

# **Materialwissenschaftliches Praktikum**

## **Elastisches und plastisches Verhalten von Werkstoffen im Zugversuch**

Versuch MP 11

09-2023

# **1 Versuchsziel und Aufgabenstellung**

Mit diesem Versuch soll das grundlegende Verständnis zum elastischen und plastischen Materialverhalten bei langsam zunehmender Zugbeanspruchung vermittelt werden.

An verschiedenen Werkstoffproben soll im Zugversuch (einachsig und momentenfrei) das reversible und das irreversible Materialverhalten untersucht werden. Dabei sollen sowohl ausgewählte charakteristische Werkstoffkennwerte als auch die reversiblen und irreversiblen Verformungsverläufe von Metallen und Polymeren bestimmt werden.

Weiterhin ist das mechanische Verhalten der Polymere bei Temperatureinwirkung zu untersuchen.

## **2 Grundlagen**

### ***2.1 Kenngrößen***

Um über das Werkstoffverhalten bei mechanischer Belastung sprechen zu können, sind Kenntnisse über die verschiedenen Materialkenngrößen notwendig.

**Tabelle 1: Die wichtigsten Kenngrößen im Überblick**

$\sigma$	F	$S_0$	S	$S_B$
Spannung in MPa	Kraft in N	Querschnitts- fläche der unverformten Probe in mm <sup>2</sup>	Querschnitt der Probe in mm <sup>2</sup>	Querschnitt der Fläche nach dem Bruch in mm <sup>2</sup>
E	G	$\epsilon$	Z	L
Elastizitäts- modul in GPa	Schubmodul in GPa	Dehnung in %	Einschnürung in %	Messlänge in mm
$L_0$	$d_0$	$\alpha$		
Ausgangs-länge in mm	Anfangs- durchmesser in mm	Winkel zwischen Hookscher Gerade und Abszisse (x- Achse) in °		

Spannung (stress):

Die auf eine Flächeneinheit  $S_0$  bezogenen Kräfte F sind Spannungen. Wirken die Kräfte senkrecht zu einer betrachteten Fläche nennt man diese Spannungen Normalspannungen  $\sigma$ , wirken sie in dieser Fläche nennt man sie Schubspannungen  $\tau$ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{ bzw. } \tau = \frac{F_{Schub}}{S_0} \text{ (Für Schubspannungen)}$$

Dies ist die technische Definition der Spannung, die wahre Spannung kann durch Querschnittsänderung (Einschnürung im Zugversuch) davon abweichen.

Dehnung (strain):

Die technische Dehnung  $\epsilon$  bezogen auf eine Ausgangslänge  $L_0$  ergibt sich aus:

$$\varepsilon(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0},$$

wobei  $L(t)$  die Probenlänge zu einem bestimmten Zeitpunkt ist. Die Dehnung wird in % angegeben.

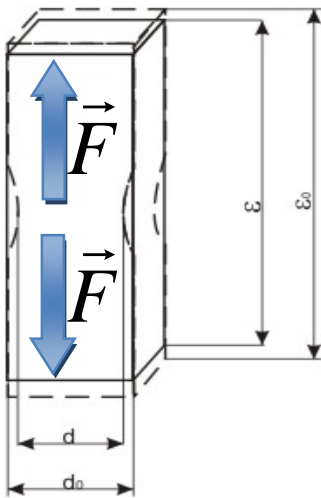


Abbildung 1: Verformung einer prismatischen Probe

Poisson- oder Querkontraktionszahl (poissons ratio):

Da das Volumen bei der Verformung konstant bleibt, gibt es bei der Längenänderung gleichzeitig eine Querschnittsänderung. Die Querkontraktions- oder Poissonzahl  $\nu$  gibt dabei das Verhältnis zwischen der Querverformung  $\varepsilon_{quer}$  und der Längsverformung  $\varepsilon_{längs}$  einer Probe (Abb. 5).

