

Werkstoffe und Fertigung I

Prof.Dr. K. Wegener

Wintersemester 2006/07

Seminarübung 3

Idealstruktur, Realstruktur

Musterlösung

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zentrum

Übungsassistenz: Niklas Rotering, Michael Kelterborn, Florian Hofmann, Tobias Ott, Tobias Nösekabel, Daniel Sutter; Robin Vujanic, Peter Vogel.

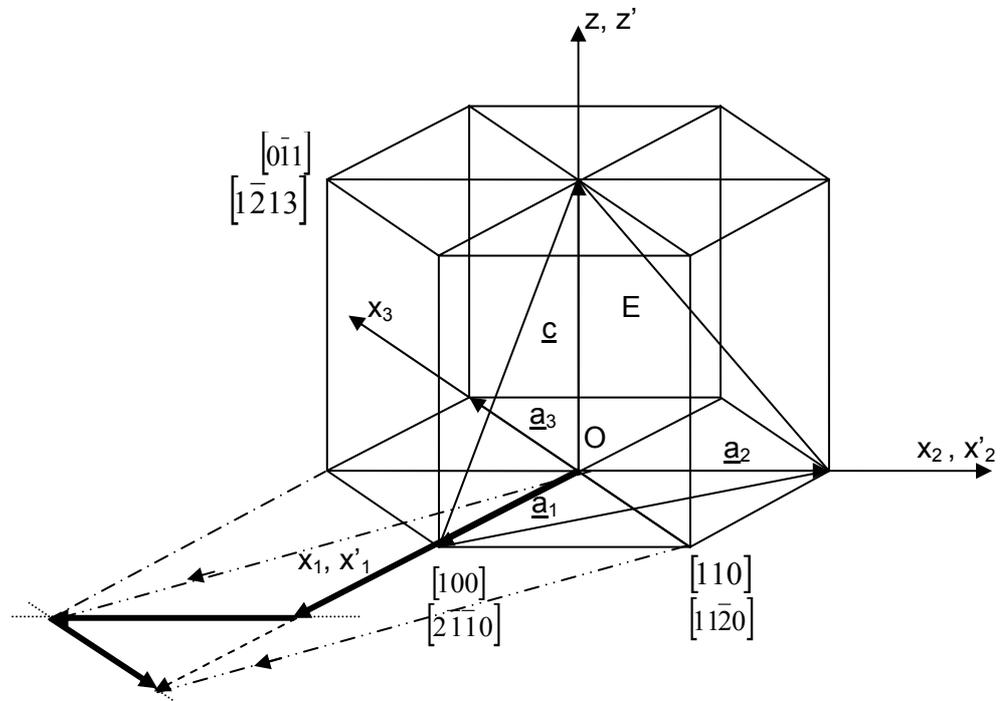
Koordination: Willi Müller, CLA F21.1, Tel. 01 633 23 84, wm@iwf.mavt.ethz.ch

Lernziele

Lernziele: Werkstoffe und Fertigung I, Kap. 1, LZ. 1, 6-8

Kerninformationen

Miller-Bravais-Indizes für hexagonale Gitter



Wegen der spezifischen Symmetrie der hexagonalen Gitter ist ein spezielles Koordinatensystem a_1, a_2, a_3, c gebräuchlich. Dabei ist mit a_3 eine redundante Achse eingeführt, die mit a_1 und a_2 in der gleichen Ebene liegt.

