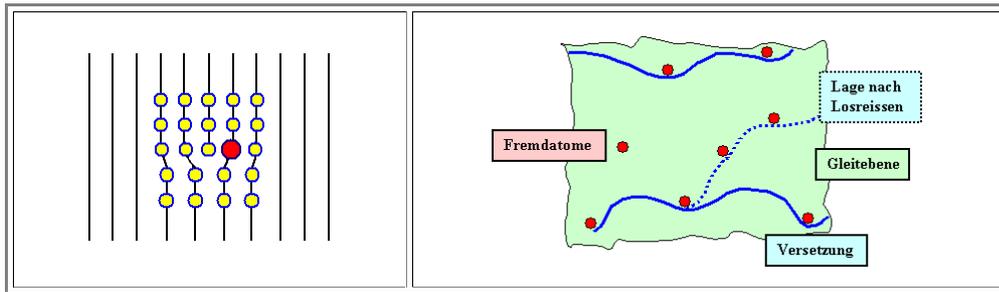


## 8.3.2 Mischkristall-, Ausscheidungs- und Dispersionshärtung

### Mischkristallhärtung

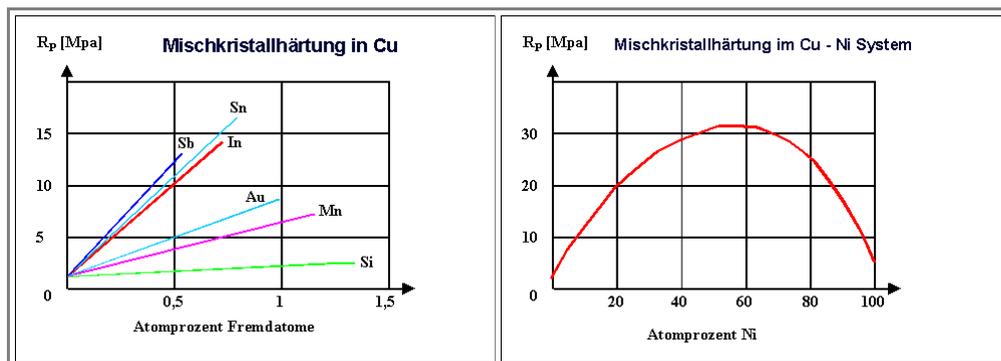
- Die einfachste Methode, die Fließspannung  $R_p$  zu vergrößern, d.h. den Kristall härter zu machen, besteht im Einbau *extrinsischer* atomarer Fehlstellen, d.h. von substitutionellen oder interstitiellen Fremdatomen.
  - Das bekannteste Beispiel für Härtung mit *interstitiellen* Fremdatomen ist **C** in **Fe** - aus weichem Eisen wird harter Stahl. Weniger bekannt ist z.B. **O** in **Si** - damit wird **Si** bei hohen Temperaturen ebenfalls "härter" und es ist etwas einfacher, die für elektronische Bauelemente tödliche plastische Verformung zu vermeiden.
  - Zn** in **Cu** oder **Cu** in **Al** sind Beispiele für Härtung mit *substitutionellen* Fremdatomen.
- Man nennt diese Form der **Härtung "Mischkristallhärtung"**; ein nicht besonders glücklicher Name (welche Kristalle werden denn bei **C** in **Fe** "gemischt"?).
  - Wie funktioniert *Mischkristallhärtung* im Versetzungsbild? Zunächst machen wir uns klar, daß eine Versetzung, die auf ein Fremdatom trifft, dort lokal andere Bindungsverhältnisse der Atome spürt.



- Damit kann es lokal schwieriger werden, den Versetzungskern zur nächsten Netzebene zu bewegen. Der Effekt ist, daß die Versetzung lokal etwas festhängt, sie ist "gepinnt" wie man im gebräuchlichen Denglisch sagt.
  - Liegt jetzt auf der Gleitebene eine Scherspannung vor, die die Peierls Spannung oder intrinsische Fließgrenze  $\tau_i$  überschreitet, wird die Versetzung loslaufen - und zwischen den Fremdatomen kann sie das auch.
  - Aber an den Fremdatomen hängt sie fest. Als Gesamteffekt wird sie sich nur ausbauchen, wie oben rechts gezeigt. Erst bei *erhöhter* Spannung wird es ihr gelingen, sich von den Fremdatomen loszureißen.
- Versetzungsbewegung erfolgt jetzt also un stetig, als eine Art Hindernislauf.
- Um wie viel muß die Scherspannung in der Gleitebene (engl. "*resolved shear stress*") erhöht werden, damit die Versetzungen wieder beweglich werden?
  - Wir nennen diese zusätzlich notwendige Spannung  $\tau_s$  ("s" steht für "solution"), eine genaue Analyse ergibt die Beziehung

