

MENA1001; Materialer, energi og nanoteknologi - Kap. 8

Mekaniske egenskaper og konstruksjonsmaterialer

Truls Norby
Kjemisk institutt/
Senter for Materialvitenskap og nanoteknologi
Universitetet i Oslo
FERMiO, Forskningsparken
Gaustadalleen 21
NO-0349 Oslo

truls.norby@kjemi.uio.no

Mekaniske egenskaper

Belastning

Spenning

Deformasjon

Konstruksjonsmaterialer

Metalliske

Keramiske

Polymerer

m.m.



Belastning og deformasjon

Belastning på et legeme = indre krefter + ytre krefter

- Indre krefter
 - Gravitasjonelle
 - Elektromagnetiske

 - Endres ved akselerasjon
 - Omfatter også effekter av termisk ekspansjon ved ujevn oppvarming

 - Påvirker (belaster) materialet bare hvis de er inhomogent fordelt
- Ytre krefter
 - Ytre krefter som gir belastning forekommer som balansert par

 - Ubalanserte krefter (netto kraft) gir opphav til akselerasjon
- Deformasjon
 - Belastning fører til deformasjon
 - Forholdet mellom belastning og deformasjon gis av materialets mekaniske egenskaper
 - Testes med strekkstav

Krefter, spenning (eng. *stress*) og deformasjon (*strain*)

- Spenning = kraft per areal

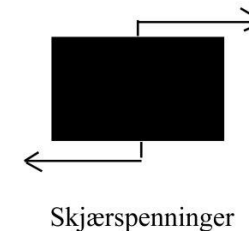
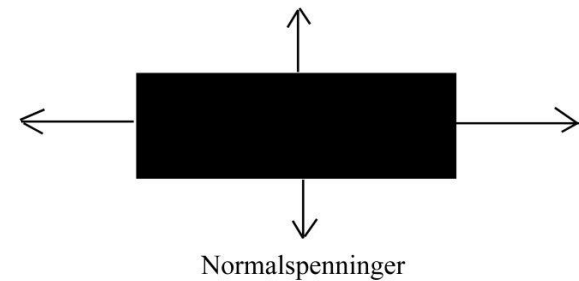
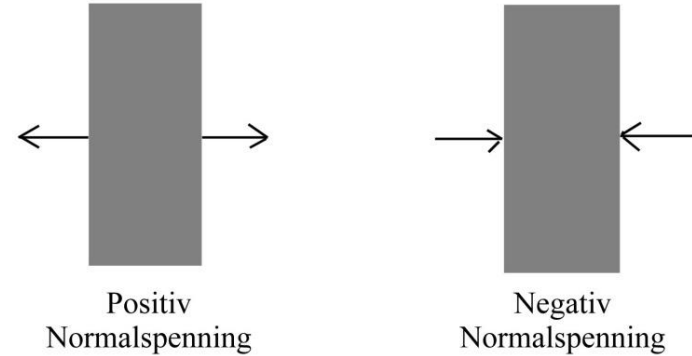
$$\vec{s}_i = \frac{\vec{F}}{S_i}$$

Enhet $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$

= "Trykk"

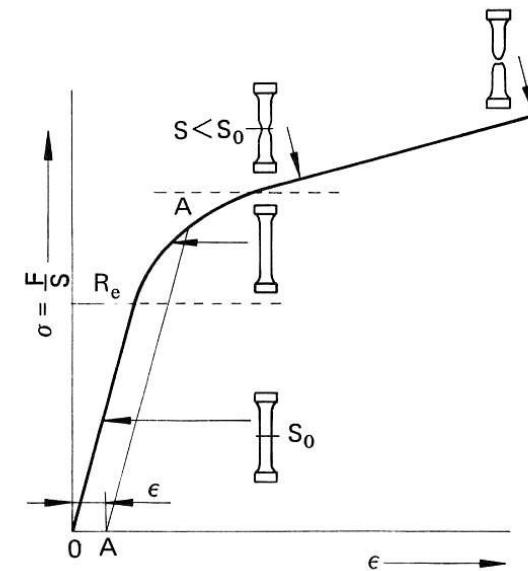
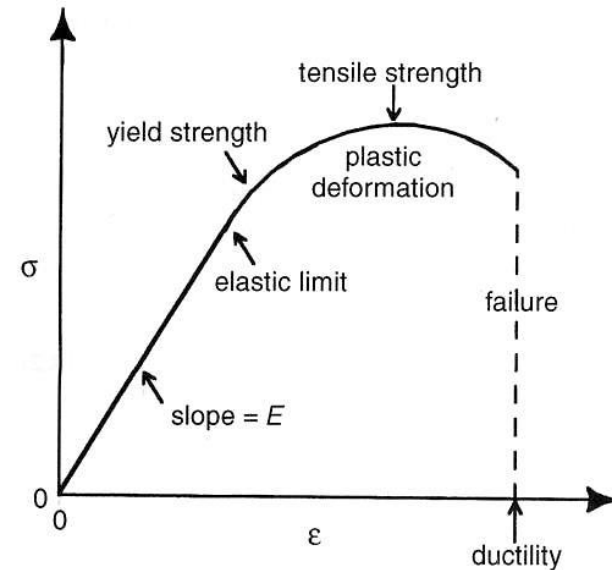
For faste stoffer:

- Normalspenning
- Skjærspenning



Deformasjon - oversikt

- Normal tøyning $e = \frac{\Delta l}{l_0}$
- Skjærtøyning
- Spenning $s = F / S_0$ kraft / startareal
- Sann spenning $\sigma = F / S(e)$ kraft / sant areal
- Elastisk deformasjon
 - Stivhet; elastisitetsmodul, E-modul: $E = s / e$
 - Deformasjon: $e = s / E$
 - Spenning: $s = E e$
- Plastisk deformasjon – avhenger av metode
 - Elastisitetsgrensen (yield point)
 - Flytespenning (yield strength) (0.2% irreversibel deformasjon)
 - Strekkfasthet (tensile strength)
- Brudd
 - Duktilt
 - (eller sprøtt)



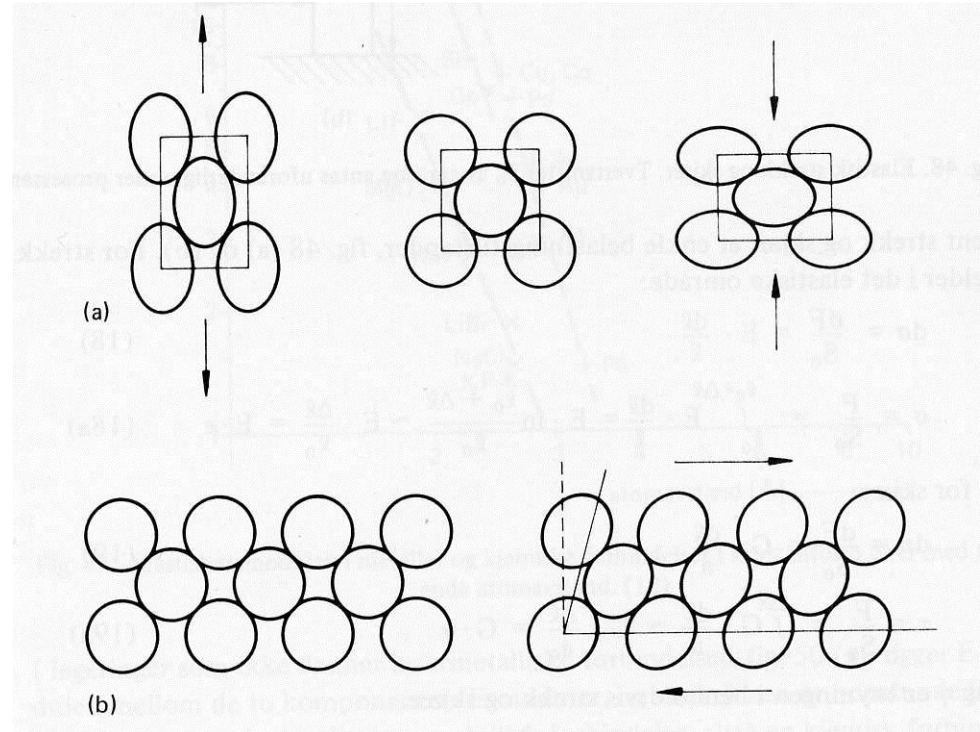
Elastisk deformasjon (tøyning, *strain*)

- Elastisk deformasjon: Forandrer avstander, men får ikke nye naboer

$$s = Ee \quad \text{eller} \quad e = \frac{s}{E}$$

- Poissons forhold:

$$\nu = -\frac{\Delta l_y / l_y}{\Delta l_x / l_x}$$



Elastisk deformasjon; interatomiske potensialer

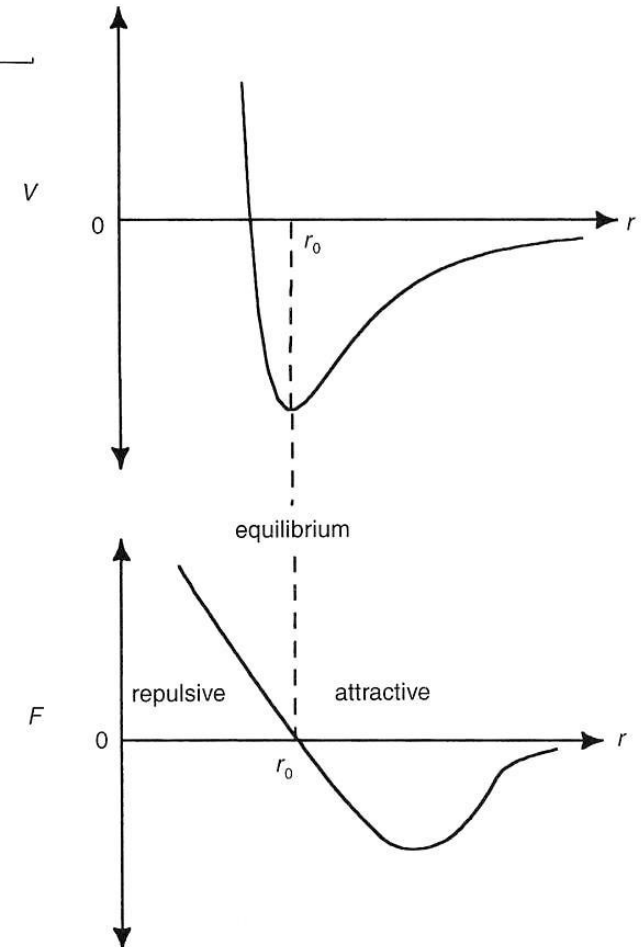
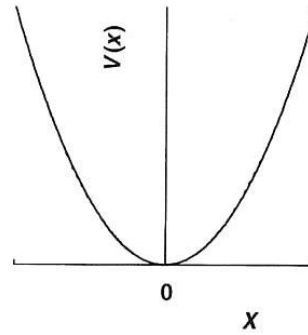
- Hooke; harmoniske fjærer: Kraft mellom atomer er proporsjonal med avstand fra likevektspunktet (symmetrisk):

$$F = -kx$$

- Generelt: Kraften F er proporsjonal med den deriverte av potensiell energi V mht avstanden r .

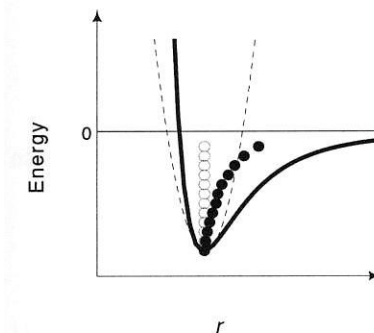
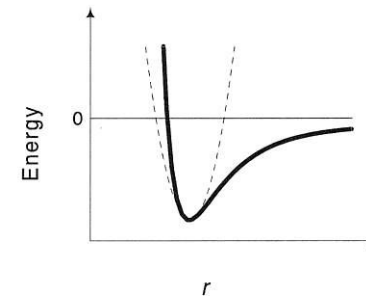
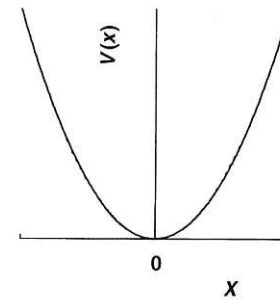
$$F = -\frac{dV}{dr}$$

- Men i bindinger mellom atomer og ioner er energien og kraften ikke symmetrisk (anharmonisitet, se fig.)
- E-modulus (stivheten) er den deriverte av F -vs- r -kurven.



