



Aalto University
School of Electrical
Engineering

Luku 6

Uusiutuva energia

ELEC-C6001 Sähköenergiatekniikka

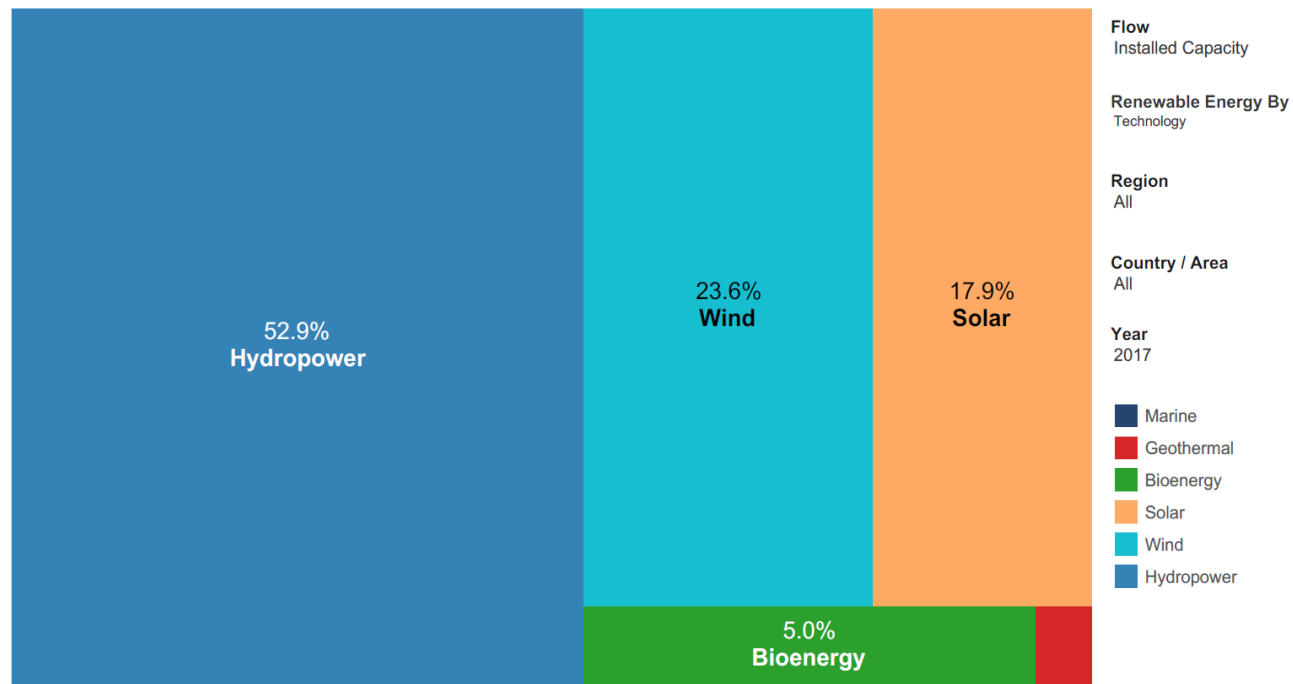
1.4.2019 ja 3.4.2019

Prof. Jorma Kyyrä

Sisältö

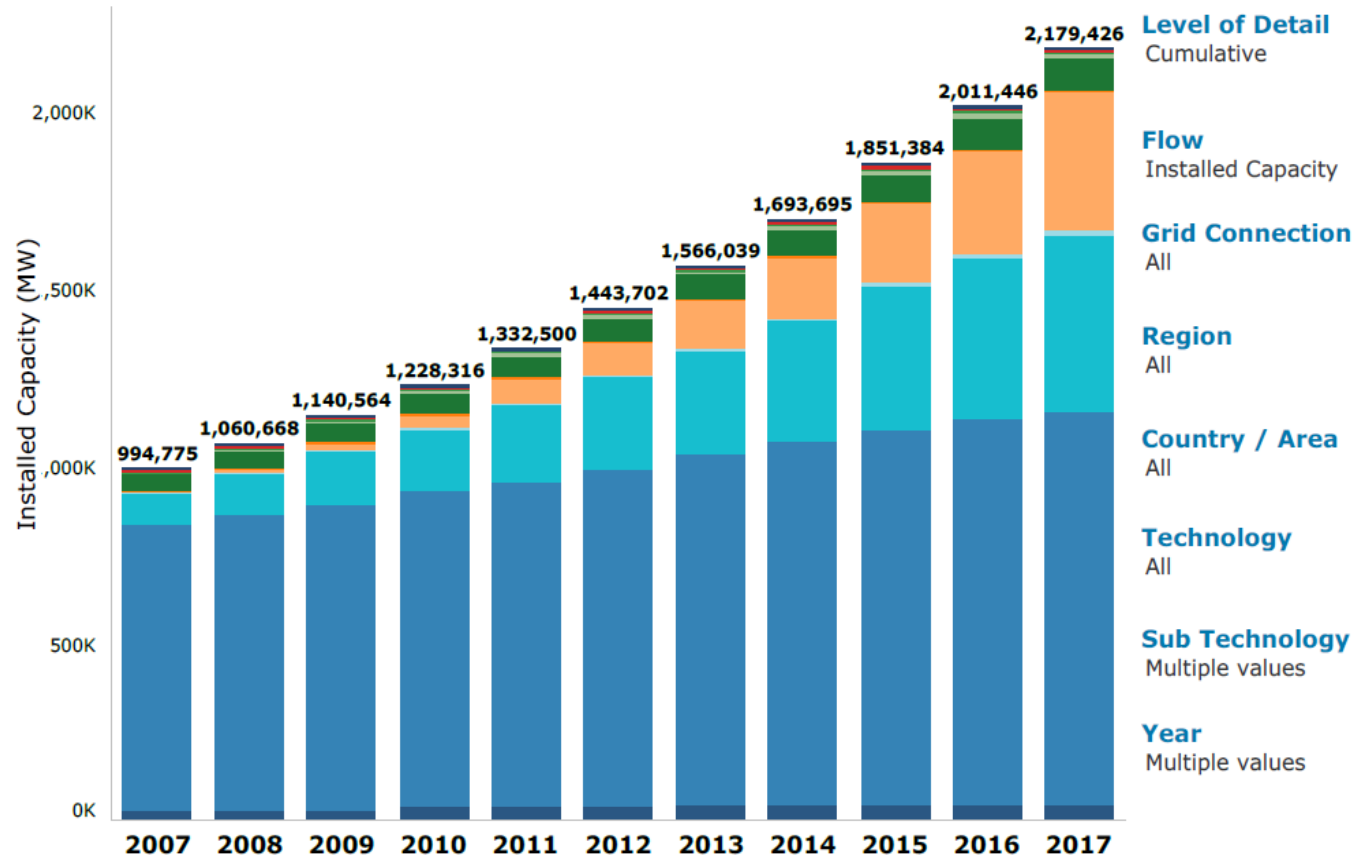
- Aurinkoenergia
- Tuulivoima
 - 6.2.1, 6.2.2, 6.2-6.2.13, muu luvut oheislukemista
- Hydrokineettiset järjestelmät
 - Eri ratkaisujen periaatteet, mutta mekaniikan yhtälöt yms. ovat oheislukemista
- Geoterminen energia
- Biomassa
- Polttokennot
 - Luvussa 6.6 olevat kemian liittyvät asiat ovat oheislukemista.
- Epäsäännöllinen energian tuotto
- Energiavarastot

