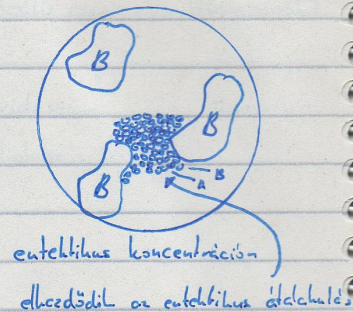
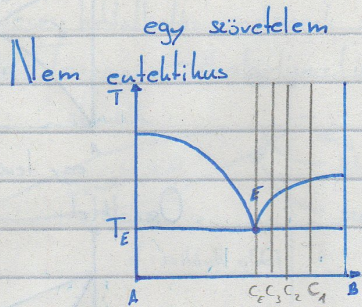
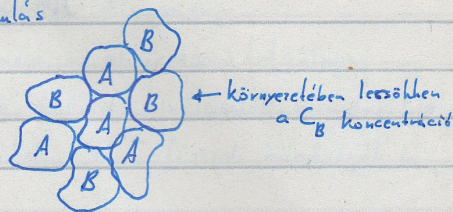
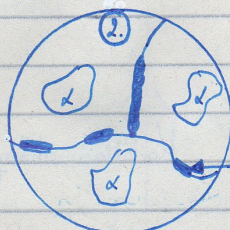
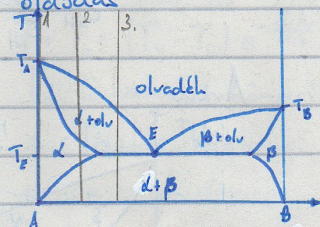


# Eutektikus átalakulás



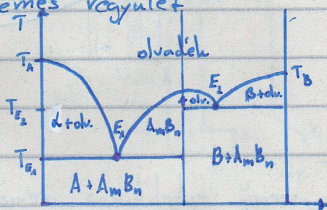
## kétkös szövetelem

### Korlátozott oldódás



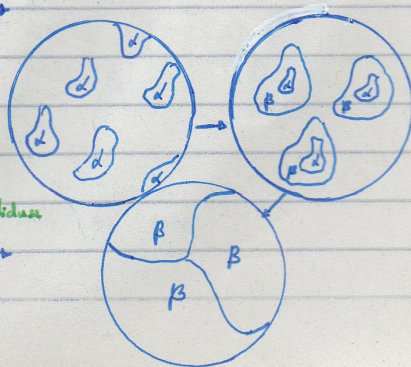
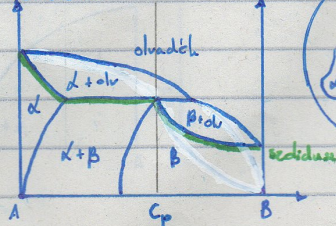
3. mint a nem eutektikus átalakulás

### Stabil fémes vegyület



olyan, mint két egyszerű eutektikus rendszer  $A + A_m B_n$  és  $A_m B_n + B$  rendszer

### Peritektikus





Kétalkotós egyensúlyi diagramok általánosítható összefüggései:

Likvidus csak görbe szakaszból áll  $\Leftrightarrow$  folyékony állapotban korlátlan oldódás

Likvidus ágaimmal száma = olvadáshő kristályosodás fázisok száma

pl.: Stabil fémek vegyületek: 3 db (A, A<sub>m</sub>B<sub>n</sub>, B)

Szilárd állapotbeli oldóképesség  $\Leftrightarrow$  szolidus alulja

görbe = alatta homogén mező

vízszintes = alatta heterogén mező

A diagram vonalait metszve a fázisok számának mindig eggyel kell változni

### Termodinamikai háttér

Termodinamika: egyensúlyban a rendszer Helmholtz-féle szabadenergiájának minimuma van

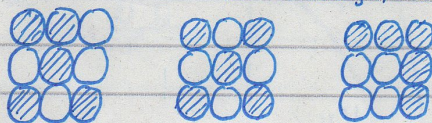
$$F = U - TS$$

$\hookrightarrow$  a rendszer entropiáján  
 $\hookrightarrow$  hőmérséklet  
 $\hookrightarrow$  a rendszer belső energiáján  
 $\hookrightarrow$  a rendszer szabadenergiája, Helmholtz

$$G = U + p \cdot V - TS = H - TS$$

$\hookrightarrow$  entalpia, állandó nyomáson vett hő-energián  
 $\hookrightarrow$  Gibbs-féle szabadenergia, szabad entalpia

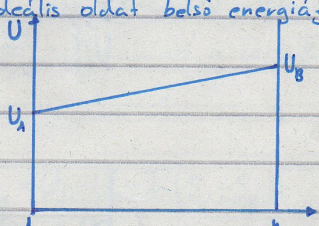
Belső energia: U



$$U_1 = U_2 = U_3$$

Ideális oldatban, U az atomok elrendeződésétől független

kétkomponensű, ideális oldat belső energiája



Keveredési, konfigurációs entropia

Az entropia statisztikus megfogalmazása:  $S = k \cdot \ln w$

Termodinamika: valószínűség statisztikus megfogalmazása

rács pont  $\uparrow$   
 $w = \frac{N!}{n!(N-n)!}$

elrendezési lehetőségek száma

$\hookrightarrow$  Boltzmann-állandó  $\hookrightarrow$  "B" atomok száma

$$S_k = k \cdot \ln w = k \cdot \ln \frac{N!}{n!(N-n)!}$$

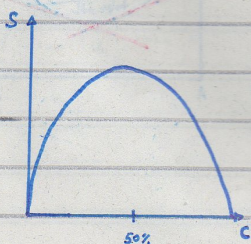
Stirling-formula  $\ln x! \approx x \cdot \ln x - x$

$$S_k = k \cdot \ln w = k \cdot \ln \frac{N!}{n!(N-n)!} = k [N \ln N - N - n \ln n + n - (N-n) \ln (N-n) + (N-n)] = -kN \left( \frac{n}{N} \ln \frac{n}{N} + \frac{N-n}{N} \ln \frac{N-n}{N} \right) = -kN [c_A \ln c_A + c_B \ln c_B]$$

ha  $N = N_A \Rightarrow k \cdot N = k \cdot N_A = R$

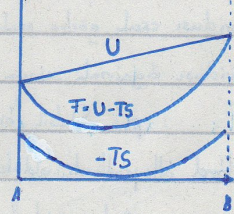
Maximumos görbét ad  $\text{Max}(S) \leftrightarrow 50\%$