$$\nu = \frac{\varepsilon_{quer}}{\varepsilon_{längs}} \quad \nu_{max} = 0,5$$

Elastizitätsmodul (Young's modulus):

Der Elastizitätsmodul oder auch Young's Modulus beschreibt den Widerstand des Werkstoffs gegen die elastische Verformung. Je höher  $E$  ist, desto mehr Kraft muss man aufwenden, um die Probe um den gleichen Betrag zu verformen.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan \alpha \text{ [GPa]}; \left[ \frac{kN}{mm^2} \right]$$

Der Zusammenhang zwischen der wirkenden Spannung und der elastischen, reversiblen Verformung für sehr kleine Dehnungen wird bei isotropen und quasiisotropen Werkstoffen durch das Hookesche Gesetz (lineare Elastizität) beschrieben:

$$\sigma = \mathbf{E} \cdot \varepsilon \text{ bzw. } \tau = \mathbf{G} \cdot \gamma \text{ (Für Schubspannungen)}$$

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \text{ (für Normalspannungen in } \vec{x} \text{-Richtung)}$$

Der Elastizitätsmodul E, der Schubmodul G und die Poisson-Konstante  $\nu$  sind über die folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G$$

Tabelle 2: Elastizitätsmoduli für ausgewählte Werkstoffe

Werkstoff	Typische Elastizitätsmoduli E [GPa]
Allg. Baustahl	200-220
Glas	70
Keramik	>400
Cu und Cu-Legierungen	120
Al und Al-Legierungen	70
Polyethylen	0,17-1,08
Polyethylenterephthalat	3,5
Polystyrol	3,2

### Streckgrenze (yield stress, yield point):

Die Streckgrenze ist die Spannung, ab der der Werkstoff plastisch verformt wird. Die obere Streckgrenze wird anhand des Maximums vor dem ersten Abfalls der Kraft ermittelt.

$R_{eH}$ : obere Streckgrenze (Higher yield strength) [MPa];  $[\frac{N}{mm^2}]$

$R_{eL}$ : untere Streckgrenze (Lower yield strength) [MPa];  $[\frac{N}{mm^2}]$

### 0,2% Dehngrenze/ 0,01% Dehngrenze :

Kann die Streckgrenze aufgrund des stetigen Verlaufs des Spannungs-Dehnungs-Diagramms nicht direkt bestimmt werden, wird graphisch die 0,2% Dehngrenze ermittelt. Seltener wird hingegen die 0,01% Dehngrenze verwendet.

### Zugfestigkeit (tensile stress):

Die Zugfestigkeit  $R_m$  ist die maximale Spannung, die aus dem gesamten Kraft-Verformungsverlauf ermittelt wurde.

### Bruchdehnung (fracture strain):

Die Bruchdehnung ist das Maß der relativen plastischen Verformung eines Werkstoffs (der elastische Anteil wird also abgezogen), bei der der Bruch der Probe eingetreten ist.

Da die Bruchdehnung nach dem Kick'schen Ähnlichkeitsgesetz nur vergleichbar ist, wenn das Verhältnis von Messlänge  $L_0$  und Querschnittsfläche  $S_0$  konstant ist, werden normalerweise Proportionalstäbe verwendet. Dies wird entsprechend gekennzeichnet durch:

$A_{10}$ : langer Proportionalstab, hierbei gilt:  $L_0 = 10 \cdot d_0$

$A_5$ : kurzer Proportionalstab, hierbei gilt:  $L_0 = 5 \cdot d_0$

$A_5 \approx (1,2 \dots 1,5) \cdot A_{10}$

Die Bruchdehnung beinhaltet also nur den irreversiblen Verformungsanteil

$$A = \frac{l_{Bruch} - l_0}{l_0} [\%]$$

### Brucheinschnürung (reduction of area):

Die Brucheinschnürung  $Z$  gibt an, um welchen relativen Betrag sich der Querschnitt  $S$  verringert hat.

