

8.5 Zusammenfassung / Merkpunkte zu Kapitel 8: Plastische Verformung von Kristallen

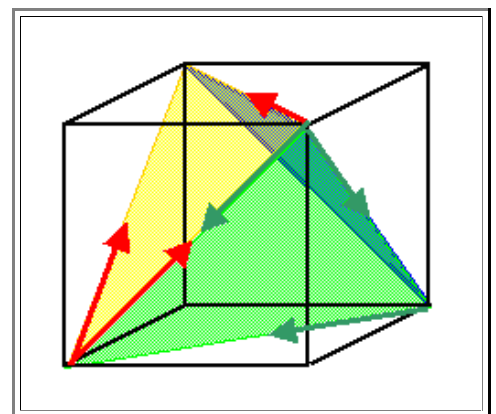
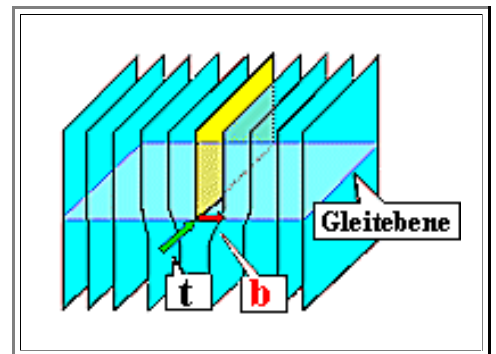
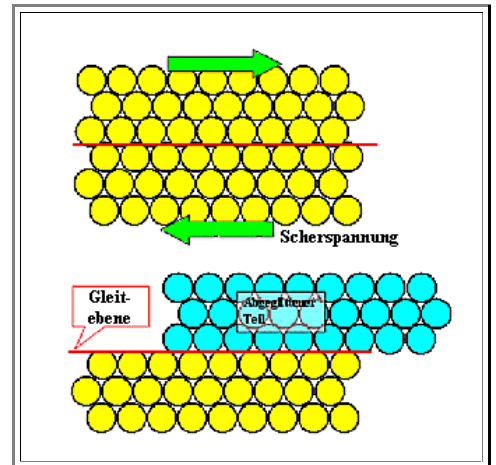
Plastische Verformung kann immer nur durch blockweises Abgleiten verstanden werden (und nicht etwa durch individuelle Atombewegungen).

- Ein direkter Mechanismus - wie gezeigt - würde Scherspannungen in der Größenordnung von ganz grob **10 %** des **E**- oder **G**-Moduls benötigen.
- Reale Kristalle verformen sich aber schon plastisch bei Spannungen, die um mehrere Größenordnungen kleiner sind!
- Die entscheidende Frage ist: Was bestimmt die Fließgrenze **R_p**, d.h. die minimale mechanische Spannung, ab der plastische Verformung beginnt. **R_p** ist im übrigen (bis auf einen Zahlenfaktor) so ziemlich dasselbe wie "Härte".
- Konsequenz:** Plastische Verformung erfolgt *immer* durch die (Erzeugung und) Bewegung von Versetzungen.

Versetzungen sind im Prinzip simple eindimensionale Defekte, trotzdem ist plastische Verformung mit Versetzungen ein sehr komplexer Vorgang.

Wichtige Eigenschaften von Versetzungen sind:

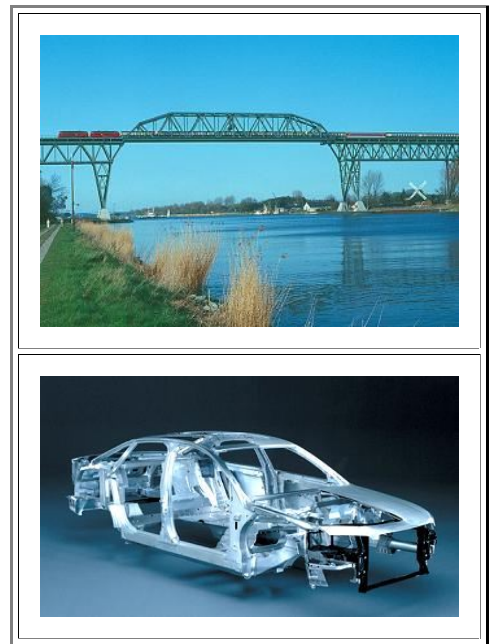
- Charakterisierung durch Burgersvektor **b** (i.d.R. kleinstmöglicher Translationsvektor des **Gitters**) und Linienvektor **t**.
- Versetzungsbewegung erfolgt in der durch **b** und **t** aufgespannten Gleitebene. Gleitebenen sind i.d.R. die dichtest gepackten Ebenen des **Kristalls**. Damit sind die möglichen Versetzungsstrukturen und Verformungen geometrisch eingeschränkt.
- Beliebige dreidimensionale plastische Verformung benötigt mindestens **5 Gleitsysteme** = kristallographisch verschiedene Kombinationen von Burgersvektor und Gleitebene. In **fcc** Kristallen gibt es **12** Gleitsysteme (**4** Ebenen x je drei **b**-Vektoren; Bild rechts).
- Die Linienenergie einer Versetzung ist $\approx Gb^2 \approx 5 \text{ eV} / |b|$; Versetzungen sind damit niemals Gleichgewichtsdefekte. Der Kristall wird deshalb versuchen, die Gesamtlänge aller Versetzungen, d.h. die Versetzungsdichte ρ_{Ver} zu minimieren.
- Versetzungen können nicht im Kristall enden, sondern nur an anderen Defekten und auf Oberflächen / Grenzflächen.
- Scherspannungen in der Gleitbenen üben auf die Versetzung eine Kraft **F_v** senkrecht zur Linienrichtung aus; die Versetzung wird sich bewegen, sobald diese Kraft eine gewisse Mindestgröße überschreitet. Die Kraft pro Längeneinheit ist durch die nebenstehende einfache Formel hinreichend gut gegeben.



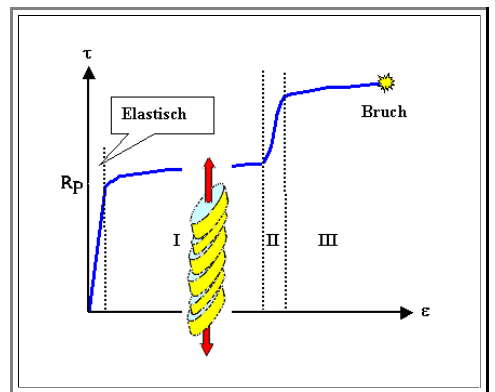
$$\frac{F_v}{l} = \tau \cdot b$$

Damit ist folgender Satz "bewiesen"

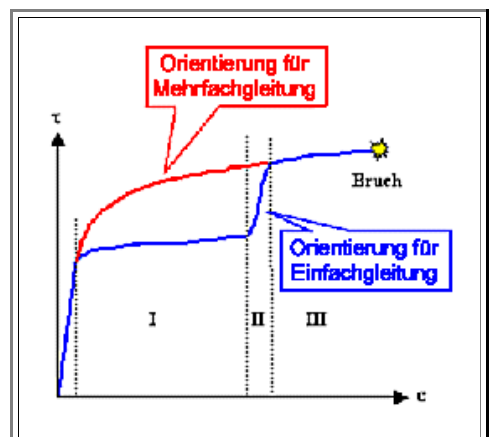
- Plastische Verformung erfolgt sobald in den verfügbaren Gleitebenen eine kritische Scherspannung τ_{krit} überschritten wird.
- Diese kritische Scherspannung bestimmt ziemlich unmittelbar die Fließgrenze R_p ; sie kann in weiten Grenzen durch geeignete Eingriffe in das Gefüge manipuliert werden.
- Optimierung von τ_{krit} ist die Grundlage der gesamten Metallurgie und damit der Zivilisation.



