

Werkstofftechnik I

Aufbau von Werkstoffen

Verfasser:

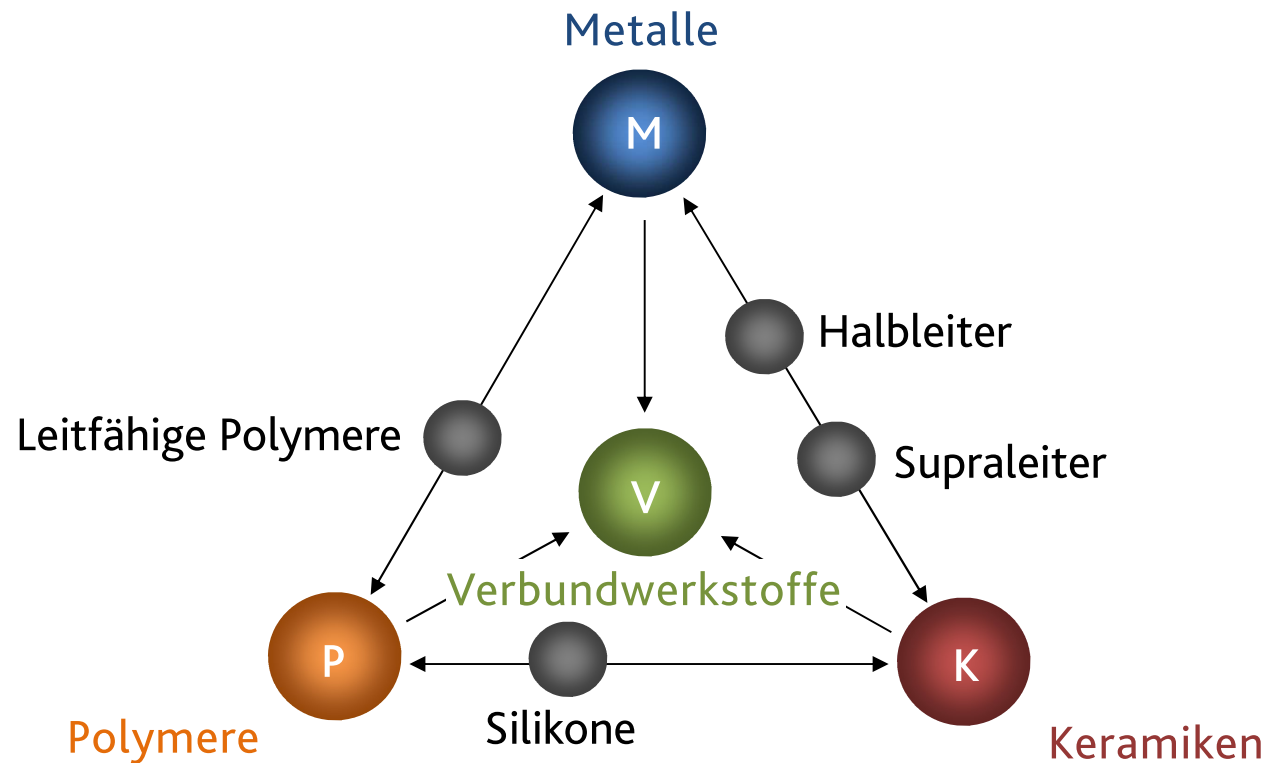
Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ

Datum:

Agenda

- Einleitung
- Werkstoffprüfung
- Metallographie
- **Aufbau von Werkstoffen**
 - Werkstoffgruppen
 - Bindungsarten
 - Kristallstrukturen
 - Gefüge eines Werkstoffes
- Mechanische Eigenschaften
- Aufbau mehrphasiger Werkstoffe
- Grundlagen der Wärmebehandlung

Vier Hauptgruppen und vier Zwischengruppen



Charakteristische Eigenschaften

- Metalle:
Gute elektrische Leitfähigkeit, Reflexion von Licht, chemisch meist wenig beständig, plastisch verformbar,...
 - Gebräuchliche Untergruppen:
 - Eisenmetalle - Nichteisenmetalle
 - Edelmetalle (Ag, Au, Pt, Ir)
 - Leichtmetalle (Dichte $\rho < 4,5 \text{ g/cm}^3$)
 - Hochschmelzende Metalle (Refraktäre, $T_m > 2400^\circ\text{C}$, Nb, Mo, Ta, W)
 - Übergangsmetalle (unvollständige innere Elektronen-Schalen)
 - Meist Legierungen: Fe + C, Cu + Zn (Messing), ...
- Keramische Stoffe: (Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe)
Schlechte Leitfähigkeit, spröde, chemisch beständig, hochschmelzend
 - Beispiele: Oxide (Al_2O_3 , ZrO_2), Karbide (SiC), Nitride (Si_3N_4), Gläser (Basis SiO_2)
- Polymere:
Kunststoffe sind schlechte elektrische Leiter, tieftemperaturspröde, chemisch beständig, nicht temperaturbeständig
 - Beispiele: PE, PVC, PMMA (Polymethylmethacrylat, Plexiglas), Gummi

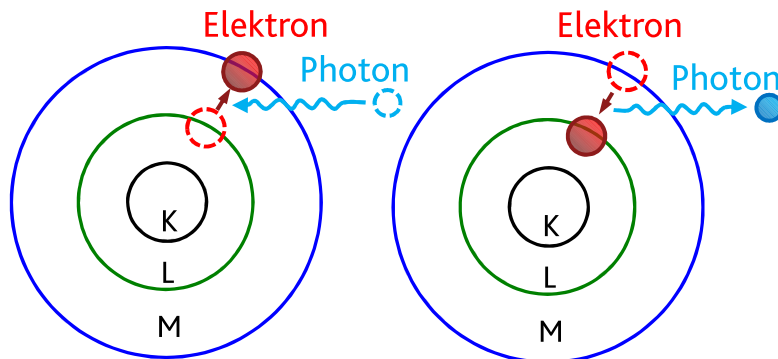
Charakteristischen Eigenschaften

- **Verbundwerkstoffe:**
Kombination von mindestens zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Daraus resultieren neue (verbesserte) Eigenschaften.
 - Beispiele: GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff), MMC (metal matrix composite: z.B. Keramikfasern in Al-Legierungen), aber auch Holz, Beton, ...

Weitere wichtige Werkstoffgruppen:

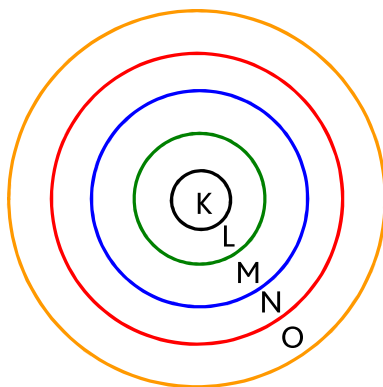
- **Halbleiter (anorganisch):**
Halbleitend, elektrische Leitfähigkeit nimmt mit der Temperatur stark zu
 - Beispiele: Si, Ge, Se, Te (+Dotierstoffe), III-V-Halbleiter: GaAs, InSb
- **Supraleiter (keramisch):**
Zeigen keinen elektrischen Widerstand unterhalb einer (möglichst hohen) Temperatur
- **Silikone:**
Als Öl, Fett, Harz oder Gummi herstellbar
- **Leitfähige Polymere (Chemie Nobelpreis im Jahr 2000):**
Anwendungsbeispiel: Organische LED (OLED), Lithium-Polymer-Batterien

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



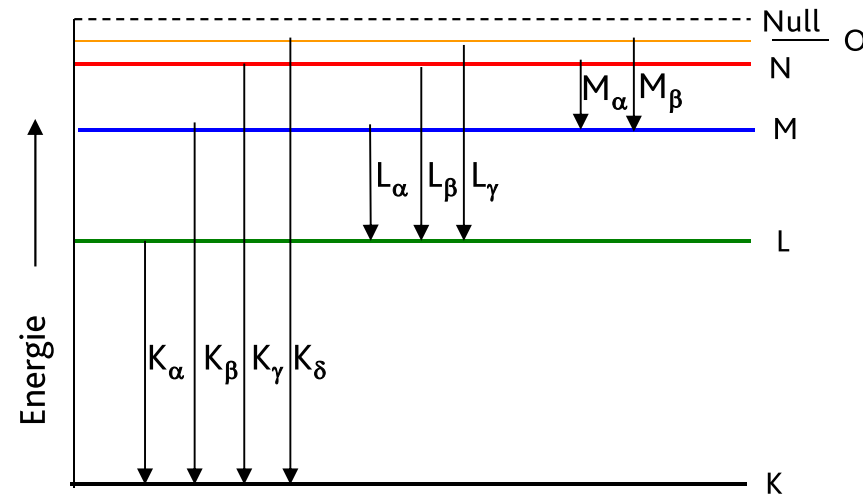
Photon wird
absorbiert

Photon wird
emittiert



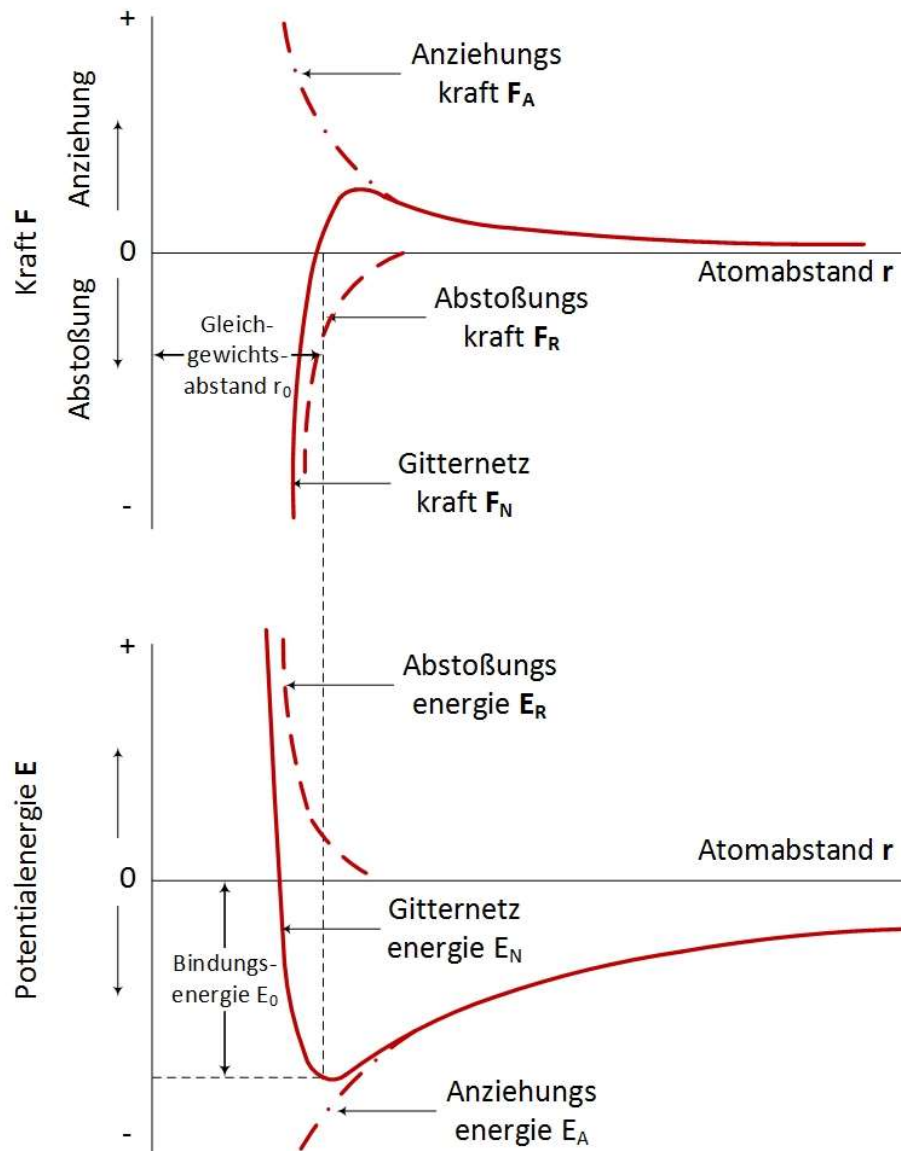
Schalenmodell

- Ein Elektron wird aus seiner Schale herausgeschlagen.
- Beim Auffüllen des leeren Platzes durch ein Elektron einer äußeren Schale wird die Energiedifferenz als Röntgenquant frei.



