

# Struktur og defekter



## Struktur

Krystallinske og amorne stoffer

Enhetscellen

Kulepakking og hulrom

Plan og retninger

Strukturbestemmelse

## Defekter

Punktdefekter

Transport

Fasediagram

Dislokasjoner

Korngrenser

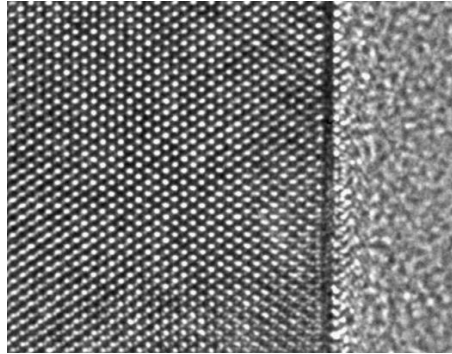
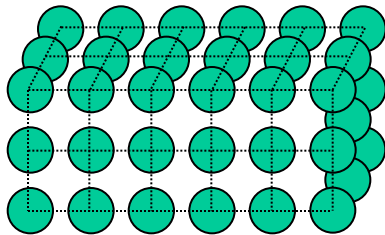
Overflater

Truls Norby/Anette Gunnæs

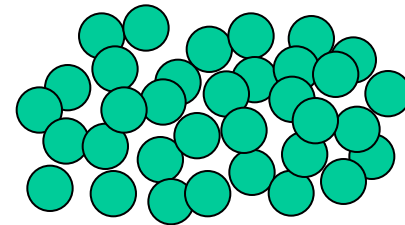
Universitetet i Oslo  
FERMiO, Forskningsparken  
Gaustadalleen 21  
0349 Oslo

# Krystallinske – amorfe materialer

Ordnet struktur



Uordnet struktur



Eksempler:

Ioniske-materialer/ Keramer  
Halvledere  
Metaller  
osv.

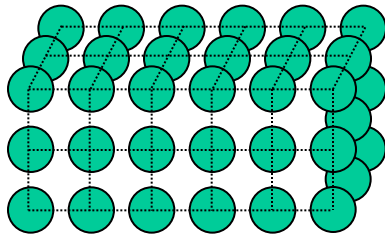
Eksempler:

Glass  
Plast  
Papir  
Tre  
osv.

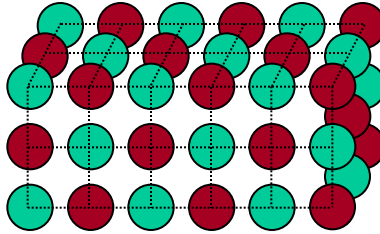
**Krystaller har en periodisk indre struktur**

# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

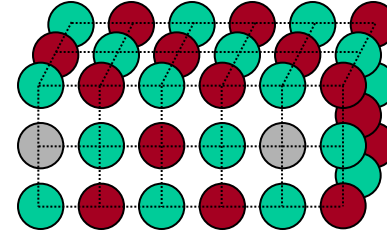
1



2



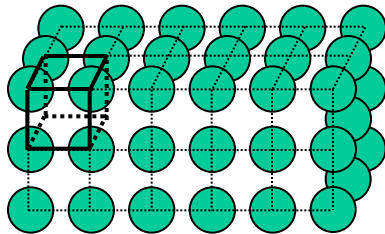
3



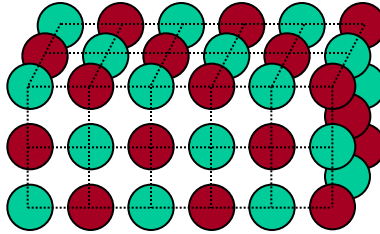
Hva er enhetscellen i eksemplene over?

# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

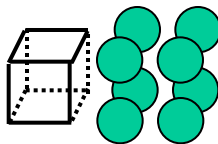
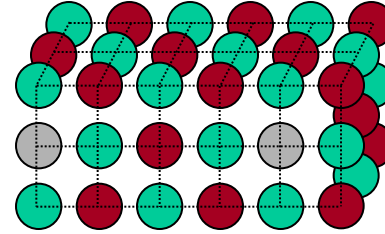
1



2

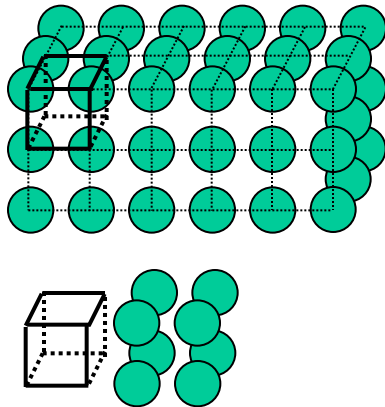


3

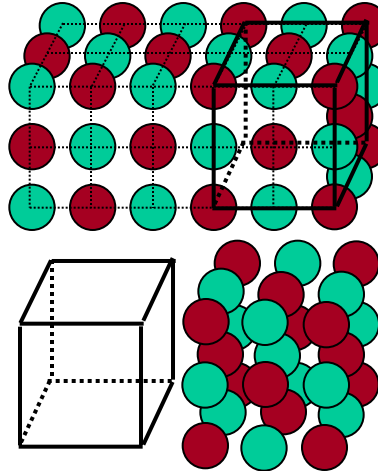


# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

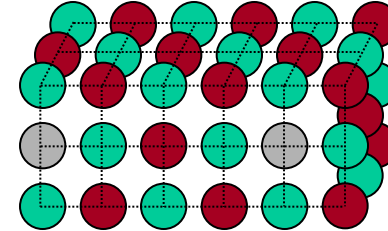
1



2

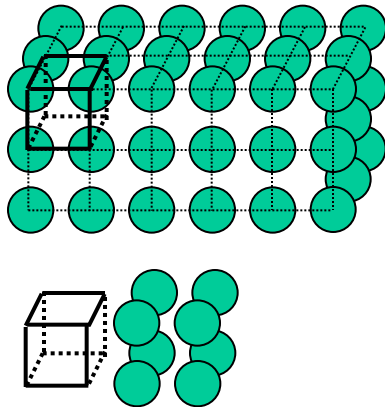


3

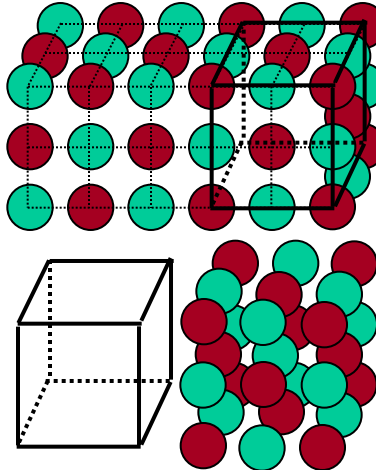


# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

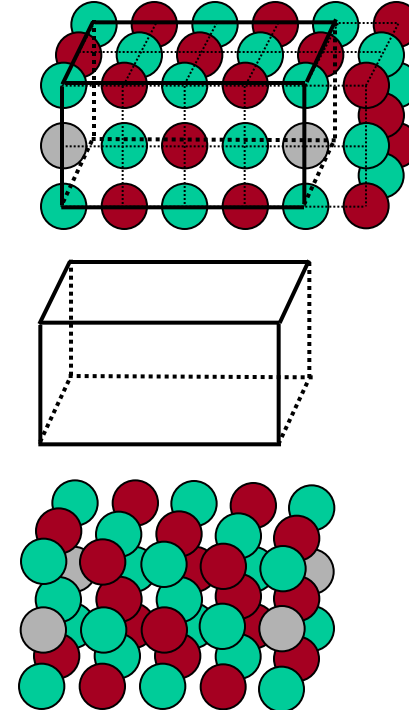
1



2

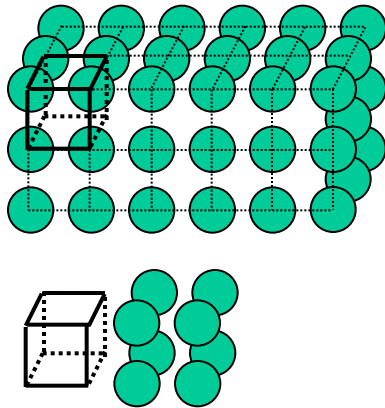


3

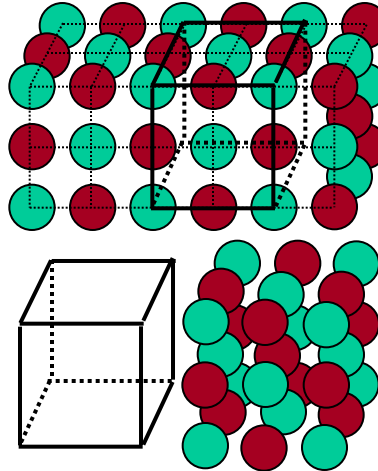


# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

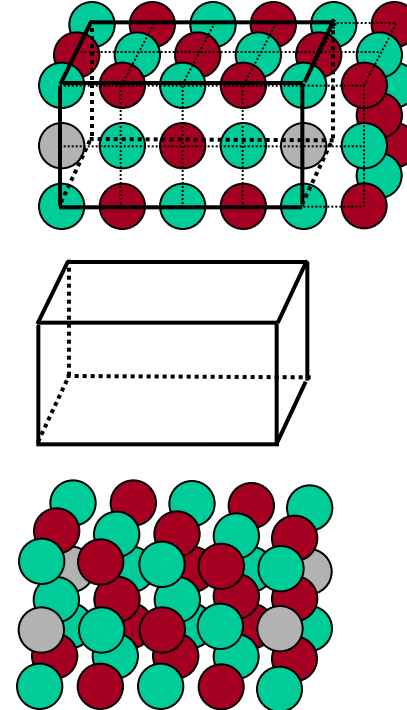
1



2



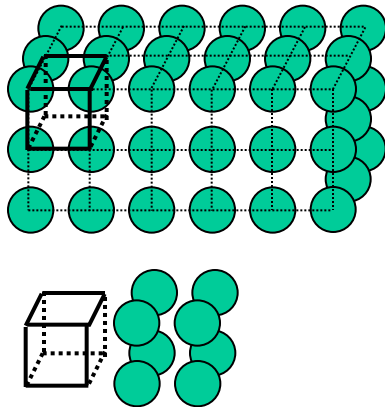
3



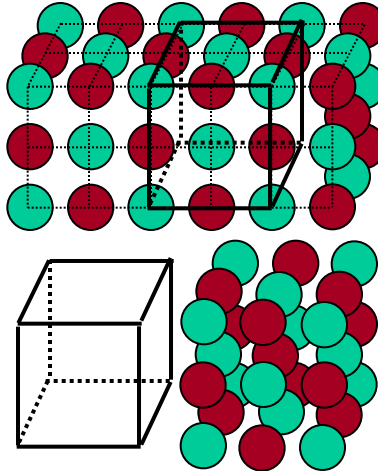
Valgfritt origo

# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

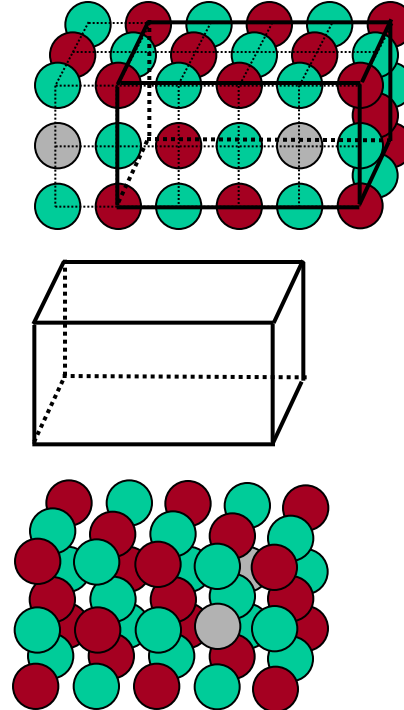
1



2



3

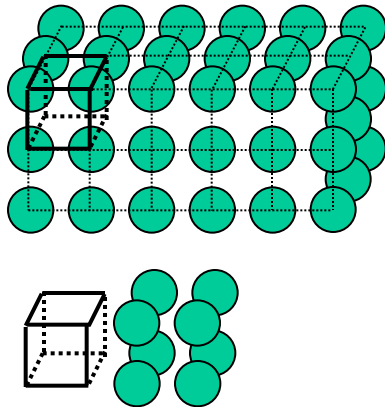


Valgfritt origo

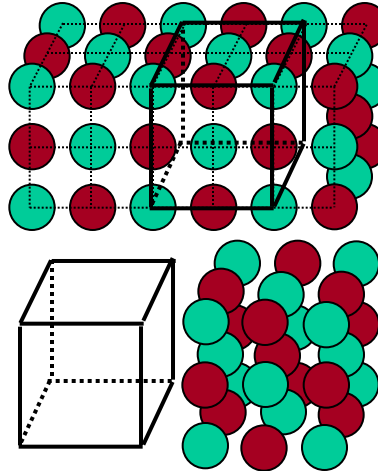


# Enhetscellen: Den minste repetisjonsenheten

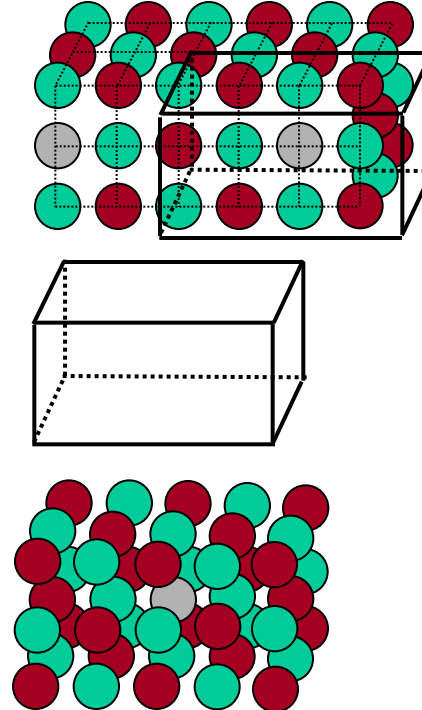
1



2

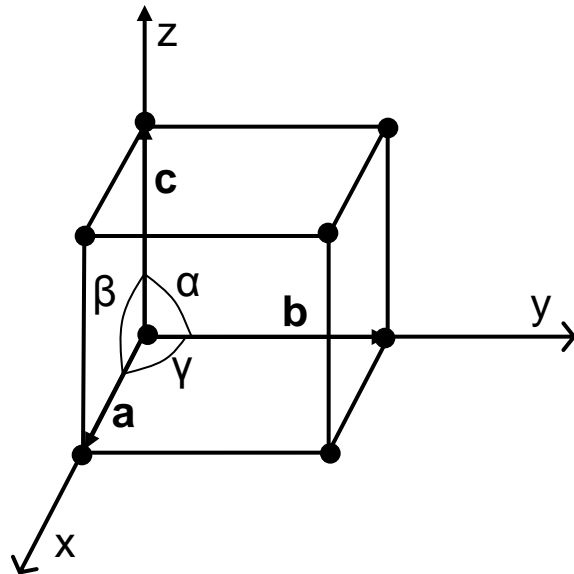


3



Valgfritt origo

# Enhetscellen

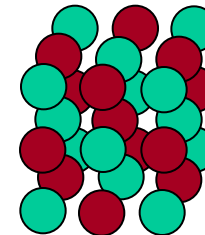
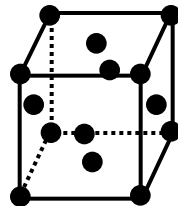
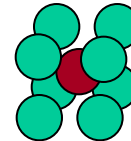
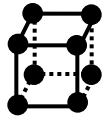
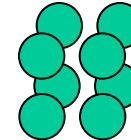
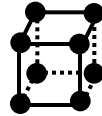


- Definert ved tre ikke planære vektorer:  
**a, b og c**
- Hele krystallgitteret kan genereres ved translasjon langs disse vektorene.
- Enhetscellen kan også beskrives av lengden til vektorene **a, b og c** samt vinklene mellom dem alfa, beta, gamma.
- Et gitterpunkt erstatter ett eller flere atomer
- Gruppe: atomer assosiert med et gitterpunkt

gitter

gruppe

enhetscelle



Atomer som sitter på hjørner, sideflater og kanter deles med andre tilstøtende enhetsceller

# Klassifisering av krystallstrukturer

7 aksesystem (koordinatsystemer)

14 bravais-gittere

-translatorisk periodisitet

7 krystallsystem

-basert på symmetri

32 punktgrupper

- basert på symmetri om et punkt

230 romgrupper

-basert på symmetri +translasjon

Hermann og Mauguin symboler:

- P (primitiv),
- F (flatesentrert),
- I (romsentrert),
- A, B, C (sidesentrert)
- R (rombohedral)

CUBIC  
 $a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



simple



body-centered



face-centered

TETRAGONAL  
 $a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



simple



body-centered

ORTHORHOMBIC  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



simple



body-centered



end-centered



face-centered

RHOMBOHEDRAL  
 $a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ < 120^\circ$



HEXAGONAL  
 $a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = 90^\circ$   
 $\gamma = 120^\circ$



MONOCLINIC  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$



simple



end-centered

TRICLINIC  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma$



# Posisjoner, retninger og plan

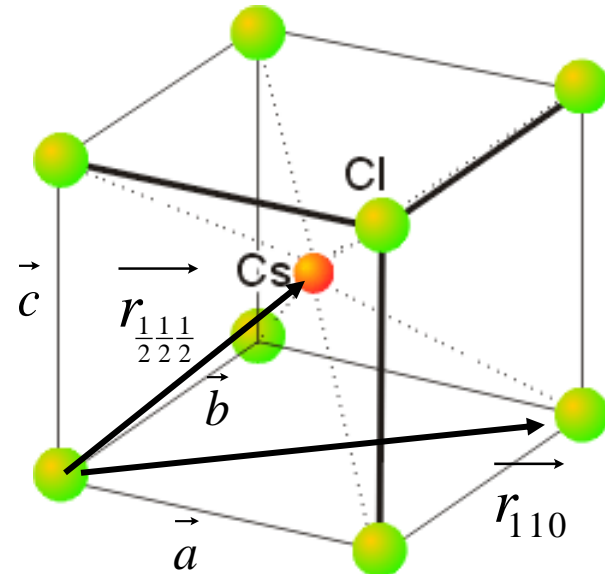
- Posisjonsvektor:

[uvw], eks [110], [ $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ]

$$\vec{r}_{uvw} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$$

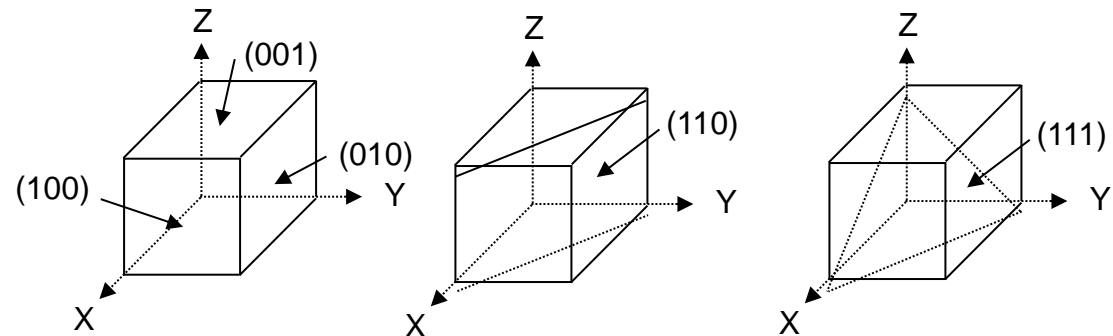
- Retninger:

- [uvw] en bestemt retning
- $\langle uvw \rangle$  alle ekvivalente retninger



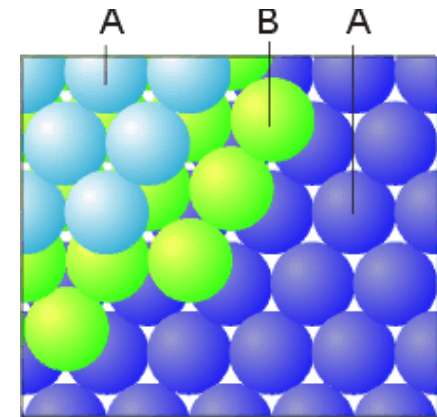
- Plan:

- Defineres ved deres normalvektor i det resiproke rom
- (hkl) et enkelt sett med plan
- {hkl} alle ekvivalente plan

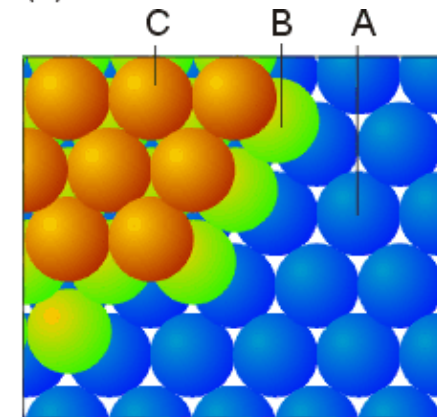


# Atomer betraktet som kuler

- I struktursammenheng kan metallatomer og ioner ofte betraktes som kuler
- Lavest gitterenergi ofte ved tetteste pakking av atomene/kulene
  - Metaller: Deling av elektroner
  - Ioniske stoffer: Elektrostatisk tiltrekning
- To måter å få tettest pakking av kuler med lik radius:
  - ABABABABA.... (figur a)
  - ABCABCAB..... (figur b)



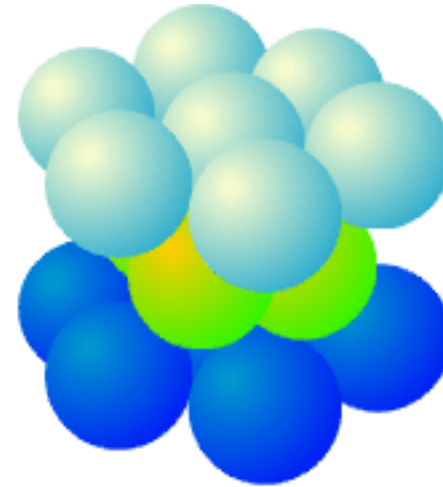
(a)



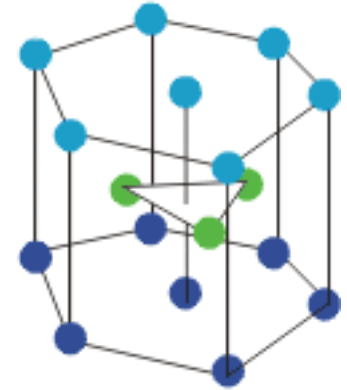
(b)

# Tetteste kulepakking

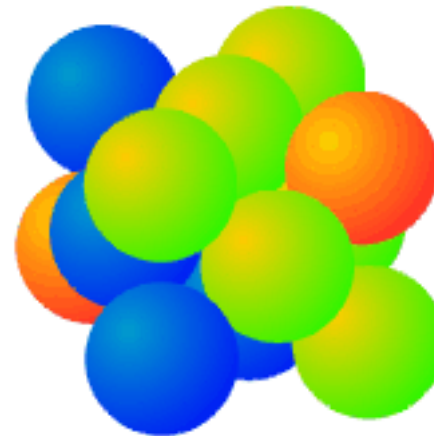
- ABABAB
  - heksagonal tettpakket
  - hexagonal close-packed (*hcp*)



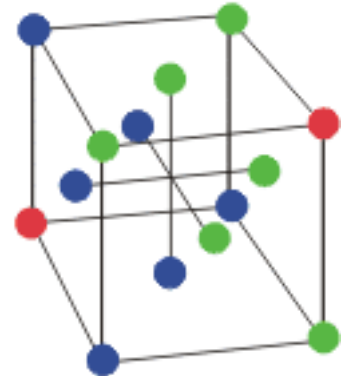
(a)



- ABCABC
  - heksagonalt utgangspunkt
  - men hvis den dreies 45° får vi:
  - flatesentrert kubisk struktur
  - face centered cubic (*fcc*)



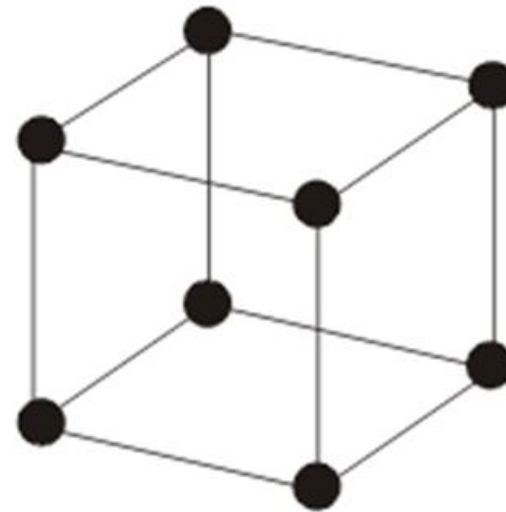
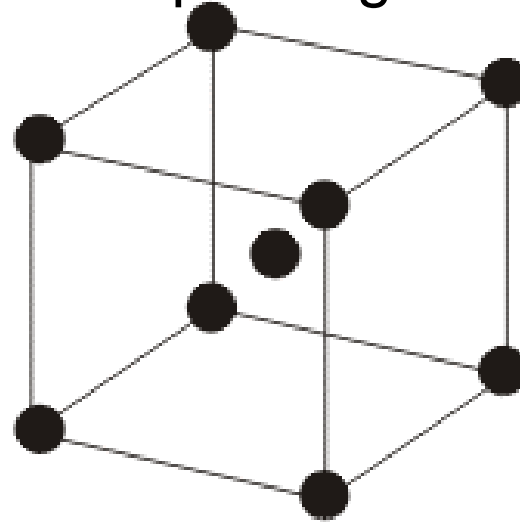
(b)



- Både hcp og fcc representerer tetteste mulige pakking av kuler

## Andre, mindre tette kulepakninger

- Romsentrert kubisk
  - Body centered cubic (bcc)
- Enkel (simpel) kubisk
  - Simple cubic (sc)
- Lavere tetthet
- Typisk for høyere temperaturer

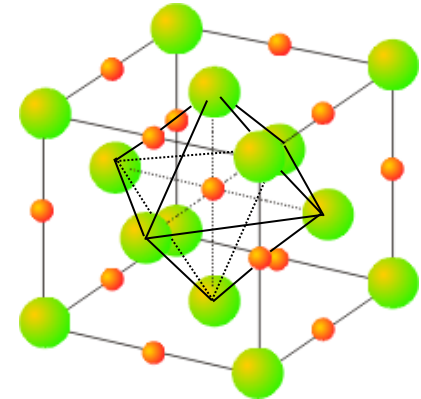
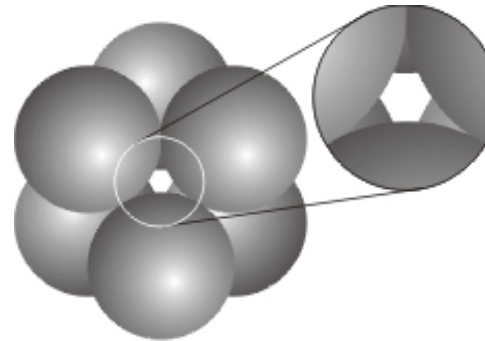




# Hulrom i tetteste kulepakninger

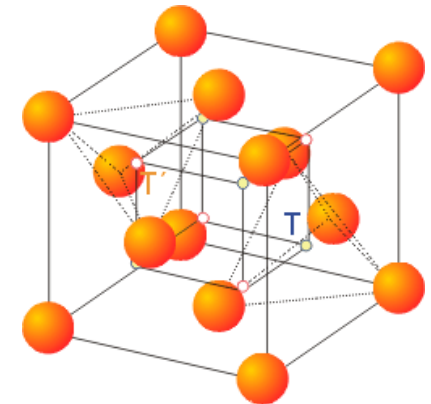
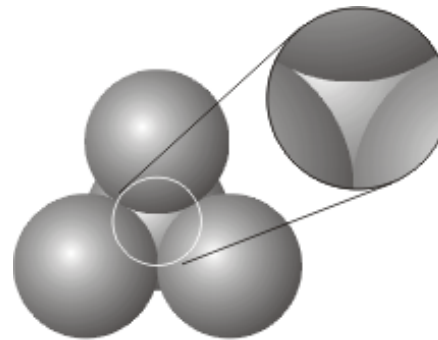
- **Oktaederhull**

- Relativt store
- 4 pr. enhetscelle
  - 1 pr. atom i enhetscellen



- **Tetraederhull**

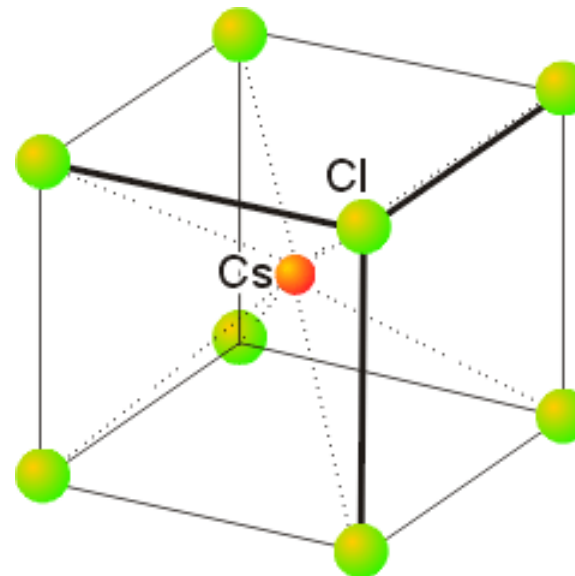
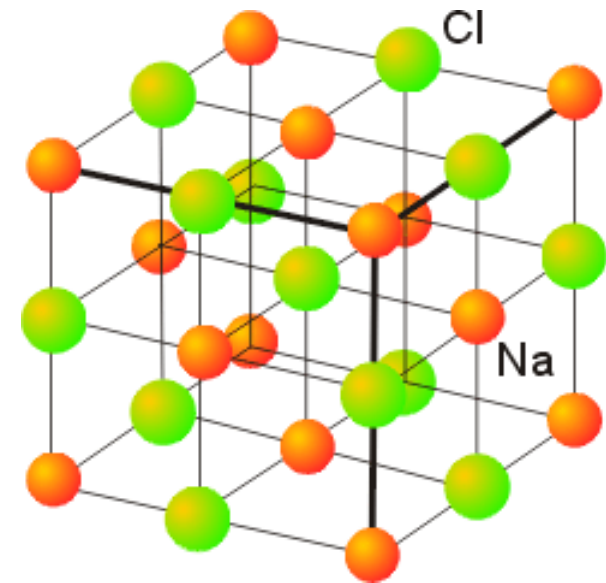
- relativt små
- 8 pr. enhetscelle
  - 2 per atom i enhetscellen



# Strukturer for ioniske stoffer

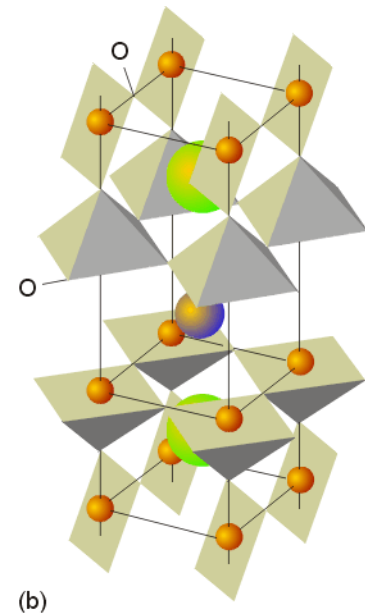
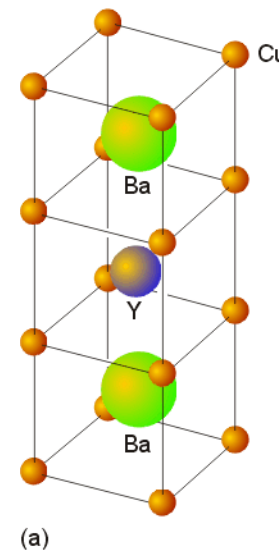
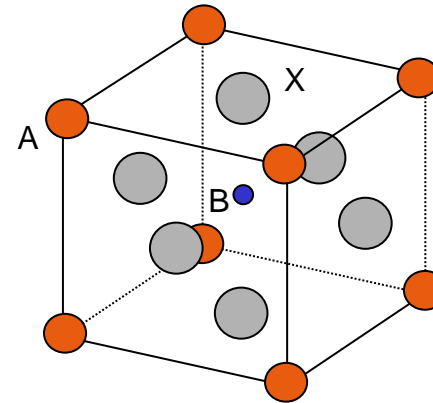
To eksempler:

- NaCl-strukturen
  - tettpakket (fcc)
  - 6-koordinasjon
  
- CsCl-strukturen
  - Mindre tettpakket
  - 8-koordinasjon



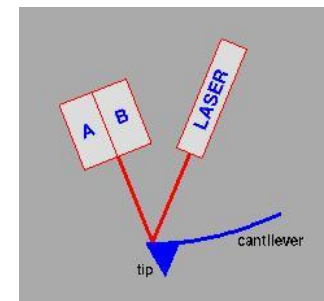
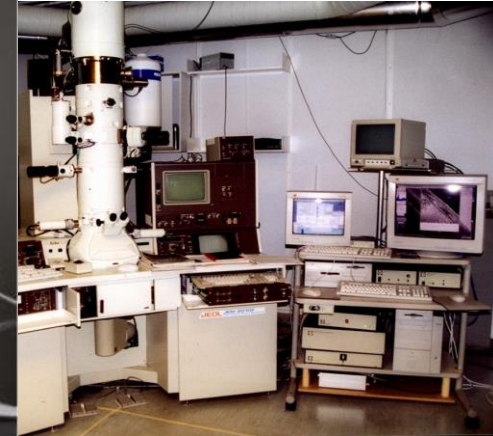
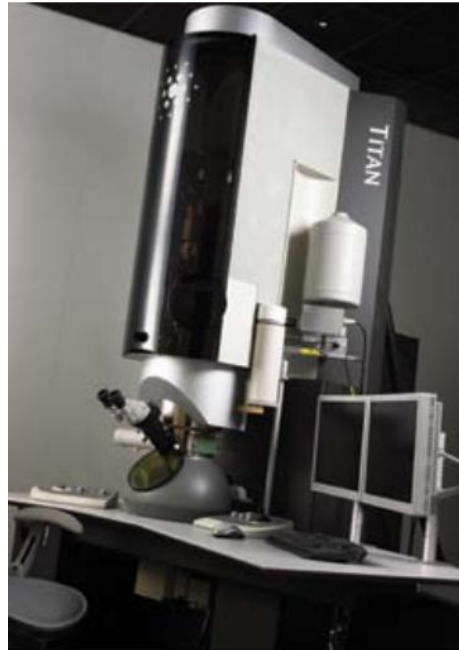
# Perovskittstrukturen; $ABX_3$

- Tettpakking av  $AX_3$
- B i oktaederhull i X-gitteret
- Ionisk binding av A mot X
- Mer kovalent binding av B mot X
- Svært tolerant
  - $CaTiO_3$  (perovskitt)
  - $SrFeO_{2.5}$
  - $La_{0.67}TiO_3$  eller  $La_{2/3}TiO_3$
  - $WO_3$
  - $Y_{1/3}Ba_{2/3}CuO_{3-x}$
  - $YBa_2Cu_3O_{9-y}$
  - $YBa_2Cu_3O_7$
- Rik variasjon i egenskaper



# Bestemmelse av atomstrukturer: Mikroskopi

- Avbildning av atomstrukturen
  - Transmisjonselektronmikroskopi
    - $\lambda=0,00251$  nm ved 200 kV akselerasjon
    - Høyoppløsningsavbildning
    - Scanning-TEM
  - Sveipprobemikroskopi (SPM)
    - Spiss (med et eller flere atomer)
    - sveipes over overflaten.
    - Scanning tunneling microscopy (STM)
    - Atomic force microscopy (AFM)



<http://spm.phy.bris.ac.uk/techniques/AFM/>

# Bestemmelse av strukturer: Mikroskopi

Al

$\text{LaNbO}_4$

(forsidebildet i MENA1001-kompendiet 2011)

A

Grafen

500 nm

C

B

250 nm

1 nm

5 nm

Si

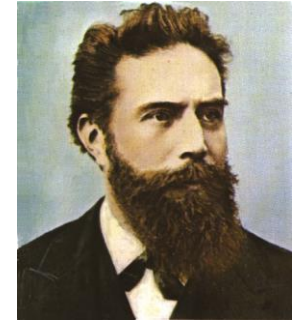
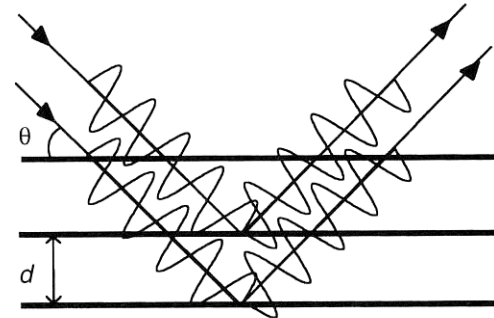
# Bestemmelse av struktur: diffraksjon

**Braggs lov:**  $n\lambda = 2d \sin\theta$

Konstruktiv interferens

**Røntgendiffraksjon (XRD)**

Liten spredning fra lette atomer (eks. O)