Heredetisége 1 és 0 közelében nagy





Két komponensű rendszer egy fázisának szabadenergia görbéje



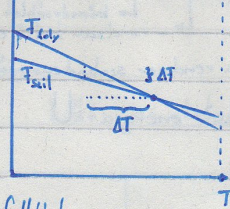
Egykomponensű rendszer egyensúlyának feltétele

Minden fázisnak van szabadenergia görbéje  $\Rightarrow$  szabadenergia görbék száma = fázisok száma

Egyfázisú tartományban: az a fázis a legstabilabb aminek szabadenergiaja legalacsonyabb

Két fázis egyensúlyának feltétele  $F_A = F_B$

Fázisátalakulások hajtóereje:  $\Delta F = F_{új} - F_{rég}$



Két komponensű rendszer egyensúlyának feltétele

Egyensúly feltétele: a rendszer összes szabadenergiajának kell minimálisnak lennie

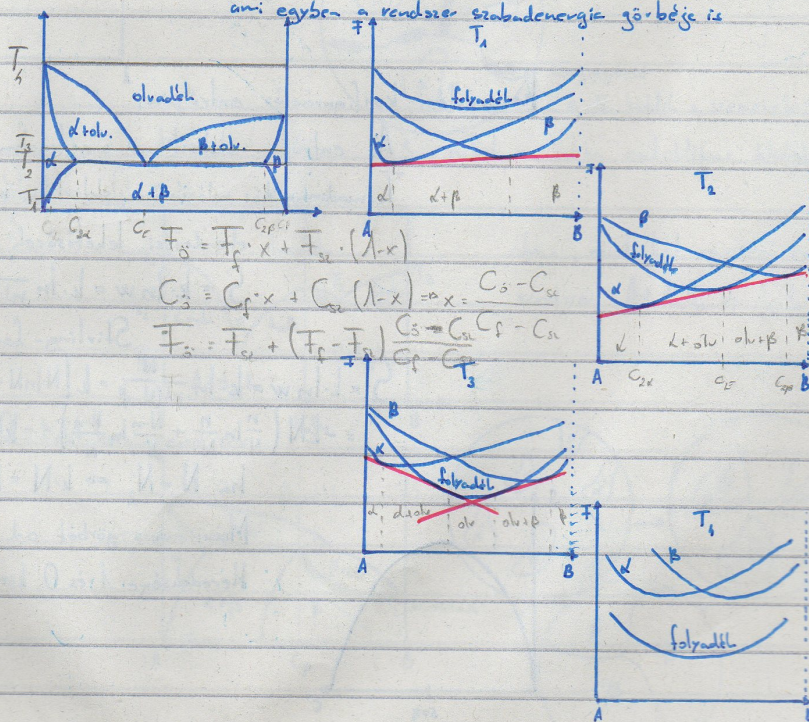
Minden fázisnak van szabadenergia görbéje  $\Rightarrow$  szabadenergia görbék száma = fázisok száma

Egyfázisú mezőben az a fázis stabilis amelynek szabadenergiaja minimális

Két- vagy többfázisú tartományban  $\frac{\partial F_A}{\partial C} = \frac{\partial F_B}{\partial C} = \mu_A = \mu_B$

Azaz, az egyensúlyt tartó fázisok szabadenergia görbéinek közös érintője van,

ami egyben a rendszer szabadenergia görbéje is



$$F_0 = F_f \cdot x + F_{sc} \cdot (1-x)$$

$$C_3 = C_f \cdot x + C_{sc} \cdot (1-x) \Rightarrow x = \frac{C_3 - C_{sc}}{C_f - C_{sc}}$$

$$F_0 = F_f + (F_f - F_{sc}) \cdot \frac{C_3 - C_{sc}}{C_f - C_{sc}}$$



Fázisátalakulás termodinamika: hűtő-cse

Diffúziós fázisátalakulás kinetikája

Fázisátalakulás (kristályosodás)

Csirképződés, nukleáció (homogén, heterogén)

Kristályok növekedése, jelentős anyagtransport (diffúzió)

Homogén csirképződés (nukleáció)

Csirké: Gömb (r)

$\Delta F_v$ : a szabadenergia csökkenés (térfogategységenként)

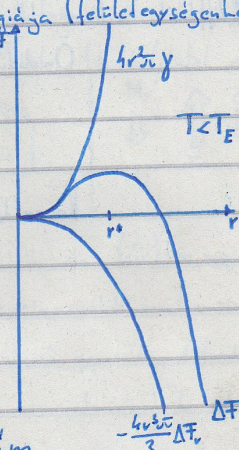
$\gamma$ : határreteg szabadenergiája (felületegységenként)

$$\Delta F = -\frac{4r^2\pi}{3}\Delta F_v + 4\pi r^2\gamma$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta v} = -4r^2\pi\Delta F_v + 8\pi r\gamma$$

$$r^* = \frac{2\gamma}{\Delta F_v} \quad \text{kritikus csirkénél}$$

$$r^* = \frac{2\gamma \cdot T_E}{L \cdot \Delta T}$$



$T = T_E$  egyensúlyi hőm.