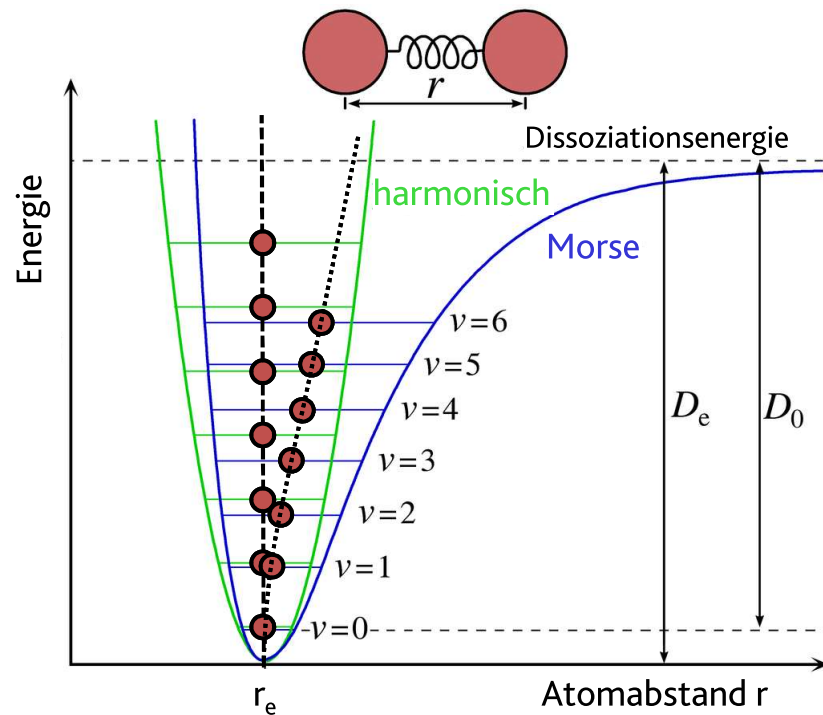
Energiespektrum

Atomare Bindung



- **Gas:**
Die Atome oder Moleküle befinden sich in einem sehr großen Abstand (≈ 10 facher Durchmesser) und bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit.
- **Kondensierte Phase:**
Die Atome liegen dicht zusammen ($\approx 10^3$ mal dichter als im Gas), die Kompressibilität ist gering (d.h. K ist groß).
- Unabhängig vom Bindungstyp ergibt sich der Abstand der Atome aus einem Gleichgewicht aus:
 - Abstoßender Energie E_R : Elektronenhüllen durchdringen sich
 - Anziehender Energie E_A : Absenkung der Energie durch elektrostatische Wechselwirkung oder die Elektronenkonfiguration

Thermische Ausdehnung



- Thermische Ausdehnung:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T \quad \alpha: \text{thermischer Ausdehnungskoeffizient}$$

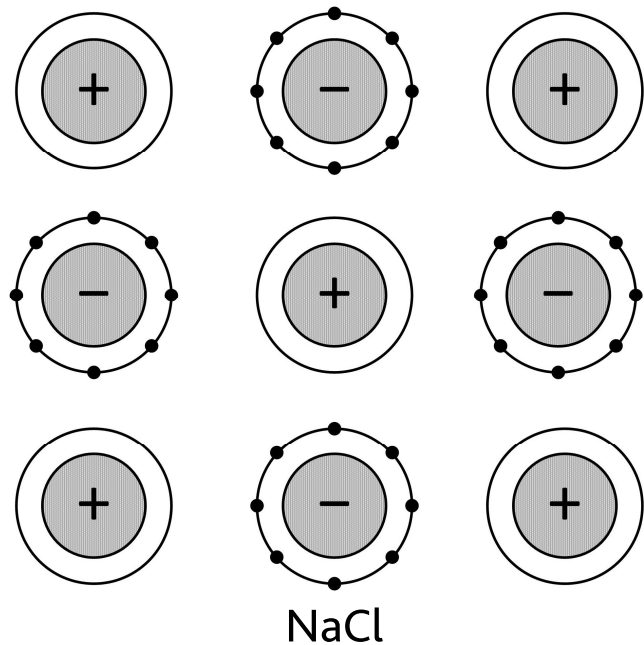
- Erklärung durch anharmonischen Oszillator:

- Durch eine Temperaturerhöhung erhalten die Atome Energie, die dann in Form von Schwingungsenergie vorliegt.
- Bei unsymmetrischem Kraftgesetz verschiebt sich der Mittelpunkt der Schwingung gegenüber der Ruhelage.
- Dies tritt z. B. bei den Schwingungen zwischen den Atomen der festen Körper auf und ist die Ursache für deren thermische Ausdehnung.

- Faustregel für kristalline Stoffe:

$$\frac{\Delta V}{V} \approx 7\% \quad \Delta T = T_m - 0K$$

Ionenbindung



- Vollständiger Elektronenübergang zwischen den Bindungspartnern
 - dadurch entstehen Kationen (positiv) und Anionen (negativ)
 - die anziehende Energie im Festkörper ist die Coulomb-Energie.
- Beispiele: NaCl und MgO

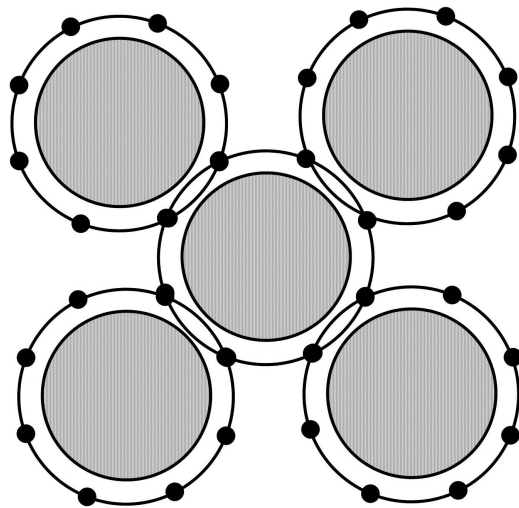
Na($z=11$): $\dots 2p^6 3s^1 \rightarrow \text{Na}^+ : (\dots 2p^6)^+$

Cl($z=17$): $\dots 3s^2 3p^5 \rightarrow \text{Cl}^- : (\dots 3s^2 3p^6)^-$

Mg($z=12$): $\dots 2p^6 3s^2 \rightarrow \text{Mg}^{2+} : (\dots 2p^6)^{2+}$

O($z=8$): $\dots 2s^2 2p^4 \rightarrow \text{O}^{2-} : (\dots 2s^2 2p^6)^{2-}$
- Triebkraft: Bildung einer Edelgaskonfiguration (Elektronenaffinität z.B. des Cl)

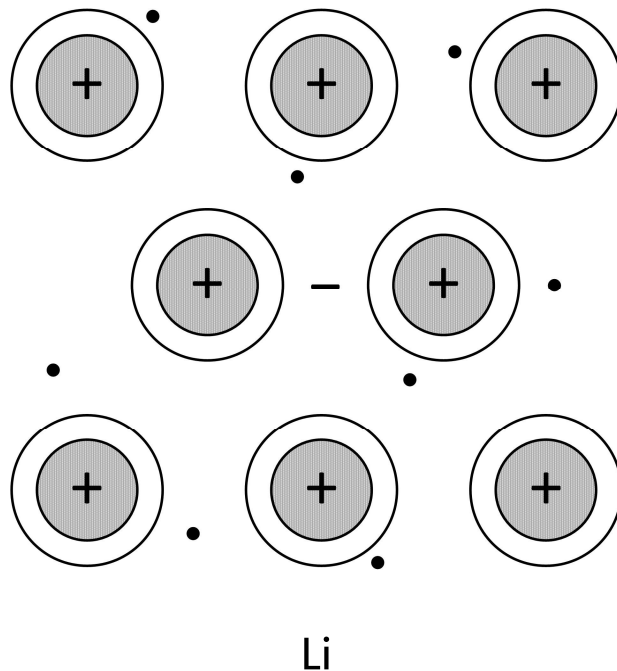
Kovalente Bindung



Diamant

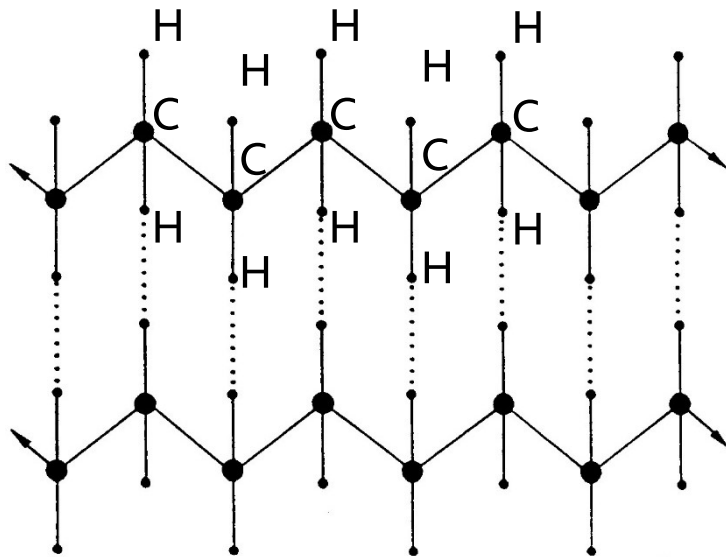
- Bildung gemeinsamer Elektronenpaare zur Erreichung einer Pseudoedelgaskonfiguration
- Bindung ist stark gerichtet.
- Beispiel Diamant: Kohlenstoff $C(z=6)$: $1s^2 2s^2 2p^2$ hat vier Außenelektronen (Valenzelektronen) und kann damit vier kovalente Bindungen eingehen.
- Triebkraft: Elektronenkonfiguration