Uusiutuva energian tuotanto maailmassa vuonna 2017

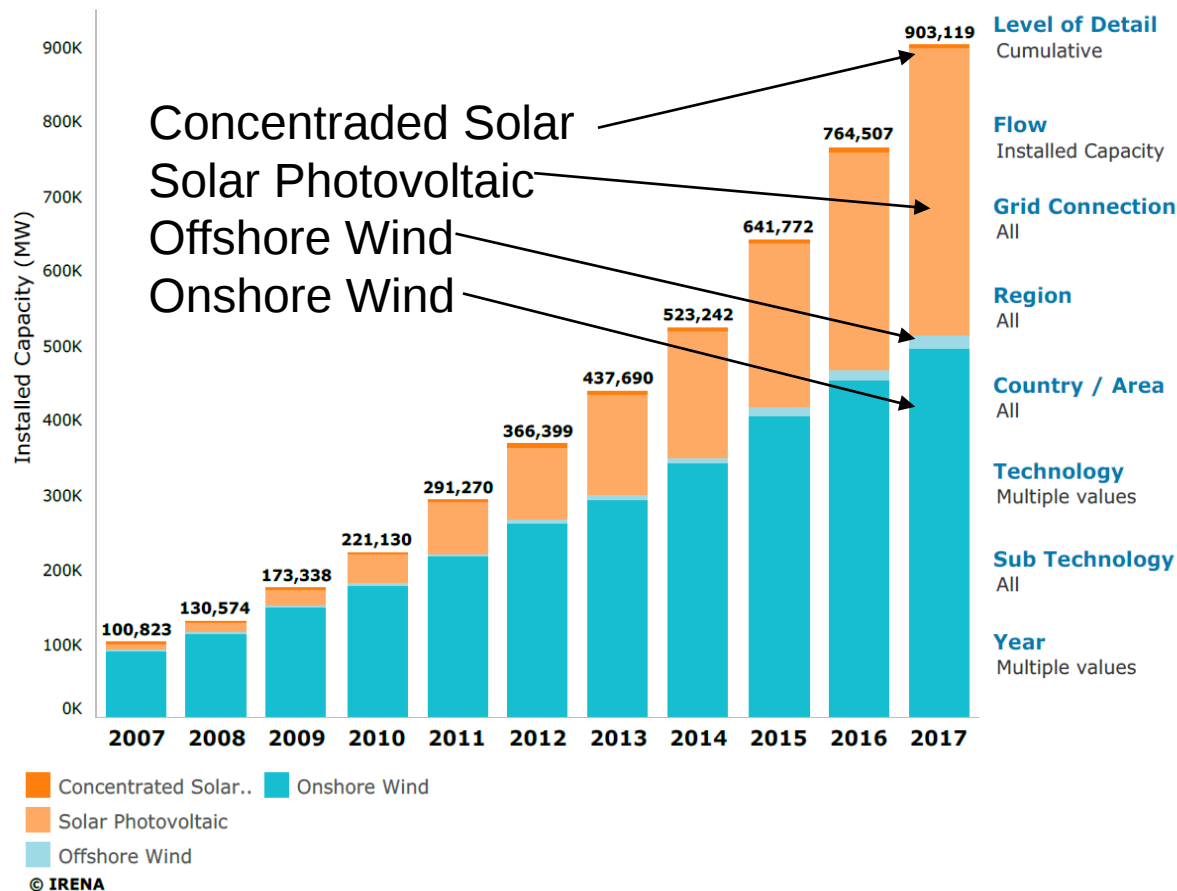


Lähde: IRENA, International Renewable Energy

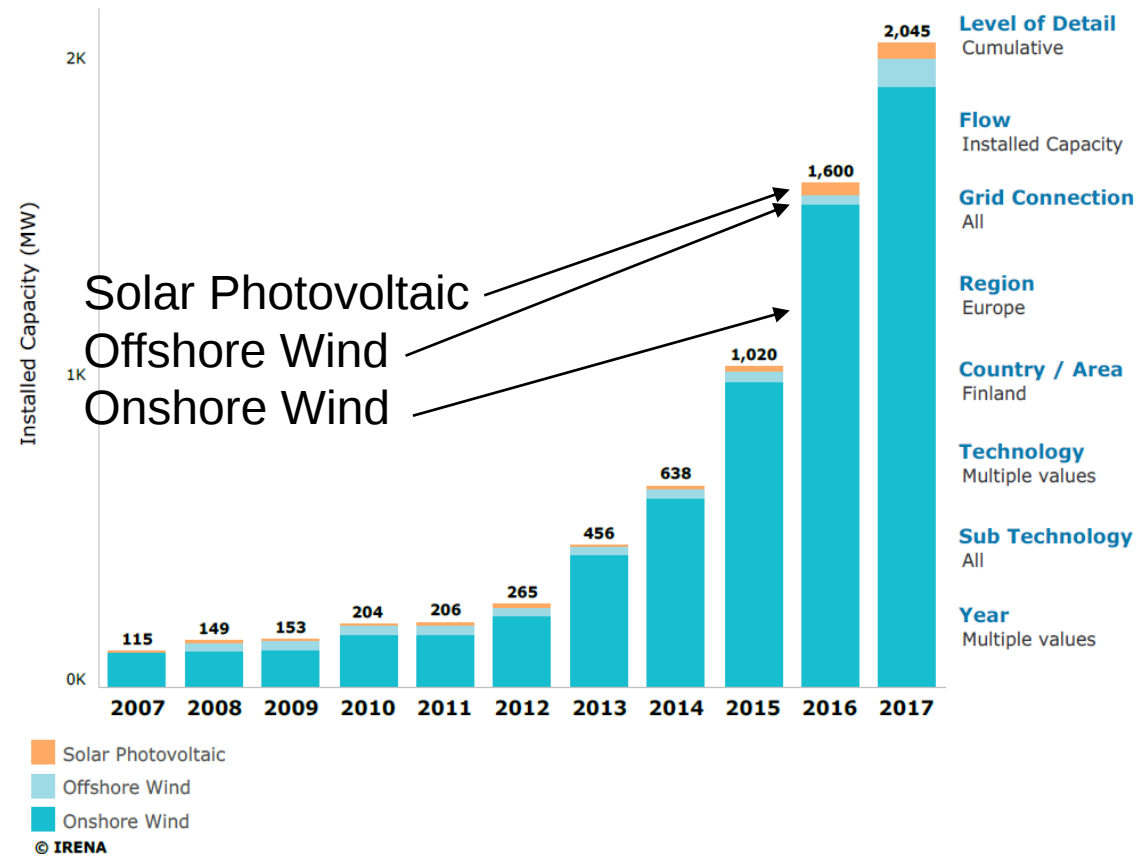
Uusiutuvan asennettu kapasiteetti maailmassa



Tuuli- ja aurinkoenergian asennettu kapasiteetti maailmassa



Tuuli- ja aurinkoenergian asennettu kapasiteetti Suomessa



Aurinkoenergia

- Auringon säteily avaruudessa on jopa $1\,366\text{ kW/m}^2$
- Maan pinnalla säteily on vaimeampaa useasta syystä johtuen, ilmakehä absorboi säteilyä ja säteily myös heijastuu partikkeleista
- Avaruuden säteilystä maan pinnalle päätyy 5-70 %
 - Riippuu vuoden ja vuorokauden ajasta
 - Paikasta maapallolla
 - Suomessa auringon vuosittainen säteilyn määrä on n. $1\,000\text{ kWh/m}^2$
- Tunnin aikana maapallon pinnalle tulee auringon säteilyenergiaa enemmän kuin koko ihmiskunta kuluttaa energiaa vuodessa

Säteilyn intensiteetti

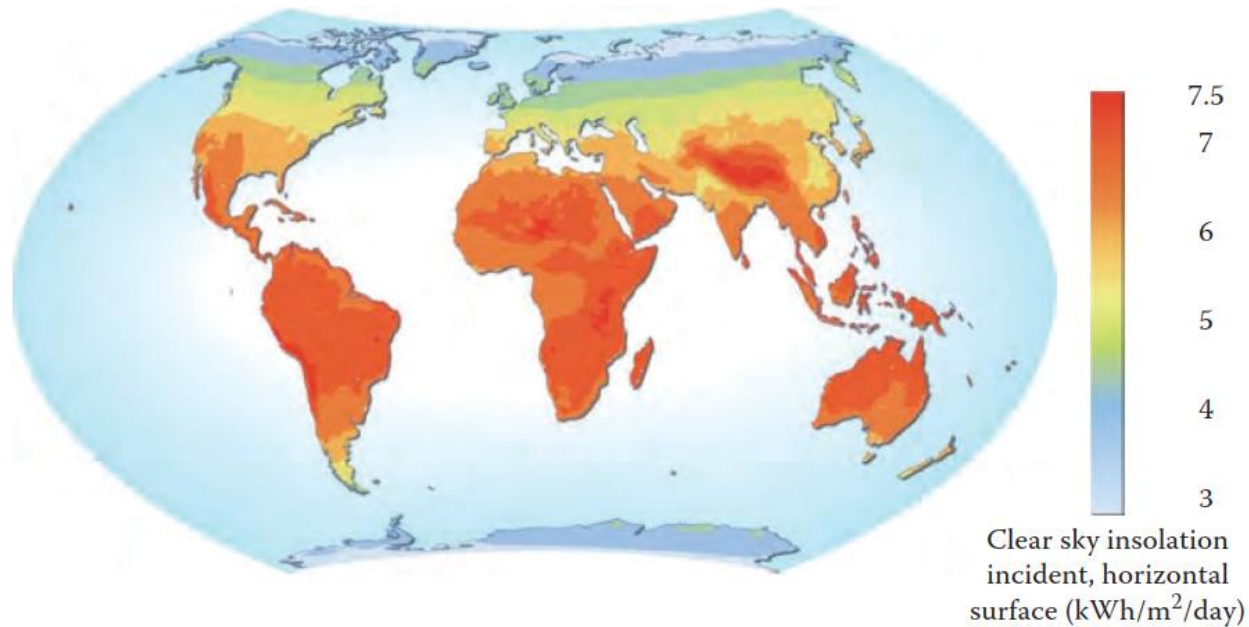
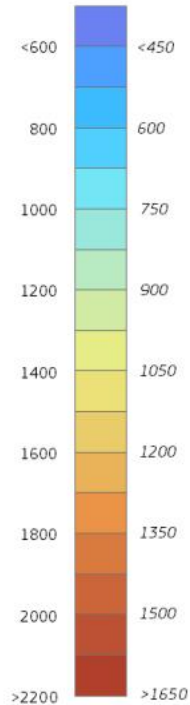


Figure 6.3 Average annual solar energy worldwide. (Courtesy of the National Aeronautic and Space Administration NASA.)

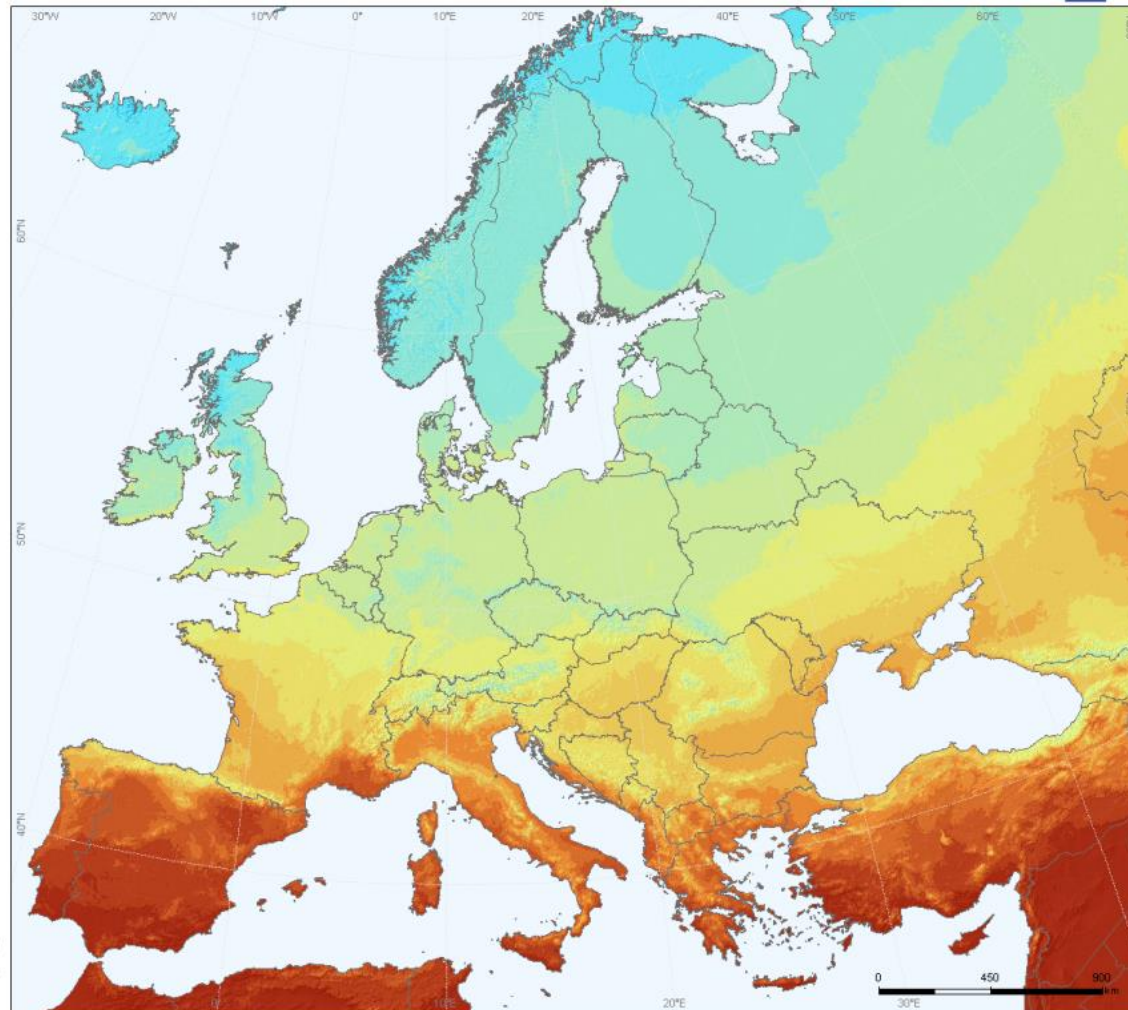
Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Global irradiation*
[kWh/m²]



