



M 1

Deutsche Version: 2

2018. 08. 30.

**TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHE
UNIVERSITÄT
BUDAPEST**

**FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU
LEHRSTUHL FÜR POLYMERTECHNIK**

ZUGVERSUCH - KRIECHEN

**ZUGVERSUCH UND UNTERSUCHUNG DER ZEITABHÄNGIGEN MECHANISCHEN
EIGENSCHAFTEN VON POLYMEREN**

	M1 – ZUGVERSUCH-KRIECHEN	Deutsche Version: 2
		2018. 08. 30.

1. Ziel der Messung

Das Ziel der Messung ist, dass die Studenten durch das Beispiel von aus unterschiedlichen Materialien hergestellten Polymeren-Proben sowohl die Methode des quasistatischen Zugversuchs, als auch die der Untersuchung des Kriechens kennen lernen. Zum Zugversuch gehören die während des Versuchs auftretenden polymerspezifischen Eigenschaften (Halsbildung), wie auch welche in denen sich Metalle unterscheiden.

2. Theoretischer Hintergrund

Während des Zugversuchs zerspalten wir die der Norm entsprechende, an den Enden eingespannte Probe durch einachsiger Zugbeanspruchung unter definierten Umständen (Prüfgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt). Notiert wird dabei die Zugkraft in der Funktion der Längenveränderung. Dimensionierung von Polymerprodukten/Werkzeugen ist jedoch schwieriger als dass ein einfacher Zugversuch genügen würde, ihre Eigenschaften sind nämlich schwer Zeitabhängig. Alltägliche Polymerprodukte reagieren auf bestimmungsgemäße Verwendung (Meistens langfristige mechanische Belastung) mit kontinuierlicher, dauerhafter Verformung (z.B. ein unter Bücher verbogener Regal). Wegen des Kriechens nehmen Deformierung und Dehnung mit der Zeit auch durch konstante Belastung kontinuierlich an. Während des Zugversuchs wird die Probe mit einer permanenter Geschwindigkeit zerspaltet. Beim Kriechversuch wird sie jedoch mit einer permanenten Last zum Versagen gebracht. Letzteres verursacht die sprunghaft beginnende, und auch weiterhin ununterbrochen zunehmende Deformation, die in der Industriellen Anwendung äußerst problematisch ist.

3. Die Probe

Eine Besonderheit von Polymeren ist die starke Formabhängigkeit des Zugdiagramms wie auch die von weiteren mechanischen Eigenschaften. In der Praxis arbeitet man mit Proben deren Querschnitt kreis- oder rechteckförmig ist. Polymertechnik bevorzugt eher letztere. Genaue geometrische Daten sind dann aber auch materialabhängig. Weitere Information dazu sind in der Norm [2] zu finden.

Abbildung Nr. 1 zeigt die typische Probeform für thermoplastische Materialien. (Abmessungen in mm)

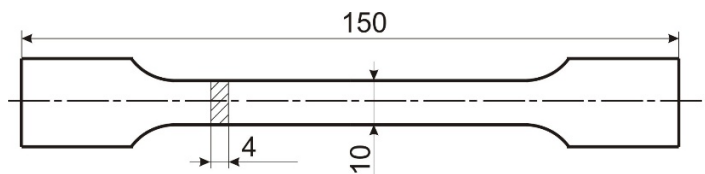


Abb. 1. Probeform für thermoplastische Polymere

4. Mit Zugversuch ermittelbare mechanische Eigenschaften

Als Ergebnis des Zugversuchs erhalten wir die auf die Umstände bezogene Kraft-Dehnungskurve ($F-\Delta l$) des Werkstoffes. Das lässt sich leicht auf eine Ingenieur-Spannung – relative Dehnungskurve ($\sigma-\varepsilon$) umparametrisieren. (Abb. 2): anstelle der Kraftachse werden wir die Ingenieur-Spannungsachse (σ [MPa]) bekommen, falls die Kraft (F [N]) mit dem Ausgangsquerschnitt der Probe (A_0 [mm²]) dividiert wird:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [\text{MPa}] \quad (1)$$

Die relative Dehnung (ε) wird dann der Quotient der Dehnung (Δl [mm]; $\Delta l = L - L_0$, wo L die aktuelle Länge der Probe) und der Anfangslänge der Probe (L_0 [mm]):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Aus dem Kraft-Dehnungsdiagramm (und aus der daraus stammenden Spannung-relative Dehnungskurve) sind die folgenden mechanischen Maße abzulesen. Die allgemeinste Zugkurve ist die auf der Abbildung 2. mit „b“ markierte Kurve. Es lohnt sich diese Kurve zu studieren, um die folgenden Begriffen zu verstehen.

