

KRIECHVERSUCHE MIT POLYPROPILEN AUF DER GRUNDLAGE DER TEMPERATUR-ZEIT-ANALOGIE

Csaba KIRÁLY

Institut für Maschinenkonstruktionslehre
Technische Universität Budapest,
H-1521 Budapest, Ungarn

Eingegangen am 3 Febr. 1995

Abstract

To use polymers as engineering material a basic requirement is to know deformations caused by load as a function of time and temperature. This paper shows a method to determine these important data through an example with polypropilen using the theory of temperature-time equivalency as a general method.

Keywords: creep, relaxation, estimation of deformation.

Die wichtigste Haupteigenschaft der Polymere ist die starke Temperatur-Zeit-Abhängigkeit der Deformationseigenschaften in Abhängigkeit von der mechanischen Belastung, sowie das breite Relaxationsspektrum. Das Kriechen der Polymere ist wesentlich stärker als bei herkömmlichen Stoffen und dieses Kriechen entsteht selbst bei normalen und bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen. Sollen solche Stoffe in Konstruktionen verwendet werden, ist es notwendig zu wissen, wie die Deformation zum Zeitpunkt der Belastung von der Zeit und von der Temperatur abhängt. Diese Daten sind unter anderem auch auf herkömmlichem Wege, mit zeitraubenden Kriechversuchen bestimmbar.

Dieser Weg — obwohl er zu den zuverlässigsten Ergebnissen führt — ist aus wirtschaftlichen Erwägungen nicht wirkungsvoll. Die wirtschaftlichere Lösung ist die Untersuchung mit der beschleunigten Methode. Der am häufigsten benutzte Beschleunigungsfaktor ist die Temperatur. Zwischen der Temperatur und der Deformationszeit besteht eine wechselseitig äquivalente Beziehung.

Deformationen

Untersucht man die Dehnung der Polymere in Abhängigkeit von der Belastung bzw. deren Zeitdauer, so kann jeder einzelne Typ der Deformation auftreten: die sofortige elastische ϵ_0 , die sofortige plastische ϵ_p , die viskoe-

lastische ε_{ve} , (reverses Kriechen) und das Fließen ε_{vp} . Im gegebenen Fall ist also die Gesamtdeformation die Summe dieser Komponenten:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_p + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp}. \quad (1)$$

In diesem Zustand können auch bedeutende viskoelastische Deformationen in den Polymeren zusammen mit der dem Hooke-Gesetz folgenden Elastizität auftreten, welche — betreffs ihrer absoluten Größe — sogar das Vielfache der sofortigen elastischen Deformation betragen können. In diesem Zustand hat das Skleronom nur eine kleine Bedeutung, eine noch kleinere haben die fließtypischen irreversen Deformationen. Die sich mit der Zeit herausbildende Deformation beträgt also:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ve}. \quad (2)$$

Die sofortige elastische Deformation:

$$\varepsilon_0 = I_0 \sigma, \quad (3)$$

wobei I_0 ein Empfindlichkeitsfaktor (Kriechnachgiebigkeit) ist, der aus dem viskoelastischem Stoffgesetz:

$$\bar{I} = I_0 + I_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (4)$$

bzw. mit Hilfe der das ganze Relaxationsspektrum betrachtenden Gleichung:

$$I = I_0 + \int_{-\infty}^{+\infty} L(\ln\tau) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) d \ln\tau \quad (5)$$

bestimmt werden kann.

Hierbei ist $L(\ln\tau) = \tau L'(\tau)$, wobei $L'(\tau)$, die Dichtefunktion des Relaxationsspektrums darstellt. Wird die Deformation der Polymere in dieser Form modelliert, so kann das bei höheren Temperaturen auftretende Kriechen mit folgendem Zusammenhang beschrieben werden:

$$I(t, T) = \frac{\varepsilon}{\sigma} = I_0(T) + \int_{-\infty}^{+\infty} L(\ln\tau, T_0) (1 - e^{-\frac{t a_T}{\tau}}) d \ln\tau \quad (6)$$

wobei T_0 die Basistemperatur bildet. Hier können für jeden Wert von T immer dieselben Werte des Spektrums $L(\ln\tau, T_0)$ benutzt werden, da die Spektrumfläche konstant bleibt. Wird die Zeitskala logarithmisiert, so ergibt sich, daß sich die Dichtefunktion des Relaxationsspektrums nicht verzieht, sondern sich nur um den der Temperatur entsprechenden Verschiebungsfaktor a_T entlang der Zeitskala verschiebt. Es kann also gesagt werden, daß die bei höherer Temperatur auftretende Deformation mit der bei niedrigerer Temperatur, aber längerer Zeitdauer auftretenden Deformation äquivalent ist.