Termisk ekspansjon

- Skyldes anharmonisiteten i interatomisk potensial
- Likevektspunktet forflytter seg ved oppvarming
- Oppgis som relativ økning i dimensjon per grad K
- Typisk $10 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
 - De aller fleste stoffer har betydelig termisk ekspansjon
 - Noen stoffer har nær null termisk ekspansjon
 - Unntak: noen stoffer har negativ termisk ekspansjon

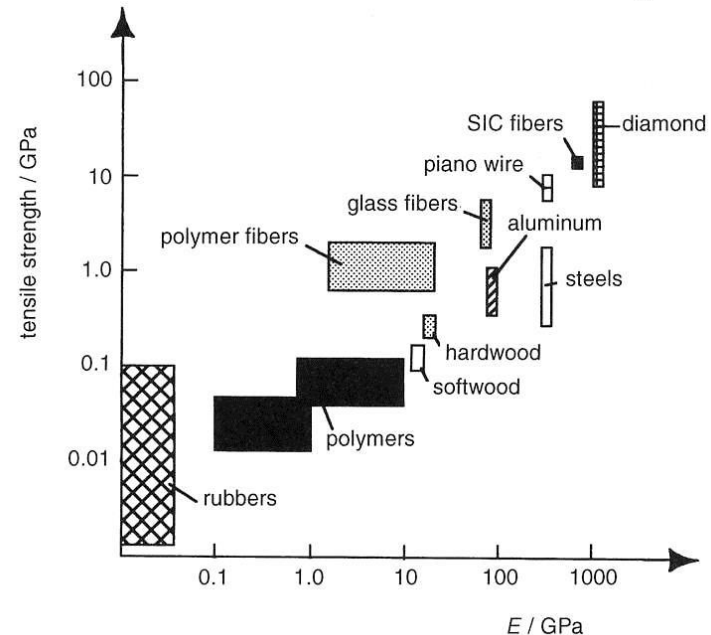
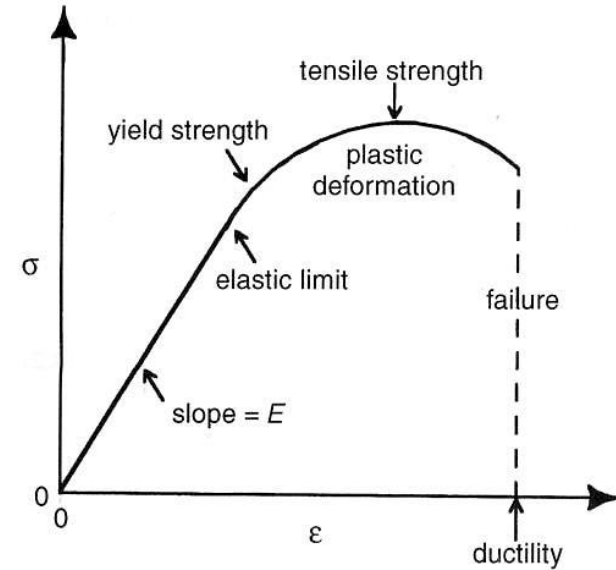


Plastisk deformasjon

- Plastisk deformasjon – avhenger av metode
 - Elastisitetsgrense
 - Flytespenning (ved 0.2% irreversibel deformasjon)
 - Strekkfasthet
 - Grovt sett proporsjonal med E-modulus

- Hardhet

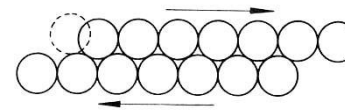
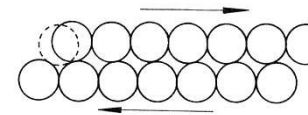
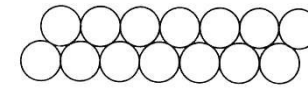
- Duktilt brudd
 - Duktilitet (plastisitet)



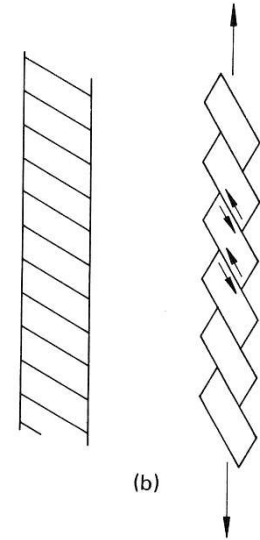
Figurer: M.A. White: Properties of Materials

Plastisk deformasjon

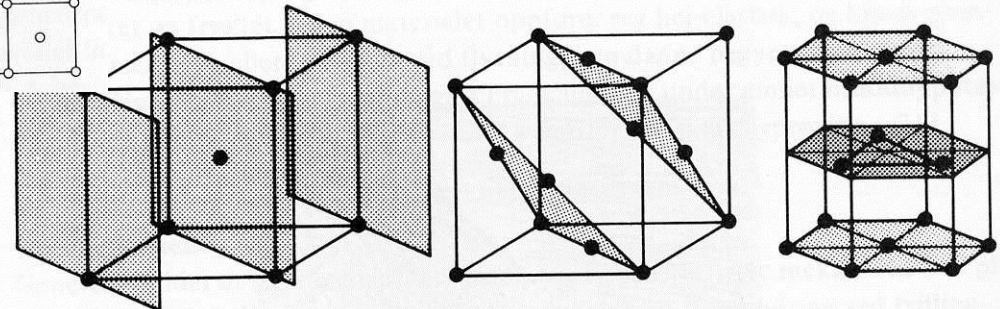
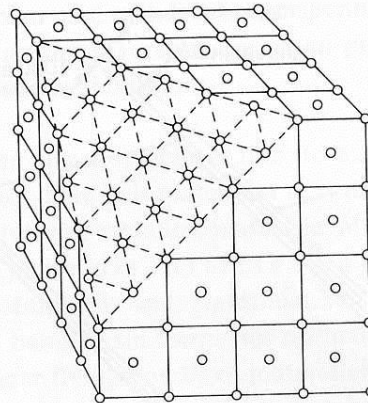
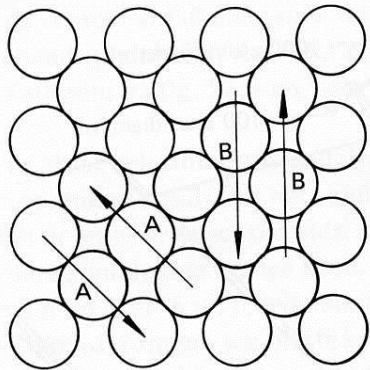
- Skyldes skjærspenninger
- Foregår i tettpakkede plan – glideplan



(a)

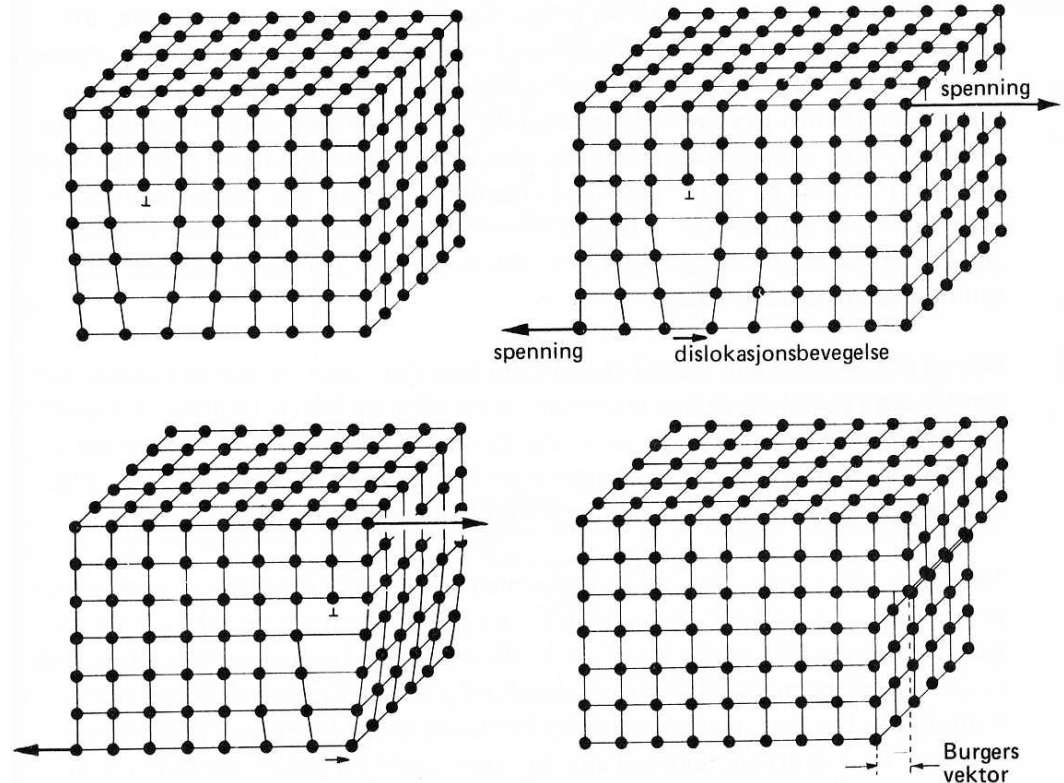


(b)



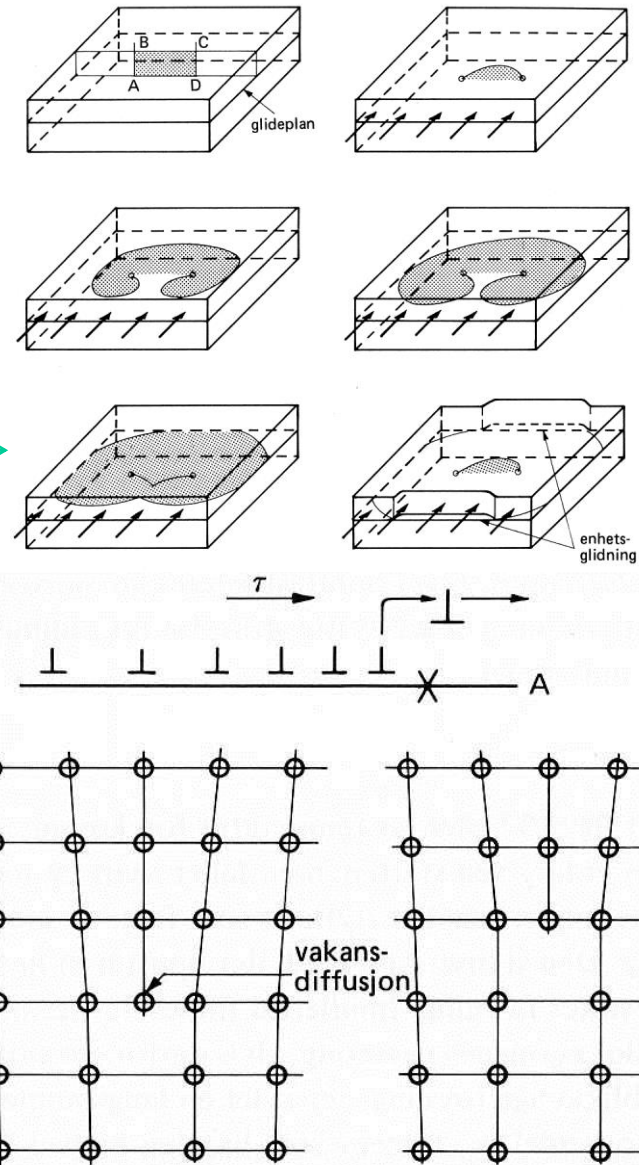
Plastisk deformasjon

- Foregår ved dannelse og bevegelse av dislokasjoner

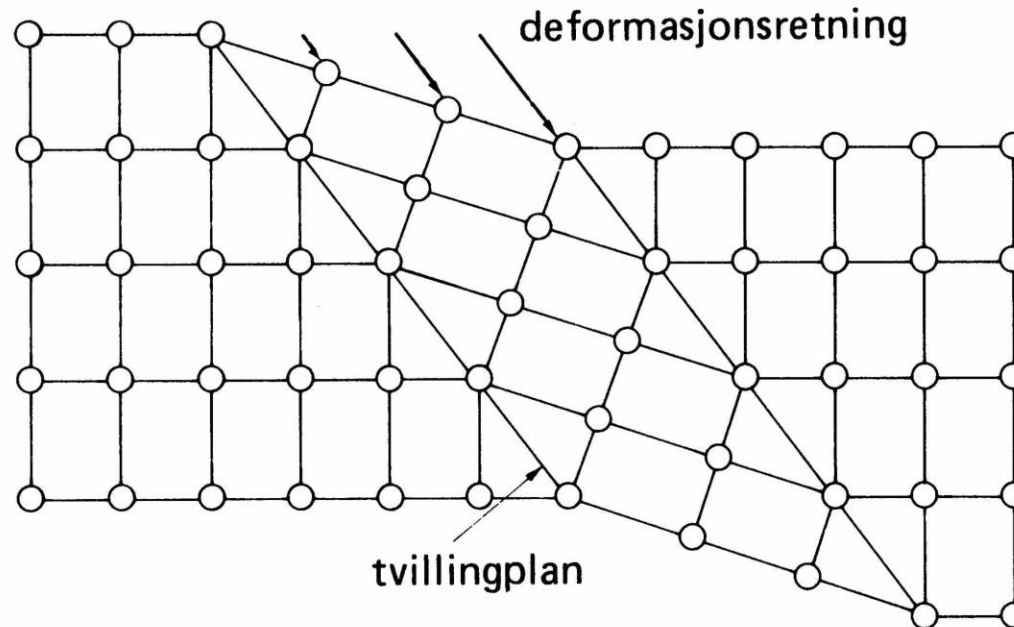


Mobilitet av dislokasjoner. Herding

- Flere mekanismer hindrer dislokasjoner i å bevege seg:
 - Fremmedatomer og andre punktdefekter
 - Utfelling
 - Korngrenser
 - Dislokasjoner hefter hverandre
- Mekanismer for å omgå hindrene
 - Frank-Read-kilder
 - Vakansklatring
 - Diffusjon



Deformasjon ved tvillingdannelse



Brudd !

