

MENA1001-Materialer, energi og nanoteknologi- **Kap. 10**

Energi; kilder, konvertering, lagring

Truls Norby
Kjemisk institutt/
Senter for Materialvitenskap
og nanoteknologi (SMN)
Universitetet i Oslo
Forskningsparken
Gaustadalleen 21
0349 Oslo

truls.norby@kjemi.uio.no

Energikilder - reserver og bruk

Solenergi

Direkte og indirekte

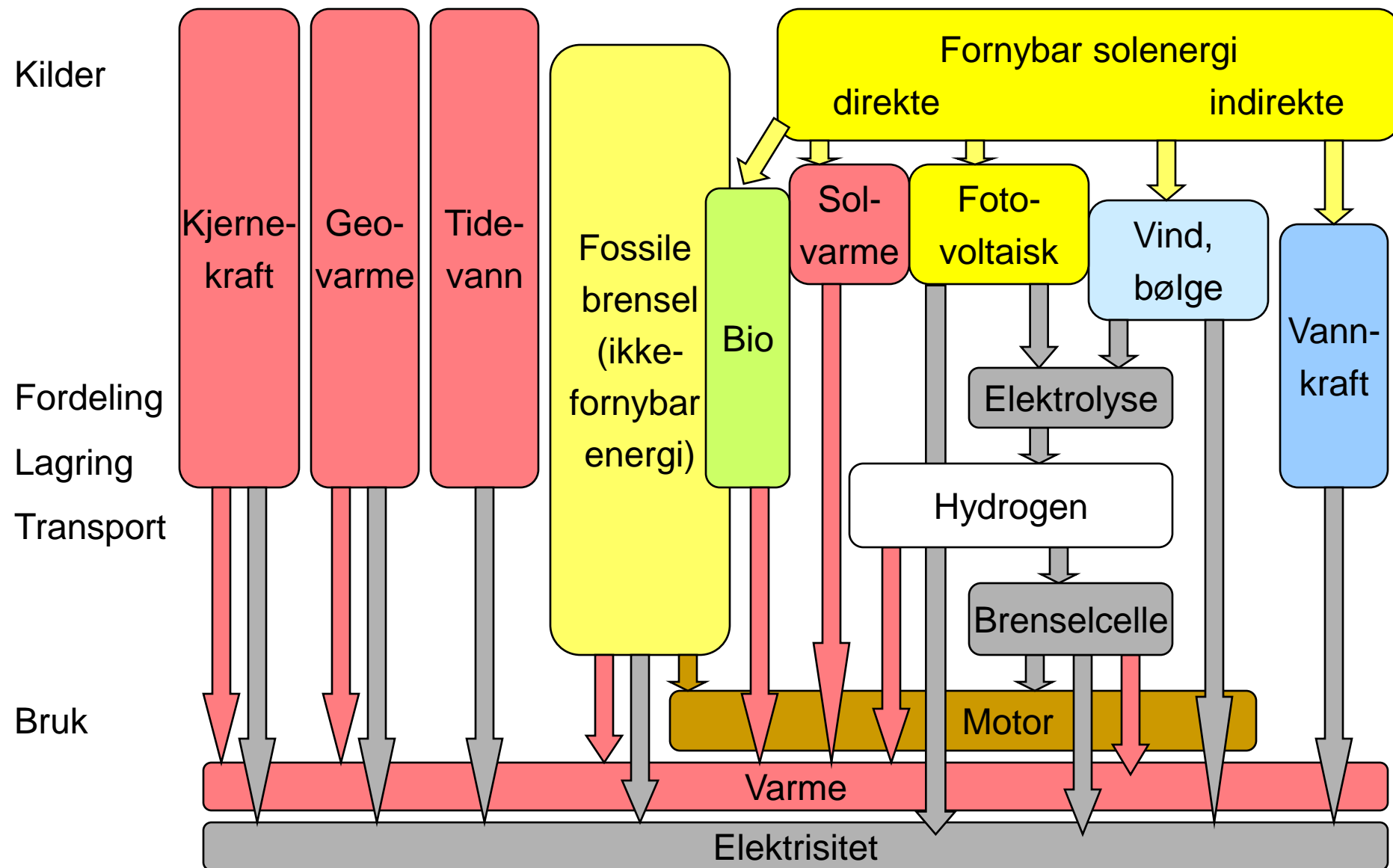
Fossile energikilder

Andre energikilder

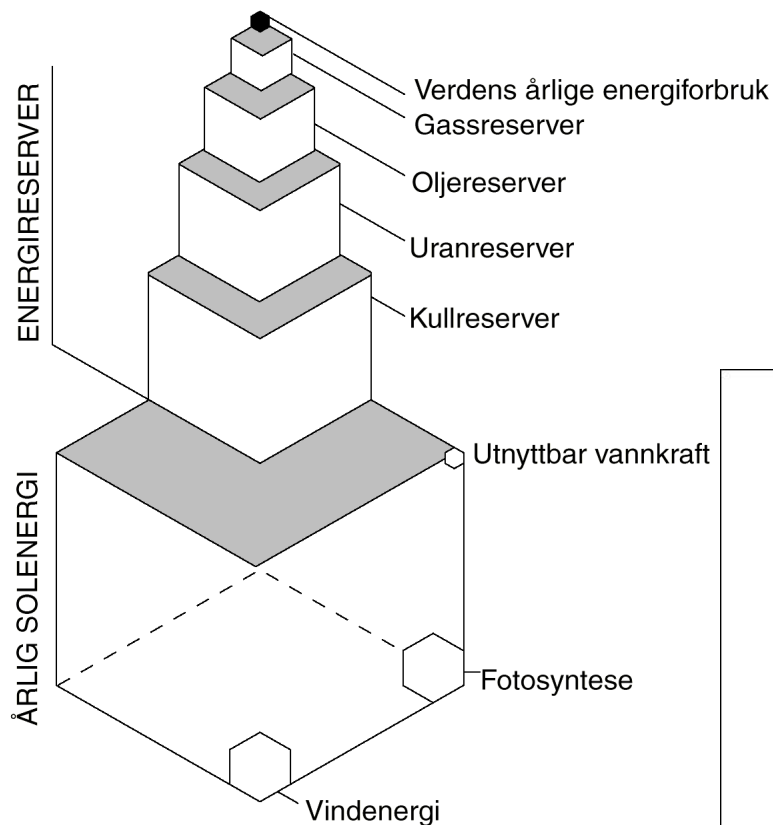
Konvertering

Lagring

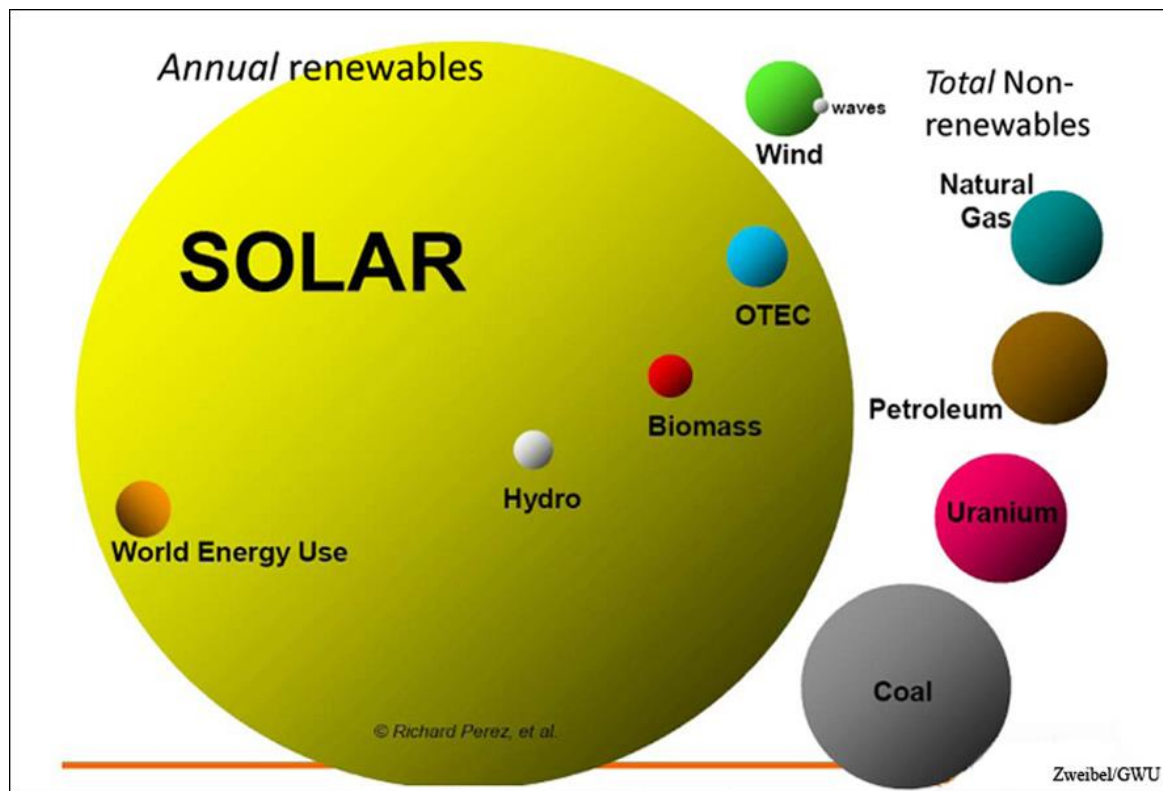
Energi; Kilder og bruk (med hydrogenlagring)



Solenergi og andre energikilder; reserver og forbruk



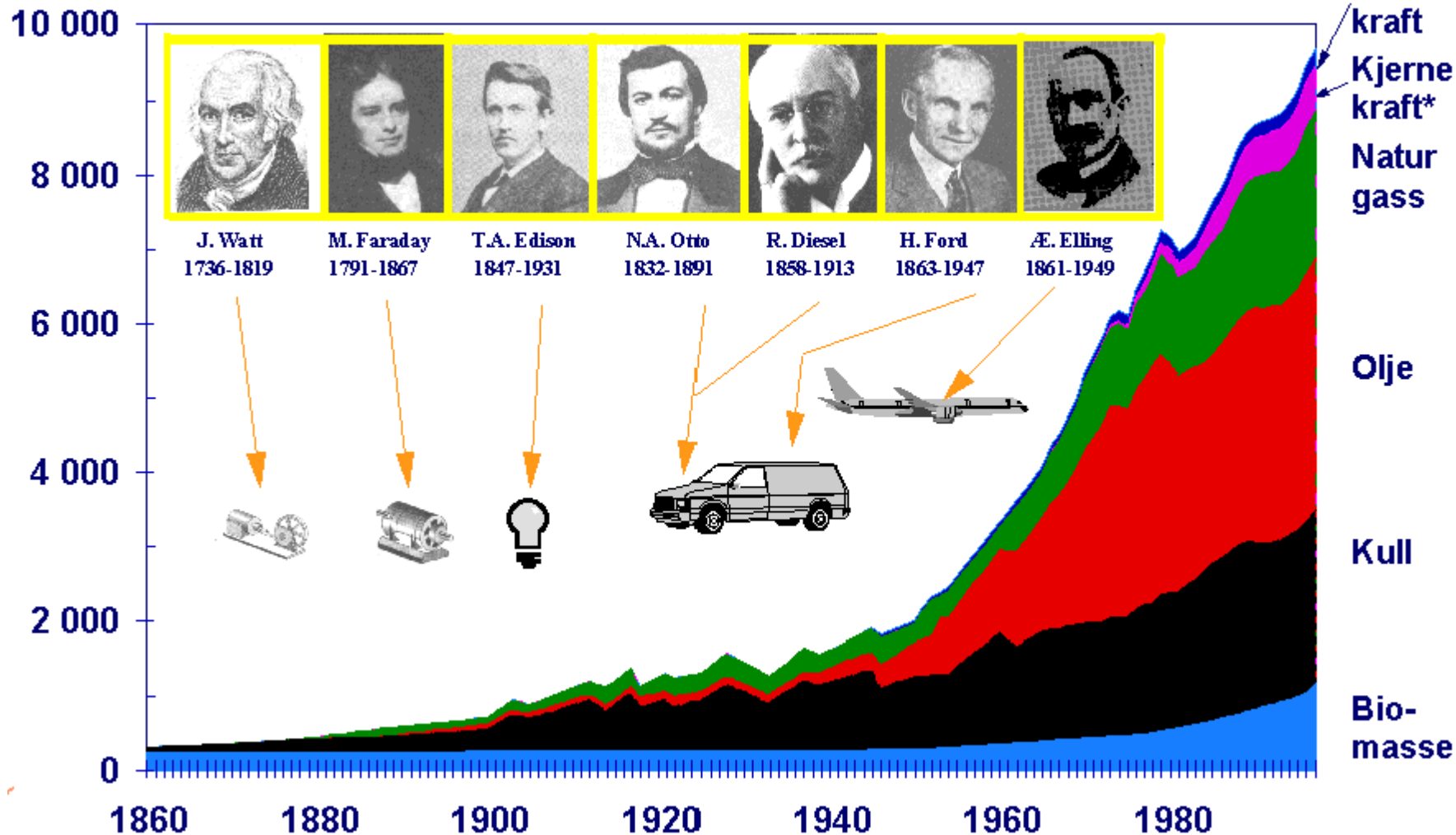
Figur: Bellona



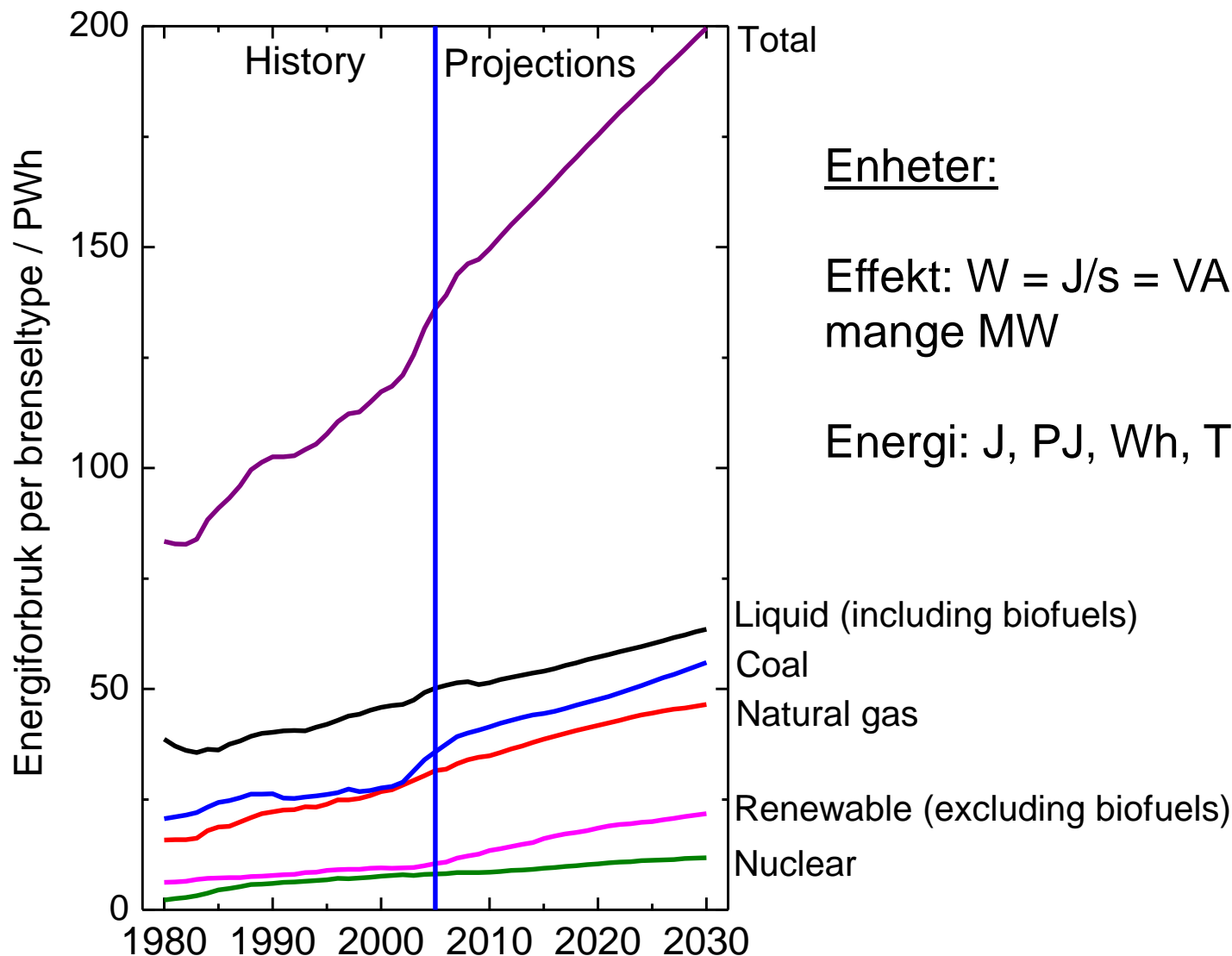
Verdens energikilder i et historisk perspektiv

2004: 11 059 MTOE = 128,3 PWh

mill. tonn oljeequivalenter pr. år



Verdens energiforbruk fordelt på brenseltyper



Enheter:

Effekt: $W = J/s = VA = VC/s$; typisk mange MW

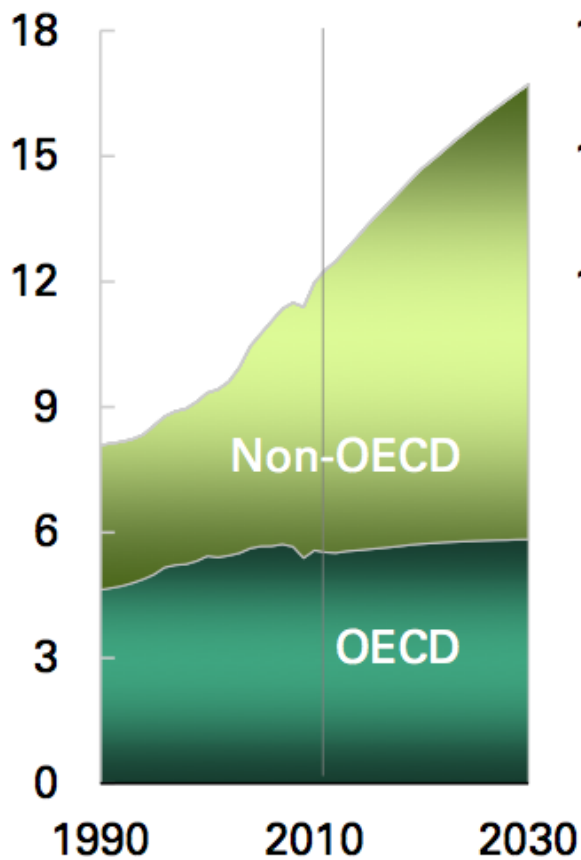
Energi: J, PJ, Wh, TWh, TOE

Kilde: Energy Information Administration, IEO 2007

Energibruk

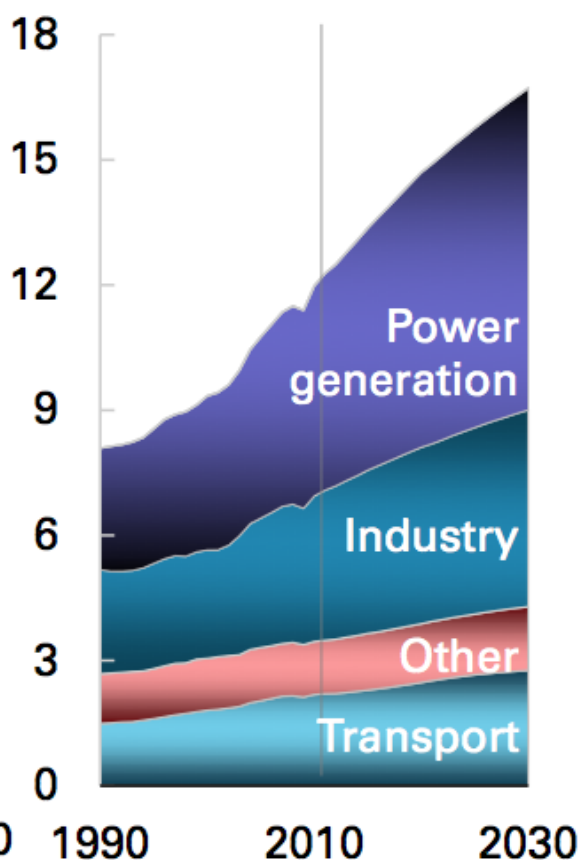
By region

Billion toe



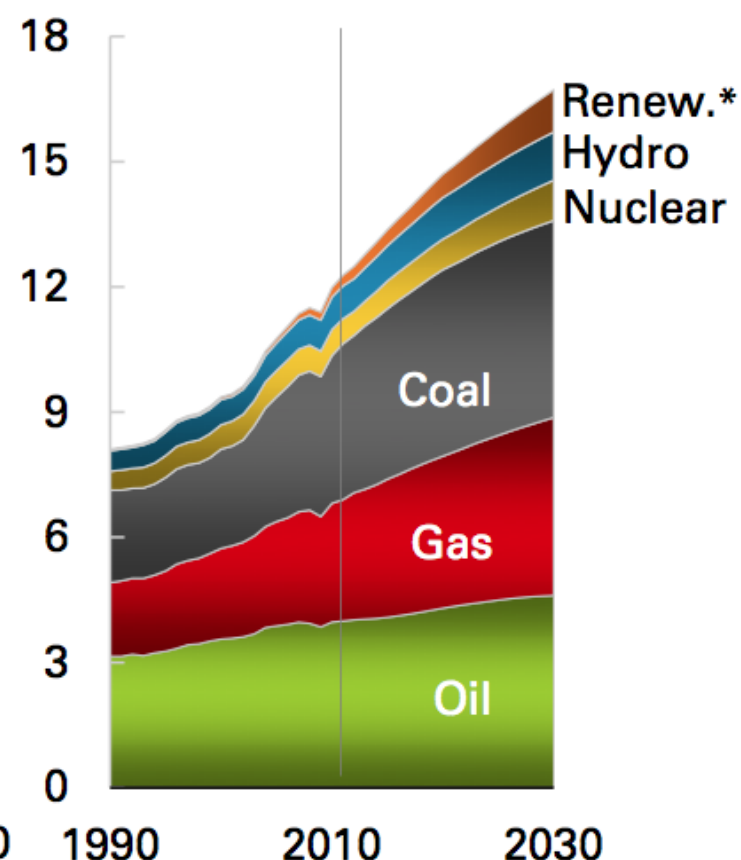
By primary use

Billion toe



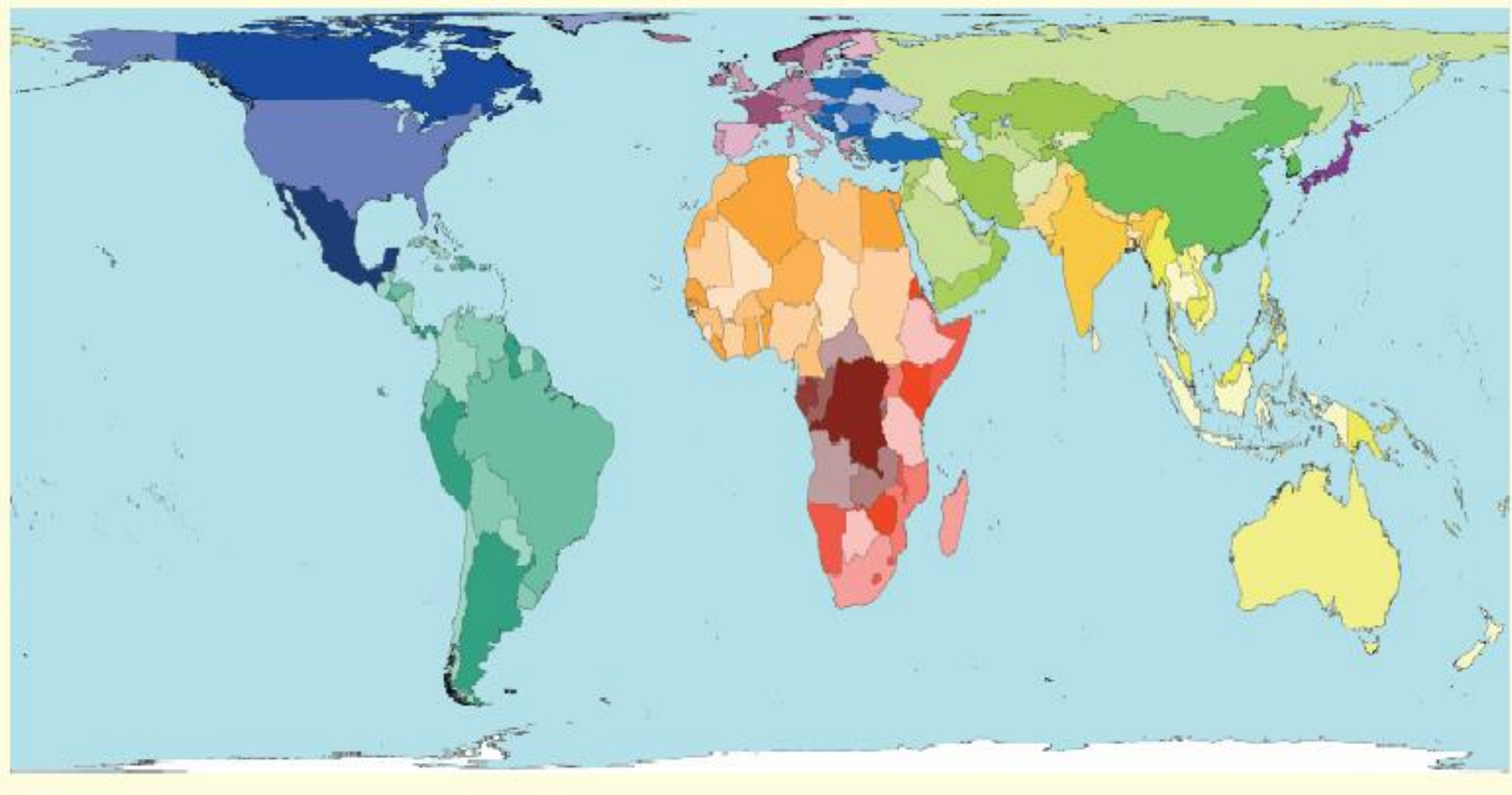
By fuel

Billion toe

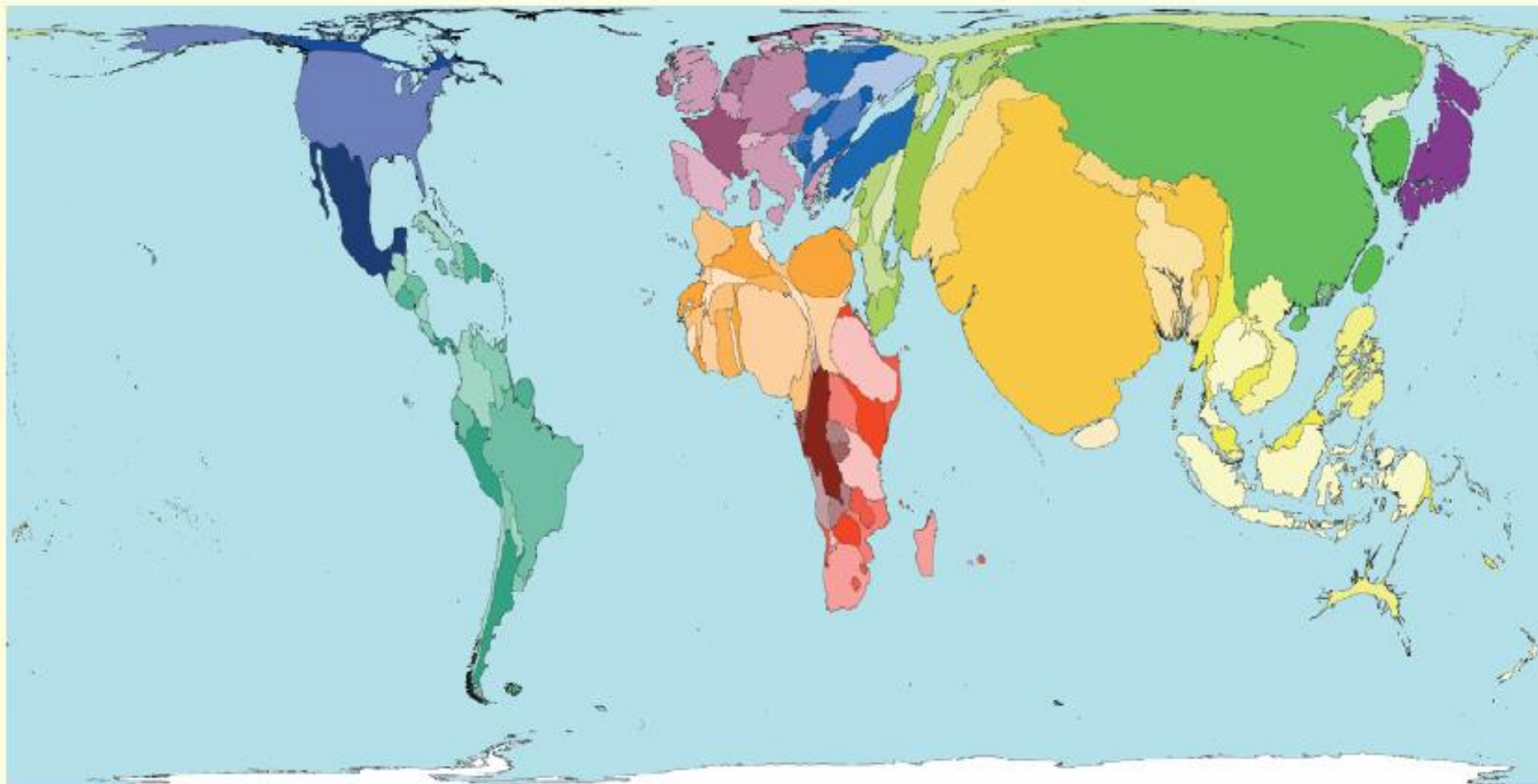


*Includes biofuels

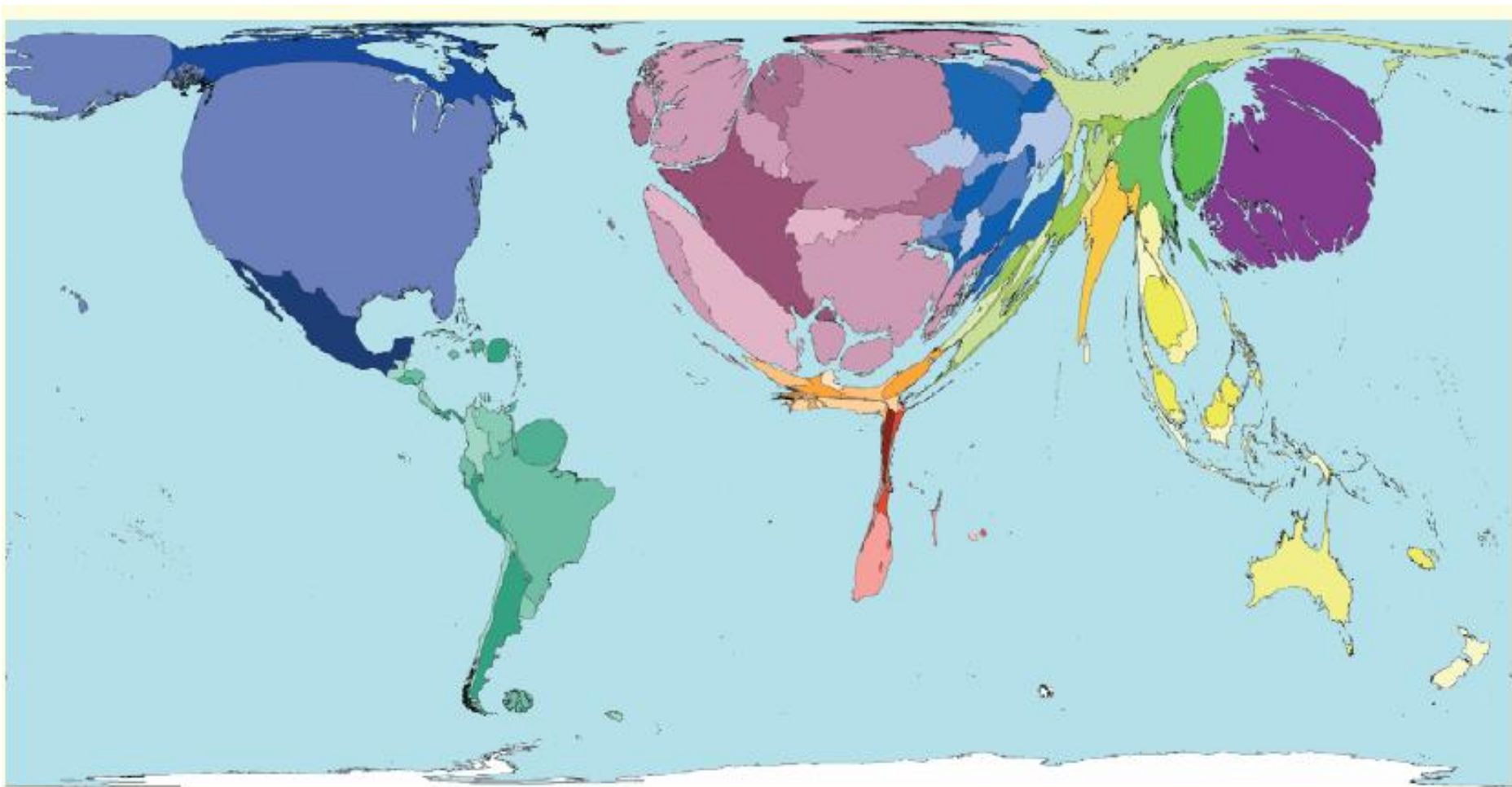
Verdens landområder



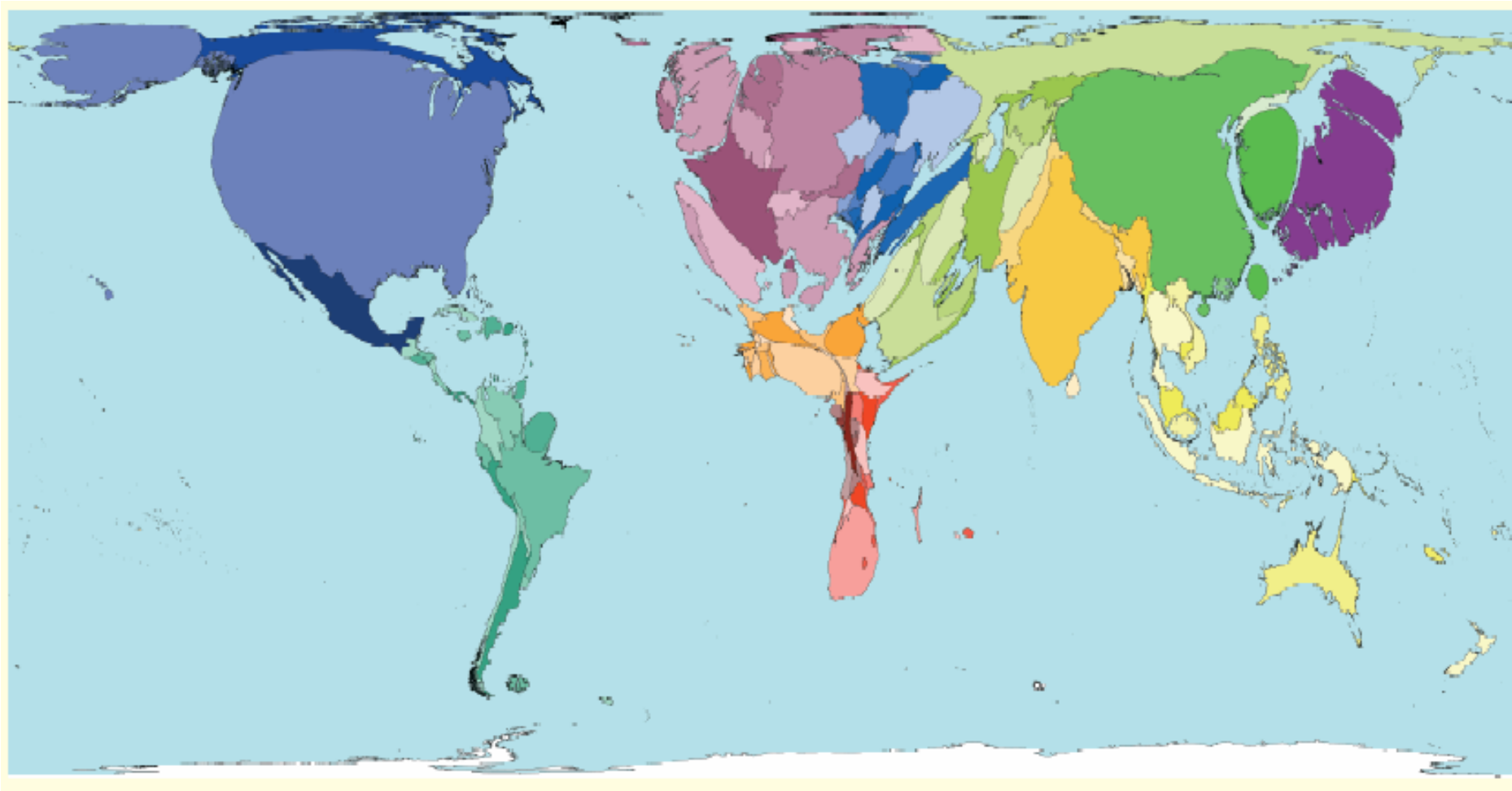
Verdens befolkning (2002)



Verdens personbiler (2002)

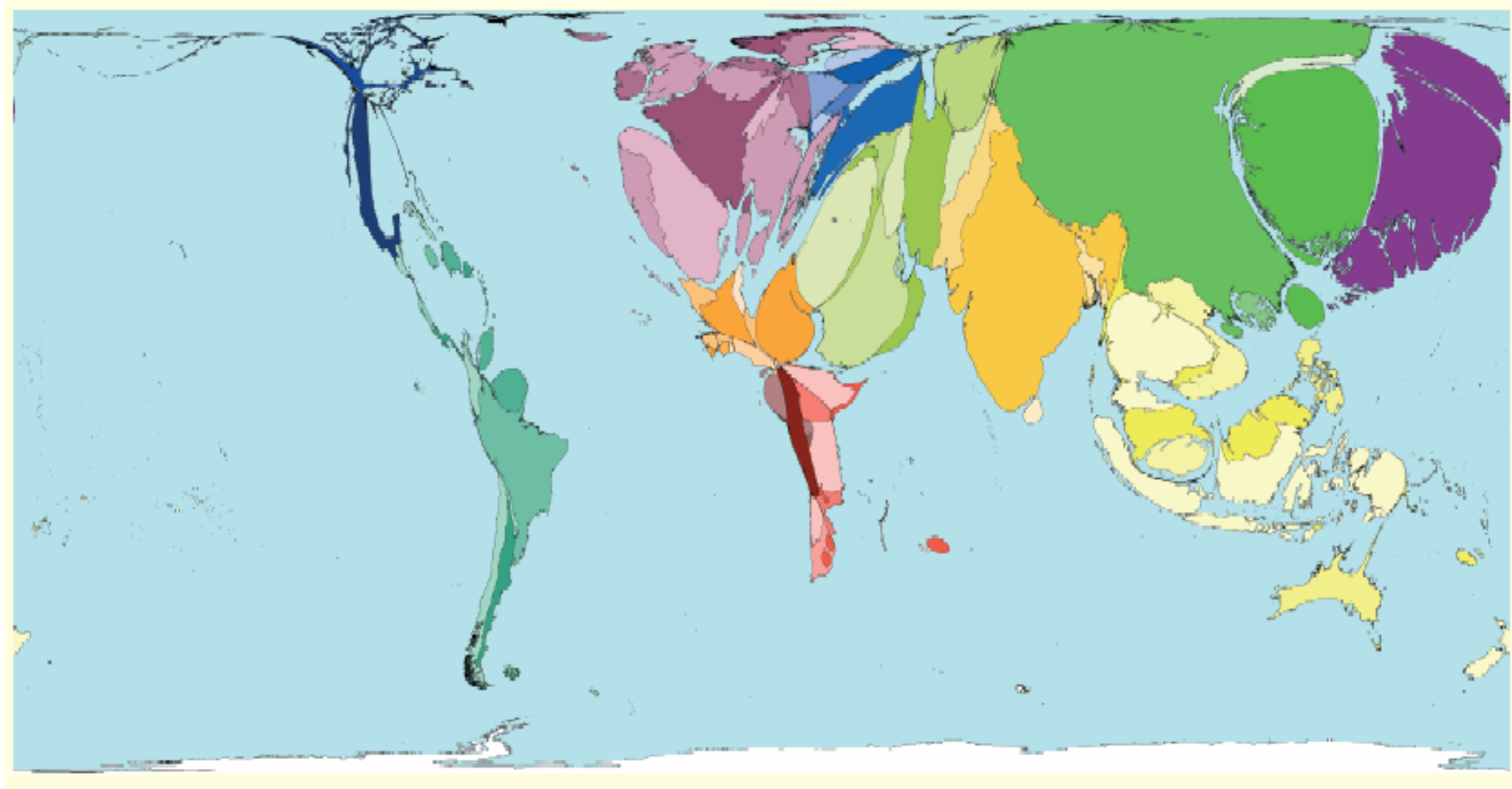


Verdens forbruk av brensel (2001)

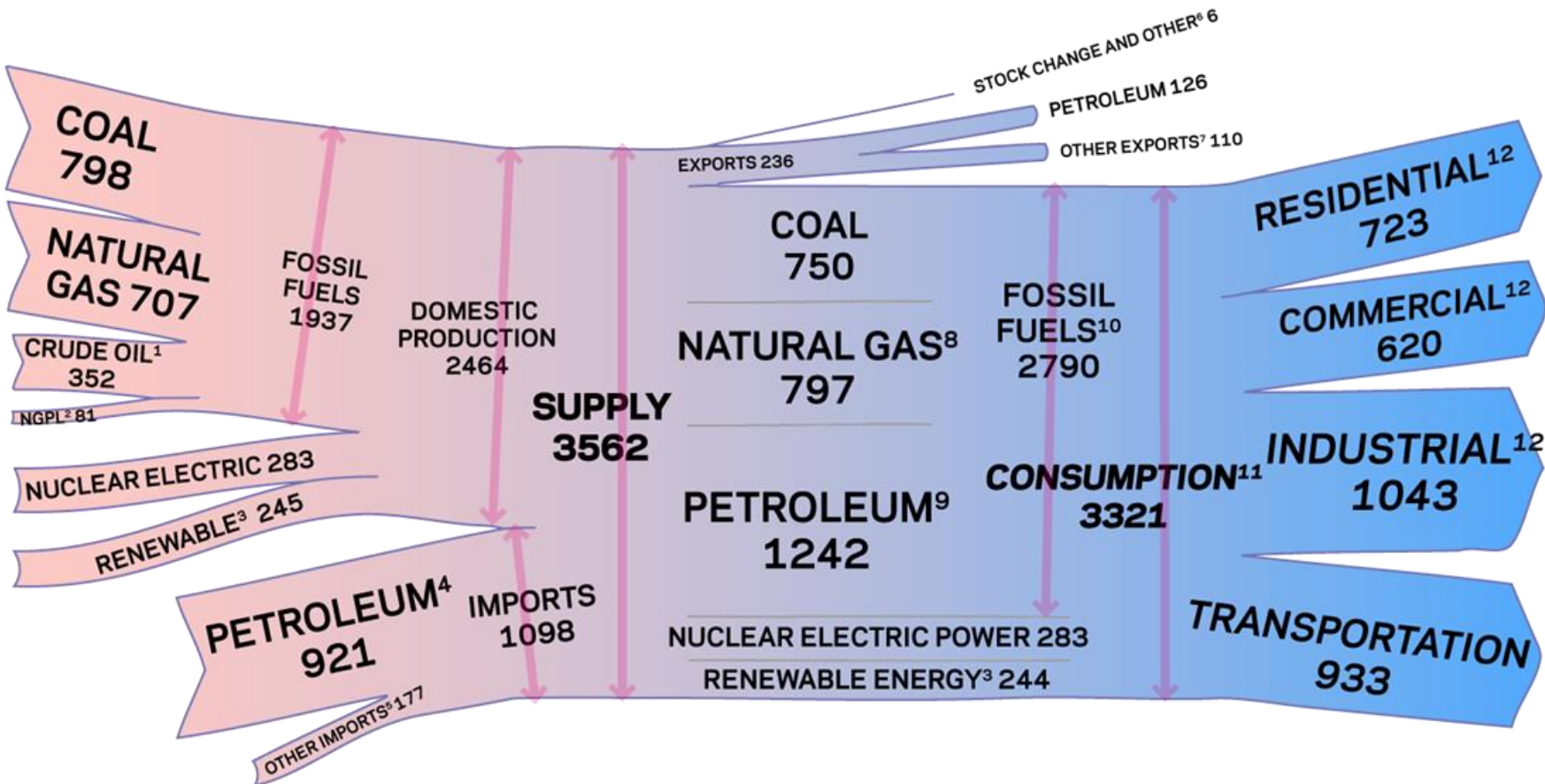


Brensel: gass, kull, olje, bio og kjernekraft

Verdens økte forbruk av brensel (1980 – 2001)



Energiflytdiagram USA 2008



¹ Includes lease condensate.

² Natural gas plant liquids.

³ Conventional hydroelectric power, biomass, geothermal, solar/photovoltaic, and wind.

⁴ Crude oil and petroleum products. Includes imports into the Strategic Petroleum Reserve.

⁵ Natural gas, coal, coal coke, fuel ethanol, and electricity.

⁶ Adjustments, losses, and unaccounted for.

⁷ Coal, natural gas, coal coke, and electricity.

⁸ Natural gas only; excludes supplemental gaseous fuels.

⁹ Petroleum products, including natural gas plant liquids, and crude oil burned as fuel.

¹⁰ Includes 0.04 quadrillion Btu of coal coke net imports.

¹¹ Includes 0.11 quadrillion Btu of electricity net imports.

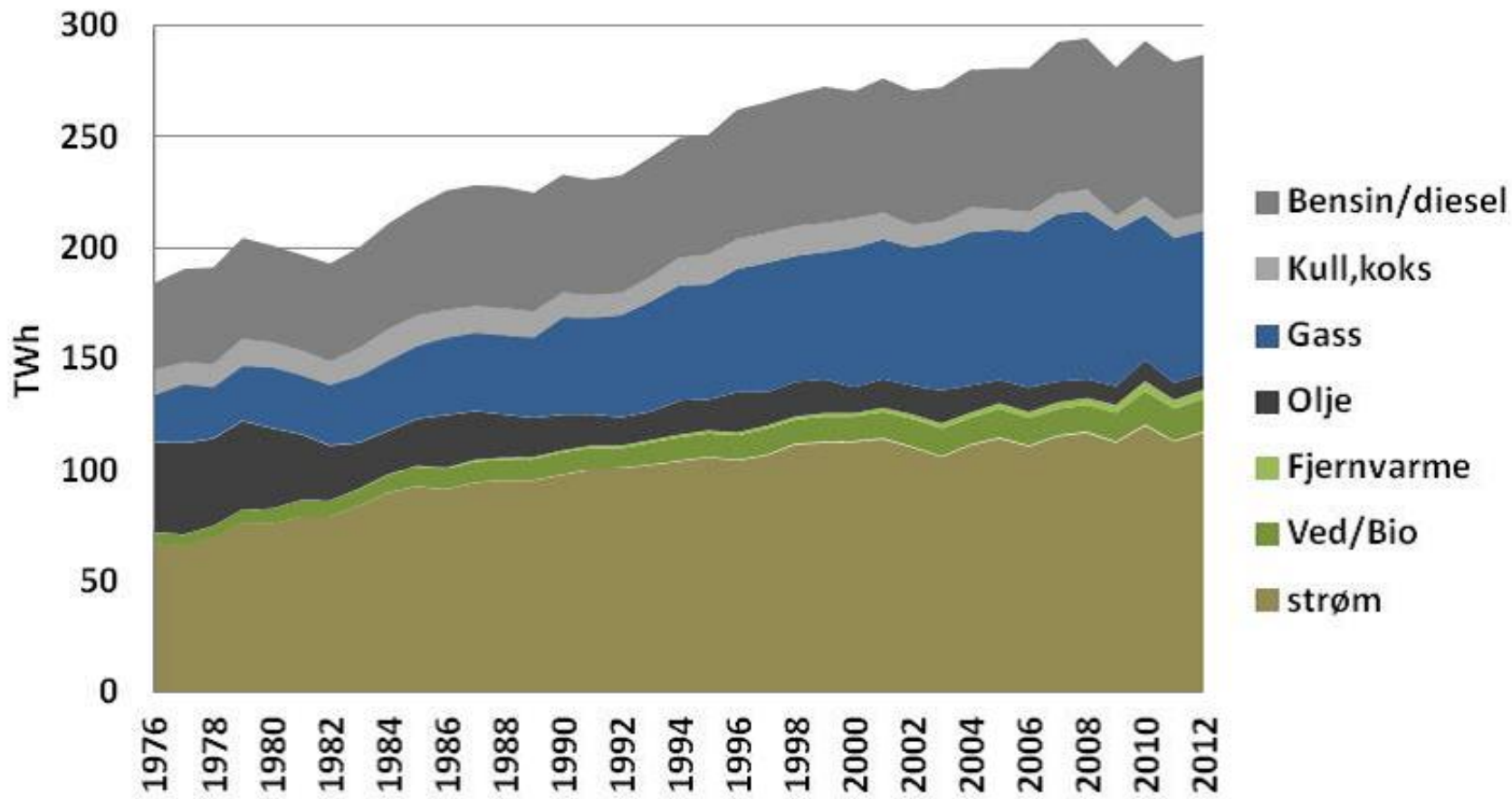
¹² Primary consumption, electricity retail sales, and electrical system energy losses, which are allocated to the end-use sectors in proportion to each sector's share of total electricity retail sales. See Note, "Electrical Systems Energy Losses," at end of Section 2.

Notes: • Data are preliminary. • Values are derived from source data prior to rounding for publication. • Totals may not equal sum of components due to independent rounding.

Sources: Tables 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, and 2.1a.

Energiforbruk i Norge

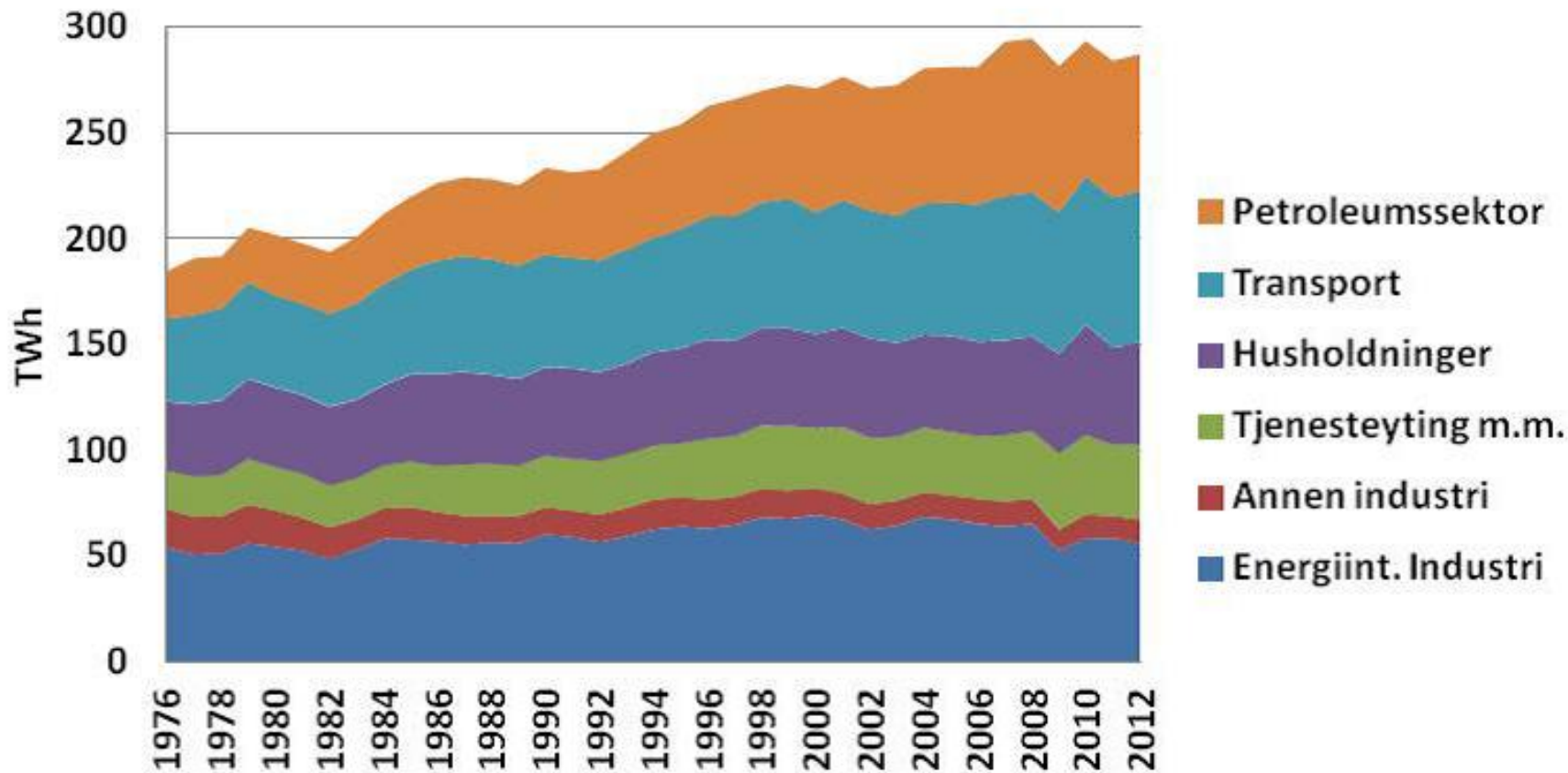
Energibruk i Norge etter energivare [TWh per år]



Figur: www.ssb.no

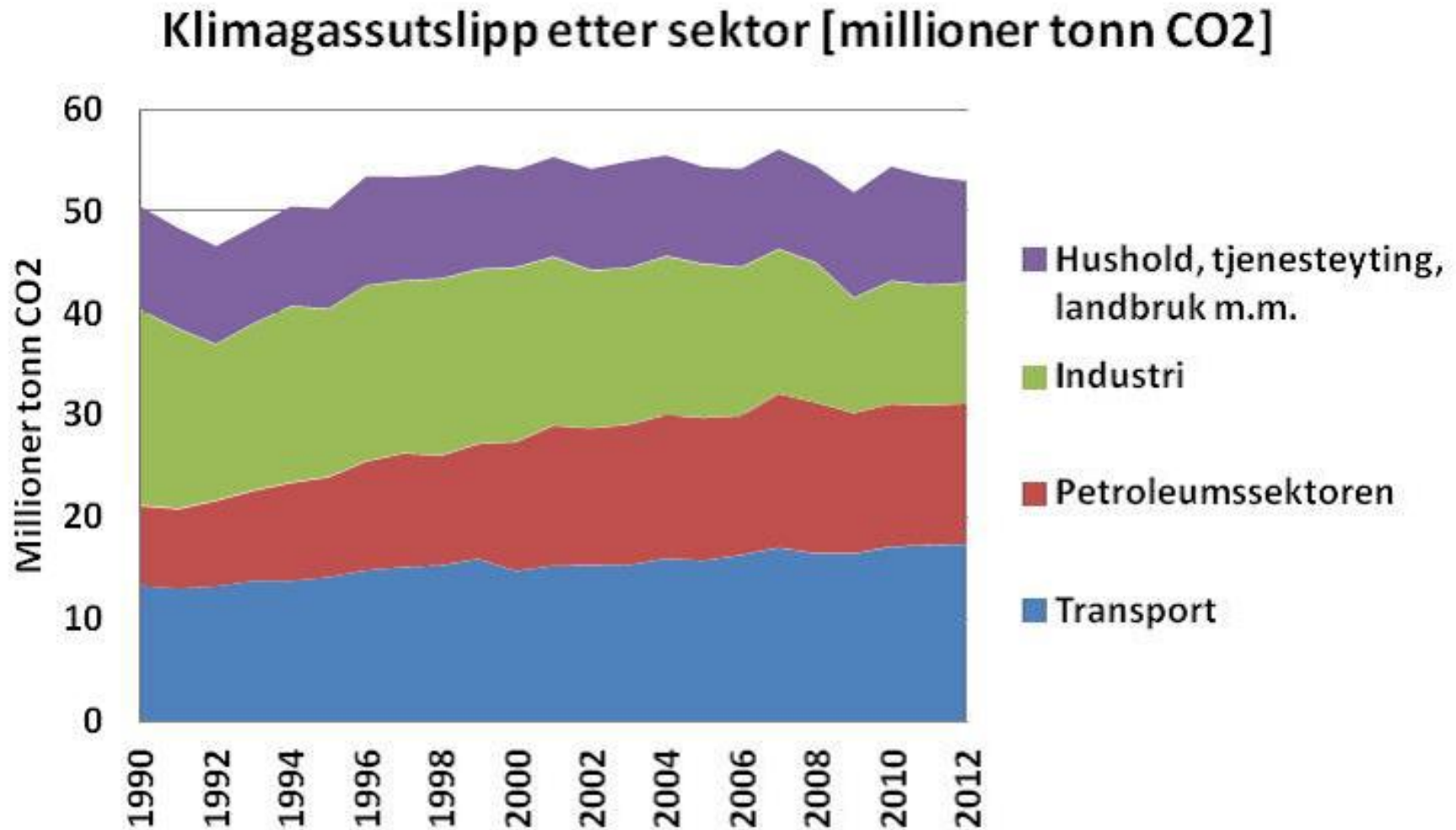
Energiforbruk i Norge

Energibruk i Norge etter sektor [TWh per år]



Figur: www.ssb.no

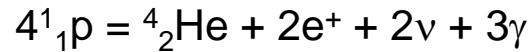
Energiforbruk i Norge



Solenergi: Solen

- Solen
 - Hydrogenbrenning

Totalreaksjon: 4 protoner blir til en heliumkjerne + tre typer stråling:



Solen gir fra seg energi som stråling og mister litt masse i hht. Einstein:

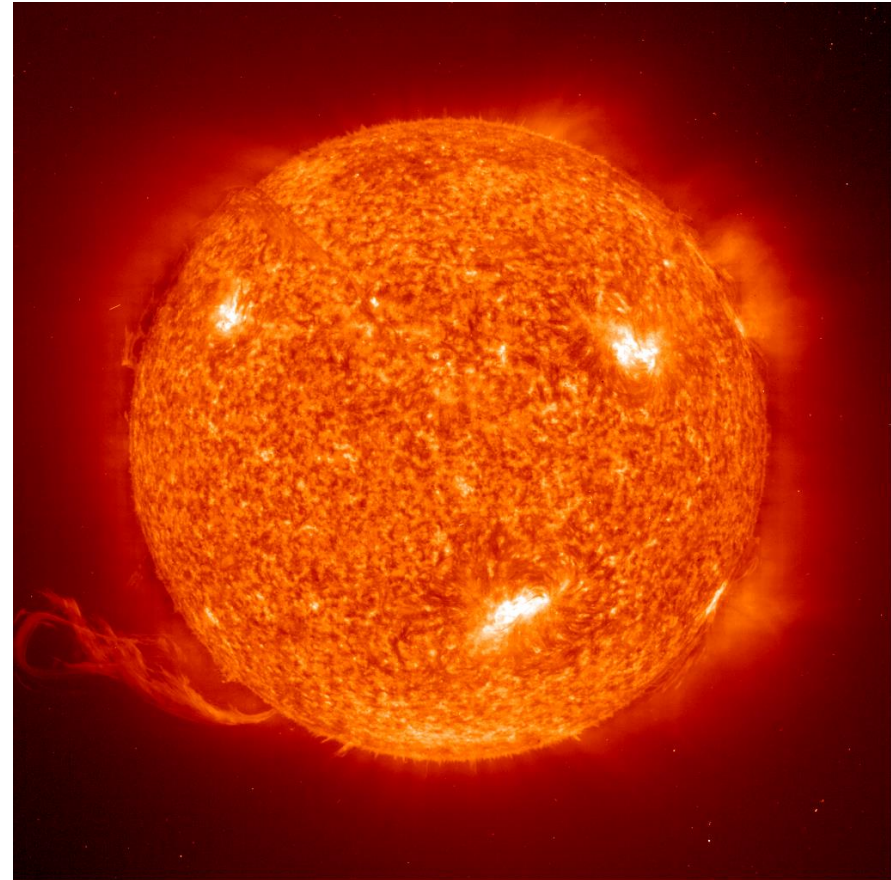
$$E = mc^2$$

Total effekt: $3,86 \cdot 10^{26}$ W

Temperaturen i kjernen: $T = 15\,600\,000$ K

Temperaturen på overflaten: $T = 5800$ K

$$\lambda_{\text{max}} = 0,1 - 1 \mu\text{m}$$



Stråling til Jorden

(Repetisjon fra Kap. 2)

$1,496 \cdot 10^{11}$ m (150 millioner km) fra Solen til Jorden

Effekten per m^2 (solarkonstanten S) avtar med kvadratet av avstanden.

