

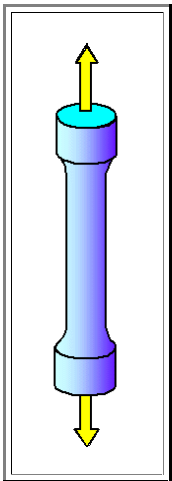
## 7. Mechanische Eigenschaften

### 7.1 Zugversuch

#### 7.1.1 Typische Spannungs-Dehnungskurven

##### Der Zugversuch

- Die letzten Kapitel des Hyperscripts sind den mechanischen Eigenschaften gewidmet; und dabei wollen wir auch nicht-kristalline Materialien, also amorphe Stoffe wie **Gläser** und **Polymere** berücksichtigen.
- Das Ziel ist, mechanische Eigenschaften, wie **Verformbarkeit**, **Sprödigkeit**, **Bruch** zu verstehen - kurz, wir möchten verstehen warum Materialien sich sehr verschieden verhalten, wenn wir mit einem Hammer draufschlagen.
  - Wir möchten verstehen, wie sich all diese mechanische Eigenschaften aus der Mikrostruktur, aus dem Gefüge des Materials ergeben. Wir möchten verstehen, wie wir sie **gezielt** beeinflussen können - was wir tun müssen, um ein Material härter oder weicher zu machen. Ein **altes Anliegen** der Technologen, aber erst heutzutage halbwegs gezielt zu machen.
- Mechanische Eigenschaften sind aber sehr vielfältig, und durch qualitativ-beschreibende Begriffe wie Verformbarkeit oder Sprödigkeit nicht ausreichend beschreibbar. Deshalb müssen wir uns zuerst einige formal-beschreibende quantitative Größen erarbeiten.



- Als paradigmatisches Experiment um mechanische Eigenschaften zu testen, dient uns der gute alte **Zugversuch** - wir haben ihn schon **früher bemüht** um das elastische Verhalten zu beschreiben. Jetzt gehen wir aber bis zum Extrem, bis zum **Zerreißen** einer Probe.
- Dazu machen wir uns einen genormten **Prüfkörper**; zylindrisch mit verdickten Enden, damit die Einspannung nicht die Verformungseigenschaften beeinflusst.
- An diesem Prüfkörper ziehen wir (wir könnten auch drücken; aber das ist etwas komplexer). Aber nicht, wie man zunächst denken würde, mit **konstanter Kraft F** bzw. (mechanischer) **Spannung**  $\sigma$ . Denn es ist viel besser, die **Verformungsgeschwindigkeit**  $d\epsilon/dt$  konstant zu halten.
- Spannung und Dehnung** werden wie folgt definiert: Die **Spannung** "Sigma" war die wirkende Kraft **F** pro Fläche **A**:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- Die Dehnung  $\epsilon$  war die relative Änderung der Länge **l**

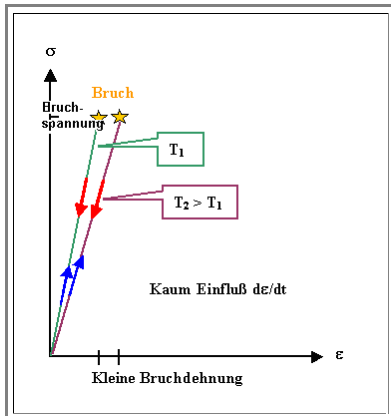
$$\epsilon(\sigma) = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l(\sigma) - l_0}{l_0} = \frac{l(\sigma)}{l_0} - 1$$

- Falls wir  $d\epsilon/dt$  konstant halten, also beispielsweise eine Längenänderung von **0,01%** pro Minute vorgeben, heißt das, daß wir die Spannung zu jedem Zeitpunkt so einstellen müssen, daß sich das gewünschte  $\epsilon$  ergibt.
- Wir brauchen also eine **Regelung**, die  $d\epsilon/dt$  aus einer kontinuierlichen Messung von **l** ermittelt und dann die Spannung so einstellt, daß  $d\epsilon/dt$  konstant bleibt.
  - Da  $\epsilon$  direkt proportional zur Zeit ist ( $\epsilon = (d\epsilon/dt) \cdot t$ ), müssen wir dann nur noch  $\sigma$  als Funktion der Zeit **t** auftragen, um eine **Spannungs-Dehnungskurve** für die gewählte Verformungsgeschwindigkeit zu erhalten. Für eine **andere** Verformungsgeschwindigkeit erhalten wir eine **andere** Spannungs-Dehnungskurve
- Diese Art der Messung von Verformungseigenschaften generiert eine große Informationsdichte über das betrachtete Material.

