

Praktikum Werkstofftechnik

Versuch 6 Zugversuch

Gegeben

Universalprüfmaschine

- Lastbereich bis 20kN

Messdatenerfassung mit PC

Zugprüfkörper aus Metall und Kunststoff

Messschieber

Aufgabe

Durchführung des Zugversuchs an metallischen und polymeren Werkstoffen

Bestimmung des Prüfkörperquerschnitts vor dem Versuch

Auswertung der ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Ermittlung der E-Moduli

Bestimmung der Bruchdehnung A an den **metallischen** Prüfkörpern durch Längenmessung vor und nach dem Versuch und Vergleich mit den Computerwerten!

Versuchsdurchführung

Zunächst sind die geometrischen Daten der Prüfkörper zu erfassen und auf den metallischen Prüfkörpern ist jeweils eine Anfangslänge L_0 von 50mm zur Bestimmung der Bruchdehnung A zu kennzeichnen.

Ein Prüfkörper ist entsprechend der Anleitung des Versuchsbetreibers in die Prüfmaschine einzubauen und die Messung zu starten.

Nach dem Bruch der Prüfkörper wird die Änderung der Messlänge L_u an den Metallprüfkörpern ermittelt. Die Bruchdehnung der Prüfkörper wird mit der PC-Aufzeichnung verglichen und die Bruchstelle (Lage und Form) dokumentiert.

Für die weiteren Prüfkörper ist analog zu verfahren.

Zur Bestimmung der Brucheinschnürung ist ein runder Prüfkörper vor und nach dem Bruch auszumessen.

Auswertung (Protokoll)

- ~~- Versuchsaufbau (Skizze, Text)~~
- ~~- Beschreibung des Versuchsablaufes~~
- ~~- Spannungs-Dehnungs-Diagramme~~
- ~~- Berechnen Sie aus den verteilten Kopien der Kraft-Verlängerungs-Diagramme den **Elastizitätsmodul zweier Metalle sowie eines Polymers!**~~
- ~~- Ermitteln Sie bei **allen** geprüften Metallen die Bruchdehnung **A**! Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse von **A** mit den Computerwerten! Welche Ursachen führen zu den Abweichungen?~~
- ~~- Stellen Sie die Kennwerte der von Ihnen durchgeführten Zugprüfung an den Metallprüfkörpern tabellarisch dar!~~
- ~~- Berechnen Sie für das geprüfte weiche Kupfer die wahre Spannung σ_w (bei Höchstkraft) unter der Annahme, dass der Prüfkörperquerschnitt bei Höchstkraft noch 60% des Ausgangsquerschnitts beträgt!~~
- ~~- Berechnen Sie die Brucheinschnürung **Z** bei des von Ihnen vermessenen Rundprüfkörpers!~~

- ~~- Diskutieren Sie die Spannungs-Dehnungs-Kurven von Kupfer (weich und hart) unter Berücksichtigung ihrer Streckgrenzen, Bruchdehnungen sowie Brucharbeiten!~~
- ~~- Nennen Sie Einsatzmöglichkeiten dieser so verschiedenen Werkstoffzustände!~~
- ~~- Vergleichen Sie die Kenngrößen Zugfestigkeit und Bruchspannung bei Kunststoffen?~~
- ~~- Wie ermittelt man die Bruchdehnung bei Kunststoffen?~~
- ~~- Stellen Sie die Kennwerte der von Ihnen durchgeführten Zugprüfung der Kunststoffe tabellarisch dar!~~
- ~~- Vergleichen Sie das unterschiedliche Verhalten der Metalle und Kunststoffe bei Zugbelastung!~~
- ~~- Definieren Sie die Werkstoffeigenschaften elastisch, linearelastisch und viskoelastisch? Nennen Sie eine Werkstoffgruppe, die sich linearelastisch verhält? Wie groß ist in etwa der linearelastische Bereich (maximaler elastischer Verformungsgrad) eines Metalls?~~