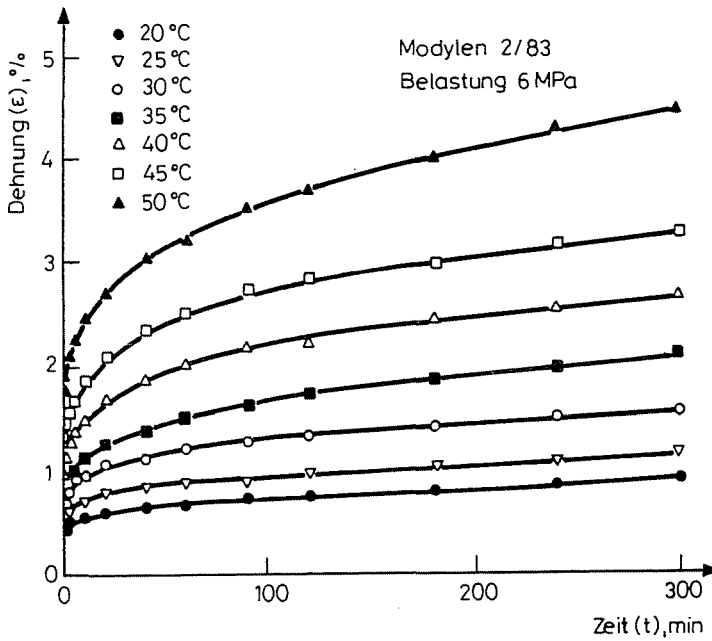


Abb. 1. Kriechkurven

Kriechuntersuchungen bei höheren Temperaturen

Die Messungen wurden auf einer Temperaturschrank-Kriechversuchsanlage vom Typ FRANK bei 20, 25, 30, 35, 40, 45 und 50 °C durchgeführt. Zur Erreichung einer homogenen Temperatur wurden die Probekörper vor der Untersuchung 16 Stunden bei Meßtemperatur gelagert. Abb. 1 zeigt die Untersuchungsergebnisse entsprechend den einzelnen Temperaturen und Belastungsniveaus. Die Meßtemperaturen wurden so ausgewählt, daß sich eine entsprechende Überlappung zwischen den bei den einzelnen Temperaturniveaus auftretenden Deformationen ergibt.

Der Temperatur Zeit-Verschiebungsfaktor

Der allgemeine rheologische Zusammenhang, welcher die Wirkung von Temperatur und Zeit in Rechnung zieht, kann eigentlich als analytischer Ausdruck der Temperatur Zeit-Analogie aufgefaßt werden. Die Nachgiebigkeit besteht ähnlich zur Deformation auch aus zwei Teilen:

$$I = I_0 + I_{ve}, \quad (7)$$

wobei das viskoelastische Stoffgesetz:

$$I_{ve} = \int_{-\infty}^{+\infty} L(\ln \tau, T_0) \left(1 - e^{-\frac{t a_T}{\tau}}\right) d \ln \tau \quad (8)$$

Funktion der Temperatur und der Zeit ist und sich der Verschiebungsfaktor a_T auf die Basistemperatur bezieht.

Zur Bestimmung des Verschiebungsfaktors müssen die Meßergebnisse in $I_{ve} - \lg t$ Koordinatensystem abgebildet werden. Da die Deformation

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ve}, \quad (9)$$

bzw.

$$\varepsilon = I_0 \sigma + I_{ve} \sigma \quad (10)$$

beträgt, muß zunächst die Anfangskriechnachgiebigkeit zur Bestimmung von I_{ve} bestimmt werden. Zur Errechnung von I_0 wurde im notwendigen Temperaturbereich die thermomechanische Kurve des untersuchten Stoffes aufgenommen [2]. Somit kann das viskoelastische Stoffgesetz nach der Formel (10) bestimmt werden.