- Duktilt brudd
- Sprøbrudd

- Bruddseighet = spenning ved brudd

- Forutsigbart i metaller + plaster
 - men obs: materialtretthet

- Uforutsigbart i keramer
 - Avhenger av
 - Defekter
 - Overflatefinish

 - Mottiltak:
 - Transformasjonsstyrking
 - Kompositter



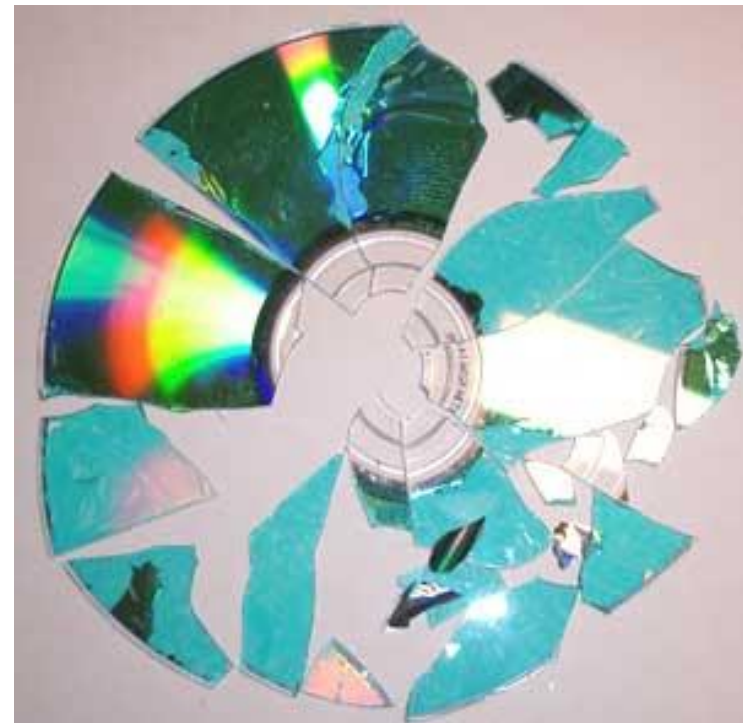
Ductile shear fracture in Aluminum



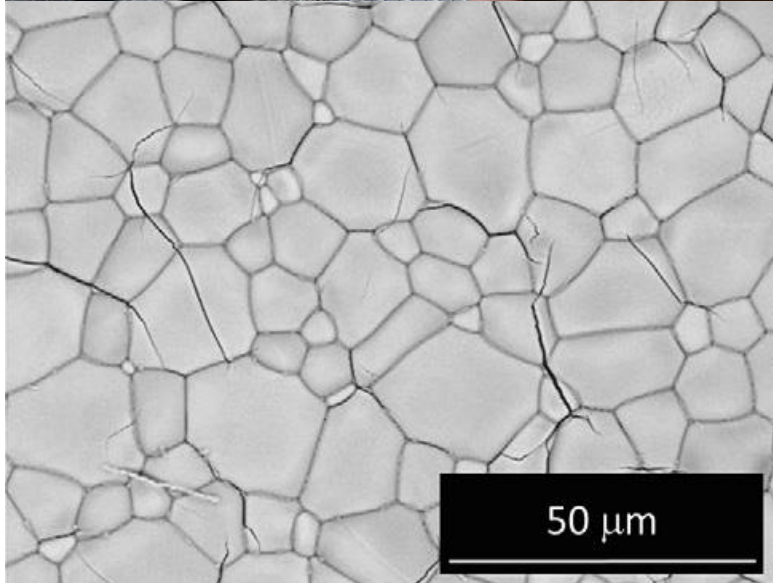
Ductile fracture in steel



Brittle fracture in steel



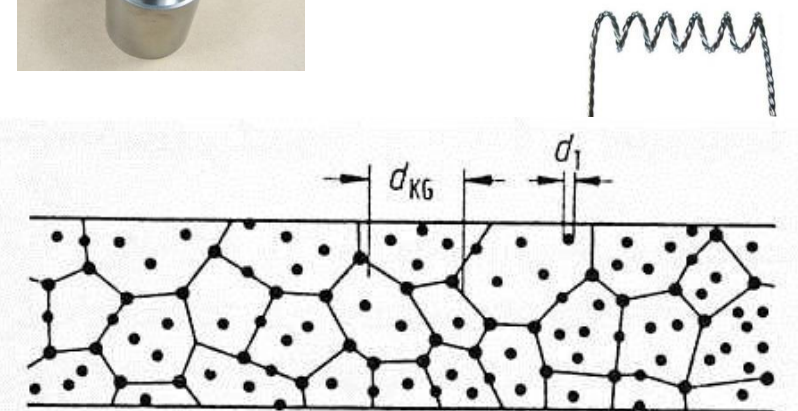
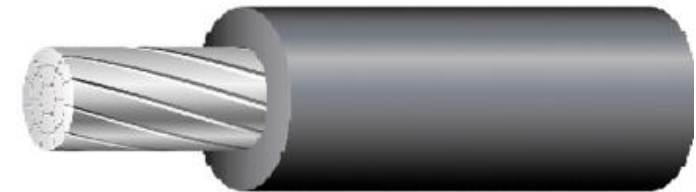
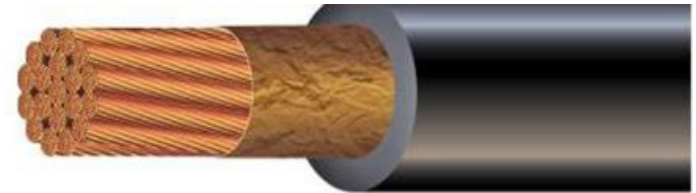
Termospenninger



- Herding ved rask avkjøling:
 - Sammentrekning i overflaten
 - Flyt av materiale til overflaten
 - Kompresjonsspenninger i overflaten når volumet under trekker seg sammen ved lavere temperatur
 - = Herding
- Temperatursvingninger i anisotrope materialer
 - Korn utvider seg forskjellig i forskjellige retninger
 - Spenninger
 - OK ved høy temperatur: dislokasjoner + diffusjon
 - Sprekkdannelse ved lave temperaturer
 - Små korn + porer kan hjelpe

Konstruksjonsmaterialer; Metalliske materialer

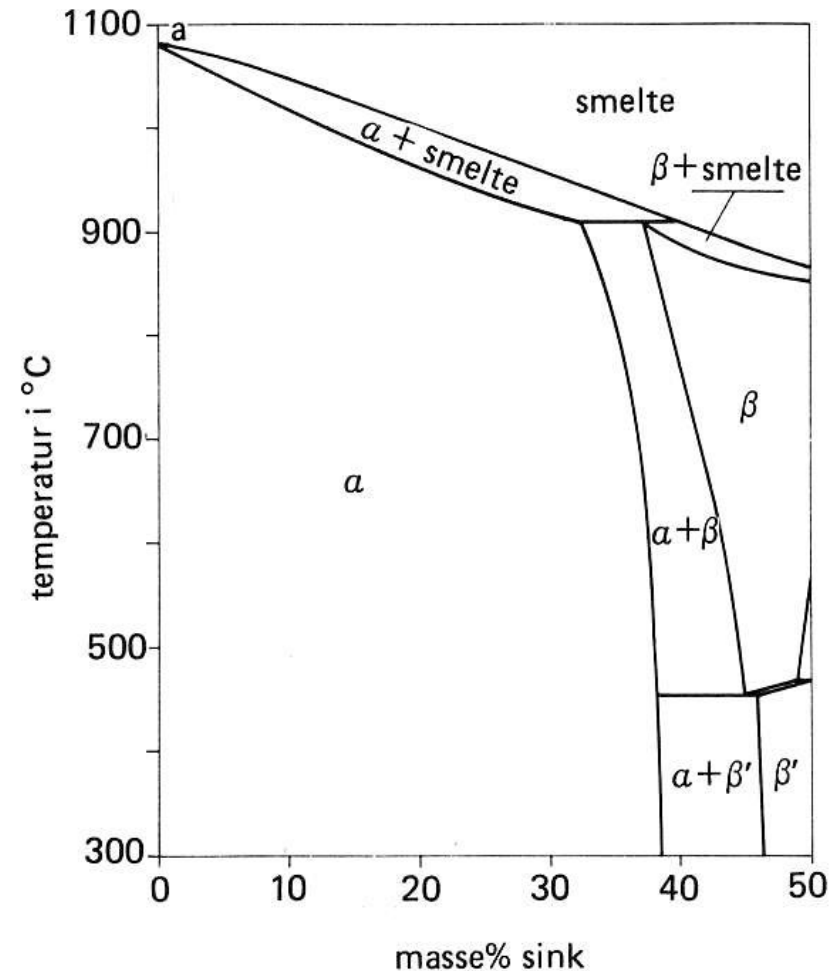
- Rene metaller
 - Bløte
 - Høy elektrisk ledningsevne
 - I bruk som elektriske ledere
 - Cu, Al
 - Høytemperaturmaterialer
 - W, Mo, Ta
 - W i glødelamper
 - ThO₂-partikler dispergert
 - Pulvermetallurgisk forming



Figur: E. Hornbogen: Werkstoffe

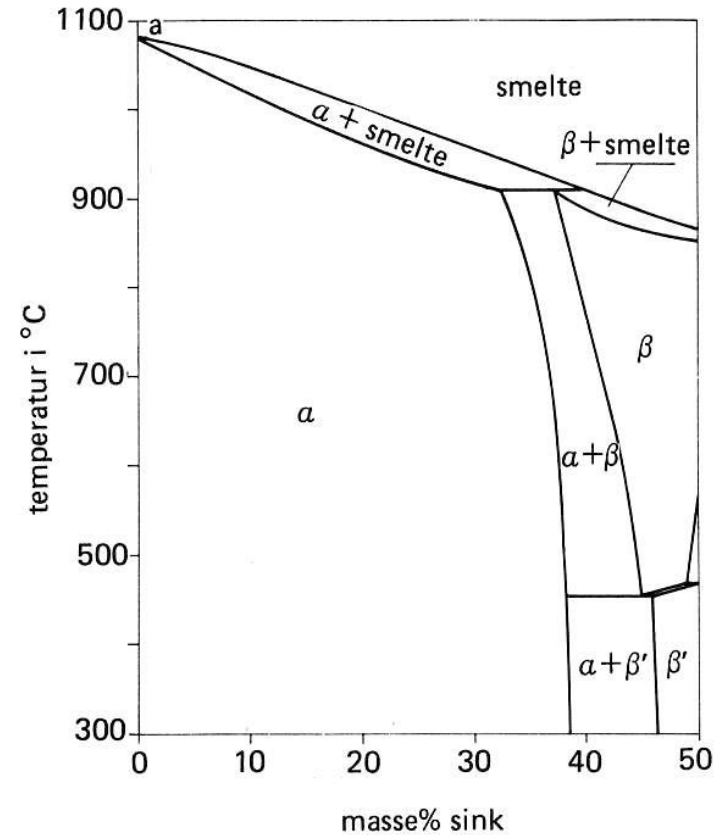
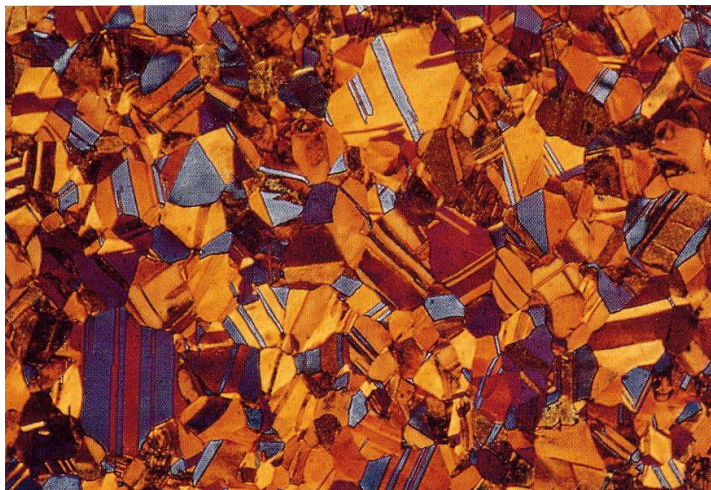
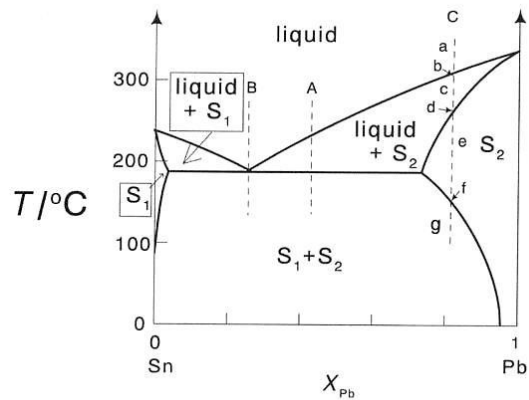
Legeringer – oversikt over herdbare legeringer og støpelegeringer

- Legeringer gjøres hardere (herdes) i tre kategorier. Dette har med hvordan og hvor effektivt dislokasjoner hindres i å gli og derved deformere materialet.:
 - Løsningsherdbare legeringer
 - Utskinningsherdbare legeringer
 - Omvandlingsherdbare legeringer
- Alternativt kan man vektlegge lavest mulig smeltepunkt, ved å gå etter eutektikum:
 - Støpelegeringer