Seien x_1, x_2, x_3, z die Koordinaten im 4-achsigen System $\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3, c$ und x_1', x_2', z' diejenigen im 3-achsigen System $\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{c}$. Dann gelten folgende Transformationsgleichungen, wobei der Faktor n so gewählt wird, dass kleinste ganze Zahlen entstehen:

| | |
|--|----------------------------------|
| $x_1 = \frac{n}{3}(2x_1' - x_2')$ | $x_1' = \frac{1}{n}(2x_1 + x_2)$ |
| $x_2 = \frac{n}{3}(2x_2' - x_1')$ | $x_2' = \frac{1}{n}(2x_2 + x_1)$ |
| $x_3 = -\frac{n}{3}(x_1' + x_2') = -(x_1 + x_2) \Leftrightarrow x_1 + x_2 + x_3 = 0$ | $z' = \frac{1}{n}z$ |
| $z = n \cdot z'$ | |

Im Bild sind einige Richtungen in Bezug auf O in beiden Koordinatensystemen angegeben. (In Beantwortung eines Hinweises, Konstruktion der Richtung $[2\bar{1}\bar{1}0]$: Der Basisvektor \underline{a}_1 wird 2 mal entlang der a_1 -Achse abgetragen. Durch den Endpunkt wird die Richtung des Basisvektors \underline{a}_2 gezeichnet, seine Länge gemäss Koordinate (-1) abgemessen oder mit Parallelogrammkonstruktion vom auf der a_2 -Achse gezeichneten Vektor $-1 \underline{a}_2$ übertragen. Gleiches auch für die Richtung \underline{a}_3 . Wegen $n=3$ erscheint der Abstand von O dreimal so gross wie für $[100]$. Dies ist für eine Richtungsangabe ohne Bedeutung.)

Ebenen werden durch die reziproken Werte ihrer Achsenabschnitte angegeben. Für E also Achsenabschnitte 1, 1, 1 im 3-achsigen System, 1, 1, -0.5, 1 im 4-achsigen System, reziproke Werte: (111) bzw. $(11\bar{2}1)$.

Nulldimensionale Gitterfehler, Arrheniusfunktion

Leerstellen und Atome auf Zwischengitterplätzen sind nulldimensionale Gitterfehler. Leerstellen werden bei Temperaturerhöhung erzeugt und bei Temperaturniedrigung vernichtet. Bei schneller Abkühlung bleiben die bei höherer Temperatur vorhandenen Leerstellen bestehen, „eingefroren“, der Kristall befindet sich im Ungleichgewicht.

Die Arrheniusfunktion ist zuständig bei verschiedenen thermisch getriebenen Vorgängen, z.B. gibt sie die Anzahl der Leerstellen n_v in einem Metallgitter mit n Gitterplätzen an. Der Quotient aus einer Aktivierungsenergie h_L oder H_L und der Boltzmannkonstanten k oder der Gaskonstanten R steht der absoluten Temperatur T ($0^\circ\text{C} \approx 273\text{K}$ Kelvin) gegenüber. Auffällig an der Kurve ist der Teil, der asymptotisch gegen 1 strebt. Die interessierenden Vorgänge spielen sich aber am linken Ende ab.

Arrheniusfunktion

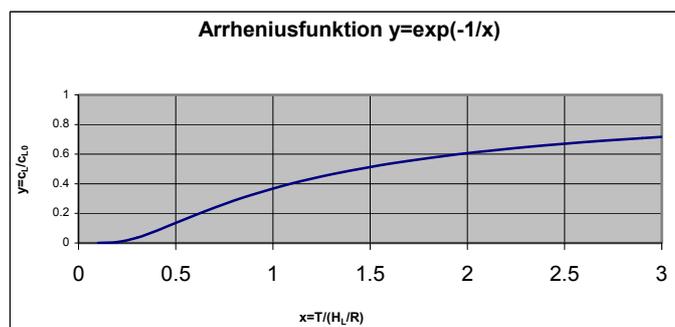
$$c_L = c_{L0} \cdot \exp\left(\frac{-H_L}{R \cdot T}\right)$$

Bildungsenergie für Fehlstellen H_L

Gaskonstante $R = 8.31\text{J} / \text{mol} \cdot \text{K}$

Temperatur T

Konstante c_{L0}



Eindimensionale Gitterfehler. Burgersumlauf.