Solar electricity**
[kWh/kW_{peak}]



* Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

**Yearly sum of solar electricity generated by optimally-inclined 1kW_p system with a performance ratio of 0.75

© European Union, 2012
PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
EC - Joint Research Centre
In collaboration with: CM SAF, www.cmsaf.eu

Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication

Aurinkoenergian jakautuminen vuorokauden aikana

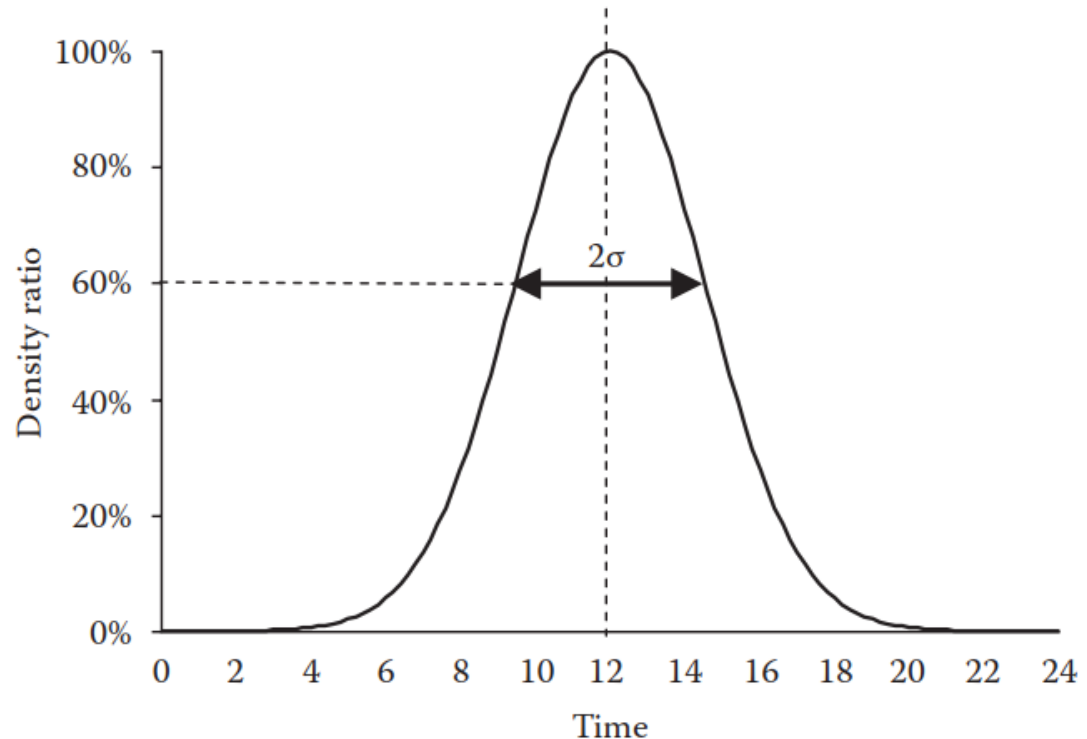


Figure 6.4 A typical solar distribution function (solar power density in 24 h period).

Aurinkokeräimet, lämmin vesi



Figure 6.5 Passive thermosiphon hot water solar system.

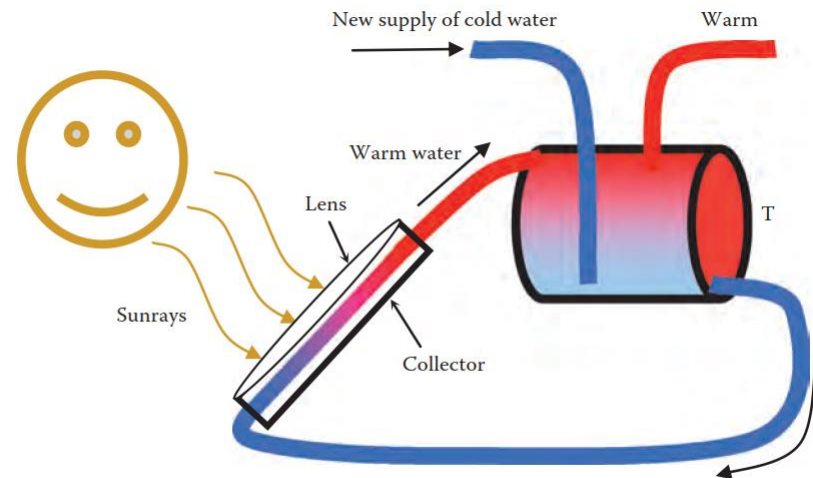
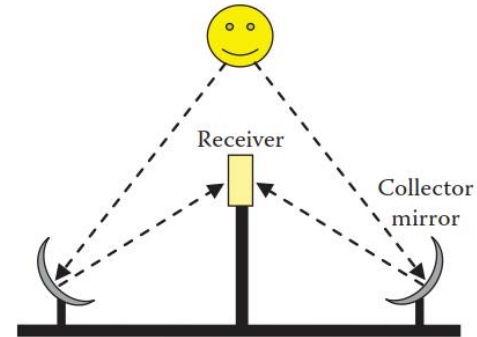


Figure 6.6 Thermosiphon hot water system.

Integroidut järjestelmät



(a)



(b)

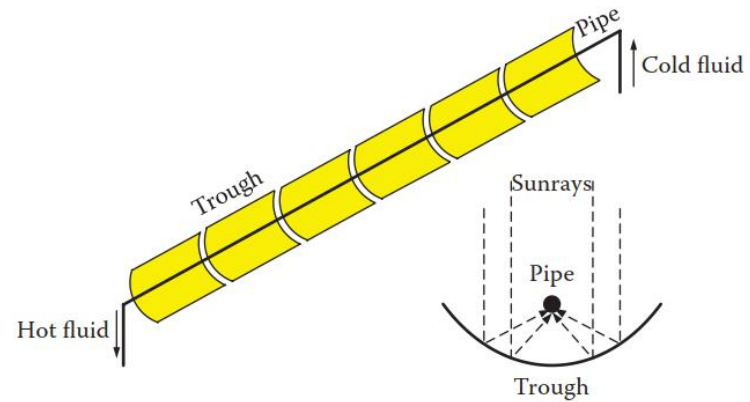


Figure 6.7 Solar systems: (a) integrated solar combined cycle system and (b) concentrated trough. (Images are courtesy of the US Department of Energy, Washington, DC.)

Aktiiviset järjestelmät

- Perustuvat piipohjaiseen puolijohteisiin
- N-tyypin puolijohteessa ylimäärä elektroneja, jotka liikkuvat, esim. fosfori-atomeja
- P-tyypin puolijohteessa aukkoja, puuttuvia elektroneja, esim. Boori

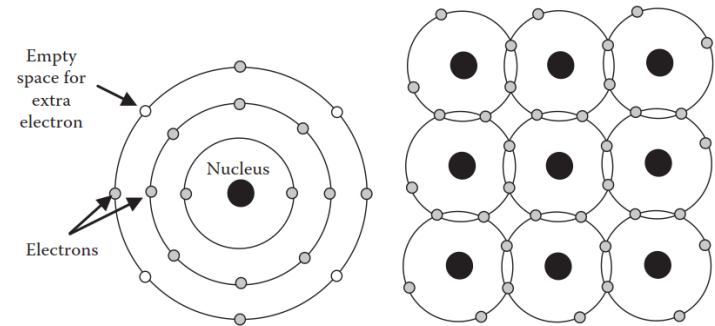


Figure 6.8 Silicon: atom and its crystal structures.

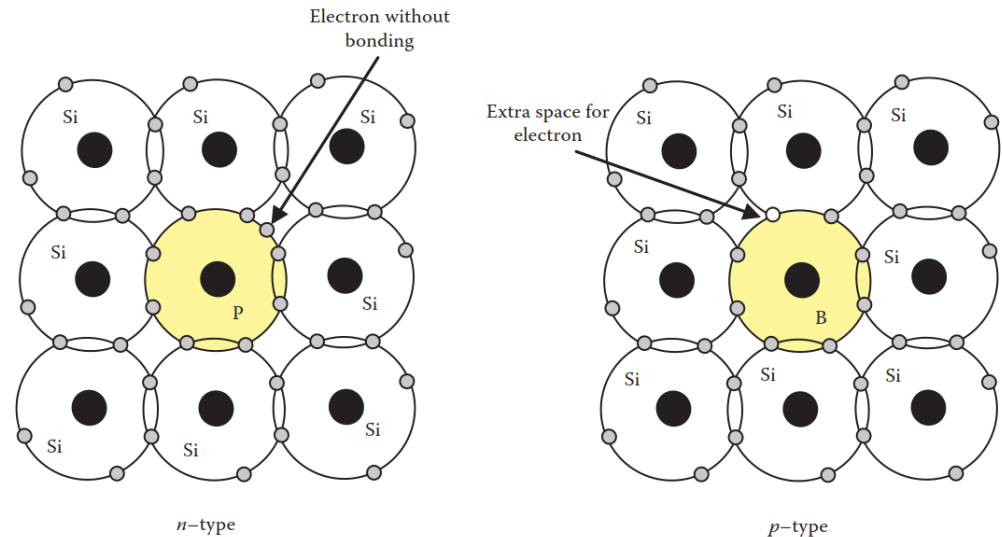


Figure 6.9 Silicon (Si) doped with phosphorus (P) and boron (B).