$$F_\alpha = U_\alpha - T_E S_\alpha = U_\beta - T_E S_\beta = F_\beta \quad \text{egykomponensű rendszer}$$

$$S_\alpha - S_\beta = \frac{U_\alpha - U_\beta}{T_E} = \frac{L}{T_E} \quad \text{d a régi, } \beta \text{ az új fázis}$$

$$L = U_\alpha - U_\beta$$

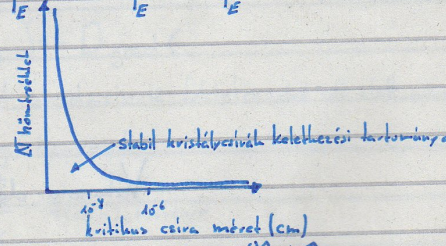
$T \neq T_E$

$$\Delta F_v = F_\alpha - F_\beta = U_\alpha - U_\beta - T(S_\alpha - S_\beta)$$

$$\Delta F_v = L - T(S_\alpha - S_\beta)$$

$$\Delta F_v = L - \frac{TL}{T_E} = L \left(1 - \frac{T}{T_E}\right) = L \frac{T_E - T}{T_E} = L \frac{\Delta T}{T_E}$$

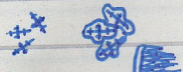
Tűlhűtés:  $\Delta T < 0$



Poliédres szemcsenövekedés



Rendezetlen dendrites szemcsenövekedés



Oslopos (sugaras) dendrites szemcsenövekedés



Szferulitos szemcsenövekedés



Chochmalshi-féle egykristály növesztés: kristályosodási mag + oldék

lassú hűtés hatására: a mag növekszik



Diffúzió: Különböző anyagi részecskék anyagban belüli helyváltása

Az anyag lehet gáz, folyékony vagy szilárd  
 transzportfolyamat (elektron, atom, ion, hőmennyiség)

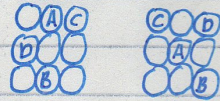
Elektronos vezeték (Ohm)	töltés áram	elektronos. potenciál gradiens
Hővezetés (Fourier)	energia áram	hőmérséklet különbség
Kémiai reakció	anyagátalakulás	affinitás
Diffúzió (Fick)	anyag áram	kémiai potenciál különbség

Diffúzió sebessége: gáz > folyadék > szilárd (növekvő gátoltság)

Diffúzió szilárd állapotban

Öndiffúzió - saját atomok vándorlása

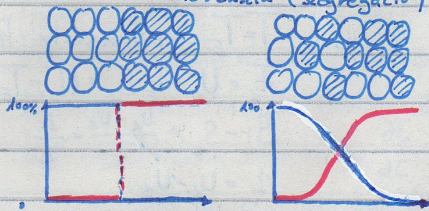
hajtóerő, a szilárdtestben lévő energia különbségek  
 megfigyelése: radioaktív „tracer” izotópokkal



Koncentrációs diffúzió - különböző atomok vándorlása

hajtóerő, az anyagban lévő koncentráció különbség  
 koncentrációs diffúzió során a koncentráció különbség  
 csökken (szelvényes eset)

növekszik (szegregáció)

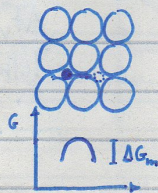


Diffúzió kinetikája

Intersticiós diffúzió

az intersticiós atom rácshelyi pontokon keresztül mozog

aktiválási energiája  
 $H, O, N, C, B$

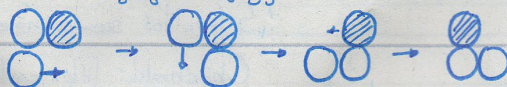


Vakancia diffúzió

szubsztitúciós idegen atom mozgása

atomok helycsere-je üres rácshelyek (vakancia) segítségével

a folyamat sebessége az üres rácshelyek számától és az atomcsere aktiválási energiájától függ



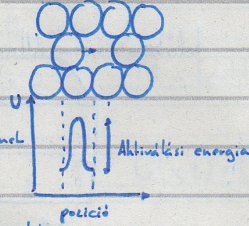
aktiválási energiája



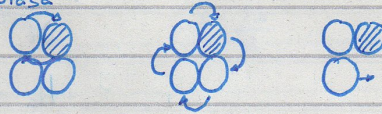
$$Q = Q_m + Q_i$$

$Q_m$  = mozgási energia

$Q_i$  = üres hely helyettesítés energiája



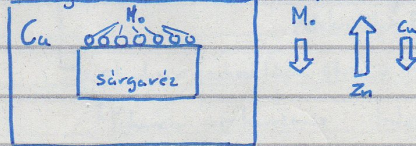
Vakancia diffúzió igazolása



direkt helyesre kelleltiv mozgás helyesre váltással

saját atom < substituációs atom < intersticiós atom

Kirkendall-Smygelskas-kísérlet (határfelület eltolódása)



minden substituációs atom (Zn) visz magával egy vakanciát

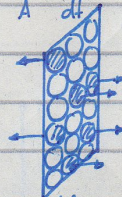
↳ vakancia-csatolt mechanizmust igazolja

substituációs átmozgó gyorsabban diffundál mint a saját atom,

mert ott nem alakulhat ki oldott atom-vakancia páros

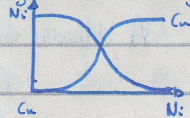
A diffúzió leírása

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad \text{anyag áramlás sebessége (fluxus) } \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \text{ v. } \left[ \frac{1}{m \cdot s} \right]$$



A felület

ez anyagáramlás sebessége hátrésvól arányos a koncentráció gradiensevel



(iránymentli derivált)

$$J = -D \cdot \text{grad } C$$

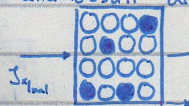
tehát az anyagáramlás egy A keresztmetszeti felületen adott idő alatt arányos

a koncentráció gradiensevel

$$\frac{dm}{dt} = -D \cdot A \cdot \frac{dC}{dx} \quad \text{Fick-1. törvénye}$$

D a diffúziós tényező

lábban állandósult diffúzió



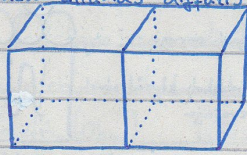
$$J_{x|bal} = J_{x|jobb}$$

Mivel  $J = -D \cdot \text{grad } C$ , akkor ha  $J_{x|bal} = J_{x|jobb}$ , akkor  $\left. \frac{dC}{dx} \right|_{bal} = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{jobb}$

vagyis a koncentráció-változás azonos az egész anyagban



Időben nem állandó diffúzió



Í az anyagban belül nem mérhető  
vélhető a lineáris koncentráció eloszlás

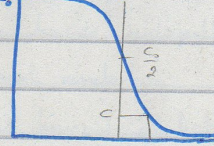
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} D \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$$