$$Z = \frac{S_0 - S_B}{S_0} [\%]$$

### Streckgrenzenverhältnis (yield stress ratio):

Das Streckgrenzenverhältnis gibt das Verhältnis zwischen Streckgrenze  $R_e$  und Zugfestigkeit  $R_m$  an, wodurch man ermitteln kann, wie viel Spannungsreserve man nach Erreichen der Streckgrenze bis zum Bruch hat.

$$\frac{R_e}{R_m}$$

### spezifische Formänderungsarbeit (specific deformation work):

Die Verformungsarbeit kann für jeden Dehnungszustand errechnet werden. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung kann durch fünf verschiedene Mechanismen beeinflusst werden:

- Versetzungen (Erzeugung und gegenseitige Behinderung von Versetzungen)
- Feinkorngefüge (Versetzungsaufstau an Korngrenzen)
- Mischkristallverfestigung (Versetzungsbewegung wird behindert)
- Ausscheidungen (Versetzungsbehinderung durch kohärente oder inkohärente zweite Phase)
- Martensitbildung (Versetzungsbehinderung durch innere Spannungen)

Die Verformungsarbeit  $W$  ist die Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve (Integral Kraft  $\times$  Weg) und dem verformten Volumen  $A_0 \times L_0$ :

$$W_S = A_0 \cdot L_0 \cdot \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{Bruch}} \sigma \cdot d\varepsilon = V_0 \cdot \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{Bruch}} \sigma \cdot d\varepsilon$$

## 2.2 Verformungsverlauf

Der Verformungsverlauf kann in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden:

- **Die reversible Verformung**, bei der die eingetretene Formänderung nach Entlastung direkt oder über eine gewisse Zeit wieder in die ursprüngliche Form zurückgeht. Man unterteilt dabei in das elastische, das kautschukelastische und das anelastische Verhalten. Die beiden letzteren führen bei einer Wechselbeanspruchung zu einer Hysterese des Spannungs-Verformungs-Verlaufes.
- **Die irreversible (bleibende) Verformung**, bei der die Formänderung auch nach Beendigung der Krafteinwirkung erhalten bleibt. Man unterteilt dabei in das viskose und das plastische Verhalten bzw. das viskoplastische Verhalten.
- **Den Bruch**, durch den der Werkstoff in makroskopischen Bereichen getrennt wird. Die äußere mechanische Beanspruchung erzeugt Verformungen in der Materialprobe.

### 2.2.1 Reversible Verformung

Das rein elastische Verhalten ist zeitunabhängig, d. h. jedem Spannungswert ist ein bestimmter Verformungswert zugeordnet. Ist das elastische Verhalten zeitabhängig, so liegt kautschukelastisches Verhalten vor, bei dem z. B. bei bestimmten Hochpolymeren die gestreckten Molekülketten bestrebt sind, in ihren früheren Unordnungsgrad zurückzugehen. Liegt zeitabhängiges anelastisches Verhalten vor, tritt die Rückverformung unter Energieverlust ein. Dieser Energieverlust führt zur Dämpfung oder inneren Reibung. Im Spannungs-Dehnungs-Verlauf zeigt sich eine Hysterese. In anisotropen Werkstoffen liegt eine deutliche Orientierungsabhängigkeit des Materialverhaltens vor.

### 2.2.2 Proportionalitätsgrenze und Elastizitätsgrenze

Die Proportionalitätsgrenze ist der Punkt der Spannungs-Dehnungskurve (viskoser Anteil) wo eine Abweichung von der linearen Beziehung auftritt. In der Spannungs-Dehnungskurve kennzeichnet es die maximale Spannung, die ein Material aufnehmen kann und unter den es wieder zu seiner Ausgangsdimension ohne permanente Verformung zurückkehren kann.