- Bei einem für **Einfachgleitung** orientiertem Einkristall ($\langle 111 \rangle$ Orientierung für **fcc** Gitter) wird bei Erhöhen der Spannung zunächst nur auf einer Gleitebene τ_{krit} überschritten.
- Obwohl nur von geringer praktischer Bedeutung, zeigt der Versuch sehr deutlich was bis zum Bruch geschieht:
 - Elastische Verformung bis zu R_p , d.h. bis zum Erreichen von τ_{krit} auf der "günstig" orientierten Gleitebene.
 - "Weiches" Verhalten im Bereich I, da Versetzungen auf der betätigten Gleitebene jetzt laufen können und große plastische Verformung ermöglichen.
 - Die blockweise Abgleitung ist (im Mikroskop) gut sichtbar.
 - Verfestigung (d.h. "hartes" Verhalten) im Bereich II, weil durch die gestiegene Spannung jetzt auch andere Gleitsysteme betätigt werden, und die Versetzungen sich gegenseitig behindern, d.h. nicht mehr leicht laufen können.
 - Entfestigung im Bereich III (Kristall ist wieder "weich"), weil bei den jetzt sehr hohen Spannungen Versetzungen sich von Hindernissen "losreißen" können.
 - Schließlich Bruch - auch weil der Kristall jetzt sehr lang, und damit auch viel dünner geworden ist.



- Damit ist auch klar, wie sich Einkristalle verformen, die so orientiert sind dass mehrere Gleitebenen gleichzeitig aktiviert werden (z.B. $\langle 100 \rangle$ Orientierung von **fcc** Gittern):
 - Bereich II wird praktisch von Anfang an vorliegen.
- Für Polykristalle, deren Körner "statistisch" orientiert sind, d.h. keine Vorzugsrichtungen haben, werden wir ähnliches Verhalten erwarten.
 - Damit haben wir dann "klassische" Spannungs - Dehnungskurven von technischen Materialien *im Prinzip* verstanden!
 - Dass die Realität noch erheblich komplizierter ist, versteht sich dabei von selbst.



Die kritische Scherspannung τ_{krit} , ab der plastische Verformung einsetzt, kann durch geeignete Maßnahmen in weiten Grenzen manipuliert werden.

Sie ist zunächst bestimmt durch die intrinsische Fließgrenze τ_i des (perfekten) Materials - eine Art Materialkonstante.

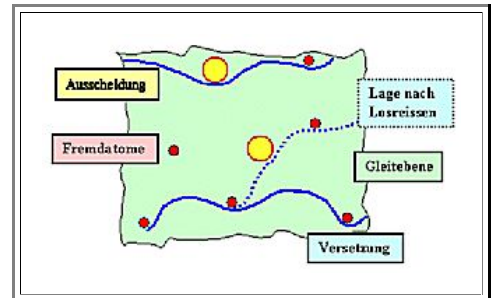
τ_{krit} = Funktion von:

- $\tau_{intrinsic}$ des Grundmaterial **plus:**
- Versetzungsdichte (= Vorgeschichte)
- Mittlere Korngröße
- Konzentration an Fremdatomen
- Konzentration, Art und Größe von Ausscheidungen

Generell gilt: Alle Arten von Gitterdefekten können Versetzungen festhalten ("pinnen")

Wie stark **ein** Defekt **eine** Versetzung "pinnt", hängt von Art, Größe und Gestalt des Defektes ab

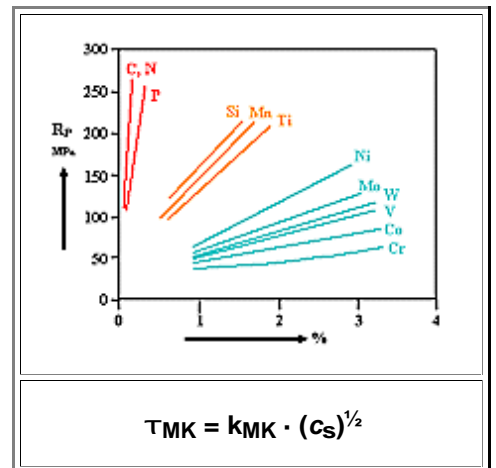
Wie stark **alle** Defekte **alle** Versetzungen "pinnen", hängt darüberhinaus noch von den Defekt**konzentrationen** und der Versetzungskonfiguration und -dichte ab.



Als **Mischkristallhärtung** bezeichnet man den Anteil τ_{MK} , der von atomar gelösten interstitiellen oder substitutionellen Fremdatomen herkommt

Als paradigmatisches Beispiel mag **0.x % Kohlenstoff** im sonst recht weichen (Schmiede)eisen dienen: Wir erhalten harten **Stahl** schon für **x < 0.5%** !