Ha  $\frac{\partial D}{\partial C} = 0$ , akkor  $\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$

egy dimenzióban  $\frac{dC}{dt} = D \cdot \frac{d^2C}{dx^2}$  Fick-II. törvénye

Fick-I. megoldása:

Végtelen féltér (ki nem merülő forrás)



$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} [1 - \Phi(\omega)]$$

$$\omega = \frac{x}{\sqrt{4Dt}}$$

Gauss-féle hibaintegrál

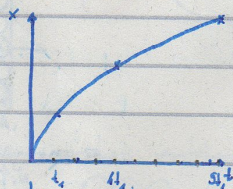
$$\Phi\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\gamma} e^{-y^2} dy, \quad \gamma^2 = \frac{x^2}{4Dt}$$

Alkalmazás: tudjuk, hogy a mintában  $x_1$  mélységben  $C$  lesz  
a koncentráció  $t_1$  idő alatt, állandó hőmérsékleten  
- mennyi idő alatt lesz ugyanekkor a koncentráció  
 $x_2$  mélységben, állandó hőmérsékleten:

$$C(x_1, t_1) = C(x_2, t_2)$$

$$\frac{C_0}{2} [1 - \Phi(\omega_1)] = \frac{C_0}{2} [1 - \Phi(\omega_2)]$$

$$\frac{x_1}{\sqrt{4D \cdot t_1}} = \frac{x_2}{\sqrt{4D \cdot t_2}} \Rightarrow \frac{x_1}{\sqrt{t_1}} = \frac{x_2}{\sqrt{t_2}}$$



vagyis a diffúzió négyzet gyökösén függ  $\omega$  értéktől

A diffúziós tényező hőmérséklet függése

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Alkalmazás: a mintában  $x_1$  mélységben  $C$  lesz a koncentráció

$t$  idő alatt adott  $T_1$  hőmérsékleten

- azonos idő alatt milyen hőmérsékleten jön létre  
ugyanekkor koncentráció  $x_2$  mélységben

$$C(x_1, t) = C(x_2, t)$$

$$\frac{C_0}{2} [1 - \Phi(\omega_1)] = \frac{C_0}{2} [1 - \Phi(\omega_2)]$$

$$\frac{x_1}{\sqrt{4D_1 \cdot t}} = \frac{x_2}{\sqrt{4D_2 \cdot t}} \Rightarrow \frac{x_1}{\sqrt{D_1}} = \frac{x_2}{\sqrt{D_2}} \Rightarrow \frac{x_1}{\sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT_1}}}} = \frac{x_2}{\sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT_2}}}}$$

$$\ln x_1 = \frac{Q}{2RT_1} - \ln x_2 = \frac{Q}{2RT_2}$$

$$\ln x_1 = \ln x_2 + \frac{Q}{2R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

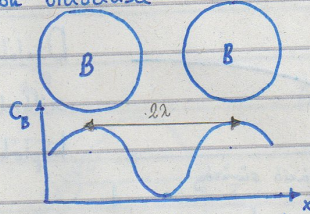
Extrém erős hőmérséklet függés



Vékonyréteg modell (kiterülő forrás)

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \quad M \text{ a felületi sűrűség}$$

Kiválások oldódása



$$C(x,t) = C_0 + C_m \cdot e^{-k^2 \cdot D \cdot t} \cdot \cos k \cdot x$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

A diffúziós állandót befolyásoló tényezők

D (hőmérséklet, ötvöző típusa, kristályhibák, nyomás, ...)

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

↳ Makrofelület > Szemcs/felület > Dialóció

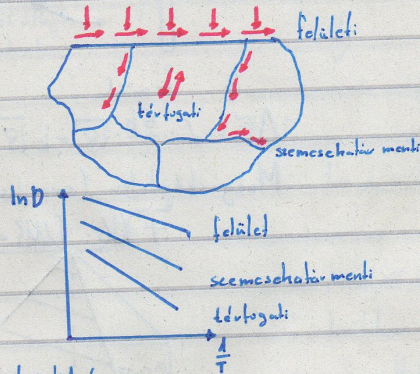
Polikristály > Egykristály

↑ sziget atom < substituációs ötvöző < intersticiós ötvöző

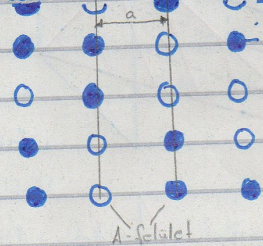
↑ Vahancia mechanizmus

↑ Intersticiós mechanizmus

Kristályhibák hatása



A diffúzió mechanizmusa a kristályban



$$m_1 = C_1 \cdot a \cdot A, \quad m_2 = C_2 \cdot a \cdot A$$

$$m_{1,2} = C_1 \cdot \frac{aA}{k \cdot z}, \quad m_{2,1} = C_2 \cdot \frac{aA}{k \cdot z}$$

z - atomok átlagos egyhelyben

tal. talakodásának ideje

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = m_{2,1} - m_{1,2} = C_1 \cdot \frac{aA}{k \cdot z} - \frac{aA}{k \cdot z} \cdot C_2 \left( C_1 \cdot \frac{dc}{dx} \cdot a \right)$$

$$J = -\frac{a^2}{k \cdot z} \cdot \frac{dc}{dx} = -D \cdot \frac{dc}{dx}, \quad \text{ha } A=1$$

$$\Gamma = \frac{1}{z} = \frac{1}{z_0} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad \text{-ugrási gyaloriság}$$

$$D = \frac{a^2}{k \cdot z} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Sejtárság (felület) növelési eljárások

Képlékeny alakítás

Szemcsméret csökkentés

Ötvözés: (intersticiós, substituációs, új fázis megjelenése)