Die Spannungs-Dehnungskurve gibt ebenso einen Hinweis über die Zähigkeit eines Materials. Die Fläche unter dem elastischen Bereich der Kurve in der Einheit [GPa] ist ein Maß für die



Zähigkeit. Je größer diese Fläche ist, umso zäher sind das Material und daher auch die Energie, die benötigt wird, um es zu brechen.

Die wesentlichen Faktoren, die die mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten beeinflussen, sind die Prüftemperatur, der Kristallisationsgrad, das Molekulargewicht und die Verformungsgeschwindigkeit.

Das Molekulargewicht hat einen ausgesprochenen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Üblicherweise steigen die mechanischen Eigenschaften mit zunehmender Molekülmasse an. Die Molekularstruktur und die Regelmäßigkeit der Struktur des Polymers beeinflussen hauptsächlich die Kristallinität des Polymers. Für lineare Polymere ist die Kristallbildung einfach zu erreichen, da sich hier die Ketten ohne Behinderungen orientieren können. Lineare Polymere wie Polyethylen sind kristallisierbare Materialien. Bei Anwesenheit von Seitengruppen hingegen, wie bei ataktischen Polystyrenen, wird eine regelmäßige Anordnung gestört. Eine regelmäßige Struktur ist potenziell in der Lage zu kristallisieren, wohingegen eine irreguläre Struktur hier zu einem amorphen Polymer führt. Einer der Faktoren für die Unregelmäßigkeit der Strukturen ist die Anwesenheit von reaktiven Gruppen in der Polymerkette und von Kettenverzweigungen. Verzweigungen stören die Kristallinität, so dass verzweigte Polymere keine hohe Kristallinität aufweisen.

### 2.2.3 Irreversible Verformung

Ist die Verformung nicht reversibel, liegt eine plastische Verformung vor. Die Gesamtverformung setzt sich aus der elastischen und der plastischen Verformung zusammen:

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\Delta L_e}{L_0} + \frac{\Delta L_p}{L_0}$$

Aus der graphischen Darstellung, dem **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**, können nicht nur wesentliche Materialkennwerte ermittelt werden, sondern auch Aussagen zum elastischen und plastischen Materialverhalten getroffen werden.

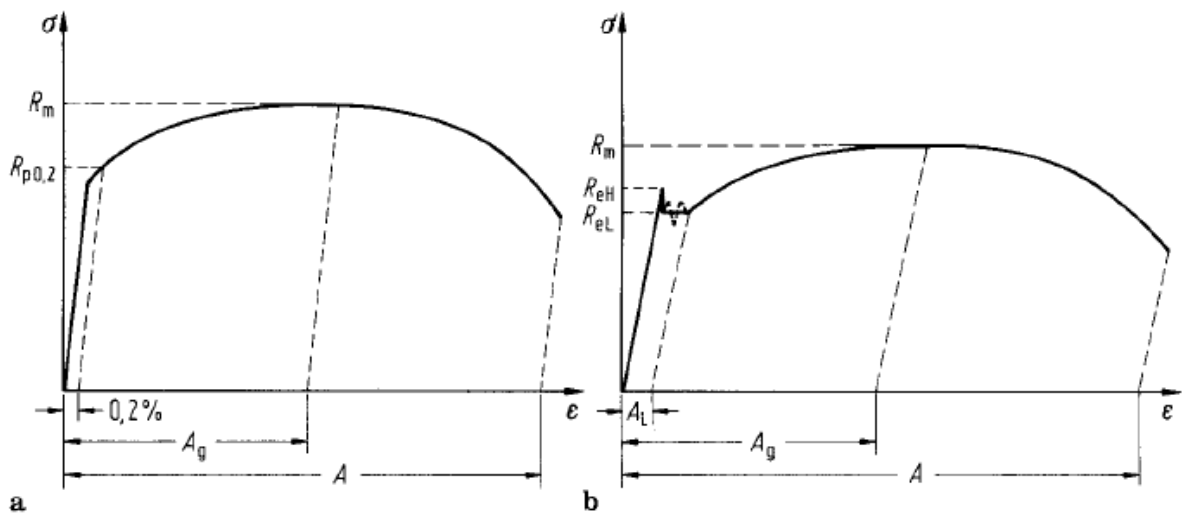


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungsdiagramme für Metalle mit stetigem (a) und unstetigem (b) Übergang