Aurinkokenno

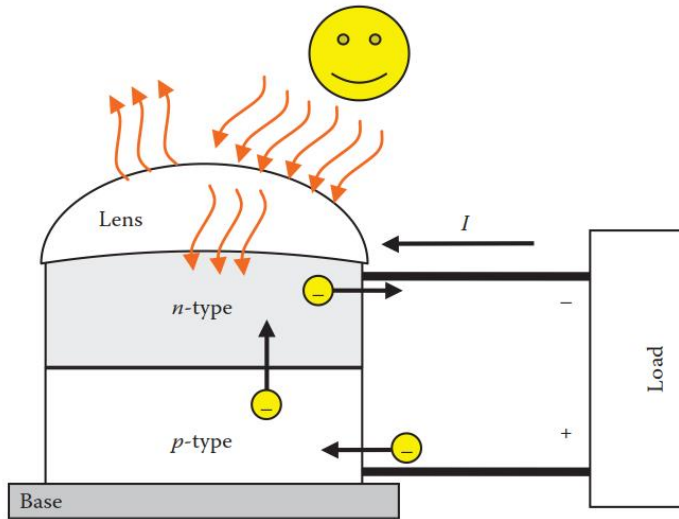


Figure 6.10 Concentrating PV cell.

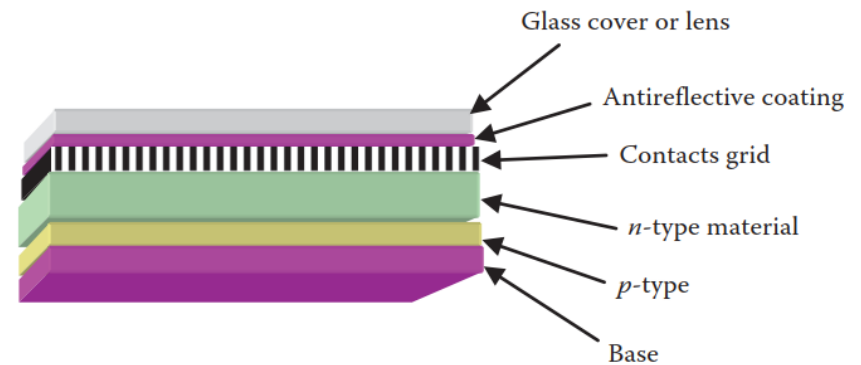


Figure 6.11 Main parts of PV cell.

P-N -liitos ja diodin toiminta

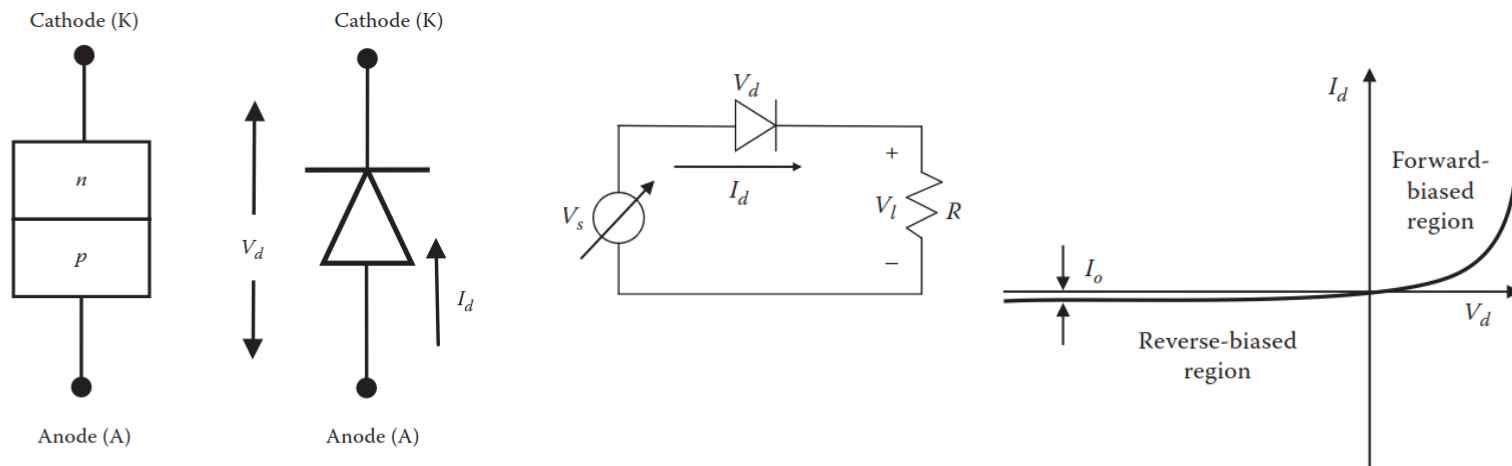


Figure 6.12 Representation of a p - n junction diode.

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

I_o is the reverse saturation current of the diode

V_d is the voltage across the diode

V_T is thermal voltage

q is the charge of one electron which is known as the elementary charge constant ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

T is the absolute temperature in kelvin (K); to convert from Celsius to kelvin, 273.15 is added to the Celsius value

k is the Boltzmann's constant ($1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

Ideaalinen aurinkokenno

- Aurinkokennon jännite on sama kuin diodin päästöjännite eli varsin matala, noin 0,6-0,7 V
- Aurinkokenno voidaan mallintaa virtalähteenä I_s , jolloin kennon virta kuormaan on $I = I_s - I_d$

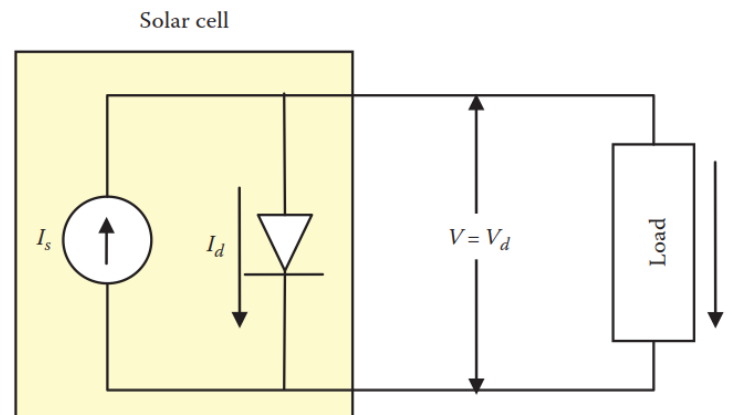


Figure 6.15 Modeling of ideal cell with current source.

Kennon virta-jännite-ominaiskäyrä

- Aurinkokenno on virtalähde rajoitetulla jännitealueella

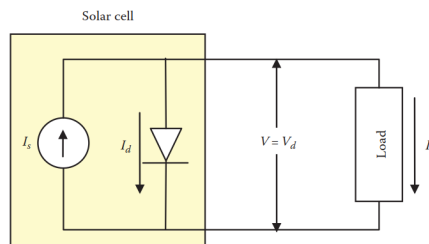


Figure 6.15 Modeling of ideal cell with current source.

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V = V_d$$

$$I = I_s - I_d$$

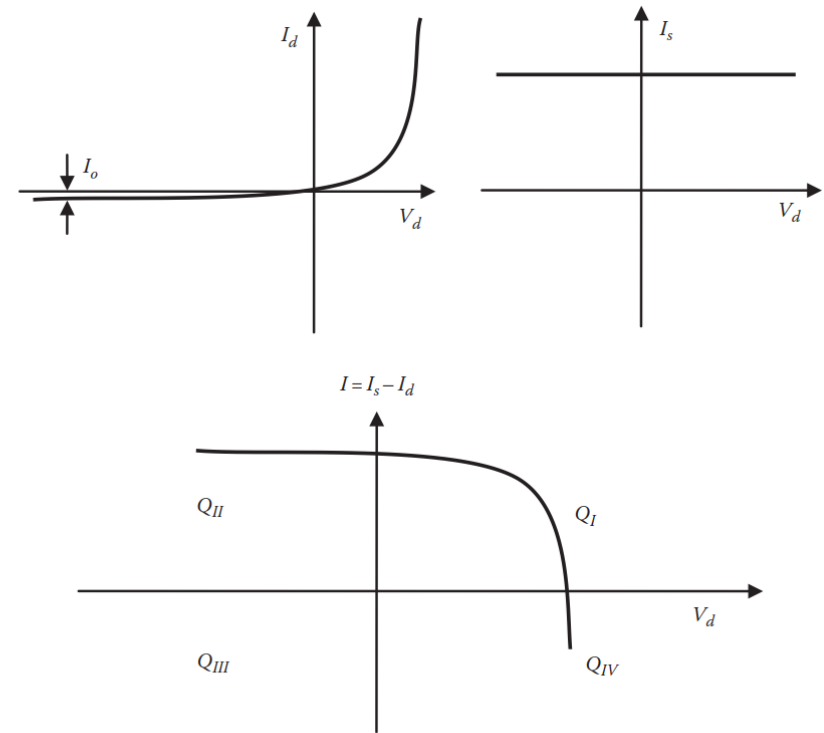


Figure 6.16 Current-volt characteristics of the PV cell.

I_o is the reverse saturation current

V_d is the voltage across the diode which is the same as the voltage across the load

V_T is the thermal voltage whose value is given in Equation 6.4

Maksimitehon piste, maximum power point, MPP

- Teho saadaan kertomalla jännite ja virta

$$P = VI = V_d I_s - V_d I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

- Teholla on maksimipiste ja kennoa pitäisi käyttää tässä pisteessä, jotta auringon säteilystä saataisiin maksimi hyöty

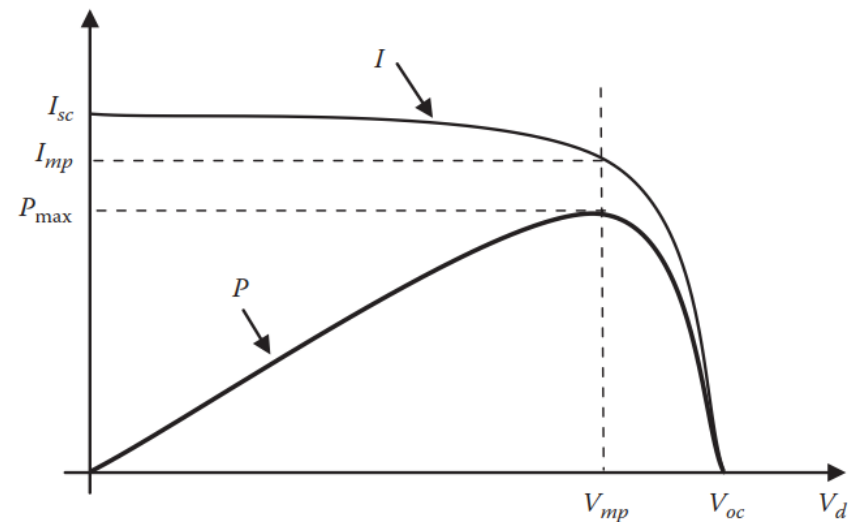


Figure 6.17 Current-voltage and power-voltage characteristics of PV cell.