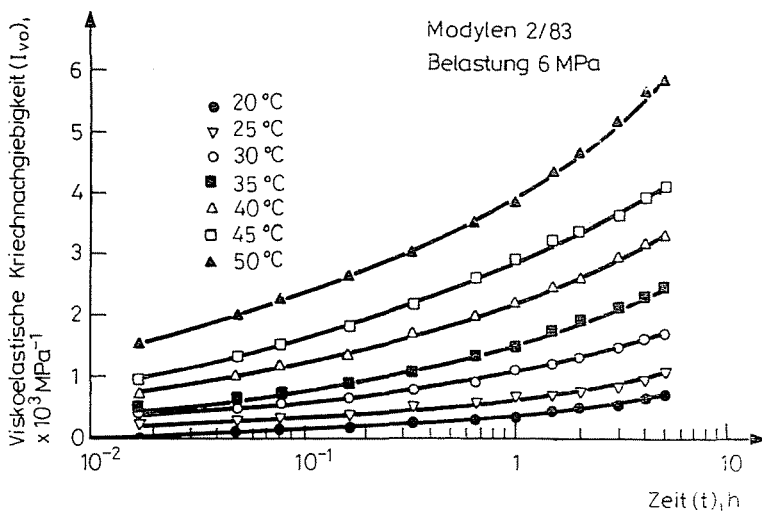


Abb. 2. Aus Messungen konstruierte viskoelastische Kriechnachgiebigkeit-Zeit-Kurven

Abb. 2 zeigt die aus den im Abb. 1 gezeigten Meßwerten konstruierten, zu verschiedenen Temperaturen gehörenden viskoelastischen Stoffgesetzkurven

in logarithmischen Zeitabschnitten. Der Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Kurven beträgt $\Delta T = 5^\circ\text{C}$. Die Basistemperatur wurde auf 20°C festgelegt, da bei dieser Temperatur zu einem früheren Zeitpunkt die Langzeitkriechversuche mit dem Stoff Modylen-2/83 durchgeführt wurden. Der Temperatur Zeit-Verschiebungsfaktor kann bis $T = 30^\circ\text{C}$ in analytischer Form durch die Gleichung

$$\lg a_T = 0,01215\Delta T^{3,6} \quad (11)$$

angegeben werden.

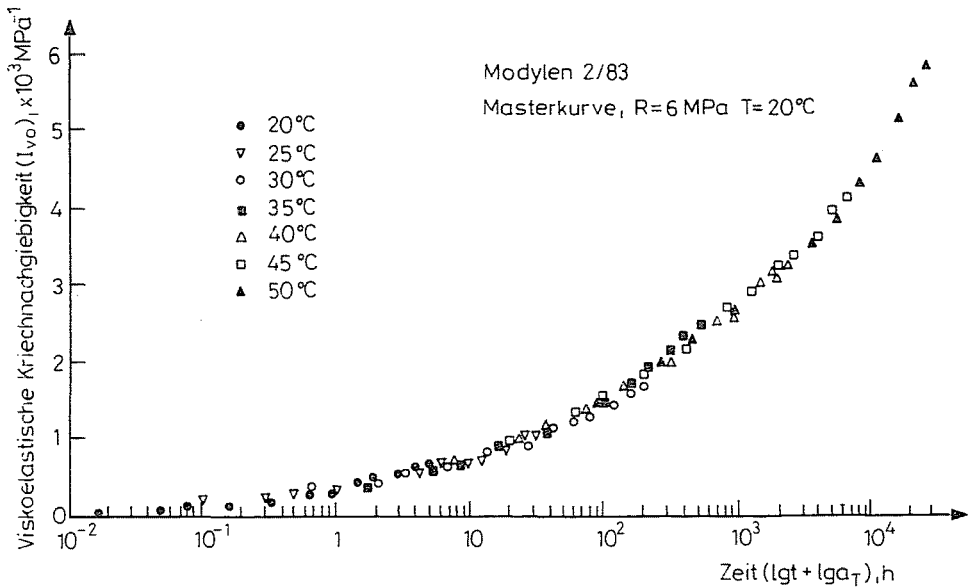


Abb. 3. Die verallgemeinerte Kurve (Masterkurve)