Versetzungen sind eindimensionale Gitterfehler. Mit einem Burgersumlauf um eine Versetzung kann der Gitterfehler charakterisiert werden. Eine Schraubenversetzung hat einen Burgersvektor in Richtung der Versetzungslinie, eine Stufenversetzung einen Burgersvektor senkrecht zur Versetzungslinie. Der Betrag des Burgersvektors bei einer vollständigen Versetzung im kubisch primitiven Gitter ist gleich der Gitterkonstanten.

Zweidimensionale Gitterfehler. Stapelfehler und Stapelfehlerenergie

Stapelfolge: Zwei Gitterebenen, in welchen die Atompositionen senkrecht übereinanderliegen, werden mit dem gleichen Buchstaben AA bezeichnet. Dazwischen liegende Ebenen mit abweichenden Atompositionen erhalten andere Buchstaben. Beispiel: ABAB. Von besonderem Interesse ist die Stapelfolge der dichtest gepackten Ebenen, weil Versetzungen vorwiegend entlang solcher Ebenen gleiten.

Stapelfehler und Korngrenzen sind zweidimensionale Gitterfehler. Stapelfehler liegen vor, wenn z.B. beim kubisch flächenzentrierten Gitter die dichtest gepackten Ebenen nicht wie ABCA übereinanderliegen sondern wie ABA. Zwischen Stapelfehlerbereichen und dem ungestörten Kristall liegen Teilversetzungen.

Stapelfehler behindern die Versetzungsbewegungen. Das führt zu einer Verfestigung bei plastischer Verformung, was für gleichmässiges Fließen beim Tiefziehen erforderlich ist. Je niedriger die materialspezifische Stapelfehlerenergie, umso grösser sind die Stapelfehler und die Verfestigung.

2 Nulldimensionale Gitterfehler: Leerstellen

Gegeben ist ein Probestück aus Kupfer.
 Bildungsenergie für Fehlstellen in Kupfer
 Gaskonstante
 Konstante
 Temperatur der Probe

$$H_L = 84 \text{ kJ/mol}$$

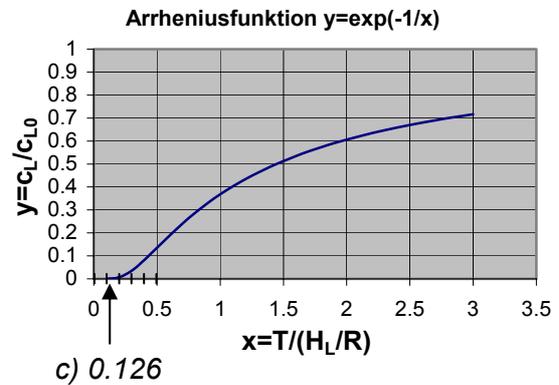
$$R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

$$c_{L0} = 1$$

$$g = 1000^\circ\text{C}$$

Arrheniusfunktion

$$c_L = c_{L0} \cdot \exp\left(\frac{-H_L}{R \cdot T}\right)$$



Gesucht

- Die relative Anzahl der Leerstellen, d.h. Anzahl Leerstellen bezogen auf die totale Anzahl Gitterplätze im Probestück.
- Als Zwischenresultat: H_L/R
- Zeichnen Sie den Wert $\frac{T}{H_L/R}$ im Diagramm ein. In welchem Bereich der Kurve liegt er?
- Pro wie viele Gitterplätze gibt es eine Leerstelle? Wie viele Gitterplätze lang ist ein Würfel, der sie beinhaltet?

Lösung:

$$b) \frac{H_L}{R} = \frac{84000 \text{ J/mol}}{8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}} = 10110 \text{ K}; \quad \frac{T}{H_L/R} = \frac{1000 + 273}{10110} = 0.1259$$

$$a) \text{ Anzahl Leerstellen pro Gitterplatz: } c_L = c_{L0} \cdot \exp\left(\frac{-1}{\frac{T}{H_L/R}}\right) = 1 \cdot \exp\left(\frac{-1}{0.1259}\right) = 0.00035$$

$$d). \text{ Anzahl Gitterplätze pro Leerstelle } \frac{1}{c_L} = \frac{1}{0.00035} = 2857$$

Diese Anzahl Atome im Würfel angeordnet ergibt eine Kantenlänge von $\sqrt[3]{2857} \approx 14$ Atomen.