Aurinkokennon toimintapisteet

- Erikokoiset kuormaresistanssit
 - R_1 on pienin
 - Tehon maksimi R_2 :lla
 - R_3 on suurin ja virta on pienempi kuin muissa, koska jännite on rajoitettu
- Käytännössä säädettävä kuorma, jota em. resistanssi kuvasi voidaan toteuttaa luvussa 10 käsiteltävillä dc-dc-katkojilla

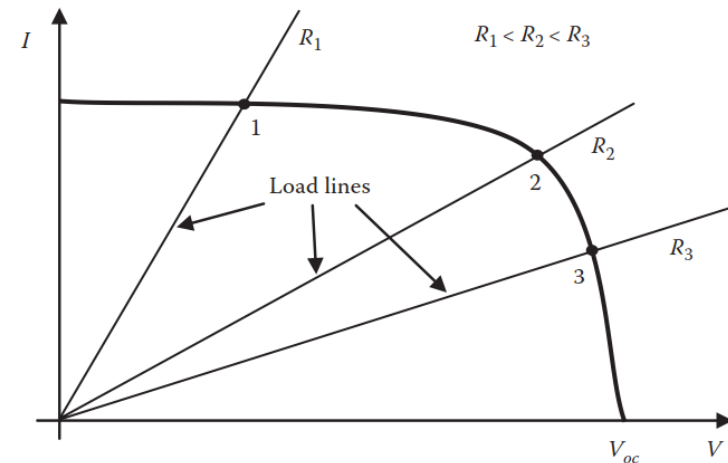


Figure 6.20 Operating points of the solar cell connected to a resistive load.

Muuttuva säteilyteho

- Auringon säteilyn muuttuessa myös kennon virta ja maksimitehon piste muuttuvat
- Lähtötehon maksimoimiseksi myös kuorman on muututtava

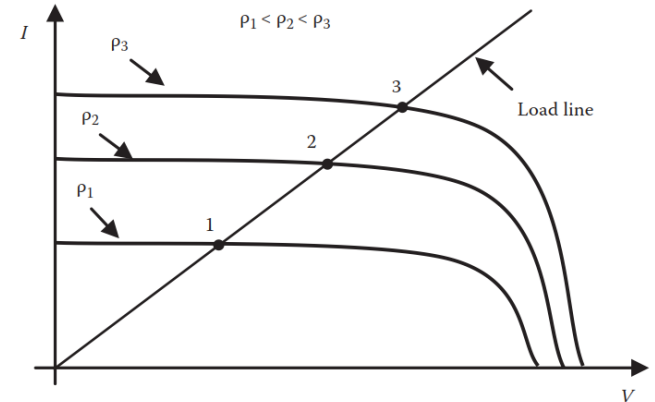


Figure 6.21 Effect of irradiance on the operating point.

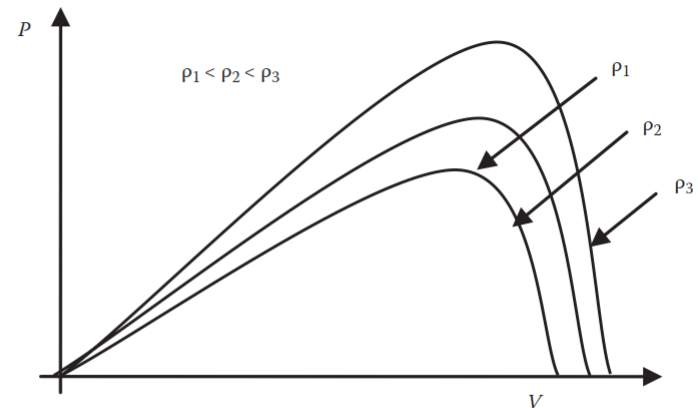


Figure 6.22 Effect of irradiance on PV output power.

Lämpötilan vaikutus

- Kasvava lämpötila
 - Pienentää kennon avoimen piirin jännitettä
 - Kasvattaa kennon virtaa, elektronit irtoavat helpommin
 - Pienentää maksimitehoa
- Aurinkokennoa pitäisi käyttää matalassa lämpötilassa ja suurella säteilyteholla

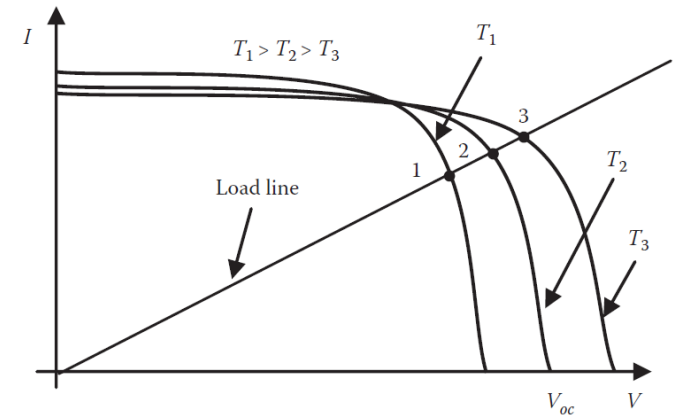


FIGURE 6.23 Effect of temperature on the operating point.

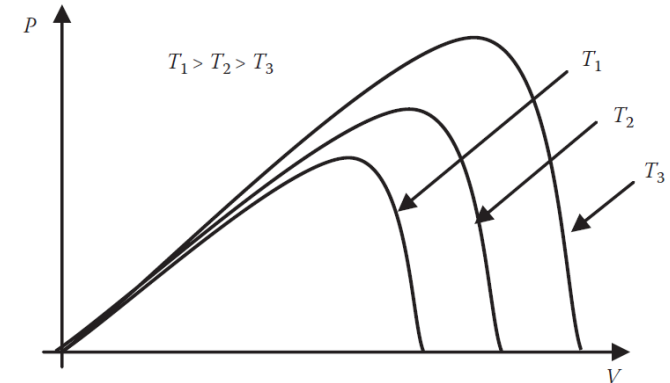


FIGURE 6.24 Effect of temperature on PV output power.

Paneelit

- Yksittäisiä kennoja kytketään sarjaan ja rinnan



Module or panel



Array



System

Figure 6.25 PV module, PV array, and PV system. (Images courtesy of the US Department of Energy, Washington, DC.)

Sarjakytkentä

- Jännite on sarjaankytkettyjen kennojännitteiden summa
- Sama virta kulkee kaikkien kennojen läpi
 - Varjostukset (pilvet, rakennukset, puut, yms.) vaikuttavat koko paneelin toimintaa, yksikin varjostunut kenno pienentää koko paneelin virran

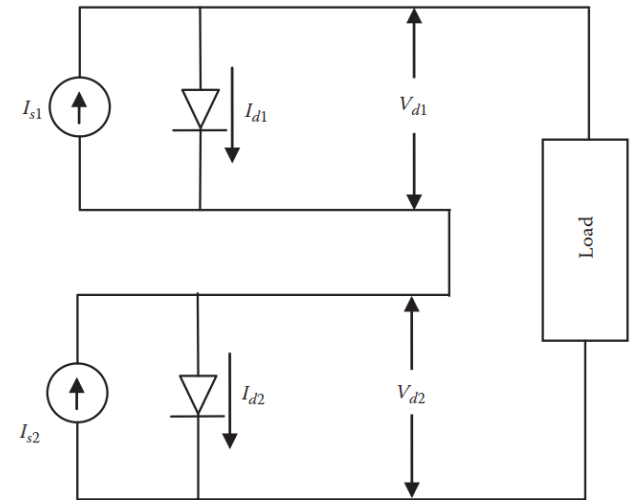


Figure 6.26 Solar cells in series.

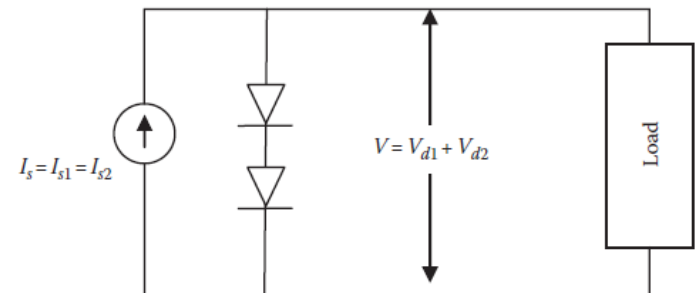


FIGURE 6.27 Equivalent circuit for solar cells in series.

Rinnankytkentä

- Kasvattaa virran rinnankytkettyjen kennojen summaksi
- Jännite pysyy matalana eli yhden kennon jännitteenä

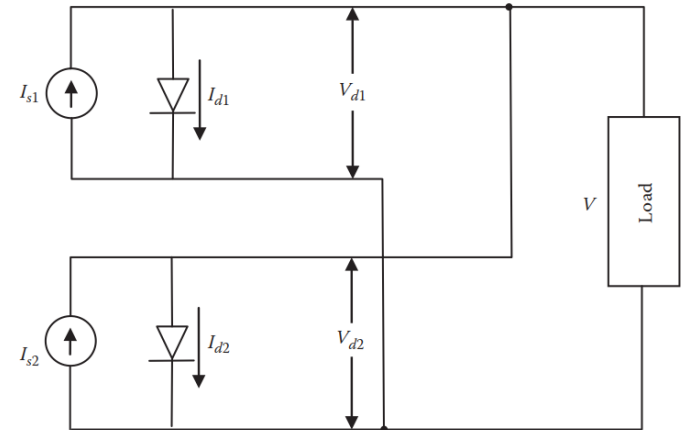


Figure 6.28 Solar cells in parallel.

