8. Plastische Verformung von Kristallen

8.1 Plastische Verformung und Versetzungen

8.1.1 Theoretische Verformungsfestigkeit

Vorbemerkung

- Plastische Verformung ist uns schon oft begegnet. Einige grundsätzliche Eigenschaften der plastischen Verformung haben wir auch schon kennen gelernt, und es ist gut sich die folgenden Punkte schnell wieder anzueignen
  - **1.** Plastische Verformung zeigt sich in eindeutiger Weise: Nach *Wegnahme* der verformenden Spannungen ist das Objekt zwar noch zusammenhängend, d.h. nicht *gebrochen* - aber es sieht anders als vorher, es ist *verformt*. Das gilt nicht nur für den Zugversuch im Labor, sondern auch für Großversuche im Feld, wie das folgende Bild demonstriert.

  - **2.** Im Zugversuch ist die plastische Verformung eindeutig an den Spannungs- Dehnungskurven zu erkennen. Plastische Verformung findet statt sobald die **Fließgrenze** R_P erreicht ist.
  - **3.** Plastische Verformung (von Kristallen wie dem oben gezeigten) erfolgt ausschließlich durch die Erzeugung und Bewegung von Versetzungen.
  - **4.** An jedem Punkt der Probe erfolgt plastische Verformung dann und nur dann, falls die (im Hauptachsensystem) dort maximale auftretende Scherspannung $\tau_{max} = ½(\sigma_1 - \sigma_3)$ größer ist als eine (materialspezifische) kritische Scherspannung τ_{krit}.
  - **5.** Sowohl R_P als auch τ_{krit} (die ja offenbar eng verwandt sein müssen) sind stark von Gefüge und der Temperatur abhängig.
  - **6.** Plastische Verformung von Metallen ist direkt (durch Nutzung) und indirekt (durch Vermeidung) die absolute Grundlage der Metallzeitalter.
- Plastische Verformung von Kristallen ist ein nahezu unerschöpfliches Thema. Nach wie vor hängt der Fortschritt vieler Technologien vom Fortschritt bei der Beherrschung plastischer Verformung ab.
  - In diesem kurzen Kapitel wollen wir uns jedoch nur *einem* von vielen möglichen Unterthemen widmen:

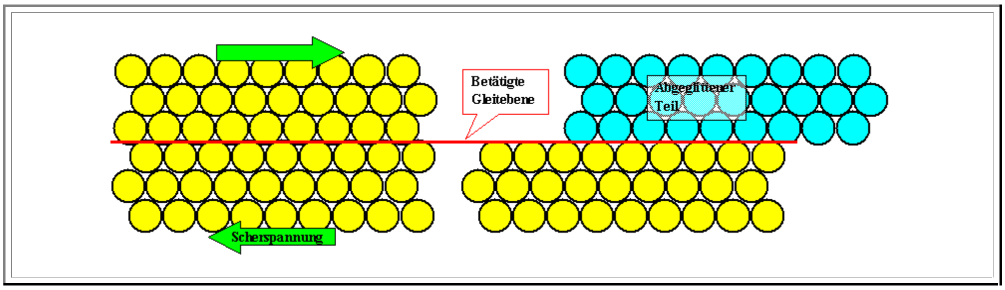
Was bestimmt für ein gegebenes Material die Fließgrenze R_P?

- Wie schon beim Bruch, überlegen wir uns aber zuerst, wie groß der *theoretische* Maximalwert für R_P sein wird.
  - Danach widmen wir uns der Frage, welche Mechanismen R_P verringern können, und wie man R_P beeinflussen kann.
- Um das Ganze etwas weniger abstrakt zu machen, hier zwei Hinweise auf die Bedeutung des obigen Satzes für den Alltag:
  - Bei Metallen ist die "**Härte**" im wissenschaftlichen oder umgangsprachlichen Sinn so ziemlich dasselbe wie R_P. Verdoppeln wir die Fließgrenze, ist das Material auch doppelt so hart.
  - Das massengefertigte Material **Stahl**, ohne das unsere **Zivilisation** undenkbar wäre (und unsere **Kultur** sich nach wie vor im bei Geisteswissenschaftlern beliebten Sklavenhaltermodus der Antike befände), ist im wesentlichen Eisen (**Fe**), dem kleinere (oder, bei Legierungsstählen, größere) Mengen weiterer Elemente zugesetzt werden, z.B. **0.4 % C**. Damit kann man die Härte (also R_P) von ziemlich weich bis superhart verändern. Heute nach wissenschaftlichen Prinzipien, früher durch Versuch und Irrtum gemischt mit "Magie".