Durch die Benutzung der Verschiebungsfaktoren bietet sich die Möglichkeit, aus Meßergebnissen, die bei verschiedenen Temperaturen und verhältnismäßig kurzen Zeitintervallen gewonnen wurden, die sogenannte allgemeine Kurve zu konstruieren. Die in Abb. 2 gezeigten Kurven müssen um die der Temperaturdifferenz entsprechenden Verschiebungsfaktoren entlang der Zeitachse verschoben werden. Abb. 3 zeigt die aus den Meßergebnissen konstruierte Kurve, die sich auf eine Belastung von $R = 6 \text{ MPa}$ und auf $T = 20^\circ\text{C}$ bezieht. Die Anordnung der Meßpunkte nach der Verschiebung ist als sehr gut einzuschätzen, sie zeigt einen stetigen, gleichmäßigen Kurvenlauf. Die Zuverlässigkeit der Anordnung der Punkte wächst durch die

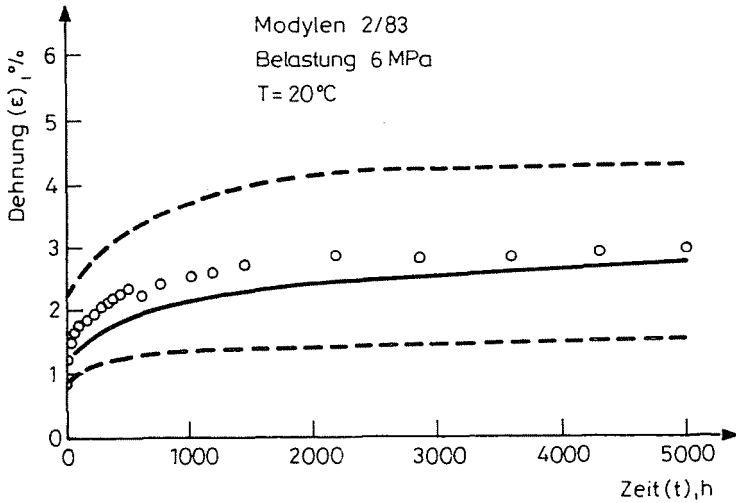


Abb. 4. Vergleich der gemessenen (x) und der geschätzten (geschlossenen Linie) Deformationen

entsprechende Überlappung der Punkte, die sich aus den verschiedenen Kurven ergeben. Mit Hilfe der allgemeinen Kurve besteht die Möglichkeit, von den bei verschiedenen Temperaturen und verhältnismäßig kurzem Zeitintervall durchgeführten Kriechmessungen auf das Langzeitkriechverhalten des Stoffes zu schließen. Aus dem auf Abb. 3 abgebildeten Diagramm, welches aus 5-Stunden-Messungen konstruiert wurde, läßt sich vorher auf das Kriechverhalten des Stoffes Modylen-2/83 über 20-30.000 Stunden bei einer Belastung von $R = 6$ MPa, bei $T = 20^\circ\text{C}$ schließen. Die Dehnungen können aus dem viskoelastischem Stoffgesetz mit Hilfe der oben erwähnten Zusammenhänge ermittelt werden.

Zur Bewertung der geschätzten Werte der Dehnungen wurden in Abb. 4 die Punkte der Langzeitkriechmessungen bei einer Belastung von $R = 6$ MPa aufgenommen. Mit gestrichelter Linie wurde das zu den Meßpunkten gehörende Konfidenzintervall der 95%-igen Wahrscheinlichkeit eingezeichnet. Die mit durchgehender Linie eingezeichnete Kurve zeigt die Kriechwerte, die auf Grund der Temperatur Zeit-Analogie geschätzt werden. Die mit dieser Methode geschätzten Werte geben eine ausreichende Näherung für die Praxis.

Literatur

1. URZSUMCEV, JU. SZ. — MAKSZIMOV, R.D.(1982): A műanyagok alakváltozása. Budapest, Műszaki Könyvkiadó.
2. Modylének kúszási vizsgálata. (Kriechversuche von Modylenen). (1984) Forschungsbericht des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre der Technischen Universität Budapest.