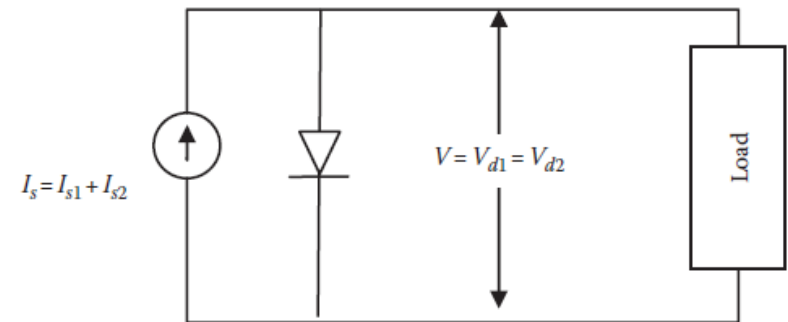


FIGURE 6.29 Equivalent circuit of solar cells in parallel.

Todellisen aurinkokennon malli

- Aurinkokennojen hyötysuhde on tyypillisesti alle 20 %, mutta laboratorio-olosuhteissa parhaat 40-50 %
- Säteilyyn liittyvät häviöt $\eta_{\text{irradiance}}$, heijastukset kennon pinnasta tai osa fotoneista ei ole riittävän suurenergisiä irrottamaan elektronia
- Sähköiset häviöt η_e , erilaiset resistiiviset häviöt johdotuksista ja puolijohdemateriaaleista on mallinnettu kahdella resistanssilla

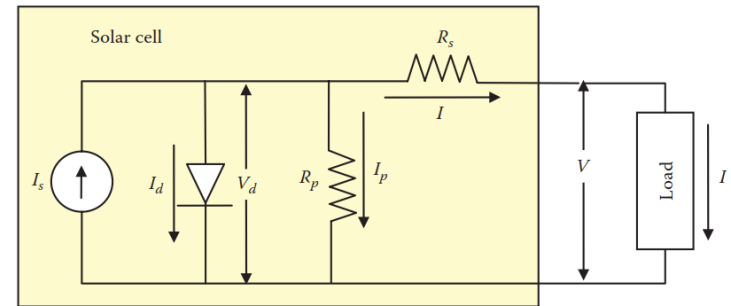


Figure 6.32 Model of real PV cell.

$$I = I_s - I_d - I_p$$

$$V = V_d - IR_s$$

$$\eta_{\text{irradiance}} = \frac{P_{se}}{P_s} = \frac{V_d I_s}{\rho A}$$

$$\eta_e = \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{VI}{V_d I_s}$$

$$\eta = \eta_{\text{irradiance}} \eta_e = \frac{P_{se}}{P_s} \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{P_{out}}{P_s} = \frac{VI}{\rho A}$$

P_{se} is solar power converted to electricity

P_s is solar power reaching the solar cell

P_{out} is the output power of the solar cell that is consumed by the load

ρ is the solar power density at the surface of the cell

A is the area of the PV cell facing the sun

Aurinkosähköjärjestelmät



Figure 6.33 Various photovoltaic systems. (Image courtesy of the US Department of Energy, Washington, DC.)

Aurinkosähköjärjestelmät

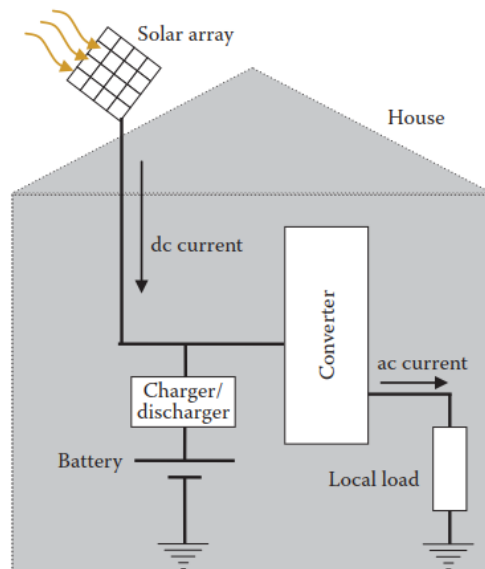


Figure 6.34 Storage PV system.

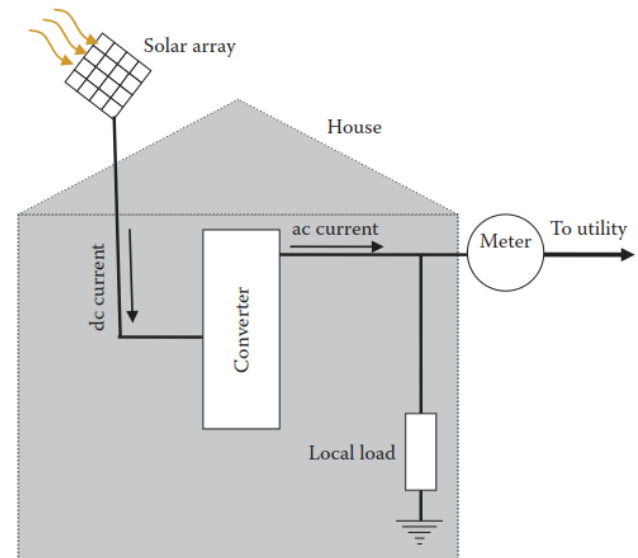
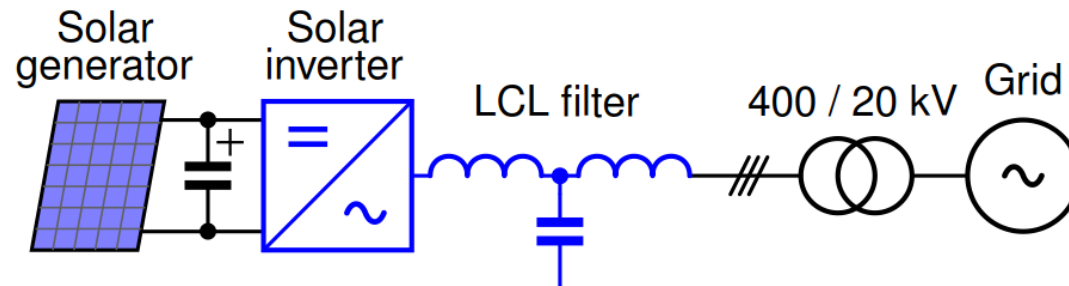


Figure 6.35 Direct PV system.

Sähköverkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmät

- Aurinkopaneelit tuottavat tasajännitteen
- DC-kiskoston jännite nostetaan suhteellisen korkeaksi, jotta verkkoonliityntä onnistuu, tyypillisesti 600-850 VDC
- Kennoja kytketään sarjaan ja lisäksi voidaan käyttää dc-dc-katkoja jännitteen nostoon ja lisäksi niillä voidaan toteuttaa maksimitehopisteen seuranta
- Tehoelektroniikka käsitellään tarkemmin luvussa 10