3 Versetzungen, Burgersumlauf

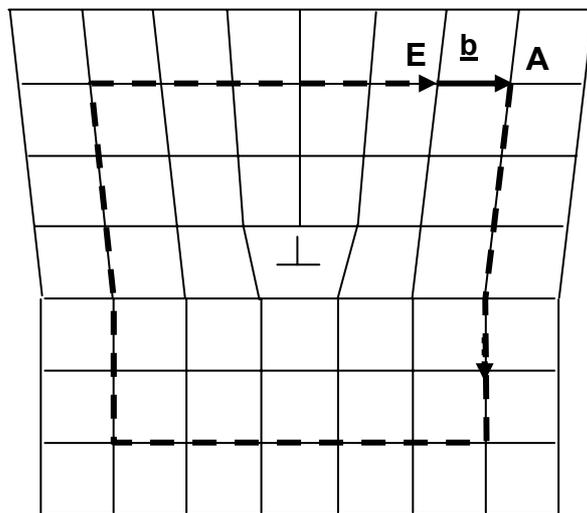
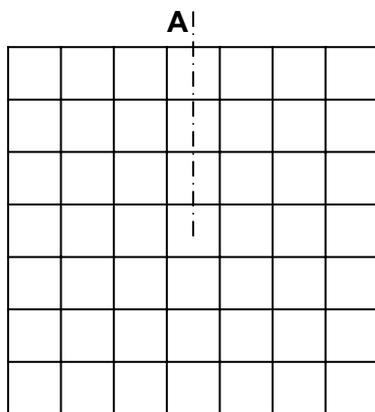
Gegeben ein Ausschnitt aus einem kubisch einfachen Gitter.

- Fügen Sie bei der Linie A eine Halbebene ein und zeichnen Sie das gestörte Gitter neu.
- Machen Sie einen Burgersumlauf.
- Zeichnen Sie den Burgersvektor.
- Macht es einen Unterschied, ob man den Burgersumlauf im Uhrzeiger- oder im Gegenuhrzeigersinn durchführt?

Lösung:

a)-c): *Zeichnung*

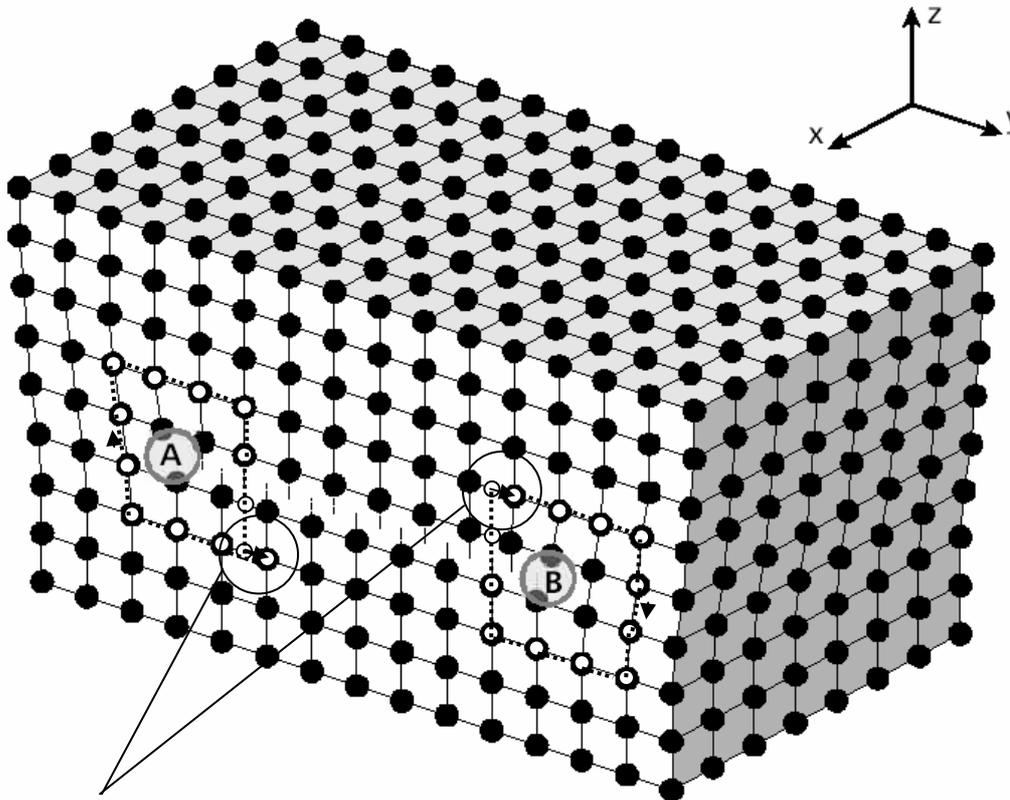
d): *Der Burgersumlauf wurde im Uhrzeigersinn gemacht, der Burgersvektor zeigt nach rechts. Bei einem Umlauf im Gegenuhrzeigersinn zeigt der Burgersvektor nach links, in die entgegengesetzte Richtung.*