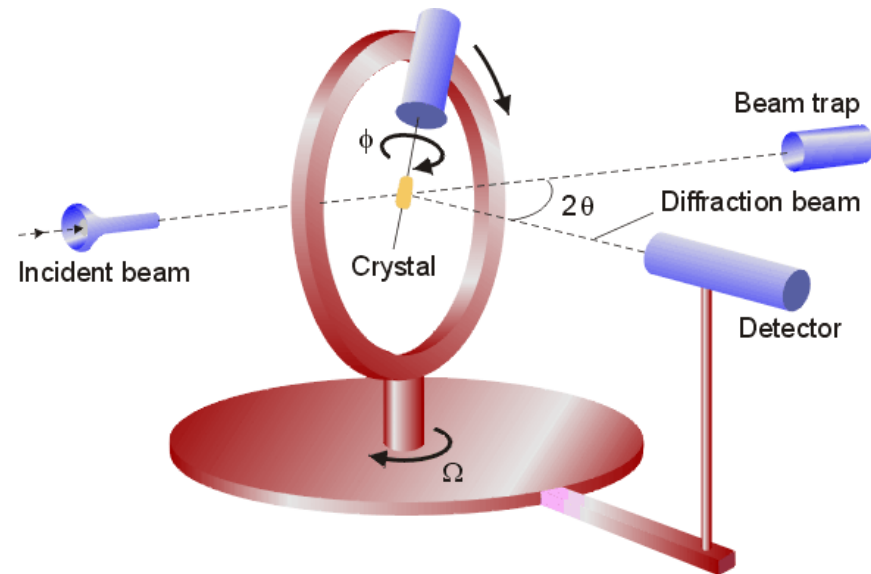
Röntgen

**Nøytrondiffraksjon (ND)**

God spredning fra lette atomer

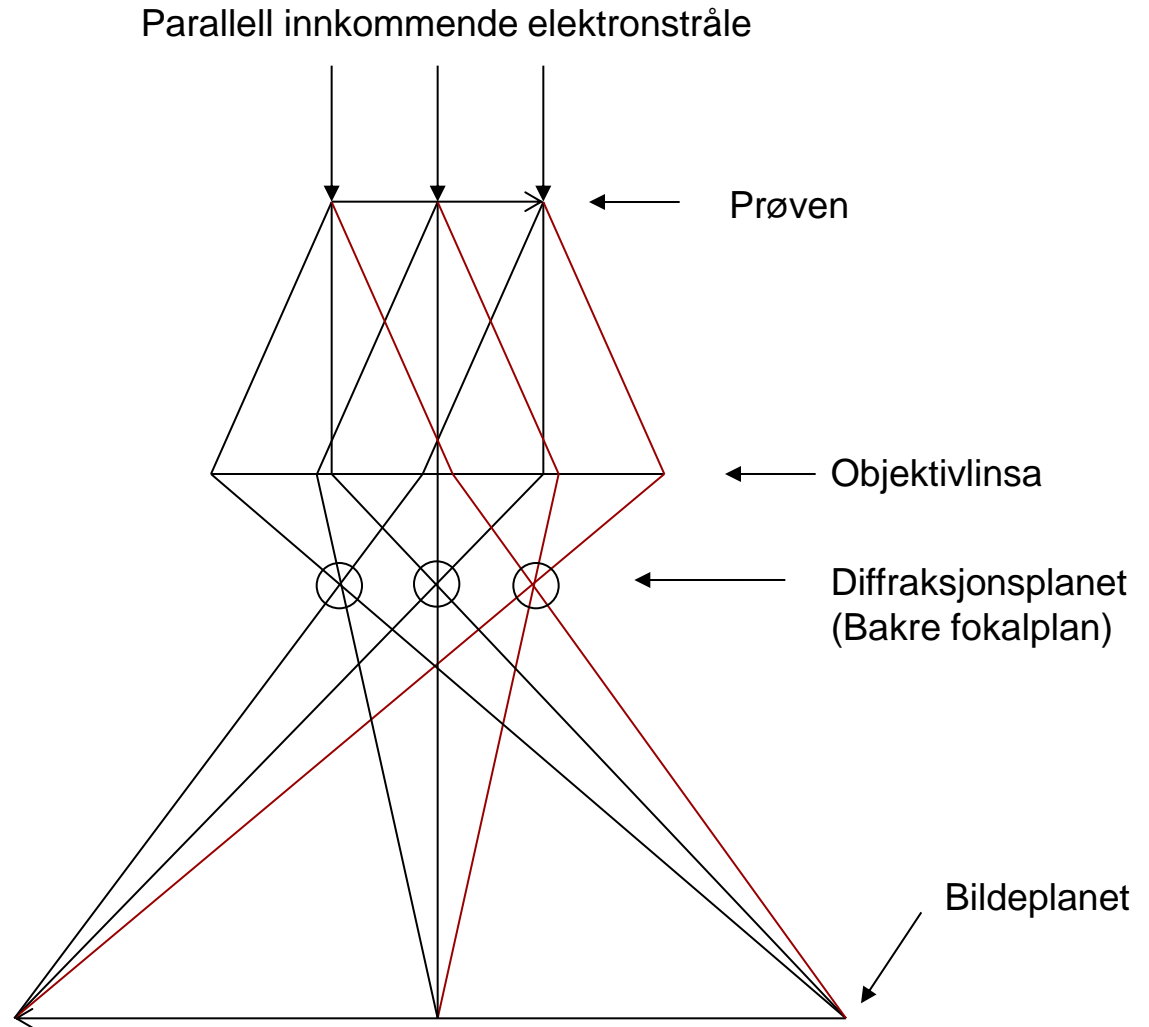
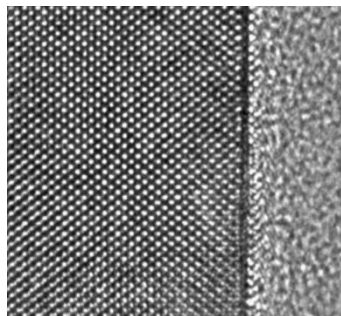
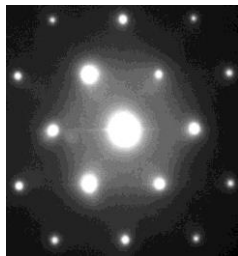
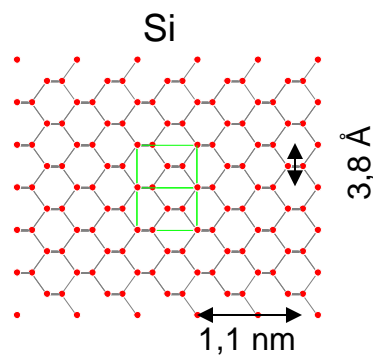
**Elektrondiffraksjon (ED)**

100-1000 ganger sterkere interaksjon enn XRD. Spredning fra både lette og tyngre atomer.



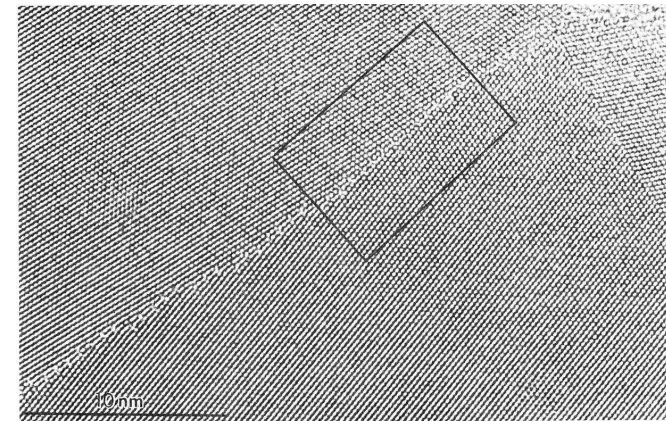
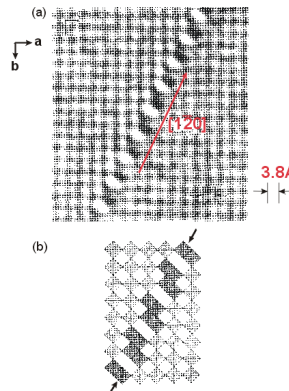
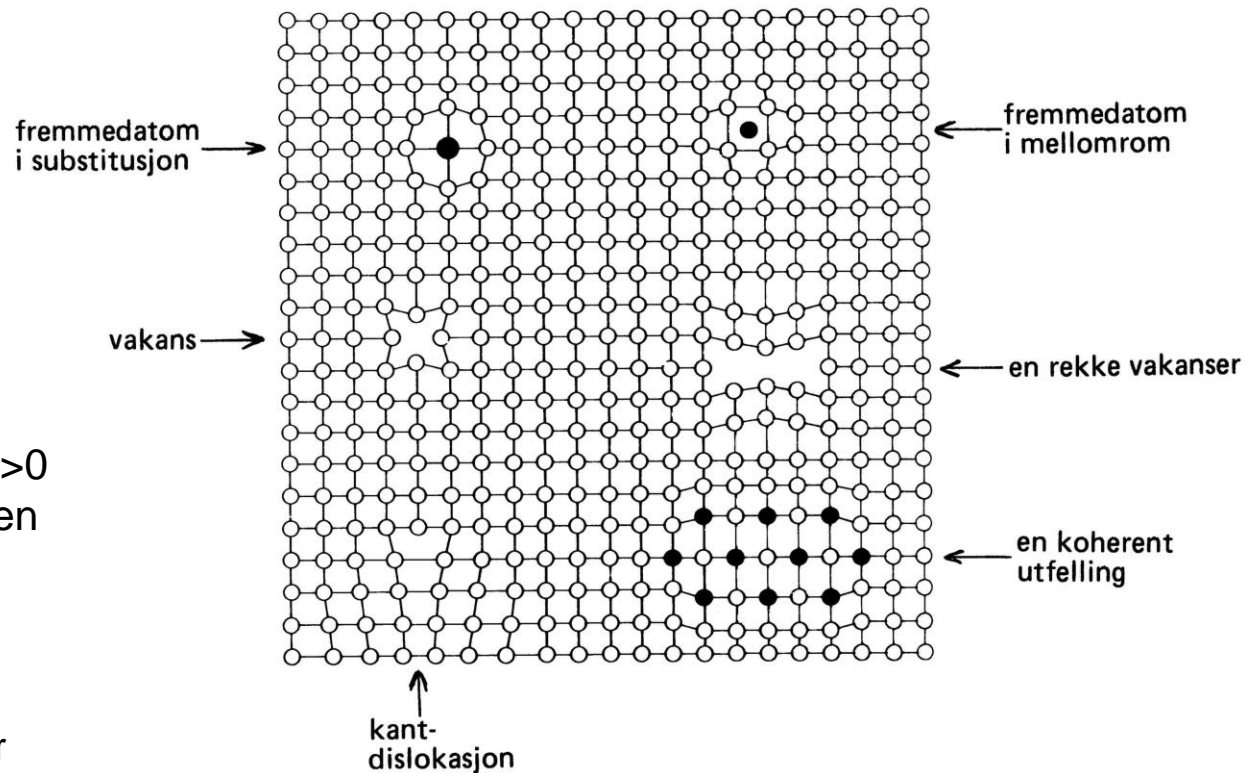
Figurer: M.A. White: properties of Materials, Shriver and Atkins: Inorganic Chemistry

# Diffraksjon og avbildning i TEM



# Defekter

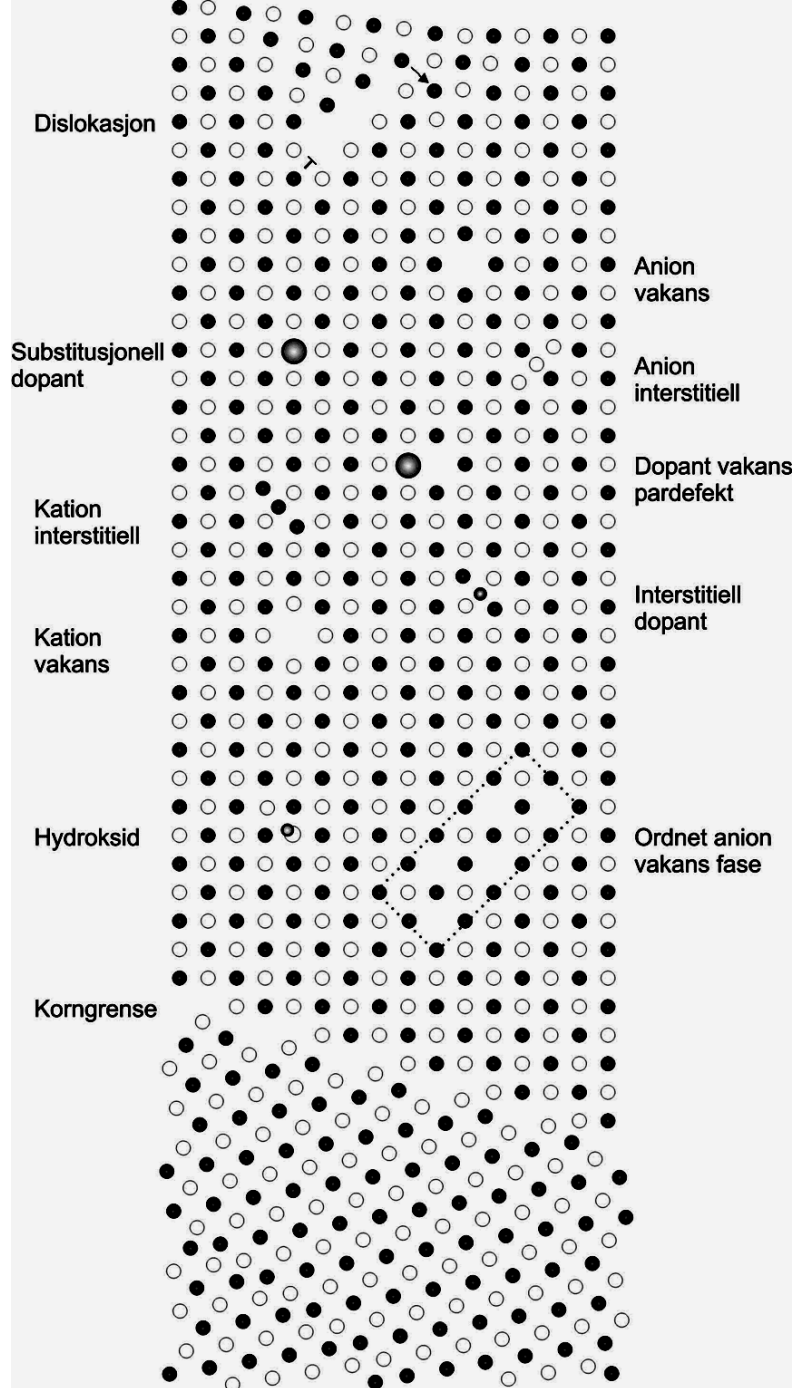
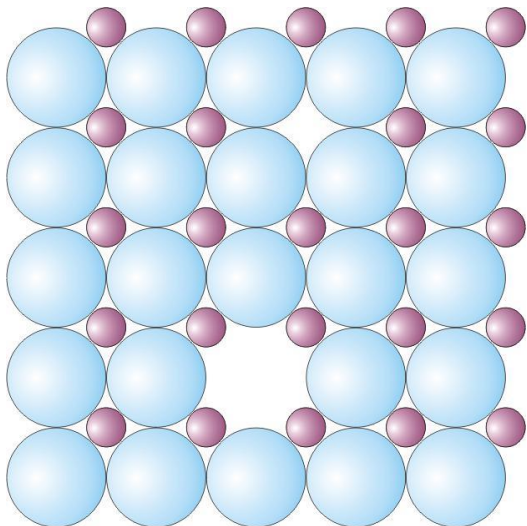
- Viktige for egenskaper
  - Diffusjon
  - Ledningsevne
  - Optiske egenskaper
    - etc.
- Ønskede eller uønskede
- Termodynamisk stabile ved  $T > 0$  K fordi de representerer uorden (entropi)
- Nulldimensjonale
  - Punktdefekter, Klasedefekter
- Éndimensjonale
  - Dislokasjoner, defektlinjer
- Todimensjonale
  - Defektplan, korngrenser
- Tredimensjonale
  - Utfellinger





# Defekter i et ionisk materiale; ladede defekter

- Defekter på kation- og aniongitter
- Elektriske ladninger på defektene
- Eksempel: Kation- og anionvakans i MX (NaCl, MgO, etc.):

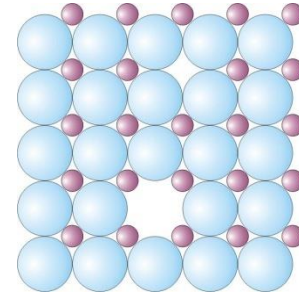


# Null-dimensjonale defekter; notasjon

- Punktdefekter
  - Vakanser
  - Interstitielle
  - Substitusjon
  
- Elektroniske defekter
  - Delokaliserte
    - elektroner
    - hull
  - Valensdefekter
    - Fangede elektroner/hull
  
- Klasedefekter
  - Assosierte punktdefekter

- Kröger-Vink-notasjon

$$A_s^c$$



A = kjemisk species  
eller v (vakans)

s = gitterplass  
eller i (interstitiell)

c = Ladning

Effektiv ladning = Reell ladning  
minus ladning i perfekt gitter

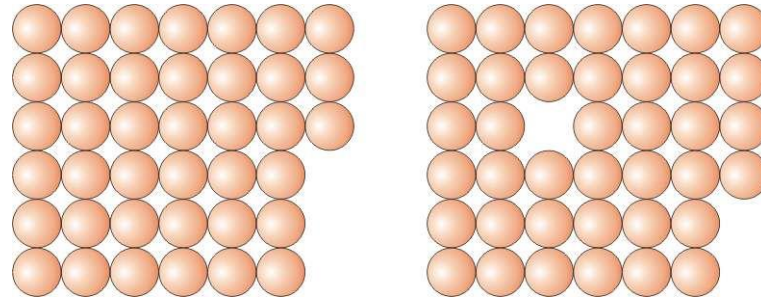
Notasjon for effektiv ladning:

- positiv
- / negativ
- x nøytral

# Punktdefekter i metaller, eks. nikkel

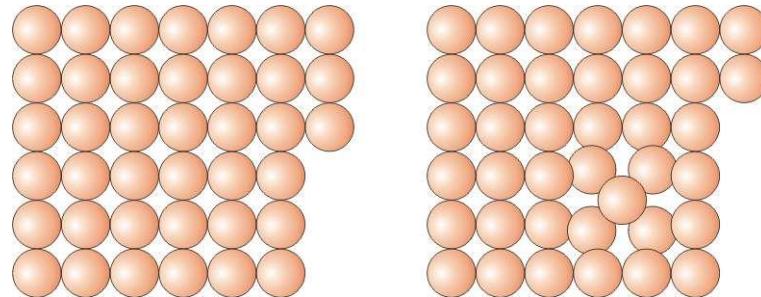
- Vakanser

$$Ni_{Ni} = v_{Ni} + Ni_{Ni}$$



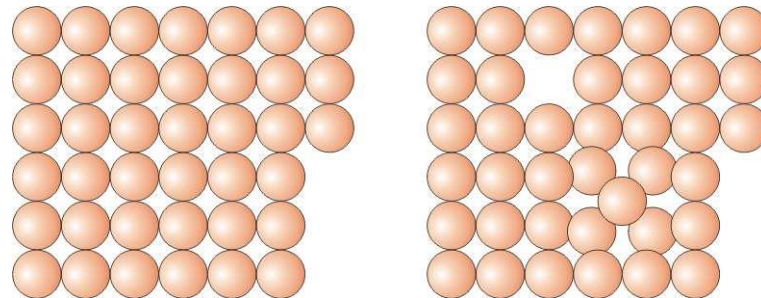
- Interstitielle

$$Ni_{Ni} = Ni_i$$



- Vakanser og interstitielle (Frenkel-defekt-par)

$$Ni_{Ni} = v_{Ni} + Ni_i$$



# Defekter i en halvleder; intrinsikk ionisasjon

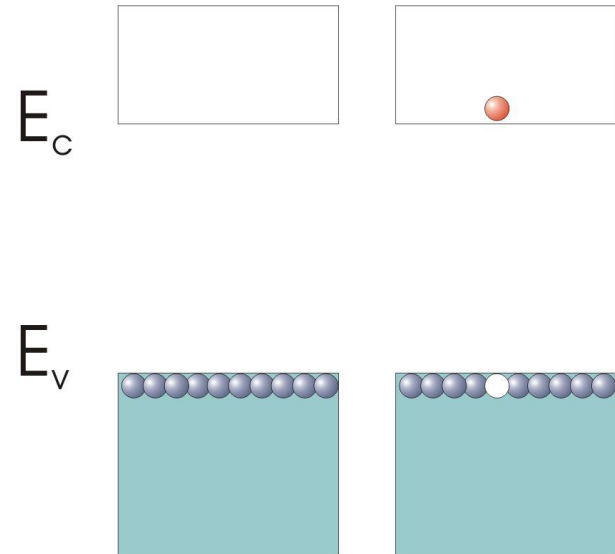
- Eksitasjon av elektroner fra valens- til ledningsbåndet:

$$e^x = e' + h^\bullet$$

eller

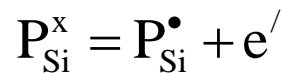
$$0 = e' + h^\bullet$$

$$K'_g = [e'] [h^\bullet] = np = K'_{g,0} \exp\left(\frac{-E_g}{RT}\right)$$

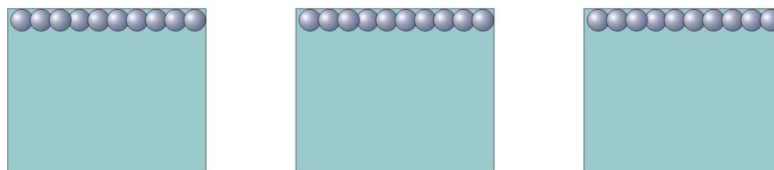


# Defekter i en halvleder; doping

- Eksempel: Silisium (Si)
- Valensbåndet i Si består av 3s og 3p-tilstander og er fullt (vha. kovalent binding).
- Fosfor (P) har ett valenselektron mer enn Si og danner en donortilstand, som lett eksiteres:



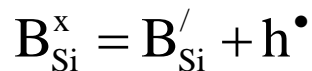
- Materialet blir en elektronleder (n-leder).