Metallische Bindung



- Alle Atome geben ihre äußeren Elektronen (e^-) ab, die dann ein "Elektronengas" bilden, in das die positiven Atomrümpfe eingebettet sind.
- Die Bindung ist ungerichtet.
- Beispiele:
 - Lithium $\text{Li}(z=3)$: $1s^2 2s^1$ gibt ein Elektron (e^-) pro Atom ab.
 - Magnesium $\text{Mg}(z=12)$: $\dots 2p^6 3s^2$ gibt 2 Elektronen (e^-) pro Atom ab.
- Triebkraft: Elektronenkonfiguration

Van-der-Waals-Bindung

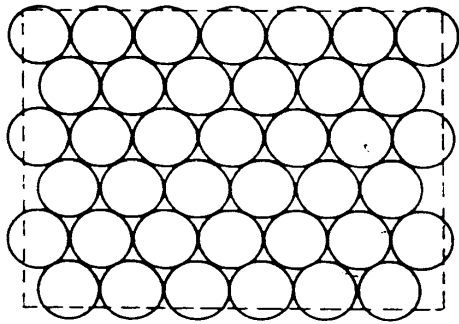


Polymer-Molekül-Kristall

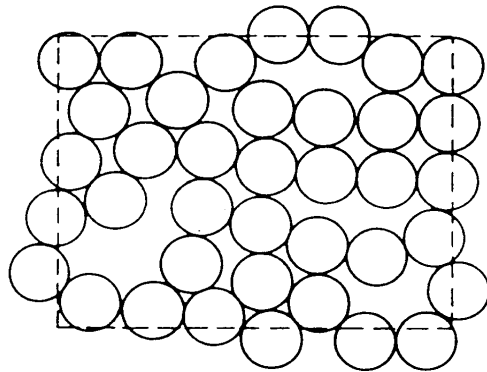
- Bindung zwischen kovalent gebundenen Molekülen (z.B. H_2 oder CH_4) oder Edelgasatomen
- Bindungsenergie ist sehr schwach und von kurzer Reichweite
- Triebkraft: Dipole und induzierte Dipole
- Beispiel: Bindung zwischen Polymer-Ketten, Edelgaskristalle

Beschreibung der Zustände

Unterschiede zwischen einem amorphen und einem kristallinen Zustand:



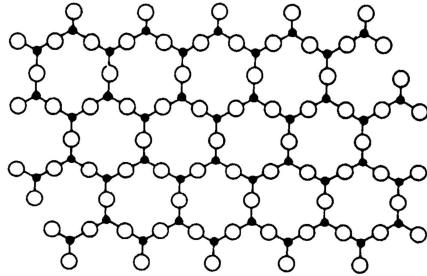
a



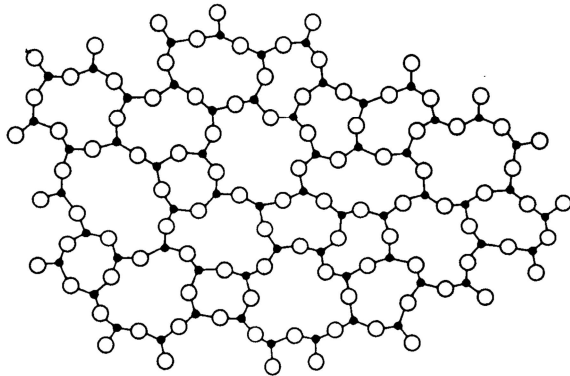
b

- a) kristallin: strenge Periodizität der Atomanordnung, geringe Kompressibilität, starre Form (geringe Fluidität), exakt definiert Erstarrungstemperatur
- b) amorph: keine Fernordnung sondern unregelmäßige Anordnung, ebenfalls geringe Kompressibilität, strukturmäßig gleich wie Flüssigkeit, kontinuierliche Abnahme der Fluidität mit abnehmender Temperatur

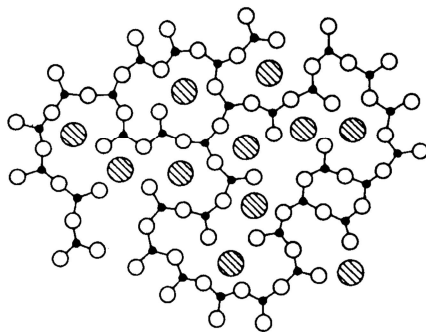
Beschreibung der Zustände



a) Quarzkristall
(kristallin)



b) Quarzglas



• Si⁴⁺ ○ O²⁻ ◐ Na

c) Glas (amorph)

- Metalle sind in der Regel kristallin.
- Ausnahme: metallische Gläser, die durch sehr rasche Abkühlung mit

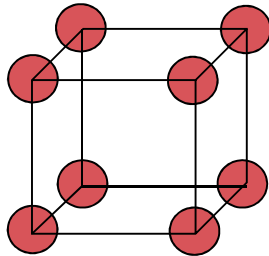
$$\frac{dT}{dt} (= \dot{T}) > 10^6 [Ks^{-1}]$$

aus dem schmelzflüssigen (amorphen) Zustand an der Umwandlung in den kristallinen Zustand (Kristallisation) gehindert wurden.

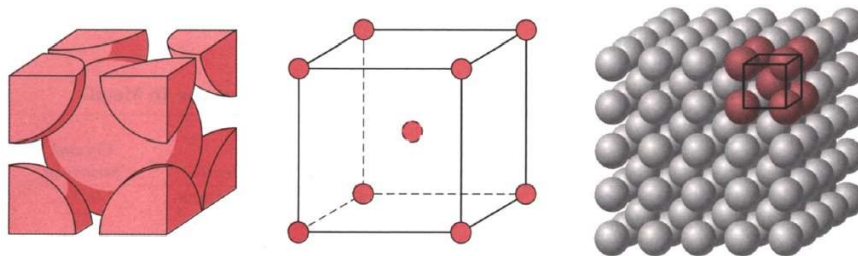
- Beispiel: Glas, Grundbaustein ist der $[SiO_4]^{4-}$ -Tetraeder; Im Glas werden durch die Zugabe von Na_2O und CaO Netzwerksunterbrecher eingebracht, so dass die Si-O-Si-Ketten aufgebrochen werden und damit eine leichtere Verarbeitbarkeit (Fluidität) entsteht.

Wichtige Kristallstrukturen (I)

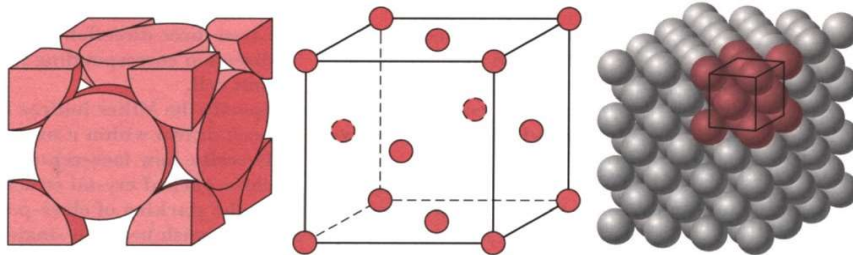
- kubisch primitiv (dient als Modell)



- kubisch raumzentriert (krz, bcc, α -Fe, β -Ti, Na, Mo)

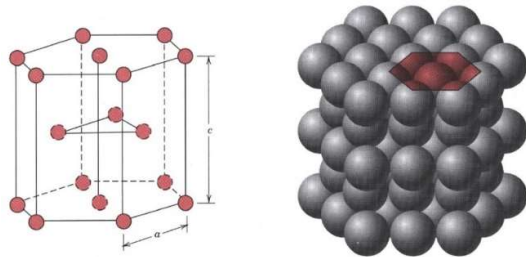


- kubisch flächenzentriert (kfz, fcc, γ -Fe, Cu, Au, Ag)

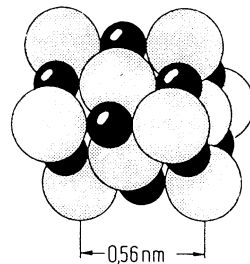


Wichtige Kristallstrukturen (II)

- Hexagonal (hdp, hcp, Mg, Zn, Cd, α -Ti)



- Weitere Kristallgitter

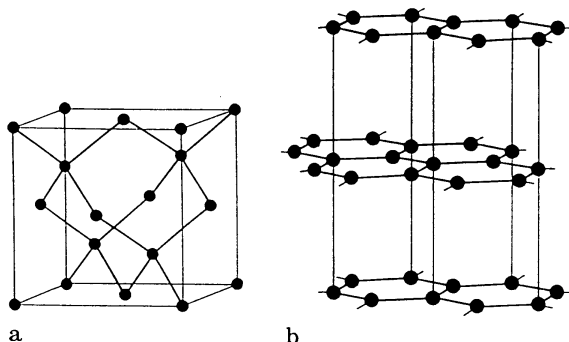


NaCl-Gitter:

zwei versetzte kfz Teilgitter für Na^+ und Cl^- ,
häufig bei 1:1 Ionenkristallen (FeO , MgO)

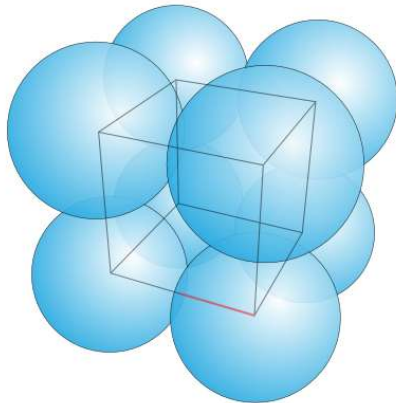
Gitter des Kohlenstoffs:

- Diamantgitter (kfz + 4 Atome in Tetraederlücken)
- Graphit (Schichtstruktur mit kovalenter Bindung innerhalb der Schicht und Van-der-Waals-Bindung zwischen den Schichten)



Koordinationszahl/Raumerfüllung

- Die Koordinationszahl gibt die Anzahl der möglichen nächsten Nachbaratome an.
- Die Raumerfüllung nach dem Kugelmodell gibt an, wieviel Volumenanteil der Elementarzelle durch Kugeln (Atome) verdrängt wird. Die Kugeln berühren sich dabei.
 - Kugelradius r
 - Kugelvolumen $V_K = 4\pi r^3/3$
 - Elementarzellenvolumen $V_{EZ} = a^3$
- Zusammen mit der Anzahl n der Kugeln (Atome) in der Elementarzelle kann die Raumerfüllung F ermittelt werden:

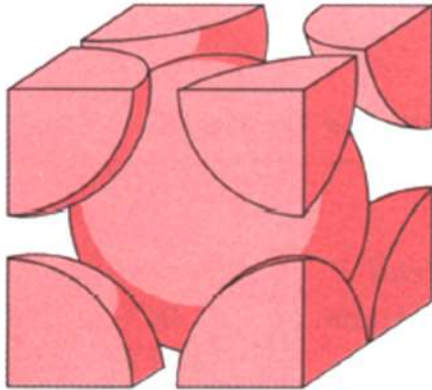


$$F = \frac{n \cdot V_K}{V_{EZ}}$$

- Beispiel: Kubisch primitive Elementarzelle
 - $8 \times 1/8 \text{ Atom} = 1 \text{ Atom}$
(8 Atome, die auf 8 Elementarzellen verteilt werden)
 - Kugelradius $r = a/2$
 - $V_K = a^3\pi/6$
 - Raumerfüllung:

$$F = V_K/V_{EZ} = \pi/6 = 52\%$$

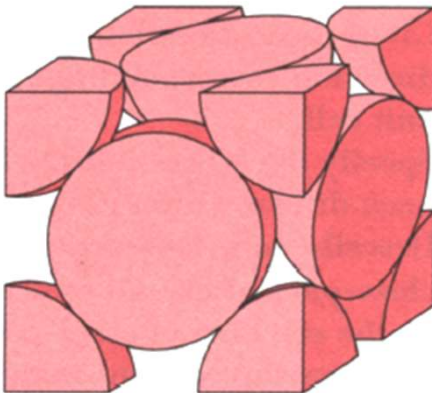
Raumerfüllung



- Beispiel: Kubisch raumzentrierte Elementarzelle (krz)

- $1 + 8 \times 1/8 \text{ Atom} = 2 \text{ Atome}$
(ein Atom im Zentrum und 8 Atome, die auf 8 Elementarzellen verteilt werden)
- Kugelradius $r = a \cdot \sqrt{3}/4$

- Raumerfüllung: $F = 2 \cdot V_K/V_{EZ} = \pi \cdot \sqrt{3}/8 = 68\%$



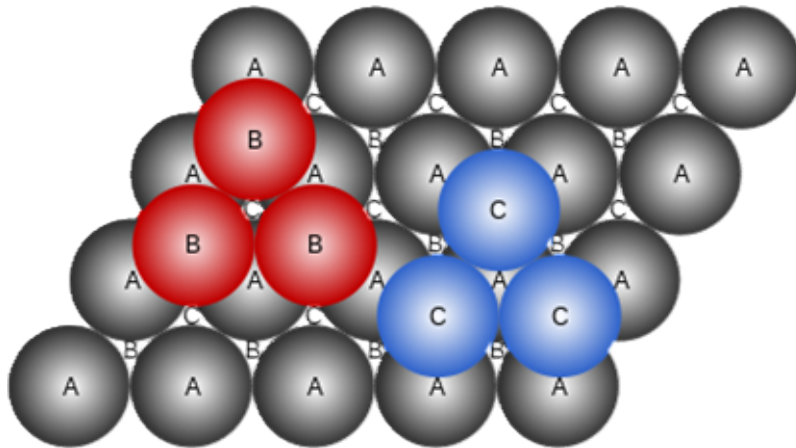
- Beispiel: Kubisch flächenzentrierte Elementarzelle (kfz)

- $6 \cdot 1/2 + 8 \times 1/8 \text{ Atom} = 4 \text{ Atome}$
(6 Atome auf den Flächenmitten, die auf je 2 Elementarzellen verteilt werden, und 8 Atome, die auf 8 Elementarzellen verteilt werden)

- Kugelradius $r = a \cdot \sqrt{2}/4$

- Raumerfüllung: $F = 4 \cdot V_K/V_{EZ} = \pi \cdot \sqrt{2}/6 = 74\%$

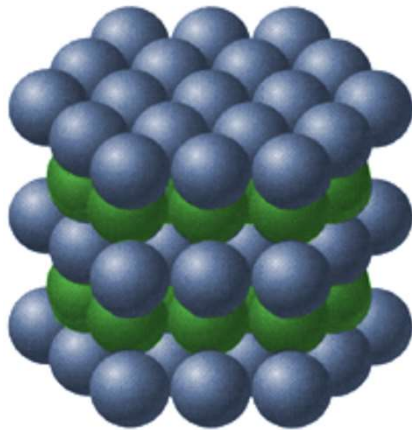
Gitter mit maximaler Raumerfüllung



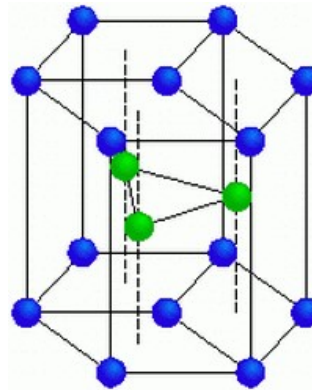
- Die dichteste Packung von Kugeln in einer Ebene führt auf eine Anordnung, in der jede Kugel gleichmäßig von sechs Nachbarkugeln umgeben ist.
- Stapelt man diese Schichten dicht aufeinander, so ergibt sich für jede Schicht zwei Anordnungsmöglichkeiten:
 - Positionen B in den Mulden der Schicht A oder
 - Positionen C in den Mulden der Schicht A.

Gitter mit maximaler Raumerfüllung

Hexagonales Gitter

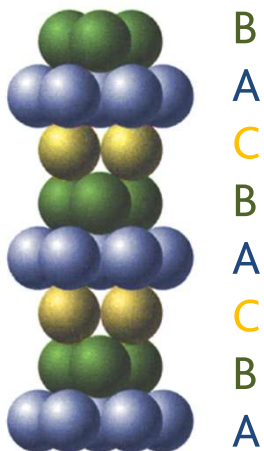


A
B
A
B
A

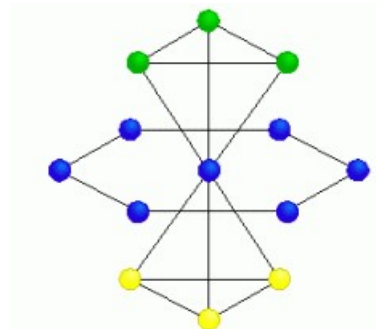


- Hexagonales Gitter
Stapelfolge ...ABABABABAB...

Kubisch flächenzentriertes Gitter

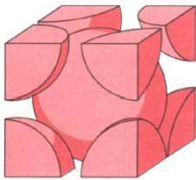
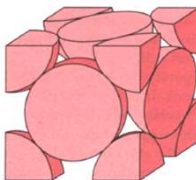
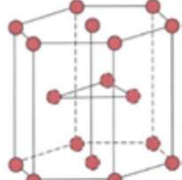


B
A
C
B
A
C
B
A

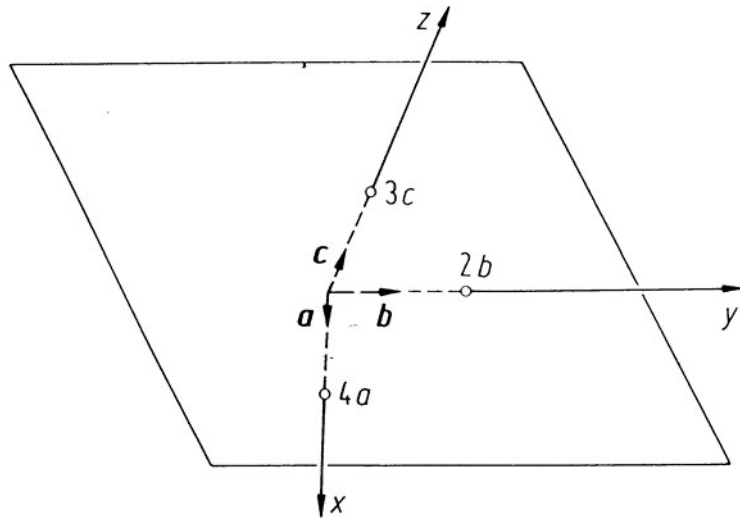


- Kubisch flächenzentriertes Gitter
Stapelfolge ...ABCABCABC...

Charakteristik der wichtigsten Elementarzellen

Gittertyp	kubisch raumzentriert	kubisch flächenzentriert	hexagonal
Darstellung			
Vertreter	α -Fe, Ta, Mo, W	γ -Fe, Al, Cu, Ag	α -Ti, Mg, Zn, Cd
Atome je Elementarzelle	2	4	6
Raumerfüllung in %	68	74 (max. Raumerfüllung)	74 (max. Raumerfüllung)
Koordinationszahl	8	12	12

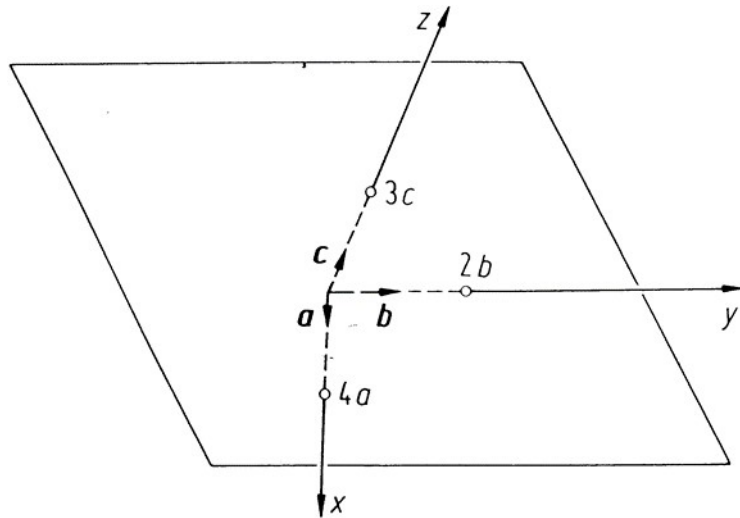
Bezeichnung einer Ebene



- Man hat ein Gitter mit den Achsen gemäß der Vektoren $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$.
- Ermittle die Schnittpunkte der Ebene mit den Koordinatenachsen.
- Die Lage der Schnittpunkte wird bestimmt durch $(p_1 \cdot \vec{a})$, $(p_2 \cdot \vec{b})$ und $(p_3 \cdot \vec{c})$.
- p_1, p_2, p_3 sind rationale Zahlen mit

$$p_i = \frac{m_i}{n_i}$$

Bezeichnung einer Ebene



- Bilde die Kehrwerte der Werte p_1 , p_2 , und p_3 und multipliziere dieses Zahlentripel mit dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen (Hauptnenner) r aus (m_1, m_2, m_3) , bis die kleinsten ganzen Zahlen (h, k, l) entstehen.