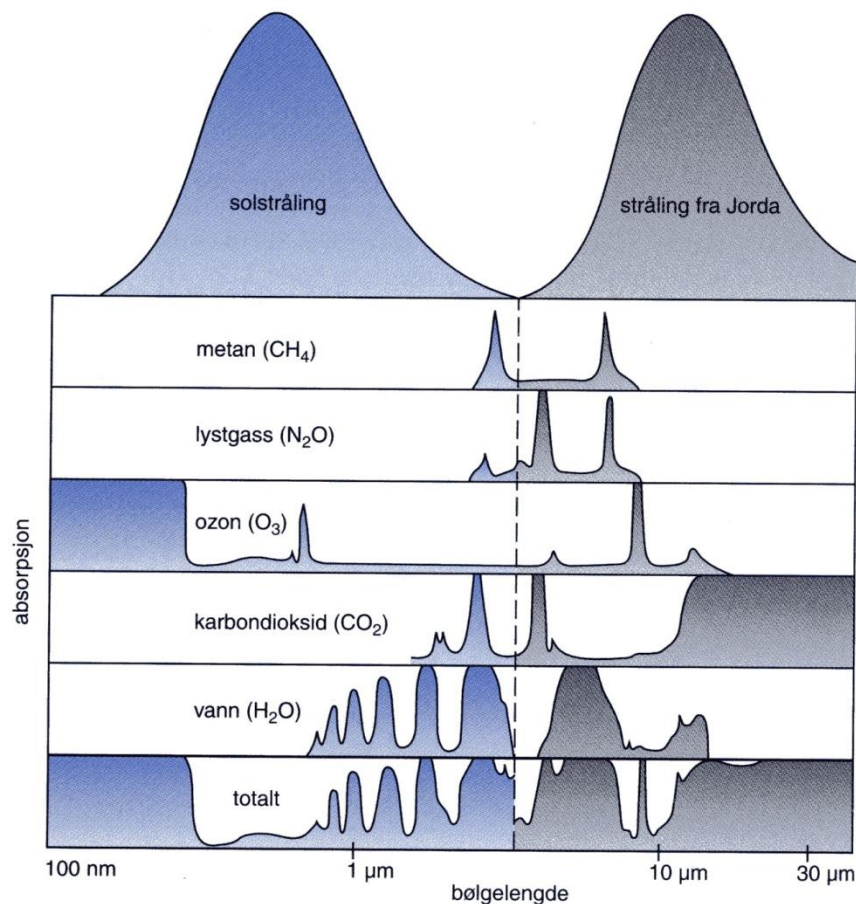
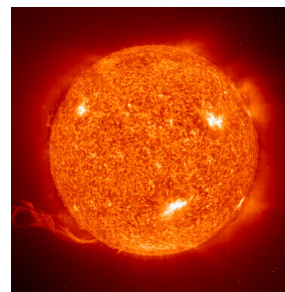
S (på jordens solside) = 1370 W/m^2

30% reflekteres direkte (albedoen), 70% absorberes (på solsiden)

Stråling fra Jorden skjer fra hele overflaten på alle sider. Derfor kan Jorden avgi all stråling den mottar, selv om temperaturen er lav. I følge Stefan-Boltzmann (kap. 2) burde temperaturen på jordoverflaten være omtrent $-20 \text{ }^\circ\text{C}$;

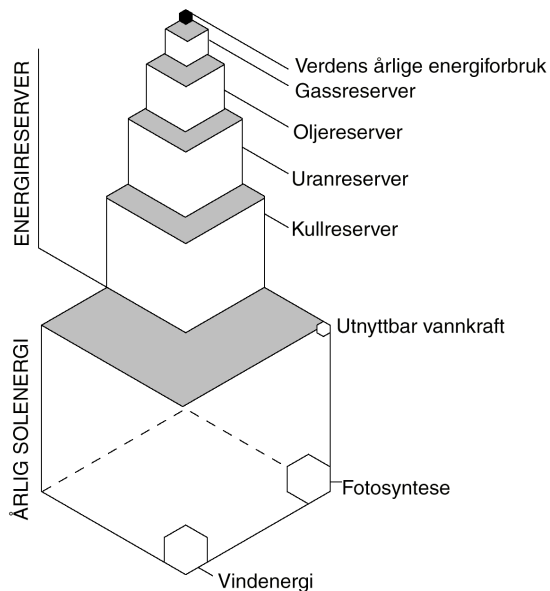
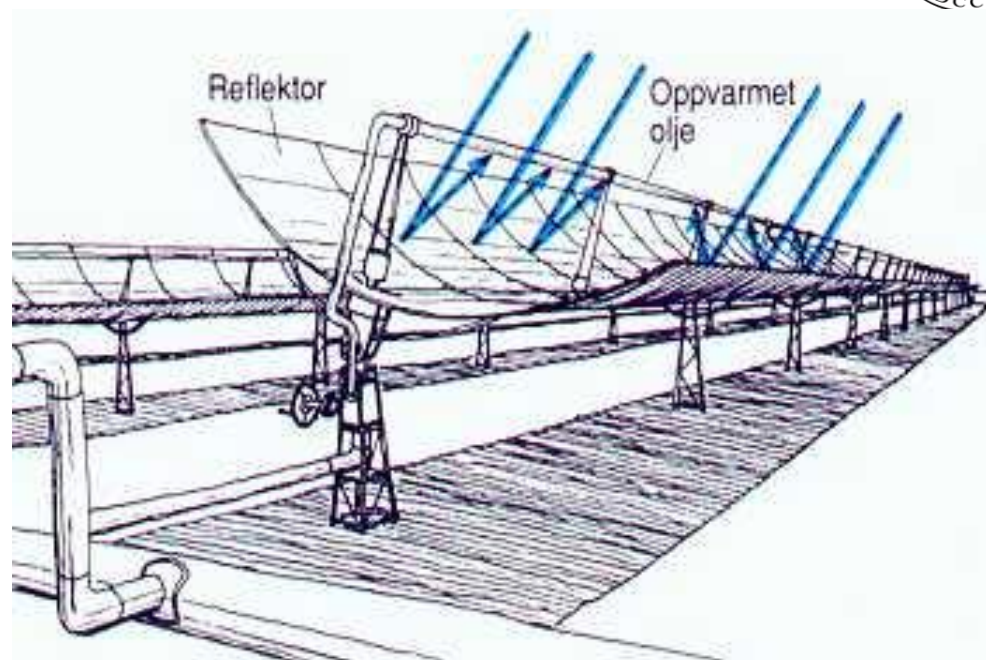
λ_{max} = ca $15 \text{ } \mu\text{m}$ (infrarødt)

Imidlertid sørger CO_2 og H_2O for mer absorpsjon i dette området enn for sollyset (synlig og ultrafiolett område; O_3 og H_2O), slik at temperaturen på overflaten er høyere for å oppnå energibalanse.



Direkte solenergi - termisk

- Absorpsjon av sort legeme
 - Fra lys til varme eller elektrisitet
 - Termisk solkraftverk
 - pasive og aktive
 - Lagring av varme mulig

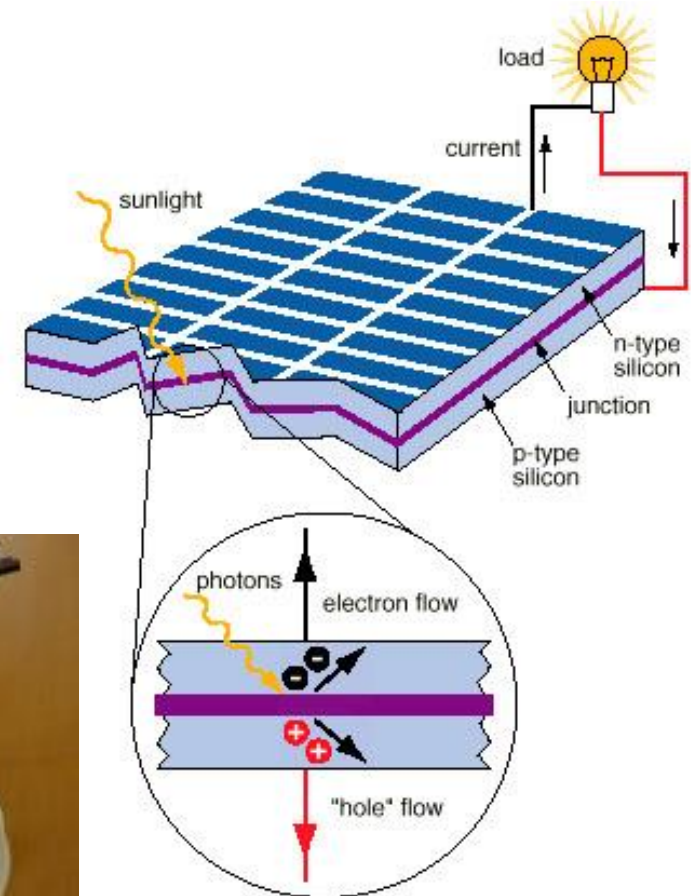


Figurer: Bellona, Høgskolen i Volda, BrightSource Energy

Fra elektromagnetisk stråling (lys) til elektrisitet

Fotovoltaiske celler - solceller

- Krystallinsk silisium (wafers)
 - 10-20% effektivitet
- Amorft silisium
 - 5-10% effektivitet
 - Mindre materialforbruk
 - Kan innbakes i polymerer; fleksible celler
- GaAs
 - Mer egnet båndgap
 - Dyrere teknologi
- Tandemceller
- Kombinasjon med solvarmefangere

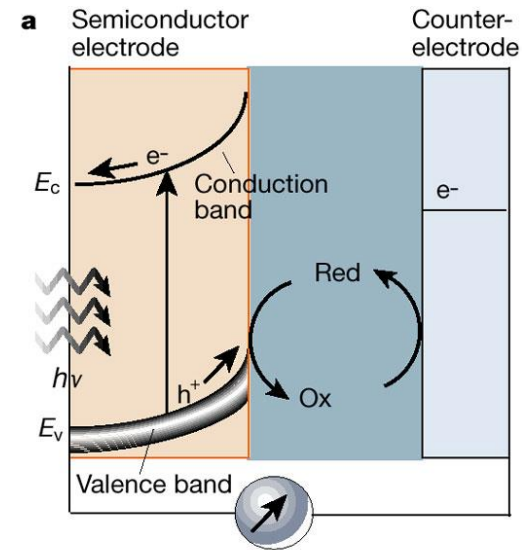


Fra lys til elektrokjemiske prosesser

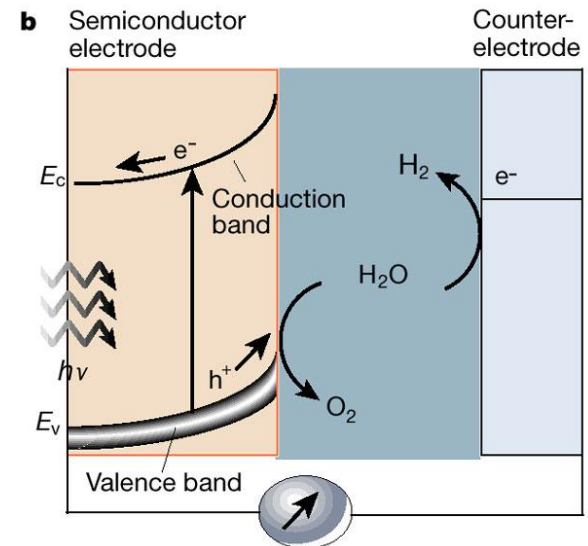
Fotoelektrokjemiske celler



- Fotogalvanisk
 - Spenning ved lys på elektrode



- Fotoelektrolytisk
 - Spalter vann direkte



Fra lys til elektrokjemiske prosesser

Fotoelektrokjemiske celler – forts.



- Fotobiologisk
 - fotosyntese
 - H_2 fra bakterier, alger



- Grätzel-celler

"dye-sensitized"

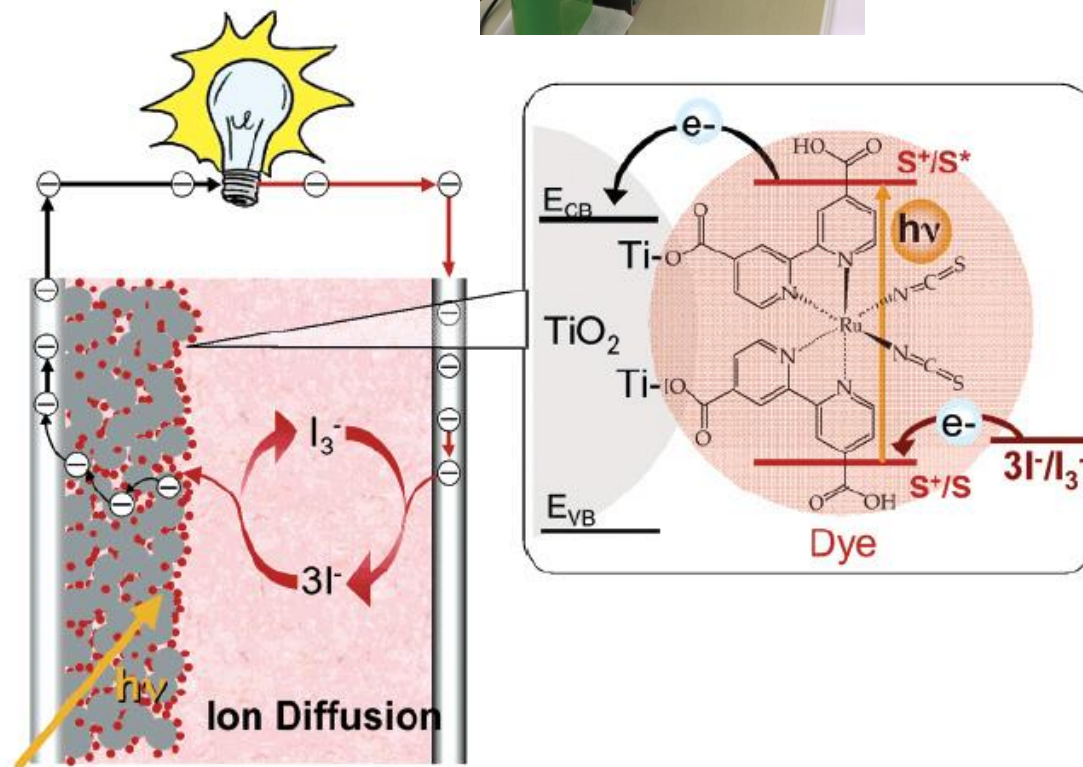
Ledende glasselektroder

Halvleder (nano- TiO_2)

Adsorbert fargestoff ("dye")

Elektrolytt

Redokspaar (I^- / I_3^-)

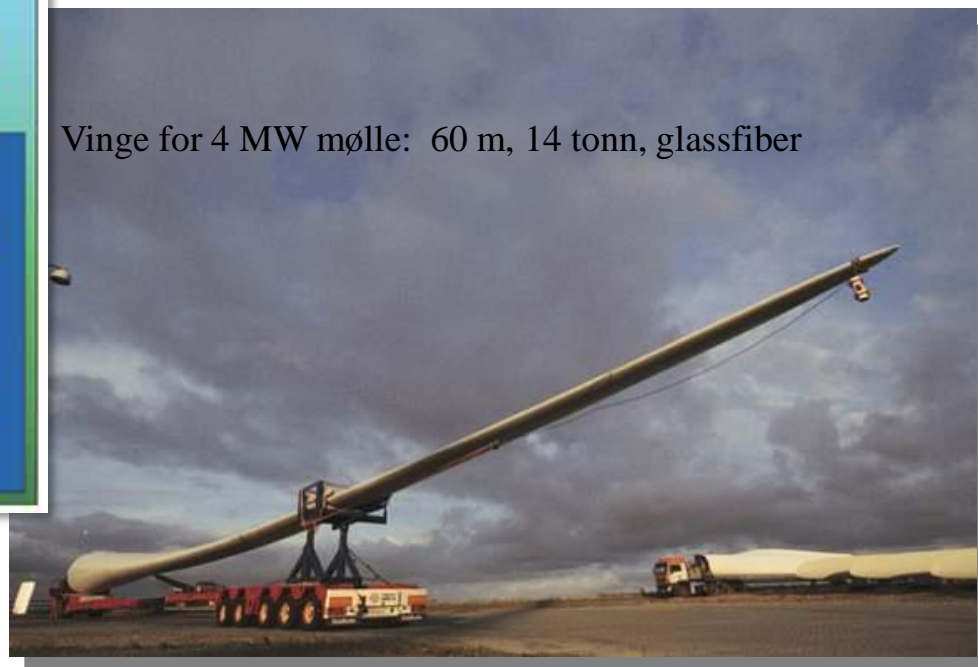




Indirekte solenergi - vind

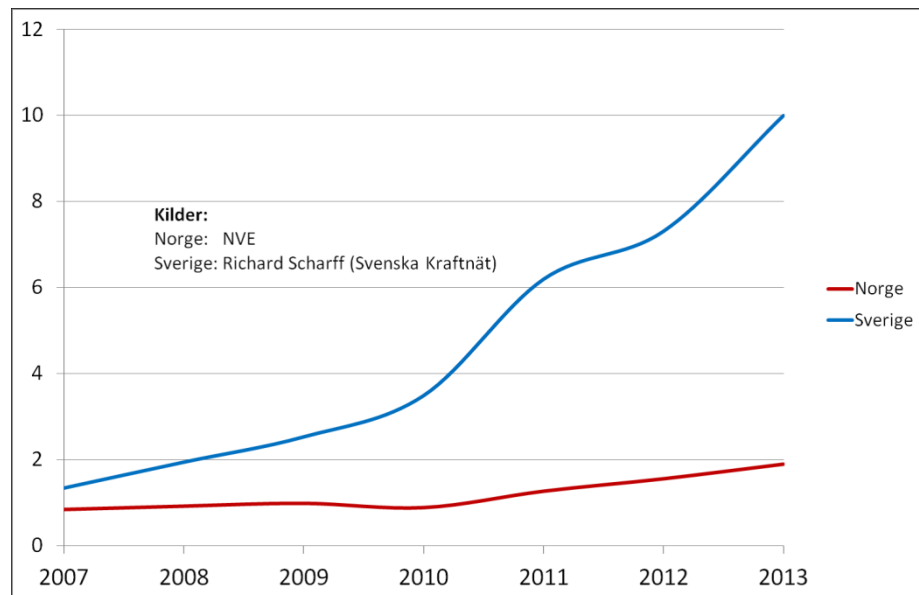
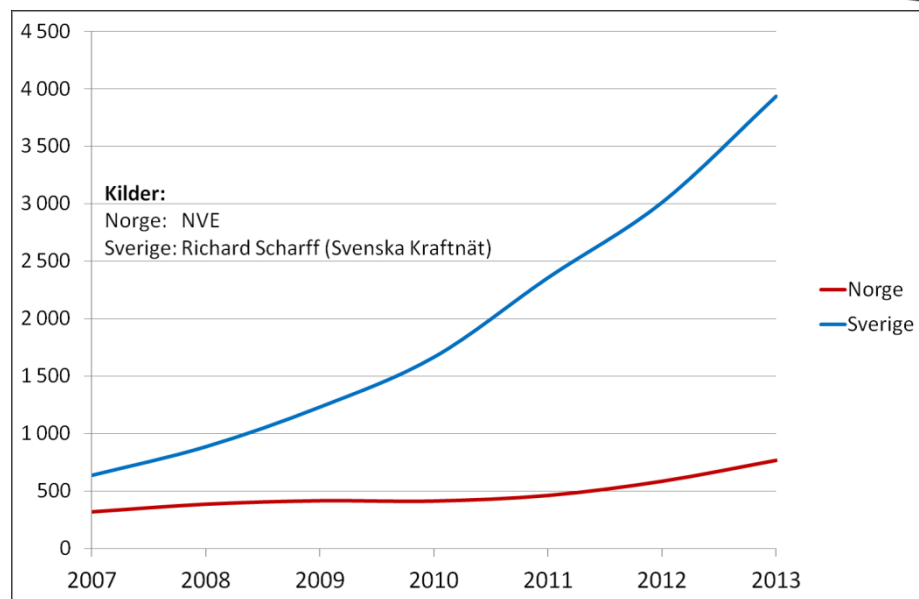


Vinge for 4 MW mølle: 60 m, 14 tonn, glassfiber



Indirekte solenergi - vind

- Moden teknologi
 - Men trenger lagring av produsert strøm i land uten vannkraft
- ”Fullt” utnyttet i enkelte land
 - eks. Danmark
 - Norge langt etter
 - Har gode vindressurser
 - Stort inngrep i landskap (?)
 - Kostbar installasjon
 - Velegnet offshore



Indirekte solenergi - bølger

- To hovedtyper

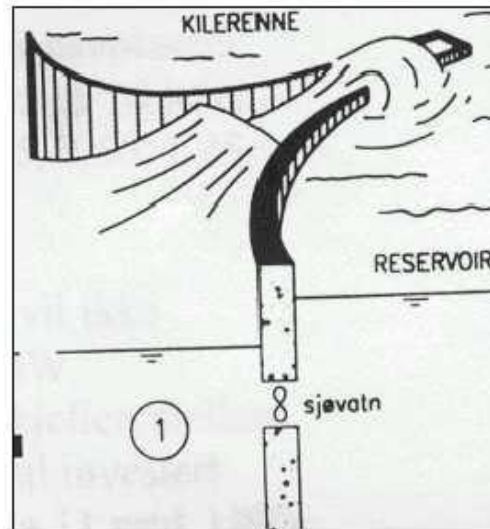
- Turbin basert på flottør eller annen bevegelse opp-ned

- Åpent hav eller i kystformasjoner
- Kan kombineres med vindkraft?



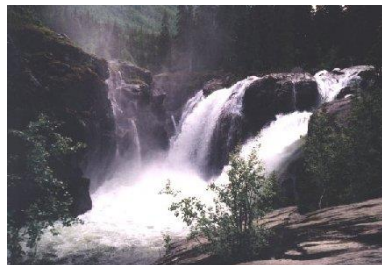
- Samling og fukusering av bølger; løftes inn i reservoar i basseng eller fjordarm

- Turbin i utløp
- Lagring innebygget



Indirekte solenergi - vannkraft

- Innebygget lagring i sjøer og demninger
- Økende interesse for mindre vannkraftverk
 - 10 MW: Småkraftverk
 - 1 MW: Minikraftverk
 - 100 kW: Mikrokraftverk
- Fra Kapittel 3:

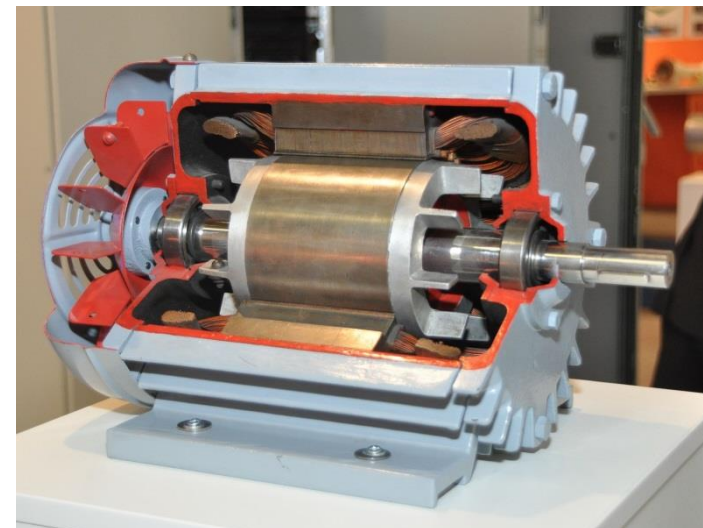
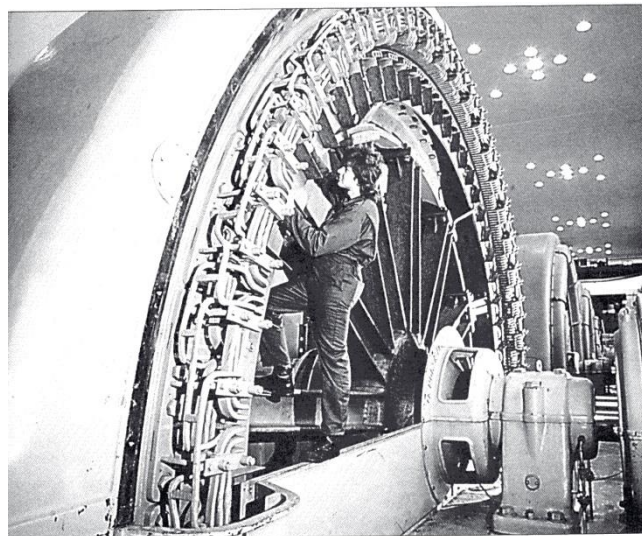


Solbergfoss 1 og 2.
Inngangspartiet til den nye stasjonen synes til venstre i bildet

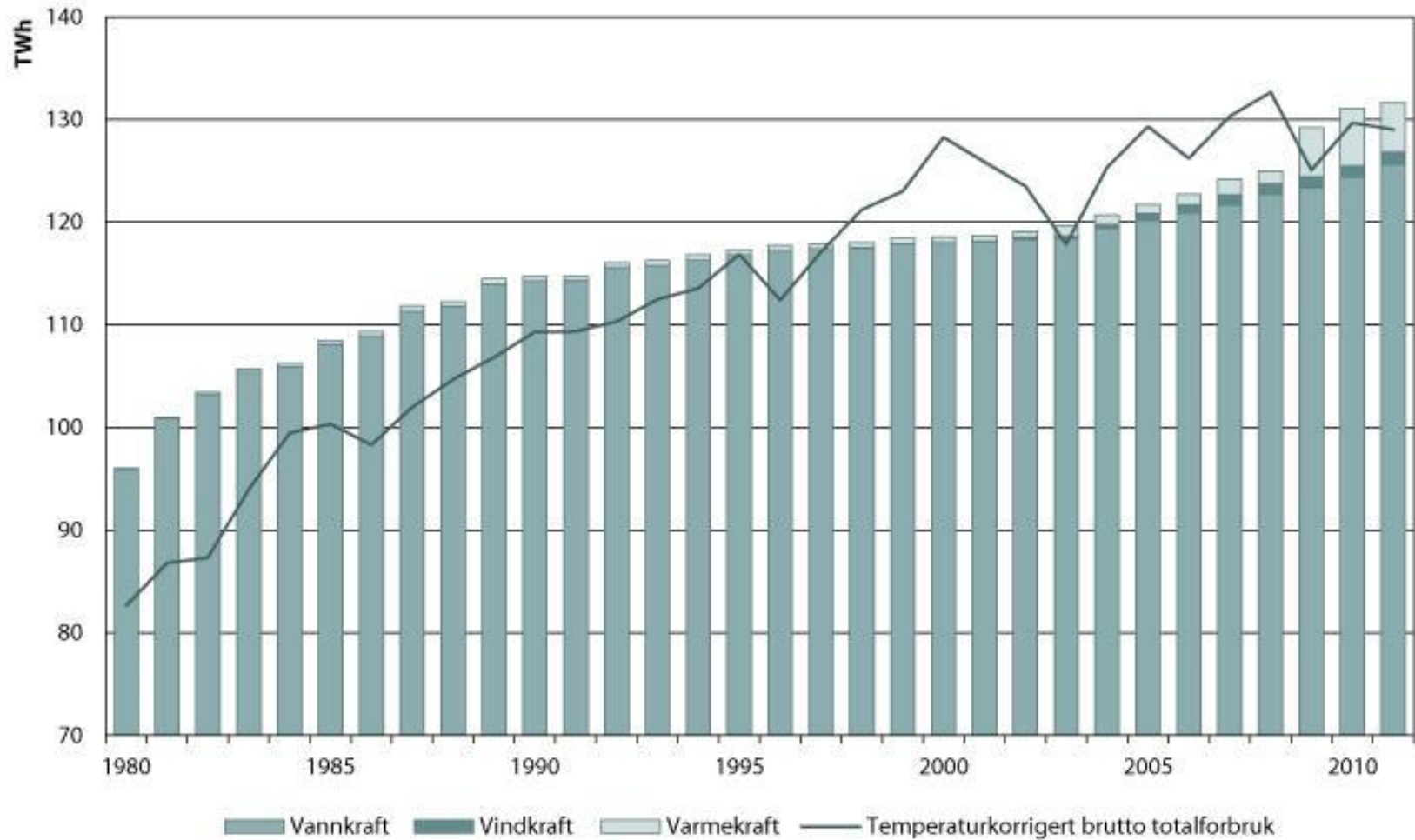


El-generator

El-motor



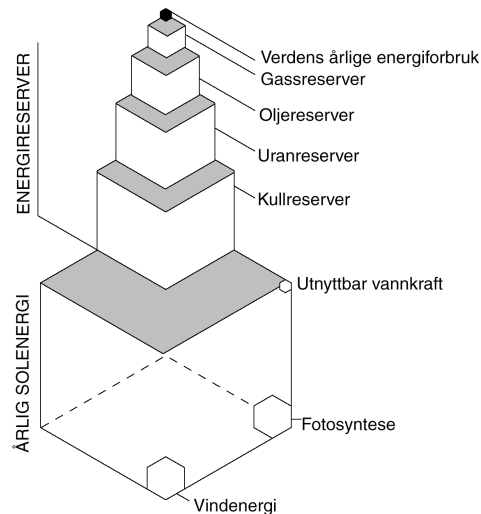
Vannkraft og annen kraftproduksjon i Norge



Bioenergi

- Med biomasse mener vi trevirke, kompost, avfall, flis, etc.