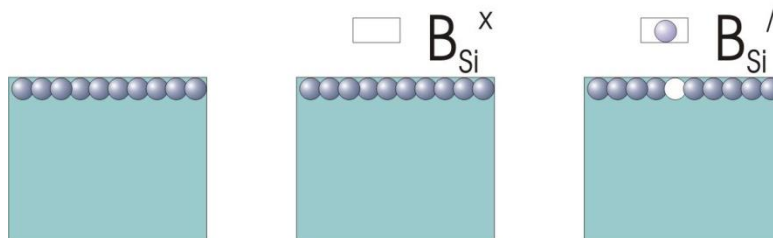
	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	He
2p	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
3p	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
4p	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5p	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
6p	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86

# Defekter i en halvleder; doping

- Eksempel: Silisium (Si)
- Valensbåndet i Si består av 3s og 3p-tilstander og er fullt (vha. kovalent binding).
- Bor (B) har ett valenselektron mindre enn Si og danner en akseptortilstand:



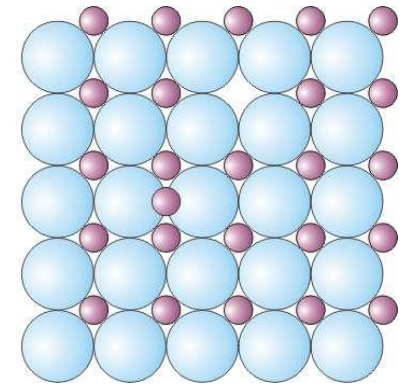
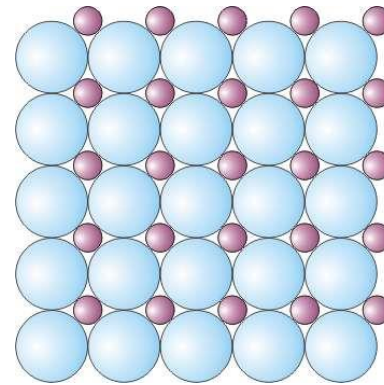
- Materialet blir en hull-leder (p-leder)



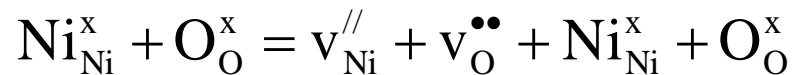
	III B	IV B	V B	V I B	V II B	
2p	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	He 2
3p	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ne 10
4p	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Ar 18
5p	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Kr 36
6p	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Xe 54
						Rn 86

# Defekter i ionisk stoff; eksempel NiO; intern uorden

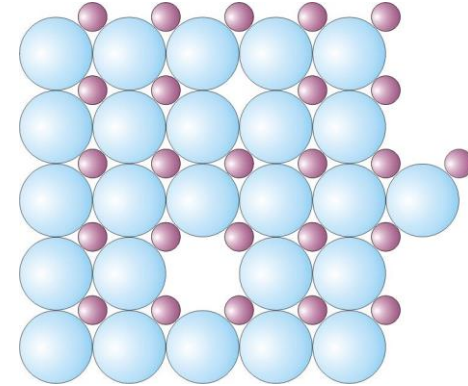
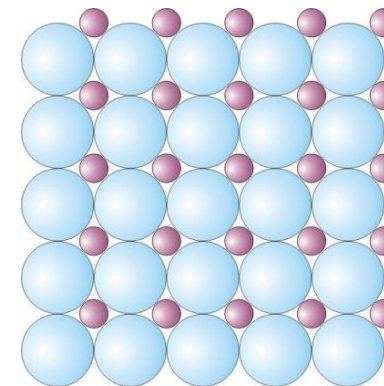
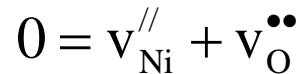
- Frenkel-defekt-par:



- Schottky-defekt-par:

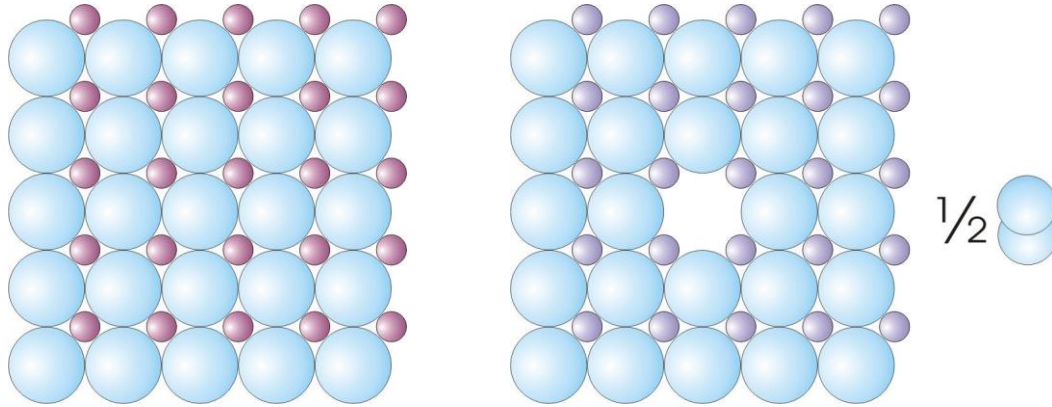


eller



- 3 regler for defektkjemiske reaksjonsligninger:
  - Massebalanse
  - Ladningsbalanse
  - Gitterplassforhold

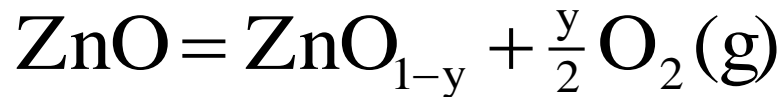
# Reaksjoner som danner ikke-støkiometri; Eksempler: oksygen-underskudd i ZnO og ZrO<sub>2</sub>



Tre grunnstoffer som er lett å forveksle; Lær forskjellen på Sr og Zn og Zr ☺ :

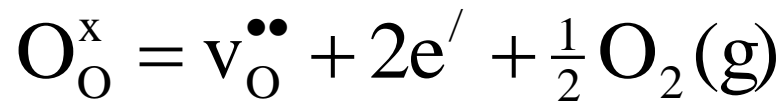
- SrO strontiumoksid (gr. 2)
- ZnO sinkoksid (gr. 12)
- ZrO<sub>2</sub> zirkoniumdioksid (gr. 4)

Kjemisk reaksjon :

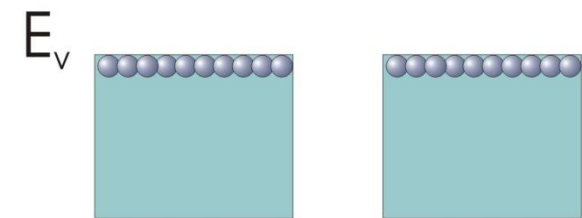
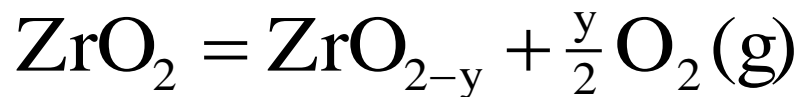


Oksygen-vakanser er donorer:

Defektkjemisk reaksjon :

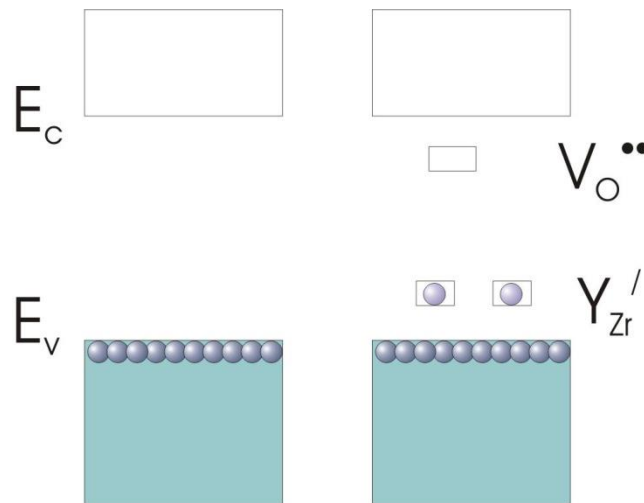
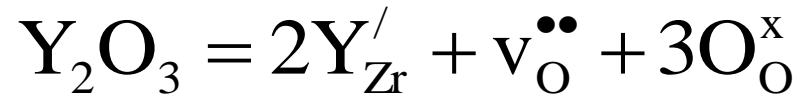
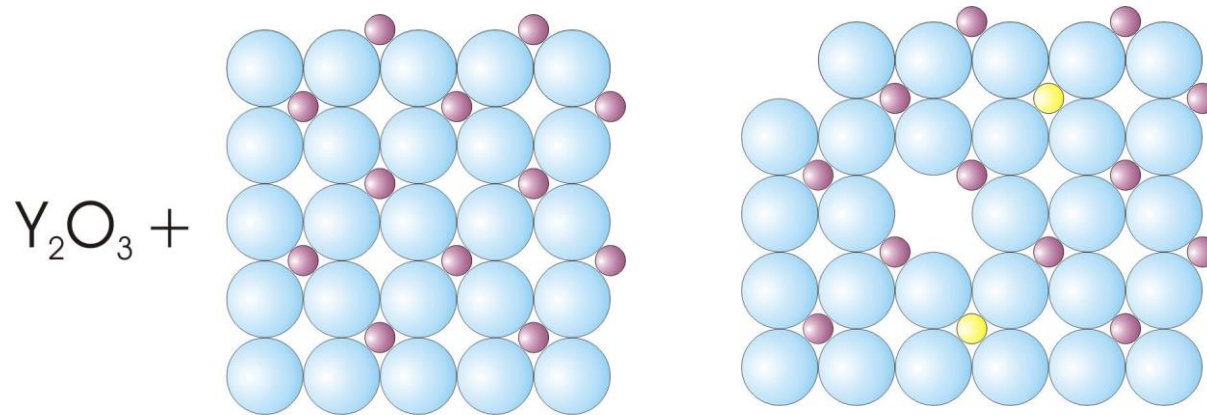


Eksempelet i boka:





# Eksempel på doping: $ZrO_{2-y}$ dopet substitusjonelt med $Y_2O_3$



Bemerk: Elektroner som doneres fra oksygenvakansen aksepteres av Y-dopanten; ingen elektroniske defekter

# Defektstruktur; elektronøytralitet og defektlikevekter

- Elektronøytralitet; eksempel fra Y-dopet  $ZrO_{2-y}$

$$2[v_O^{\bullet\bullet}] = [Y'_{Zr}] + n$$

- Antagelse: to defekter dominerer

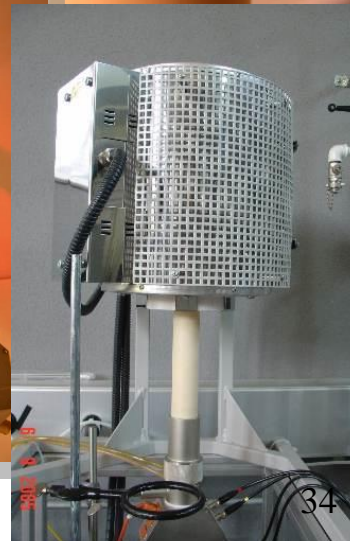
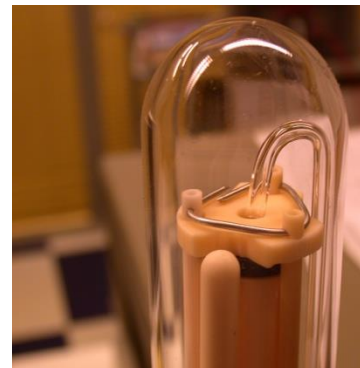
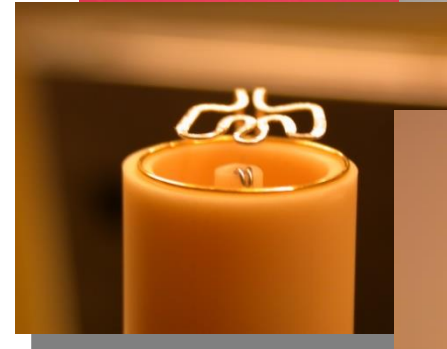
$$n = 2[v_O^{\bullet\bullet}] \gg [Y'_{Zr}]$$

- Defektlikevekt:  $O_O^x = v_O^{\bullet\bullet} + 2e' + \frac{1}{2}O_2(g)$

$$K'_{red} = \frac{[v_O^{\bullet\bullet}]}{[O_O^x]} n^2 p_{O_2}^{1/2} = 4 \frac{[v_O^{\bullet\bullet}]^3}{[O_O^x]} p_{O_2}^{1/2}$$

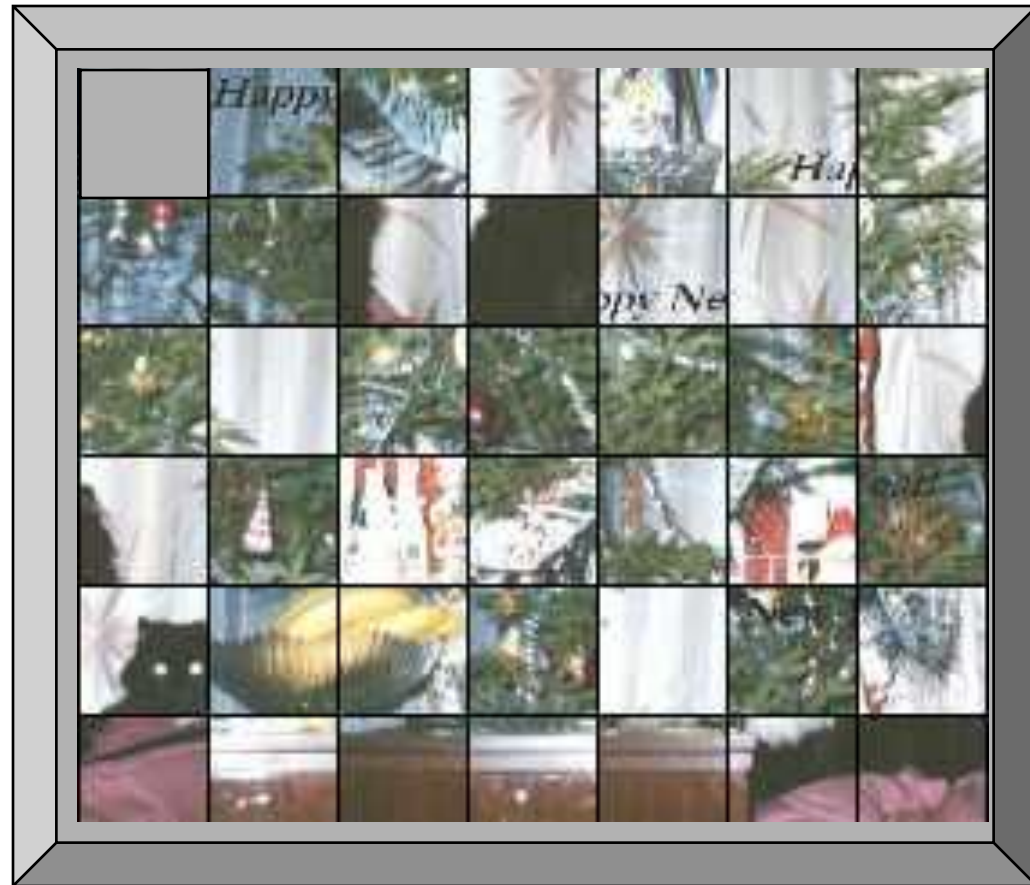
- Innsetting gir løsningen:

$$[v_O^{\bullet\bullet}] = \frac{n}{2} = \left(\frac{1}{4} K'_{red}\right)^{1/3} [O_O^x]^{1/3} p_{O_2}^{-1/6}$$



