitativer Vergleich mit den Voraussagen der dargestellten Modellbildungen.
1. In beiden Modellvorstellungen der Viskoplastizität wird von einer Überspannung Gebrauch gemacht. Im Rahmen des ersten Modells wird die Überspannung als Differenz der aktuellen Spannung und der Gleichgewichtsspannung, im Rahmen des zweiten Modells als Differenz der aktuellen Spannung und der statischen Spannung definiert. Die Gleichgewichtsspannung ergibt sich beim ersten Modell als ein geschwindigkeitsunabhängiges Funktional vom Plastizitätstyp, wobei die momentane Gleichgewichtsspannung von der gesamten vergangenen Dehnungsgeschichte abhängt. Beim zweiten Modell geht die Gleichgewichtsspannung aus der Bestimmungsgleichung der statischen Spannung hervor. Hierin ergibt sich die Gleichgewichtsspannung als diejenige Spannung, auf die die aktuelle Spannung und die statische Spannung relaxiert wären, wenn man die Gesamtdehnung konstant gehalten hätte. Als Verfestigungshypothesen werden bei beiden Modellen nichtlineare kinematische und isotrope Verfestigung zugrunde gelegt und deren Verlauf über der plastischen Dehnung diskutiert.
 2. Um Unterschiede hinsichtlich des Verlaufs der Gleichgewichtsspannung bei Variation der Dehnungsgeschichte zu betrachten, wurden Simulationen mit den Materialmodellen durchgeführt. Integriert wurden dabei die Modelle numerisch mit Hilfe des Runge-Kutta-

Verfahrens. Unterschiede der Gleichgewichtsbahnen zwischen den beiden Modellen ergeben sich, wenn man z.B. bei einer monotonen Zugbelastung eine Teilentlastung vornimmt.

3. Die experimentellen Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur an einem "Low Cycle Fatigue Testsystem" (Serie 1362) der Firma Instron durchgeführt. Dazu wurden sieben verschiedene zuvor spannungsarm geglühte metallische Werkstoffe mit vier verschiedenen Dehnungsgeschichten belastet.
 - a) Bei monotonen Zugversuchen nach Versuchsart 1 wurde die Dehnrates bei Zirkalloy und Bronze über mehrere Zehnerpotenzen variiert und die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannungsantwort untersucht. Dabei ist insbesondere eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannungsantwort bei Bronze unterhalb der Fließgrenze gering, oberhalb der Fließgrenze dagegen sehr ausgeprägt und unterlinear.
 - b) Bei Versuchsart 2 wurde am Ende der monotonen Zugbelastung die Gesamtdehnung für die Zeitdauer von 3600 s konstant gehalten. Dabei zeigt sich, daß nach dieser Relaxationszeit die Spannungsabnahme bei den vorgestellten Stählen und bei Bronze nahezu abgeschlossen ist, während bei Reinaluminium, Zirkalloy und der Aluminiumlegierung offensichtlich wesentlich längere Haltezeiten notwendig sind, um den Dehnungs-Spannungs-Wert zu einem Gleichgewichtszustand zu bringen.
 - c) Nach Versuchsart 3 wurden Proben nach monotoner Zugbelastung teilentlastet, und zwar so, daß der Spannungspunkt bei derselben Gesamtdehnung wie bei Versuchsart 2 zu Beginn der anschließenden Haltezeit von 3600 s noch oberhalb des zugehörigen Abbruchpunktes lag.

Bei Zirkalloy, Bronze und den Stahlsorten kommt man zu dem Ergebnis, daß die Dehnungsgeschichten nach Abbruch der Relaxationsvorgänge bei Versuchsart 2 und 3 in etwa zu demselben jeweiligen Dehnungs-Spannungs-Punkt führen. Demnach sind diese Materialien besser im Rahmen der Modellvorstellung mit Überspannung bezogen auf die statische Spannung zu beschreiben.

Die Ergebnisse an Reinaluminium und der Aluminiumlegierung zeigen dagegen ein davon abweichendes Verhalten. Bei einer Teilentlastung relaxiert der Spannungswert nach der Haltezeit deutlich tiefer als ohne Teilentlastung. Auch deuten die entsprechenden Relaxationsdiagramme darauf hin, daß sich diese Materialien besser durch das Viskoplastizitätsmodell mit Überspannung bezogen auf die Gleichgewichtsspannung beschreiben lassen.

- d) Durch Einfügen von mehreren Haltezeiten von je 3600 s bei konstanter Gesamtdehnung in den Verlauf eines Zugprozesses werden entsprechende Relaxationsvorgänge oberhalb der Fließgrenze beobachtet. Die Abbruchpunkte liegen deutlich unterhalb der Dehnungs-

Spannungs-Kennlinie bei der geringsten Dehnrage nach Versuchsart 1. Dies kann so interpretiert werden, daß diese Abbruchpunkte näher zu den Gleichgewichtszuständen liegen.

Kapitel 5

Literaturverzeichnis

- [1] Haupt P. & Korzen M.:
A New Constitutive Model for the Phenomenological Representation of Rate-Dependent and Rate-Independent Material Behavior, International Seminar on the Inelastic Behavior of Solids: Models and Utilization, Besancon, France (1988), I/41-I/51.

- [2] Korzen M.:
A Numerical Method for the Intigration of a Viscoelastic-Plastic Constitutive Model, in: D.R.J. Owen et al. (eds.): Computational Plasticity, Models, Software and Applications, Swansea, U.K.: Pineridge Press, 603-613, 1989.

- [3] Korzen M. & Haupt P.:
Materialgleichungen der Viskoplastizität - Vergleichende Darstellung und Diskussion, Abschlußbericht zum DFG-Projekt, THD, Darmstadt 1991.

- [4] Tsakmakis Ch.:
Methoden zur Darstellung inelastischen Materialverhaltens bei kleinen Deformationen. Habilitationsschrift, Universität-Gesamthochschule Kassel, Institut für Mechanik, 1994.

- [5] Tsakmakis Ch.:
Formulation of Viscoplasticity Laws using Overstresses, wird veröffentlicht in Acta Mechanica, 1995.

- [6] Lion A.:
Materialeigenschaften der Viskoplastizität Experimente, Modellbildung und
Parameteridentifikation. Dissertation vom Fachbereich Maschinenbau der Universität
Gesamthochschule Kassel, 1994.
- [7] Haupt P.:
On the Mathematical Modelling of Material Behavior in Continuum Mechanics, *Acta
Mechanica* 100, 129-154, 1993.
- [8] Tsakmakis Ch.:
An analysis of rate- and material parameter-dependent limiting cases in viscoplasticity
laws, *Int. J. Solids Structures* 33, 149-166, 1996