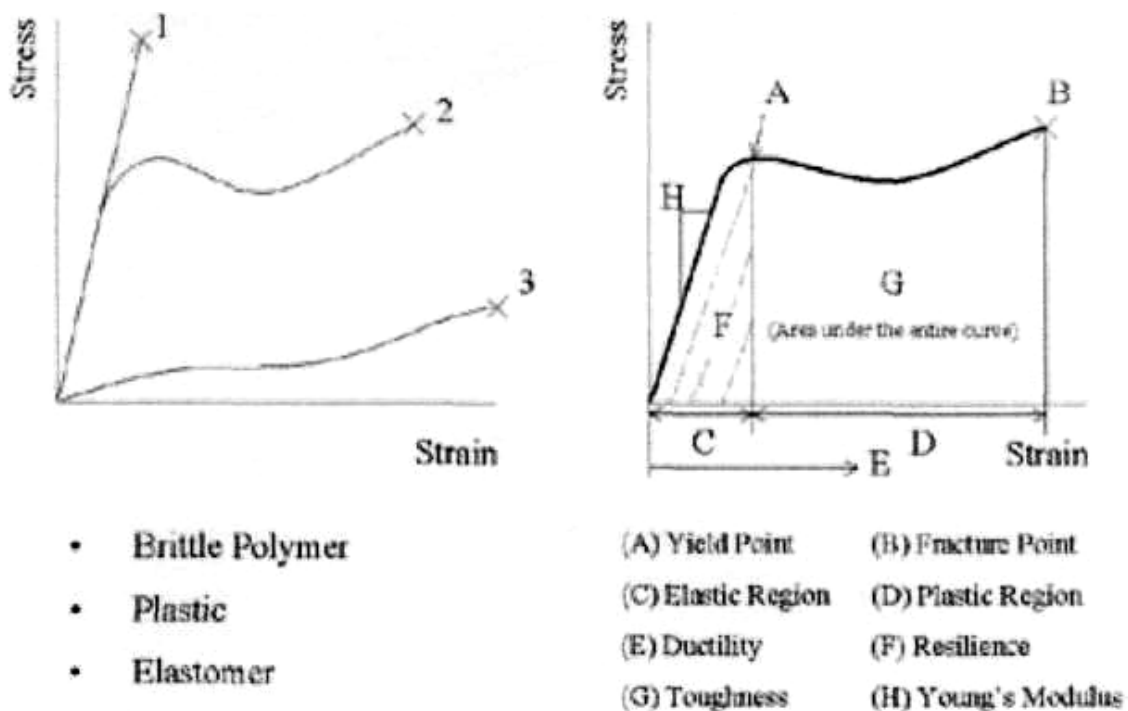


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungsdiagramme links: für spröde (1), plastisch-duktiler (2) und kautschukelastischer (3) Polymere und rechts: Materialkennwerte eines typischen Polymers

Für viele Werkstoffe liegt im Anfangsbereich der Beanspruchungen ein linearer Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung vor. Der Anstieg H dieser Geraden beschreibt das

elastische Verhalten und wird Elastizitätsmodul  $E$  genannt. Ein geringerer Anstieg entspricht einem geringeren Elastizitätsmodul und meist einer größeren Elastizität (bei gleicher Spannung tritt bei Werkstoffen mit einem kleineren Elastizitätsmodul eine größere Dehnung ein)

$$\tan \alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ideal spröde Werkstoffe (Gläser, Keramiken, Duromere) zeigen nur diese Hookesche Gerade, an deren Ende der Bruch eintritt (Siehe Abb. 3 links, Kurve 1).

