

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 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 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:

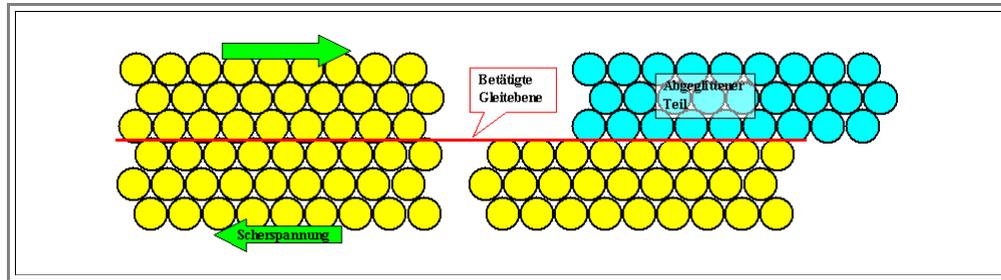
- Bei Metallen ist die "**Härte**" im wissenschaftlichen oder umgangssprachlichen Sinn so ziemlich dasselbe wie R_p . Verdoppeln wir die Fließgrenze, ist das Material auch doppelt so hart.
- Das massengefertigte Material **Stahl**, ohne das unsere **Zivilisation** undenkbar wäre (und unsere **Kultur** 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.

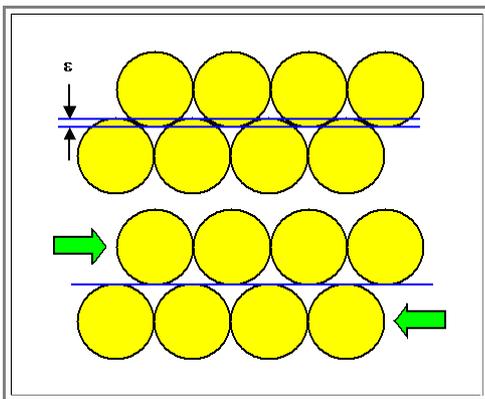
Theoretische Fließgrenze

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 uns 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 $\epsilon = 0,1543$
- 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 vorbeiführt, war

$$\sigma = \frac{G}{15} \dots \frac{G}{30}$$

- G ist der [Schubmodul](#), also $\approx 0,4 E$.

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.