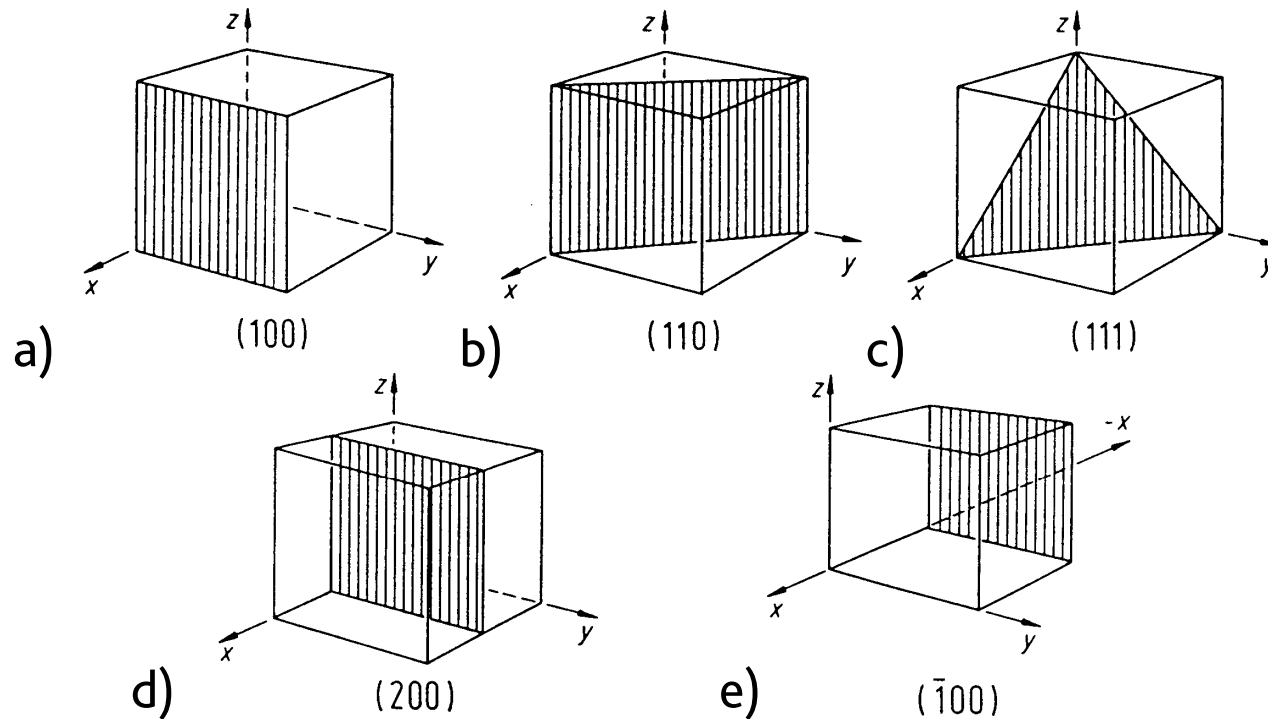
$$r \cdot \left(\frac{n_1}{m_1}, \frac{n_2}{m_2}, \frac{n_3}{m_3} \right) = (hkl)$$

Schnittpunkte	Millersche Indizes
$p_1 = 4; p_2 = 2; p_3 = 3$	(364)

$$12 \cdot \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3} \right) = (364)$$

Schreibweise: (hkl) , z.B. (364)

Bezeichnung einer Ebene



$$a) (1, \infty, \infty) \rightarrow \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty} \rightarrow (100)$$

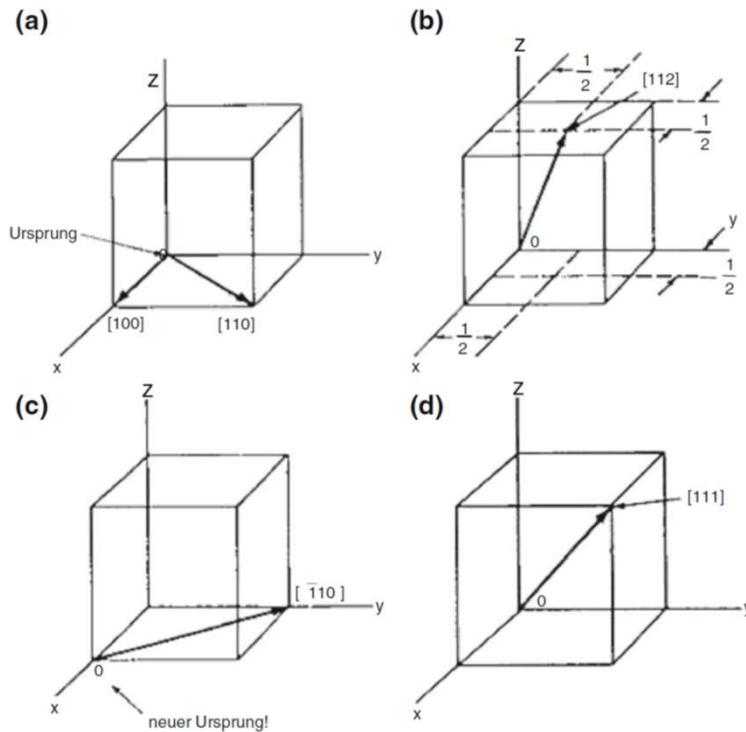
$$b) (1, 1, \infty) \rightarrow \frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty} \rightarrow (110)$$

$$c) (1, 1, 1) \rightarrow \frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1} \rightarrow (111)$$

$$d) \left(\frac{1}{2}, \infty, \infty\right) \rightarrow \frac{1}{1/2}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty} \rightarrow (200)$$

$$e) (-1, \infty, \infty) \rightarrow \frac{1}{-1}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty} \rightarrow (\bar{1}00)$$

Richtungen in einem Kristallgitter



- Verschiebe eine Gerade, die in die gesuchte Richtung zeigt so, dass sie durch den Ursprung geht.
- Ein (beliebiger) Punkt auf der Geraden wird durch seine Koordinaten

$$[x, y, z] = [q_1, q_2, q_3]$$

als Vielfache des Gitterparameters festgelegt.

- q_1, q_2, q_3 sind rationale Zahlen mit

$$q_i = \frac{m_i}{n_i}$$

Richtungen in einem Kristallgitter

- Die gesuchten Indices u, v und w ergeben sich aus diesen Koordinaten durch Multiplikation mit dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen (Hauptnenner) r aus (n_1, n_2, n_3) , die zu den kleinsten (teilerfremden) ganzen Zahlen (u, v, w) führt.

$$r \cdot \left[\frac{m_1}{n_1}, \frac{m_2}{n_2}, \frac{m_3}{n_3} \right] = [uvw]$$

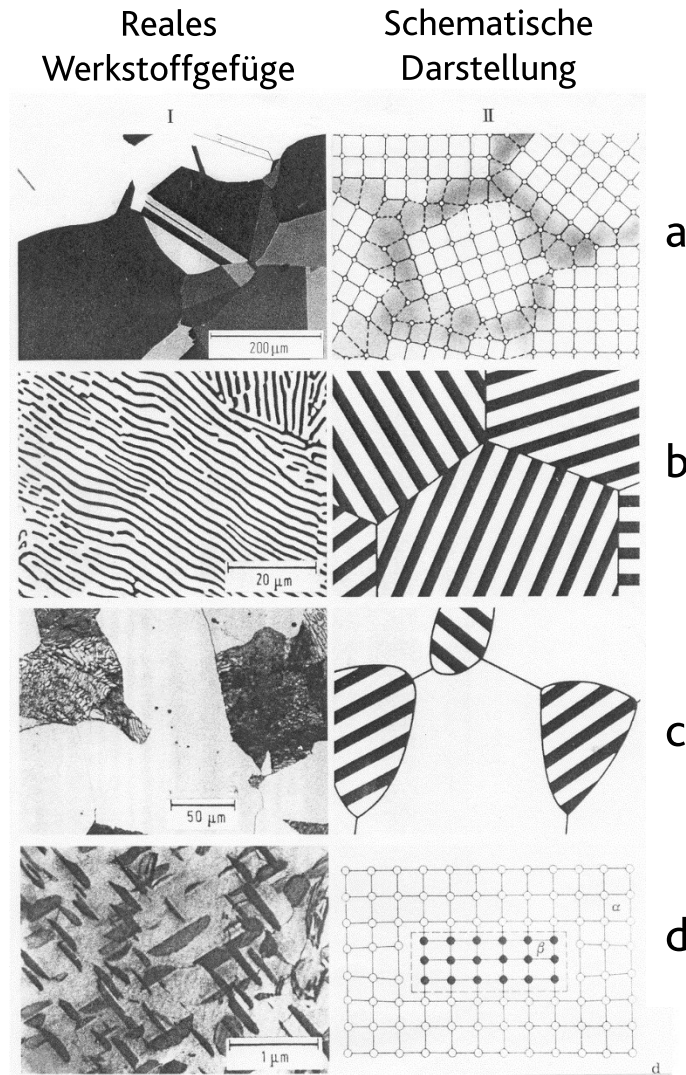
Schreibweise: $[uvw]$, negative Zahlen werden durch Überstreichen gekennzeichnet.

Koordinaten	Millersche Indizes
$q_1 = 1; q_2 = 0; q_3 = 0$	$1 \cdot [1, 0, 0] = [100]$
$q_1 = 1; q_2 = 1; q_3 = 0$	$1 \cdot [1, 1, 0] = [110]$
$q_1 = 1/2; q_2 = 1/2; q_3 = 1$	$2 \cdot \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1 \right] = [112]$
$q_1 = -1; q_2 = 1; q_3 = 0$	$1 \cdot [-1, 1, 0] = [\bar{1}10]$
$q_1 = 1; q_2 = 1; q_3 = 1$	$1 \cdot [1, 1, 1] = [111]$
$q_1 = 1/4; q_2 = 1/3; q_3 = 1/12$	$12 \cdot \left[\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{12} \right] = [341]$

Gefüge eines Werkstoffs: Abgrenzung

- Betrachtungsweise der Mechanik (meist): Festkörper=Kontinuum
- Betrachtungsweise der Physik (meist): Idealer Festkörper
- Realer Werkstoff: Gefüge, d.h. komplexer Aufbau mit Anordnung der Kristalle und Störungen (Abweichung vom perfekten Aufbau)
- Bevor im folgenden die unterschiedlichen Arten von Störungen behandelt werden, sollen einige wichtige Begriffe erklärt werden:
 - Technische Werkstoffe sind in der Regel viel- bzw. polykristallin (nicht einkristallin), d.h. sie setzen sich aus Körnern zusammen, die unterschiedliche Kristallorientierung aufweisen.
 - Eine Phase ist ein Bereich konstanter Struktur und chemischer Zusammensetzung. Technische Werkstoffe sind oft mehrphasig.