# Diffusjon

- Diffusjon krever defekter

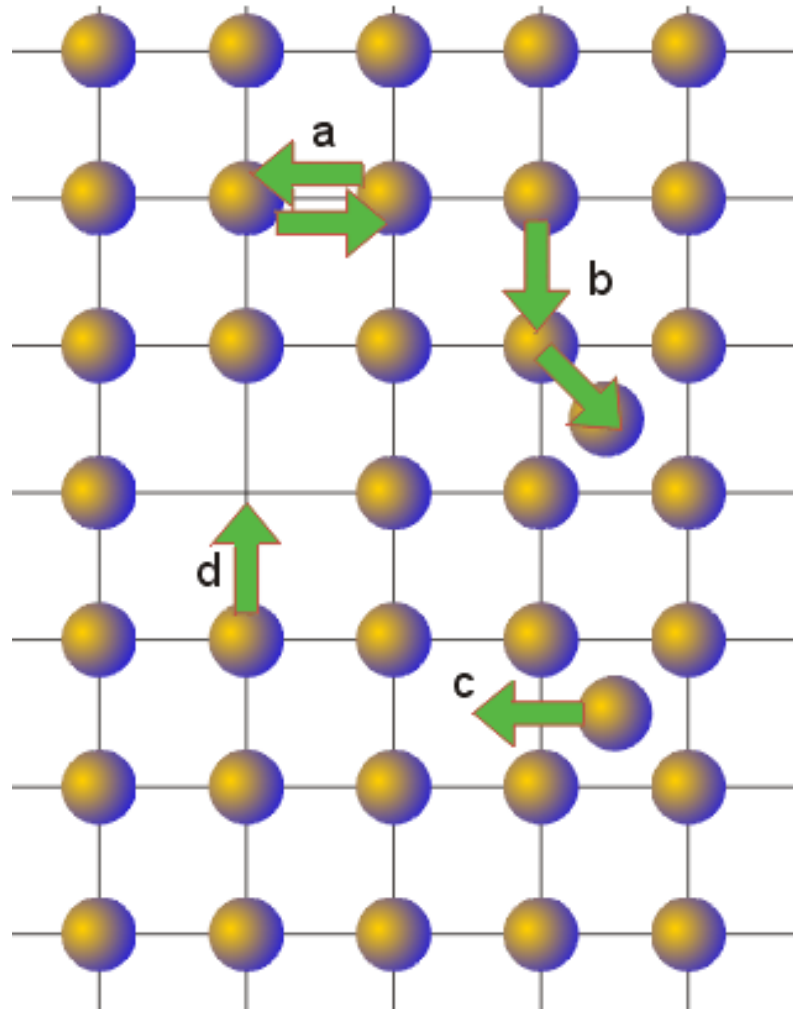


# Diffusjonsmekanismer og hoppefrekvens

Vakans	("d")
Interstitiell	("c")
Kjedeinterstitiell	("b")
Ombytting	("a")

Generelt er hoppefrekvens (antall hopp per tidsenhet ( $n/t$ )) gitt ved  
 forsøksfrekvens  $\nu_0$   
 termisk energi ( $kT$ ) i forhold til  
 aktiveringsbarrieren  $Q_m$ ,  
 antall naboplasser  $Z$   
 fraksjon av defekter  $X_{defekt}$ :

$$\frac{n}{t} = \nu_0 e^{-Q_m/kT} Z X_{defekt}$$



# Selvdifusjon

- Selvdifusjon = "Random diffusion"
- Termisk energi
- Selvdifusjonskoeffisienten er knyttet til hoppefrekvensen

$$D_r = \frac{1}{6} s^2 \frac{n}{t} = D_r^0 e^{-Q_D/kT} = D_r^0 e^{-(Q_m+Q_C)/kT}$$

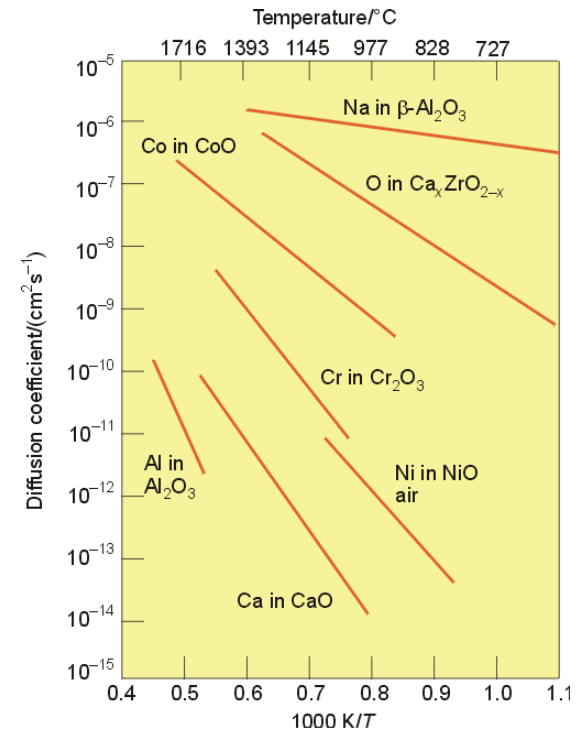
- Aktiveringsenergien for selvdifusjon har ofte bidrag fra både mobilitet og dannelse av defektene

- Total tilbakelagt vei er meget lang:

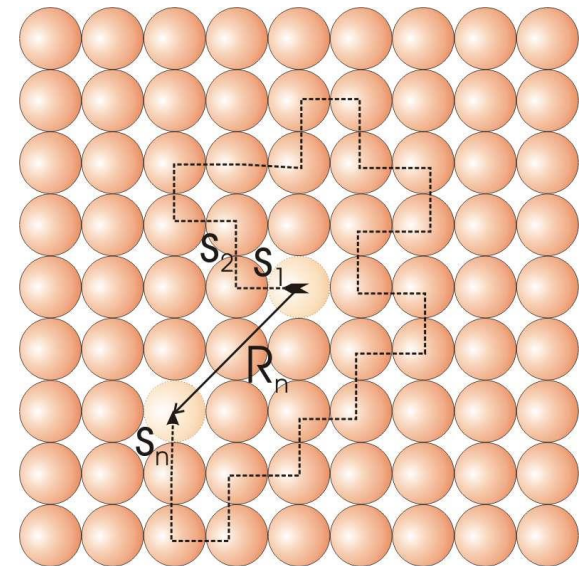
$$d_{total, tilfeldig} = \frac{6D_r t}{s}$$

- men midlere radiell avstand fra startpunktet er liten:

$$r_{radiell} = \sqrt{6D_r t}$$



Figur: Shriver and Atkins: Inorganic Chemistry



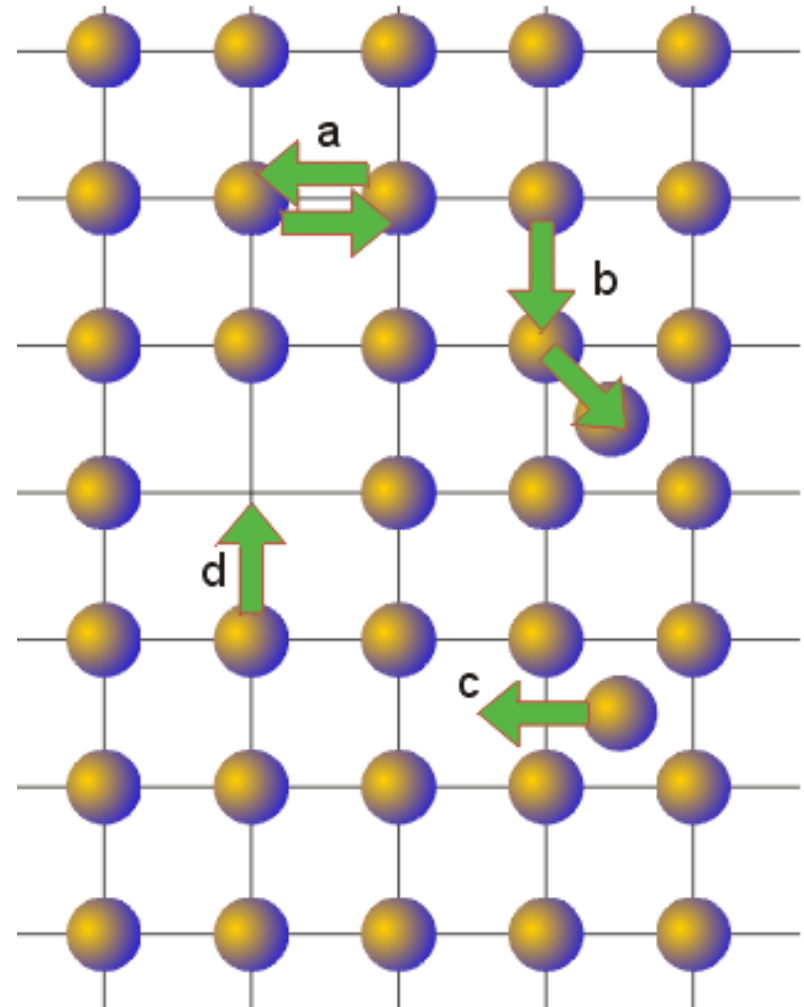
# Defektdiffusjon

- Defekten beveger seg mye oftere (og derved lenger) enn det korresponderende gitterspeciet  $s$ .

$$\frac{D_{r,defekt}}{D_{r,s}} = \frac{[s]}{[defekt]}$$

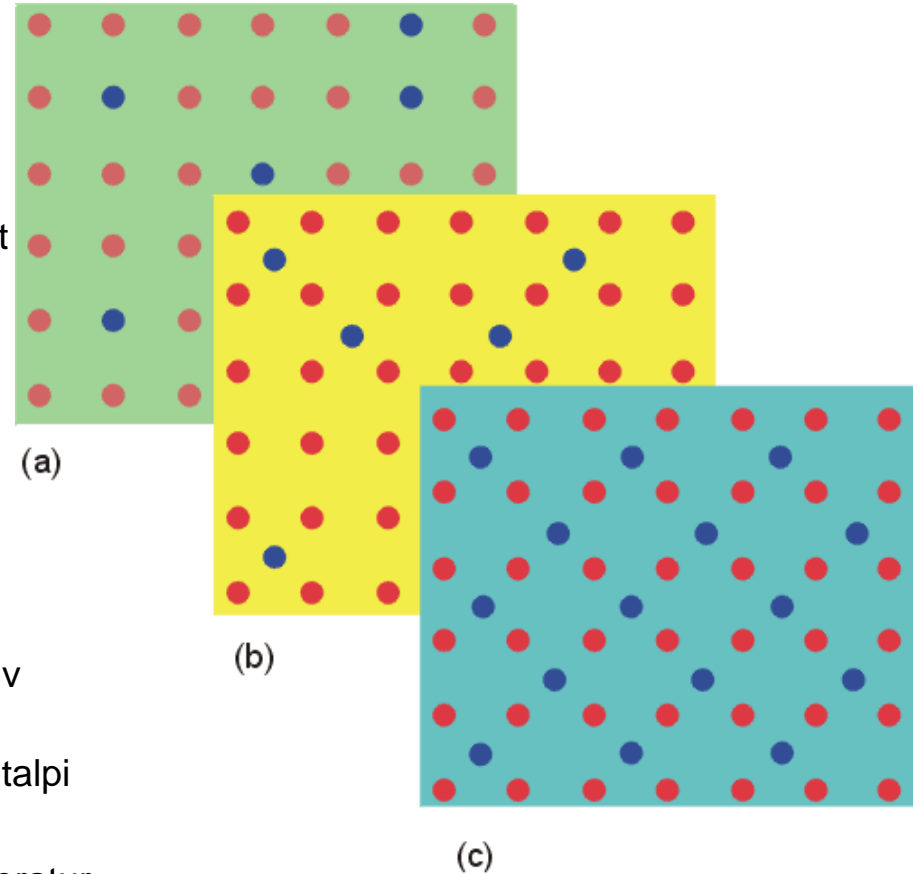
eller

$$D_{r,defekt} [defekt] = D_{r,s} [s]$$



# Løsninger

- Gasser
  - Alltid blandbare
- Væsker
  - Ofte blandbare
  - "Likt løser likt"
- Faste stoffer
  - Faste løsninger: oftest begrenset blandbarhet
  - "Likt løser likt"
  - Substitusjonell løsning
  - Interstitiell løsning
- Fast løsning og konkurrerende alternativer:
  - Faseseparasjon; Lav entropi, negativ entalpi
  - Danne ordnet forbindelse; Lav entropi, negativ entalpi
  - Fast løsning; Høy entropi (uorden), positiv entalpi
  - Fast løsning begunstiges derfor av høy temperatur

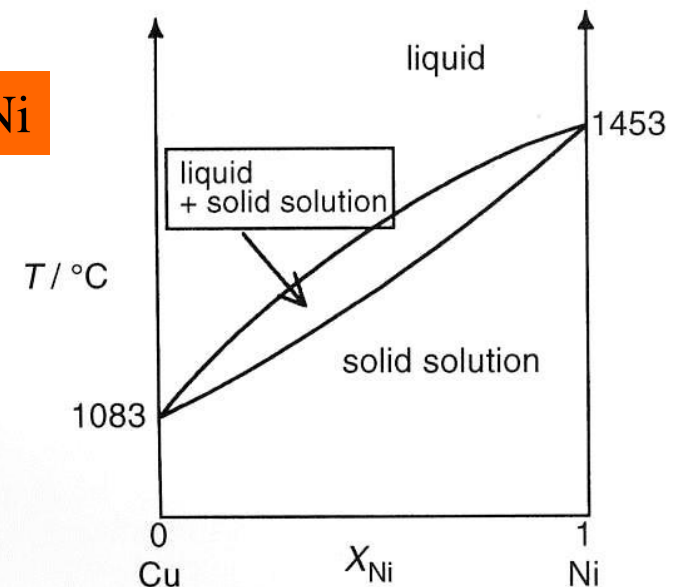


Figur fra Shriver and Atkins: Inorganic Chemistry

# Binært fasediagram – to komponenter

- Oftest  $X$  vs  $T$
- $X$ : Atomfraksjon eller atom-%  
eller  
Vektfraksjon eller vekt-%
- Eksempel på fullt blandbart system: Cu-Ni
  - Liquidus- og solidus-kurver
- Slike diagrammer viser stabilitetsområder
  - Løsninger og tofaseområder
  - Sammensetning av løsningen i enfaseområde
  - Vi kan også indirekte lese blandingsforhold av faser i tofaseområder

Cu-Ni



Figur fra M.A. White: Properties of Materials



# Entropi og Gibbs energi for fasediagram

Anta at det koster en viss entalpi  $\Delta H_{B/A}$  å løse B i A

Konfigurasjonell entropi er gitt ved (fra Kap. 3):

$$S = k \ln \frac{(a+b)!}{a!b!} \approx -k \left( a \ln \frac{a}{a+b} + b \ln \frac{b}{a+b} \right)$$

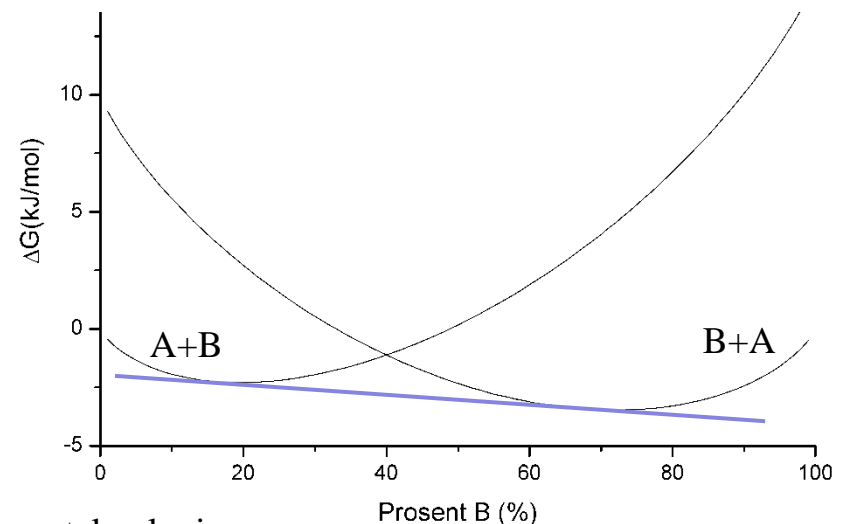
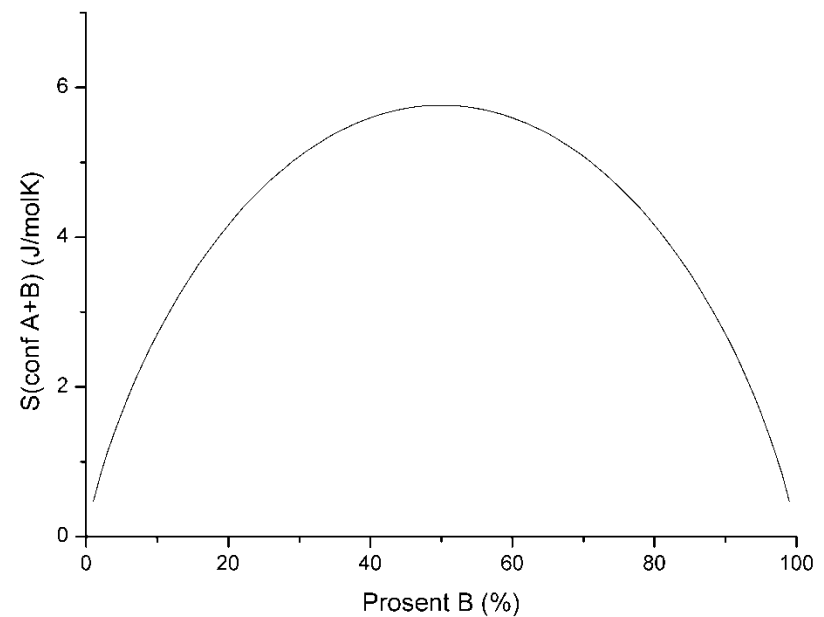
der a og b er relative mengder av A og B.