Grundlagen

1. Zugversuch an Metallen

Der Zugversuch nach der Norm DIN EN ISO 6982 (ersetzt DIN EN 10002) gehört zu den wichtigsten Prüfverfahren zur Beurteilung von Werkstoffen. Es werden Festigkeits- und Verformungskennwerte ermittelt, die in den Werkstofflisten vorrangig zu finden sind. Obwohl diese Kenngrößen nur für statische Belastungen gelten, dienen sie doch grundlegend dazu, die auf dem Markt verfügbaren Werkstoffe untereinander zu vergleichen und die für die Bauteilauslegung notwendigen Festigkeitsberechnungen durchzuführen.

Der Zugversuch besteht darin, einen Prüfkörper durch Zugbeanspruchung unter Vorgabe einer bestimmten Beanspruchungsgeschwindigkeit zu dehnen (bis zum Bruch), um mechanische Kenngrößen zu bestimmen.

Der Versuch dient zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei Zugbeanspruchung und liefert die für die Festigkeitsberechnungen erforderlichen Kennwerte des **Elastizitätsmoduls (E)**, der **Zugfestigkeit (R_m)** und der **Streckgrenze (R_e)**. Weiterhin erhält man die Werte für die **Gleichmaßdehnung (A_g)**, **Bruchdehnung (A)** und **Brucheinschnürung (Z)**, die für die Beurteilung der Umformbarkeit wichtig sind.

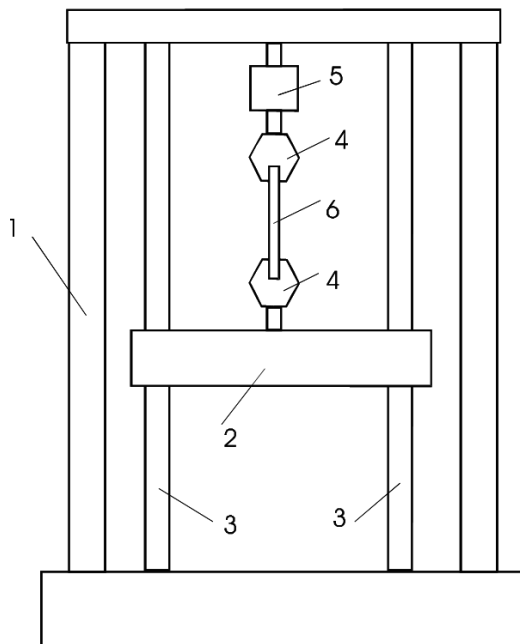
Der Zugversuch wird an genormten Prüfkörpern, die aus dem zu prüfenden Werkstoff extra hergestellt werden müssen und die bestimmte geometrische Formen (z. B. Flach- oder Rundprüfkörper) haben, mit Hilfe von kalibrierten Prüfmaschinen und Geräten, die eine korrekte Auswertung erlauben, durchgeführt. Möglich ist auch die Prüfung ganzer Baugruppen sowie bauteilähnlicher Prüfkörper.

Form und Maße der Prüfkörper sind ebenfalls in der Norm DIN EN ISO 6982 festgelegt. Der Prüfkörperquerschnitt S_0 kann kreisförmig, quadratisch, rechteckig oder ringförmig sein. Die Anfangsmesslänge L_0 muss mindestens 20 mm betragen. Wenn der Prüfkörperquerschnitt zu klein ist, um der Anfangsmesslänge L_0 zu entsprechen, kann entweder ein Wert für k von 11,3 gewählt werden oder Anfangsmesslänge und Anfangsquerschnitt werden unabhängig von einander gewählt (nichtproportionale Prüfkörper).