Darstellung von Werkstoffgefügen



Beispiele:

- Einphasiges, polykristallines Gefüge (α -Fe-Ni-Leg.)
- Zweiphasiges (lamellares), polykristallines Gefüge (Fe_3C und α -Fe, Perlit)
- Einphasige und zweiphasige Körner (Perlit und Ferrit)
- Zweiphasiges Gefüge (TEM: Al_2Cu -Ausscheidungen in Al-Legierung)

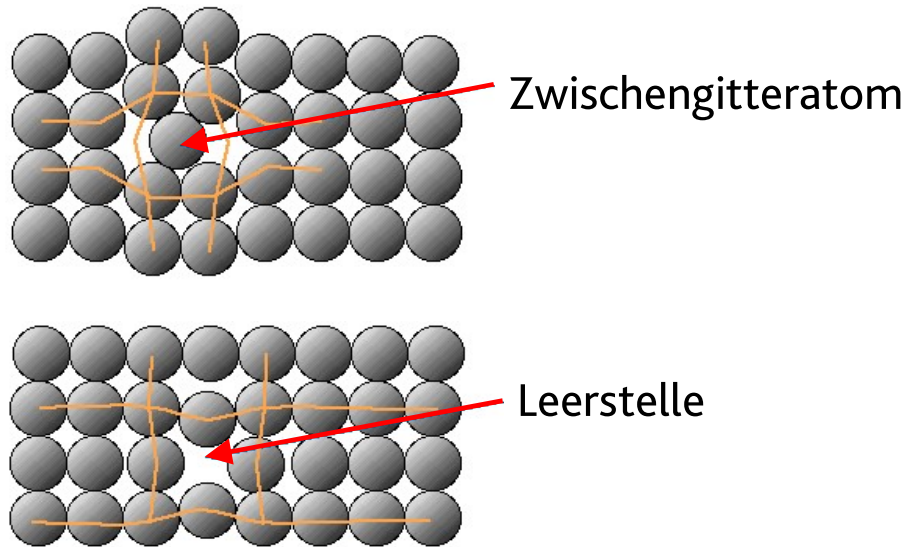
Baufehler

- Kristalle sind niemals fehlerfrei.
- Die Gitterbaufehler (= die Störungen im perfekten Aufbau eines Werkstoffes) werden nach ihrer Dimensionalität unterteilt:
 - Punktförmige Störungen = nulldimensionale Fehler (0D)
 - Linienförmige Störungen = eindimensionale Fehler (1D)
 - Flächenförmige Störungen = zweidimensionale Fehler (2D)
 - Räumliche Störungen = dreidimensionale Fehler (3D)

Hinweis: Es sind die Kristallbaufehler, die metallische Werkstoffe mit Eigenschaften versehen, die sie zu den wichtigsten Strukturwerkstoffen machen, z.B.

- Diffusionsgesteuerte Phasenumwandlungen benötigen Leerstellen (0D) zur Diffusion
- Plastische Verformung geschieht durch die Erzeugung und Bewegung von Versetzungen (1D)
- Rekristallisation benötigt die Erzeugung und Bewegung von Korngrenzen (2D)

Nulldimensionale Baufehler



Typische Zahlenwerte:

- Knapp unterhalb der Schmelztemperatur ist jeder 10.000te Gitterplatz unbesetzt.
- Die Zwischengitterkonzentration ist geringer, da wegen der hohen Verzerrung Q groß ist.

- Für den Stofftransport im Festkörper sind die atomaren Fehlstellen von großer Bedeutung.
- Diese Defekte liegen bei ausreichend hoher Temperatur im thermischen Gleichgewicht vor. Für ihre Konzentration c gilt dann:

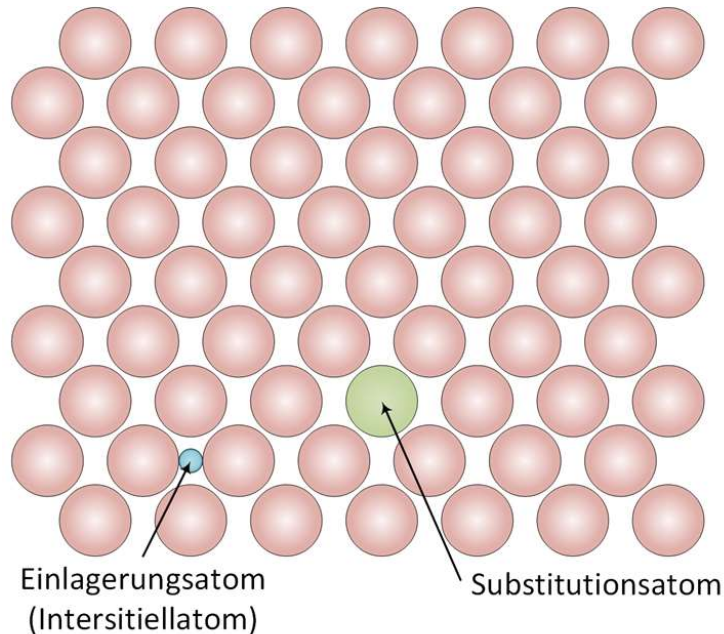
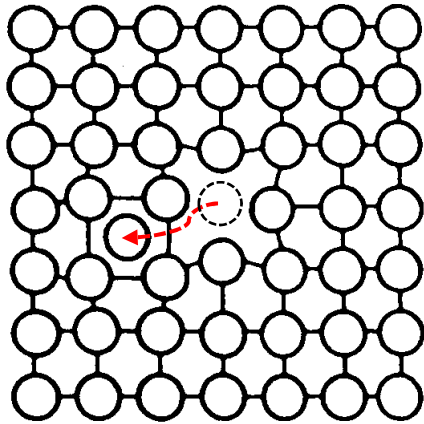
$$c = c_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}$$

mit:

- c_0 : Konstante in $1/m^3$
- Q : Energieaufwand zur Bildung der Fehlstellen (Bildungsenergie) in J/mol
- R : $8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$ (allg. Gaskonstante)
- T : absolute Temperatur in K

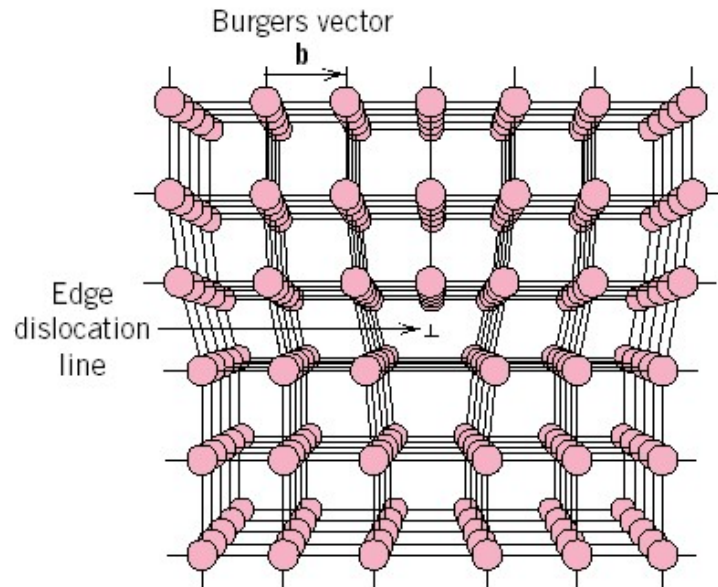
Hinweis: Arrhenius-Ausdruck, Bestimmung von Q aus experimentellen Werten von c mit Hilfe der Auftragung $\ln c(T) = \ln c_0 - \frac{Q}{R \cdot T}$.

Nulldimensionale Baufehler



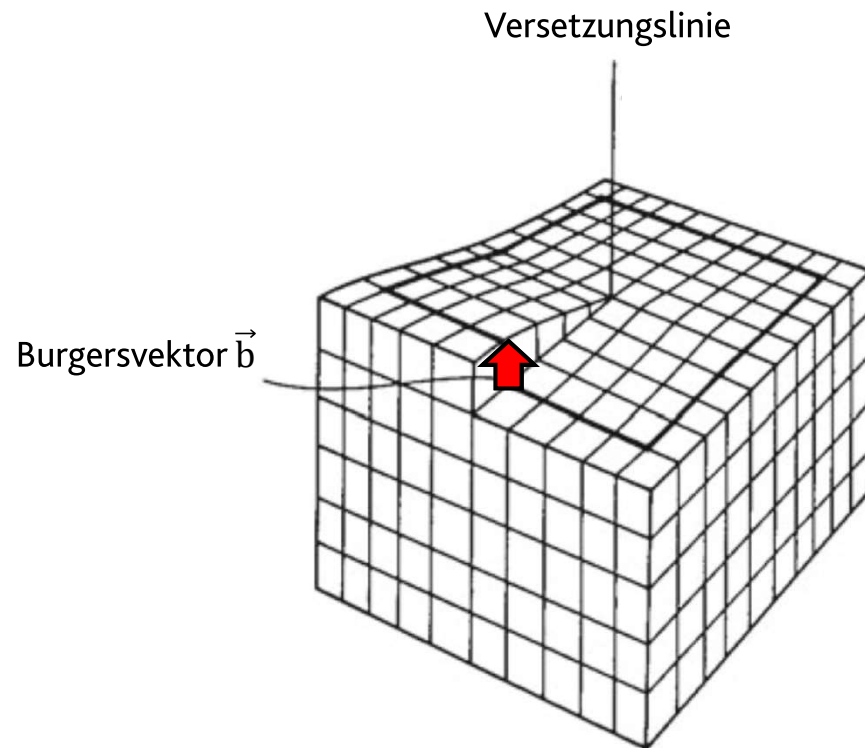
- Frenkel-Paar: entsteht, wenn ein Atom in das Zwischengitter geht und dabei eine Leerstelle zurücklässt (z.B. bei Strahlenschädigung).
- Fremdatome (eines Legierungselementes) können im Gitter auf zwei Arten gelöst werden:
 - als Substitutionsatom
 - als Einlagerungsatom (interstitiell)
- Hinweis: Verzerrung im Gitter (⇒ Mischkristallhärtung)

Eindimensionale Baufehler



- Ist der Gitteraufbau entlang einer Linie gestört, so spricht man von Versetzungen.
- Für die plastische Verformung kristalliner Werkstoffe sind die Versetzungen von großer Bedeutung:
 - a) Stufenversetzung:
 - Anschaulich: Der Kristall wird entlang einer Ebene aufgeschnitten und beide Trennflächen werden senkrecht zum Schnitt verschoben.
 - Dann wird eine Halbebene eingeschoben.
 - Das Ende der eingeschobenen Halbebene (Versetzungslinie) definiert eine Stufenversetzung.