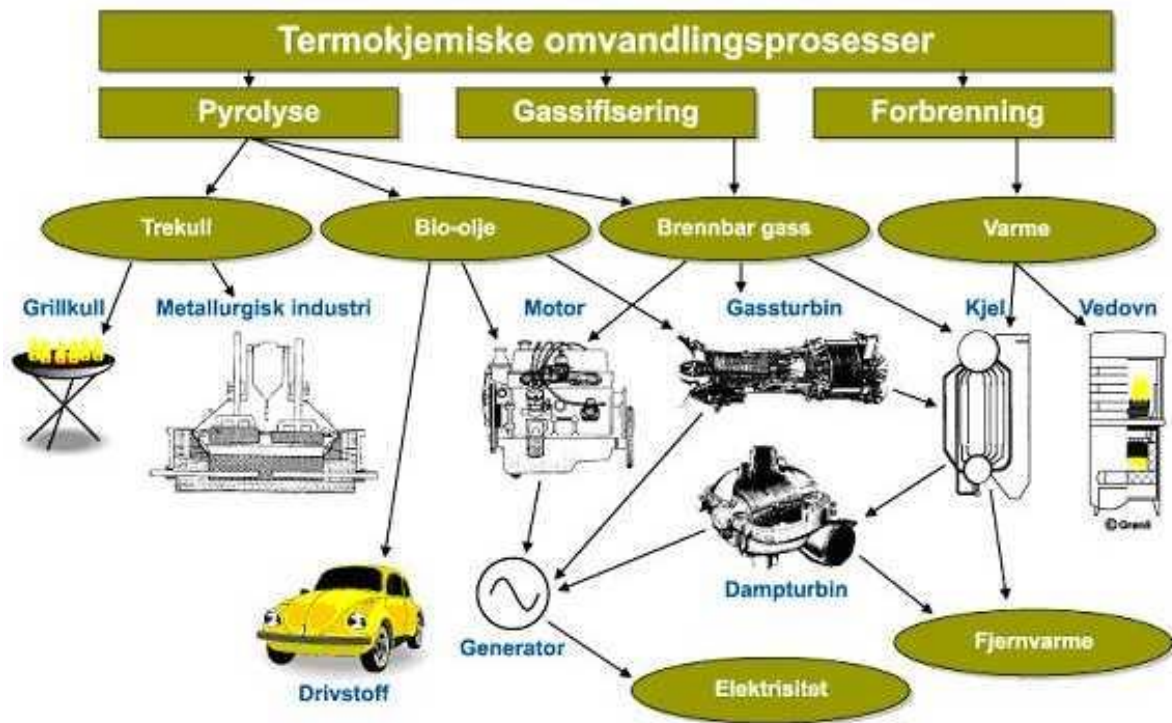
- Hva med mat?



Termokjemisk prosessering

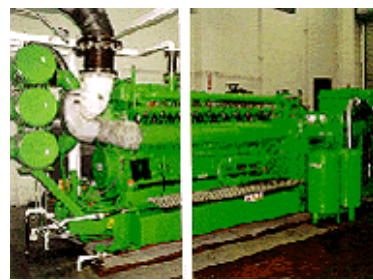
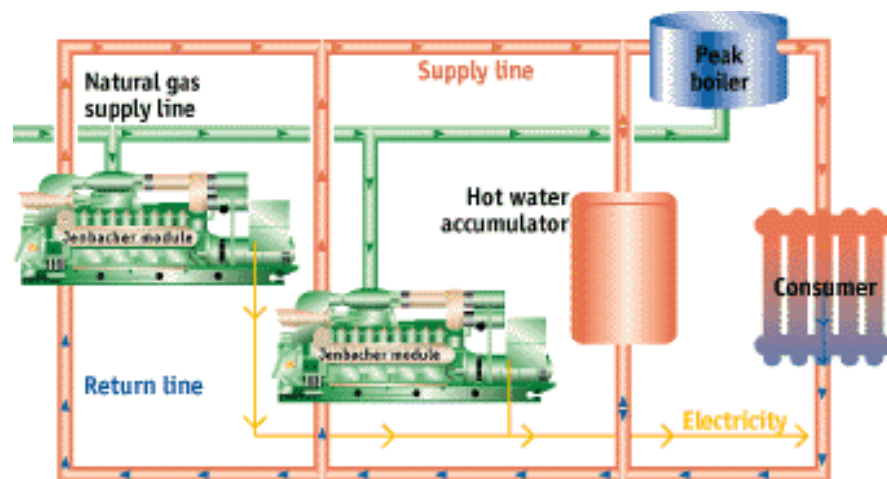
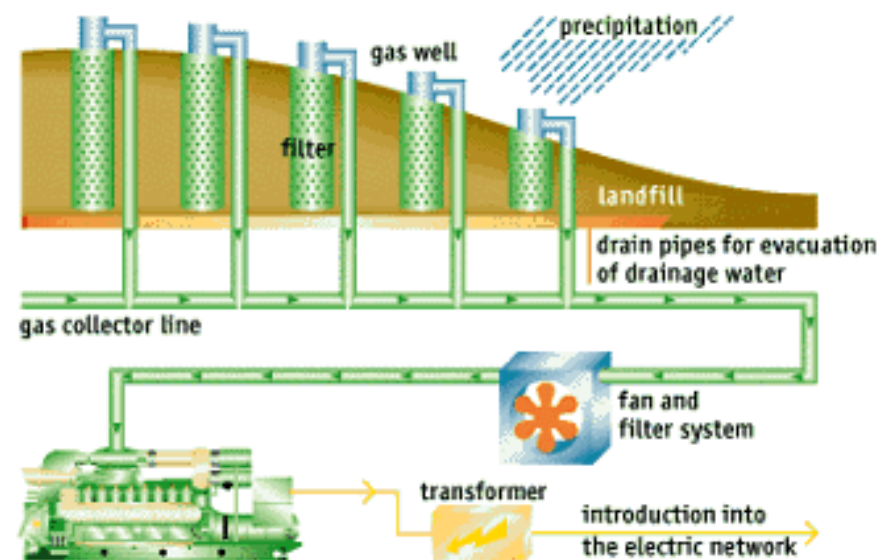
- Pyrolyse
 - Produkt: Trekull, oljer
- Gassifisering
 - Oksidasjon med damp, luft, O_2
 - Produkt: CH_4 , C_3H_8 , CO , H_2
- Forbrenning

ENERGI FRA BIOMASSE



Deponigass

- Avfallsdeponier utvikler gass ved forråtnelse og gassifisering
- Kan brukes til elektrisitet og fjernvarme
- Oslo:
 - 1000 GWh/år bioenergi
 - Mest fjernvarme
 - 50 GWh elektrisk via dampturbin
- Drammen: Lager H₂ ved reformering; for hydrogenbiler ☺



Geotermisk varme og jordvarme

- Kilder til geotermisk energi:
 - Varmestrøm fra jordens varme kjerne
 - Kjernereaksjoner i mantelen
- Strømmer til jordoverflaten
 - Gjennomsnittlig $0,063 \text{ W/m}^2$
 - Totalt 32 TW for hele kloden
- Virker sammen med oppvarming fra sola; jordvarme
- Vi kan ta ut geotermisk varme fra store dyp eller der varme når opp gjennom sprekker i skorpen
 - > 40°C : Oppvarming
 - > 150°C : Dampturbin for elektrisitet



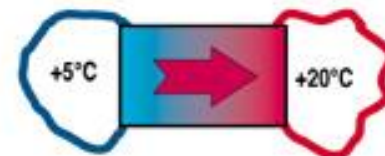
Varme og varmepumper

- Varm luft ($T > 0 \text{ K}$) kan deles i en varmere del og en kaldere del, med konstant totalenergi.
- Det koster litt energi (typisk 25%) å kjøre prosessen i endelig hastighet.
- Dvs: 1 kW elektrisitet inn kan typisk gi 3 kW varme ut.
- Vi varmer huset og kjøler uteluften (eller hav/sjø). Solen varmer omgivelsene opp igjen over tid, dvs. dette er i lengden solenergi.

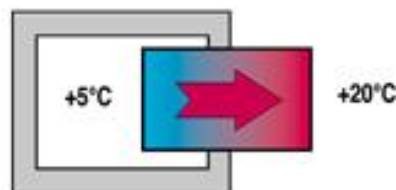
1) Naturlig varmetransport - fra varm til kald side



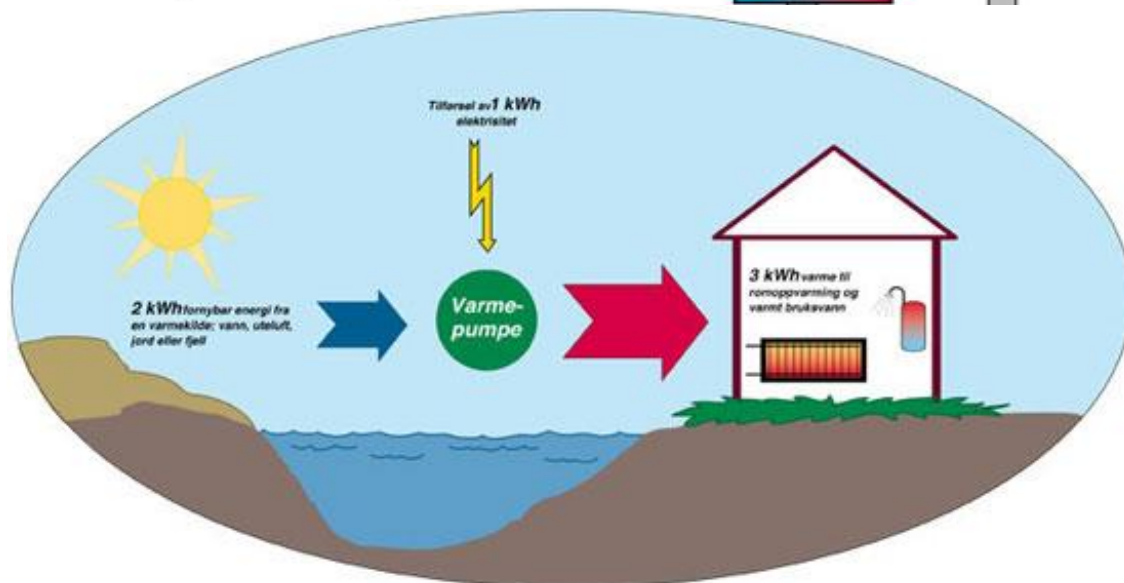
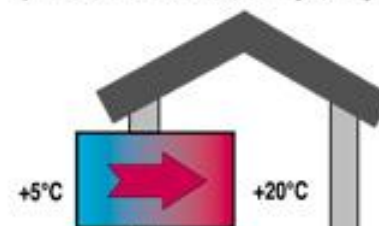
2) Varmepumpe - fra kald til varm side



3) Kjøleskap med varmepumpe



4) Hus med varmepumpe



Tidevannskraft

- Månens (og Solens) gravitasjon trekker på havvannet i regelmessige svingninger
- To prinsipper:
 - Mølle som utnytter strømmen gjennom sund begge retninger
 - Oppfylling av åpnet basseng eller fjordarm – stengning – utløp gjennom turbin
- Norges første anlegg i Kvalsundet ved Hammerfest



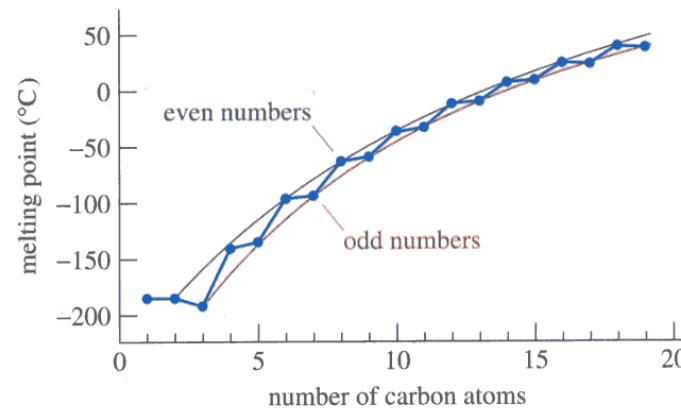
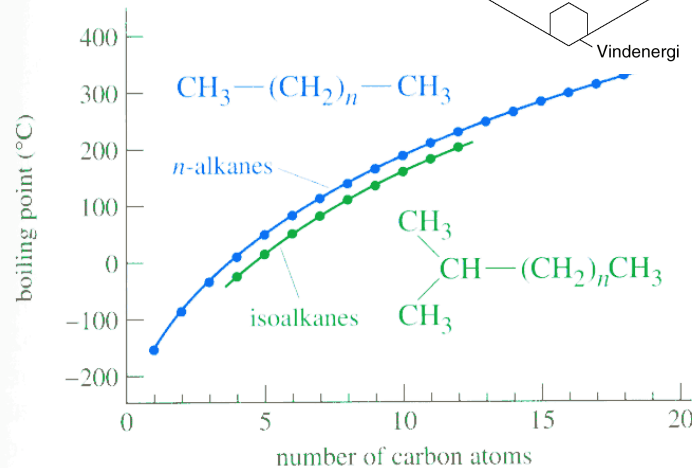
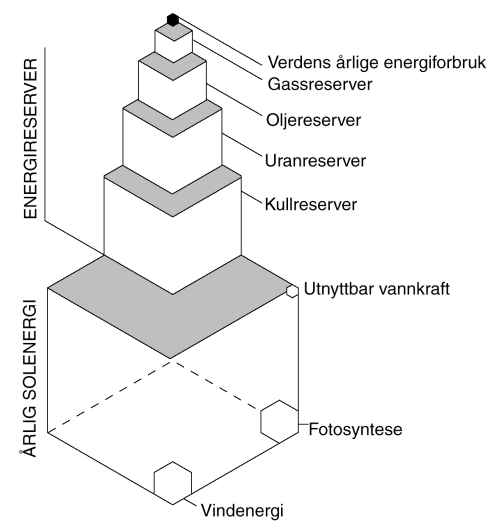
Fossile energikilder

- Kull

- Komplekst
 - organisk
 - C,H,O,S,N
 - uorganiske mineraler

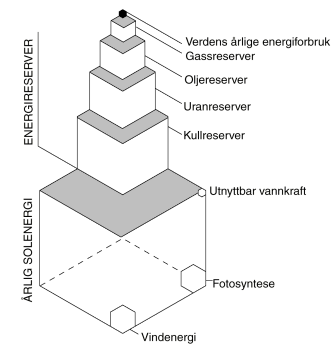
- Hydrokarboner

- Alkaner; mettede
 - C_nH_{2n+2}
 - Metan, etan, propan, butan...
- Alkener og alkyner (umettede)
 - eks. eten C_2H_4 og etyn (C_2H_2)
- Uforgrenede/forgrenede
- Uaromatiske/aromatiske (ringformede)
- Gass: $n = 1..3$
- Råolje: $n = 2....$
- Forbrenner til CO_2 og H_2O , eks.:
 $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$



Kull

- Største reserve av energi på jorden
 - Mange kvaliteter
 - Mange bruksområder
 - Forbrenning
 - Foredling som brensel
 - Råstoff
 - Karbotermisk reduksjon – fremstilling av metaller
- Behandling som for biomasse:
 - Forbrenning
 - Pyrolyse
 - koks
 - Forgassing
 - Med damp til vanngass:
$$\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$$
- Høye innhold av svovel
 - SO_x ; sur nedbør
- Tungmetaller
- Sot



Kina: 3 215 døde under produksjon av kull i 2008
(offisielle tall, i følge www.china.org.cn)

Olje

- Råolje:
 - Gass, flytende, fast
 - Varierende svovelinnhold
- Fraksjonert destillasjon, bl.a.:
 - Gass ($n=1..2$)
 - LPG (Liquefied Petroleum Gas) ($n=3..4$)
 - Bensin ($n=5..8$)
 - Flybensin og diesel ($n=9..16$)
 - Oljer (fyring, smøring) ($n=16..30$)
 - Paraffinvoks ($n>25$)
 - Asfalt ($n>35$)
- Cracking
 - Deling i mindre komponenter
 - Øker andelen lettere råstoffer, for bensin og polymerer
- Prosessering
 - Hydrogenering/dehydrogenering
 - Oksidasjon, aromatisering, polymerisering



Destillasjonstårn og cracker

Petroleumsindustri: olje og gass

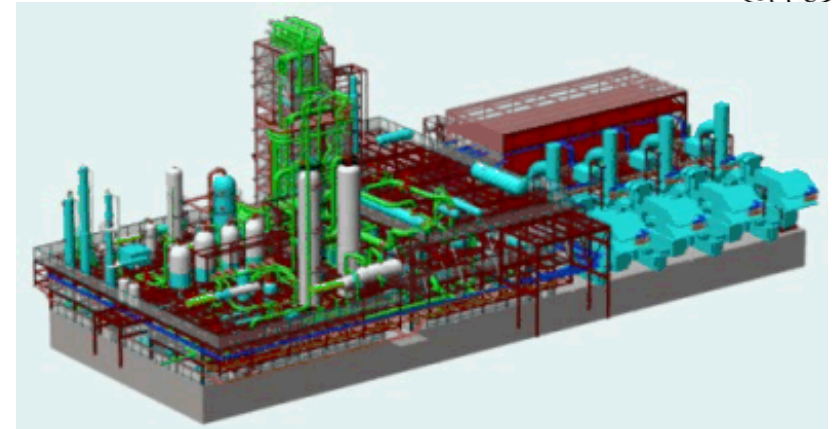
Petrokjemisk industri: avledede produkter

Naturgass

Kårstø: 3,5 TWh

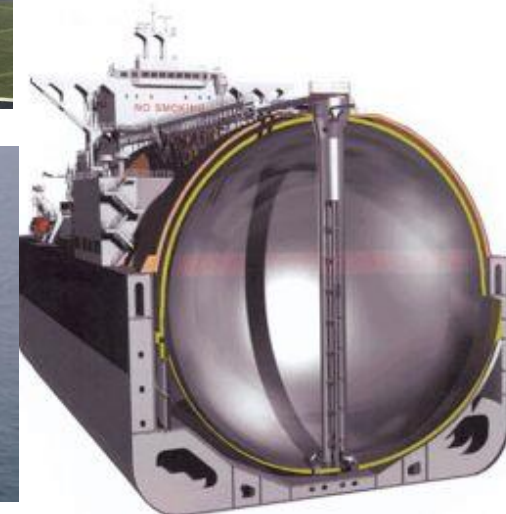


- Typisk sammensetning:
 - 70% CH₄
 - 10% C₂H₆
 - 15% C₃H₈
 - 5% andre
- LNG (Liquefied Natural Gas)
- Lave svovelinnhold
- Viktige reaksjoner:



Snøhvitfeltets ilandførings- og LNG-anlegg på Melkøya ved Hammerfest

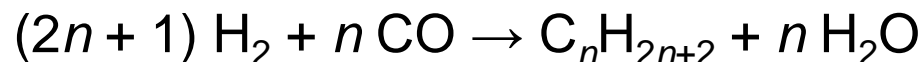
- Partiell oksidasjon til syntesegass
$$\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$$
- Dampreforming til syntesegass
$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$$
- Vann-skift
$$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$$
- Metanolsyntese
$$\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$$
- Dimerisering, eks.
$$2\text{CH}_4 = \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$$



Dagens LNG-skip, utviklet av Kværner

Fischer-Tropsch-syntese

- Fra syntesegass til høyere hydrokarboner, mest alkaner:



150-300°C, Katalysatorer: Co, Fe, Ru...

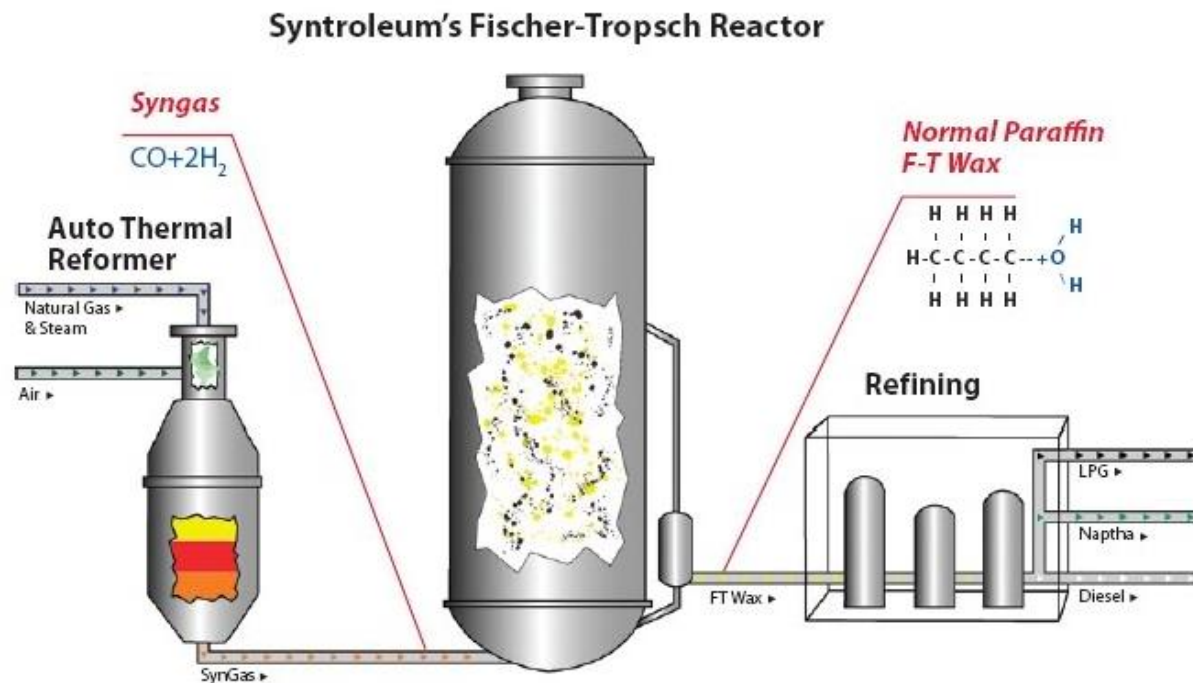
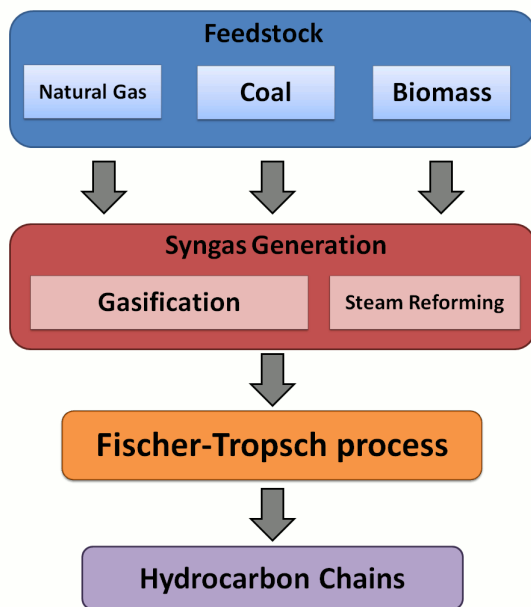
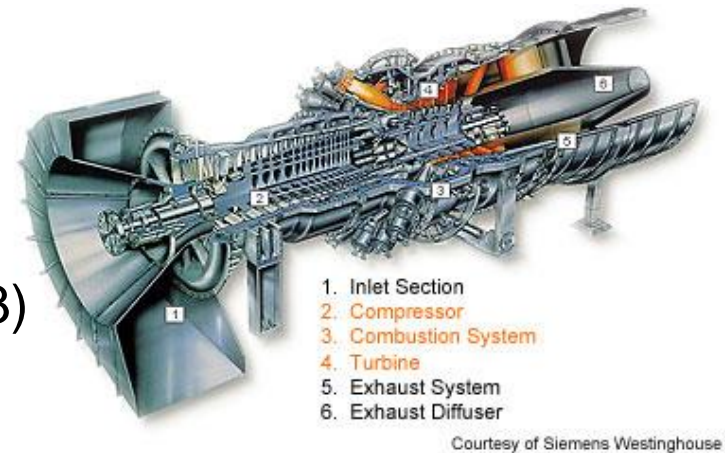


Image Source: BioPact/Syntroleum

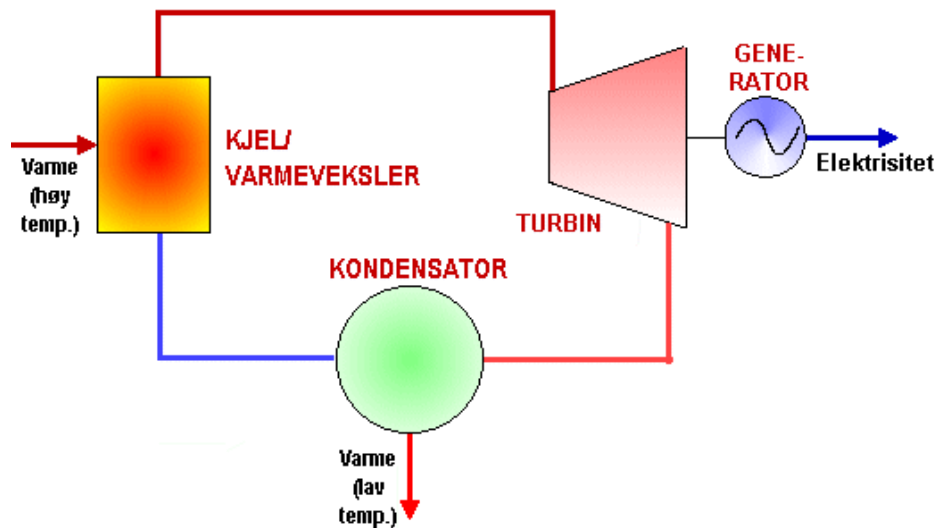
Varmemaskiner

- Fossile brensel konverteres i all hovedsak til varme ved forbrenning, og videre til bevegelse ved varmemaskiner.
- Varmemaskiner er godt utviklet og moden teknologi.
- Begrenset effektivitet – Carnot-syklus (Kap. 3)
- Roterende maskiner - turbiner
- Reverserende maskiner - motorer

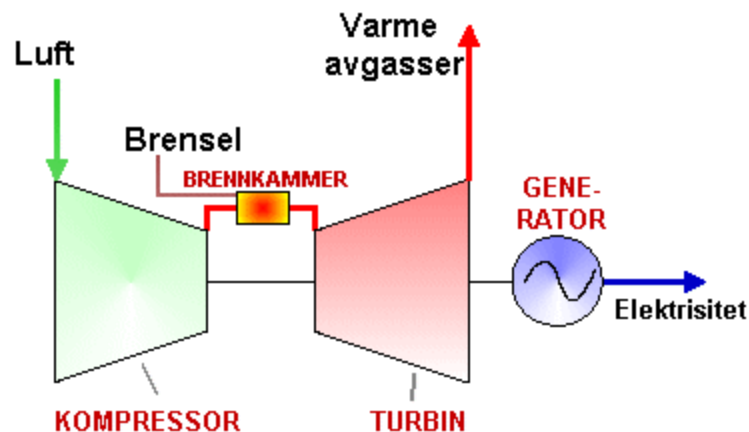


Varmemaskiner: Turbiner for ekspanderende gasser

- Dampturbin
 - Kjel



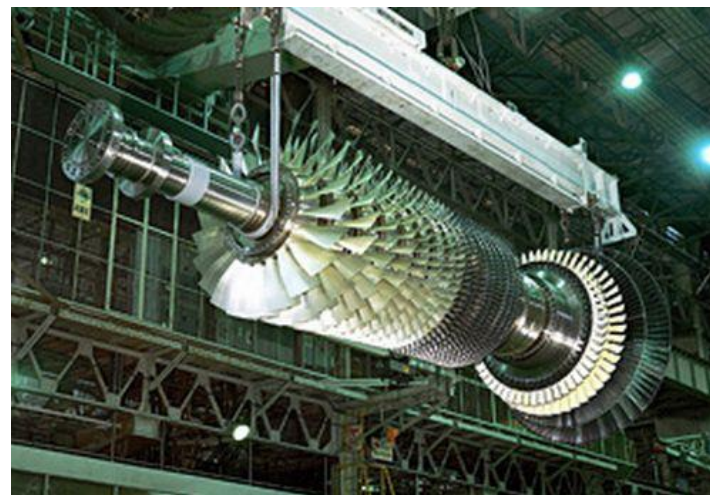
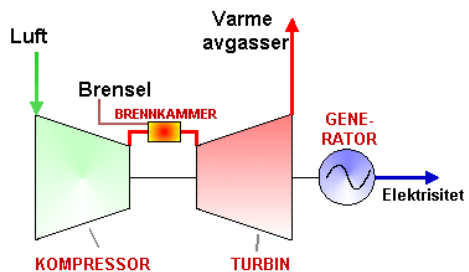
- Gassturbin
 - Brennkammer
 - Turbin
 - Kompressor



Fra kjemisk til mekanisk energi; roterende motorer

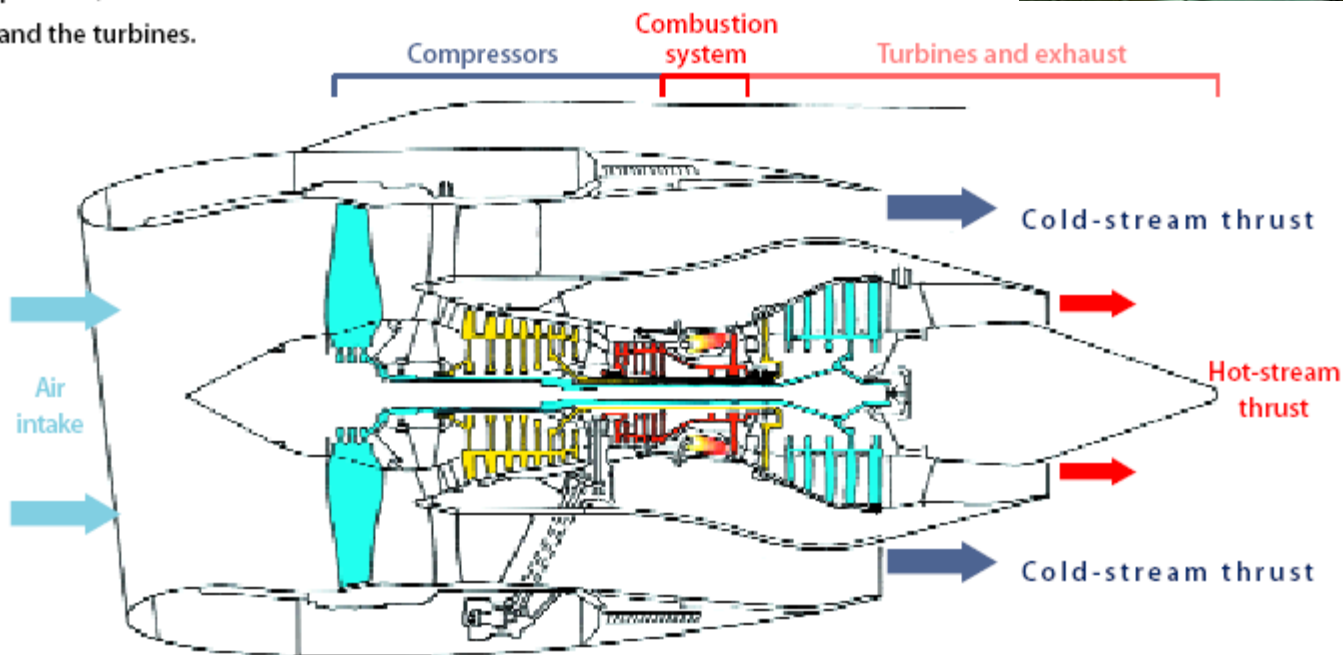
Gassturbin

Jetmotor



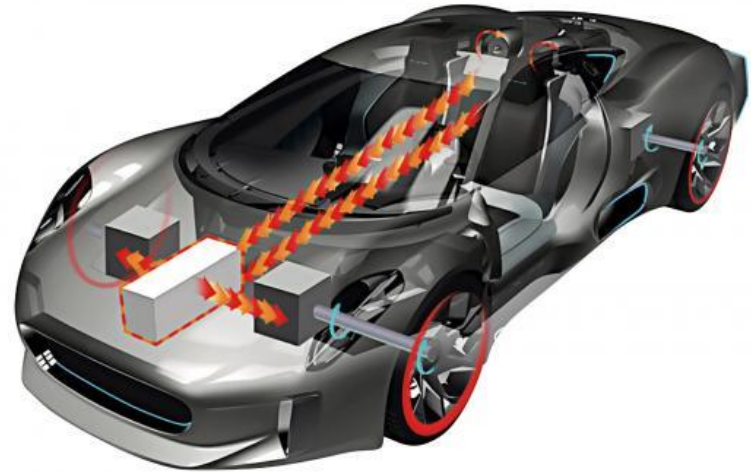
Layout of the gas turbine

The gas turbine has three main sections: the compressors, the combustion system, and the turbines.