Um die Verformung während der Prüfung beispielsweise mittels Laserextensometrie zu verfolgen, können vor der Versuchsdurchführung auf den Prüfkörpern entlang der Messlänge Messmarken angebracht werden. Die Messmarken dürfen nicht als Kerbe wirken, um die Versuchsergebnisse nicht zu beeinflussen. Die Messmarken werden ganz fein, z. T. auch als Farbstriche, aufgebracht. Außerdem können (wie im Praktikum) mechanische Ansatzdehnungsaufnehmer verwendet werden, die direkt an den Prüfkörper angebracht werden, um die Verlängerung des Prüfkörpers zu messen. Sie werden für die Messung der Anfangsverlängerung (Bestimmung des Elastizitätsmoduls) eingesetzt.

Der Prüfkörper wird in zwei Einspannklemmen eingespannt, wobei eine Einspannklemme fest gelagert ist, während die andere beweglich und damit verschiebbar ist. Auf die bewegliche Einspannklemme wird je nach Maschinentyp mit einer veränderlichen Kraft F bzw. mit einer veränderlichen Abzugsgeschwindigkeit eingewirkt, so dass der Prüfkörper eine in axia-

ler Richtung ansteigende Zugkraft erfährt. In Bild 1 ist eine Universalprüfmaschine mit Spindeltrieb zur Durchführung des Zugversuchs schematisch dargestellt. Gegenüber Universalprüfmaschinen mit Spindeltrieb gibt es auch solche mit servohydraulischem Antrieb.



- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1 Maschinenrahmen | 4 Einspannklemmen |
| 2 Querhaupt | 5 Kraftmessdose |
| 3 Spindeln | 6 Probe |

Bild 1: Schematische Darstellung einer Universalprüfmaschine

Über eine Kraftmessdose sowie ein Längenänderungsmesssystem werden die aufgebrachte Kraft sowie die zugehörige Verlängerung registriert. Die Zugbelastung des Prüfkörpers muss um allgemein vergleichbare Messergebnisse zu erzielen gleichmäßig, stoßfrei und in einem vorgeschriebenen Bereich der Belastungsgeschwindigkeit vorgenommen werden. Die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst die Ergebnisse des Zugversuchs. Hohe Belastungsgeschwindigkeiten liefern im Allgemeinen höhere Festigkeitskennwerte und kleinere Verformungskennwerte.

Im Einzelnen werden im Zugversuch folgende Festigkeits- und Verformungskennwerte ermittelt:

- Zugfestigkeit R_m
- 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ oder Streckgrenzen R_{eH} und R_{eL}
- Elastizitätsmodul E
- Gleichmaßdehnung A_g
- Bruchdehnung A

Bei Einhaltung der in der Norm vorgegebenen Versuchsbedingungen sind die ermittelten Kennwerte mit denen anderer Prüflabore vergleichbar.

Mit dem Beginn der Belastung verlängert sich der Prüfkörper. Unter Last kann man die Gesamtverlängerung ΔL_{gesamt} (Gl. 1), bestehend aus dem elastischen und plastischen Anteil, messen.

$$\Delta L_{\text{gesamt}} = \Delta L_{\text{elastisch}} + \Delta L_{\text{plastisch}}$$

Gl. 1

Bezieht man die Kraft F auf den Ausgangsquerschnitt S_0 der Prüfkörper, erhält man die **Nennspannung** σ (Gl. 2) und die Längenänderung ΔL auf die Anfangslänge L_0 , so erhält man die **Dehnung** ε (Gl. 3).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2 = \text{MPa}) \quad \text{Gl. 2}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 (\%) \quad \text{Gl. 3}$$

Aus dem aufgezeichneten Kraft-Verlängerungs-Diagramm wird unter Beachtung der oben genannten funktionellen Zusammenhänge das Spannungs(σ)-Dehnungs(ε)-Diagramm ermittelt.