Løsningsherdbare legeringer

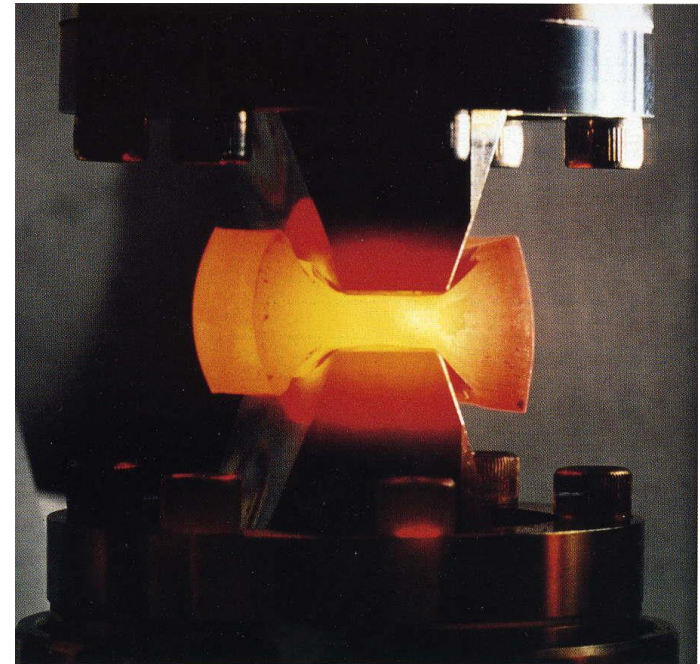
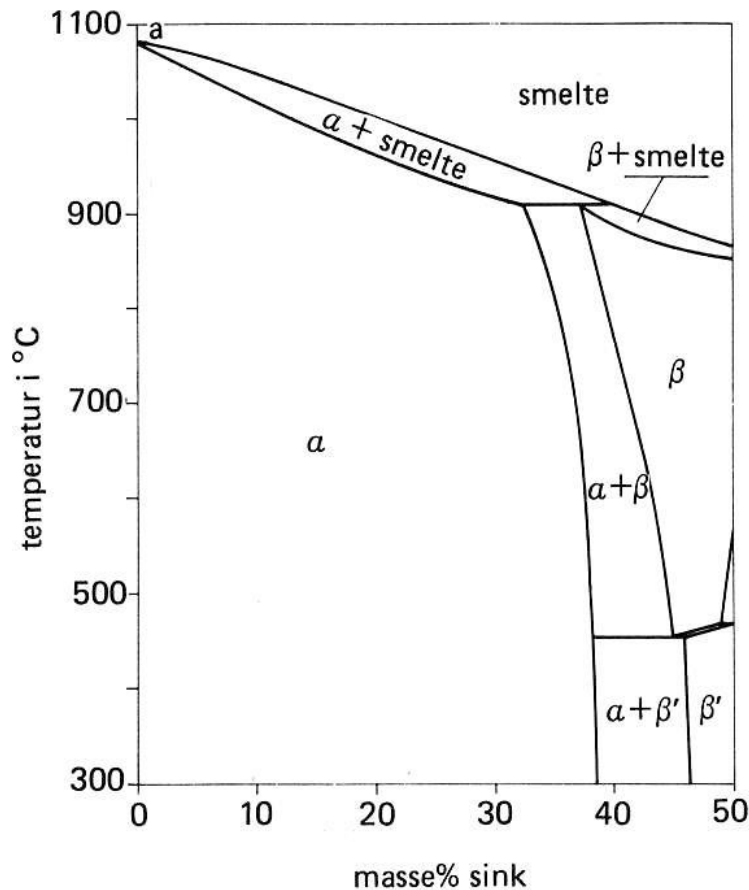
- Enfase
- Dislokasjoner hindres av fremmedatomer



Figurer: M.A. White: Properties of Materials, A. Almar-Næss: Metalliske Materialer, W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

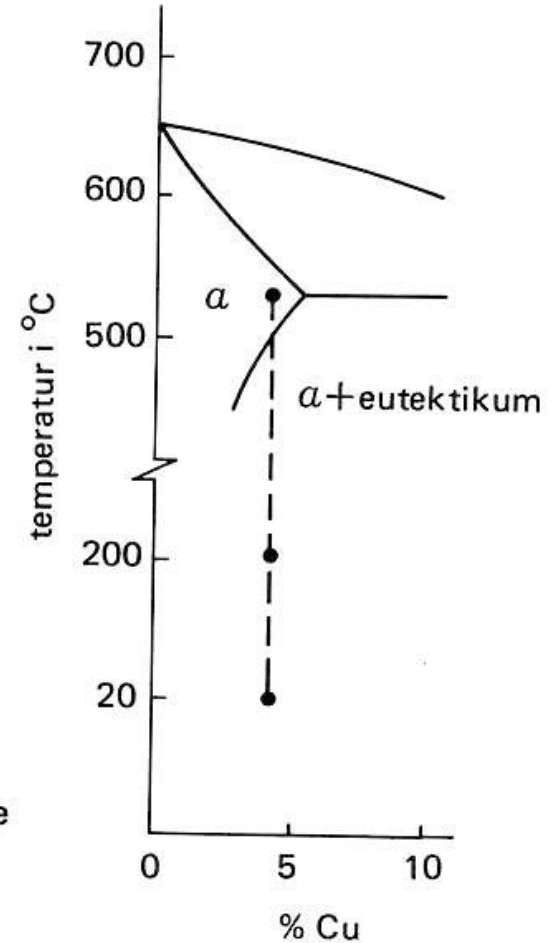
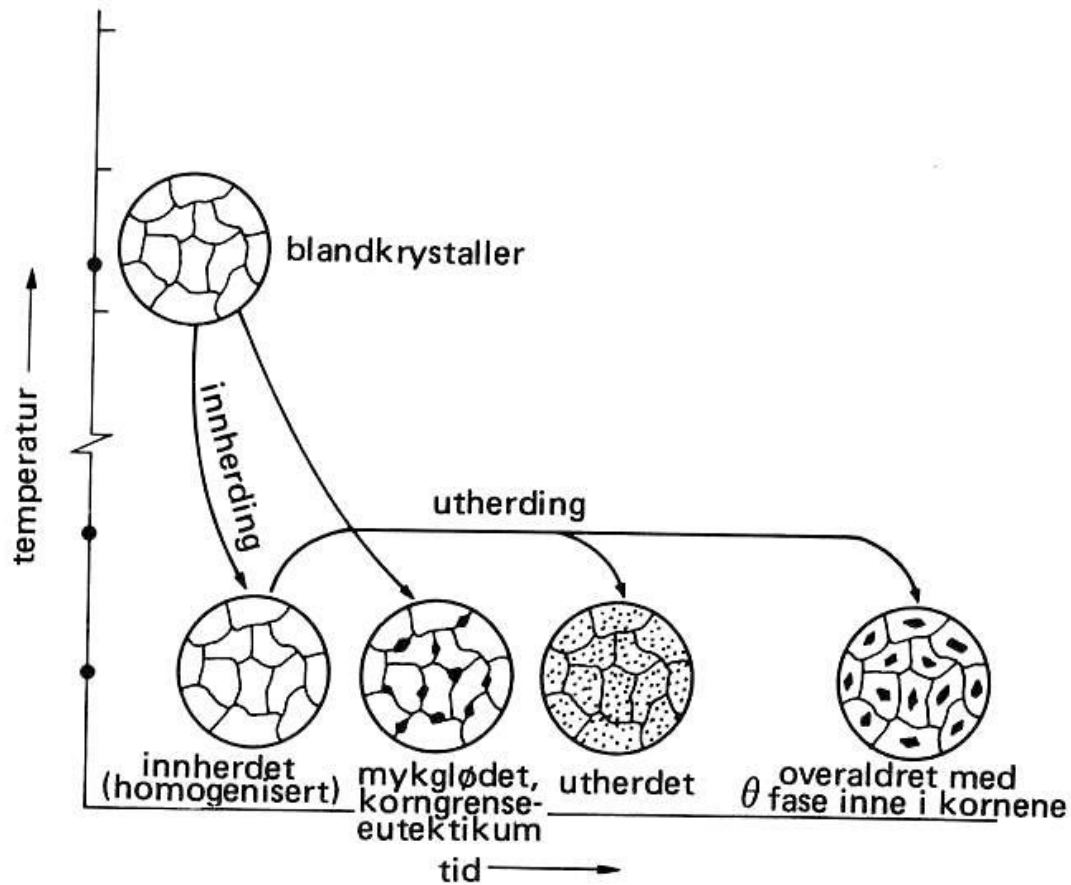
Utskillningsherdbare legeringer

- Høyere innhold av legeringselement
- Tofaseområde
- Dislokasjoner hindres av utfellinger



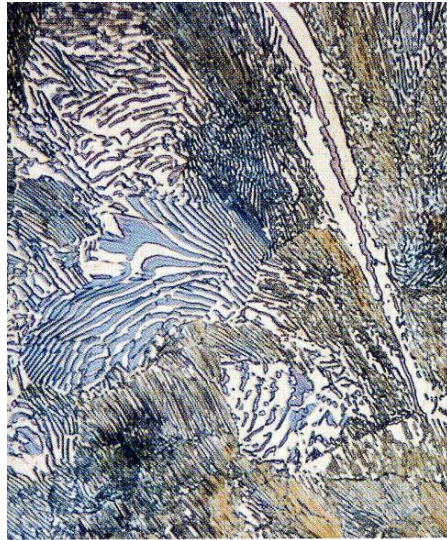
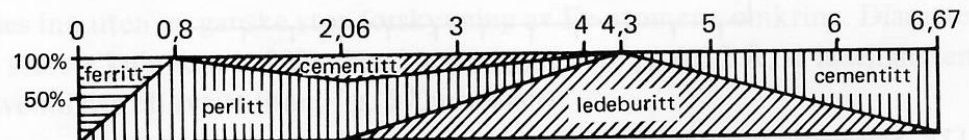
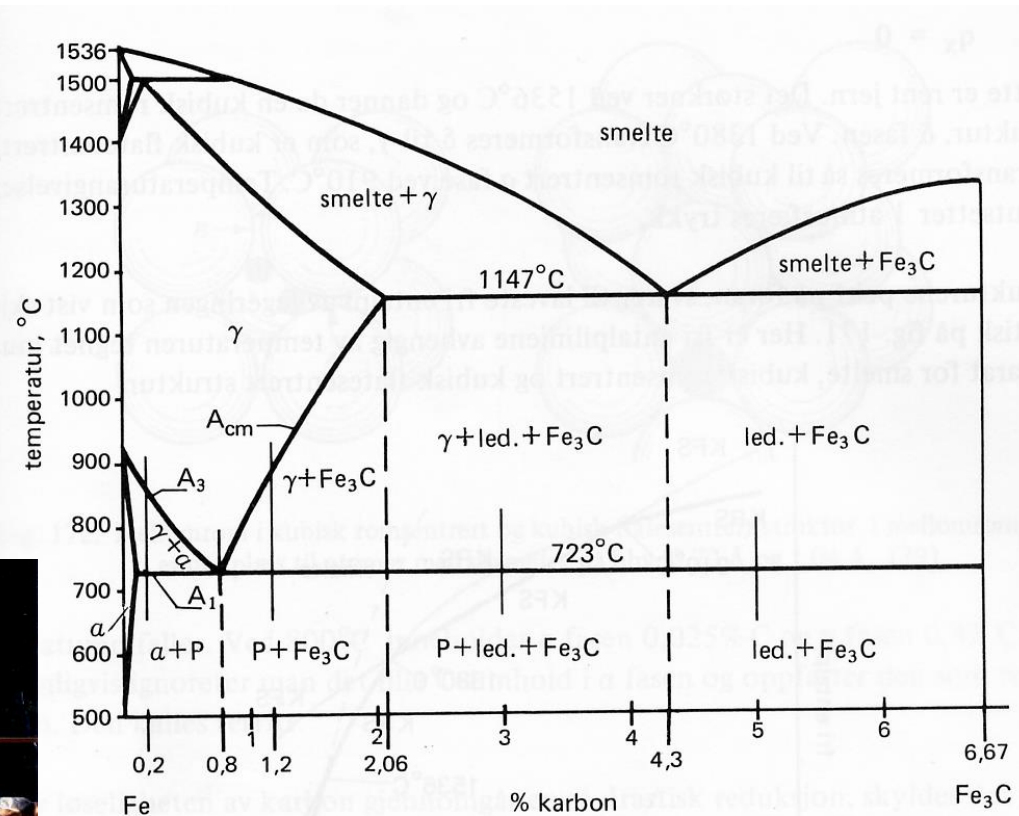
Figurer: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering, A. Almar-Næss: Metalliske Materialer

Utskillingsherdbare legeringer



Stål – utfellings- og omvandlingsherdbare Fe-C-legeringer (austenittiske og martensittiske stål)

- Jern (lite C)
- Stål (mer C – forskjellige varmebehandlinger)
- Støpejern (enda mer C)

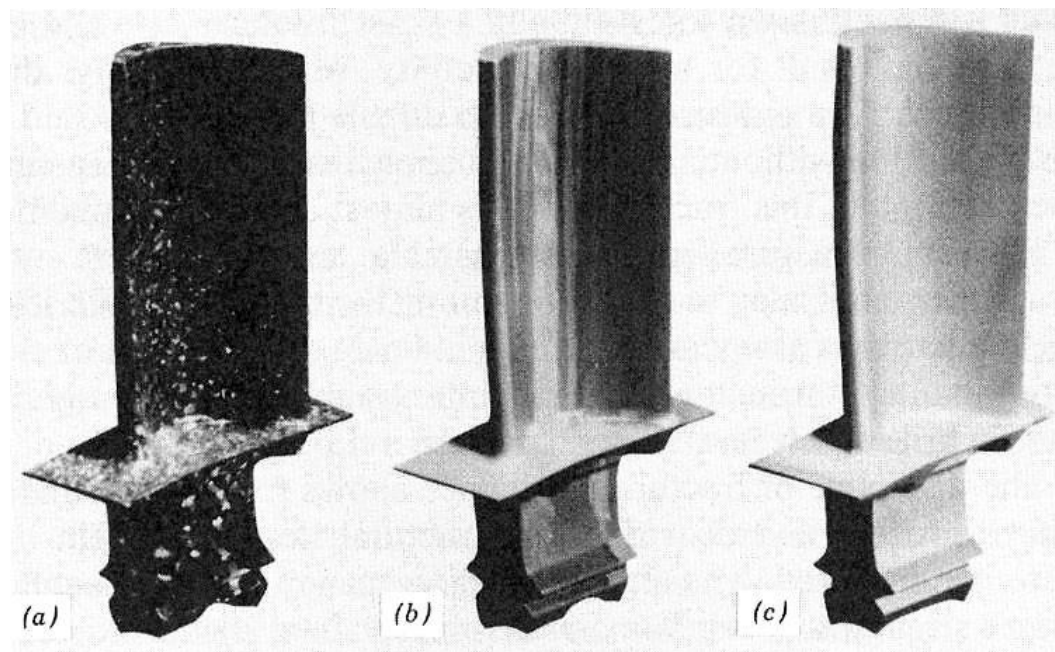


Superlegeringer

- Utskinningsherdbare legeringer
- Hovedkomponent Cr, Ni, Co, Fe
- Legeringselementer Al, Si, Ti, Mo, Nb, W
 - herdende sekundærfaser
 - beskyttende oksidlag
 - Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2
- Faste og korrosjonsbestandige ved høye temperaturer
 - rotorblader for jetmotorer og gassturbiner
 - Rettet størkning, enkrystaller, belegg, osv. øker temperaturbestandigheten ytterligere