Der Zuwachs τ_{MK} an kritischer Schubspannung ist i.a. proportional zur Wurzel aus der Konzentration der **AF**.



Ausscheidungshärtung arbeitet entsprechend mit Ausscheidungen der zuvor atomar gelösten atomaren Fehlstellen.

Ausscheidungen behindern Versetzungsbewegung zwar i.d.R. weitaus effektiver als atomare Defekte, dafür ist ihre Dichte aber automatisch weitaus geringer

Der Zuwachs τ_{Aus} an kritischer Schubspannung ist i.a. proportional zum Kehrwert des mittleren Abstands $\langle d \rangle$ zwischen den Ausscheidungen

$$\tau_{Aus} = \frac{2G \cdot b}{\langle d \rangle}$$

Verformungs- und Feinkornverfestigung nutzt **Versetzungen** und **Korngrenzen** als Hindernisse für die Versetzungsbewegung

Viele Versetzungen erhält man durch plastische Verformung. Vorverformtes Material ist daher härter als jungfräuliches - aber es bricht auch früher! Der Zuwachs τ_{VV} ist proportional zur Wurzel aus der Versetzungsdichte ρ_V

Kleine Körner erhöhen τ_{krit} erheblich um τ_{KG} , das umgekehrt proportional zur Wurzel aus mittlerer Korngröße $\langle d \rangle$ ist.

$$\tau_{VV} \approx 0,2 \cdot G \cdot b \cdot (\rho_V)^{1/2}$$

$$\tau_{KG} \approx \frac{k_{KG}}{\langle d \rangle^{1/2}}$$

Die technische Frage ist nun: Wie stellt an das optimale Gefüge her?

- Und wie erhält man es bei Temperprozessen, insbesondere beim Schweißen?

▶ Denn bei hohen Temperaturen *erholt* sich das Material, d.h. Defektdichten werden kleiner, und deshalb Körner und Ausscheidungen größer.

▶ Carbon Steels owe their remarkable properties to the fact that at **996 K** there is a phase change of the eutectoid kind:

- Above **996 K**: (Non-magnetic) γ - phase, **fcc** lattice; called *austenite*, able to dissolve up to **2%** carbon and still about **0.8 %** at **996 K**.
- Below **996 K**: (Magnetic) α - phase; **bcc** lattice with hardly any solubility of carbon, called *ferrite*.

▶ Even if you would start with a relatively defect free γ - phase, the change of lattice type would by necessity introduce many defects and thus lead to some hardening. However, the main hardening effects are due to the need to remove surplus carbon in the α - phase

- Upon slow cooling one obtains *pearlite*, a mixture of α - **Fe** and *cementite*, which is itself an eutectic of α - **Fe** and **Fe₃C**.
- Upon fast cooling (= quenching) one obtains "lathes" of *martensite*, a metastable lattice (tetragonal, sort of distorted **bcc**) with the carbon atoms still dissolved. Martensite is very hard, but brittle
- Tempering below the eutectoid temperature of **996 K** will keep part of the hardness, while restoring some ductility: We have "*tempered steel*", for many years a synonym for the utmost in material strength.

▶ Adding more alloying element serves to principally distinct goals:

- "Repair" certain problems, e.g. add **Mn** to compensate for unwanted, but unavoidable **S** in the mix.
- Produce certain wanted properties, e.g. better corrosion resistance by adding **Cr**.

▶ However, each addition infringes on *all* properties; optimizing can be long and hard work.

▶ Nevertheless, an incredible richness of steel variants with a huge spectrum of properties is known and produced.

- What can be done with respect to the yield strength **R_p** (proportional to hardness) is shown in the diagram for the presently ultimate in strength: *maraging steels*. Note that the yield strength of pure ferrite is about **50 MPa**.

▶ In principle, whatever happens, can be understood by looking at the movement of dislocations.

Schweißen ist ein komplexer Prozeß

Die Schweißnaht wird unvermeidlich andere mechanische Eigenschaften haben als das Grundmaterial.