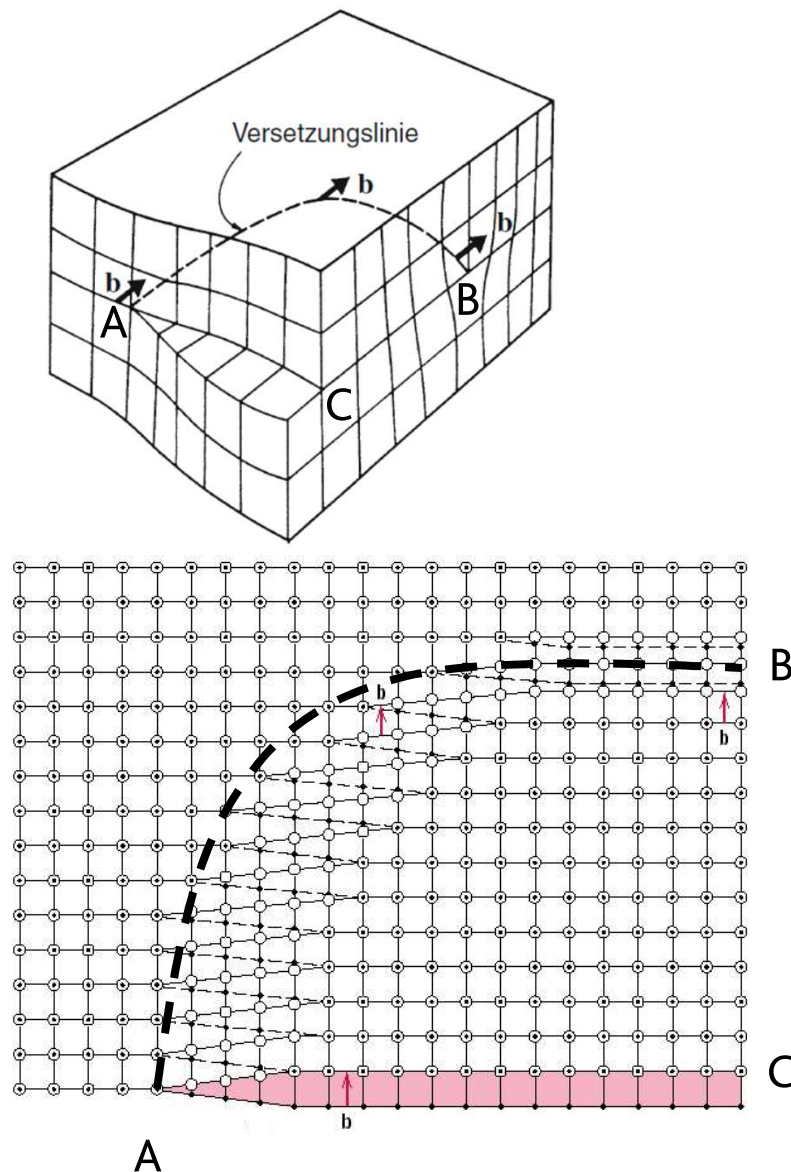
Eindimensionale Baufehler



b) Schraubenversetzung:

- Anschaulich: Der Kristall wird entlang einer Ebene aufgeschnitten und beide Trennflächen werden parallel zum Schnitt verschoben.
- Es wird aber keine Halbebene eingeschoben, so dass hier das Ende des Schnitts die Versetzungslinie definiert.
- Geht man auf einer Ebene senkrecht zur Versetzungslinie um eine Schraubenversetzung herum, so kommt man nicht auf den Ausgangspunkt zurück, sondern bewegt sich auf einer Schraubenlinie.
- Der Verschiebungsvektor $\vec{b}$ (Versatz) wird als Burgersvektor bezeichnet.

Eindimensionale Baufehler



- Stufen- und Schraubenversetzungen sind Extremfälle.
 - Eine Versetzungslinie liegt meist kreisförmig geschlossen vor und besitzt nur an bestimmten Stellen einen reinen Schrauben- oder Stufencharakter.
 - Dazwischen handelt es sich um eine gemischte Versetzung.
- c) Gemischte Versetzung: Blick auf zwei Atomlagen (kubisch primitiv):
- Punkte: Atome der unteren Lage
 - Kreise: Atome der oberen Lage

Eindimensionale Baufehler

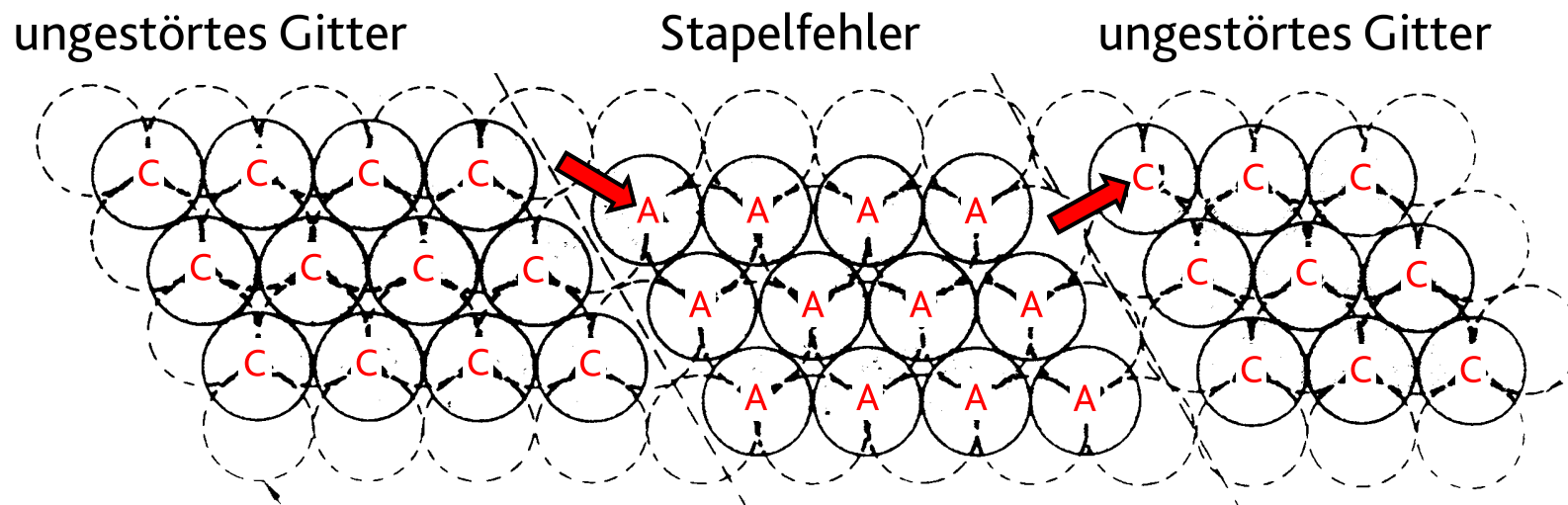
Typische Zahlenwerte:

- Die Versetzungsdichte ρ wird als Versetzungslinienlänge pro Volumen definiert.
Man findet typischerweise:
 - in versetzungsarmen Metallen: $\rho \approx 10^{12} \text{ m/m}^3$ (1 km pro mm^3)
 - in stark verformten Metallen: $\rho \approx 10^{16} \text{ m/m}^3$
 - in sehr guten Si-Einkristallen: $\rho \approx 10^3 \text{ m/m}^3$
- Diese Konzentrationen sind Nichtgleichgewichtskonzentrationen und entstehen bei der Herstellung und/oder der Verformung.

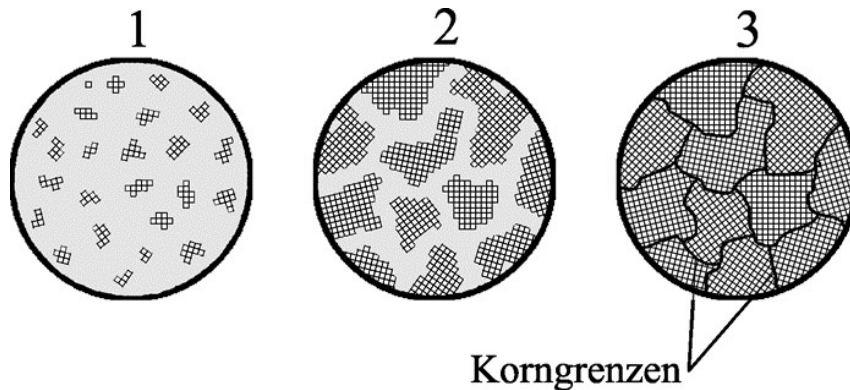
Zweidimensionale Baufehler

a) Stapelfehler: Es liegt lokal ein Fehler in der Stapelfolge vor.

Beispiel: Im kfz-Gitter (Stapelfolge ...ABCABC...) folgt auf eine B-Ebene eine A-Ebene:

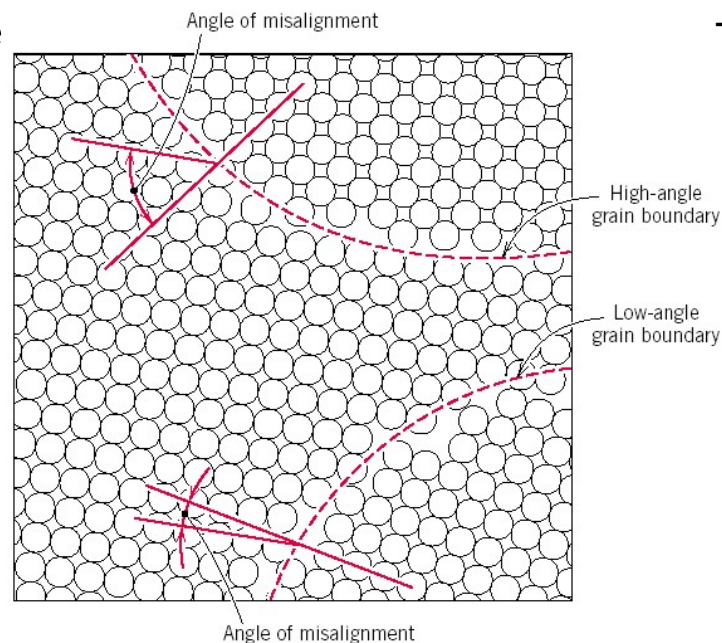


Zweidimensionale Baufehler



Vereinfachtes Schaubild für die Erstarrung:

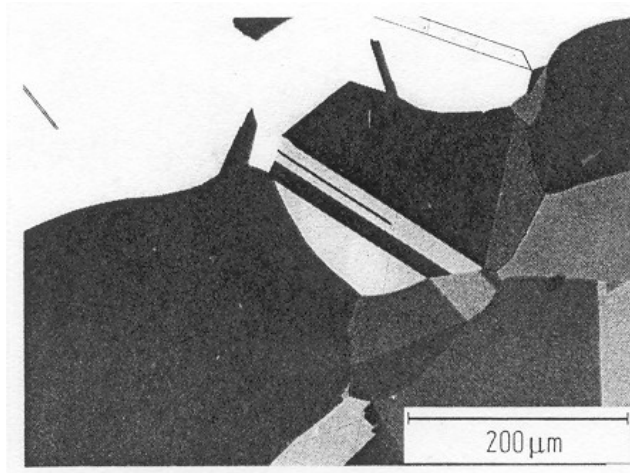
- (1) Bildung von Kristallisationskeimen
- (2) Wachsen der Kristalle
- (3) Fertiges Gefüge



b) Großwinkelkorngrenze (Korngrenze):

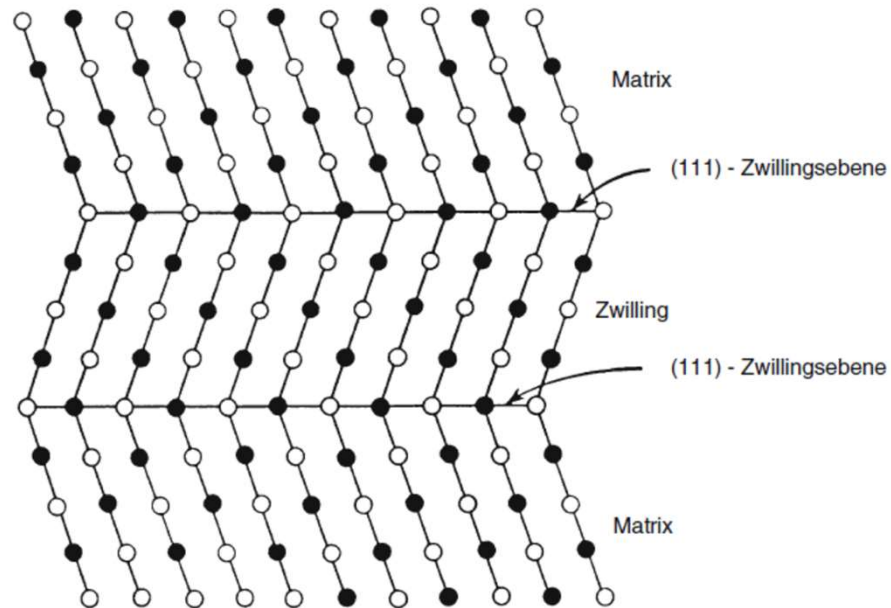
- Korngrenzen entstehen bereits bei der Erstarrung (Kristallisation) eines Werkstoffes, da die Kristallisation an mehreren Stellen einsetzt (Keime), und diese Bereiche wachsen, bis sie sich berühren.
- Durch die unterschiedliche Kristallorientierung der so entstehenden Körner entstehen Korngrenzen, die meist mit großen Orientierungswinkelunterschieden verknüpft sind.