## Spröde Materialien

Wir spannen ein beliebiges Material in die Zugmaschine. Fest vorgegeben sind die Parameter  $d\epsilon/dt$ , und damit auch  $\epsilon(\dot{\epsilon}) = (d\epsilon/d\dot{\epsilon}) \cdot \dot{\epsilon}$ . Außerdem wird das Experiment bei einer konstanten Temperatur  $T$  durchgeführt.

Die einfachste Kurve, die wir erhalten können, beschreibt *sprödes Material*. Im wesentlichen finden wir



- Weitgehend *lineares* Verhalten bis zum Bruch, d.h.  $E = d\sigma/d\epsilon = \sigma/\epsilon = \text{const.}$ . Der  $E$ -Modul kann dabei sehr groß sein; siehe [Link](#)
- Vollständig *elastisches* Verhalten, d.h. die "*Hinkurve*" (blauer Pfeil) ist identisch mit der "*Rückkurve*" (roter Pfeil). In anderen Worten: Ob man die Spannung hoch- oder runterfährt produziert dieselbe Kurve.
- Kein (oder nur sehr geringer) Einfluß von  $d\epsilon/dt$  auf die Kurve.
- Kein großer Einfluß von  $T$ ; mit zunehmender Temperatur wird  $E$  etwas *kleiner*.
- Kein großer Einfluß des *Gefüges*, d.h. von Defekten oder anderen Gefügeparametern; wohl aber ein Einfluß von Vorbehandlungen und der Oberflächenqualität, auf die Bruchspannung bzw. -Dehnung.
- *Kleine* Bruchdehnungen (bei möglicherweise hohen Bruchspannungen) im Bereich  $\epsilon_{\text{Bruch}} \ll 1\%$ .

Typische, uns wohlvertraute *spröde Materialien* sind zum Beispiel

- Gläser; einige "harte" Kunststoffe oder Polymere.
- Viele **Ionenkristalle**, praktisch alle Keramiken.
- Einige kovalent gebundene Kristalle bei niedrigen Temperaturen - z.B. Diamant und **Si**.
- Viele intermetallische Phasen, z.B. **Ti<sub>3</sub>Al**.

**Sprödigkeit** ist das Gegenteil von **Zähigkeit** (engl. "toughness"). Um ein quantitatives Maß für diese Eigenschaften zu erhalten, definiert man als Zähigkeit  $G_C$  die insgesamt erforderliche *Arbeit*, die man in ein Material (pro Volumeneinheit) hineinstecken muß bis es bricht. Es gilt

$$G_C = \frac{1}{V} \int_0^{l_{\text{Bruch}}} F \cdot dl$$

- Mit  $V$  = Volumen,  $F$  = Kraft,  $l$  = Länge und  $l_{\text{Bruch}}$  = Länge beim Bruch
- Mit  $A$  = Querschnittsfläche wird  $V = A \cdot l$  und wir bekommen

$$G_C = \int_0^{l_{\text{Bruch}}} \frac{F \cdot dl}{A \cdot l} = \int_0^{\epsilon_{\text{Bruch}}} \sigma \cdot d\epsilon$$

da  $\sigma = F/A$  und  $dll = d\epsilon$ . Das Integral läuft jetzt von 0 bis  $\epsilon_{\text{Bruch}}$ ; *es ist einfach die Fläche unter der Spannungs-Dehnungskurve*.

Mit  $\sigma = E \cdot \epsilon$  ist das Integral sofort auswertbar, wir erhalten

$$G_C = \frac{E \cdot \epsilon_{\text{Bruch}}^2}{2} = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}^2}{2E}$$

Da  $\epsilon_{\text{Bruch}}$  klein ist, haben spröde Materialien eine *kleine* Zähigkeit. Das sieht man auch sehr schön in der Zusammenstellung einiger [Daten im Link](#).

Die zu verrichtende Brucharbeit ist Arbeit gegen die Bindungskräfte, die auch direkt **E bedingen**. Wir konnten aus den Bindungen auch ein Kriterium für die maximale Spannung oder Dehnung bis zum Bruch **ableiten**, aber wir werden noch sehen, daß der Spröbruch in der Regel schon bei viel kleineren Spannungen erfolgt.