Das σ - ε Diagramm kann in mehrere Bereiche aufgeteilt werden. Der erste ist der **elastische Bereich**, welcher durch einen linearen Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε charakterisiert ist (Gl. 4) und nach dem englischen Naturforscher ROBERT HOOKE als **Hooke'sche Gerade** bezeichnet wird:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{mit } E = \text{Elastizitätsmodul (engl. Young's Modulus)} \quad \text{Gl. 4}$$

Der E-Modul als Proportionalitätsfaktor entspricht dem Anstieg der Hooke'schen Geraden. Befindet sich die Kraft bzw. die Dehnung innerhalb dieses Bereiches, so geht der gedehnte Prüfkörper nach der Entlastung auf seine ursprüngliche Länge zurück.

Der Elastizitätsmodul E auch kurz E-Modul genannt, ist ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffes gegen elastische Verformung.

Wird der Prüfkörper über den elastischen Bereich hinaus belastet, geht die Gerade des Spannungs-Dehnungs-Diagramms in ein gekrümmtes Kurvenstück über oder fällt ab. Dann ist der **plastische Bereich** erreicht. Dies macht sich z.B. nach einem zwischenzeitlichen Entlasten in einer bleibenden Verformung der Prüfkörper bemerkbar.

Der Übergang vom elastischen und in den plastischen Bereich wird als **Fließ- bzw. Streckgrenze** bezeichnet. Je nach Werkstoff kann im σ - ε Diagramm der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich mit oder ohne ausgeprägte Streckgrenze erfolgen (Bild 2).

An der Streckgrenze ist der Anstieg des Spannungs-Dehnungs-Diagramms = 0. Es tritt eine Zunahme der Dehnung ohne Spannungszunahme auf, d.h. hier erfolgt eine plastische Deformation.

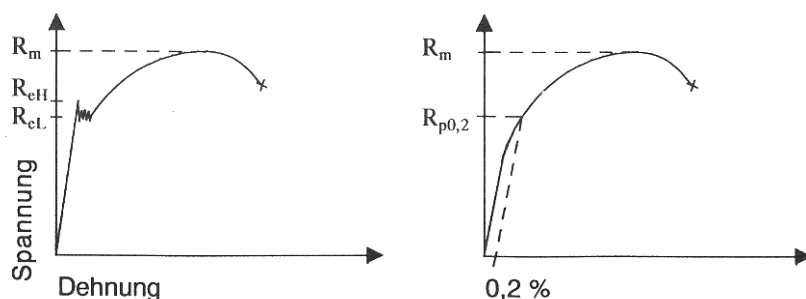


Bild 2: Spannungs- Dehnungs- Diagramm mit und ohne ausgeprägter Streckgrenze

Eine ausgeprägte Streckgrenze ist an einem plötzlichen Absinken und Schwingen der Kraft bei gleichzeitiger Zunahme der Dehnung erkennbar. Die obere Streckgrenze R_{eH} (Index für „high“) ist definiert als die Nennspannung, bei der der erste deutliche Kraftabfall auftritt. Die untere Streckgrenze R_{eL} (Index L für „low“) ist definiert als die kleinste Nennspannung im Fließbereich, wobei Einschwingerscheinungen nicht berücksichtigt werden.

Für Werkstoffe **ohne** ausgeprägte Streckgrenze (z.B. Al) ist der genannte Übergang oft nur schwer zu erkennen. Es wird daher üblicherweise eine 0,2%-Dehnungsgrenze („Ersatzstreck-

grenze“) bestimmt. Dies ist die Nennspannung, bei der eine nichtproportionale, also bleibende Dehnung von 0,2% erreicht wird.

Wird die Kraft über die Streckgrenze hinaus erhöht, steigt die Kurve bis zu einem Maximum an. Danach wird am Prüfkörper eine starke örtliche Einschnürung an einer Stelle der Versuchslänge sichtbar, die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit einer Abnahme der Spannung gekoppelt ist, bis der Prüfkörper reißt. Die erreichte Maximalspannung wird mit **Zugfestigkeit** R_m bezeichnet (Gl. 5):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Zugfestigkeit ist die maximal erreichbare Spannung des Werkstoffes unter Zugbeanspruchung.