$$\tau_{MK} = k_{MK} \cdot (c_s)^{1/2}$$

- Dabei ist  $c_s$  die Konzentration der Fremdatome, und  $k_s$  eine Proportionalitätskonstante.
- Spannend ist natürlich  $k_s$ . Es ist eine *Materialkonstante*, die aber für jede Sorte Fremdatom anders sein wird. Manche Fremdatome werden große Wirkung zeigen, manche nur kleine. Einige Beispiele dazu
- 4% Cu** in "normalem" **Al** erhöhen  $R_p$  auf ca. **180 MPa** ausgehend von einem stark schwankenden Wert von **(25.... 100) MPa**. Das ist eine Verdopplung bis Versiebenfachung; schon eine recht kräftige Härtung. Wir können bloß nicht ganz sicher sein, daß das **Cu** auch durchweg atomar gelöst ist.
  - Hier einige Messungen



- Die Wurzelabhängigkeit von der Konzentration ist bei den kleinen Konzentrationen im Bild links noch nicht richtig zu sehen, wohl aber bei großen Konzentrationen im Bild rechts.
- Für Eisen mit gelösten Fremdatomen (man nennt das dann auch Stahl) gibt es ein [sehr ähnliches Bild](#).

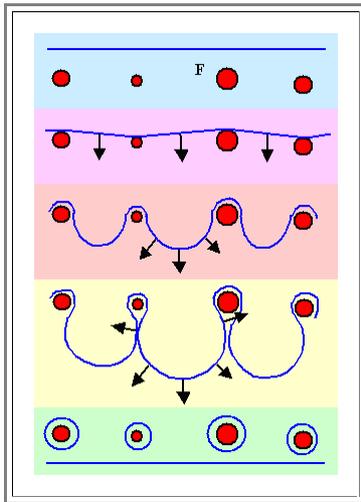
## Ausscheidungs- und Dispersionshärtung

- Da atomare Defekte bereits sehr effektiv Versetzungsbewegung behindern können, ist es nicht verwunderlich, daß größere dreidimensionale Defekte das auch tun. Dies gilt insbesondere für Ausscheidungen und Dispersionspartikel.
- Ausscheidungen** sind, [wie bereits behandelt](#), kleine Teilchen einer zweiten Phase, die durch Agglomeration von Fremdatomen entstanden sind. Sie können also - je nach thermischer Behandlung und Phasendiagramm - wachsen und schrumpfen.
- Dispersionspartikel** sind Teilchen einer zweiten Phase, die schon in der Schmelze vorhanden waren; sie sitzen damit relativ unveränderlich im Wirtskristall.
- Beide **3-D** Defekte sind massive bis unüberwindliche Hindernisse für die Versetzungsbewegung, erhöhen also immer **R<sub>p</sub>**.
- Die **zusätzlich** notwendige Spannung  $\tau_{\text{Aus}}$  um Versetzungen durch den Kristall zu jagen, ist

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

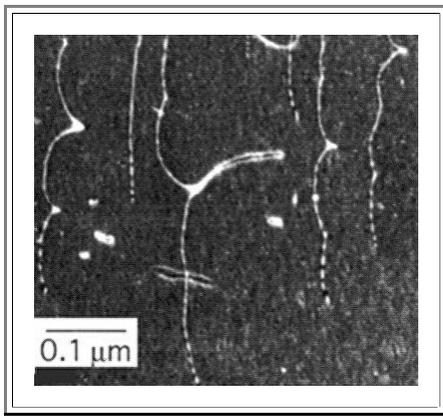
Mit **G** = Schermodul; **b** = Burgersvektor;  $\langle l \rangle$  ist der mittlere Abstand zwischen den Ausscheidungen.