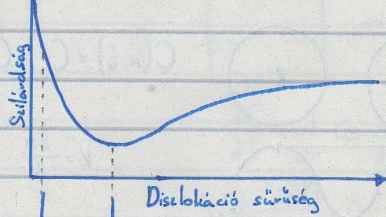
Hőkezelés: allotróp átalakulással rendelkező ötvözők, kiválások nemcsítes

Kompozit anyag (réteges, szelvéstésű, részecské erősítésű)



# Képlékeny (hideg) alakítás

mechanikai hatásra, alakításra megfelel az anyag (aluminium hengerveles)

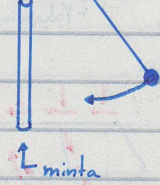


Diszlokáció sűrűség nő  $10^{10} - 10^{16} (10^{16}) \frac{1}{m^2}$   
 szilárdság, keménység nő  
 képlékenység, szívósság csökken

kb.  $10^6 \frac{1}{m^2}$  a diszlokáció sűrűség, minimális szilárdság, kilágyított anyag  
 kis diszlokáció sűrűség, szilárd, törékeny szerkezet (Si lapkák → CPU)

a diszlokációk fennakadásakor Frank-Read források keletkeznek, nő a szilárdság  
 diszlokációk keletkezése, egymást akadályozzák, helyhez kötők

## Képlékenység - szívósság vizsgálata



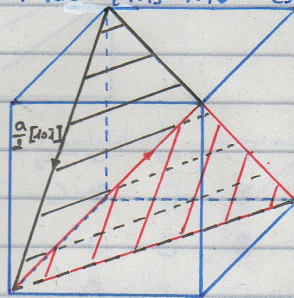
a töréshez szükséges energia alapján: ridegek - szívósak

↳ törékeny, nem képlékeny

$$\Delta G = \sigma \cdot \frac{Gb}{\lambda} \cdot \sqrt{\rho} = k \cdot \sqrt{\rho}$$

Mozgásképtelen (sessilis) diszlokációk (Lomer-Cottrell gát)

FKK: {111} - 110 > csúsztatói rendszerek

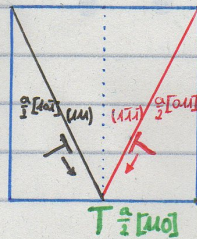


$$\begin{matrix} (111) & (\bar{1}\bar{1}\bar{1}) \\ \frac{a}{2}[101] & \frac{a}{2}[011] \end{matrix}$$

új diszlokáció burgers-vektora, meggyezik a régiéé összegével

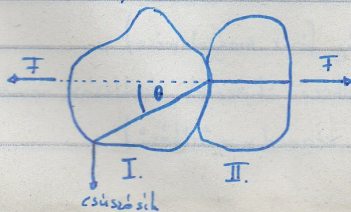
$$\frac{a}{2}[101] + \frac{a}{2}[011] \rightarrow \frac{a}{2}[110]_{001}$$

az új diszlokáció mozgásképtelen, mivel az (001) nem csúsztató sík az FKK rendszerben



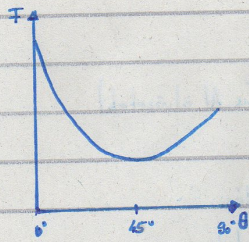
## Szemcseméret csökkentés

Szemcse-, kristallit-határok hatása

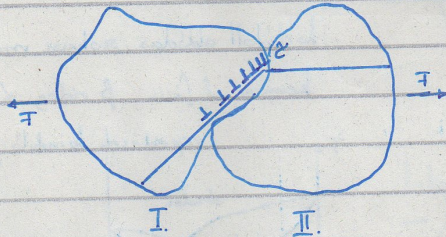


Az erő hatásvonalak és a diszlokáció sűrűsége által beárult szög ( $\theta$ ) befolyásolja az alakváltozáshoz szükséges erő nagyságát





45°-nál minimális a kátfeszítés nagysága



- Az erő hatására megindul a diszlokáció képződés az I. szemcsében, melyek feltörődnek a szemcsék határon

- A diszlokációk törődésének hatására belső feszültség lép fel (feszültségcsúcs), ez már elegendő energiával szolgál, hogy a II. szemcsében is meginduljon a képletköny alakváltozás

- Kis szemcsében kevesebb diszlokáció törődik fel, kisebb a  $\Sigma$  így nagyobb erő szükséges az alakváltozáshoz, nő a folyáshatár  $\sigma$

Hall-Petch egyenlet

$$\sigma_{\text{folyás}} = \sigma_{\text{anyag}} + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

↑  
szemcsék átlagos mérete



finomszemcsés anyagok

ultrafinomszemcsés anyagok

$$\hookrightarrow d \approx 1 \mu\text{m}$$

nanoszemcsés anyagok

$$\hookrightarrow d \ll 1 \mu\text{m}$$

kritikus szemcseméret

a Hall-Petch megfordul

Ötvözés:

Az intersticiós ötvözők szilárdság növelő hatása (nagyarányúval) erősebb mint a szubsztitúciós ötvözőké (N a Nb-ban, C a Fe-ban)

Oldódási keményedés

szilárd oldat

diszlokációk - oldott atomok kölcsönhatása

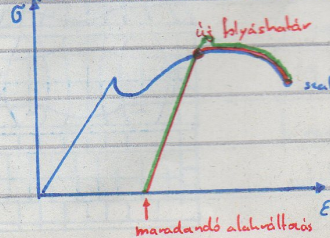
Cottrell-atmoszféra

a: szubsztitúciós atomok a diszlokáció

körül rendeződnek el

folyáshatár mindig magasabb, mint a tisztán fémé

kis ötvöző tartalom esetén  $\Delta\sigma = G \cdot \left(\frac{r_0 - r}{r_0}\right) \cdot c$



az anyag meghúzása után, új tulajdonságokkal rendelkezik, megváltozik a szilárdosítási görbe felér pihenési állapot után



Hőkezelés:

Allotrop átalakulás nélküli ötvözetek (Cu, Al ötvözetek)