Im Grunde haben wir damit sprödes Verhalten gut eingekreist. Was uns noch fehlt ist:

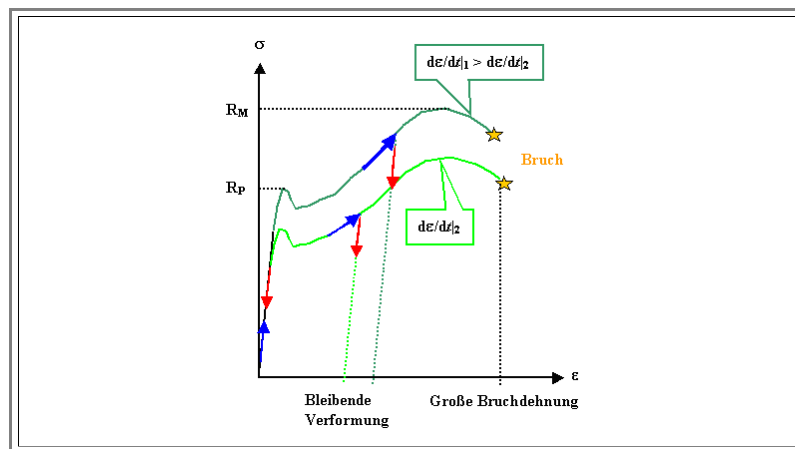
- 1. Ein **Kriterium** für Sprödigkeit, d.h. welche Materialeigenschaft Sprödigkeit oder Duktilität verursacht.
- 2. Eine Abschätzung **realistischer** Bruchspannungen oder -Dehnungen.

Der 1. Punkt muß (für Kristalle) etwas mit den Eigenschaften von **Versetzungen** zu tun haben, da **plastische Verformung** (und damit Duktilität) **immer von Versetzungen vermittelt** wird. Der 2. Punkt ist im Moment noch unklar; er wird in Kürze behandelt.

## Duktile Materialien

Betrachten wir nun die Spannungs - Dehnungskurve eines duktilen Materials. Wir nehmen z.B. eines der "weichen" Metalle **Au, Ag, Cu** oder **Pb**.

Was wir bekommen, wird je nach Material und Verformungsparametern **dε/dt** und **T** sehr verschieden aussehen, aber mehr oder weniger die in der folgenden Graphik gezeigten Eigenschaften haben.



Für relativ **kleine Spannungen** erhalten wir **elastisches** Verhalten wie bei spröden Materialien. Ein schwach temperaturabhängiger **E**-Modul (zusammen mit einem weiteren Modul) beschreibt das Verhalten vollständig.

Beim Überschreiten einer bestimmten Spannung **RP** die **Fließgrenze** genannt wird, bricht das Material jedoch noch nicht, sondern **verformt sich plastisch**.

Das Kennzeichen der **plastischen Verformung** ist, daß sich der **Rückweg vom Hinweg stark unterscheidet**. Wird die Spannung wieder zurückgefahren, geht die Dehnung nicht auf Null zurück, sondern entlang einer elastischen Geraden auf einen endlichen Wert - das Material ist **bleibend** verformt.

Die Fließgrenze hängt von allen möglichen Parametern ab: Wie in der Graphik gezeigt von der **Verformungsgeschwindigkeit**, aber auch von der **Temperatur** und insbesondere von Feinheiten des **Gefüges**. Der gezeigte "Peak" kann mehr oder weniger ausgeprägt gefunden werden; er ist stark von der Vorgeschichte des Materials bedingt.

Das **Maximum** der Kurve gibt die ultimative Spannung an, die das Material "aushält". Es heißt **RM = maximale Zugfestigkeit** ("**ultimate tensile strength**"). Sobald **RM** erreicht wird, kann man die Spannung wieder etwas zurücknehmen und **trotzdem** größere Dehnungen erreichen. Hält man die Spannung allerdings auf **RM**, wird die Probe sich jetzt immer weiter verformen bis zum Bruch.

Die Fläche unter der Spannungs - Dehnungskurve ist groß; wir haben eine **große Zähigkeit**.

Während das Verhalten im elastischen Bereich nach wie vor direkt durch die Bindungspotentiale gegeben ist (es werden nach wie vor nur Bindungen "langgezogen"), gilt das **nicht** für das Verhalten im plastischen Bereich (und den Bruch).

Typische Materialien mit mehr oder weniger ausgeprägtem plastischem Verhalten sind:

- Alle **Metalle**.
- Kovalent gebundene Kristalle; jedoch oft nur bei **höheren** Temperaturen, z.B **Si, Ge, GaAs**.
- Einige **Ionenkristalle**, insbesondere bei hoher Reinheit und hohen Temperaturen.
- Viele **Polymere** - diese folgen jedoch eigenen Gesetzmäßigkeiten, die wir in **Kapitel 9** behandeln werden.

Viele Fragen stellen sich; einige werden in speziellen Modulen näher betrachtet:

Wie sehen die **Spannungs - Dehnungskurven realer Materialien** aus?