Gibbs energi for B løst i A:

$$\Delta G_{B/A} = \frac{b}{a+b} \Delta H_{B/A} - T \Delta S$$

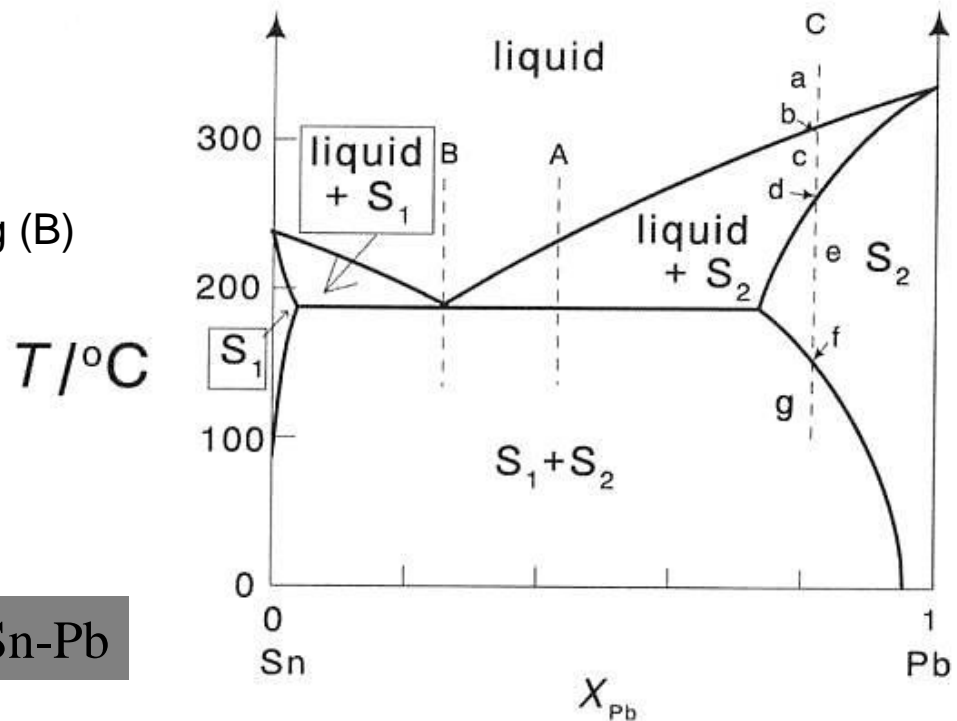
Tilsvarende for A i B

Tangenter viser laveste Gibbs energi og en- og tofaseområder



# Binært fase diagram – to komponenter

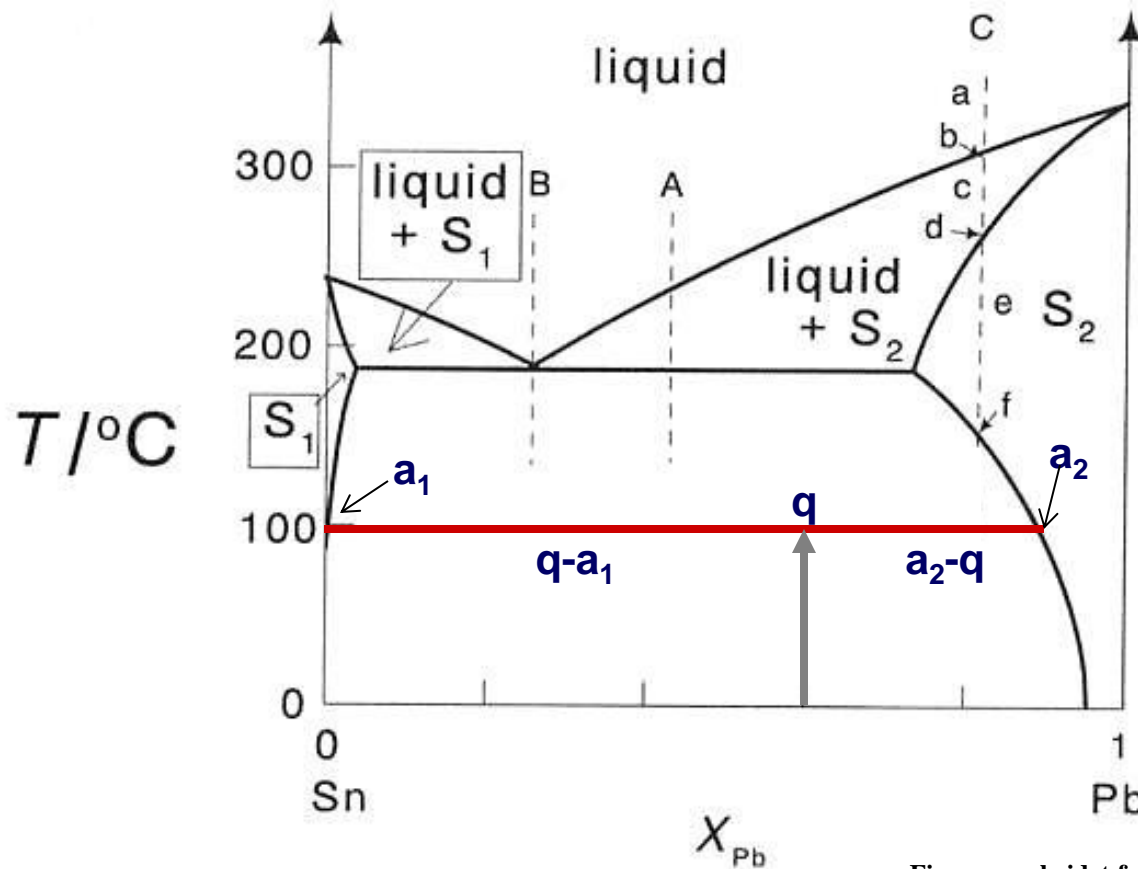
- Eksempel på system med ikke full løselighet i fast fase: Sn-Pb
  - To faste løsninger  $S_1$  og  $S_2$
  - Flytende løsning
  - Flere tofaseområder
  - Eutektikum; eutektisk sammensetning (B)



Figur fra M.A. White: Properties of Materials

# Vektstangregelen

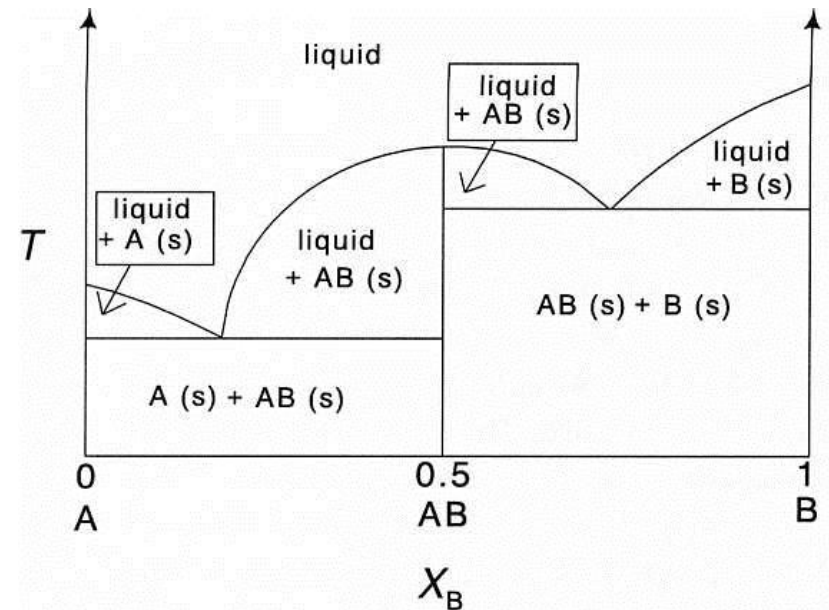
$$m_1(q - a_1) = m_2(a_2 - q) \quad \text{eller} \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2 - q}{q - a_1}$$



Figur omarbeidet fra M.A. White: Properties of Materials

# Fasediagram med intermediære forbindelser

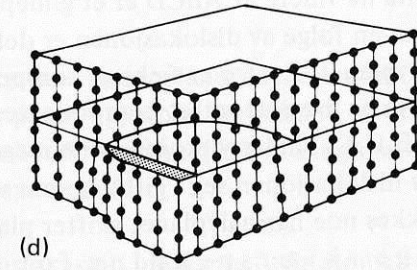
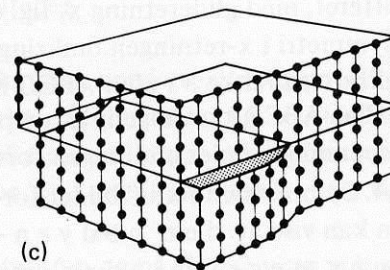
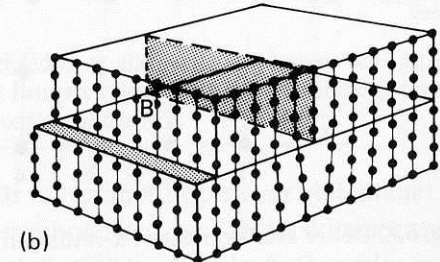
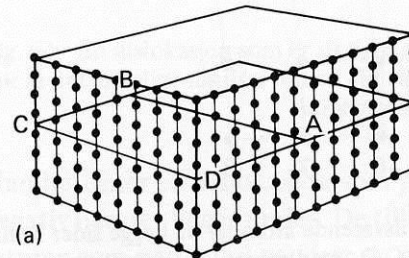
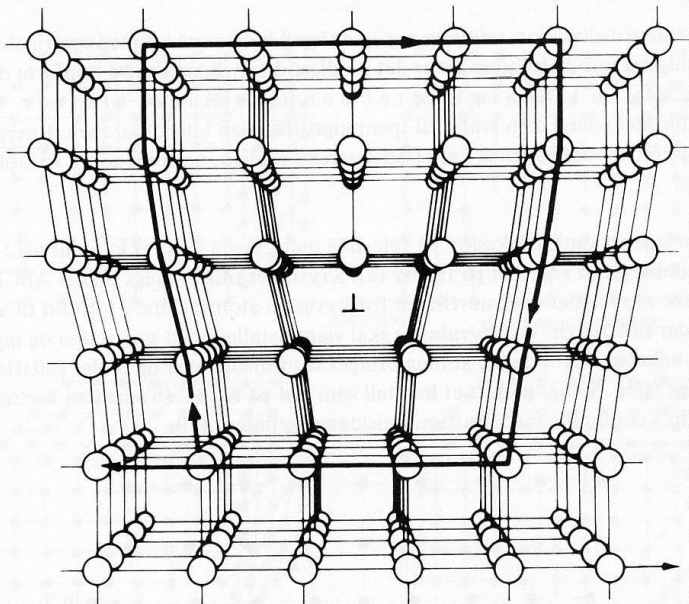
- Intermediære forbindelser mellom komponentene (her A og B)
  - for eksempel  $A_2B$ ,  $AB$ ,  $AB_3$
  - kalles ofte støkiometriske, men er det i prinsippet ikke
- Eksempel (figuren):
  - Én intermediær fase  $AB$ .
  - Smelter ("kongruent") til væske med samme sammensetning
  - Diagram satt sammen av to binære fasediagrammer



Figurer fra M.A. White: Properties of Materials

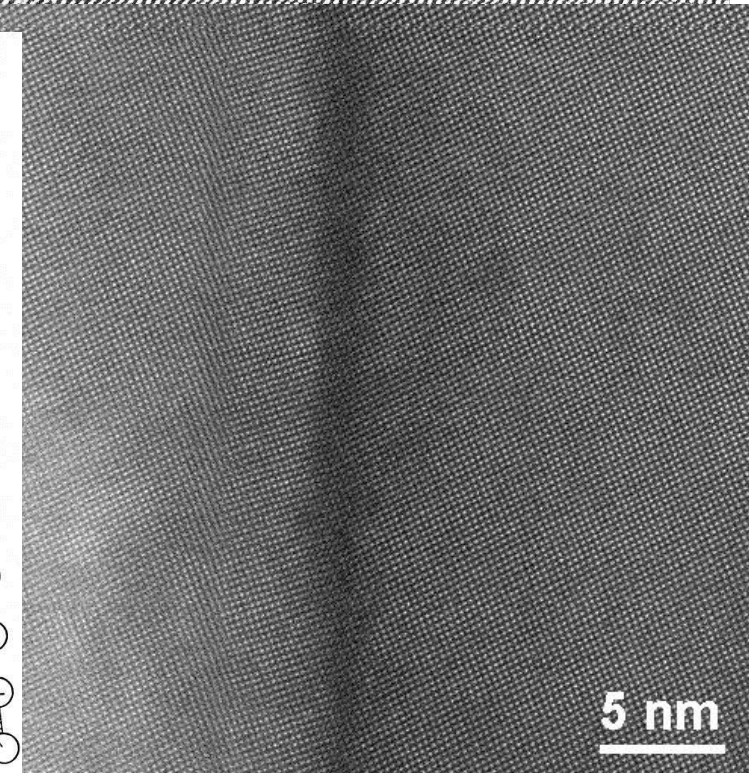
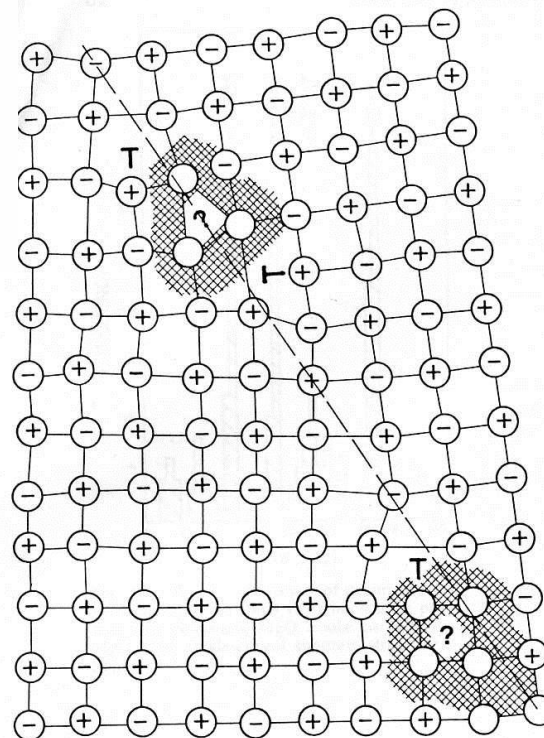
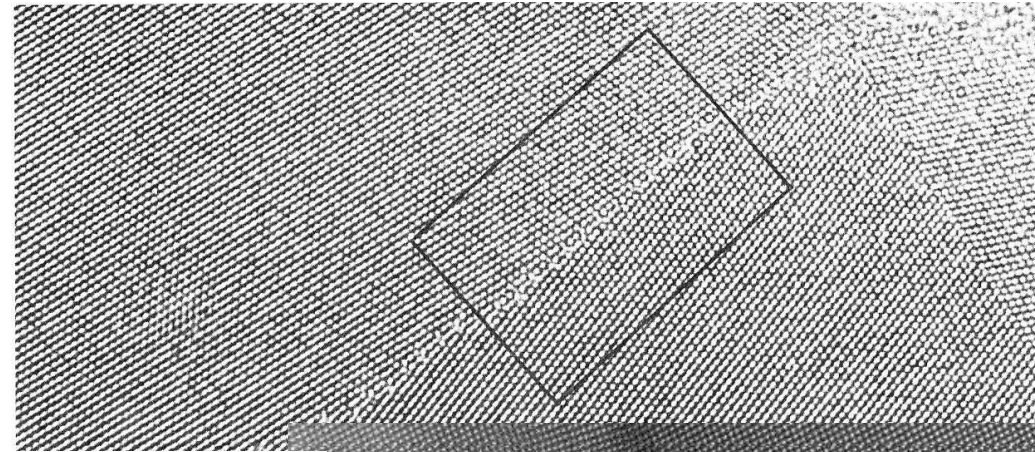
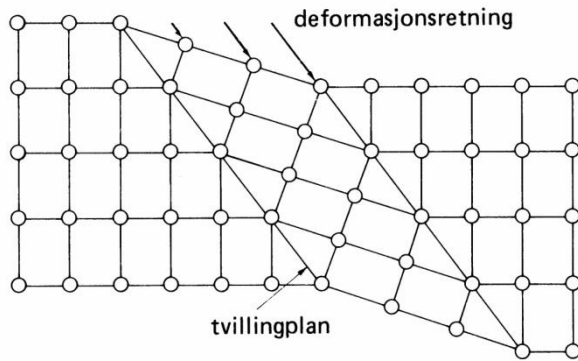
# Dislokasjoner

- Éndimensjonal defekt
- Kant- og skruedislokasjoner
- Karakterisert ved Burgers vektor



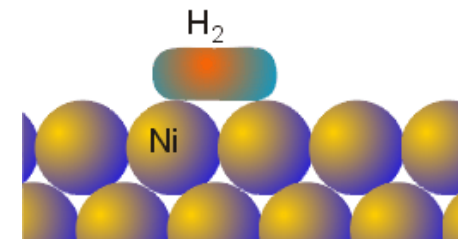
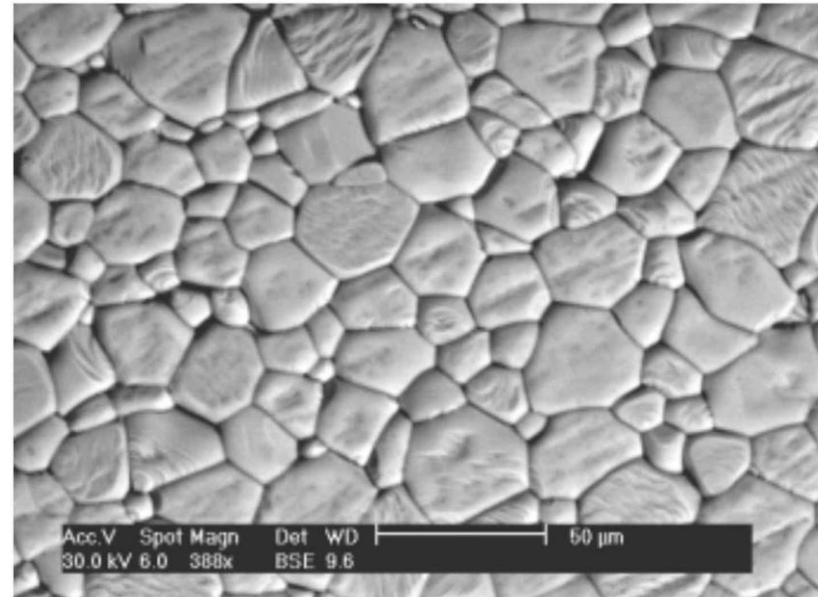
# Korngrenser

- Todimensjonal defekt
- Varierende "match"
  - Fra tvillinggrenser til amorf grensefase

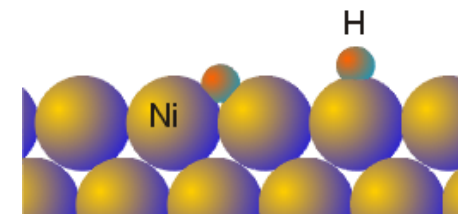


# Overflater

- Todimensjonal defekt
- En ny, tilfeldig plassert overflate har meget stor energi
- Alle midler tas i bruk for å redusere denne energien
  - Mindre overflate
    - avrunding, sintring
  - Mer stabil overflate
    - fasettering, etsing
  - Ny terminering
    - Atomær omstrukturering
    - Adsorpsjon
      - kjemisorpsjon, fysisorpsjon
- Korngrenser og overflater har stor uorden og oftest forhøyet transport