σ_M Zugfestigkeit: ~ ist der Quotient der ersten lokalen maximalen Kraft der Zugkurve und des Ausgangsquerschnitts der Probe. Diese Spannung kann mit dem Fließ-Spannung (σ_Y , „b“ und „c“ Kurve), oder mit der Bruchfestigkeit (σ_B , „a“ Kurve) gleich sein.

σ_B Bruchfestigkeit: ~ ist der Quotient der direkt vor dem Bruch gemessenen Bruchkraft und des Ausgangsquerschnitts der Probe.

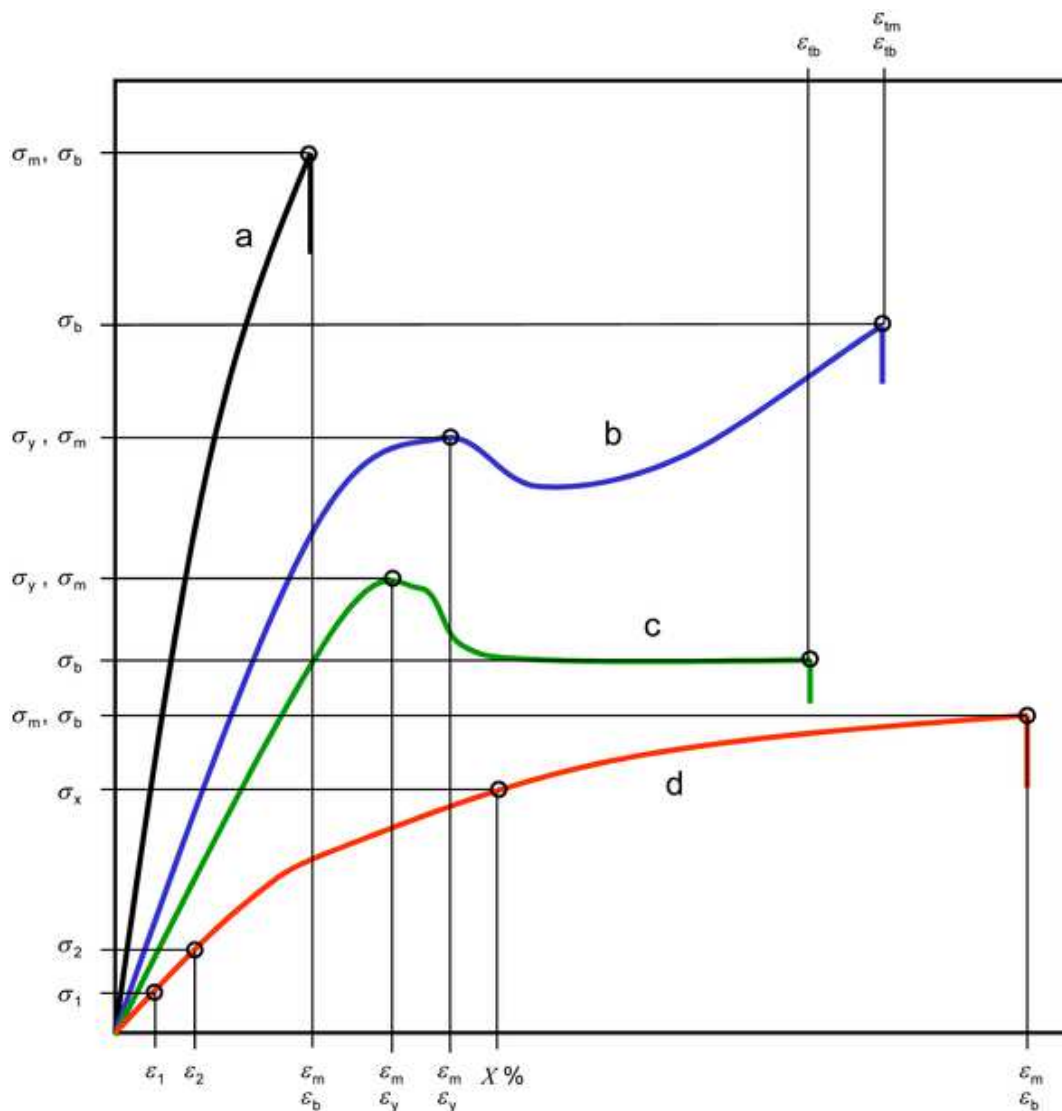


Abb. 2: Allgemeine Zugkurven der Polymere: a) sprödes (glasartig) Benehmen, b) und c) Benehmen mit Halsbildung, d) weiches, gummiartiges Benehmen mit großer (>50%) Bruchdehnung

σ_y **Fließ-Spannung:** ~ ist die erste Spannung, bei der die Dehnung, ohne dass die Spannung zunehmen würde, wächst. Bei den viskoelastischen Polymeren bilden sich bleibende Dehnungen schon während der kleinen Spannungen, also es gibt keine Fließgrenze, sogar tritt die Fließ-Erscheinung bei gewissen Polymeren im Praxis überhaupt nicht auf, bei anderen können jedoch 100% Fließformänderung auftreten.