Bei plastischen, viskosen oder visko-plastisch verformbaren Materialien schließt sich nach Überschreiten der rein elastischen Verformung der Bereich der irreversiblen Verformung an. Treten die irreversiblen Verformungen erst nach Überschreiten eines Schwellenwertes der Spannung ein, spricht man von plastischer Verformung. Erfolgt die Verformung ohne einen derartigen Schwellenwert bezeichnet man sie viskose Verformung. Als charakteristische irreversible Verformungskennwerte werden die obere Streckgrenze  $R_{eH}$  bzw. die Spannung, bei der eine bleibende Verformung von 0,2% vorliegt, die Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , die Gesamtdehnung beim Bruch, die Bruchdehnung  $A$ , die Brucheinschnürung  $Z$ , das Streckgrenzenverhältnis  $R_{eH}/R_m$  und die Verformungsarbeit  $W$  gemessen bzw. berechnet.

Gleiche Bruchdehnungen werden nur unter der Bedingung

$$\frac{s_0^2}{L_0} = \text{const.}$$

erhalten. Deshalb sieht die Norm kurze ( $\frac{D_0}{L_0} = \frac{1}{5}$ ) und lange ( $\frac{D_0}{L_0} = \frac{1}{10}$ ) Proportionalstäbe vor, deren Bruchdehnung  $A_5$  bzw.  $A_{10}$  zu unterschiedlichen Werten führt:  $A_{10} > A_5$ .

## 2.3 Struktur von Thermoplasten

### 2.3.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen ist der weltweit am häufigsten verwendete Kunststoff. Aus diesem Kunststoff werden Einkaufstaschen, Shampooflaschen, Spielzeuge und sogar kugelsichere Westen hergestellt. Ein Polyethylenmolekül besteht aus einem langen Rückgrat aus Kohlenstoffatomen mit jeweils zwei Wasserstoffatomen pro Kohlenstoffatom. Durch diese lineare Struktur ohne

Verzweigungen resultieren eine hohe Kristallinität und eine hohe Dichte des Polymers. Daher wird dieses Polymer auch HDPE (high density polyethylene) genannt. Es ist auch möglich, dass einige der Kohlenstoffatome anstatt mit einem Wasserstoffatom mit einer lange Kette (Polyethylen) verbunden sind und somit Kettenverzweigungen auftreten. Dadurch verringert sich nicht nur die Kristallinität sondern auch die Dichte des Polymers. Es wird daher LDPE (low density poly ethylene) genannt. Lineares Polyethylen ist viel fester als verzweigtes Polyethylen, verzweigtes Polyethylen ist aber billiger und einfacher herzustellen.

### **2.3.2 Polyethylenterephthalat (PET)**

PET ist ein Polymer aus veresterten Ethylenglycolen und Terephthalatderivaten. Es entsteht durch Polykondensation von (Poly)Ethylenglykol und Terephthalsäure. Durch die Terephthalsäure besitzt es 1,4-substituierte, aromatische Benzolringe in der Hauptkette. Die Estergruppen in der Polyesterkette sind polar, wobei der Carbonylsauerstoff eine negative Partialladung aufweist und das Carbonylkohlenstoff eine positive Partialladung. Durch die elektrostatische Anziehung der jeweils gegenteiligen Partialladungen richten sich die Estergruppen benachbarter Ketten in einer kristallinen Form an.

### **2.3.3 Polystyrol (PS)**

Polystyrol ist ein Polymer, das einen Benzolring in der Seitengruppe aufweist. Es gibt zwei Arten von Polystyrolen, die auf Stereoregularität beruhen: syndiotaktisches und ataktisches Polystyrol. Bei syndiotaktischem Polystyrol sind die Phenylgruppen der Polymerkette abwechselnd entlang der Hauptpolymerkette angeordnet. Normales oder ataktisches Polystyrol hat keine Ordnung hinsichtlich der Anordnung der Phenylgruppen.