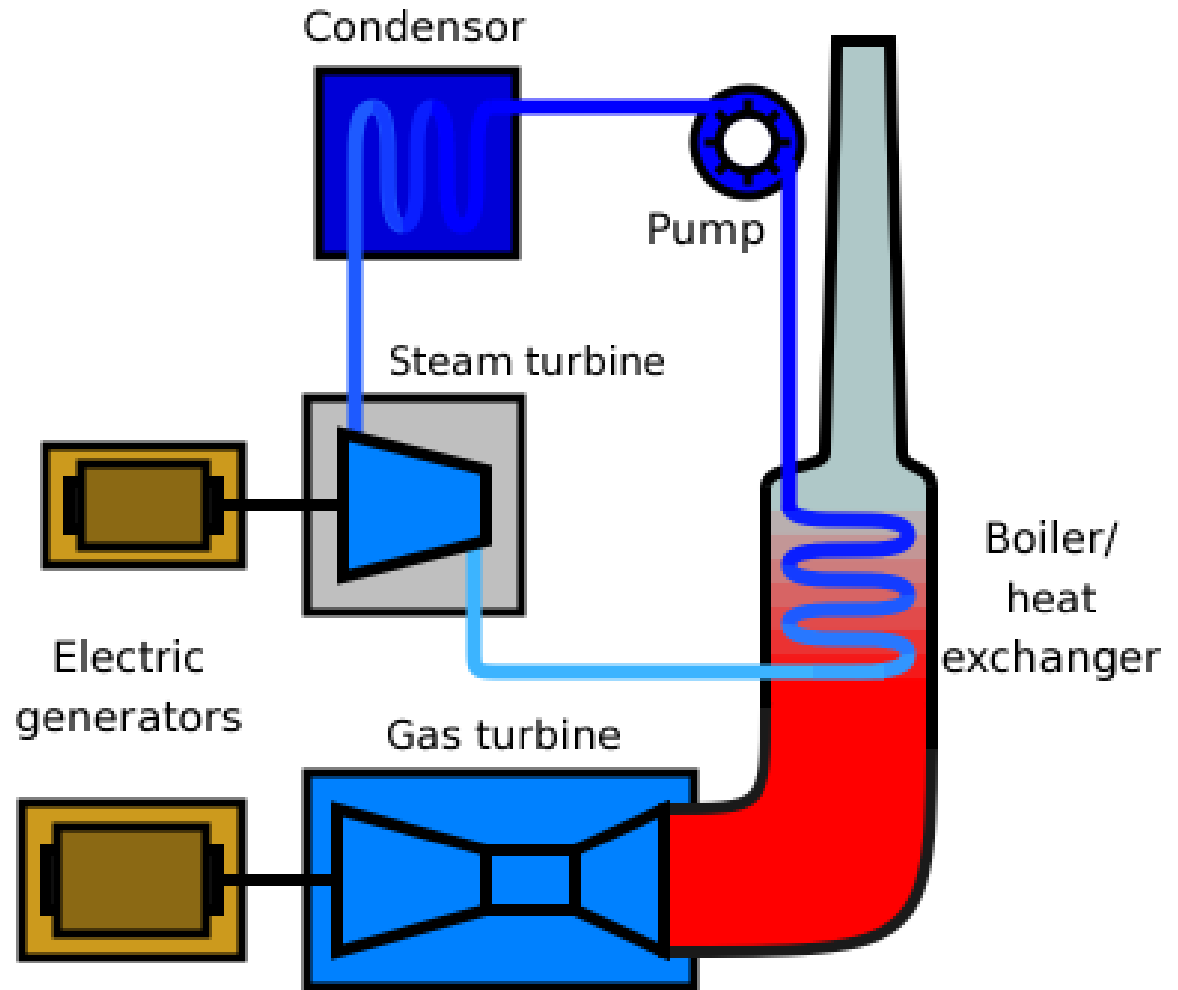
Jetmotor i biler?

- Jaguar CX 75 konsept
- Elbil med mikrogassturbin
“range-extender”



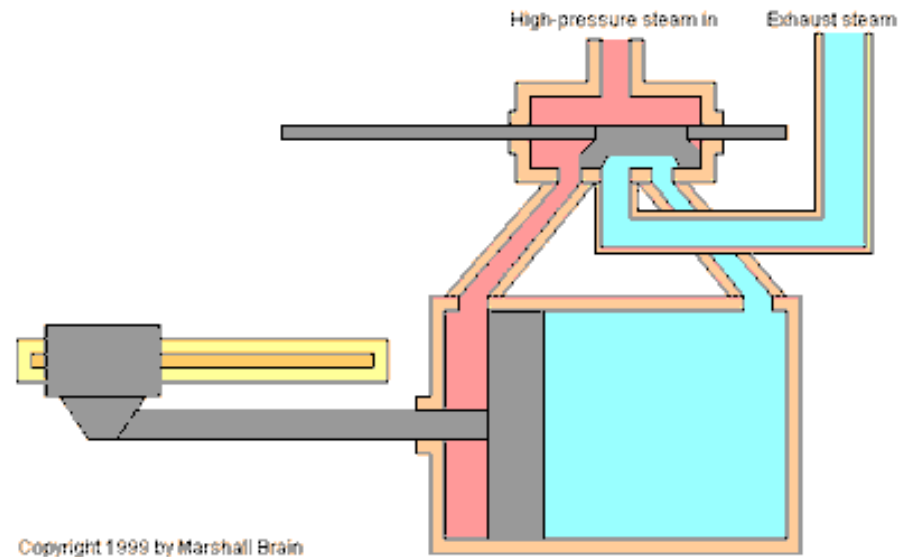
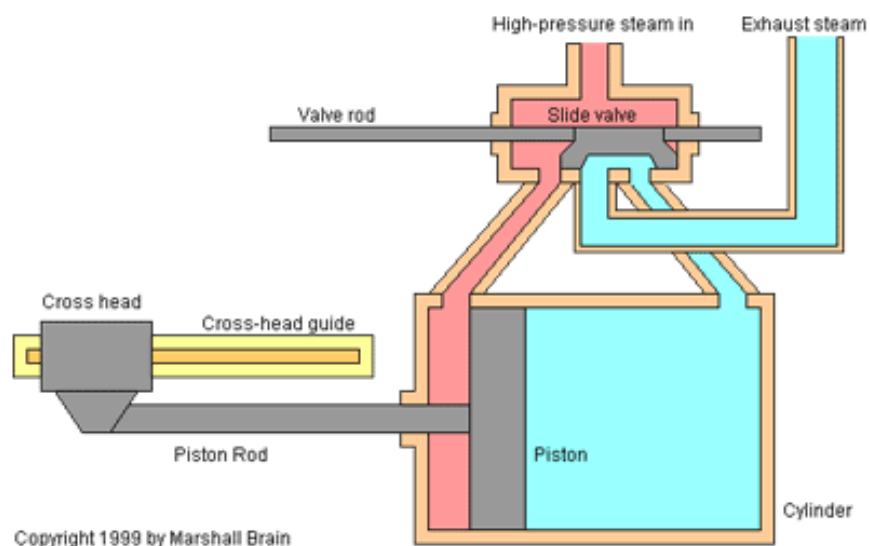
"Combined cycle" kraftverk

- Gassturbin
- Dampsturbin



Fra kjemisk til mekanisk energi; reverserende motorer

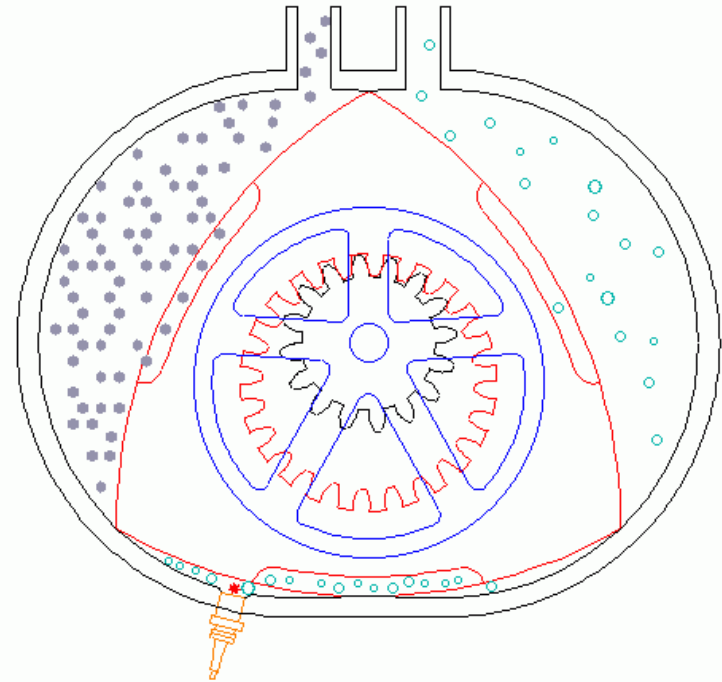
Dampmaskinen



Fra kjemisk til mekanisk energi

Forbrenningsmotorer

- Reverserende
 - Velkjent
 - 1...n sylindre, 2- eller 4-takter
 - Otto
 - Eksplosjon tennes med gnist
 - Diesel
 - Eksplosjon skjer ved tilstrekkelig kompresjon
- Roterende
 - Wankel
 - Morsomt og i prinsippet effektivt design, men nå ute av produksjon

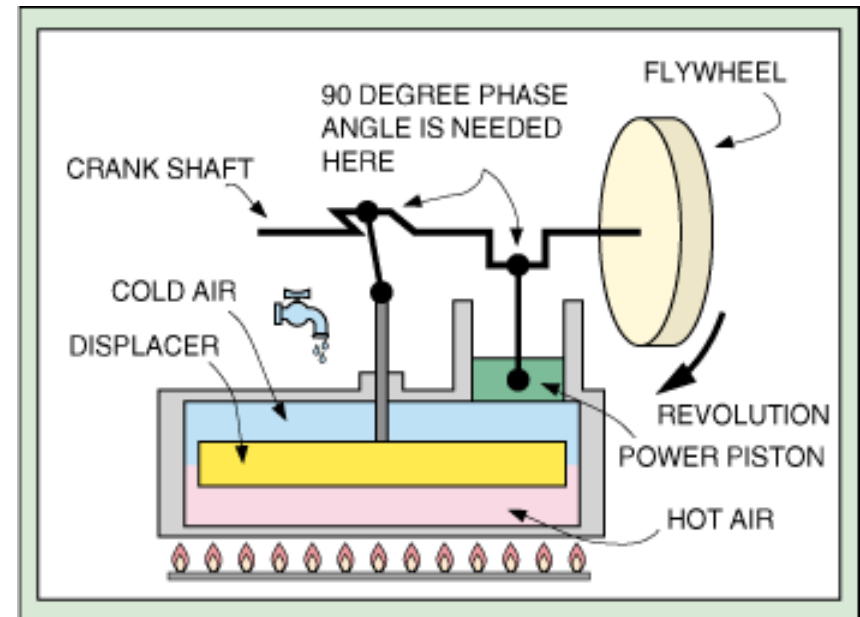
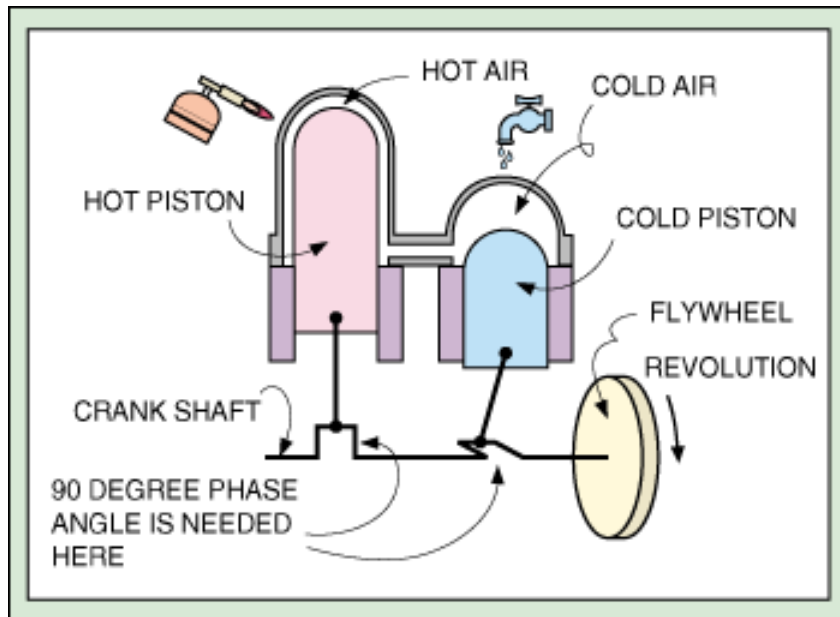


Copyright 2000, Keveney.com

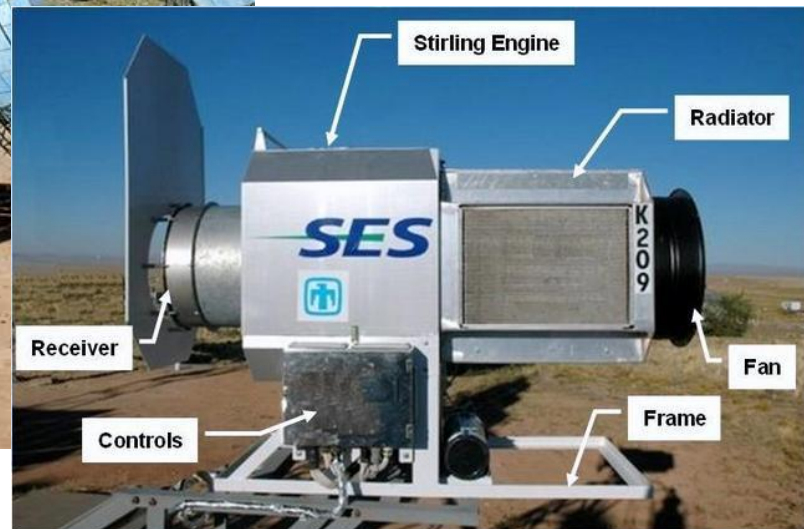


Sterlingmotoren

- Lukket gassmengde
- Ekstern oppvarming og avkjøling
 - Kan bruke mange energityper; alt som avgir varme: brensel, elektrisitet, solvarme...
- I prinsipp effektiv og stillegående



Solvarme og stirlingmotorer

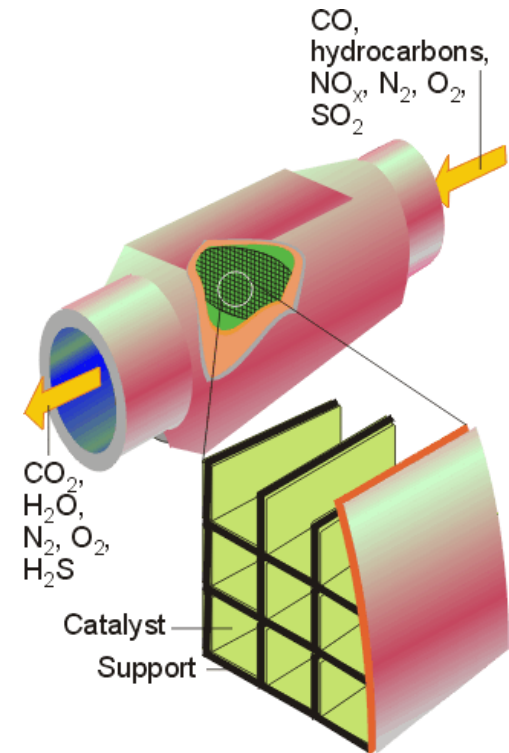


Virkningsgrad (effektivitet)

- = avgitt effekt dividert på tilført energi per tidsenhet
 - tilført energi oftest lik varmeinnholdet (reaksjonsentalpi) for brenselet
 - Virkningsgrad typisk 20% (bil) til 50% (gassturbin)
- Tap:
 - Irreversibel termodynamikk, Carnotsyklus
 - Varmetap
 - Ufullstendig brenselutnyttelse
 - Friksjon
 - Tomgang
 - Tapene blir til varme; kan utnyttes og øke total effektivitet
 - Damp turbin og generator
 - Termoelektrisk restvarmegenerator
 - Oppvarming av bil
 - Fjernvarme til hus

Avgassrensing og -kontroll

- For mye luft: NO_x
- For lite luft: Hydrokarboner og sot
- Feedback til motor og forgasser fra
 - Lambdasensor (pO_2)
 - NO_x -sensor



CO₂-separasjon – ”CO₂-fritt kraftverk”

- C eller CO₂ må mest mulig fjernes fra fossile brensel, og deponeres, slik at vi i praksis brenner bare hydrogenet

1. Separasjon av CO₂ etter forbrenning (skille CO₂ fra N₂ og H₂O) (Post-combustion)

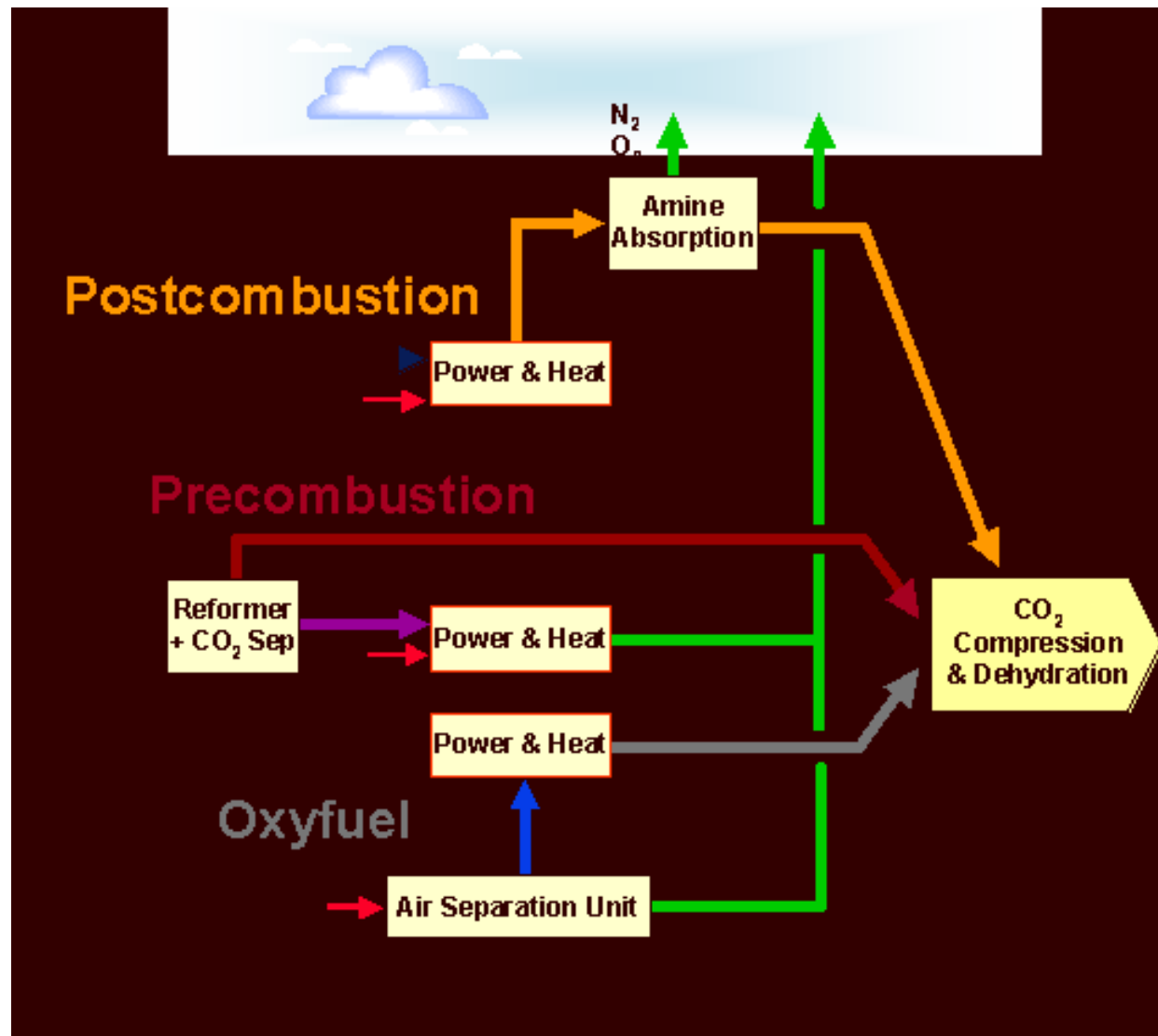
1. Amin-absorbsjon (scrubbing)
2. Membraner