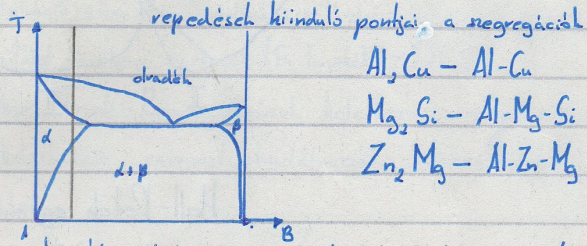
önálló 2. fázis megjelenése

kiválásos, diszperziós keményedés:

nemesíthető ötvözetek

korlátolt oldódás, szoluszé mentén

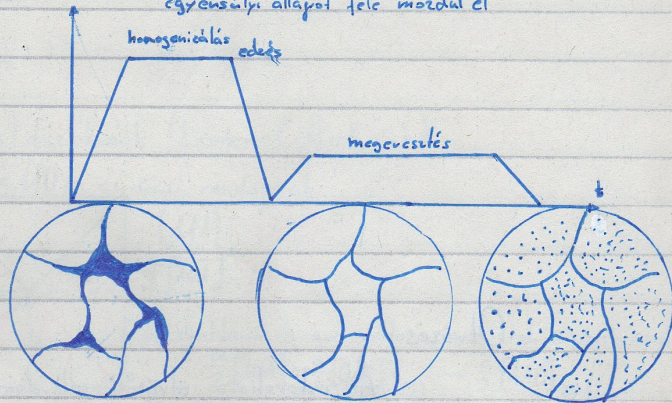
kemény 2. fázis,  $\beta$  rideg  $\alpha$ -hoz képest



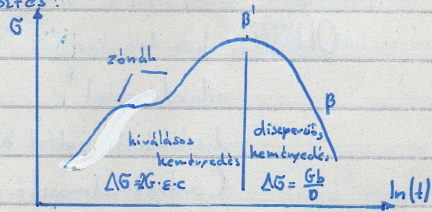
hevítés  $\rightarrow \beta$  beolvad  $\alpha$ -ba  $\rightarrow$  hirtelen hűtés: edzés (rideg)

hőn tartás (szoluszé alatt), B atomok energiát kapnak: megeresztés

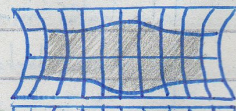
egyensúlyi állapot felé mozdul el



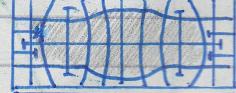
Megeresztés:



$\alpha +$  Guinier - Preston I. zóna



$\alpha +$  Guinier - Preston II. zóna  
koherens fázishatár



$\beta'$ : diszlokációk beáramlása  
szemi-koherens fázishatár  
 $G_{max}$

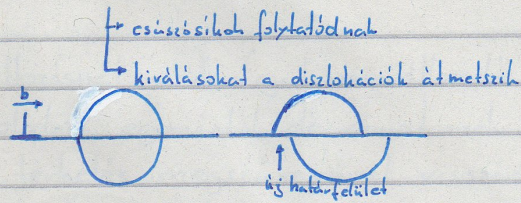


inkohérens fázishatár  
 $\alpha'$  (egyensúlyi) +  $\beta$  (inkohérens)



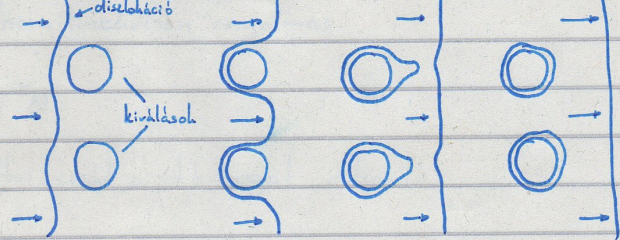
## Diszlokációk mozgása megeresztett ötvözetben

### Koherens fázishatár



a diszlokáció mozgása nehezebb, energiát kell használnia az új határfelület létrehozásához

### Inkoherens fázishatárok



diszperziós keményedés

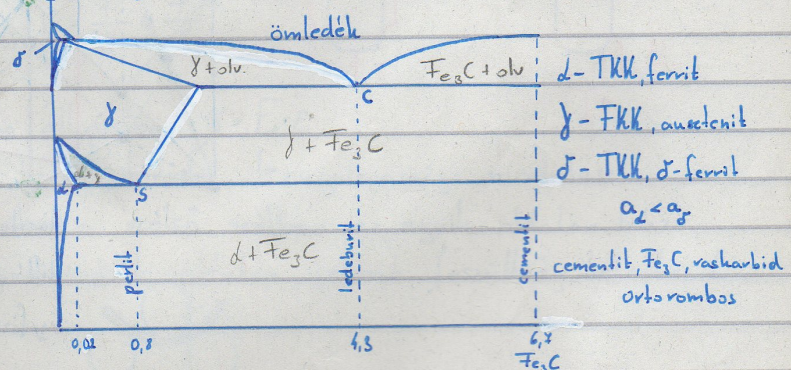
diszlokáció - kiválás kölcsönhatás (fennsík)

$$\text{Orowan-mechanizmus } \bar{\sigma} = \frac{G \cdot b}{d}$$

kiválások átmérője nő  $\Rightarrow$  a kiválások közötti távolság eszikken : túlóregítés

## Allotrop átalakulással rendelkező ötvözetek

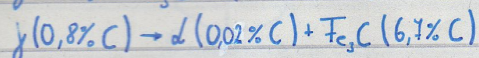
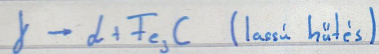
acélok nem egyensúlyi átalakulásai:  $\text{Fe-C}$ ,  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$



szövetelemek: perlit S: eutektoidos pont

ledeburit C: eutektikus pont

Perlites (eutektoidos) átalakulás:

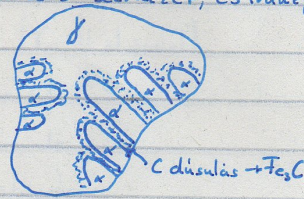


hipoeutektoidos koncentrációknál  $\delta$  szemcsék hiánya

eutektoidos koncentrációknál, eutektikus átalakulás

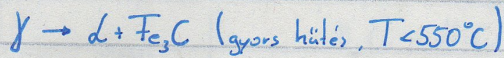


lemezkes szerkezet, csíráképződés, diffúzió



hűtési sebesség =  $\rho$  síromság  
korlátozottan, de alakítható

### Bainites átalakulás

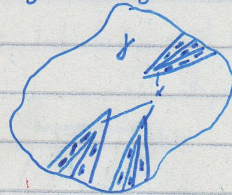


csíráképződés, diffúzió (korlátozott)

ausztenit határon indul ( $\alpha$  képződéssel)

$\alpha$  (<0,3%) (0,02% C az egyensúlyi)

Fe<sub>3</sub>C korongok, tűs szerkezet

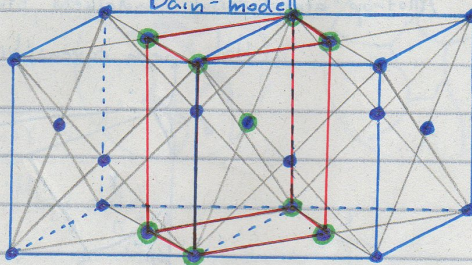


felső-alsó bainit  
hőmérséklet szerint

rosszul alakítható szövet

### Martenzites átalakulás

Bain-modell



hasonló a tetragonális-  
hoz, kis különbség  
FKK → TKT

Ausztenit: gyors hűtés ( $M_s \approx 220^\circ\text{C}$ )

diffúzió nélkül:

egyfázisú martenzites szerkezet (TKTetragonális),

C tartalom ugyanannyi, mint az ausztenit,

amiből keletkezett

kb. 4% fajtérfogat növekedés  $\Rightarrow$  feszültség



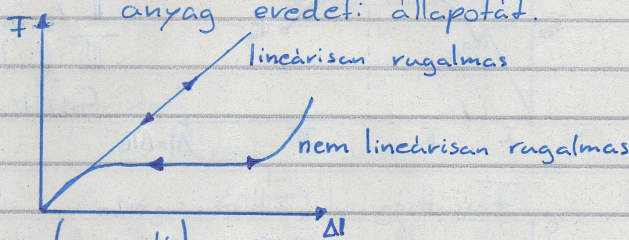
# Vendég előadás

## Mechanikai tulajdonságok

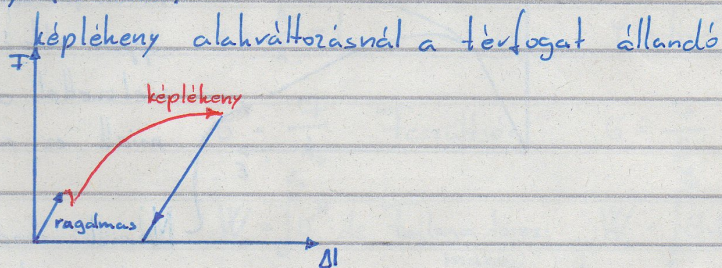
### Alakváltozás:

#### Rugalmas (reverzibilis)

rugalmas alakváltozásnál a térfogat nem állandó az atomok eltávolodnak egymástól, de az atomok közötti vonzás a terhelés megszűnésével visszaállítja az anyag eredeti állapotát.



#### Képlékeny: (maradó)

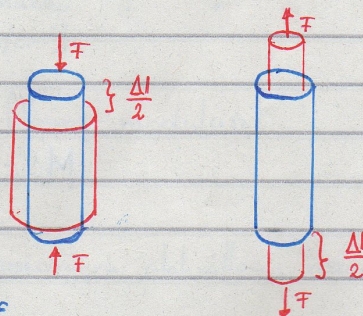


### Igényberéte

Húzó, nyomó és hajlító

Alakváltozás:  $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$

Feszültség:  $\sigma = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$



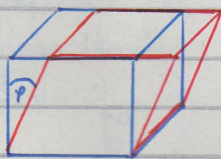
Rugalmas állapotban:  $\sigma = E \cdot \epsilon$

Hooke-törvény  $\hookrightarrow$  rugalmassági modulusz

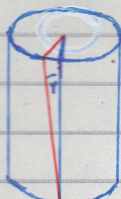
Hajlításkor a szélső szélben az egyik oldalon húzó, míg a másik oldalon nyomó feszültség keletkezik



### Nyíró:



Egyszerű nyírás



Csavarás

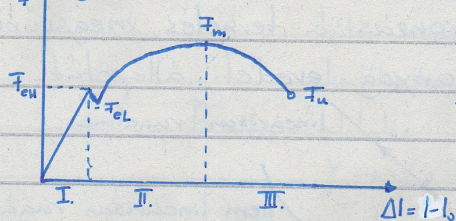
$\gamma = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$



$$\alpha = \frac{M}{I_p} \cdot r, \text{ poláris másodrendű nyomaték}$$

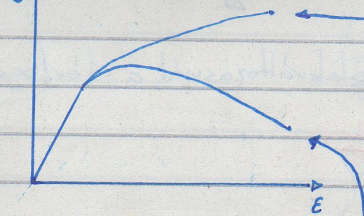
Rugalmas állapotban:  $\alpha = G \cdot \varphi$

Szakítóvizsgálat



- I. Rugalmas alakváltozás
  - II. Egyenletes képlékeny alakváltozás
  - III. Kontrakció (keresztmetszet csökkenés)
- Szakítási diagram

Feszültség-alakváltozás görbe



Valódi feszültség- valódi nyúlás esetén az éppen aktuális erőt az aktuális keresztmetszettel osztjuk. A felhemenyedés miatt ez a görbe szig. mon. nő.

Mérnöki rendszerben a feszültség számításakor a kiinduló keresztmetszetet vesszük alapul, ezért az alakváltozás növekedésével csökken a feszültség.