## ***2.4 Glasübergangstemperatur und Temperatureinfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Polymeren***

Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  ist die Temperatur, bei der amorphe oder teilkristalline Polymere vom flüssigen oder gummielastischen Zustand in den hartelastischen oder glasigen Zustand übergehen bzw. umgekehrt. Ursächlich für das Phänomen der Glasübergangstemperatur ist das Einfrieren oder Auftauen der Brownschen Molekularbewegungen längerer Kettensegmente der Polymeren. Die Glasübergangstemperatur wird daher auch oft als Einfriertemperatur, Erweichungstemperatur oder -punkt bzw., da die Übergänge meistens in

einem Temperaturbereich stattfinden, als Glasumwandlungsintervall oder Erweichungsbereich bezeichnet. Beim Erreichen der Glasübergangstemperatur tritt eine drastische Änderung der Viskosität und anderer physikalischer Kenngrößen, wie der Härte, des E-Moduls und der thermodynamischen Zustandsgrößen Volumen, Enthalpie und Entropie, der Polymeren ein. Bestimmt werden kann die Glasübergangstemperatur unter anderem über dilatometrische, dielektrische, dynamisch-mechanische oder refraktrometrische Messungen bzw. mit Hilfe der NMR-Spektroskopie. Die Glasübergangstemperatur ist abhängig von der chemischen Struktur der Polymeren, deren Molmasse, der Flexibilität der Polymerketten und vom Druck (bzw. Zug), dem das Polymersystem ausgesetzt wird. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität, der Härte und des E-Moduls wird im Spannung-Dehnungsdiagramm der Polymere sehr deutlich. Wenn die Temperatur steigt, sinkt im Allgemeinen das Elastizitätsmodul, die Elastizitätsgrenze sowie die Bruchfestigkeit. Im Gegensatz hierzu steigen in der Regel die elastische Verformbarkeit und die Bruchdehnung. Die mechanischen Eigenschaften von Polymeren ändern sich drastisch wenn die Temperatur  $T_g$  überschritten wird. Der E-Modul kann beispielsweise um einen Faktor 1000 erniedrigt werden, wenn die Glasübergangstemperatur  $T_g$  überschritten wird.

Statistische Copolymere u. Mischungen von miteinander kompatiblen Polymeren haben in der Regel nur eine Glasübergangstemperatur, die zwischen der der reinen Homopolymeren liegt. Blockcopolymere mit inkompatiblen Blöcken u. Blends von inkompatiblen Polymeren weisen dagegen mehr als eine Glasübergangstemperatur auf. Die Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur  $T_m$  als weitere wichtige Temperatur-Kenngröße für Polymere korrelieren bei den meisten Polymeren einigermaßen exakt. Das Verhältnis von  $T_g:T_m$  liegt bei über 80% von symmetrischen u. asymmetrischen Polymeren im Bereich von ca. 0,5–0,8. Beide Temperaturen vermitteln wichtige Anhaltspunkte über die Formbeständigkeit der Polymeren beim Erwärmen u. damit Aussagen, in welchem Temperatur-Bereich die Polymeren einsetzbar sind.

### 3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wird mit der Zug-Druck-Prüfmaschine Zwick/Roell Z020 durchgeführt. Im Rahmen des Praktikums werden genormte Flachproben aus verschiedenen Materialien verwendet. Die Prüfmaschine ist erst nach ausführlicher Einweisung durch den Aufsichtsführenden zu bedienen. Die Bedienung während eines Versuches darf nur von einer Person vorgenommen werden. Bei den Untersuchungen sind geeignete Schutzmaßnahmen gegen mögliche abplatzende Teile zu treffen. Die Messungen werden bei Raumtemperatur durchgeführt.