Gass- og flymotorturbinblader lages av stadig forbedrede superlegeringer:

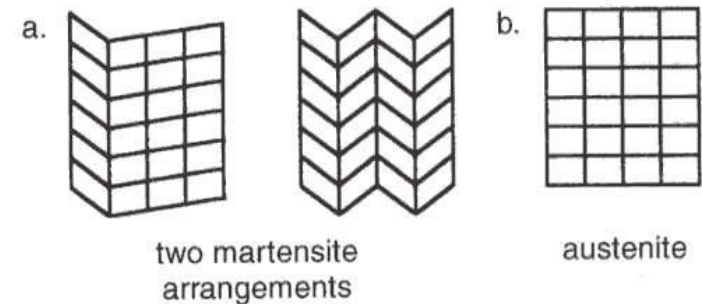
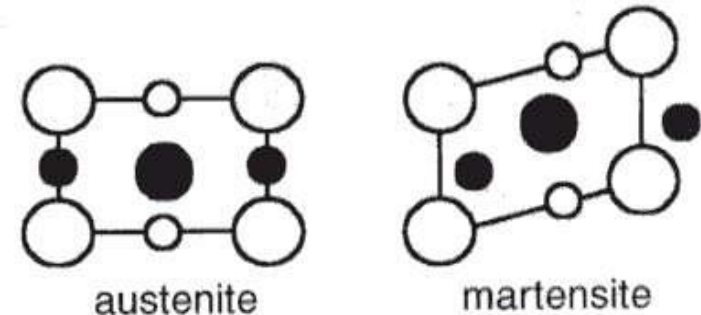
Herdet polykrystallinsk ...rettet størkning ...enkrystall



Figur: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

Hukommelsesmetall

- Eksempel på hukommelsesmetall
 - To polymorfe strukturer av en Ni-Ti-legering (Nitinol)
 - Høy temperatur: Symmetrisk austenittisk
 - Lav temperatur: Asymmetrisk martensittisk
 - Deformasjon ved lav temperatur av den myke martensittiske strukturen ved tvillingdannelse i flere mulige retninger
 - Oppvarming; overgang til austenittisk; bare én mulighet; opprinnelig form gjeninntas.
- Eksempel på bruk: Ventiler, utblokkere o.a. i kroppen, oljeinstallasjoner, m.m. som utvides til normal størrelse etter installasjon.

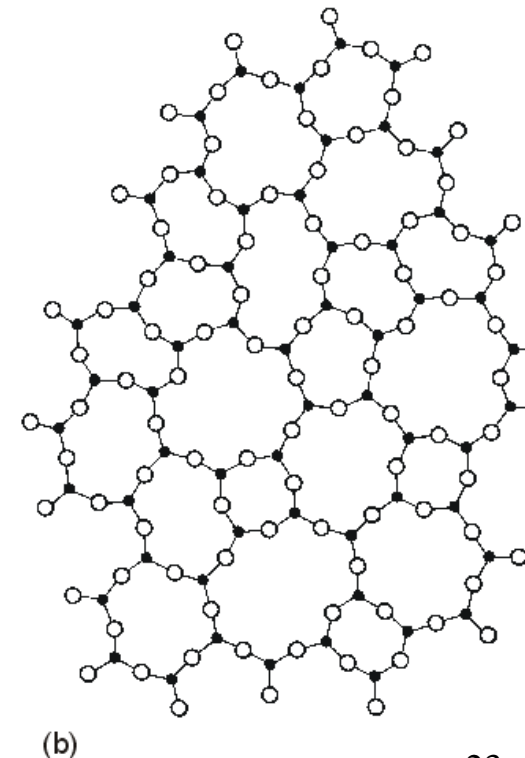
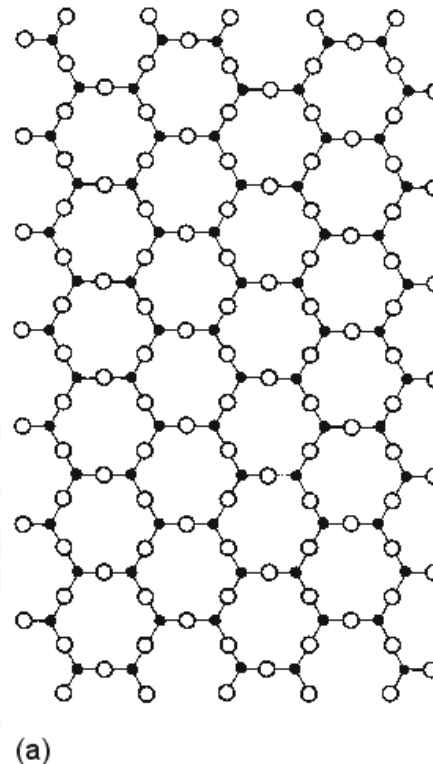
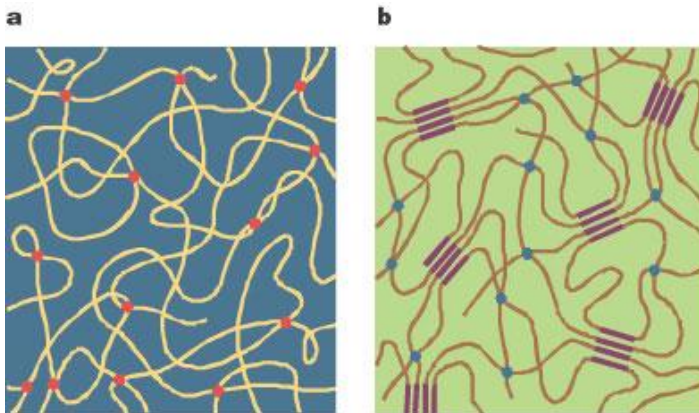


Amorfe stoffer, glass, polymerer

- Korttrekkende orden
- Ingen langtrekkende orden
- Glasstemperatur i stedet for smeltetemperatur
- Diffuse diffraksjonsspektra

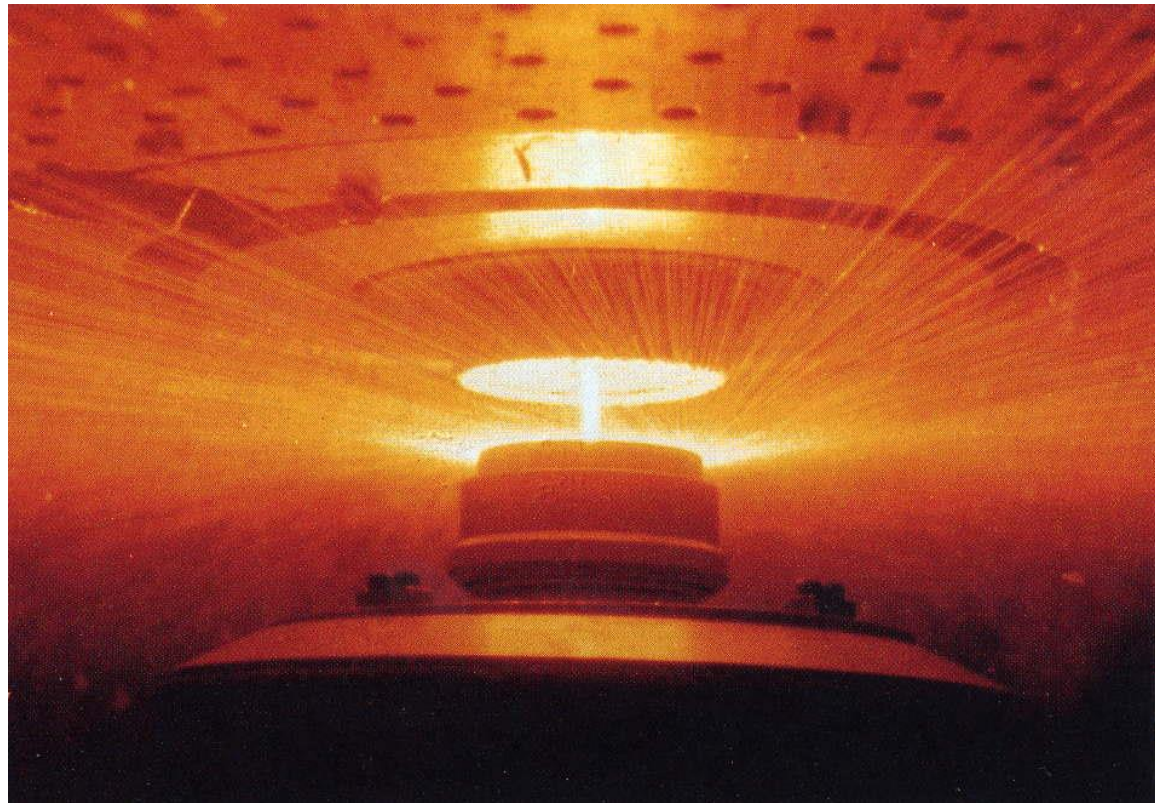
- Amorfe keramer
- Amorfe metaller
- Glass (faste væsker)
- Polymerer

Figur: Shriver and Atkins: Inorganic Chemistry



Metalliske glass

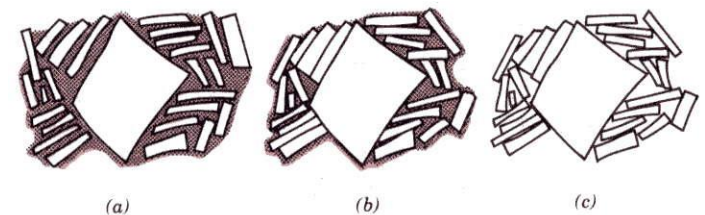
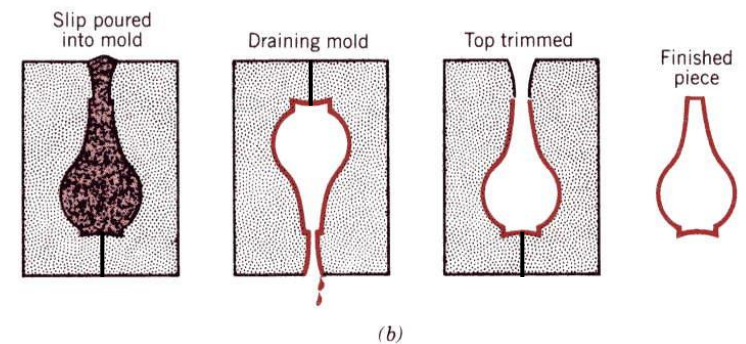
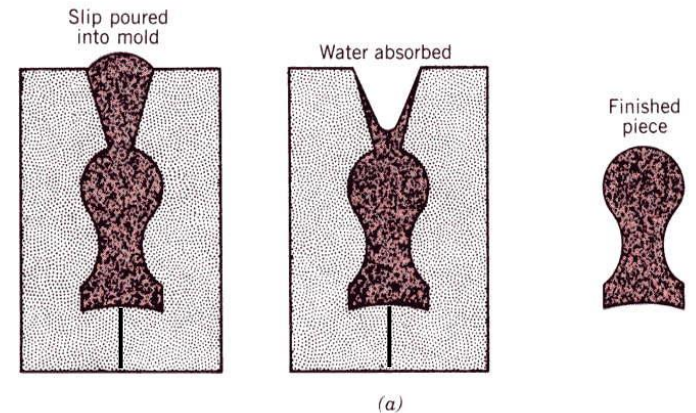
- Meget hurtig avkjøling (eks. som dråper som skytes mot et spinnende, avkjølt kopperhjul)
- Amorfe
- Eks. $\text{Fe}_{0.8}\text{B}_{0.2}$ eller $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$
- Nye egenskaper
 - Mekaniske
 - Magnetiske
 - Katalytiske