Mérszámok

Folyáshatár:

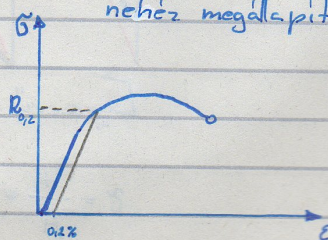
$$R_e = \frac{F_e}{A_0} = \sigma_e$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{A_0}, \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{A_0}$$

$$R_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}$$

egyzményes folyáshatár, a 0,2%-os maradvány megnyúláshoz tartozó feszültség

olyan esetben, ahol a folyáshatárt nehéz megállapítani (pl.: Al)





Szakítószilárdság

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

Kontrakció

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100$$

$A_u$  = végső keresztmetszet

Szakadási nyúlás

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100$$

Mennyiségek

Mérnöki rendszer

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Valódi rendszer

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$$

Alakváltozás

$$\varepsilon = \frac{A_0}{A} - 1$$

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

$$\sigma^M = \frac{F}{A_0} \quad \text{Feszültség}$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$W_c = \int_{\varepsilon_u}^{\varepsilon} \sigma^M \cdot d\varepsilon \quad \text{Fajlagos törési munka} \\ [J/cm^3]$$

$$W_c = \int_0^{\varphi_u} \sigma \cdot d\varphi$$

Lineáris rugalmas tulajdonságok

Rugalmasági modulusz:  $E$  (Young-modulusz)

Hooke-törvény:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Poisson-tényező:  $\nu$

a keresztirányú és a hosszirányú alakváltozás viszonya

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon}, \text{ ahol } \varepsilon_r \text{ - radiális alakváltozás}$$

fémek:  $\nu \sim 0,33$

kerámiák:  $\nu \sim 0,25$

polimerok:  $\nu \sim 0,4$

Csúszató rugalmassági modulusz:  $G$

Hooke-törvény:  $\tau = G \cdot \gamma$

Térfogati rugalmassági modulusz:  $K$

$$p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V_0}, \text{ ahol } p \text{ a nyomás}$$

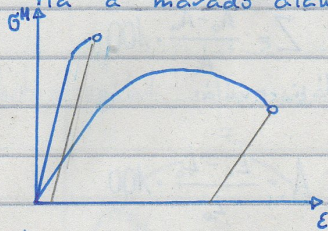
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$



## Képlékeny / rideg viselkedés

Ha a maradó alakváltozás közel nulla, akkor rideg

Ha a maradó alakváltozás jelentős, akkor képlékeny



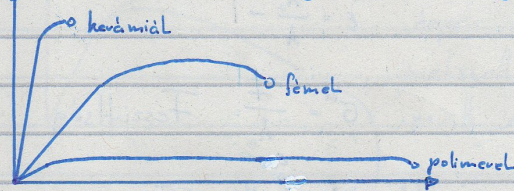
## Szívósság

Az anyag törésig tartó energiabevétel képessége

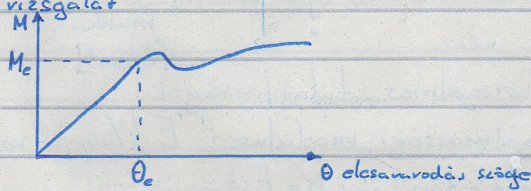
Kerámiák: kis szívósság (nagy szilárdság, rideg viselkedés)

Fémek: nagy szívósság (közepes szilárdság, képlékeny viselkedés)

Polimerek: kis szívósság (kis szilárdság, képlékeny viselkedés)



## Csavaró vizsgálat



$$\text{Csavarófolyáshatár } R_e = \frac{2\sqrt{3} M_e}{\pi \cdot r^3 \max}$$

## Keményységmérés:

A (statikus) keménység fogalma: a vizsgált anyag ellenállása az adott geometriájú súrószerkezű behatolásával szemben.

A keménység: adatokból becsülhetők a szilárdsági és technológiai tulajdonságok.

A keménységmérés kivitelzése:

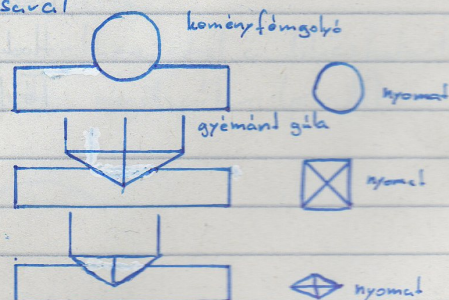
Alakváltozás létrehozásával

Fizikai hatások alkalmazásával

Brinell-féle keménységmérés

Vickers-féle keménységmérés

Knoop-féle keménységmérés





## Dinamikus keménységmérés eljárás

gyors lökészerű erőhatással végzett mérés  
kivitelezés.

sűrűségszámmal lenyomatot mérve: Poldi-kalapács  
rugalmas visszapatánást mérve: Szkleroszkóp, Duroszkóp

Dinamikus igénybevétel ~~eljárás~~  
sűrűs és rideg törethelyet

## Az anyagok mágneses tulajdonságai

Mágneses tér, anyag kölcsönhatás leírása

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \rightarrow \text{térerő vektor}$$

$\mu$  az anyag mágneses teret befolyásoló tényezője, permeabilitás  
 $\vec{B}$  mágneses indukció vektor

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \kappa)$$

$\mu_r$  relatív permeabilitás  $\mu_r = 1 + \kappa$   
 $\vec{M} = \kappa \cdot \vec{H}$  mágnesesség  
 $\kappa$  mágneses szuszceptibilitás  
vákuum permeabilitás  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

## Mágneses tulajdonságok eredete

Egyedi elemi részecskék mágneses tulajdonságai

Szabad atomok mágneses tulajdonsága:

saját (spin) mágneses momentum, pályamomentum  
betöltött alhéjak spin momentuma zérus

csak a betöltetlen alhéjak spinmomentumait  
kell számításba venni

## Mágneses anyagok csoportosítása

Dia (lezárt elektronhéj)  $\kappa < 0 \approx 10^{-5}$ ,  $\mu_r < 1 \approx 1$

Si, Cu, Zn, Ag, Cd, Au ...



Meissner effektus  $\kappa = -1$ , Hg

Para (legalább egy párosítatlan elektron)  $\kappa > 0$  ( $10^{-5} - 10^{-3}$ )

Mg, Al, Ti, W, O ...

Anti  $\kappa = 0$