Zweidimensionale Baufehler

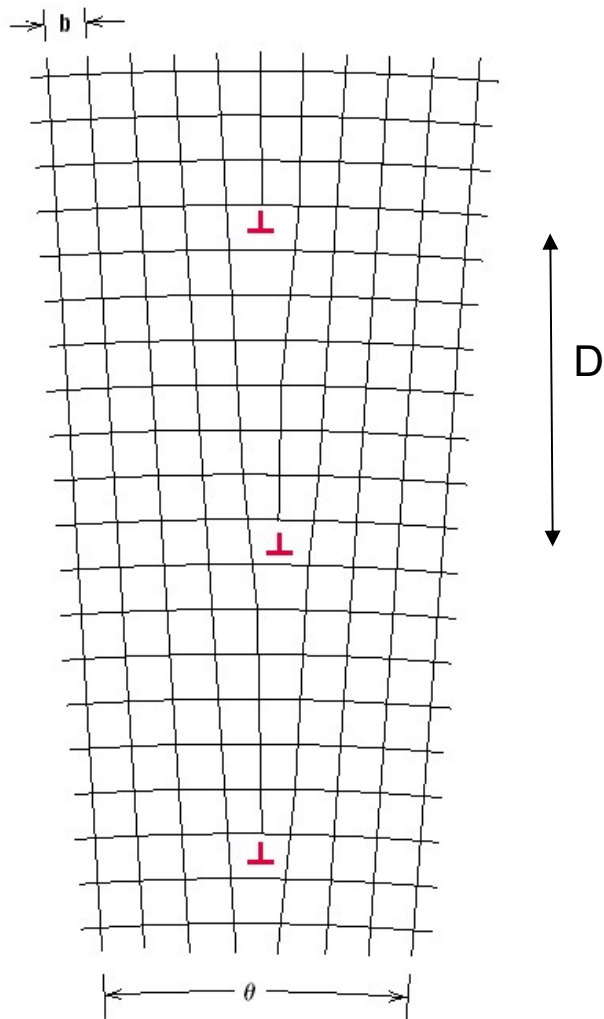


c) Zwillingsgrenze (Spezielle Korngrenzen):

- Die Atome (Atomlagen) werden an dieser Grenze gespiegelt.
- Zwillingsgrenzen entstehen z.B. bei plastischer Verformung und sind aufgrund ihres geradlinigen Verlaufs im Schliff erkennbar.



Zweidimensionale Baufehler



d) Kleinwinkelkorngrenze:

- Versetzungen können sich zu regelmäßigen Versetzungswänden oder Versetzungsnetzwerken zusammenlagern.
- Im Falle von Stufenversetzungen entsteht eine Kippgrenze. Für den Kippwinkel gilt:

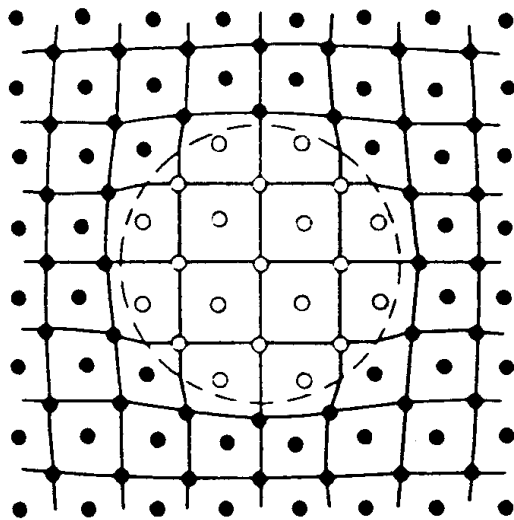
$$\sin \theta \approx \theta = \frac{b}{D}$$

- Der Kippwinkel nimmt kleine Werte an (z.B. 1°).

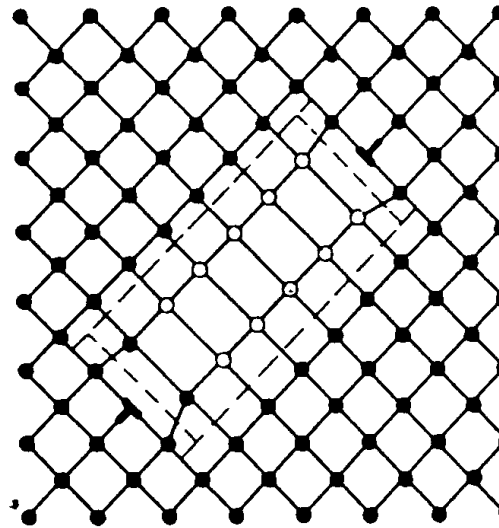
Zweidimensionale Baufehler

- e) Phasengrenzen: Je nachdem ob sich die Gitterebenen der Matrixphase in einer zweiten Phase fortsetzen, bezeichnet man die Phasengrenze als

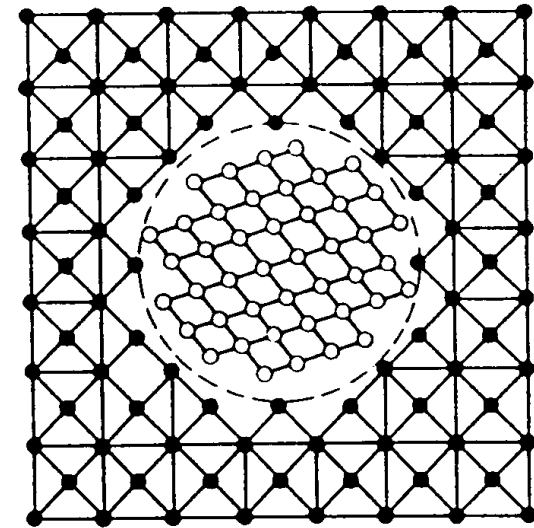
kohärent



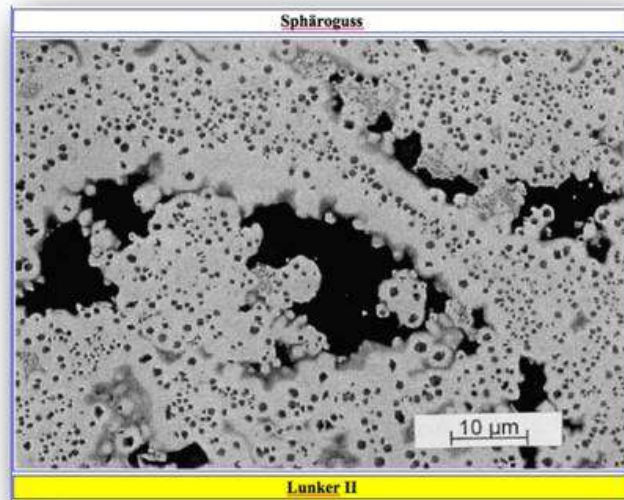
teilkohärent



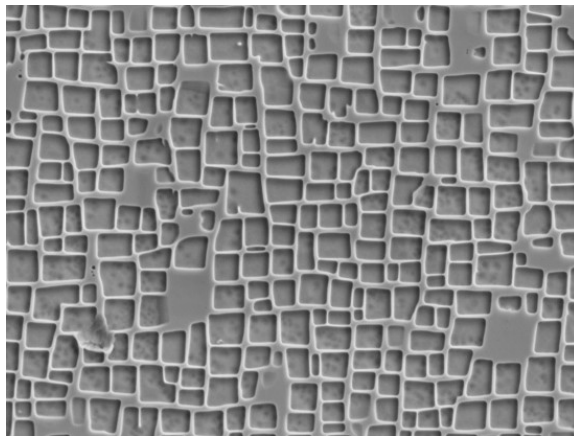
inkohärent



Dreidimensionale Baufehler



Quelle: Internet, <http://www.mezgergroup.com>



Quelle: Internet, <http://scienceblogs.de>

a) Poren, Lunker

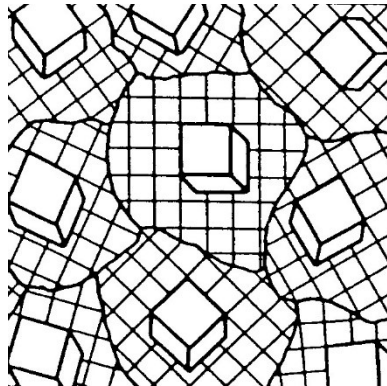
Lunker sind Schwindungshohlräume in den Gussstückpartien.

b) Ausscheidungen etc.

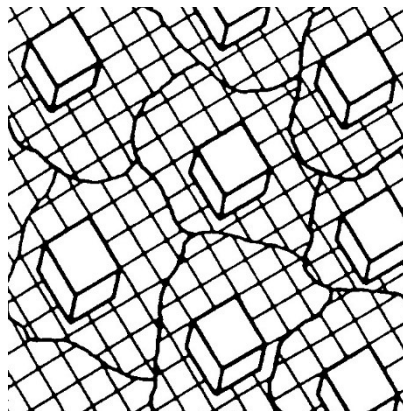
Nickelbasislegierung mit γ' Teilchen

Dreidimensionale Baufehler

ohne Textur



mit Textur



Hinweis zu der Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften:

- Ein Polykristall kann in seinen Eigenschaften richtungsunabhängig (isotrop) sein, wenn sich durch eine regellose Verteilung der Kornorientierungen die Anisotropie des einzelnen Korns nicht auswirken kann (quasi-isotrop).
- Häufig kommt es aber zu einer Textur, d.h. bestimmte Kornorientierungen treten bevorzugt auf.
- Konsequenz: Anisotropie.