Dehnung bei der maximalen Kraft: (ε_M):

$$\varepsilon_M = \frac{L_M - L_0}{L_0} * 100[\%] \quad (3)$$

wo L_0 die originelle Prüflänge ist, L_M die ausgedehnte Prüflänge bei maximaler Kraft

Bruchdehnung (ε_B):

$$\varepsilon_B = \frac{L_B - L_0}{L_0} * 100[\%] \quad (4)$$

wobei L_B die gemessene gedehnte Prüflänge beim Bruch..

Tangentenmodul (E_e): ~ ist die Steigung der Tangenten in einem beliebigen Punkt der σ - ε Kurve (Abb. 3).

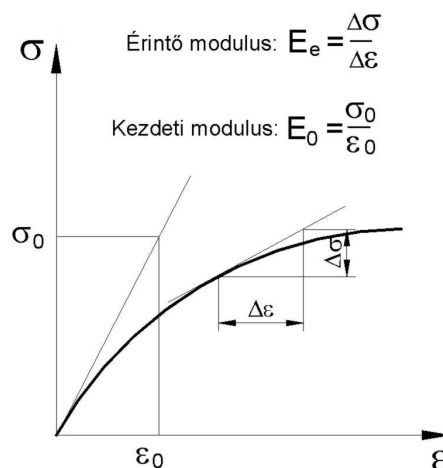


Abb. 3: Bestimmung des Tangentenmoduls

Da die Zugkurve nicht linear ist, ändert sich die Steigung der Tangente auch von Punkt zu Punkt. In den Ursprung der Spannung-relativ Dehnungskurve gezeichnete Tangente ist der Ausgangselastizitätsmodul (E_0). Wenn die Tangente in den Ursprung nicht genau eingezeichnet wird, kann's im Wert des E-Moduls zu wirklich großen Ungenauigkeiten führen. Deshalb betrachten wir in der Praxis die Steigung der durch die zu den 0,05 % und 0,25 % relativen Dehnungswerten gehörigen Kurvenpunkten gezeichneten Geraden, als eine spezielle Sehne.

5. Deformationskomponenten der Polymermaterialien

Das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis der viskoelastischen Polymermaterialien unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von dem der elastoplastischen Stähle, die bis zur elastischen Grenze als völlig elastisch und darüber als plastisch angesehen werden. Dieser Unterschied zeigt sich in erster Linie im nicht-linearen Spannungs-Dehnungs-Verhältnis, weiterhin in der Temperatur-, Belastungsstufen- und der Belastungszeitabhängigkeit.

Im Falle der Polymere ist beim Beschreiben des äußerst komplizierten Verhaltens eine Möglichkeit, dass man dieses komplexe Verhalten als Kombination von solchen idealen Eigenschaften betrachtet, die in jedem Falle gleichzeitig auftreten. Eines der einfachsten Annäherungen gemäß setzen wir voraus, dass sich die als Folge einer gegebenen Belastung zustandekommende ϵ -Gesamtdeformation aus einer sogenannten ϵ_{pr} -elastischen, einer ϵ_{kr} -viskoelastischen und einer ϵ_m -viskosen bleibenden Deformationskomponenten zusammensetzt:

$$\epsilon(t) = \epsilon_{pr} + \epsilon_{kr}(t) + \epsilon_m(t)$$

Je nach den oben aufgeführten idealisierten Deformationskomponenten sieht man auf Abbildung 5. die zur Be- und Entlastung gehörenden Spannungs-Dehnungs-Verhältnisse:

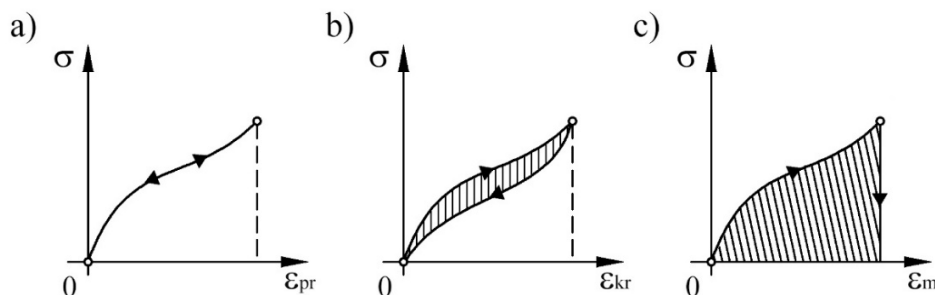


Abb.4.: Deformationskomponenten der Polymere

(a) Die momentane **elastische** Deformationskomponente - welche durch die im Mikrogefüge vorstattgehende Änderung des Atomabstands und des Valenzwinkels zustandekommt - bildet sich sofort, ohne Verzögerung im Augenblick der Belastung aus, und geht nach dem Aufheben der Belastung ebenfalls verzögerungslos zurück. Dieser Vorgang ist zeitunabhängig und die Be- und Entlastungskurven stimmen miteinander überein (Abb.4.a.). Die sich während der Belastung ausbildende Deformation und die zugeführte Deformationsarbeit wandeln sich ebenfalls restlos um. Aus diesem Grund ist diese Komponente wie mechanisch als auch thermodynamisch gesehen

reversibel.

Das einfachste Modell für die Deformationskomponente ist die Feder (Tabelle 1.), die sich dem Hooke-Gesetz gemäß verhält, welche - wegen ihrer linearen Charakteristik - gegenüber der Abbildung 4.a. eine weitere Vereinfachung, Idealisierung ist.

(b) Die **viskoelastische** (verzögert elastische) Komponente - welche im Mikrogefüge durch Ab- und wieder Aufwicklung der Molekülketten bei Spannung entsteht - bildet sich während der Belastung verzögert aus und bildet sich nach Aufheben der Belastung ebenfalls verzögert zurück. Demnach ist dieser Vorgang zeitabhängig und die Be- und Entlastungskurven stimmen nicht miteinander überein. In diesem Fall bildet sich eine sogenannte Hysterese aus, deren Fläche proportional zum Quotienten der Deformationsverlustarbeit ist, welche sich in Wärme umwandelt (Abb.4.b). Diese Komponente ist demnach mechanisch gesehen reversibel, thermodynamisch gesehen jedoch irreversibel.

Das einfachste Modell dieser Komponenten ist die Parallelschaltung einer Feder und eines viskosen Elements (Tabelle 1.). Dies ist das sogenannte Kelvin-Voigt Element.


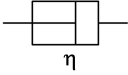
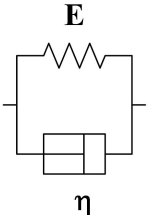
(c) Die **viskose** bleibende Deformationskomponente - welche durch die gegenseitige Verschiebung und der bleibenden Verrückung der Molekülketten im Mikrogefüge zustande kommt - bildet sich während der Belastung kontinuierlich aus, häuft sich in der Zeit an und behält nach den Aufheben der Spannung den Deformationswert bei. Die Be- und Entlastungskurven sind nicht dieselben. Die letztere artet sogar aus und die gesamte zugeführte Arbeit wandelt sich in Wärme um (Abb.4.c). Demzufolge ist diese Komponente wie mechanisch, als auch thermodynamisch gesehen irreversibel.

Das einfachste, eine weitere Idealisierung bedeutende Modell für diese Komponente ist das viskose Element (Tabelle 1.), welches sich dem Newtonschen Gesetz gemäß verhält.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir die mechanischen Eigenschaften der Polymere als viskoelastische Stoffe mit verschiedenen mechanischen Modellen beschreiben können. Eines dieser Grundmodelle ist die sich dem Hooke-Gesetz ($\sigma = E \cdot \epsilon$) gemäß verhaltende Feder, die die elastische Deformationskomponente modelliert.

Die andere ist das dem Newton-Gesetz ($\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$) gemäÙe ideal-viskose Element, welches durch einen mit viskoser Flüssigkeit gefüllten Zylinder mit Kolben repräsentiert wird und die viskose Deformation modelliert. Die ideale Feder kann mit dem E-Modul, das viskose Element mit dem Viskositätskoeffizienten der sich im Zylinder befindliche Flüssigkeit charakterisiert werden. Diese sind die Parameter der mechanischen Modelle. Durch Parallelschalten der vorigen zwei Elemente erhalten wir das Kelvin-Voigt Element, welches die für die Polymere typische Eigenschaft, die viskoelastische Deformation modelliert.