4 Stapelfehler und Teilversetzungen

Stapelfehler werden durch zwei Teilversetzungen aufgespannt, d.h. gegen die ungestörten Kristallteile abgegrenzt. Schematisch sind im untenstehenden kubisch einfachen Gitter zwei Teilversetzungen A und B mit dazwischen liegendem Stapelfehler dargestellt. Zeichnen Sie für beide je einen Burgersumlauf und den dazugehörigen Burgersvektor ein und geben Sie die Koordinaten der beiden Vektoren an.

Lösung



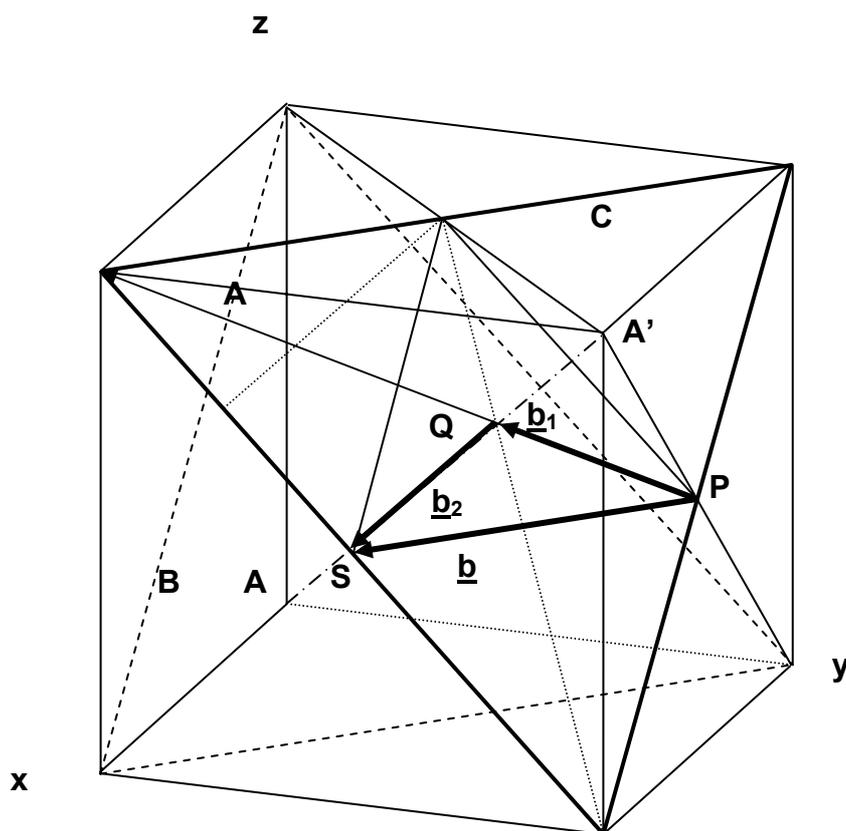
$$\underline{b}_A = \underline{b}_B = \frac{a_0}{2} [010] \quad \text{oder} \quad \underline{b}_A = \underline{b}_B = \frac{a_0}{2} [0\bar{1}0]$$