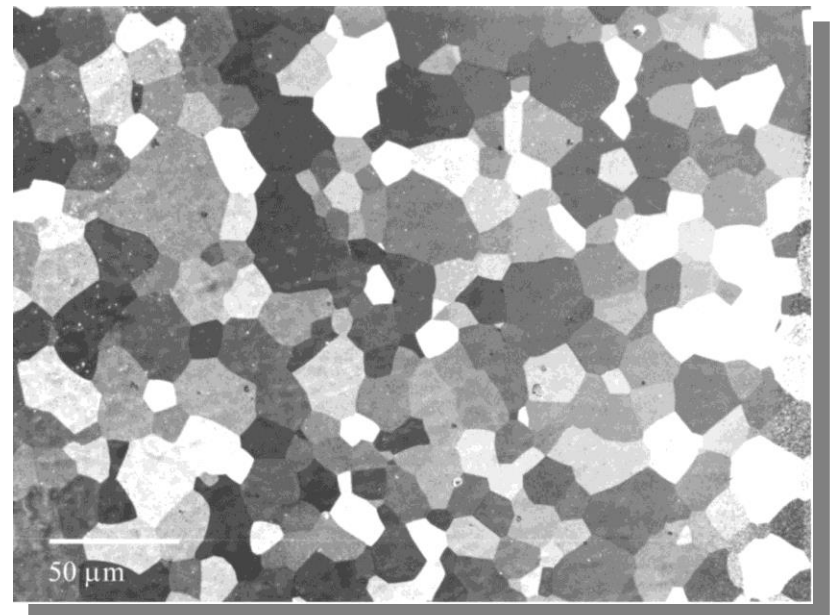
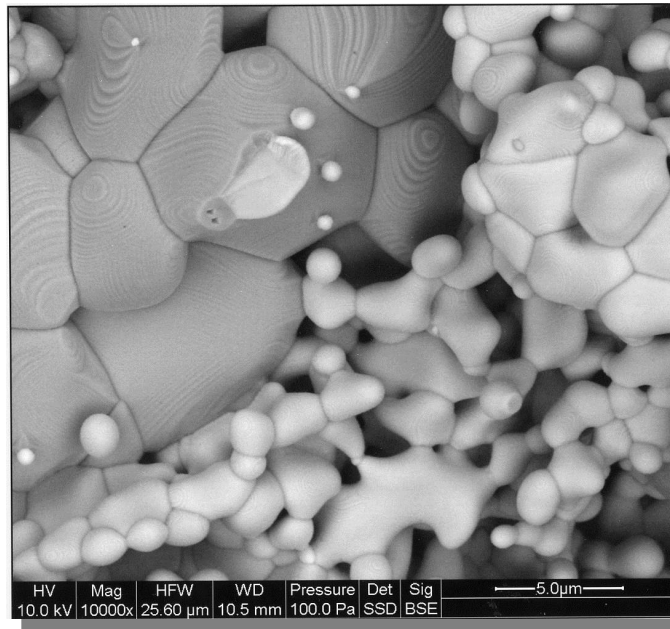
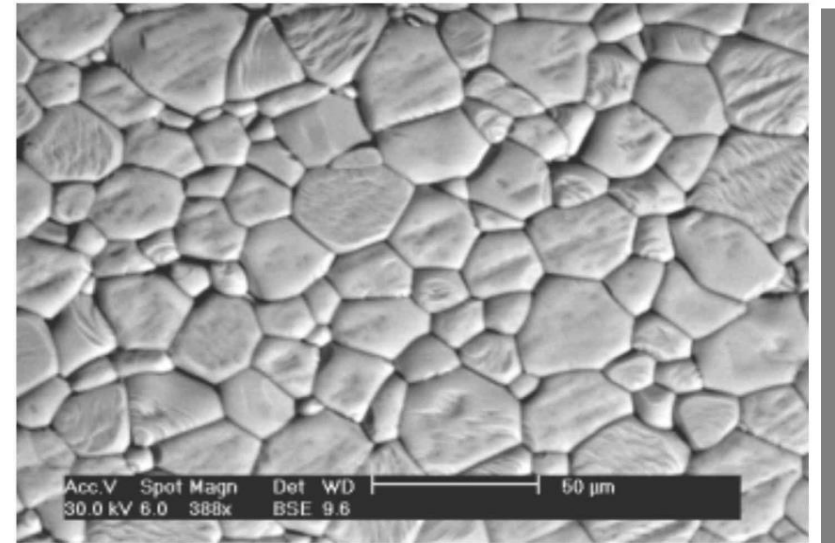
(a)



(b)

# Mikrostruktur

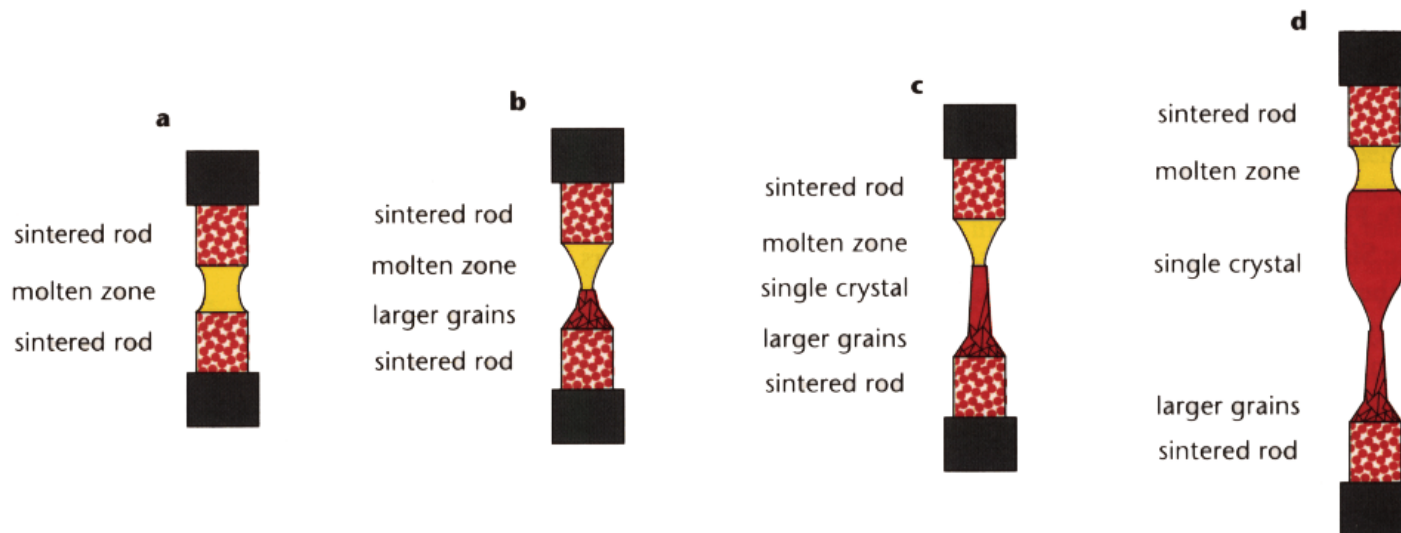
- Geometrisk fordeling av
  - Faser og fasegrenser
  - Porer og overflater
  - Korn og korngrenser
- To- og tredimensjonale defekter





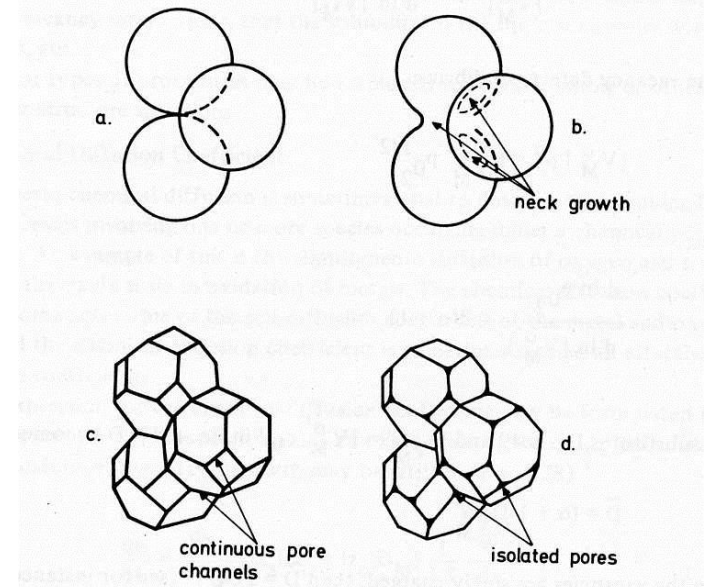
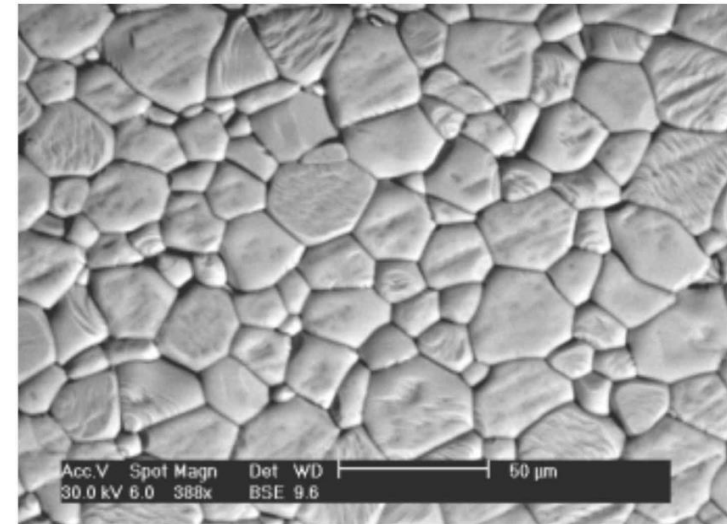
# Enkrystaller

- Rendyrker bulkegenskapene til et stoff
- Retningsavhengige egenskaper kan optimaliseres
- Fremstilles ved krystallgroing fra gass, løsning eller smelte

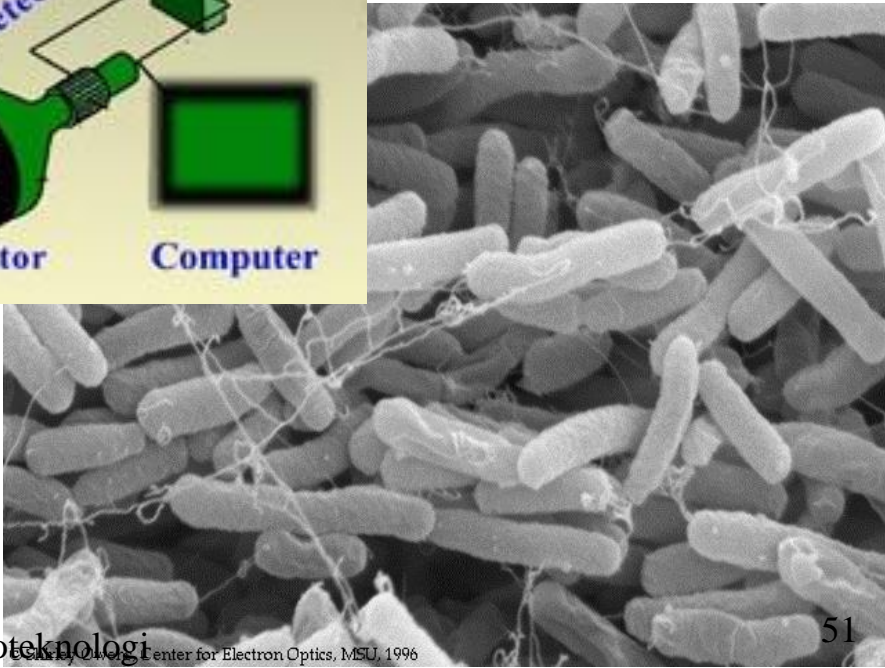
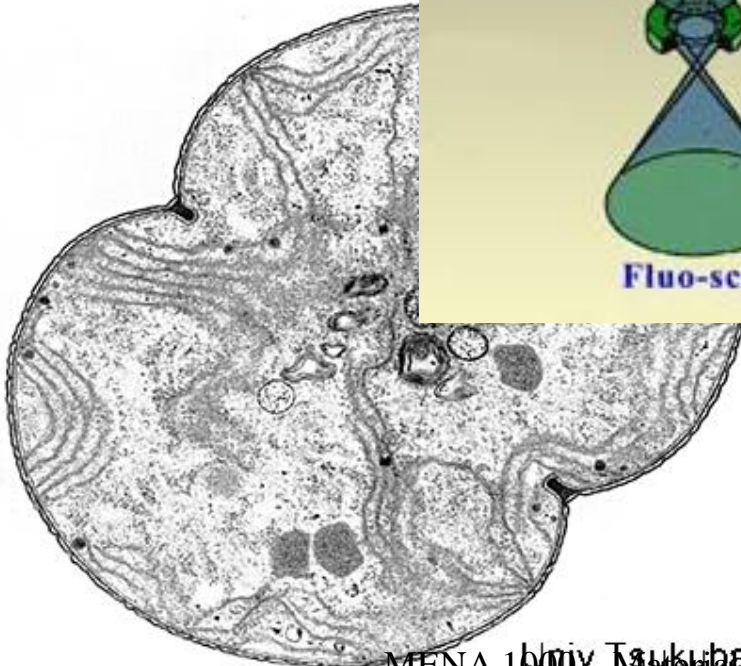
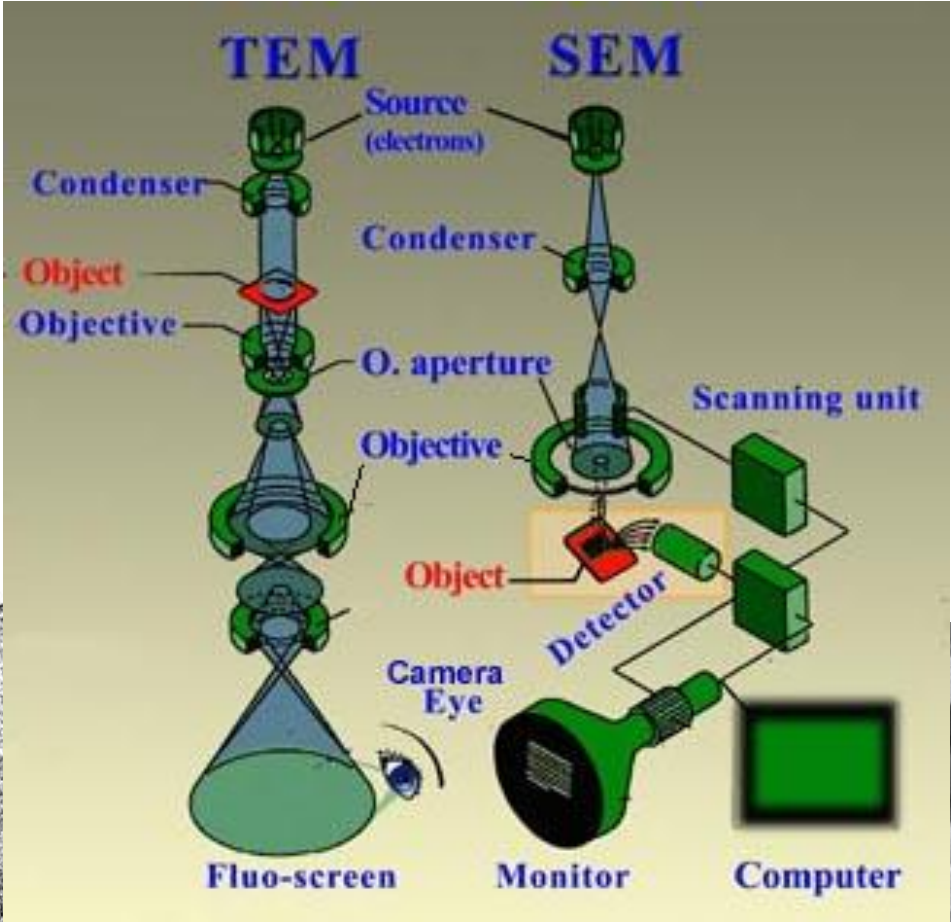


# PolykrySTALLinsk stoff

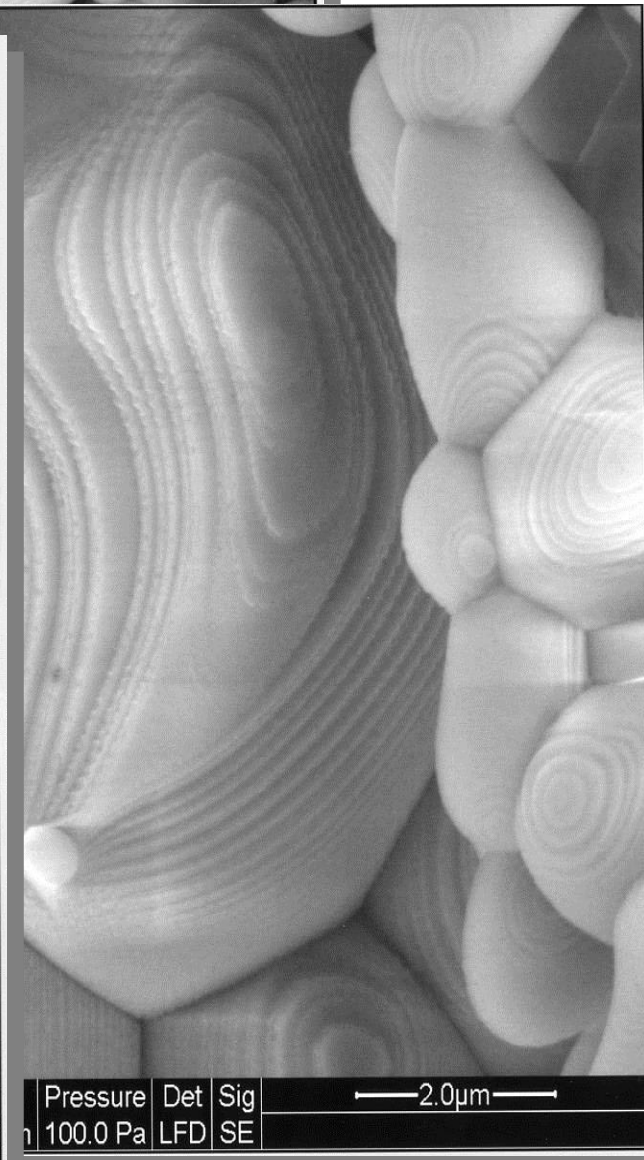
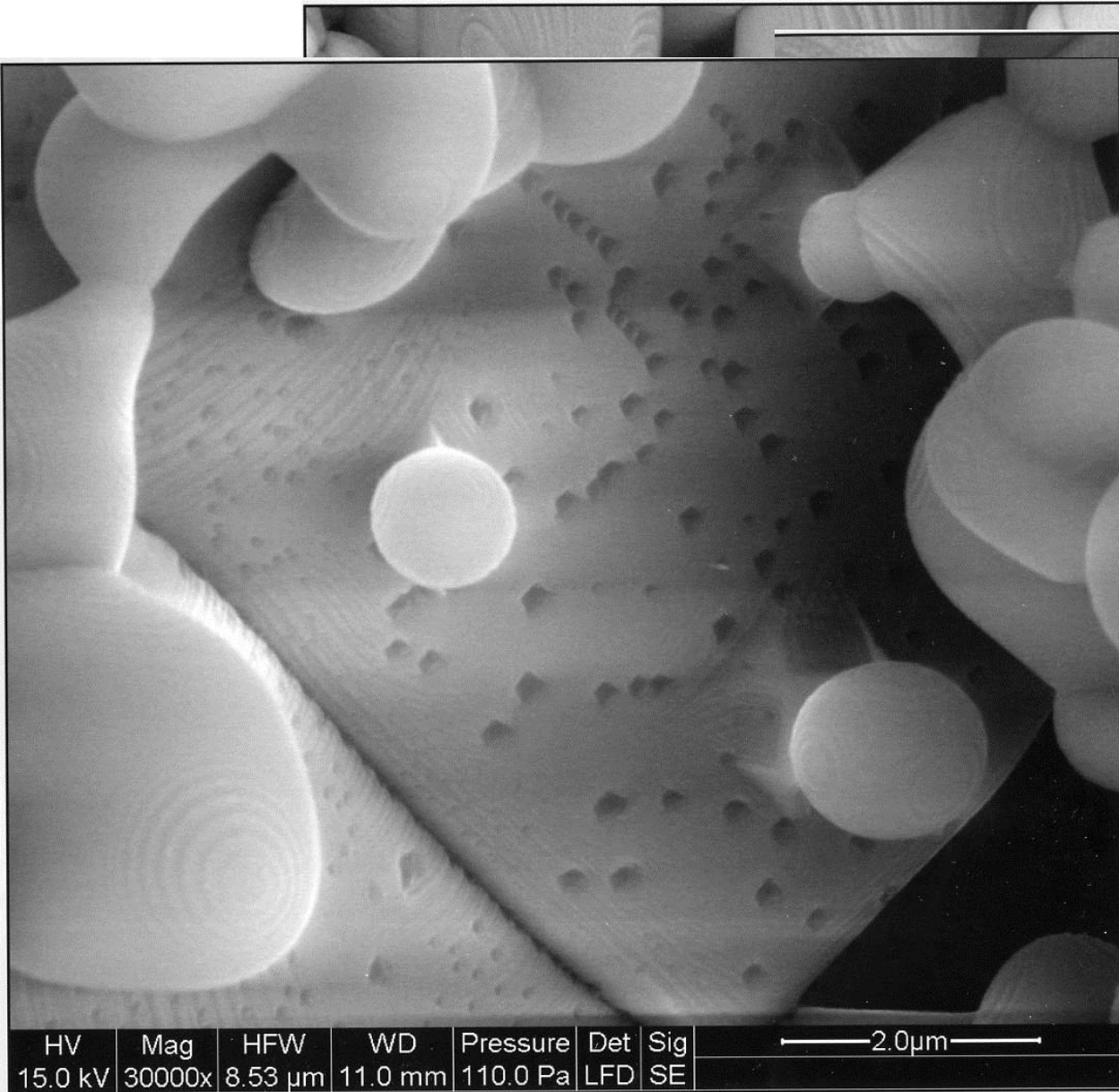
- Fremstilling
  - Størkning fra smelte
    - Typisk for metaller
  - Sintring av pulvre
    - Typisk for keramer
    - Men også for enkelte metaller; pulvermetallurgi
- Sintring er eliminasjon av porer (= eliminasjon av overflater)
- Drives av reduksjon i overflateenergi