Figur: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

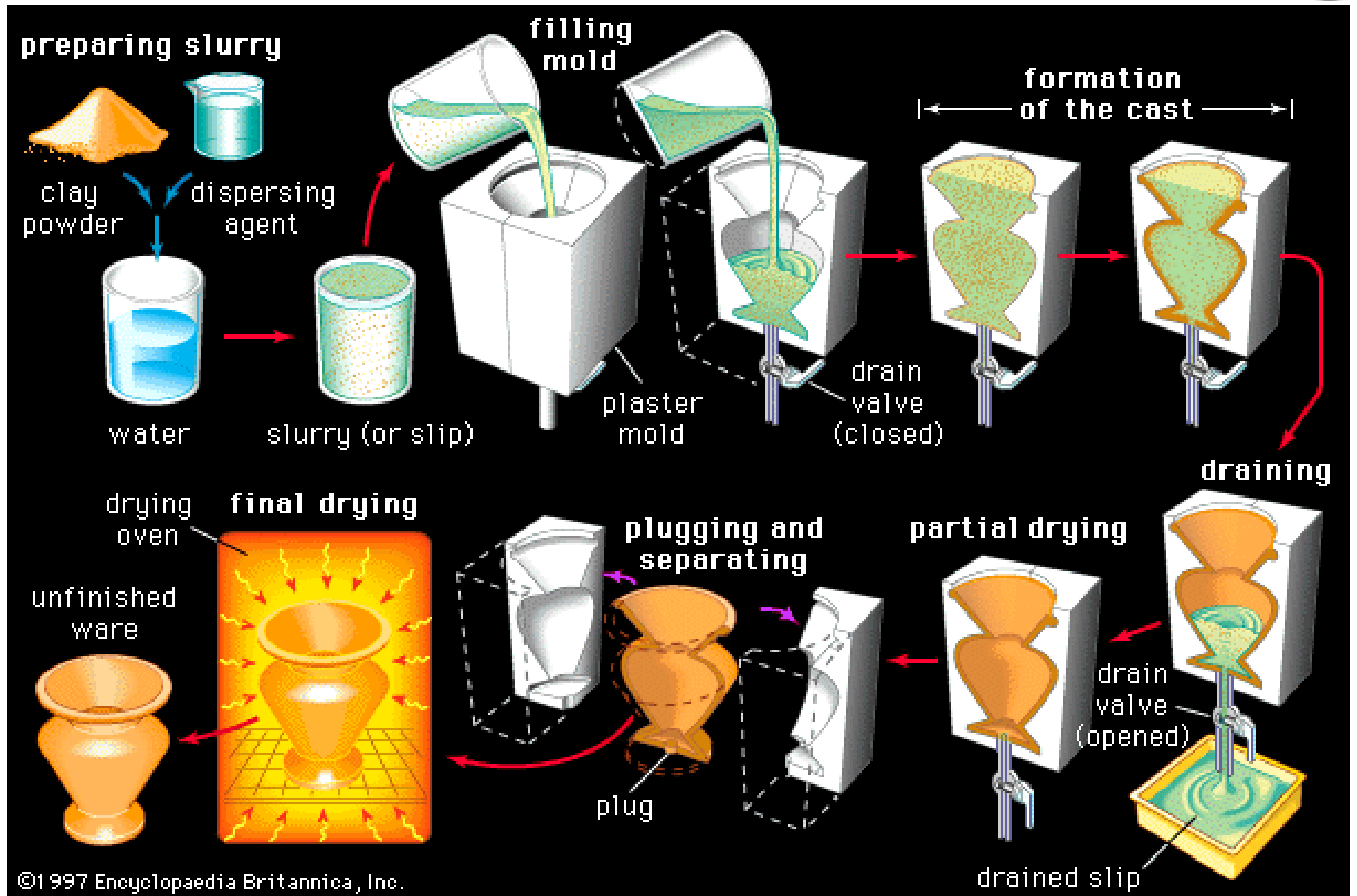
Tradisjonelle keramiske materialer: Oksidkeramikk

- Brente, leirbaserte materialer
 - Stabile; syre+base
 - alkali-, jordalkali- og aluminiumsilikater
 - leirkeramikk
 - porselen:
 - Kaolinit, feltspat, kvarts
 - Suspensjon av kaolinit i vann – tyktflytende væske
 - Forming ved dreining eller slikkerstøping
 - Brenning
 - Glasering
 - Porsgrund Porselen, Norsk teknisk porselen



Figur: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

Slikkerstøping (slip casting)



Ildfastmaterialer

- Høytemperaturbruk i smelteovner og lignende, samt i andre tekniske og vitenskapelige sammenhenger
- Tradisjonelle, silikatholdige sammensetninger
< 2000°C
- Renere oksider
< 3000°C
 - BeO, MgO
 - ZrO₂
 - ThO₂
- Termiske barrierer



Keramiske skjæreverktøy

- Transformasjonsstyrket tetragonalt Y-stabilisert ZrO_2
 - Metastabil tetragonal form
 - Går over til stabil monoklin form i sprekkefronten: Sprekk og energi avledes; sprekken stanser

- Kniver for fileteringsroboter

- Hardere enn stål



Foto: Kyocera

Hydratiserbare silikater: Sement og betong

Kalsiumsilikater og –aluminater

Brent ved 1400°C

(fri for H₂O og CO₂)

= Sement

+ sand

= Mørtel

+ pukk etc.

= Betong

Herding omfatter reaksjoner med vann
(hydratisering) og CO₂ (karbonatisering)

Kan herdes under vann

Norsk spesialitet: mikrosilika(SiO₂)-
tilsetninger

Armert betong

Spennarmert betong

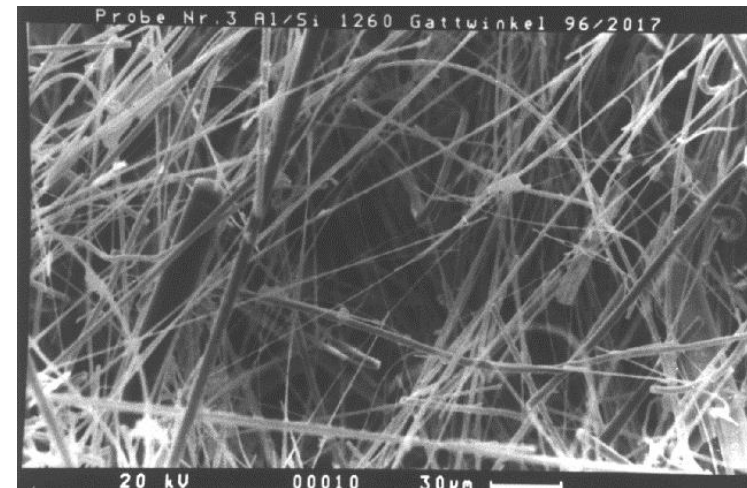
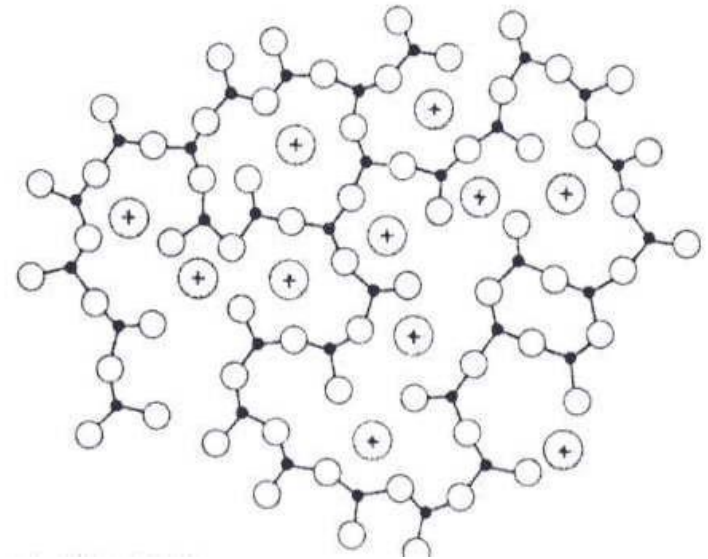


Fra <http://www.fesil.com/microsilica.htm>



Glass og glasskeramer

- Amorfe
- Keramiske ved lav temperatur
- Mykner ved glasstemperaturen T_g
- Kvantsglass (smeltet SiO_2)
- Sodaglass ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2$)
- Sodakalkglass (+CaO)
- Borsilikatglass (+ B_2O_3)
- Blyglass (+PbO)
- Glassull, mineralull – isolasjon
- Glassfiber – for kompositter
- Glasskeramer; Smeltes og størkner som glass, krystalliserer til keram

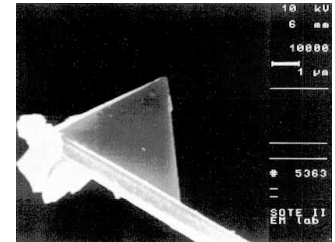


Figur: E. Hornbogen: Werkstoffe, <http://www.uni-koeln.de>

Elementære og ikke-oksidiske keramiske materialer

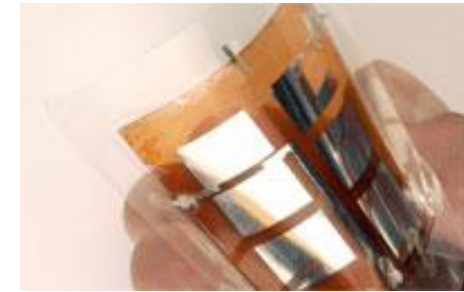
- C og Si
- Diamant hardeste kjente materiale; slipe- og skjæreverktøy
- Grafitt er et viktig konstruksjonsmateriale for mange tekniske applikasjoner
 $t_m = 3750^\circ\text{C}$
- Karbonglass, karbonglassfiber

- To eller flere ikke-oksidiske grunnstoffer
- Harde: SiC, Si₃N₄, AlN, WC, TiB₂

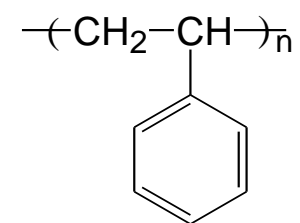
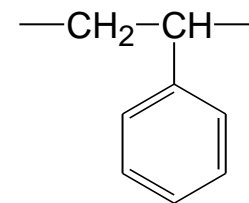
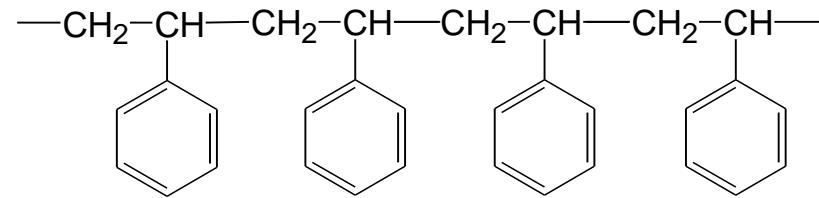
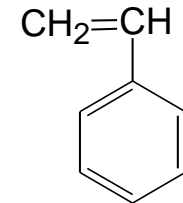
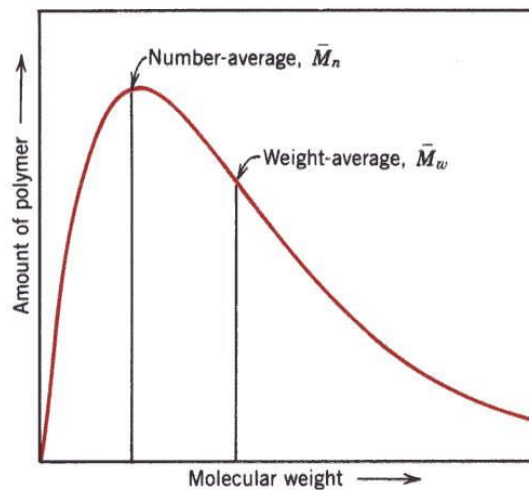


- Myke (skjærbare): BN

Polymermaterialer



- Råstoffer i hovedsak fra olje/gass (petrokjemi), samt i enkelte tilfeller fra naturen
- Polymerer fra monomerer
- Eksempel: Polystyren fra styren
- Fordeling av kjedelengder n og molekylvekt M_p



- Strekkfasthet øker med økende M_p :

$$\sigma_B = \sigma_{B,\max} \frac{A}{M_p}$$

Figur: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

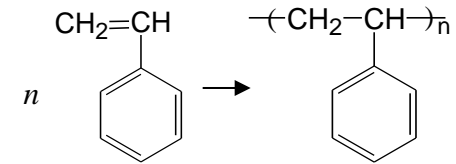
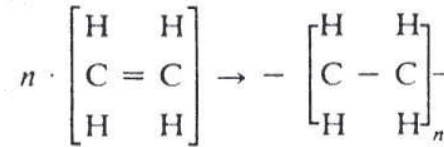
Polymerisering

- Addisjon

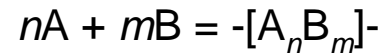
- Monomerer

- Eksempler

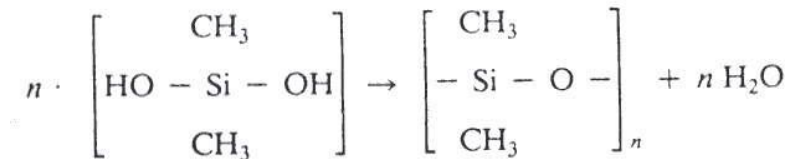
- polyetylen
- polystyren



- Kopolymerer

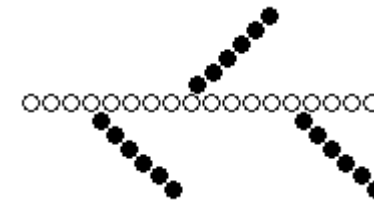
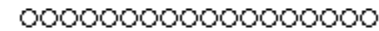


- Kondensasjon



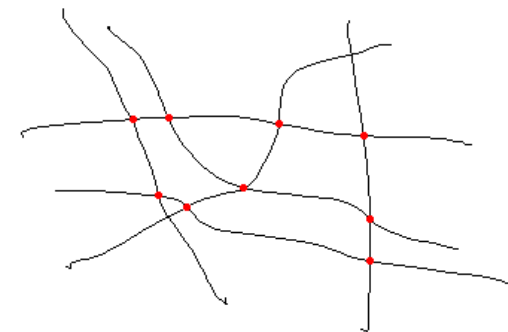
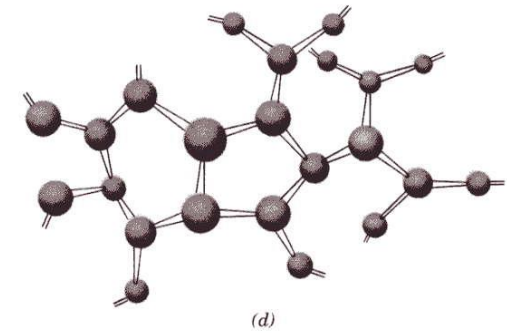
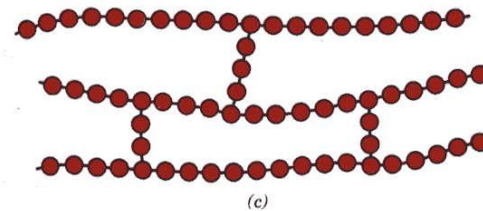
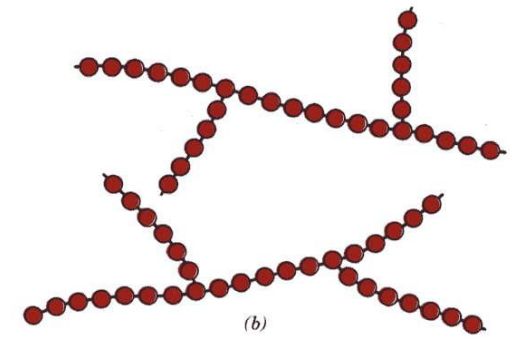
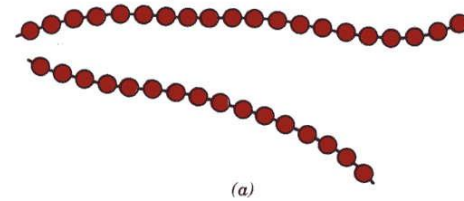
Kopolymerer