- Wieso bewegen sich Versetzungen **überhaupt** noch, falls Ausscheidungen **unüberwindliche** Hindernisse sein können?
- Aus dem gleichen Grund, der Eidechsen beweglich hält, selbst wenn man sie am Schwanz festhält: Sie lassen einen Teil ihrer selbst zurück. Wie das geht ist unten gezeigt.



- Die Versetzung kommt von oben und nähert sich einer Reihe von Ausscheidungen, an denen sie festgehalten wird.
- Die auf die Versetzung wirkende Kraft ist als schwarzer Pfeil an einigen Punkten eingezeichnet, sie [steht immer senkrecht](#) auf der Versetzungslinie.
- Die Versetzung baucht sich aus. Dabei zieht die in der Gleitebene vorhandene Scherspannung, die Linienenergie (die nicht umsonst die Dimension einer Kraft hat, nämlich Energie pro **cm**, und deswegen auch **Linienenergie** heißt), zieht zurück. Falls die Scherspannung zu klein ist, bleibt die Versetzung ausgebaucht liegen.
- Falls die Scherspannung aber ausreicht, um die vorletzte Konfiguration zu produzieren, werden sich benachbarte Ausbauchungen berühren und reagieren. Das Resultat ist ein Versetzungsring um die Ausscheidung, und eine regenerierte Versetzung, die der Ausscheidung ein Schnippchen geschlagen hat.
- Die Rechnung dazu ist relativ einfach und ergibt die obige Formel, die als wesentliche Kenngröße den mittleren Abstand  $\langle l \rangle$  zwischen den Ausscheidungen hat.

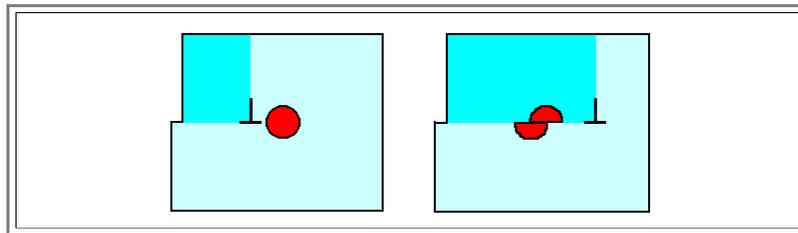
- Daß die Versetzungsbewegung tatsächlich so abläuft, zeigt das folgende elektronenmikroskopische Bild von A. Appel (**GKSS** Geesthacht)



- Die Versetzungen sind hier als weiße Linien zu sehen.
- Das Material ist eine **Ti - Al** Legierung, die seit einiger Zeit als neuer hochtemperaturfester Leichtmetallwerkstoff entwickelt wird; insbesondere für Turbinenanwendungen.
- Es ist sehr schön zu sehen, wie die Versetzungen sich um kleine (und hier nicht sichtbare) Hindernisse herumwinden; zwischen den Hindernissen sind sie ausgebaucht.
- Die weißen Flecken sind die Überbleibsel von Versetzungen, die sich losgerissen haben.

▶ Aha! Man kann also *jedes* Material kräftig härten, indem man ganz viele kleine Ausscheidungen produziert. *Gemacht!* Im Prinzip: Ja -aber!

- Sind die Ausscheidungen zu klein, schneidet die Versetzung sie einfach durch. Die Abgleitung in der Ausscheidung erfolgt dann ausnahmsweise blockweise.



- Sind es zu viele Ausscheidungen, haben wir wahrscheinlich ein insgesamt ganz anderes Material, nicht nur einen härteren Ausgangskristall.
  - Außerdem - wie machen wir das? **X** % irgendwas in ein Material eingebracht bildet nicht automatisch viele kleine Ausscheidungen, nur weil wir das gerne hätten.
- ▶ Für eine gegebene Konzentration an Fremdatomen wird es irgendein Optimum geben - eine machbare Mischung aus noch atomar gelösten Fremdatomen und ein Spektrum an Ausscheidungsgrößen das dann automatisch auch die mittleren Abstände bestimmt.
- Es ist dabei klar, daß beide Mechanismen sich nicht einfach addieren. Im Prinzip wird der Mechanismus mit der höchsten notwendigen Spannung das Verhalten dominieren. Der jeweils andere wird aber auch noch etwas beitragen, und sei es nur, die Versetzungsbewegung zu verlangsamen.