2. Separasjon av CO₂ før forbrenning (skille CO₂ fra H₂) (Pre-combustion)

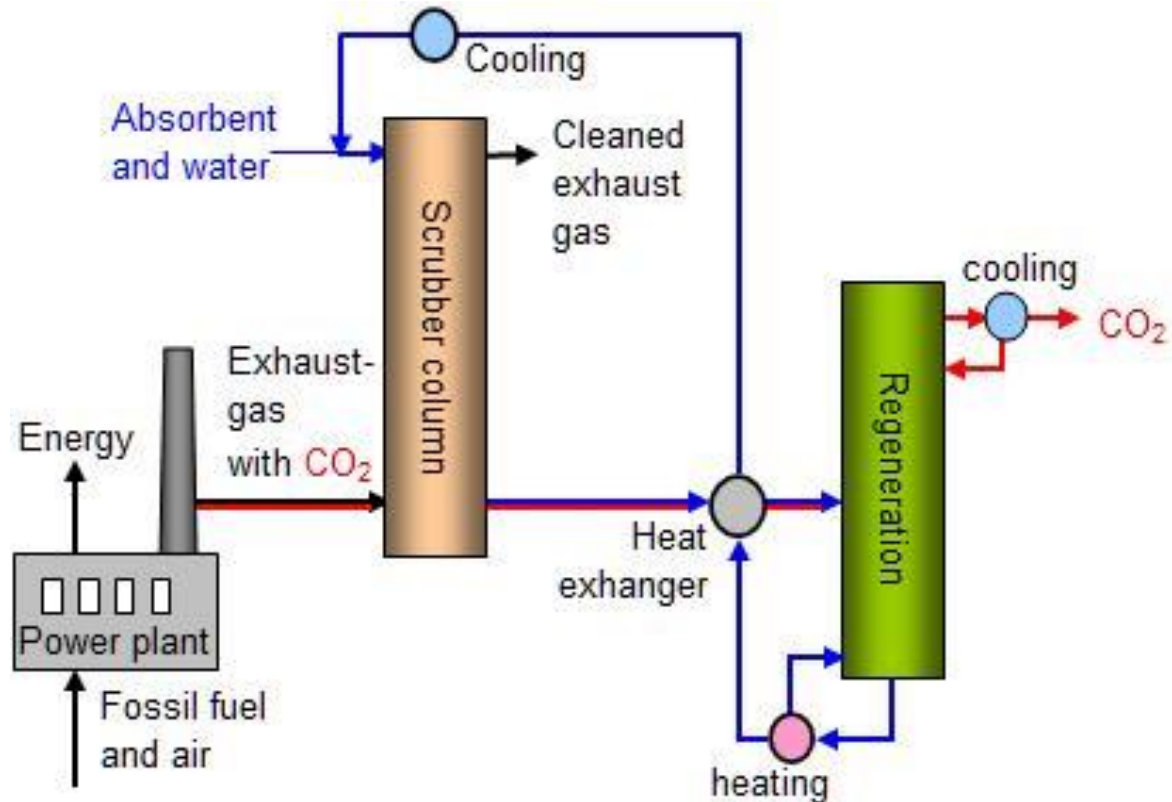
1. Scrubbing
2. Membraner

3. Separasjon av O₂ og N₂ i luft før forbrenning (skille CO₂ fra H₂O) («Oxyfuel»)

1. Luftdestillasjon
2. Membraner

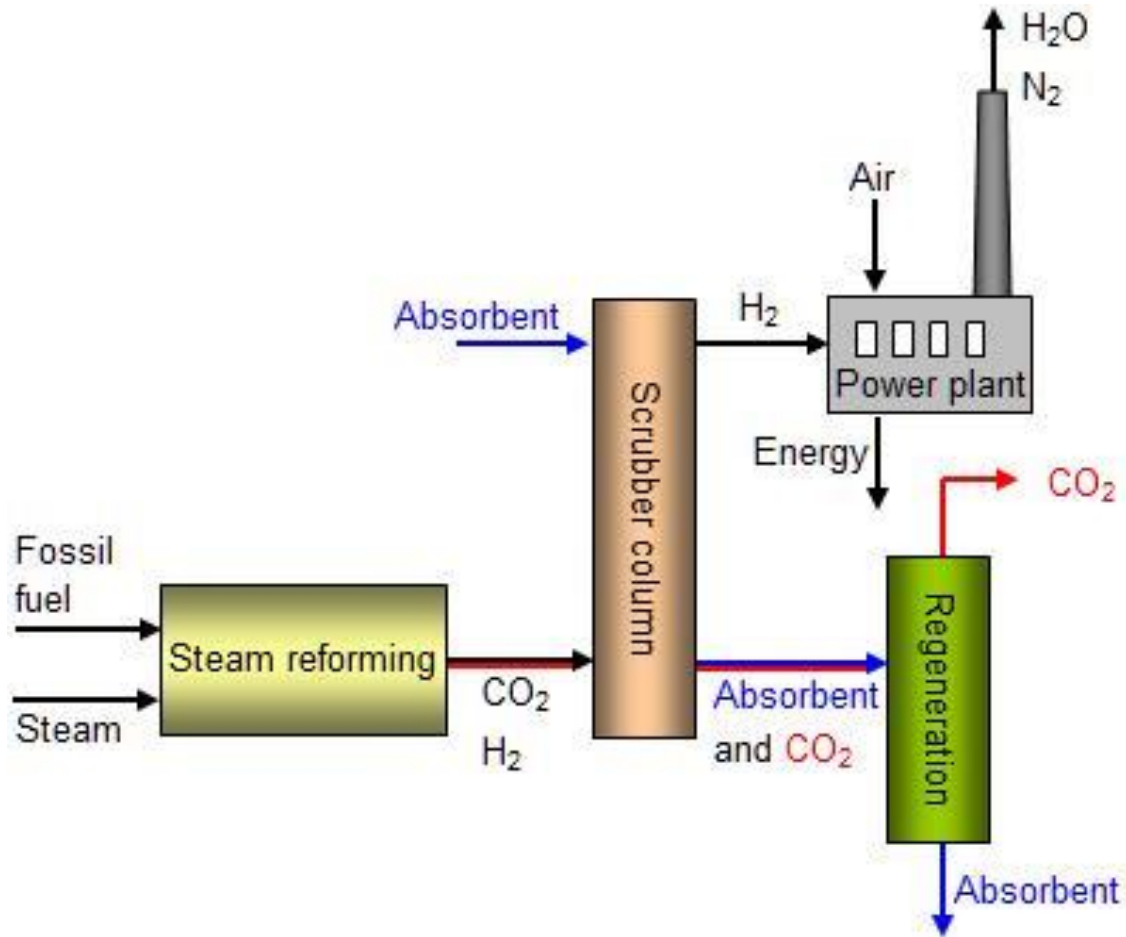


Post-combustion



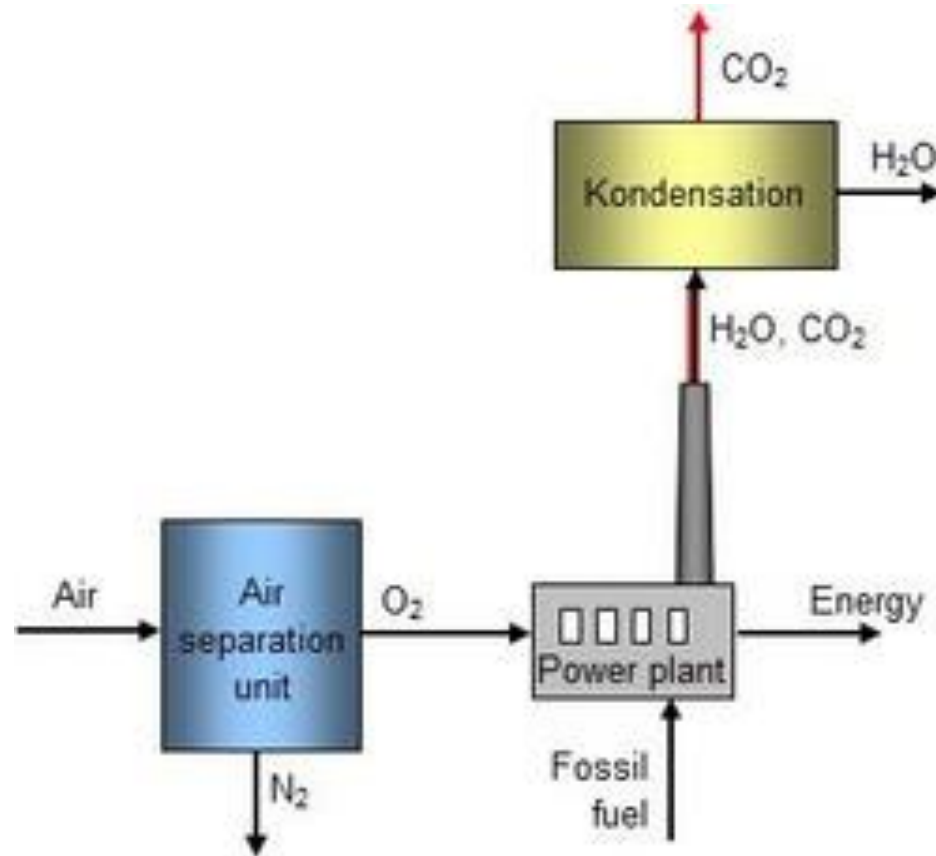
Figur: Bellona

Pre-combustion



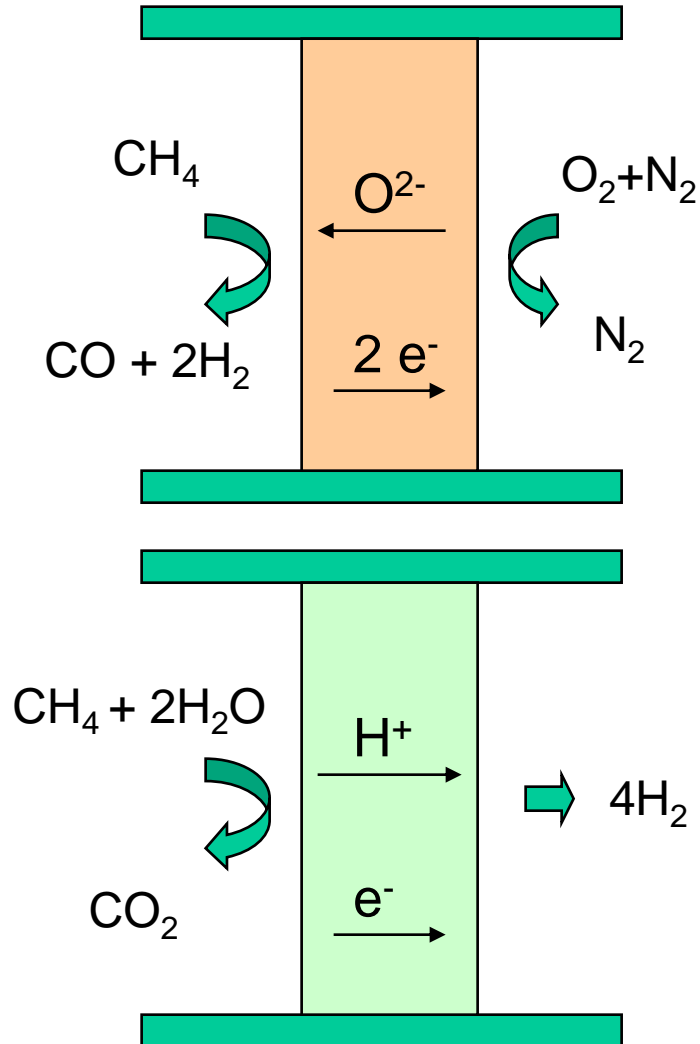
Figur: Bellona

Oxyfuel-prosess

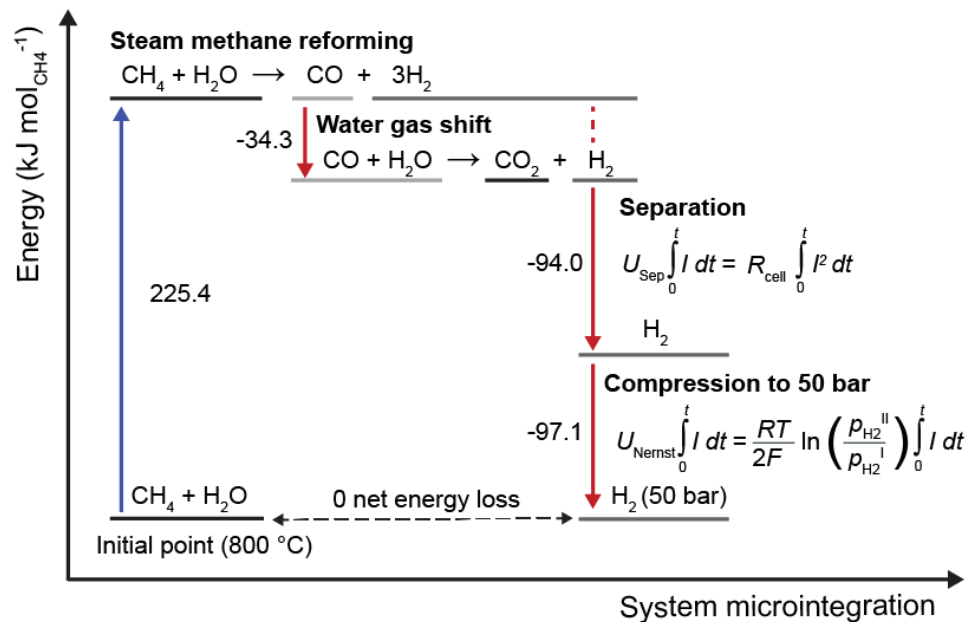
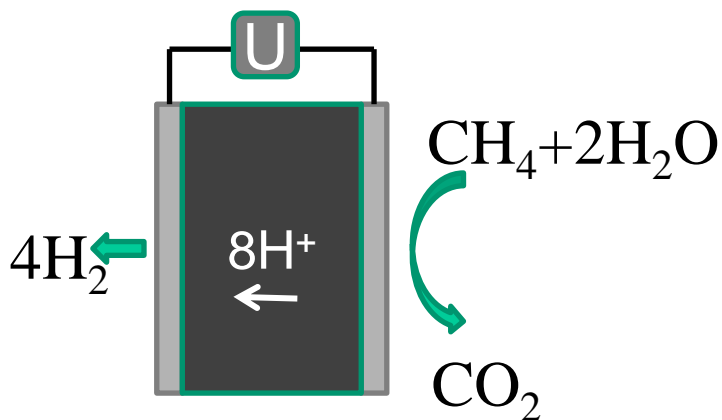


Figur: Bellona

Eksempler på bruk av blandede ledere for gaseparasjonsmembraner



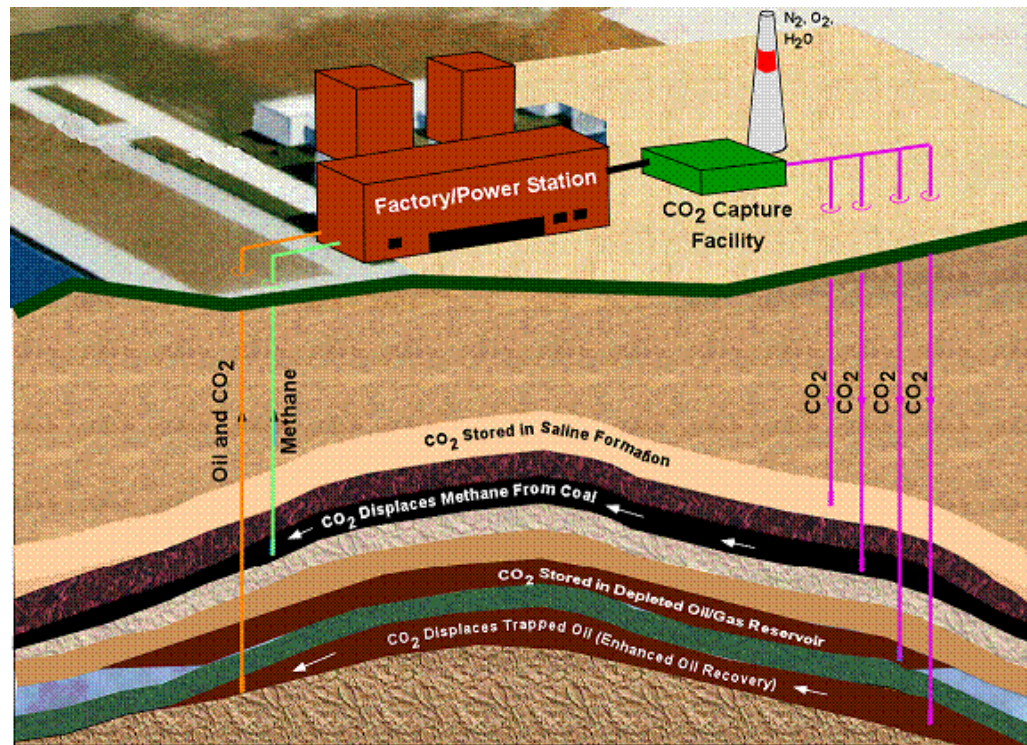
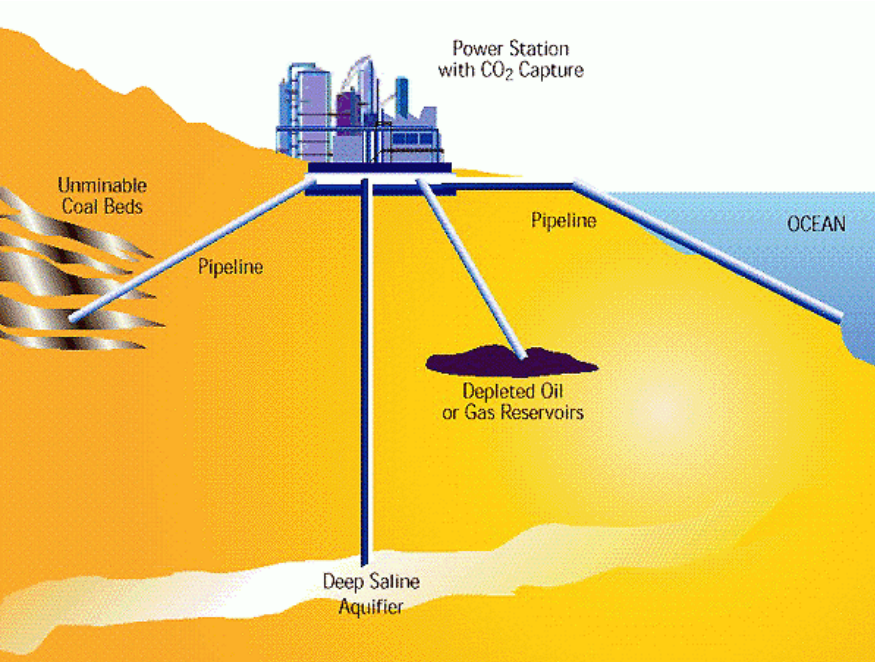
Steam reforming and electrochemical extraction and compression of H₂ with thermal microintegration



H. Malerød-Fjeld, D. Clark, I. Yuste-Tirados, R. Zanón, D. Catalán-Martinez, D. Beeff, S.H. Morejudo, P.K. Vestre, T. Norby, R. Haugsrud, J.M. Serra, C. Kjølseth, “Thermo-electrochemical production of compressed hydrogen from methane with near-zero energy loss”, *Nature Energy* (2017) in print.

CO₂-deponering

Mange muligheter: mer et spørsmål om pris

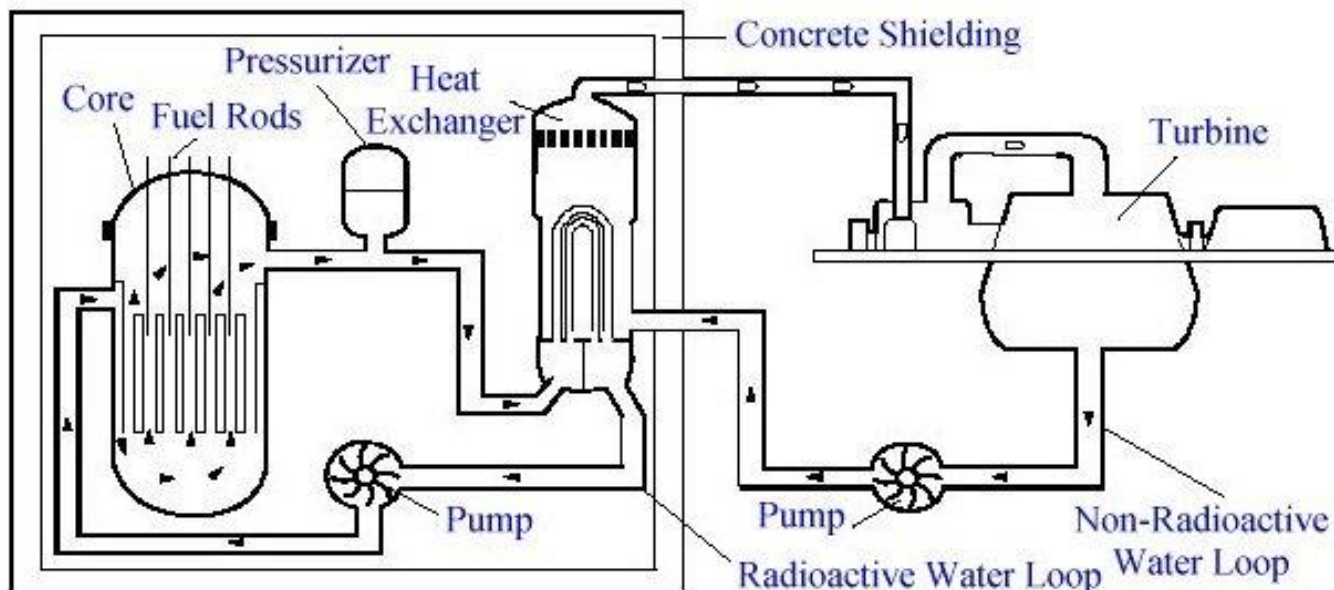
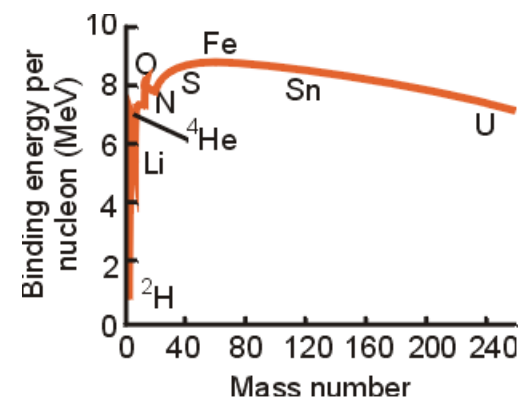


Fra fossil til fornybar energi

- Reservene av hydrokarboner varer ikke evig
 - Økte CO₂-utslipp endrer klimaet dramatisk
 - Overgang til ikke-fossil, fornybar energi er derfor nødvendig
 - Dette tar tid, fordi
 - fornybar energi er dyrere enn fossil
 - hydrogen fra fossile kilder er billigere enn fra fornybare
 - fornybar energi er oftest vanskeligere å transportere og lagre
 - overgangen krever tid og mye ekstra energi (materialer, anlegg...)
- Redskaper:
 - Bedre bruk av fossil energi
 - Utbygging av fornybar energi
 - Energieffektivisering
 - + kombinasjoner
 - Krever nye og bedre prosesser og materialer (derfor MENA1001!)

Kjernekraft - fisjon

- Uran; flere isotoper; ^{238}U (stabil) og ^{235}U
- Anriker uran på ^{235}U ved filtrering av $\text{UF}_6(\text{g})$
- $^{235}\text{U} + \text{n}$ ("kaldt") = $^{236}\text{U} = ^{92}\text{Kr} + ^{142}\text{Ba} + 2\text{n} + \text{energi}$
- En fisjonsreaktor har
 - brenselstaver med ^{235}U
 - absorptorstaver (eks. Cd)
 - moderatorstaver (eks. grafitt, H_2O)
 - kjølemiddel (H_2O , D_2O)



Problemer med kjernekraft

- Kjernefysiske våpen
 - Atombomben (fisjon)
 - Hydrogenbomben (fusjon)
- Ulykker, terrorhandlinger
- Lagring av avfall
 - Nedbrytning og korrosjon av innkapslingsmaterialer
- Hvem bestemmer hvem som får lov til å ha kjernekraftverk?

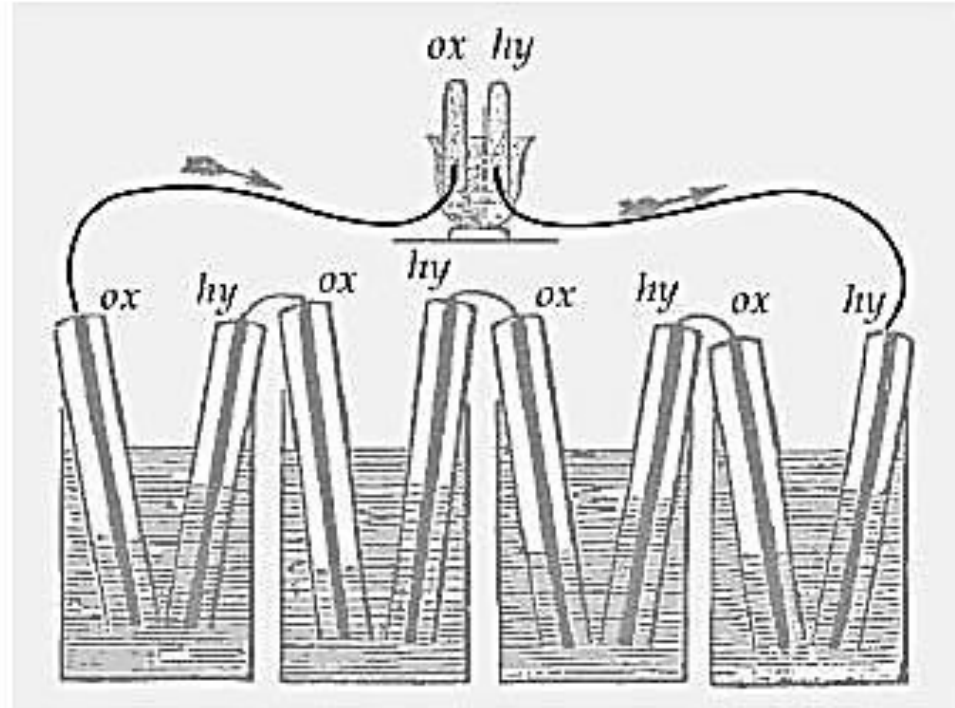


Fra kjemisk til elektrisk energi

Brenselceller

- Sir William R. Grove, 1839
- $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$
- Svovelsyre som elektrolytt
- H_2 og O_2 som brensel

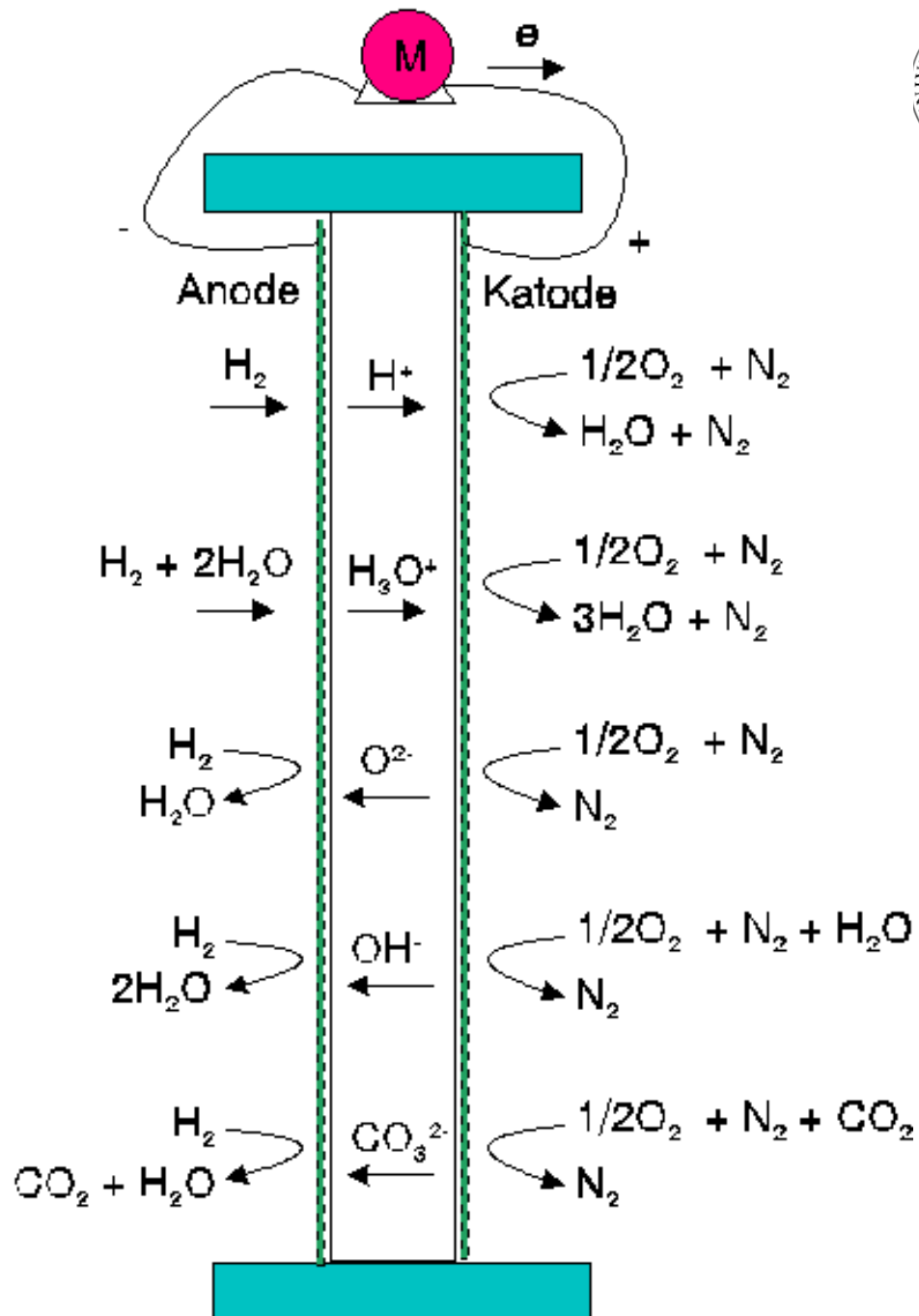
- Kunne også spalte vann (elektrolysør)



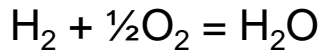
Mange typer
brenselceller

Eksempler: H_2 + luft

Fosforsyre (PAFC)-, Alkaliske (AFC)- og Smeltekarbonat (MCFC)-brenselceller er relativt etablerte og eksisterer i store anlegg, men har problemer med aggressiv flytende elektrolytt. Vi vil i det videre bare behandle brenselcelle-typer med faste elektrolytter; PCFC, PEFC og SOFC.



Brenselcelle med rent protonledende elektrolytt Proton Conducting Fuel Cell (PCFC)



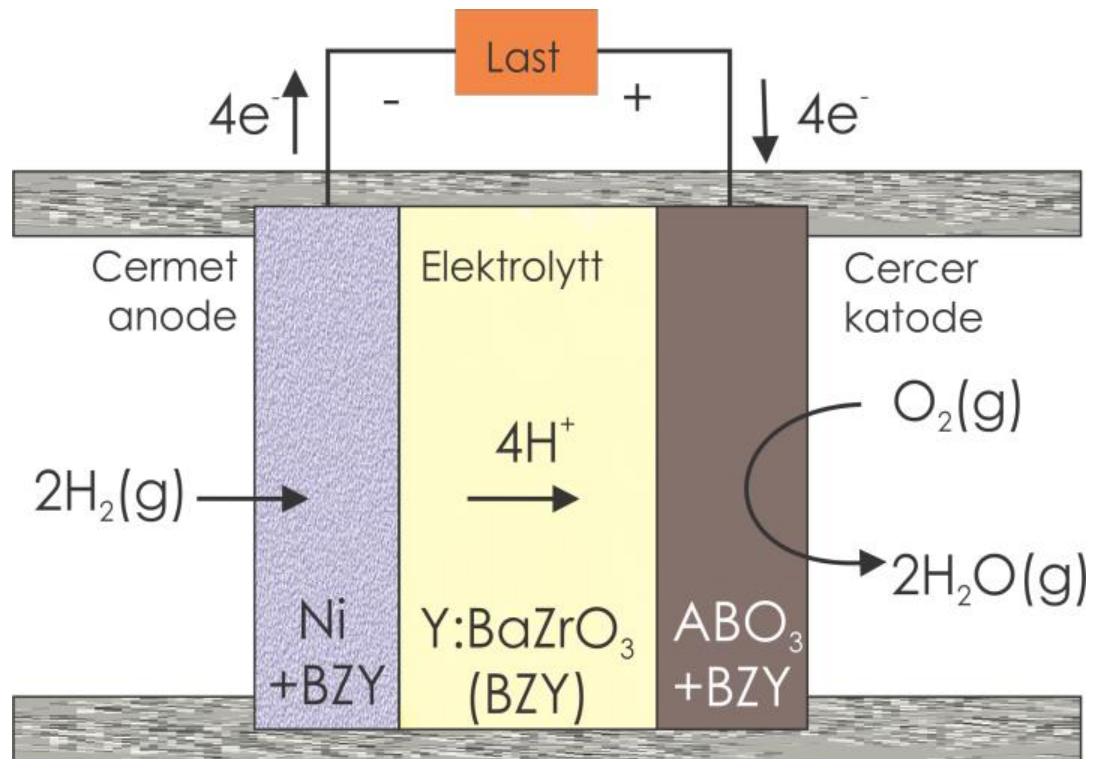
Enkel “balance-of-plant” (BOP)

3 klasser rene protonledere:

Høytemperatur polymerer:
eks. poly-benzimidazol (PBI)

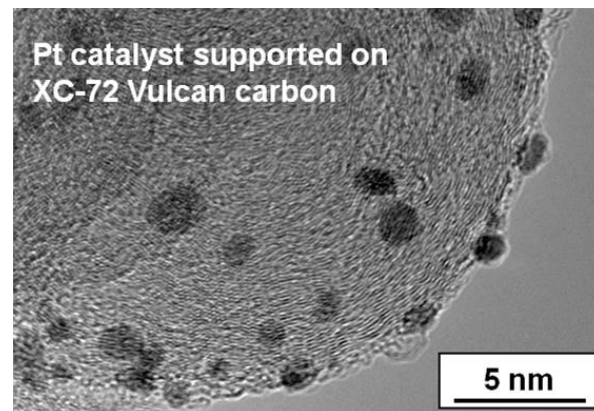
Faste syrer:
eks. CsH_2PO_4

Protonledende oksider:
eks. Y-dopet BaZrO_3

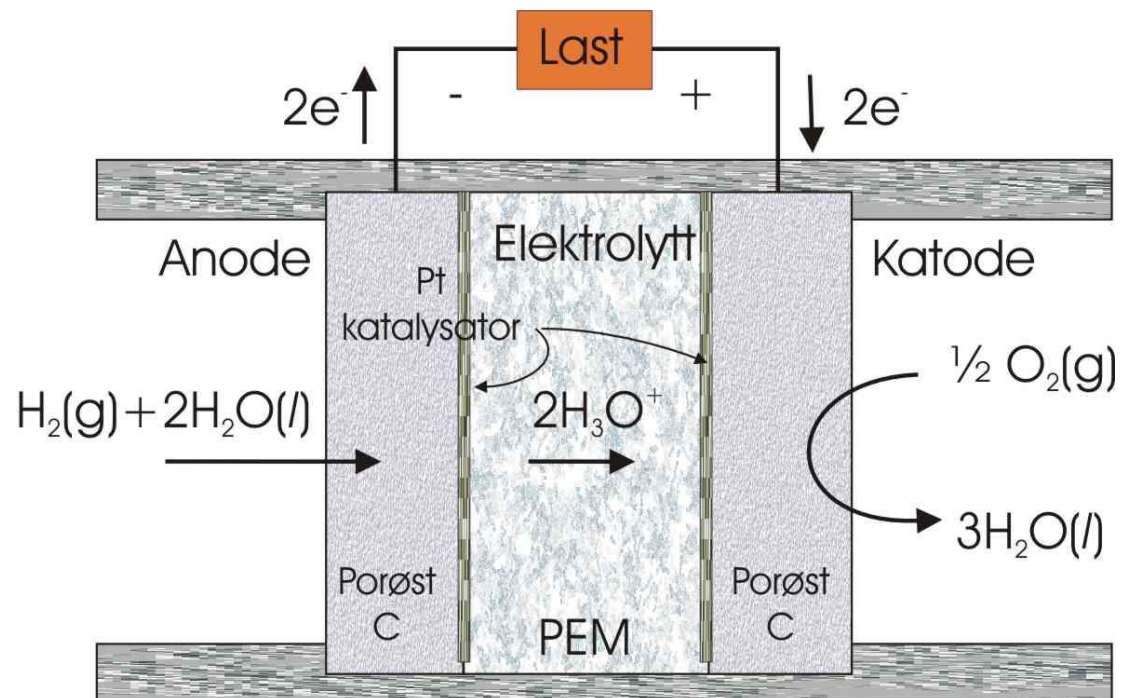


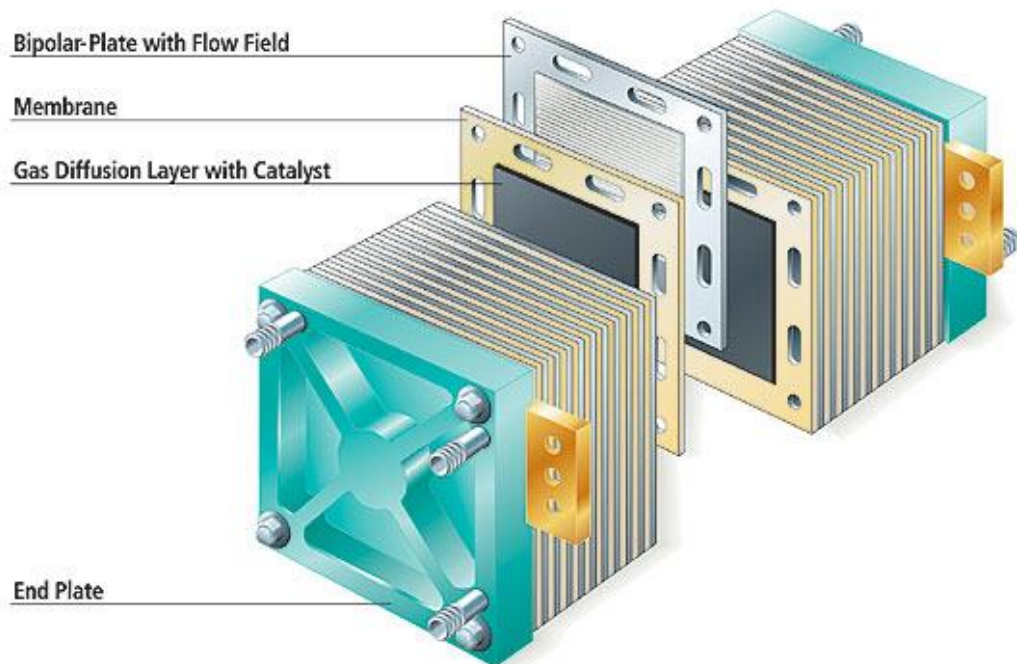
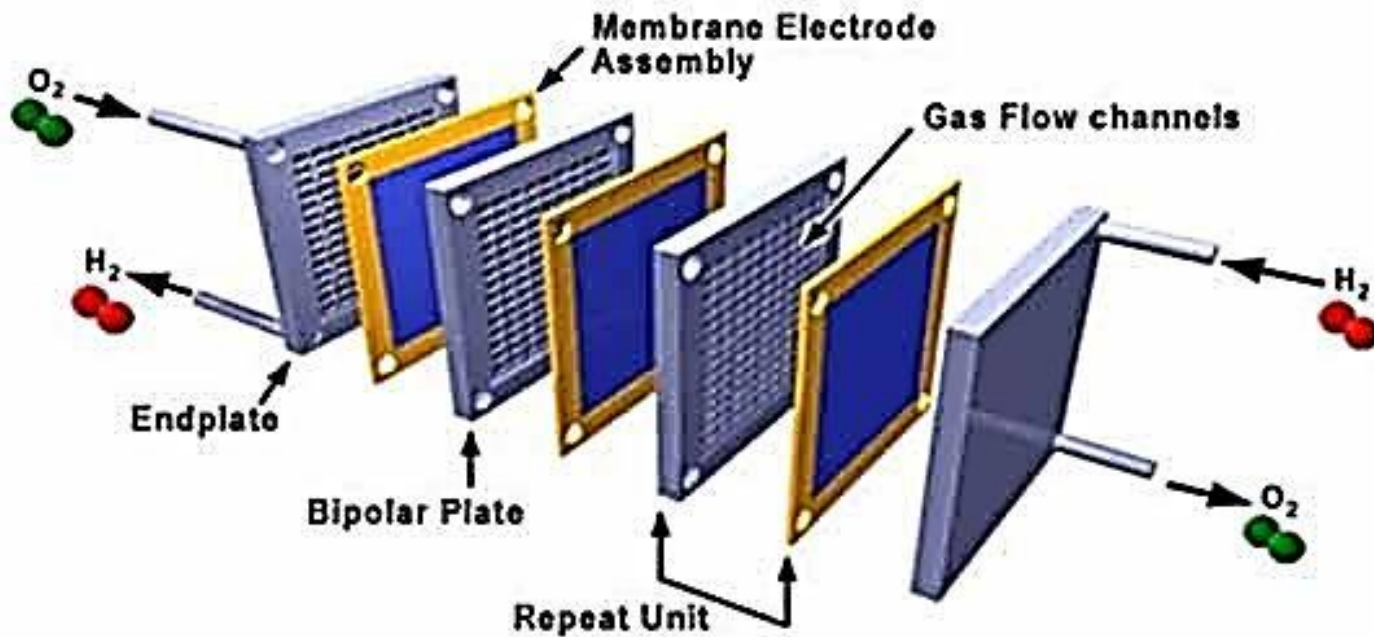
Polymer-elektrolytt-brenselcelle

- 50-85°C
- Elektrolytt: Nafion® og lignende
 - H_3O^+ -leder + drag av ca. 5 H_2O
 - Vann må sirkuleres
- Elektroder: Porøs C + Pt
- Brensel: Rent H_2
- Problemer:
 - Katalysatorforgiftning (CO)
 - Pris (Pt + elektrolytt)
- Ledende brenselcelleteknologi for transport (biler, busser...)