Bis zum Kraftmaximum hat sich der Prüfkörper gleichmäßig entlang der gesamten Messstrecke verlängert und ist dabei dünner geworden. Die Größe der bleibenden Verlängerung ist bis zu diesem Punkt ein den Werkstoff und seinen Zustand charakterisierender Wert. Diese nichtproportionale Dehnung bei Höchstkraft A_g wird auch als **Gleichmaßdehnung** bezeichnet (Gl. 6):

$$A_g = \frac{L(F_m) - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad \text{Gl. 6}$$

Die Nennspannung am eigentlichen Bruchpunkt ist nur von geringer praktischer Bedeutung und wird als Kennwert meist nicht festgehalten.

Zur Bestimmung der Bruchdehnung als Maß für die Dehnbarkeit eines Werkstoffes werden bei Metallen die Bruchstücke des Prüfkörpers zusammengelegt. Dabei ist nach Möglichkeit darauf zu achten, dass der zusammengelegte Prüfkörper gerade verläuft. Der Abstand zwischen den Markierungen der Anfangsmesslänge wird bestimmt. Die Differenz der Messlängen nach (L_u) und vor dem Bruch (L_0) dividiert durch die Anfangsmesslänge L_0 ist als **Bruchdehnung** A definiert (Gl. 7):

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100(\%) \quad \text{Gl. 7}$$

Von praktischer Bedeutung ist auch die beim Bruch verbleibende Querschnittsfläche S_u . Die Abnahme der Ausgangsfläche ($S_0 - S_u$), dividiert durch die Ausgangsfläche S_0 nennt man **Brucheinschnürung** Z (Gl. 8):

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100(\%) \quad \text{Gl. 8}$$

Die Brucheinschnürung Z ist neben A und A_g der dritte aus dem Zugversuch ermittelbare Verformungskennwert. Glas zeigt bei Raumtemperatur einen gegen Null gehenden Z -Wert, während beispielsweise Reinstkupfer bei derselben Temperatur eine Brucheinschnürung Z von nahezu 100% besitzt.

Die ermittelten Werte aus dem Zugversuch werden in einem Prüfbericht festgehalten. Der Bericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

- Hinweis auf die Norm
- Kennzeichnung der Prüfkörper
- Werkstoff, falls bekannt
- Prüfkörperlage und -richtung
- gemessene Kennwerte und Ergebnisse

Weitergehende Anforderungen z.B. an die Prüfkörperherstellung, Maschinengeschwindigkeiten usw. finden Sie in der Norm DIN EN ISO 6982 – Teil 1.

2. Verfahren zur Bestimmung der 0,2% Dehngrenze

Das Verfahren der 0,2%-Dehngrenze wird bei Werkstoffen angewendet, bei denen ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm ohne ausgeprägte Streckgrenze zu erwarten ist.

Eine Vorgehensweise ist die Aufnahme des Anfangsbereiches des Kraft-Verlängerungs-Diagramms. Nach der Umrechnung in Spannungs-Dehnungs-Werte kann die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ bestimmen werden, in dem eine Parallele zur Hooke'schen Gerade von dem 0,2%-Dehnungswert ausgehend gezeichnet wird (Bild 2). Bei modernen, rechnergestützten Zugprüfmaschinen lässt sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm automatisch ermitteln und am Bildschirm darstellen bzw. ausdrucken. Die Ermittlung von $R_{p0,2}$ erfolgt dann durch den Rechner bzw. der Software. Je nach Anforderung können auch $R_{p0,1}$ - oder $R_{p0,01}$ -Werte ermittelt werden.