5 Stapelfolge, Stapelfehler

In der Elementarzelle eines kubisch flächenzentrierten Gitters sind die Ebenen B und C eingezeichnet, je eine A-Ebene geht durch die Eckpunkte A, A' des Würfels.

- Zeichnen Sie ausgehend vom Punkt P den Burgersvektor \underline{b}_1 einer Teilversetzung, welcher die Atome der Ebene C (innerhalb dieser Ebene) so verschiebt, dass eine Ebene A entsteht, und geben Sie seine Koordinaten an.
- Geben Sie einen Vektor \underline{b} an, der C in sich verschiebt.
- Geben Sie einen Vektor \underline{b}_2 an, welcher zusammen mit \underline{b}_1 den Vektor \underline{b} ergibt.

Lösung



a) S. Zeichnung. Burgersvektor \underline{b}_1 als Differenz der Ortsvektoren A-Q: $\frac{2}{3} \cdot [111]$ und A-P: $\frac{1}{2} \cdot [121]$

$$\underline{b}_1 = \frac{1}{6} \cdot [4 \ 4 \ 4] - \frac{1}{6} \cdot [3 \ 6 \ 3] = \frac{1}{6} \cdot [1 \ \bar{2} \ 1]$$

$$\underline{b} = \frac{1}{2} \cdot [1 \ \bar{1} \ 0]$$

$$\underline{b}_2 = \underline{b} - \underline{b}_1 = \frac{1}{2} \cdot [1 \ \bar{1} \ 0] - \frac{1}{6} \cdot [1 \ \bar{2} \ 1] = \frac{1}{6} \cdot [3 \ \bar{3} \ 0] - \frac{1}{6} \cdot [1 \ \bar{2} \ 1] = \frac{1}{6} \cdot [2 \ \bar{1} \ \bar{1}]$$

6 Stapelfolge und Stapelfehler

Geben sie je die korrekte Stapelfolge und ein Beispiel einer gestörten Stapelfolge an für folgende Gittertypen:

- Kubisch primitiv
- Kubisch raumzentriert
- Kubisch flächenzentriert
- Hexagonal dichtest gepackt.

Lösung

Die fehlerhafte Stapelfolge ist unterstrichen

- | | | |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------|
| a) Kubisch primitiv | regulär: AA | gestört: A <u>ABBB</u> |
| b) Kubisch raumzentriert | regulär: ABAB | gestört: ABAB <u>BAB</u> |
| c) Kubisch flächenzentriert | regulär: ABCABC | gestört: ABC <u>BCA</u> |
| d) Hexagonal dichtest gepackt. | regulär: ABAB | gestört: AB <u>CAC</u> |

7 Stapelfehlerenergie

| Stapelfehlerenergie $\gamma_{St} [J / m^2]$ | | | | |
|---|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 18/8 CrNi | Ms 30 | Au | Cu | Al |
| $7 \cdot 10^3$ | $7 \cdot 10^3$ | $10 \cdot 10^3$ | $100 \cdot 10^3$ | $250 \cdot 10^3$ |

Sie möchten durch Tiefziehen Behälter fertigen. Welche der obigen Materialien sind dafür am besten geeignet und warum?

Lösung:

Am besten geeignet sind 18/8 CrNi, Ms 30, Au, weil sie eine niedrige Stapelfehlerenergie und damit viele Stapelfehler haben. Das Laufen der Versetzungen wird behindert, es tritt eine Verfestigung beim Kaltumformen auf. Dadurch fließt das Material gleichmässig, Rissbildung wird vermieden.