Tabelle 1. Die Modellelemente zur Modellierung der Deformationskomponenten

Name der Deformationskomponenten	Bezeichnung	Modell	Darstellung, Parameter
<i>momentane elastische Deformation</i>	ε_{pr}	Feder nach dem Hooke-Gesetz	 E
<i>viskose bleibende Deformation</i>	ε_m	viskoses Element nach dem Newton-Gesetz	 η
<i>viskoelastische (verzögert elastische) Deformation</i>	ε_{kr}	Kelvin-Voigt Element (Parallelschaltung von Feder und viskosem Element)	 E η

6. Bestimmung der Deformationskomponenten aus der Kriechkurve

Aus der aufgenommenen Kriechkurve (Abb. 5.) dessen Maßstab von $\Delta l(t)$ auf den Maßstab von $\varepsilon(t)$ umgerechnet wurde...

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0}$$

...kann man die Modellparameter des geprüften Stoffs leicht ablesen:

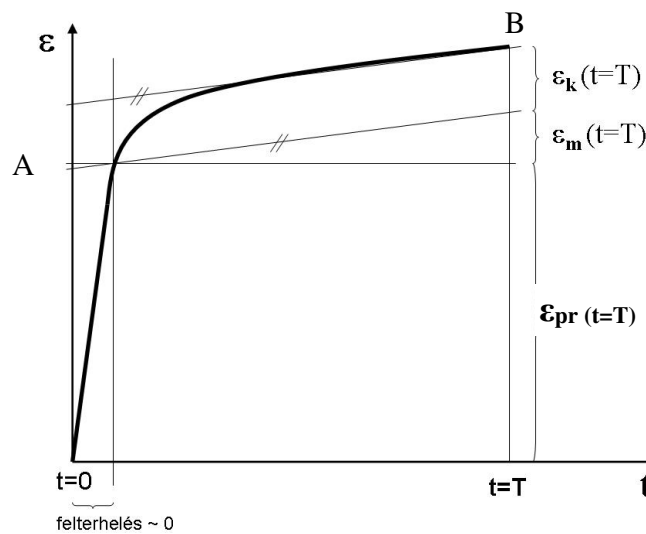


Abb.5 Auswertung der aufgenommenen Kriechkurve

Als erstes zeichnen wir eine vertikale Gerade, die durch den Punkt B läuft. $\varepsilon(t=T)$. Danach finden wir den Punkt, wo die Kurve vom linearen Teil abweicht (A). Von diesem Punkt aus zeichnen wir eine horizontale Gerade, die somit von der vorigen Gerade die Strecke der momentaner elastischen Dehnung $\varepsilon_{pr}(t)$ abschneidet. $\varepsilon_m(t)$ (bleibende elastische Dehnung) und $\varepsilon_{kr}(t)$ (verzögerte el. D.) bekommen wir durch eine Hilfsgerade, die durch dem Punkt A läuft, und zur Tangente der Kurve im Punkt B parallel ist. (Siehe Abb. 5)

7. Empfohlene Literatur:

1. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
2. EN ISO 527 szabvány: Szakítóvizsgálat
3. EN ISO 899 szabvány Kúszóvizsgálat
4. Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve, Springer-Verlag, 1993

MESSPROTOKOL

Name: Note:

Neptunkode:

Datum: Kontrolliert von:

Messleiter:

1. Die Aufgaben der Praxis

- Zugversuch unterschiedlicher Polymerproben
- Berechnung der mechanischen Eigenschaften anhand der registrierten Kraft-Dehnungskurven
- Untersuchung des Kriechens von Polymeren

2. Grunddaten:

Temperatur, T: [C]
 relative Feuchtigkeit: [%]
 Querschnitt der Probe: [mm²]
 Probenlänge: [mm]

3. Auswertung der Messdaten, Diskussion der Umstände der Untersuchung

Nr.	Prüfgeschw. (mm/min)	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	E_0 [GPa]
1						
2						
3						
4						
5						
6						

4. Kriechversuch

Material:		
Querschnitt, A (axb)	=	mm ²
Probenlänge, l ₀	=	mm
Belastung	=	N
Spannung	=	MPa
Untersuchungsdauer	=	s

5. Gemessene und berechnete Werte:

[mm]	[-]
$\Delta l_{\dot{o}}(T)=$	$\epsilon_{\dot{o}}(T)=$
$\Delta l_r(T)=$	$\epsilon_p(T)=$
$\Delta l_m(T)=$	$\epsilon_m(T)=$
$\Delta l_k(T)=$	$\epsilon_k(T)=$