3. Zugversuch an Kunststoffen

Für die Durchführung des Zugversuchs an Kunststoffen werden wie bei den Metallen Universalprüfmaschinen eingesetzt, die in der Regel jedoch einen geringeren Lastbereich aufweisen. Wegen des unterschiedlichen mechanischen Verhaltens von Kunststoffen gibt es für die Zugprüfung von Kunststoffen die eigenständige Norm DIN EN ISO 527. Die Durchführung erfolgt nach den gleichen Wirkprinzipien wie bei den Metallen, d.h. es werden Kraft-Verlängerungs-Diagramme aufgenommen und in Spannungs-Dehnungs-Diagramme umgerechnet.

Im Bild 3 sind der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur auf den Verlauf der Spannungs- Dehnungs- Kurven für einen thermoplastischen Kunststoff dargestellt.

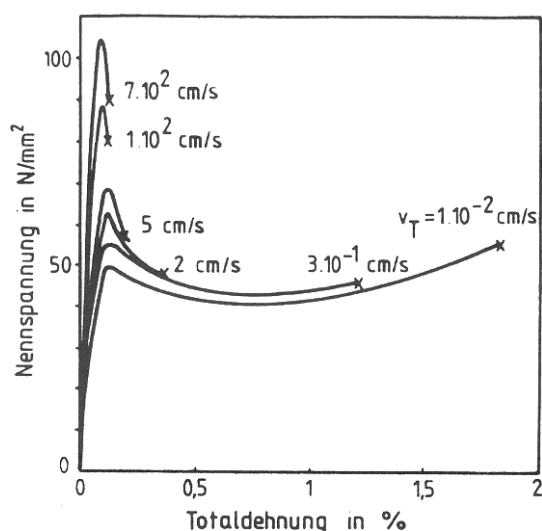


Bild 3: Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Bild 4 zeigt für verschiedene Kunststoffe bzw. Werkstoffeigenschaften mögliche Kurvenverläufe. Es werden jedoch kunststoffspezifische Kennwerte definiert, die zu ermitteln sind:

1. Die **Streckspannung** σ_y ist der erste Nennspannungswert, bei dem ein Zunahme der Dehnung ohne Steigerung der Nennspannung auftritt.
2. Die **Bruchspannung** σ_B ist die Nennspannung beim Bruch des Prüfkörpers und wird auch als Reißfestigkeit bezeichnet.
3. Die **Zugfestigkeit** σ_M ist die maximale Nennspannung, die der Prüfkörper während der Belastung erträgt.
4. Die **Streckdehnung** ε_y ist die **gesamte** Dehnung bei Streckspannung.
5. Die **Bruchdehnung** ε_B ist die **gesamte** Dehnung im Augenblick des Bruchs des Prüfkörpers.

6. Die **Dehnung bei der Zugfestigkeit** ε_M ist die **gesamte** Dehnung bei der Maximalspannung.

Der **Elastizitätsmodul** E_t wird bei definierten Dehnungen ($\varepsilon_2 = 0,25\%$ und $\varepsilon_1 = 0,05\%$) und den dazugehörigen Spannungswerten (σ_2 und σ_1) mathematisch ermittelt (Gl. 9).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{F_2 - F_1}{0,002 \cdot A_0} \quad \text{Gl. 9}$$

Ersichtlich ist, dass andere Formelzeichen verwendet werden und dass bei der Bestimmung der Dehnkennwerte immer die gesamte Prüfkörperverlängerung (bestehend aus elastischem und bleibendem Anteil) aus dem Kraft-Verlängerungs-Diagramm entnommen und nicht wie bei den Metallen nur die bleibende Verlängerung. Aufgrund des viskoelastischen Verformungsverhaltens ist bei Kunststoffen die bleibende Verlängerung eine Funktion der Zeit. Im Augenblick des Bruches vermindert sich die Bruchlänge um den elastischen Anteil, während der viskoelastische Anteil sich mit der Zeit zurückstellt. D.h. nach Entlasten des Prüfkörpers wird nicht sofort die bleibende Verlängerung erreicht, sondern der Prüfkörper zieht sich noch über einen längeren Zeitraum weiter zusammen.