# Elektronmikroskopi



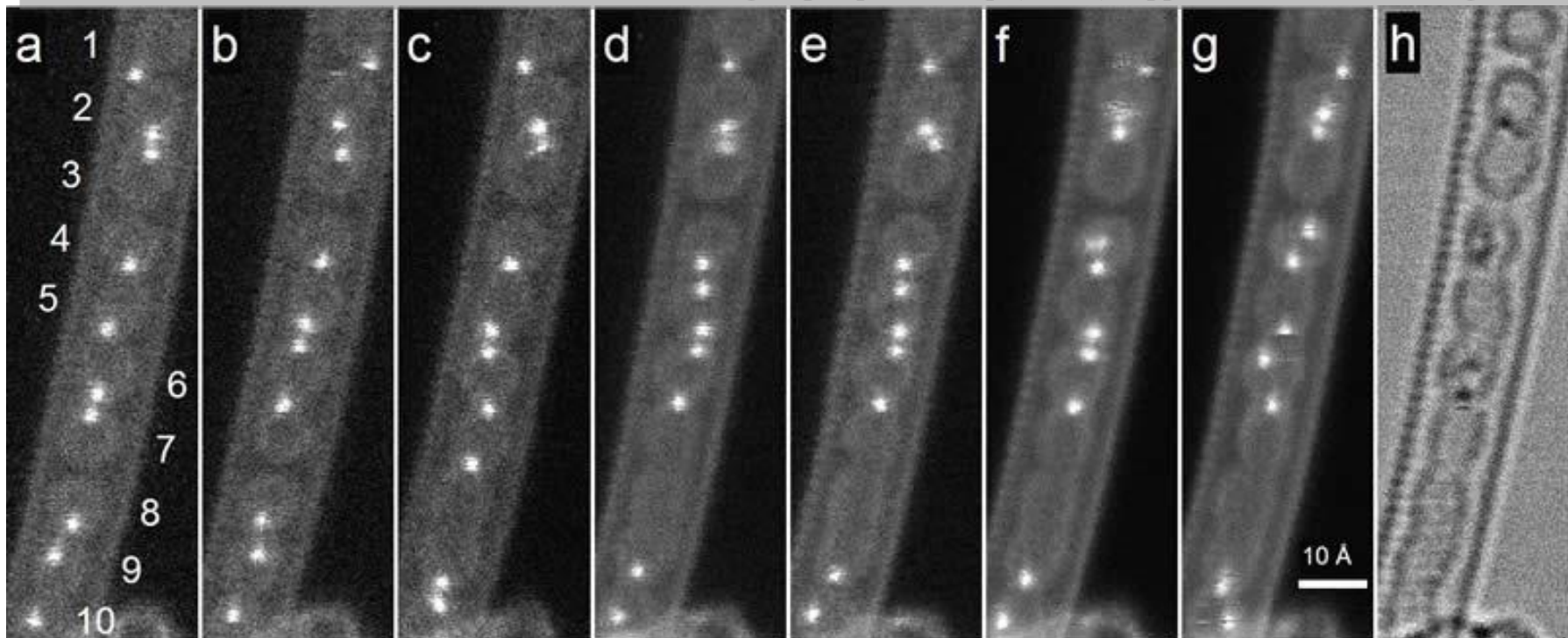
# Ni+ZrO<sub>2</sub> cermet sintret ved 1500°C



# TEM med atomær oppløsning og spektroskopi

- Interaksjon mellom molekylære strukturer og mange typer stråling (Lys, IR, UV, elektroner...)
- Gir karakteristiske energispektre (absorpsjon, transmisjon, refleksjon)
- Gir opplysninger om atomers identitet, bindinger, elektronspinn...
- Kombinasjonen med atomær oppløsning i mikroskopi

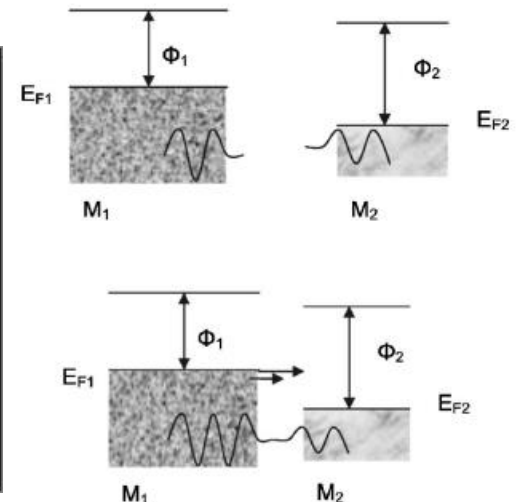
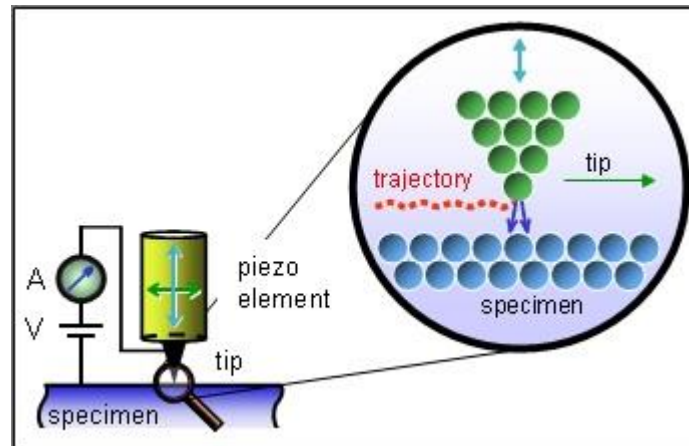
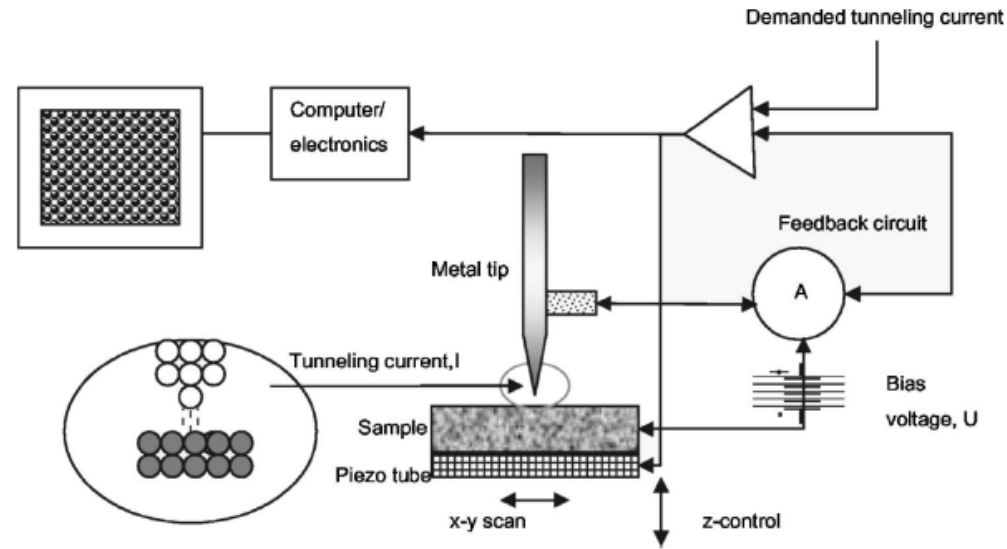
Til høyre: TEM-bilde av envegget karbon-nanorør med  $C_{82}$ -baller og enkelte erbium(Er)-atomer. Serie til venstre: Er-atomene er fremhevet ved å bruke elektron-energi-taps-spektroskopi(EELS)-toppen til Er for avbildningen.



# Sveip-probe-mikroskop (SPM)

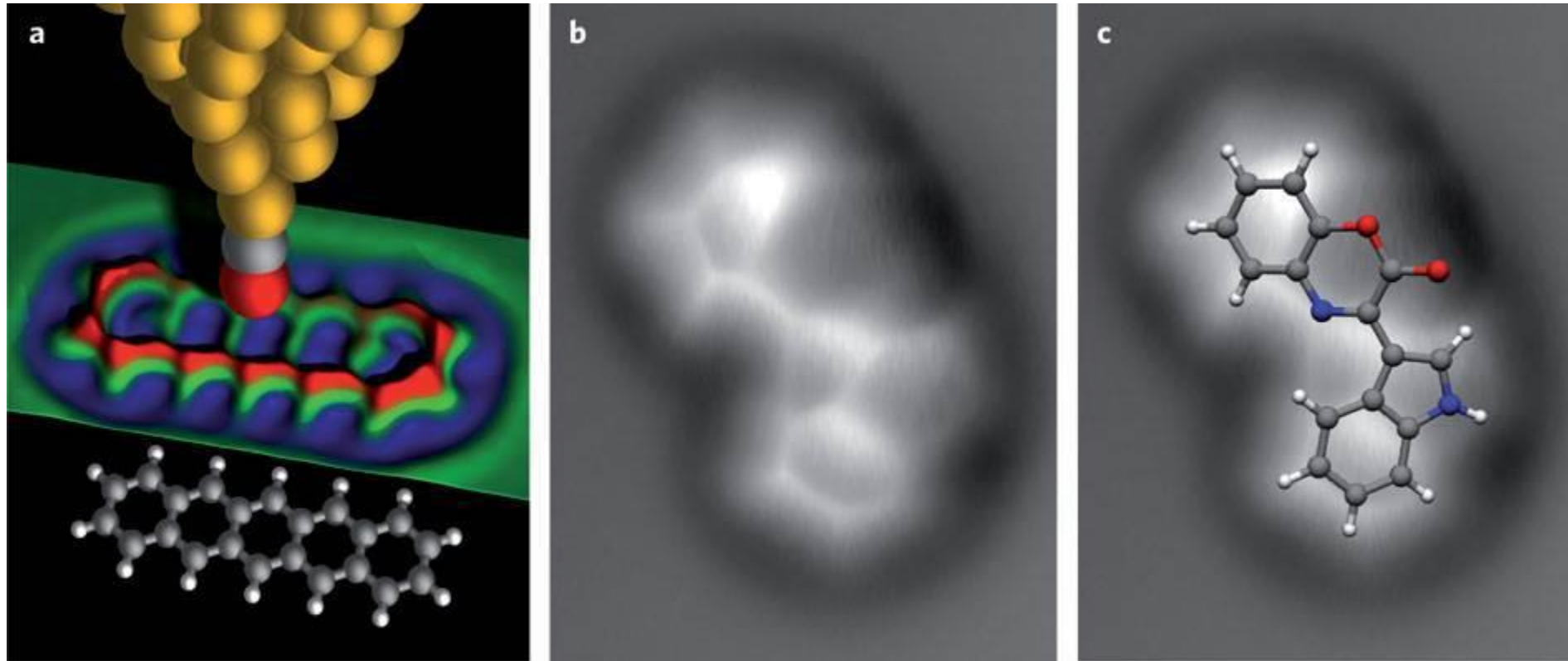
- Scanning Tunneling Microscope (Sveip-tunneling-mikroskop, STM)

- Mye felles med AFM
- Det går en tunnelingstrøm av elektroner prøven og nåla, som varierer med avstanden
- Ofte bare det nærmeste atomet som står for tunnelstrømmen, derfor kan atomær oppløsning oppnås
- Krever ledende prøver



Figurer: T. Knutsen et al., *J. Electrochem. Soc.*, 2007

# SPM på molekyler



L. Gross, *Nature Chemistry* **3** (2011) 273.

# Fremstilling og manipulasjon av nanostrukturer

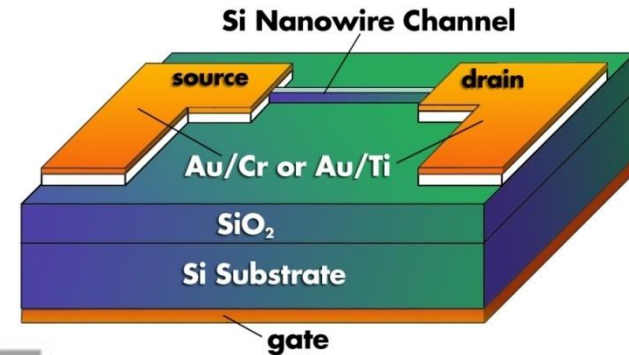
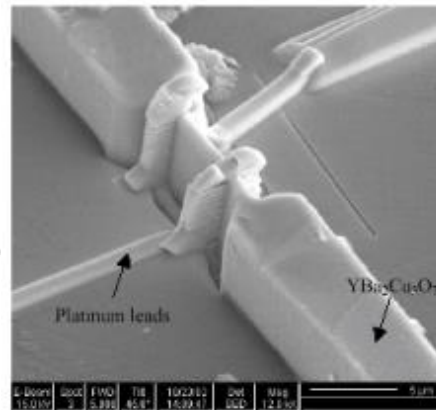
- Top-down:

- Litografiske metoder; elektronstrålelitografi

- Avsette
- Reagere
- Etse

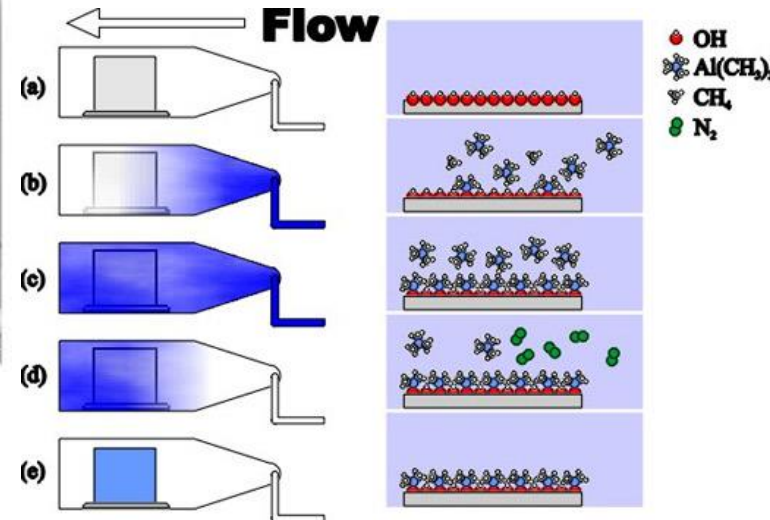
- Skjæremetoder

- Focused Ion Beam (FIB)



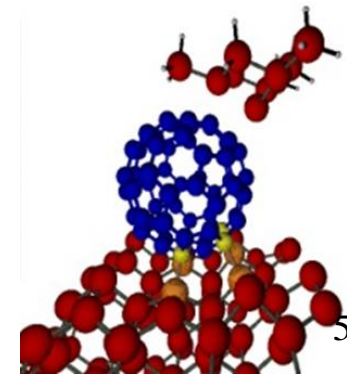
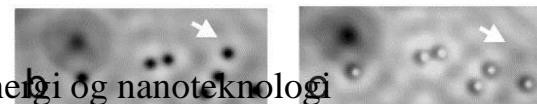
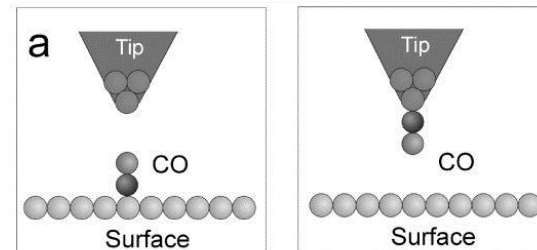
- Bottom-up:

- Chemical Vapour Deposition (CVD)
- Lag-for-lag
- Nanopartikler
- Selvbyggende, selvrepliserende



- Manipulering

- SPM-manipulering av atomer





# Oppsummering, Kap. 7

- Amorfe vs krystallinske stoffer

- Struktur i krystallinske stoffer

- Enhetsceller
- Kulepakking
- Bravais-gittere
- Bestemmelse og nomenklatur

- Defekter

- Nulldimensjonale
  - Punktdefekter
  - Elektroniske defekter
  - Nomenklatur
  - Defektkjemi
  - Diffusjon
  - Faste løsninger - fasediagram
- Endimensjonale
  - Dislokasjoner
- Todimensjonale
  - Korngrenser
  - Overflater

- Mikrostruktur

- Enkrystaller
- Polykrystallinske stoffer
  - Fremstilling
  - Sintring

- Mikroskopi

- SEM
- TEM
- SPM

- Nanostrukturer

- Fremstilling
- Manipulasjon





## Etter dette kapitlet...

- Etter dette kapitlet må du kunne gjøre rede for amorfe og krystallinske stoffer.
- Du bør kunne beskrive eller skissere de vanligste symmetrier (kubisk, tetragonal, osv.) og Bravais-gittere.
- Du bør vite hvordan mikroskopi og diffraksjon brukes til å studere strukturer.
- Du må kjenne til elektroniske defekter og punktdefekter og nomenklaturen for disse, samt hvordan vi skriver og balanserer defektreaksjoner.
- Du bør kjenne sammenhenger mellom defekter og diffusjon.
- Du bør forstå og kunne skissere et binært fasediagram med begrenset blandbarhet.
- Du bør kunne beskrive dislokasjoner, korngrenser og overflater.
- Du bør kunne vise hvordan enkrystaller lages og hvordan et tett polykrystallinsk materiale fremkommer ved sintring.