Keskusvaihtosuuntaaja

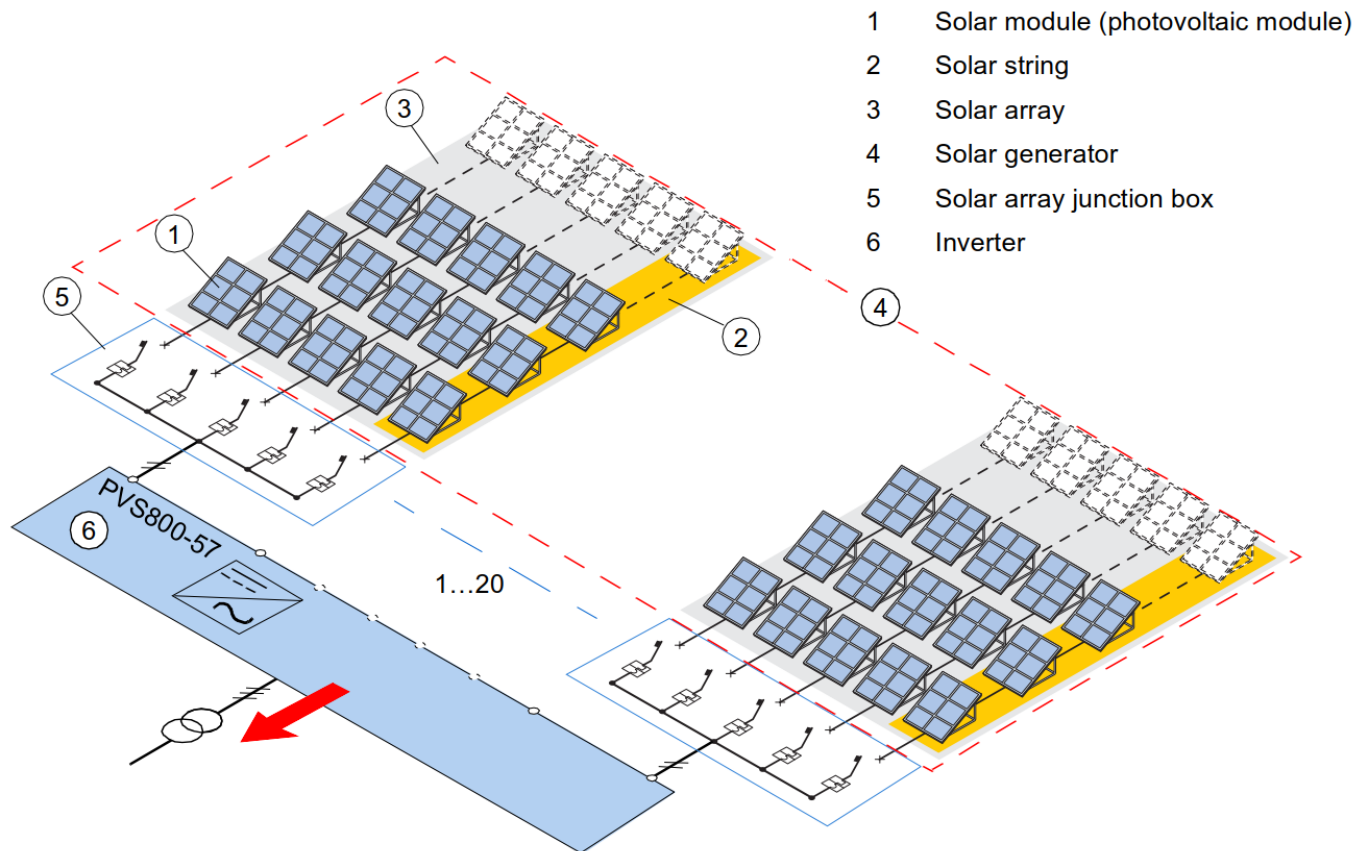
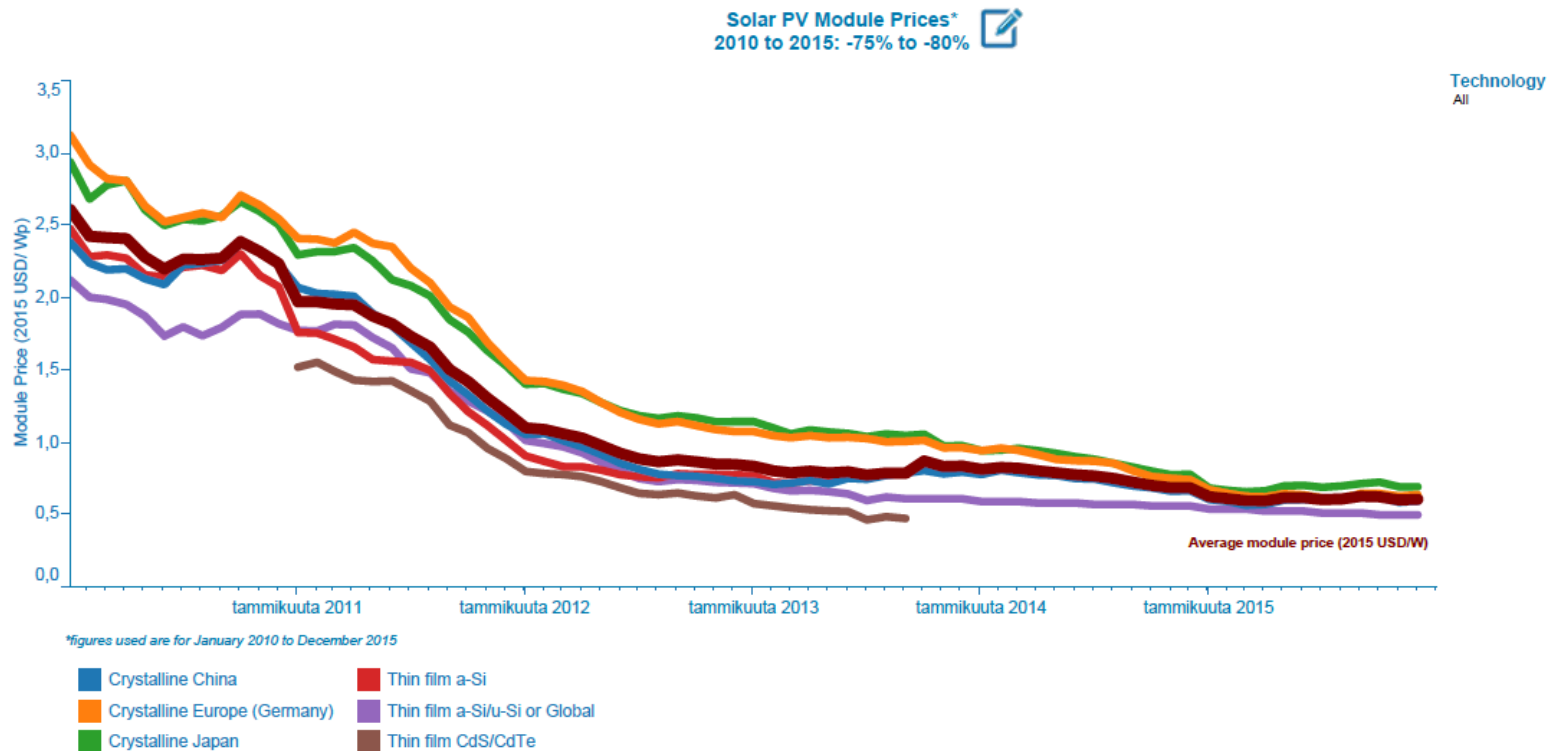


Figure: ABB

Aurinkopaneelien hintakehitys



© IRENA

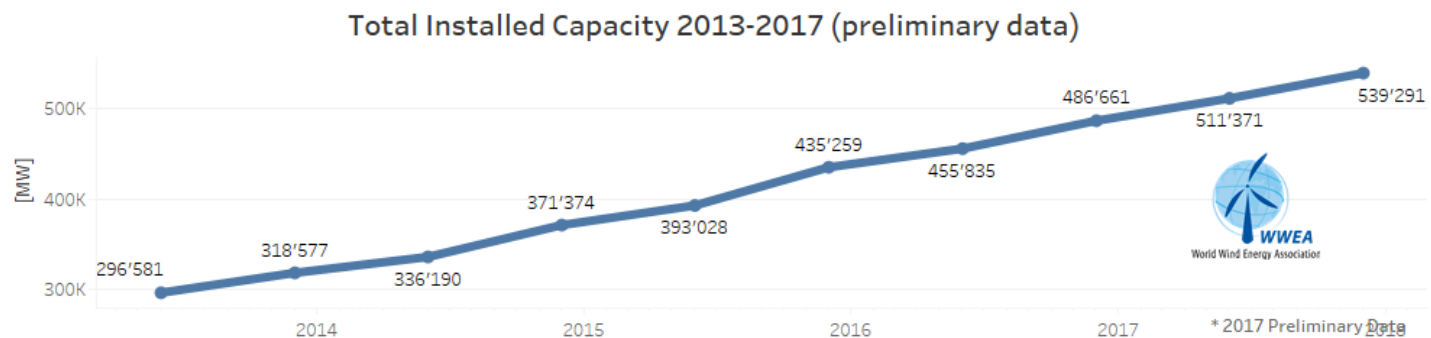
6.2 Tuulienergia

- Käytetty jo tuhansia vuosia mm. purjehduksessa, noin 5000 sitten Egyptissä
- Ensimmäiset tuulimyllyt noin 3000 BC Kiinassa ja sen jälkeen Babyloniassa
- Ensimmäisen tuuliturbiinin rakensi Charles F. Brush 1888
- Suurimmat tuulivoimalat ovat nykyään jopa 8 MW
- 6.2.1, 6.2.2, 6.2.7-6.2.13, muu oheislukemista

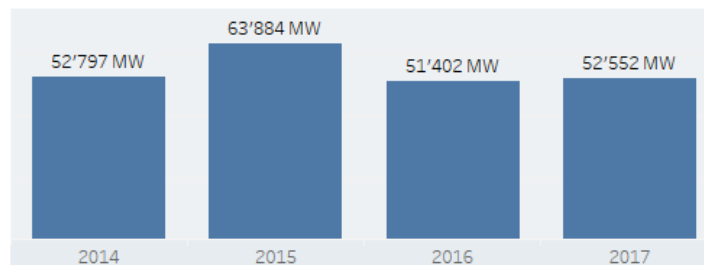
World Wind Energy Association

- <http://www.wwindea.org/home/index.php>

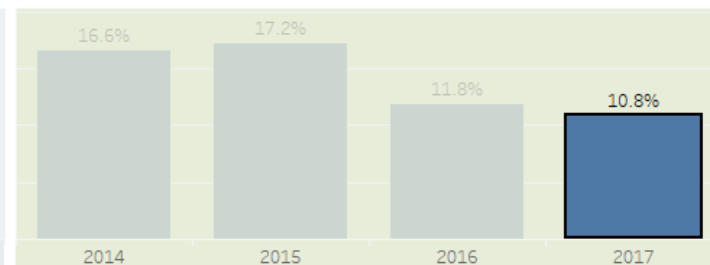
Select a .. All



New Installed Capacity



Growth Rates



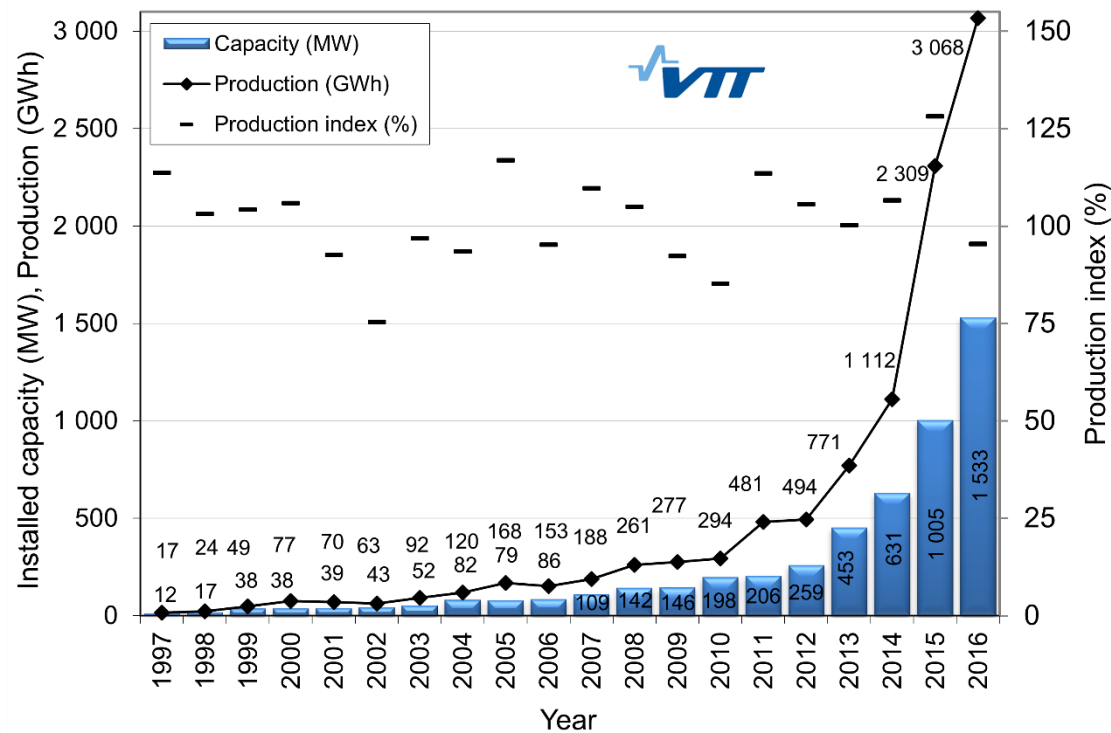
Maaailman top 16 maata

Top 16 + rest of the World [MW]