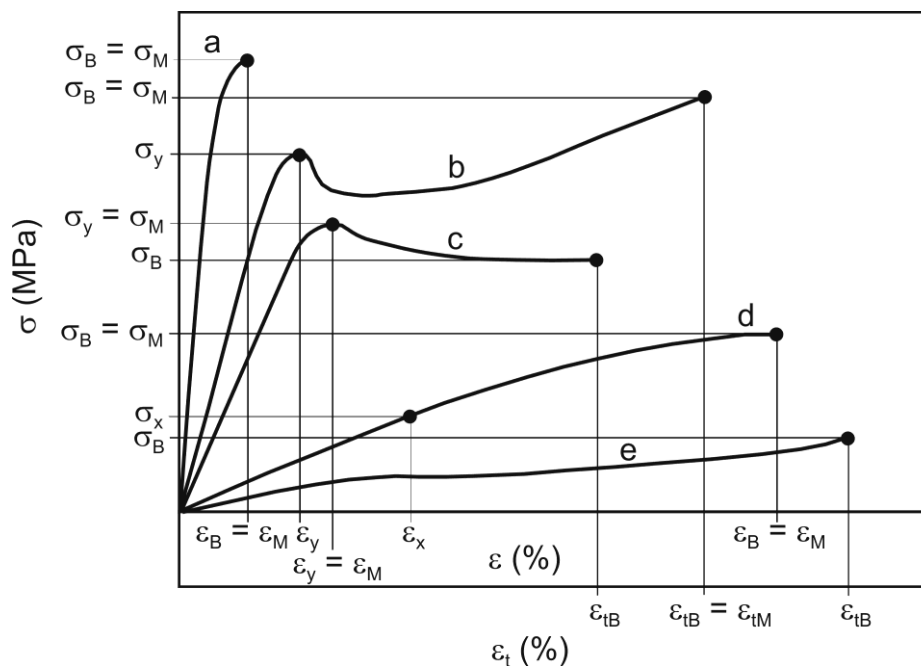


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Kenngrößen von verschiedenen Kunststoffen; spröde Werkstoffe (a), zähe Werkstoffe mit Streckpunkt (b und c), zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt (d) und elastomere Werkstoffe (e)

Fragen zum Testat Zugversuch

- 1) Wie wird der Zugversuch maschinentechnisch realisiert?
- 2) Was beschreibt der E-Modul? Was kann man mit Hilfe des E-Moduls berechnen?
- 3) Wie sind Spannung (Nennspannung) und Dehnung beim Zugversuch definiert?
- 4) Welche Größen werden durch folgende Symbole beschrieben: R_{eL} , R_{eH} , R_p , R_m , A_g , A und Z ?
- 5) Was ist der Unterschied zwischen Nennspannung (auch technische Spannung genannt) und wahrer Spannung?
- 6) Erläutern Sie die Arbeitsweise einer Kraftmessdose!
- 7) Was ist ein Dehnungsmessstreifen?
- 8) Welche 3 großen Kunststoffgruppen gibt es? Worin unterscheiden sich diese Gruppen im chemischen Aufbau? Erläutern Sie das Hoch- bzw. Tieftemperaturverhalten dieser 3 Gruppen!
- 9) Wie wird der Elastizitätsmodul von Kunststoffen bestimmt?
- 10) Wie ist die Bruchdehnung eines Kunststoffes definiert?
- 11) Was versteht man unter elastischer, was unter plastischer Verformung?
- 12) Was ist eine Versetzung?
- 13) Was passiert im Atomgitter der Metalle bei elastischer, was bei plastischer Verformung?

Literatur

DIN EN ISO 6982 – Teil1

DIN EN ISO 527 – Teil 1

Blumenauer, H. Werkstoffprüfung, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1994

Bargel, H. J.; Schulze, G. Werkstoffkunde, Springer Verlag, 2008 oder ältere Auflagen

Macherauch, E. Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg-Verlag, 1992