Oak Ridge Natl. Lab.





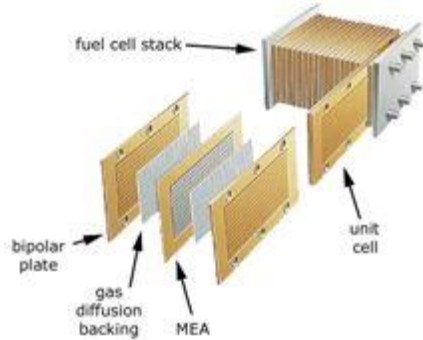


Hyundai iX35 – fra 2013
100 kW. 100 km / kg H₂. Rekkevidde: 600 km

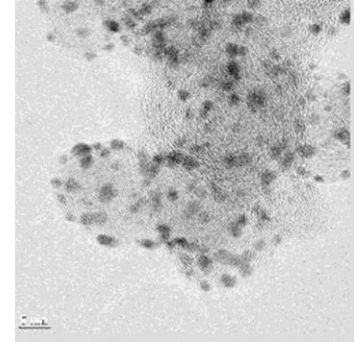


Toyota Mirai – fra 2015





PEFC



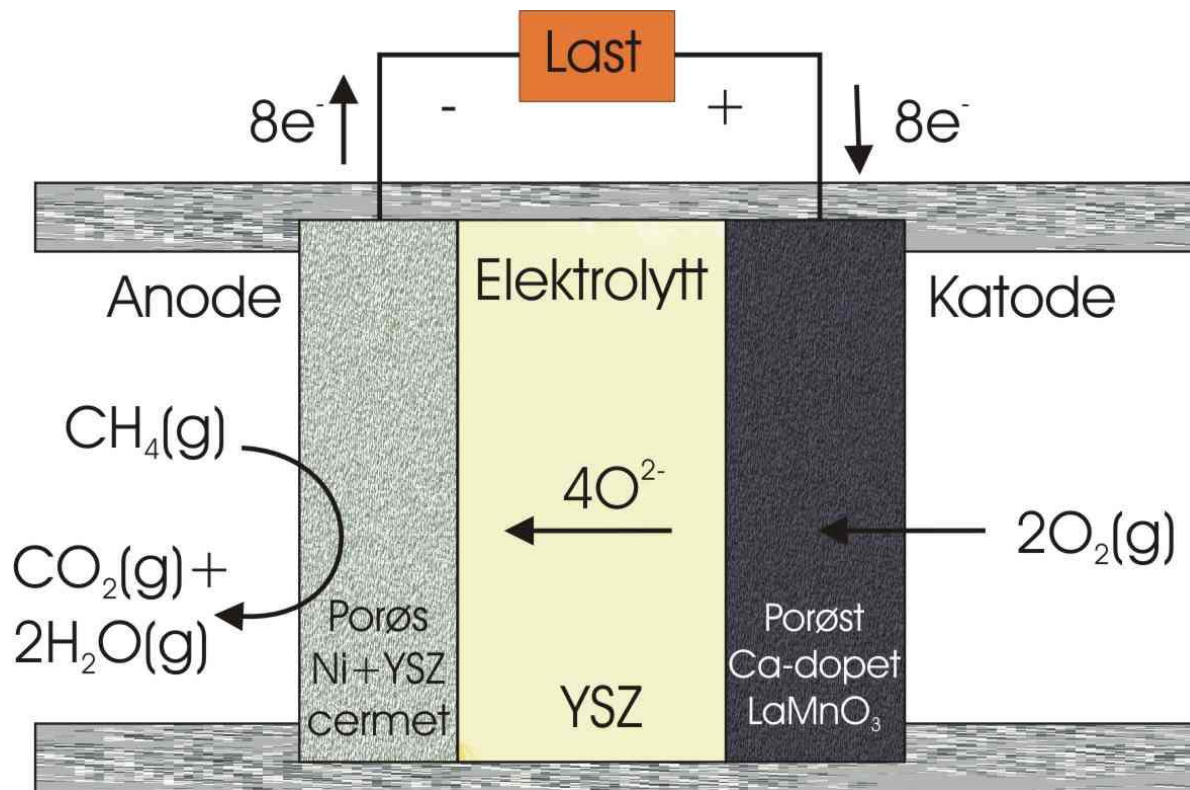
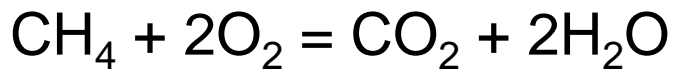
- +
 - Generelt for brenselceller
 - Miljøvennlig
 - Effektiv
 - Fleksibel
 - Modulær
 - Spesielt for PEMFC
 - Rask oppstart
 - Mekanisk robust

- -
 - Komplisert teknologi
 - Dyrt
 - Nafion
 - Pt
 - Må ha rent H₂ som brensel
 - CO-passivering
 - Transport, lagring
 - Lav verdi på spillvarme

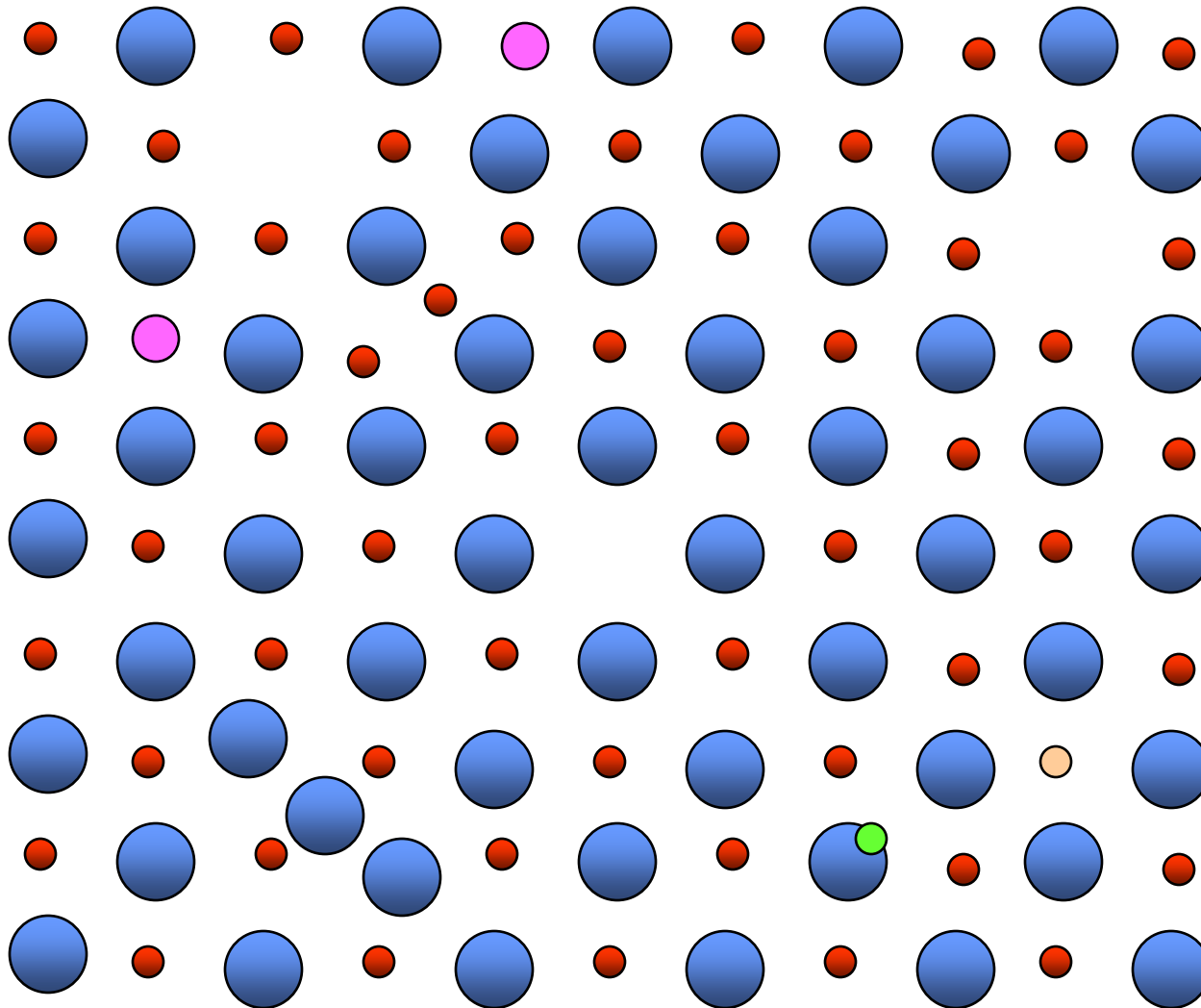
•Forskning

- Høyere temperatur (mindre Pt, høyere CO-toleranse)
- Vannhåndtering eller systemer uten vann (N som proton-vert istedet for O)
- Nye polymerer
- Nanostruktur i elektroder (mindre Pt nødvendig)

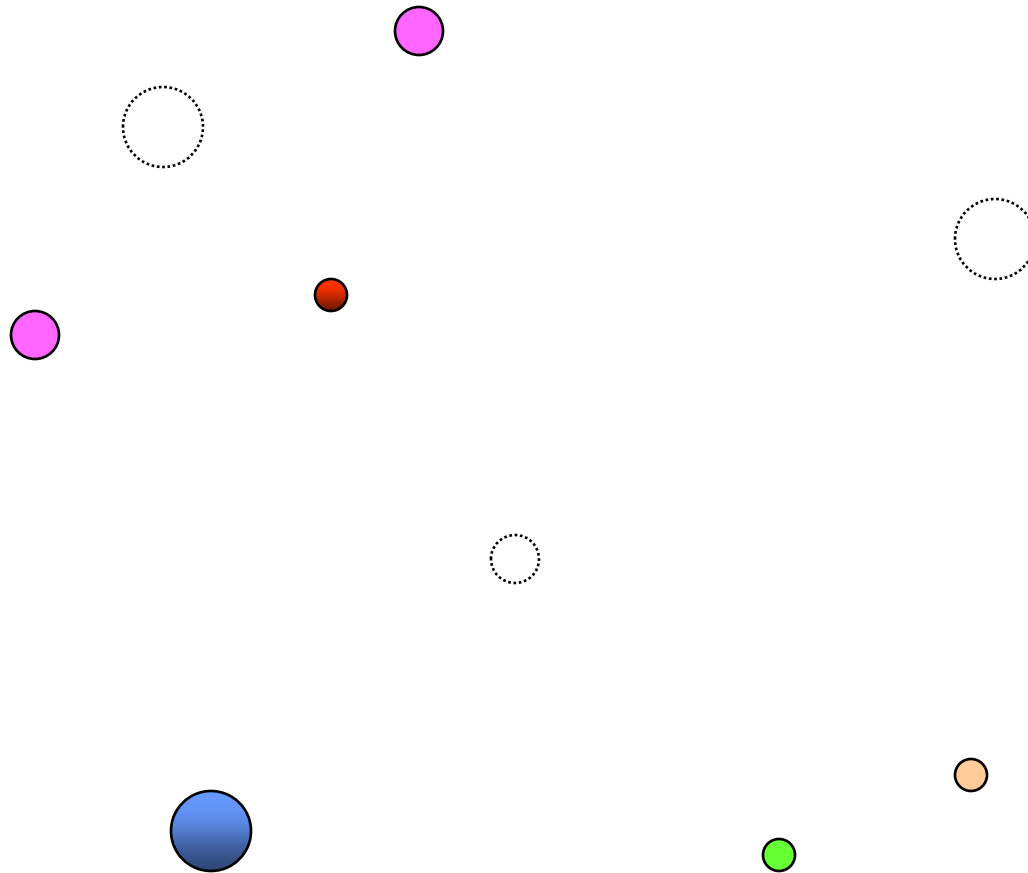
Fastoksid-brenselcelle - Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



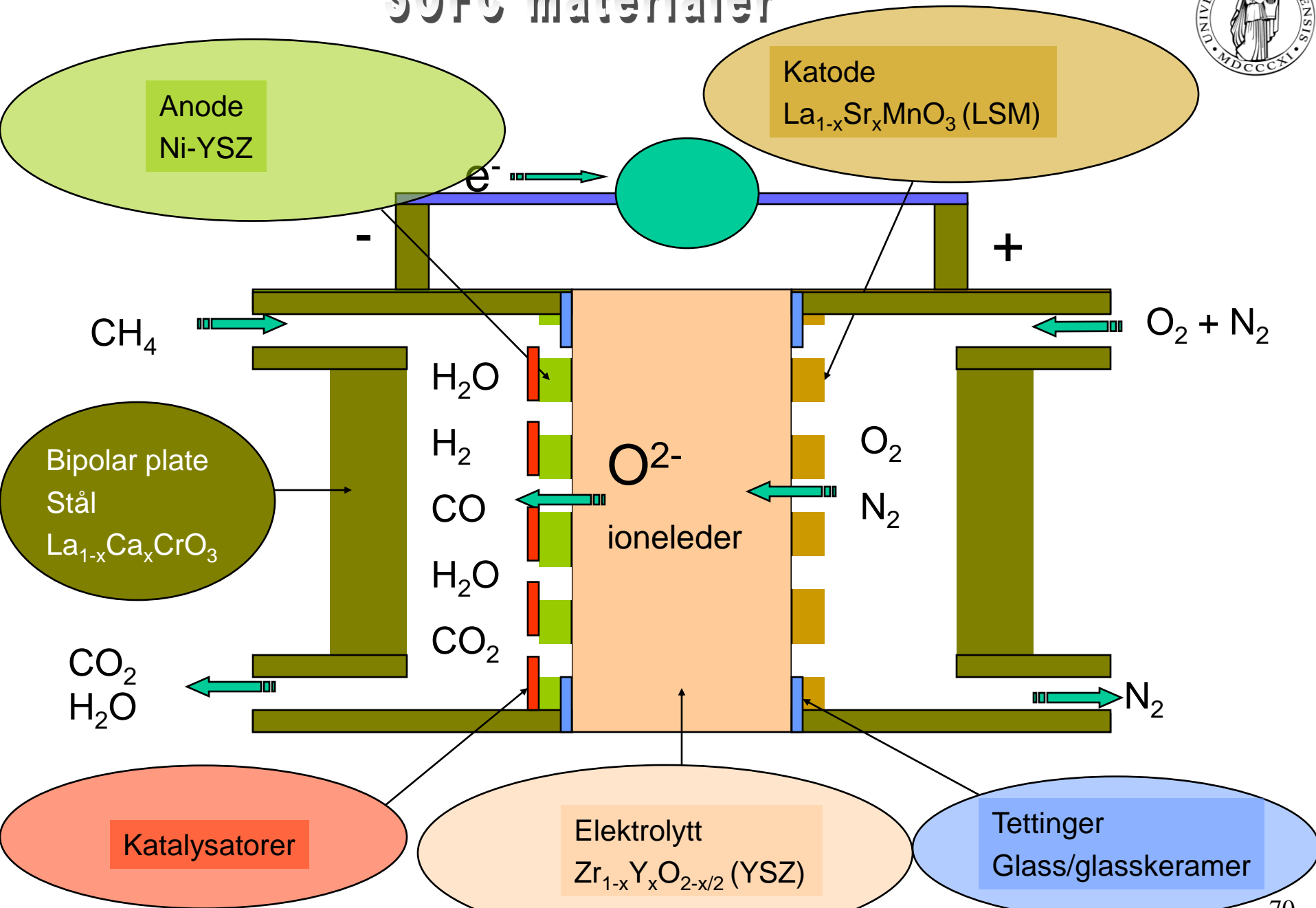
SOFC trenger transport: Punktdefekter - hvor mange ser du?



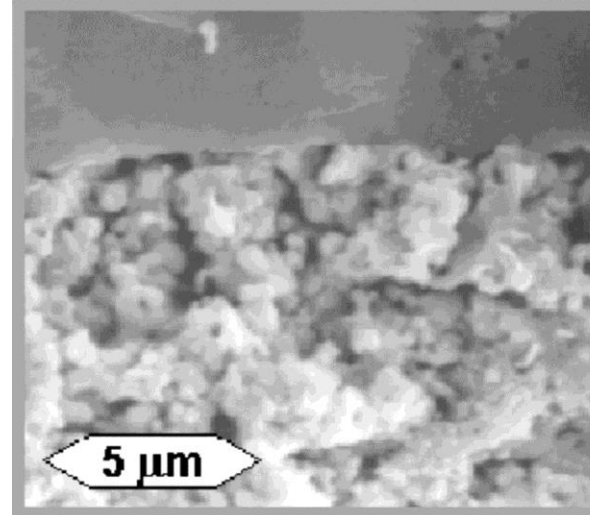
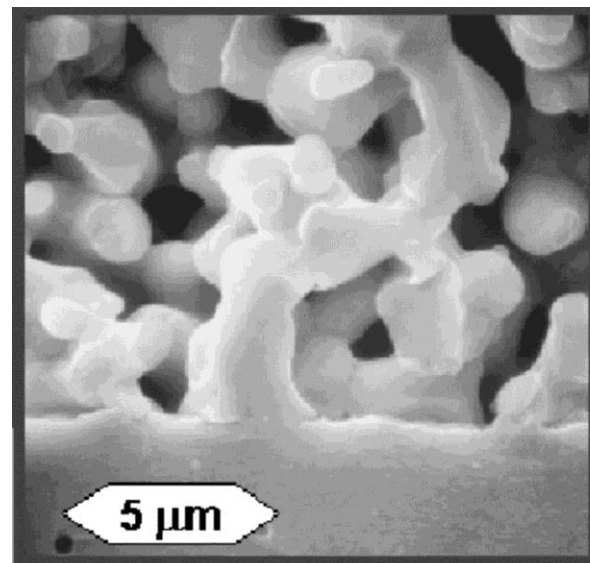
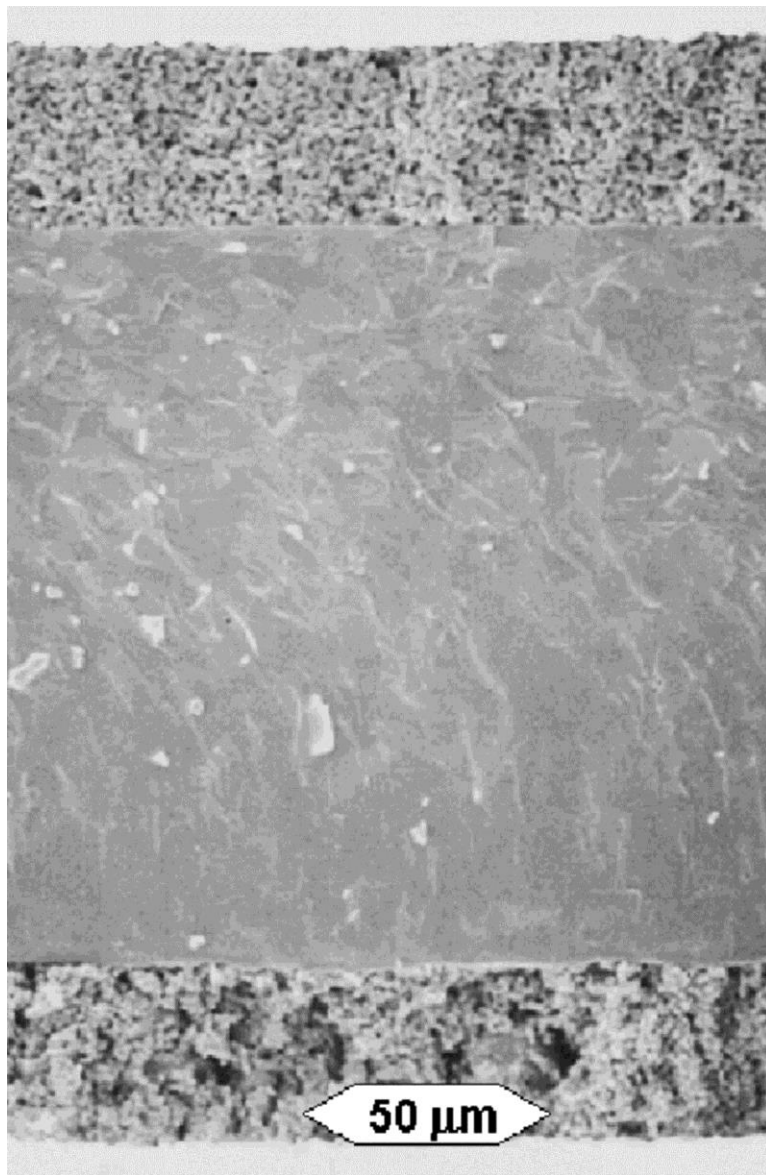
Punktdefekter



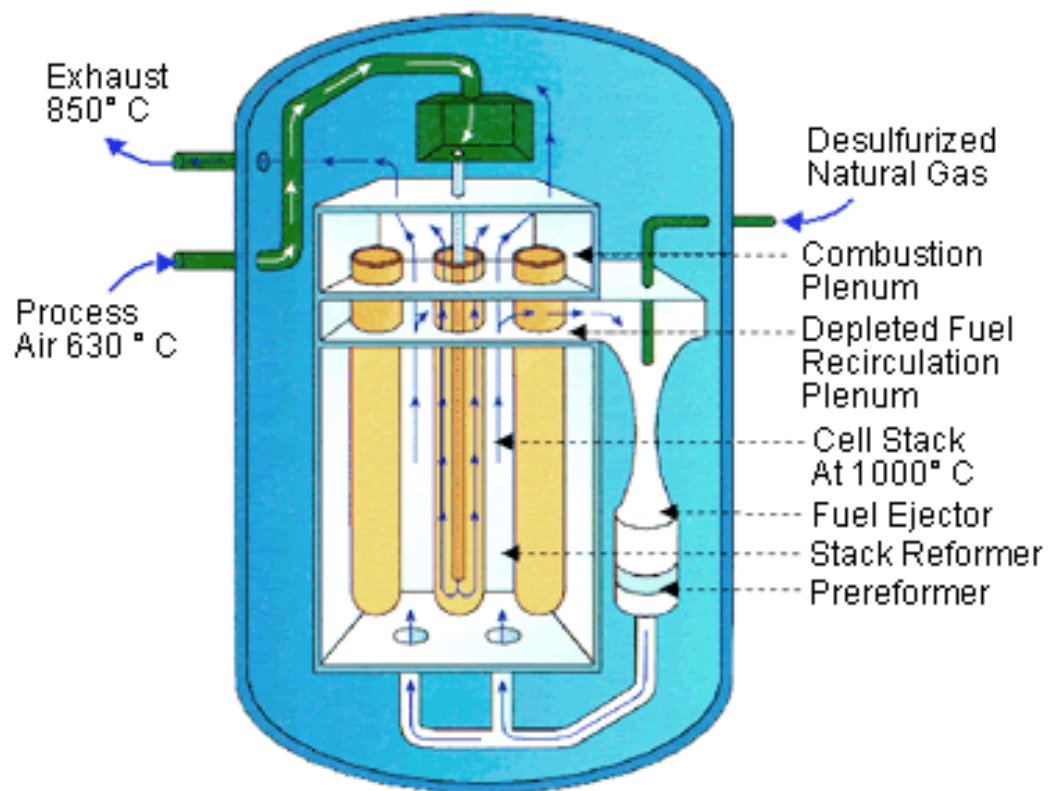
SOFC materialer



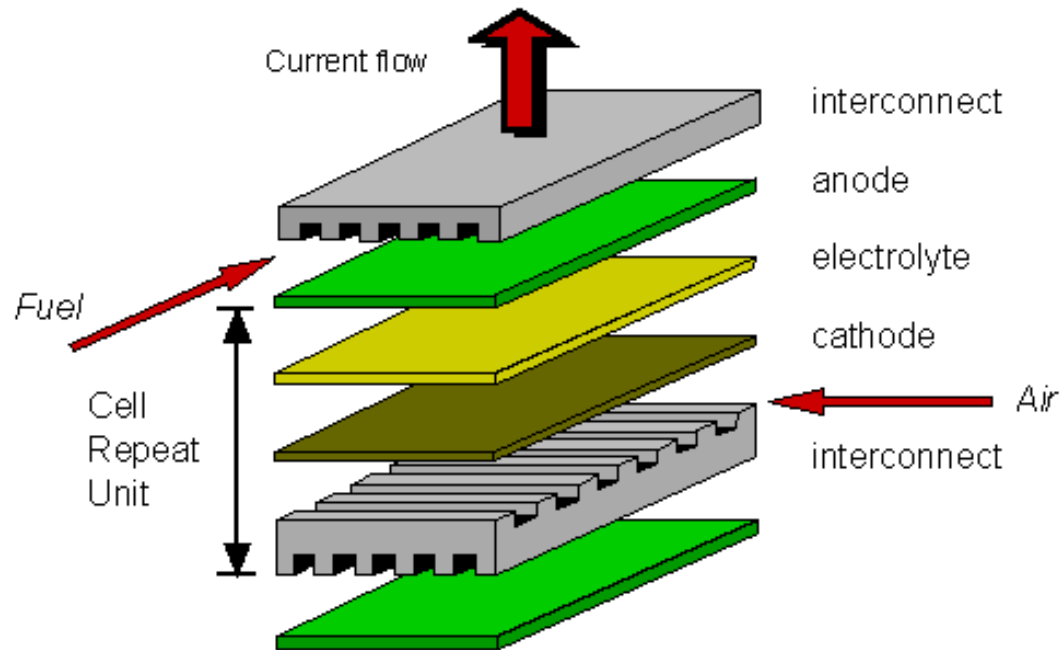
Eksempel på mikrostruktur



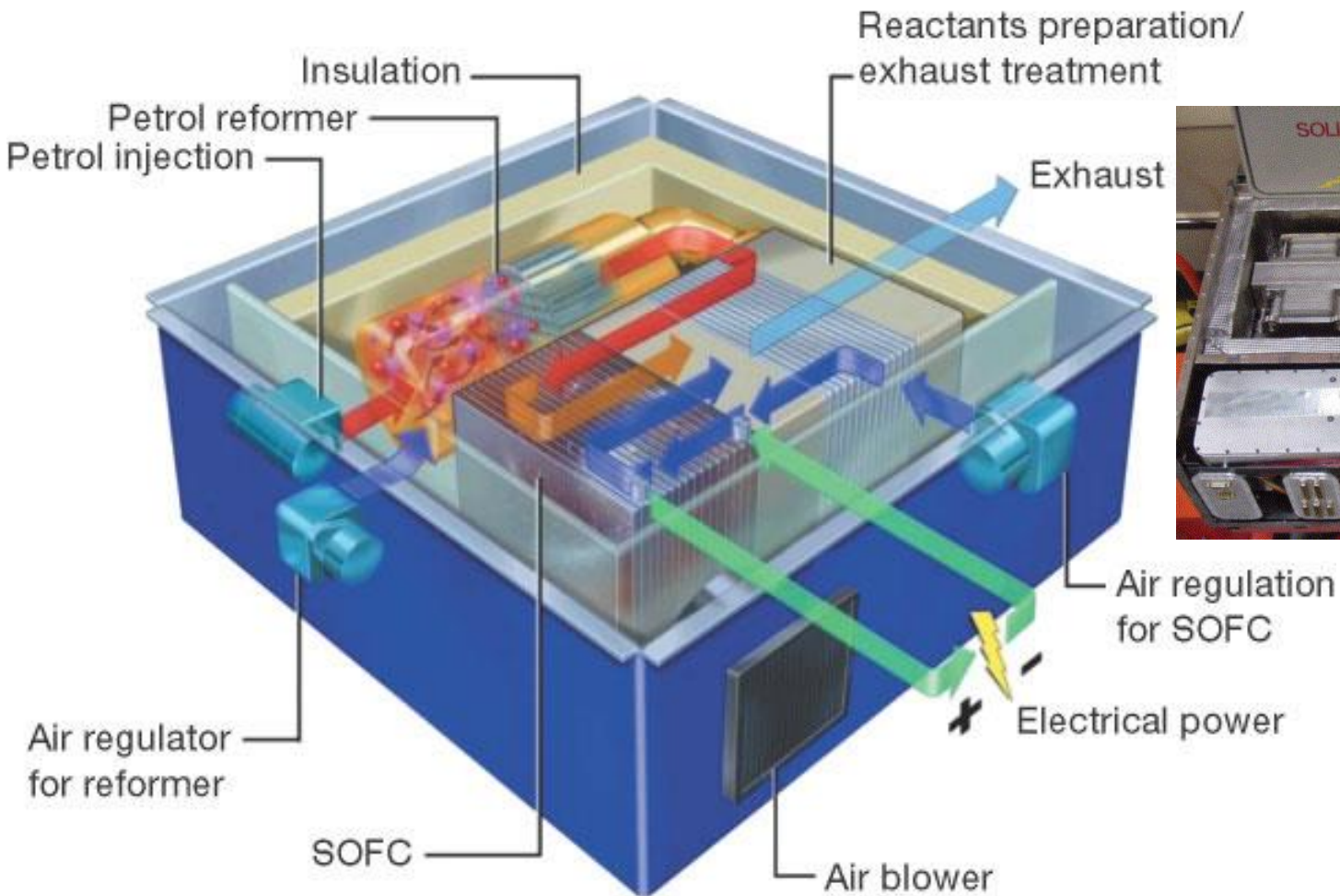
Rørdesign



Planare design



SOFC Auxiliary Power Unit (APU)