- a) Bestimmen Sie die Abmessungen der Proben und berechnen Sie die Querschnittsfläche. Messen Sie hierzu die Probendimensionen mindestens dreimal und ermitteln Sie den Mittelwert. Markieren Sie innerhalb des verjüngten Abschnitts die Mitte sowie einen Längenbereich, der für die Probendimensionen geeignet ist. Die Ausgangsfläche  $A_0$  wird aus den Probengeometrien berechnet. Die Messlänge ist gleich der angerissene Längenbereich.
- b) Führen Sie den Zugversuch mit drei verschiedenen Metallproben bis zum Bruch durch!
- c) Führen Sie den Zugversuch für jedes Polymer mit 5 Proben bis zum Bruch durch!
- d) Führen Sie den Zugversuch mit 5 weiteren erwärmten Polymerproben durch! Dabei sind die gleichen Polymere zu verwenden wie unter c).

Während des Dehnungsvorganges werden die zur Verformung erforderlichen Kräfte  $F$  in Abhängigkeit von der Verlängerung  $\Delta L = L(t) - L_0$  der ursprünglichen Messlänge  $L_0$  des Probestabes bestimmt und gespeichert. Dabei ist  $L(t)$  die zu einem jeweiligen Zeitpunkt des Versuches vorliegende Messlänge.

## 4 Auswertung

Zeichnen Sie die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der einzelnen Zugversuche im Detail.

Ermitteln Sie die folgenden Materialkenngrößen:

1. Elastizitätsmodul
2. Obere Streckgrenze/ 0,2 %-Dehngrenze
3. Zugfestigkeit
4. Bruchdehnung
5. Brucheinschnürung

Der ermittelte Spannungs-Dehnungs-Verlauf soll den folgenden Grundtypen zugeordnet werden:

- keine Streckgrenzenerscheinung (typisch für kubisch flächenzentrierte Metalle wie Al, Cu, Ni, austenitische Stähle)
- ausgeprägte Streckgrenze und inhomogenem Dehnungsbereich (Dehnungszunahme ohne Nennspannungssteigerung, Lüdersdehnung, z. B. Cu- und Al-Basislegierungen) mit oberer und unterer Streckgrenze und inhomogenem Dehnungsbereich (nach Erreichen der Streckgrenze Nennspannungsabfall und danach Lüdersdehnung, z. B. unlegierte Stähle mit nicht zu großem Kohlenstoffgehalt)
- Sprödes Werkstoffverhalten
- Elastisch-plastisches Verhalten
- Viskoelastisches Verhalten

Die Kennwerte und das Materialverhalten sind kritisch zu bewerten und entsprechend der Versuchsaufgabe zu diskutieren.

Die Resultate sind in geeigneter Form graphisch darzustellen.

Dehnung an der Streckgrenze

Zeichnen Sie das Spannungs-Dehnungsverhalten jeweils eines Polymers bei verschiedenen Temperaturen und diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit der physikalischen und mechanischen Kenngrößen der Polymere

## 5 Weiterführende Literatur

- [1] Blumenauer, H.: Werkstoffprüfung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig
- [2] Weißbach, W.: Werkstoffkunde & Werkstoffprüfung. Vieweg & Sohn Braunschweig
- [3] Schatt, W.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig
- [4] Callister jr., W.: Fundamentals of materials science: an interactive e-text. John Wiley & Sons, Weinheim 2001
- [5] Merkel, M.: Taschenbuch der Werkstoffe. Fachbuchverlag Leipzig
- [6] Stahl-Eisen-Liste: Stahleisen-Verlag
- [7] Handbuch der Kennwerte von metallischen Werkstoffen nach EN (Ringeinband). Deutscher Verlag für Schweißtechnik
- [8] I.M Ward, Mechanical Properties of Solid Polymers, 2 Ed. Wiley NY, 1983
- [9] G.M Swallowe, Mechanical Properties and Testing of Polymers, Kluwer pub, 1999.
- [10] European Standard (EN ISO 527) for Determination of tensile properties of plastics, Kunststoffe Mechanische und thermische Eigenschaften, Beuth 1997.
- [11] CD Römpp Chemie Lexikon – Version 1.0, Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag 1995.