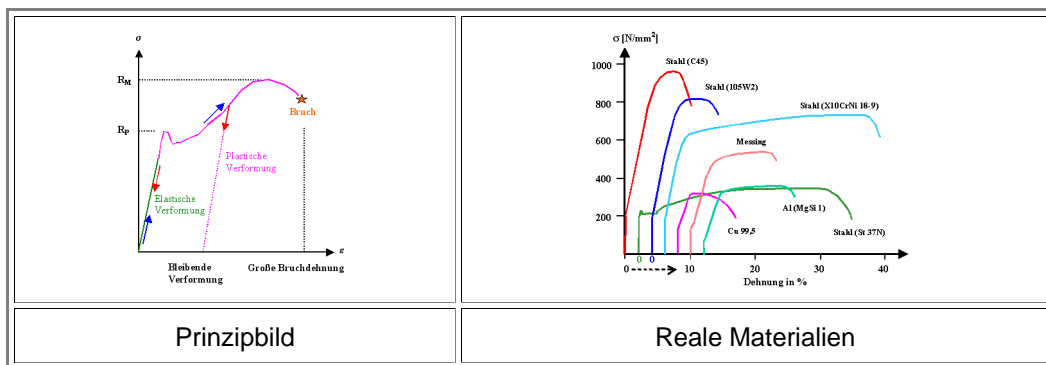


4.3.2 Die restlichen Defekte

Nochmals plastische Verformung

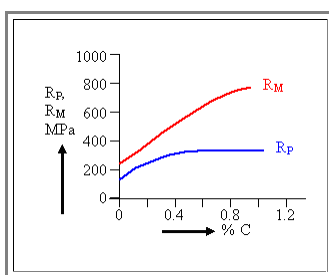
Die plastische Verformung aller Kristalle (= aller Metalle) erfolgt ausschließlich durch die Erzeugung und Bewegung von Versetzungen

- **OK** – das haben wir verstanden. Wenn wir unterstellen, dass die Erzeugung von Versetzungen den meisten Kristallen keine Probleme bereitet (das ist so), bleibt nur die Frage, wie leicht oder schwer es einer Versetzung fällt, sich zu *bewegen*.
- ▶ Ganz von alleine geht es erfahrungsgemäß ja nicht. Man muss schon mehr oder weniger kräftig drücken oder ziehen, bevor sich ein Material plastisch verformt, d.h. sich die Versetzungen in Inneren bequem, durch den Kristall zu laufen.
- Die minimale mechanische Spannung, die man dazu braucht, heißt Fließgrenze (als R_p in [Zugversuchsdiagramm](#) eingezeichnet). Die Fließgrenze ist (für Metalle) nichts anderes als die wohlbekannte **Härte** – auch wenn sie anders gemessen wird und eigene Maßeinheiten hat (der [Link](#) gibt Auskunft). Hier sind nochmals einige paradigmatischem Spannungs-Dehnungs-Diagramme:

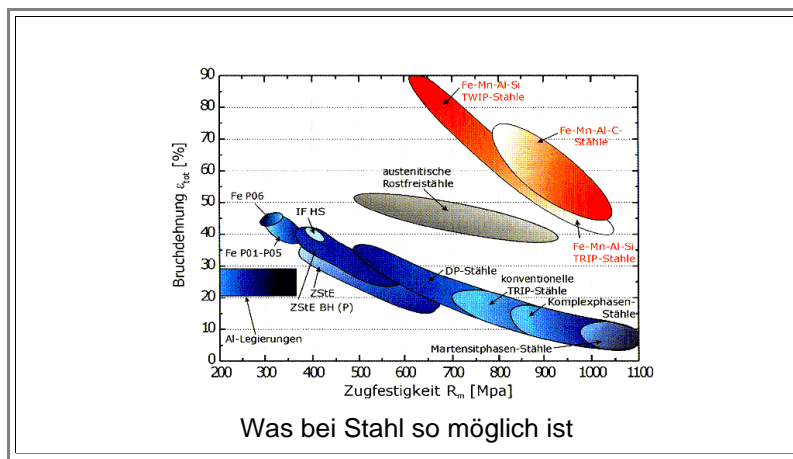


▶ Also – was bestimmt die Fließgrenze oder Härte eines gegebenen Metalls?