SOFC



- +
 - Generelt for brenselceller
 - Miljøvennlig
 - Effektiv
 - Fleksibel, modulær
 - Spesielt for SOFC
 - Brensel-tolerant
 - Høy verdi på spillvarme
 - Integrasjon i prosesser

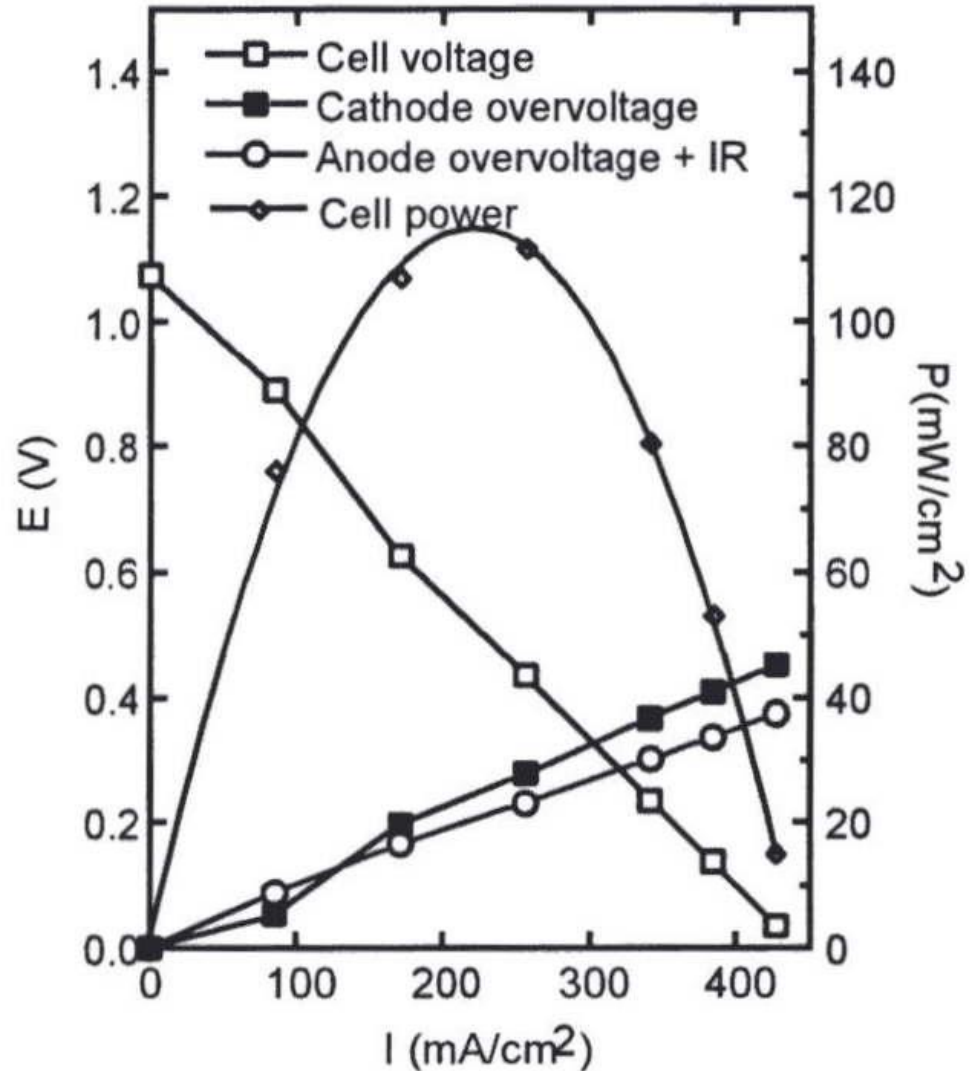
- -
 - Komplisert teknologi
 - Dyrt
 - Avanserte keramer
 - Sjeldne grunnstoffer
 - Mekanisk lite robust
 - Lang oppstartstid
 - Degradering ved høy temperatur

•Forskning

- Lavere temperatur (mindre korrosjon, rimeligere bipolare plater)
 - Tynnere lag. Bedre katalysatorer.
- Nye materialer. Protonledende oksider.
- Prosessintegrasjon. Kombinerte el-varme anlegg med brenselcelle og gassturbin.

Potensial og effekt vs strøm for en brenselcelle

- Eksempelet i figuren:
 - 1 mm tykk YSZ elektrolytt
 - Ca-dopet LaCrO_3 elektroder
 - H_2 + luft
- Cellen har elektrisk tap i
 - elektrolytten ("IR")
 - overpotensialer i katode og anode
- Cellepotensialet E faller fra Nernst-potensialet når vi øker strømmen.
- Den elektriske effekten P går fra 0, via et maksimum, tilbake til 0.
- Den elektriske effektiviteten går tilsvarende fra 100%, via 50%, til 0.
- Vi opererer ofte brenselceller ved 2/3 av maksimums-effekten



Elektrisk effekt og virkningsgrad

- Elektrisk effekt ut P_e er lik P_{in} multiplisert med faktorer som beskriver effektiviteten:

$$P_e = \eta_G u_f P_{in}$$

- η_G elektrisk virkningsgrad
- u_f brenselutnyttelsesgrad
- $P_e / P_{in} = \eta_G u_f$ Virkningsgrad for cellen

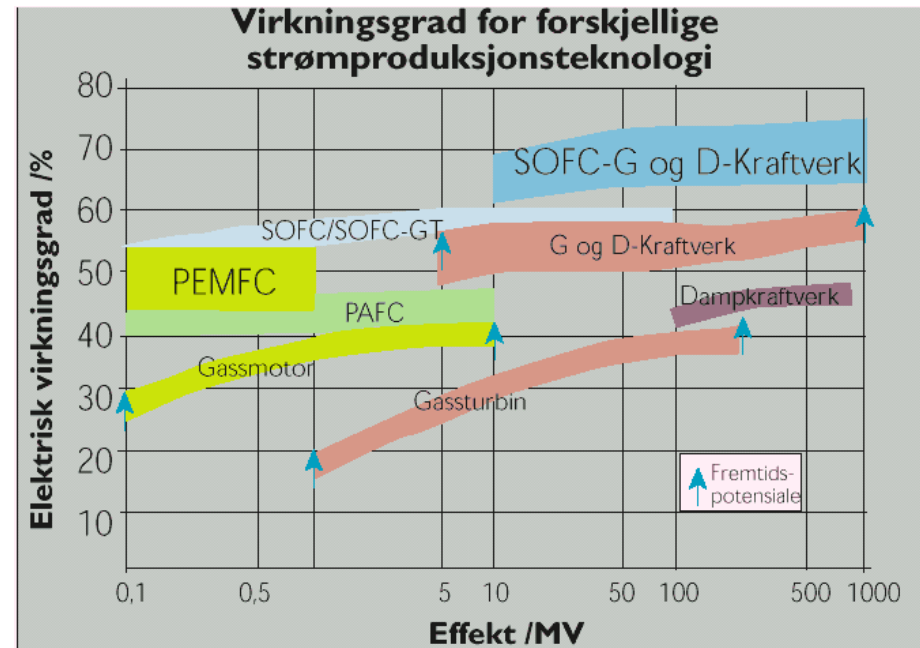
– Typisk 50%

- $\eta_G = P_e / (P_{in} u_f) = w_{el} / w_{tot} = \Delta G / \Delta H$

– Teoretisk kan η_G være >100%

Brenselceller; egenskaper

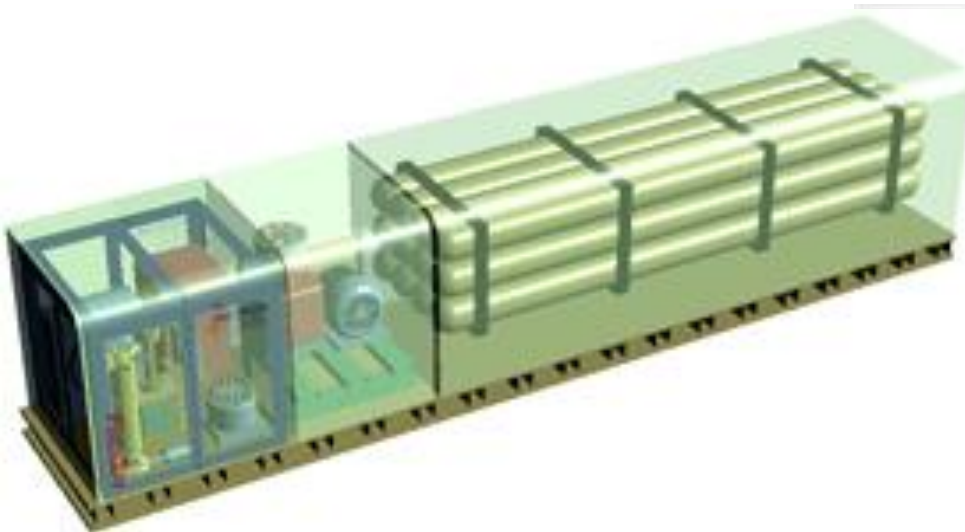
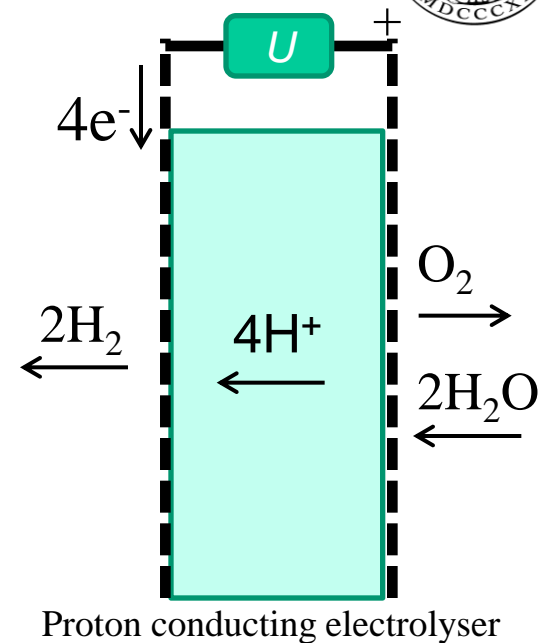
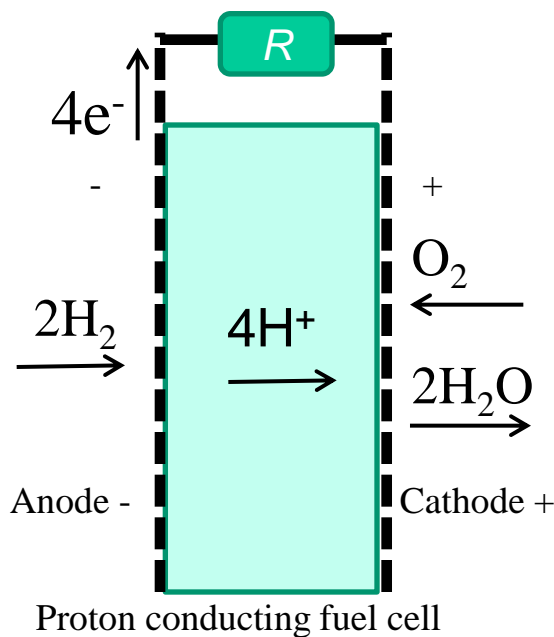
- Ingen flamme – direkte fra kjemisk til elektrisk energi
 - Mindre NO_x
- I prinsippet Gibbs energi; ingen Carnot-syklus
 - men andre tapsledd
 - Elektrisk virkningsgrad
 - Brenselutnyttelse
- Fleksible
- Modulære
- Støyfrie
- Mer effektive enn motorer ved varierende effektuttak



Elektrolysører



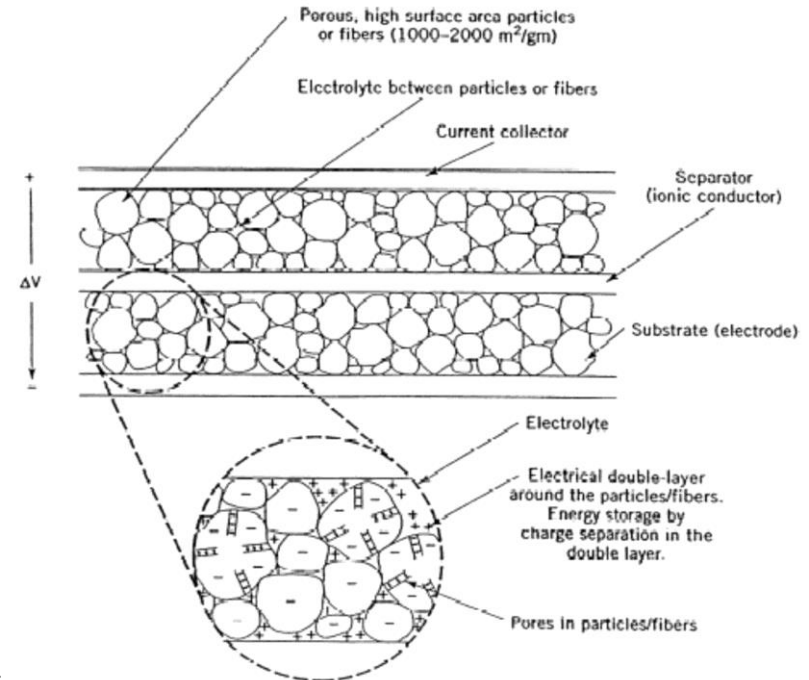
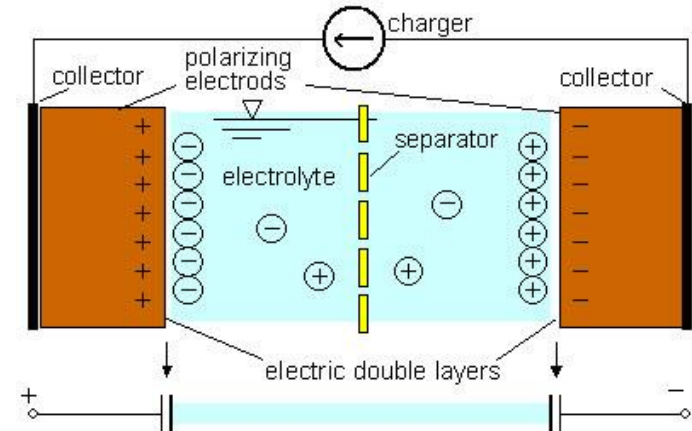
- Reversert brenselcelle
- AFC- og PEFC-deriverte typer mest utbredt
- H₂-fyllestasjoner med elektrolysør; fra elektrisitet til H₂ on-site



Lagring av elektrisk energi

Kondensatorer

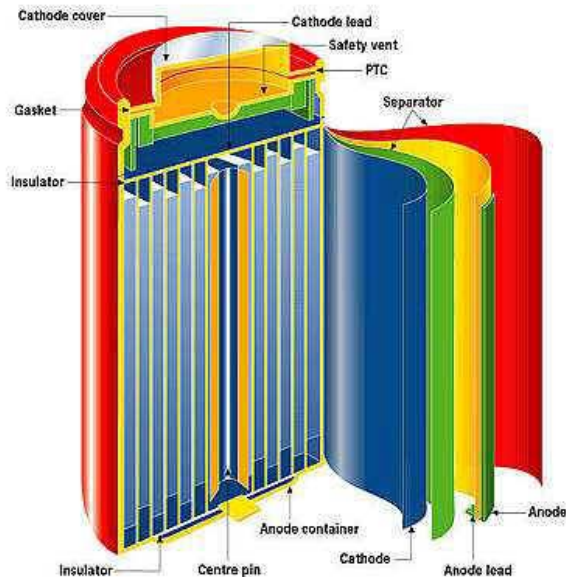
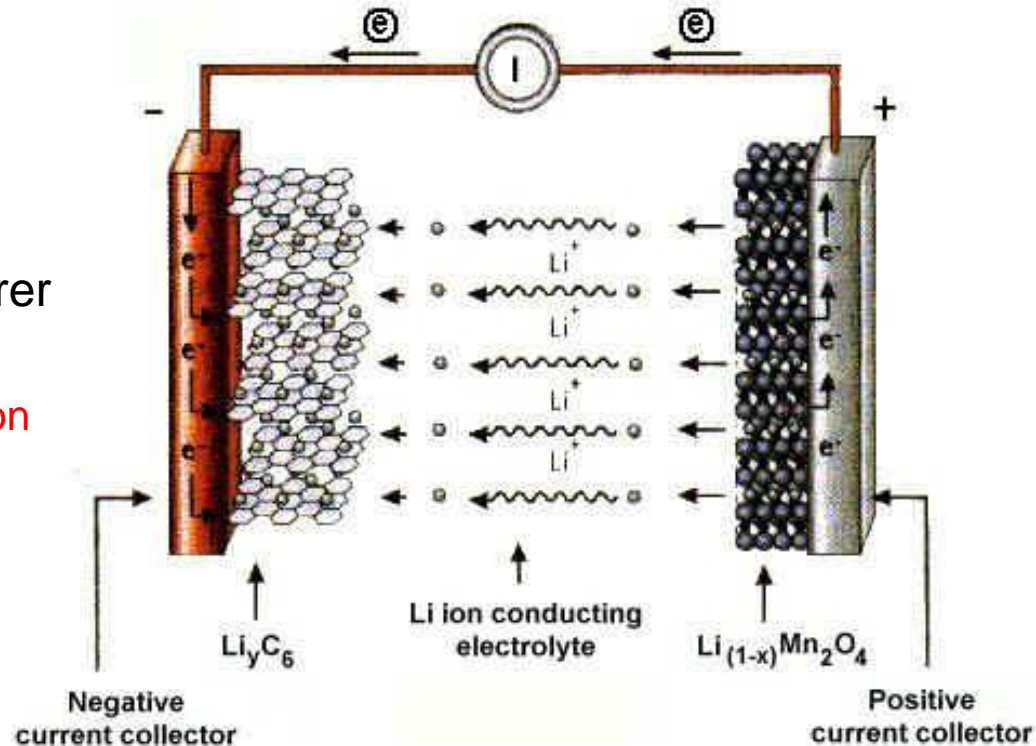
- Platekondensator
- Keramisk kondensator (dielektrika, ferroelektrika)
- Elektrolyttkondensator
 - Utnytter elektrokjemiske dobbeltlag mellom en elektrolytt og en elektrode
- Super/ultra-kondensatorer
 - Forbedrede elektrolyttkondensatorer
 - Nano-karbonpartikler
 - Nano-metalloksidpartikler
- Hybride kondensatorer/batterier



Lagring av elektrisitet

Elektrokjemisk konvertering; akkumulatører

- Primære batterier
 - Energien lagres av fabrikken
 - Kastes/resirkuleres etter bruk
- Sekundære batterier = akkumulatører
 - Kan reverseres; lades opp
 - Mange typer: Pb, NiCd, NiMH, **Li-ion**



Elektriske biler



- Drives av elektromotorer
- Oppladbart batteri
 - Kan ha superkondensatorer som akselerasjonshjelp
 - Plug-in lading
 - Med forskjellige typer "range extenders"
 - Motordrift
 - Motor + generator
 - Brenselcelle



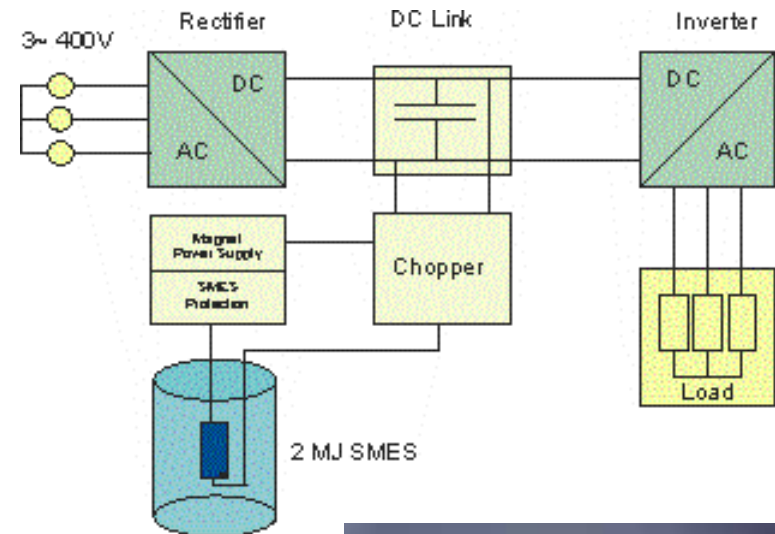
(mange typer hybrider)

- Brenselcelle

Motorer kan gå på mange typer brensel; bensin/diesel, gass, biodrivstoff, hydrogen. Brenselcellene er av PEFC-type; Går på hydrogen (komprimert eller fra on-board prosessert drivstoff)

Lagring av strøm i superledere

- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Likestrøm induseres i en tykk, superledende ring (tyroid)
- Fortsetter å gå "uendelig"
- Kan tas ut ved behov; induserer da strøm i den utenforliggende spolen
- Brukes i UPS (Uninterruptible Power Supplies) for oppstart+noen sekunder etter strømbrudd
- Dyrt, men bra!



Hydrogen



- Men lagring og transport er dyrt
- Gass
- Flytende
- Hydrogenlagringsmaterialer
 - Metaller og legeringer
 - Alanater, boranater
 - Nanokarbon
 - Hybridmaterialer
- Flytende hydrogenbærere
 - Alkoholer og andre C-holdige
 - NH_3 og andre N-holdige

<u>Medium</u>	<u>Volume density of hydrogen, 10^{22} atoms/cm³</u>	<u>Hydrogen weight density, wt %</u>
H_2 gas at 100 atm	0.5	100
H_2 liquid (20K)	4.2	100
H_2 solid (4.2K)	5.3	100
LiH	5.9	12.6
$\text{PdH}_{0.6}$	4.3	0.6
H_2O (liquid)	6.7	11.2
MgH_2	6.7	7.6
TiH_2	9.2	4.0
VH_2	11.4	3.8
UH_3	4.0	1.3
TiFeH_2	6.0	1.9
LaNi_5H_7	7.6	1.6
LiAlH_4	5.7	10.6
Mg_2NiH_4	5.9	3.6



Hydrogen-lagring

- På lang sikt vil alt H₂ komme fra fornybare kilder: Trenger lagring for å utjevne varierende produksjon og forbruk

- Tanker

- Kompresjon
- Hydrogenlagringsmaterialer



- Injisere i gass-nettverk

- Biogass
- Deponigass
- Naturgass
- Ingen kompresjon



- Reagere med CO₂ til CH₃OH eller med eller N₂ til NH₃

Hydrogen-transport og -distribusjon

- Transport av H₂:
 - Rør
 - Trykktanker på bil
- Transport av kjemisk bærer (CH₄, CH₃OH, NH₃)
 - Lokal reformering
- Transport av elektrisitet
 - Lokal elektrolyse
- Lokal produksjon av elektrisitet
 - Vind, sol, vann
 - Lokal elektrolyse



H₂-fyllestasjoner

- Etablert teknologi
- Helt lukket og automatisk system
- Kompresjon til 1000 atm
- Fyller 700 atm
- Tar 3 minutter



Er H₂ sikkert?

- H₂ teknologi velprøvet og trygg
 - Produksjon
 - Transport
 - Fylling
 - Lagring
 - I kjøretøy
 - Kollisjonssikkerhet
- Farer som for andre brensel
 - Fordeler og ulemper
 - Unngå ansamlinger oppunder tak





Andre energilagringmetoder

- Mekanisk potensiell energi
 - Lufttrykk – tomme gruveganger
 - Vanntrykk – pumping opp til bassenger og sjøer
- Mekanisk kinetisk energi
 - Løpehjul (flywheel)
 - Superledende magnetisk friksjonsfri opplagring
 - Sikkerhetsaspekt?
- Termisk
 - Varmekapasitet
 - Faseomvandlingsmaterialer



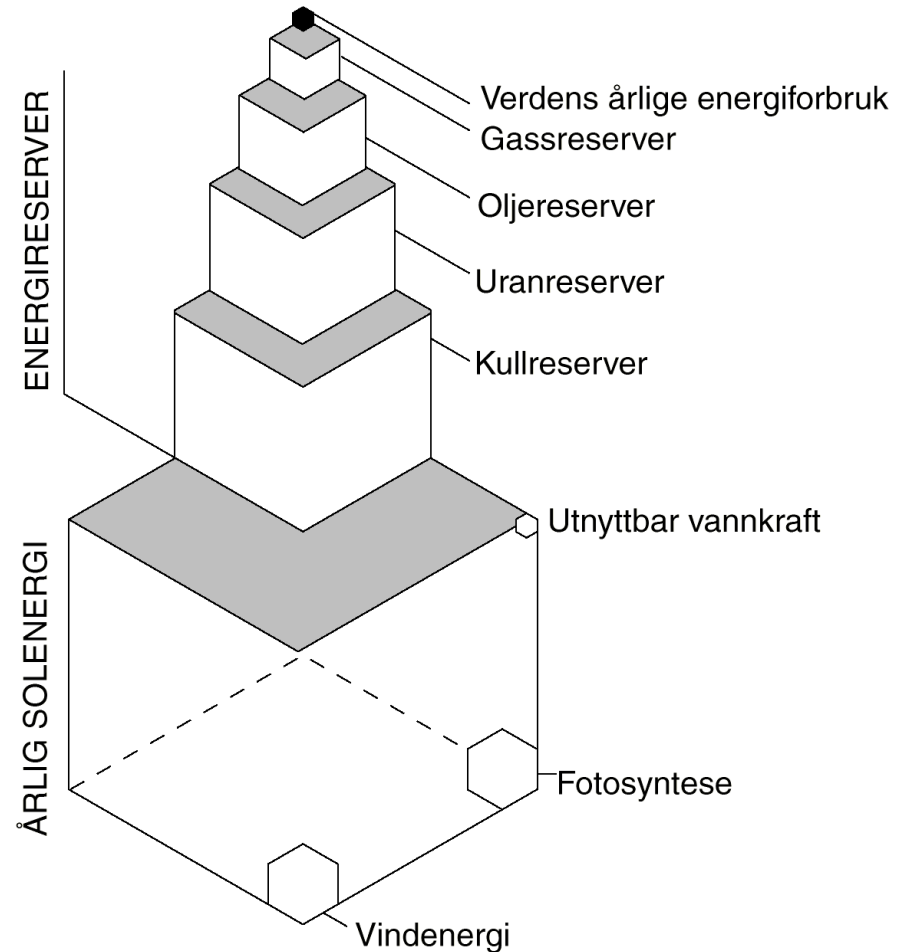
Forbruk, nedbrytning og gjenvinning av materialer

- Å lage teknologi for fornybar energi koster også energi
- Degradering
- Nedbrytning
- Kostnad ved skrotning
- Gjenvinning



Oppsummering - Energikilder

- Bærekraftig bruk av energi:
 - Bedre bruk av fossile reserver
 - Med reduserte CO₂-utlipp
 - Utbygge fornybare kilder
 - Ta i bruk hydrogenteknologi
 - med hydrogen fra både fossile og fornybare kilder
 - Effektivisere bruk av energi
- Nøkkelen ligger i ny og bedre konvertering, lagring og transport av energi. For dette trenger vi nye og forbedrede materialer.



Oppsummering Energikonvertering og -lagring

- Energikonvertering

- Fra sollys til elektrisitet m.m.
- Fra vind/vann til mekanisk
- Fra kjemisk til varme
- Fra nukleær til varme
- Fra varme til mekanisk
- Fra mekanisk til elektrisk
- Brenselceller
 - mange typer; lær en eller to godt!

- Energilagring

- Elektrisk
 - Spenning (ladning)
 - Strøm
- Kjemisk
 - Akkumulator
 - Lær Li-ion m.m.!
 - Hydrogen
- Mekanisk

100µm