- Homopolymer (fra addisjon, kondensasjon)
- Kopolymerer
 - Blokk
 - Forgrenet (grafted)
 - Alternierende
 - Tilfeldig



Molekylære strukturer

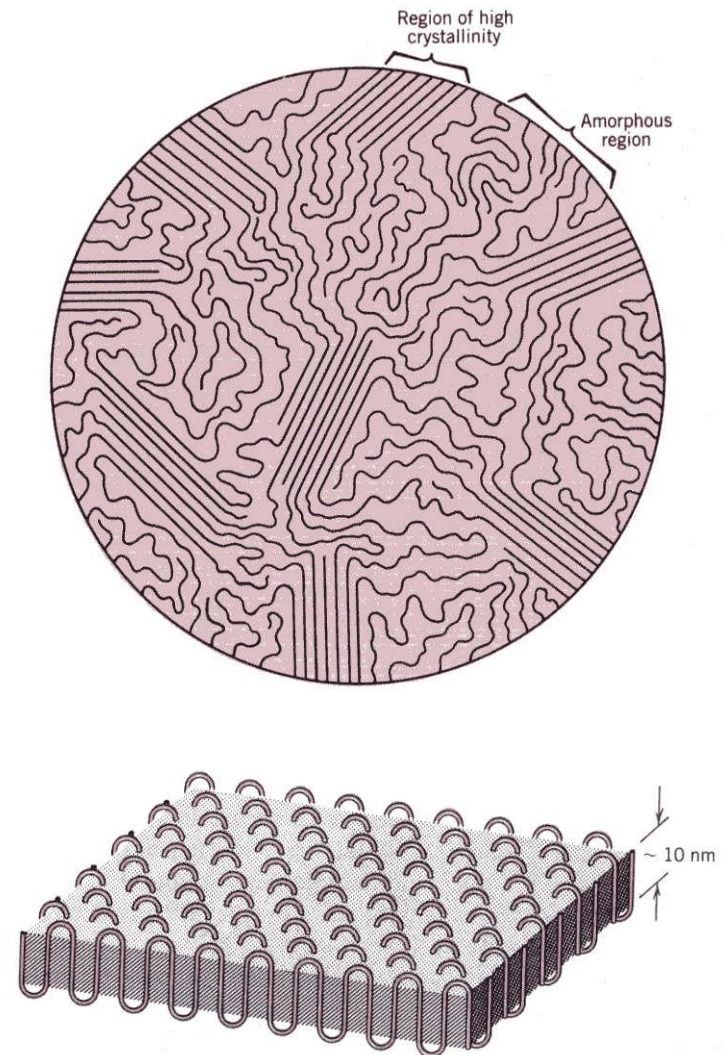
- Lineær
- Forgrenet
 - Korte grener: Hindrer krystallisering
 - Lange grener: Endrer plastisiteten betydelig
- Nettverk
 - Stigekoblede
 - Monomer med 3 bindinger
 - Krysskoblede (cross-linked) kjeder
 - o.a.



Figur: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

Krystallinitet

- Kjedefolding gir områder av krystallinitet
- Økt hardhet
- Amorfe og krystallinske plaster er sprø ved svært lave temperaturer, gjennomgår en mykning ved en T_g og smelter til slutt ved høy temperatur dersom de ikke er krysskoblede.



Figurer: W.D. Callister jr.: Materials Science and Engineering

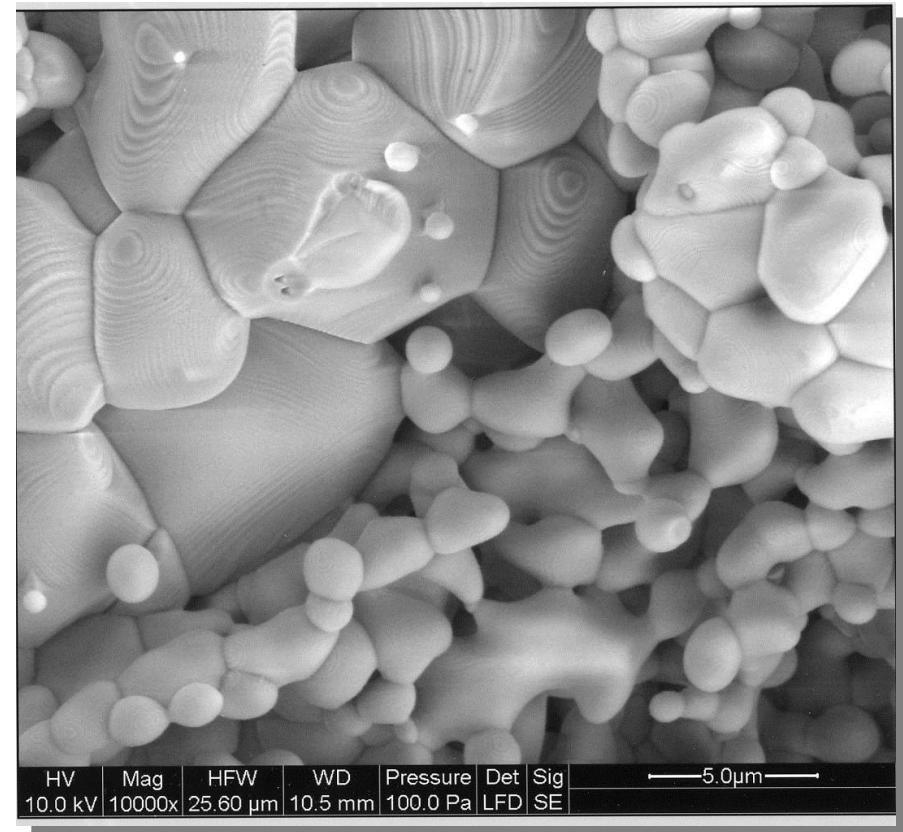
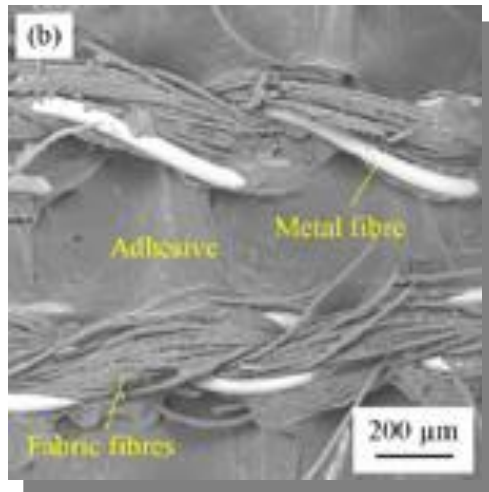
Hovedkategorier av polymermaterialer

- Smelteplaster (termoplaster)
 - Ikke krysskoblede
 - Myke, skjærbare
 - Smeltes og omsmeltes; støpbare
- Herdeplaster (duromere)
 - danner nettverk ved høy temperatur eller ved additiver (tokomponentplaster og -lim)
 - Harde
 - Ikke smeltbare (dekomponerer)
- Gummielastiske polymerer (elastomere)
 - Oppviklede og innfiltrerte kjeder
 - Ofte naturlig gummi (kautsjuk) som viktig ingredient



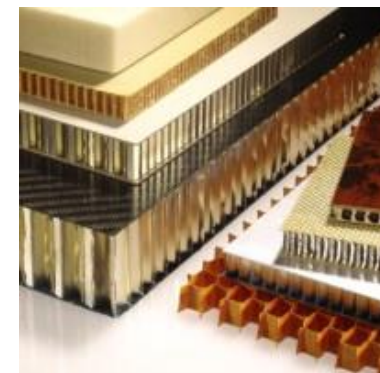
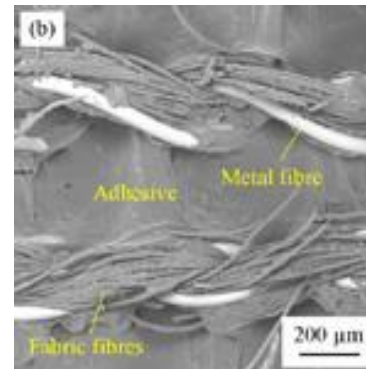
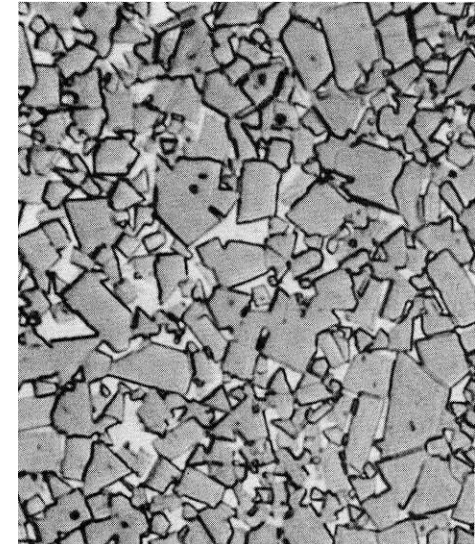
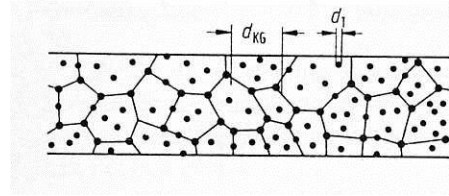
Kompositter

- Flere faser
- Kombinere egenskaper
- Stanse brudd
- Sikring mot fullstendig brudd



Komposittmaterialer

- Isotrope
 - Legeringer
 - Cermets, hardmetall
- Fiber
 - Fiberforsterket plast
 - Trematerialer
 - Armert betong
- Laminater
 - Trematerialer
 - Honeycomb
- Overflate
 - Herding
 - Korrosjonsbeskyttelse

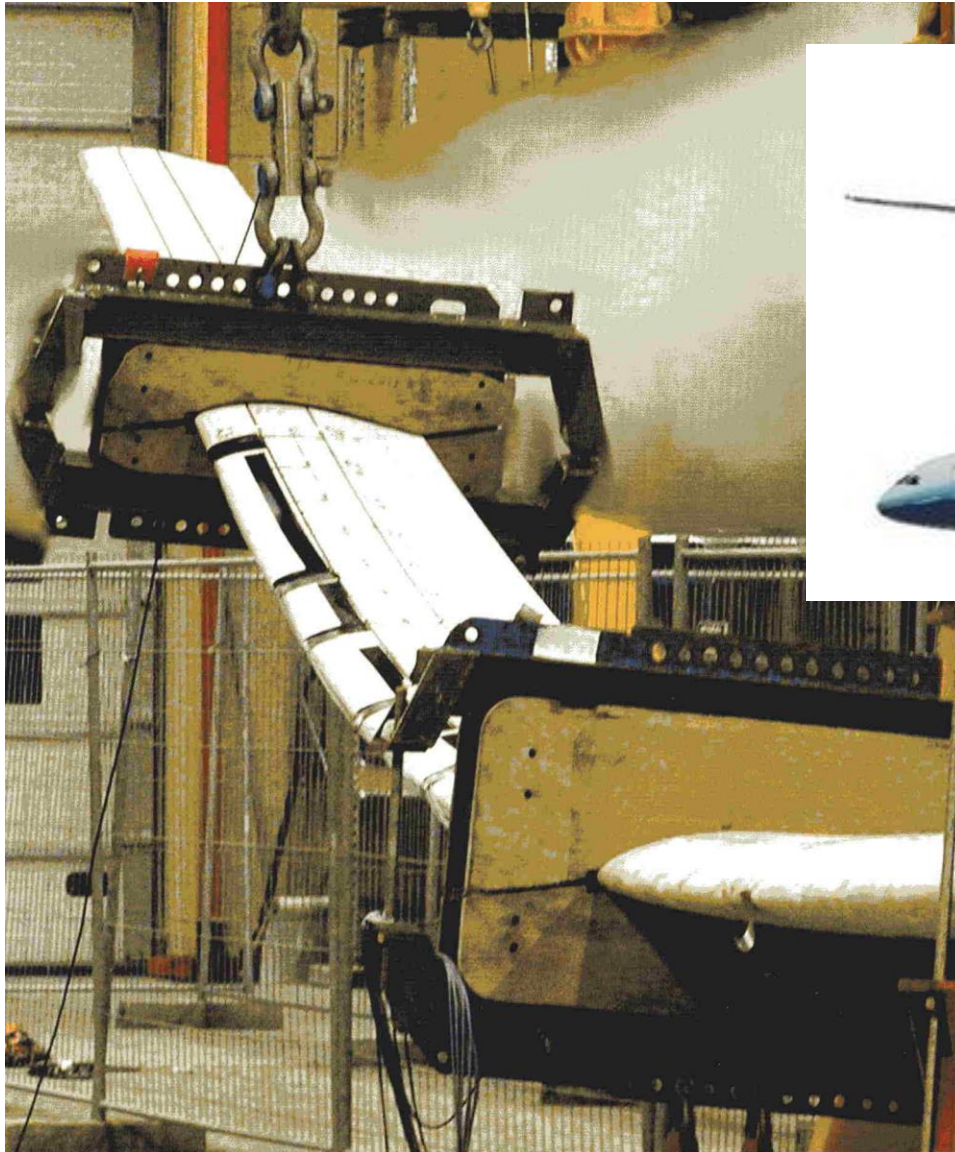


Figurer: E. Hornbogen: Werkstoffe, W.D. Callister jr.:
Materials Science and Engineering,
<http://www.trbonders.co.uk/products.html>

Kompositter og kompositt-konstruksjoner er ofte sterke og seige

Testing av vindmøllevinge.