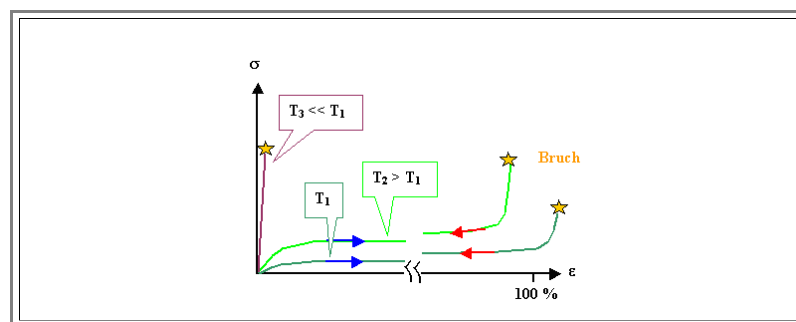
- Wie entwickelt sich die Form der Probe? Wird sie immer nur länger (und notgedrungen dünner), oder verliert sie die zylindrische Form?
  - Wieso hat die Spannungs - Dehnungskurve ein Maximum, d.h. warum braucht man weniger Spannung um eine große Verformung zu erzeugen als eine kleine?
  - Wie genau wirkt sich die Verformungsgeschwindigkeit aus?
  - Was passiert, falls wir eine schon einmal verformte Probe *nochmals* einem Zugversuch unterwerfen?
  - Was genau bestimmt  $R_p$  und  $R_M$ ? Die Größe des Peaks bei  $R_p$ ?
- Wir werden einigen Antworten auf diese Fragen im folgenden begegnen. Sie umfassen die wissenschaftlichen Grundlagen eines Großteils der Metallurgie und damit der **Grundlagen unserer Kultur und Zivilisation**.
- Bevor wir weiter gehen, beantworten wir aber noch schnell eine Frage, die unsere Vorfahren über Jahrtausende beschäftigt: Wie weit kann man ein Schwert biegen, bis es sich "verbiegt" oder gar bricht?

## Übung 7.1-3

Schwerter biegen

## Elastomere

- Was noch zu tun bleibt, ist ein kurzer Blick auf alle Materialien, die *nicht* in die Gruppe "spröd" oder "duktil" fallen.
  - Das sind zunächst die meisten *komplexen* Systeme. Zwar sind von den Zugversuchen des alten Griechen **Prokrustes** und der **Inquisition** an sehr komplexen biologischen Systemen keine Spannungs-Dehnungsdiagramme überliefert, aber man kann annehmen, daß sie nicht mit der bereits behandelten Systematik beschrieben werden können.
- Im weniger theologischen und mehr technischen Bereich sind es insbesondere einige Vertreter der Stoffgruppe der *Polymere*, die aus der Rolle fallen.
  - Im Kapitel 9 wird das noch vertieft werden; hier ist schon mal ein "trailer".
- Insbesondere aber die **Elastomere** - also **Gummisorten** - zeigen ein Verhalten, das *total verschieden* ist von den bisher behandelten Materialgruppen.
  - Ein typisches Spannungs - Dehnungsdiagramm von **Gummi** sieht etwa so aus:



- Als gemeinsames Charakteristikum halten wir fest, daß trotz stark verschiedener Verformungskurven wir bei Elastomeren *immer* elastisches Verhalten finden.
  - Am auffälligsten ist, daß *riesige* elastische Verformungen in der Größenordnung von **100 %** möglich sind.
  - Weniger auffällig ist, daß der (sehr kleine) **E-Modul** mit wachsender Temperatur etwas *zunimmt* - ganz im Gegensatz zu praktisch allen anderen Materialien.
  - Deutlich unterhalb einer für die jeweiligen Gummisorte charakteristischen Temperatur verliert das Elastomer sein gummiartiges Verhalten - es wird schlicht *spröde* und verhält sich weitgehend wie "normale" spröde Materialien.
  - Im "Gumbibereich" ist die *Verformungsgeschwindigkeit* nicht besonders wichtig.
- Wie ist dieses seltsame Verhalten zu erklären?
  - Zunächst ist klar, daß die elastische Verformung *nicht* wie sonst immer durch das "*Langziehen*" von *Bindungen* erfolgen kann: Wir können unmöglich die Bindungsabstände verdoppeln und verdreifachen ohne lange vorher das Material zu zerbrechen.
  - Damit ist aber ziemlich unklar was wirklich passiert! Wir werden die Gummielastizität noch ausführlich behandeln, hier nur so viel: Gummielastizität ist ein rein *entropischer* Effekt! Langziehen vermindert die Entropie des Systems "Gummi" und erhöht somit die freie Enthalpie. Das System "wehrt" sich dagegen durch eine Rückstellkraft.

- Obwohl die Spannungs - Dehnungskurven des Zugversuchs nur einen kleinen Teil des mechanischen Verhaltens von Festkörpern (unter stark idealisierten Umständen) beschreiben, enthalten sie eine Fülle von Information, die nur sehr schwer von "first principles" abzuleiten ist,
- Wir werden uns im folgenden einigen allgemeinen Grundlagen von elastischer und plastischer Verformung widmen, um dann einige ausgewählte Mechanismen etwas genauer zu betrachten.