- Man könnte es erraten: die Art und Zahl der Hindernisse, die eine Versetzung auf ihren Weg von hier nach da überwinden muss. Als Hindernisse kommen natürlich (!?) nur Kristallgitterdefekte in Betracht
- ▶ Die Versetzung spürt alles! Fremdatome sind Hindernisse, genauso wie Ausscheidungen, Korngrenzen, Voids,



- Deshalb ist Eisen oder Aluminium mit ein paar Kohlenstoff- bzw. Kupferatomen (= extrinsische Punktdefekte) deutlich härter als reines Eisen; feinkörnige Materialien sind härter als grobkörnige, und solche Kristalle, die schon viele Versetzung enthalten, sind härter als relativ versetzungsfreie. Das Bild links zeigt den Einfluss von Kohlenstoff auf die Fließgrenze R_p und die maximale Zugfestigkeit R_m von Eisen.
- Der letzte Punkt macht die Theorie der plastischen Verformung zu einem der schwierigeren Kapitel der Materialwissenschaft, denn das, was gerade passiert (per Versetzungsbewegung), hängt sowohl davon ab, was gerade passiert (plastische Verformung erhöht die Versetzungsdichte und macht weitere Versetzungsbewegung schwieriger), als auch davon, was früher passiert ist (bereits vorverformte Metalle brechen früher).
- Der letzte Punkt eröffnet aber auch ungeheure Möglichkeiten für die Metalltechnik: Ich kann die Verformungseigenschaften eines Materials auf unglaublich viele Arten beeinflussen und damit optimieren; das Bild unten zeigt, wo's langgeht.

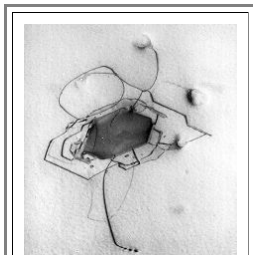


Beziehung zwischen Defekten

Leicht zu merken:

Alle Defektsorten können miteinander wechselwirken.

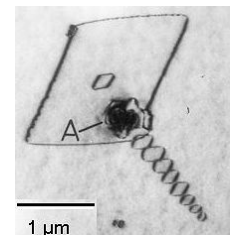
- Atomare Fehlstellen lagern sich an Versetzungen an (mit teilweise schrecklichen Langzeitkonsequenzen); Versetzungen beranden zweidimensionale Defekte; Korngrenzen emittieren oder absorbieren **AF's** und Versetzungen, ...



SiO₂-
Ausscheidung in
Si mit ersten
Versetzungen

- Defekte können sich dadurch auch **umwandeln**. Ein für die Mikroelektronik sehr relevantes Beispiel:

- Interstitielle Sauerstoffatome im Überschuss (beim Abkühlen) lagern sich zu einer Ausscheidung zusammen.
- Die Ausscheidung ist durch eine Phasengrenze berandet.
- Die Phasengrenze ist eine gute Versetzungsquelle.
- Bei internen Spannungen (z. B. wegen Temperaturgradienten) werden Versetzungen erzeugt und laufen los.
- Eine Versetzung erreicht einen Transistor. Der Kristall ist im kritischen Bereich nicht länger versetzungsfrei; das Produkt landet im Müll



SiO₂-
Ausscheidung in
Si als
Versetzungsquelle

Die beiden **TEM**-Bilder rechts und links zeigen den Anfang einer solchen Versetzungsbildung; im Zentrum (dunkel) die (amorphe) **SiO₂**-Ausscheidung. Die mit "A" bezeichnete Ausscheidung rechts produziert Versetzungsringe.

- Das ist kein theoretisches Horrorszenario, sondern traurige Realität in der Halbleitertechnologie. Die Tatsache, dass es funktionierende Halbleiterbauelemente gibt, zeigt immerhin, dass man derartige Schweinereien vermeiden kann.
- Schon wahr, aber:

It ain't easy, man!