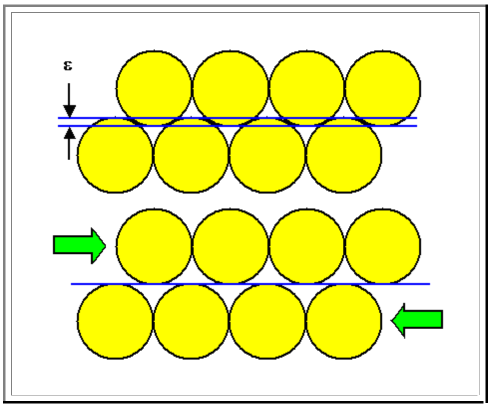
- Das Thema "Stahl" ist eine unerschöpfliche Quelle zum Thema "Was bestimmt die Fließgrenze". Es wird in einigen Modulen im Rückgrat 2 gestreift.

Theoretische Fließgrenze

- Wir beginnen mit der zur plastischen Verformung gehörenden Elementarbeobachtung: Teile des Kristalls sind auf einer bestimmten kristallographischen Ebene (meistens der dichtest gepackten Ebene) aufeinander abgeglitten.
  - Das sieht schematisch so aus:



- Obwohl wir schon wissen, daß das oben gezeigte Endergebnis der Abgleitung peu à peu durch den Durchgang von Versetzungen entstanden ist, stellen wir und zunächst ganz dumm und berechnen, welche Spannungen wirken müssen, damit der *ganze* Kristallblock *in einem Stück* nach rechts rutscht. Das simpelste Modell dazu sieht so aus:



  - Zuerst ziehen wir durch eine (nicht eingezeichnete) *Normalspannung* die beiden Ebenen, zwischen denen wir Abgleitung haben wollen so weit auseinander, daß sie ohne sich zu berühren übereinander gleiten können. Dies entspricht der eingezeichneten Dehnung ϵ.
  - Anschließend genügt eine (vernachlässigbar kleine) Schubspannung, um die gewünschte Abgleitung zu bekommen.
  - Wie groß ϵ sein muß, ergibt sich durch elementare Geometrie (die wir uns hier schenken) zu ϵ **= 0,1543**
  - Zu berechnen ist also nur, welche Normalspannung σ_{min} wir mindestens brauchen, um das notwendige ϵ zu bekommen.

- Das einfache Ergebnis ist

$$\sigma_{min} = \frac{E}{6{,}46}$$

  - - und das ist viel zu groß. Kein Wunder, denn die benötigte Dehnung ist nicht sehr weit weg von der theoretischen Bruchdehnung; ganz zu schweigen davon, daß experimentelle Werte um Größenordnungen kleiner sind.

- Aber unser Modell ist vielleicht auch ein bißchen zu simpel?
  - Kann sein. Herr **Frenkel** hat sich so um **1926** der Sache angenommen, und mit erheblich besseren Modellen, aber immer noch ohne Versetzungen, σ_{min} berechnet.
  - Das Ergebnis, an dem nun kein Weg mehr vorbeiführte, war

$$\sigma = \frac{G}{15} \; ...... \; \frac{G}{30}$$

  - ***G*** ist der Schubmodul, also ≈ **0,4 *E*** .

- Fein **-** wir haben jetzt eine minimale Spannung die ungefähr einen Faktor **10** kleiner ist. Aber es nützt nichts **-** sie ist immer noch viel zu groß. Schauen wir uns den Vergleich theoretischer und gemessener Werte an (gleich als Scherspannungen angegeben)

Material	G [10^3 MPa]	$\tau_{min} = G/15$ [MPa]	τ_{exp} [MPa]
Au	450	3 000	0,9
Al	31,6	2 110	1
Cu	81,8	5 450	1
Zn	45,9	3 060	1 -3

- Wir liegen noch immer um einen Faktor von rund und roh **1000** daneben! Es nützt nichts: Plastische Verformung (von Kristallen) erfolgt *ganz sicher* nicht durch das Abgleiten ganzer Kristallblöcke in einem Stück.
  - Das war der Stand der Erkenntnis um **1930**. Die industrialisierte Welt lebte von der plastischen Verformung der Metalle - und niemand wußte wie das "funktioniert".
  - Klar war nur, wie es *nicht* geht. Die Versetzung mußte "erfunden" werden!
  - Es ist eine große historische Ungerechtigkeit, daß die Wissenschaftler, die das mehrtausendjährige Rätsel der plastischen Verformung lösten, nie den **Nobelpreis** bekamen.
- Und jetzt ist es Zeit, Kapitel 4.1.4 noch einmal anzuschauen.