Boeing 787 maks. belastning.



Materialsvikt

- Duktilt eller sprøtt brudd
- Materialtretthet
- Korrosjon
- Spenningsindusert korrosjon



Biologiske kompositter – naturens egne konstruksjonsmaterialer

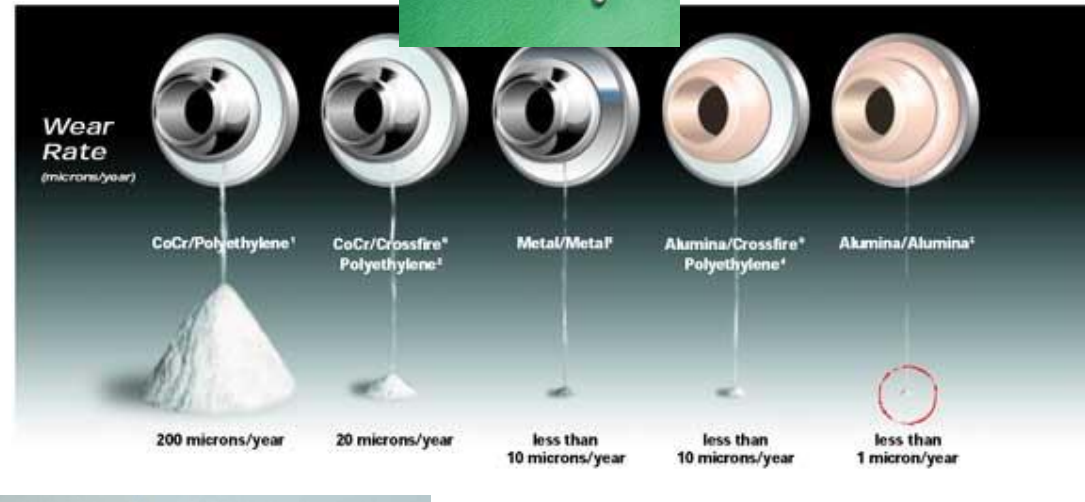
Bio-kompositt	Mineralske			Organiske				
	Ca, CaCO ₃	SiO ₂	Hydroksy-apatitt	Keratin	Collagen	Chitin	Cellulose	Andre
Skjell	x							x
Horn	x			x				
Skjellett			x		x			
Tenner			x					x
Nebb	x			x				
Krabbe-skall	x					x		x
Insekter						x		x
Tre							x	
Sjødyr-armer		x						x

Biokompatible og biomimetiske materialer

- Biokompatible
 - Kjemisk stabil grenseflate til vev
 - Bindinger
 - Biologisk aksept

- Implantater
 - keramiske
 - metaller (stål, titan, amalgam, gull...)
 - Kompositter

- Biomimetiske
 - Materialer som mimer biologiske materialer
 - Kompositter (tre, skjell...)
 - Fotoniske

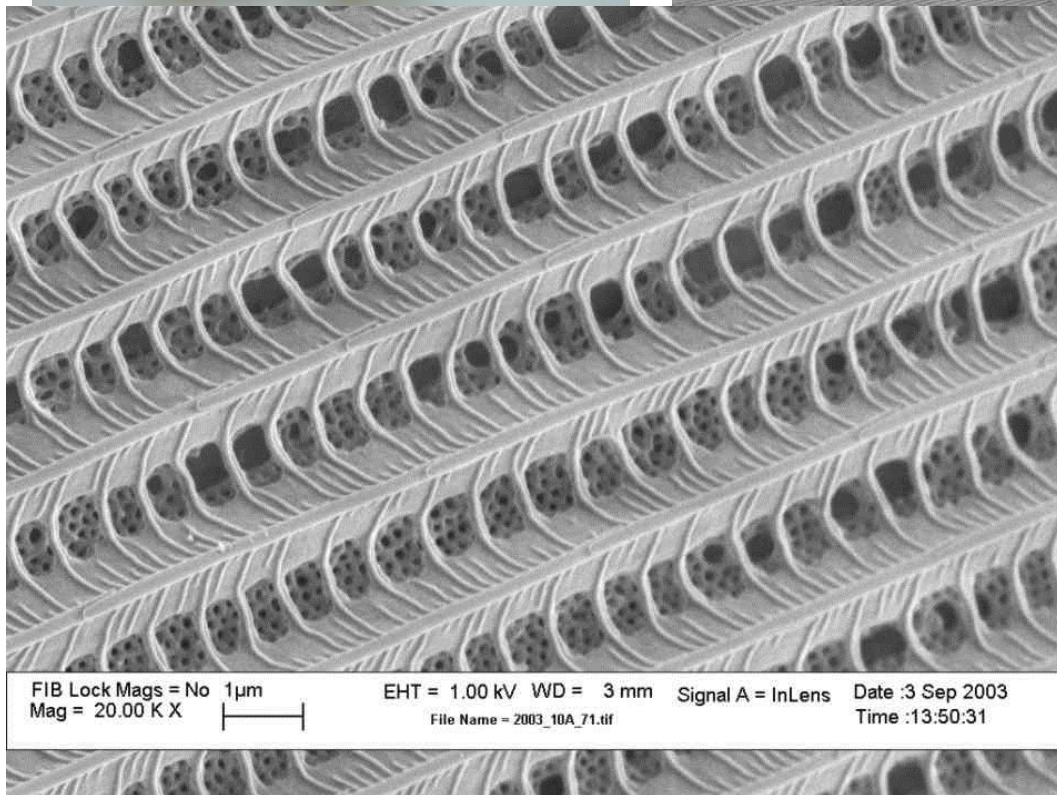
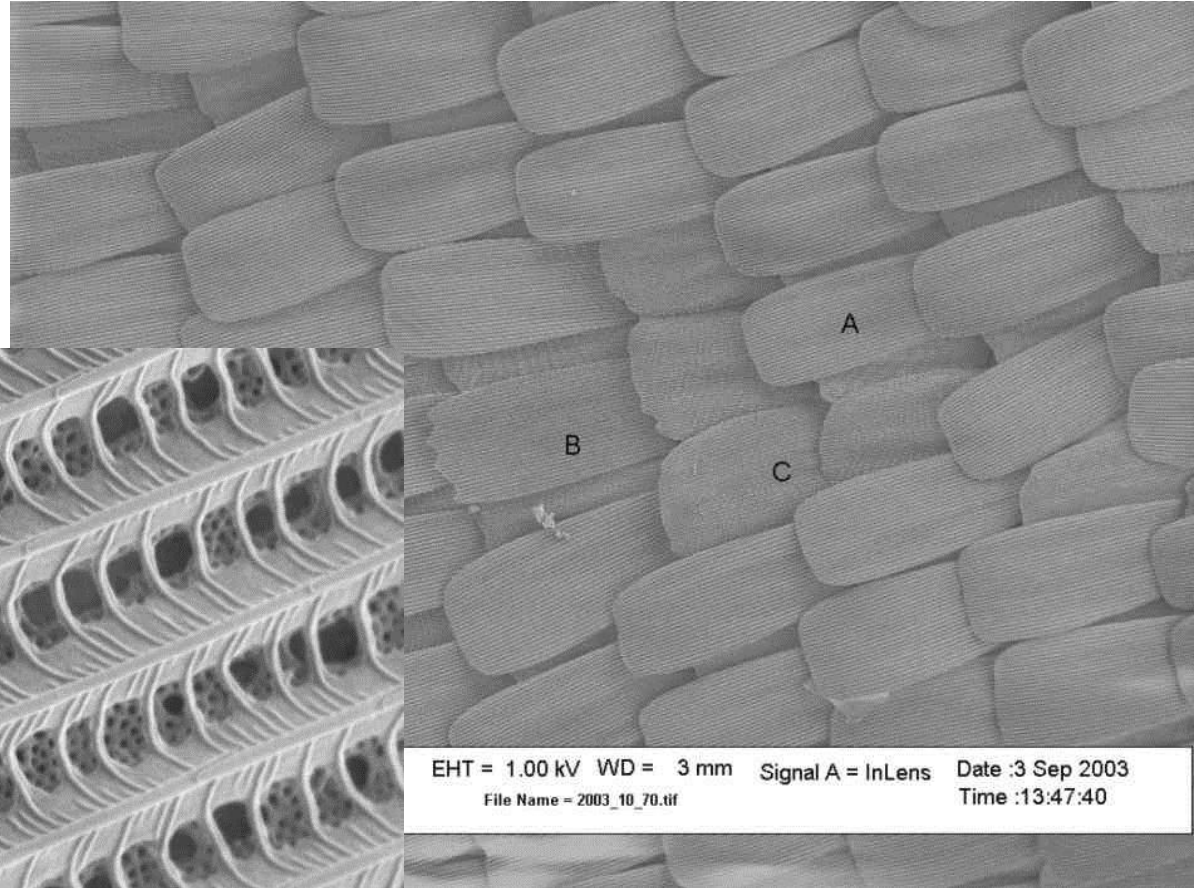


¹W. J. Othepedics, Vol. 1998, No. 2, February 1998.

²With Low Wear of the Articulating Surfaces," Journal of Arthroplasty, Vol. 11, No. 3, 1996.

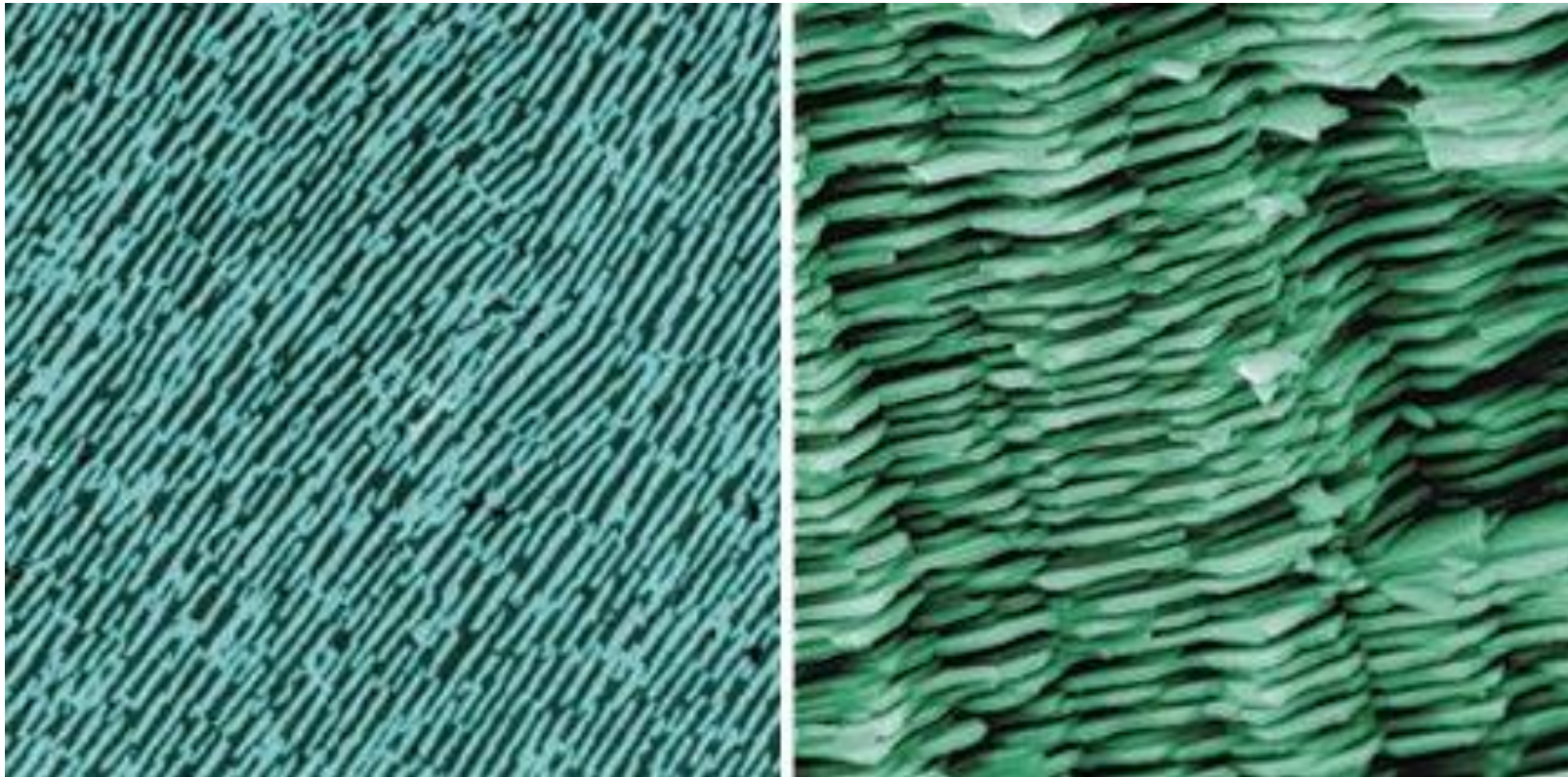
³Alumina Bearing Couple Under Hip Joint Simulation," Trans. 44th Ann. Mtg. ORS, 51, 1998.

Biomimetiske materialer; eksempel fotoniske sommerfuglvingeskjell; kan vi lage tilsvarende strukturer?



Biomimetiske materialer

Biomimetisk Al_2O_3 (venstre) vs perlemor fra muslingskjeil



Oppsummering

- Krefter – spenning
 - Normal, skjær
- Deformasjon
 - Elastisk, plastisk, brudd
 - Dislokasjoner
 - Herding
 - Fremmedatomer
 - Utfellinger
 - Dislokasjonsheking
 - Korngrenser
- Metalliske materialer
- Keramiske materialer
- Polymermaterialer
- Kompositter
- Biologiske kompositter
- Biomimetiske og biokompatible materialer