Country/Region	Total capacity end 2017	Added capacity 2017	Total capacity end 2016	Total capacity end 2015	Total capacity end 2014	Total capacity end 2013
China*	187730	19000	168730	148000	114763	91413
United States	88927	6894	82033	73867	65754	61108
Germany	56164	6145	50019	45192	40468	34658
Rest of the World*	48500	5600	42822	37522	32219	26493
India**	32879	4600	28279	24759	22465	20150
Spain	23026	6	23020	22987	22987	22959
United Kingdom	17852	3340	14512	13614	12440	10531
France	13760	1695	12065	10293	9296	8254
Brazil	12763	1963	10800	8715	5962	3399
Canada	12239	341	11898	11205	9694	7698
Italy*	9700	443	9257	8958	8663	8551
Turkey*	6981	900	6081	4718	3763	2958
Sweden*	6721	228	6493	6029	5425	4470
Poland*	6534	752	5782	5100	3834	3390
Denmark	5320	93	5227	5064	4883	4772
Portugal*	5316	0	5316	5050	4953	4724
Australia*	4879	553	4326	4186	3806	3049
Grand Total	539291	52552	486661	435259	371374	318577

Finish Wind Energy Statistics, VTT

- <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>
- <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>

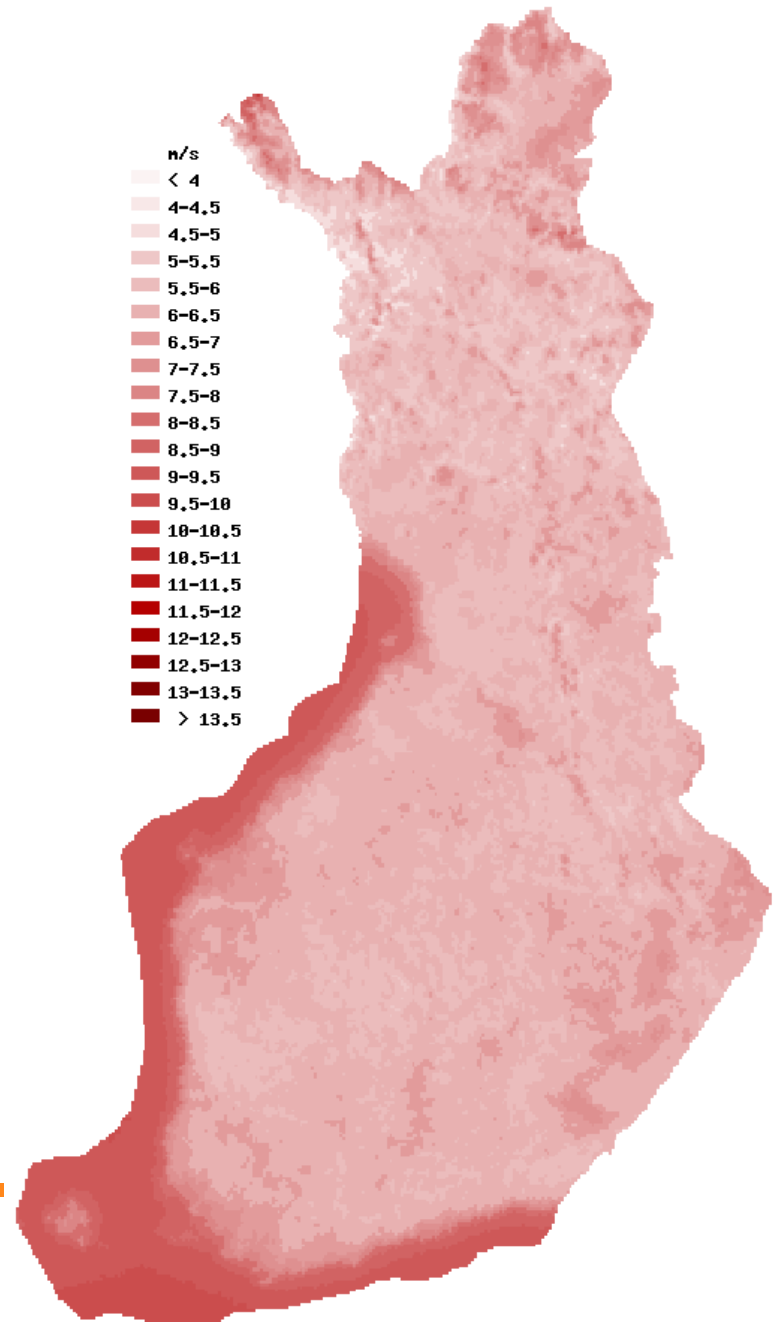
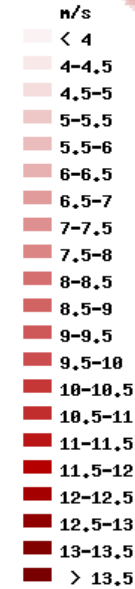


Tuulivoimalat Suomessa

- Nykyisten voimaloiden [sijaintipaikat](#)
- <http://ethawind.com/map/>
- Uudet suunnitelmat [kartalla](#)

Suomen tuuliatlas

- <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>



- **Tuotanto roottorin pyyhkäisypinta-alaa kohti (kWh/m²):**
 - Tuotanto roottorin pyyhkäisypinta-alaa kohden kertoo, kuinka paljon energiaa on tuotettu roottorin pinta-alaan nähden.
 - Nyrkkisääntönä on, että voimala on tuottanut hyvin, mikäli vuosituotannosta laskettu luku on yli 1000k Wh/m².
- **Huipunkäyttöaika th (h):**
 - Tuulivoimaloiden energiantuotanto vaihtelee välillä 0 % - 100 % nimellistehosta.
 - Th kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan
 - Esimerkiksi 2500 tunnin huipunkäyttöaika sitä että laitos on tuottanut vuoden aikana energiamäärän, jonka laitos tuottaisi toimiessaan nimellistehollaan 2500 tuntia
 - Mikäli tuulivoimalan vuotuinen huipunkäyttöaika on yli 2400 tuntia, on laitos tuottanut hyvin.
- **Kapasiteettikerroin CF:**
 - Kapasiteettikerroin CF kertoo huipunkäyttöajan suhteessa vuoden tunteihin ja se kuvaa siten oleellisesti samaa asiaa kuin huipunkäyttöaika
 - Kapasiteettikerroin on käytössä erityisesti englanninkielisessä kirjallisuudessa

Määritelmiä (2/2)

- **Tuotantoindeksi IL (%)**
 - Tuotantoindeksi on sääasemilla mitattujen tuulennopeushavaintojen perusteella laskettu tuotanto suhteessa pitkän aikavälin havainnoista laskettuun keskimääräiseen tuotantoon
 - Suomen tuulivoimatilastoissa keskimääräinen tuotanto on tällä hetkellä laskettu vuosien 1987 - 2001 tuulennopeushavainnoista.
 - Tuulennopeushavainnot muutetaan keskitehoksi käyttäen 1500 kW tuulivoimalaitoksen tehokäyrää ja huomioiden ilman tiheyden vaikutus tehontuotantoon
 - Tuotantoindeksiä tarvitaan kun halutaan selvittää, kuinka tuulinen jokin tietty ajanjakso oli suhteessa pitkän aikavälin keskimääräiseen tuulisuuteen. Asia on erityisen tärkeä tuulivoimainvestointien yhteydessä, jolloin on selvitettävä mikä on tuotantoennuste voimalahankkeen eliniän ylitse.

Tuulen liike-energia

- Tuulen energia

- m, massa,
- w, nopeus m/s,
- Δ , ilman tiheys kg/m³

$$KE = \frac{1}{2}mw^2$$

$$KE = \frac{1}{2}A\delta tw^3$$

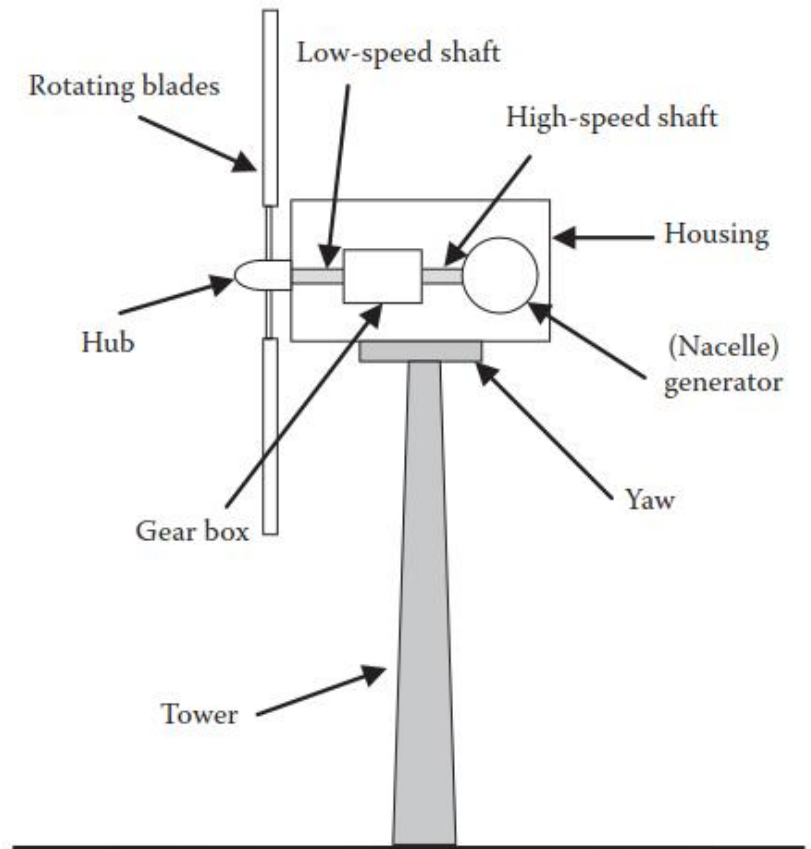
- Teho

$$P_{wind} = \frac{KE}{t} = \frac{1}{2}A\delta w^3$$

Tuulivoimalan osat



(a)



(b)

Figure 6.39 Basic components of a wind-generating system: (a) horizontal design and (b) main parts.

Tuuliturbiini

Wind Turbine

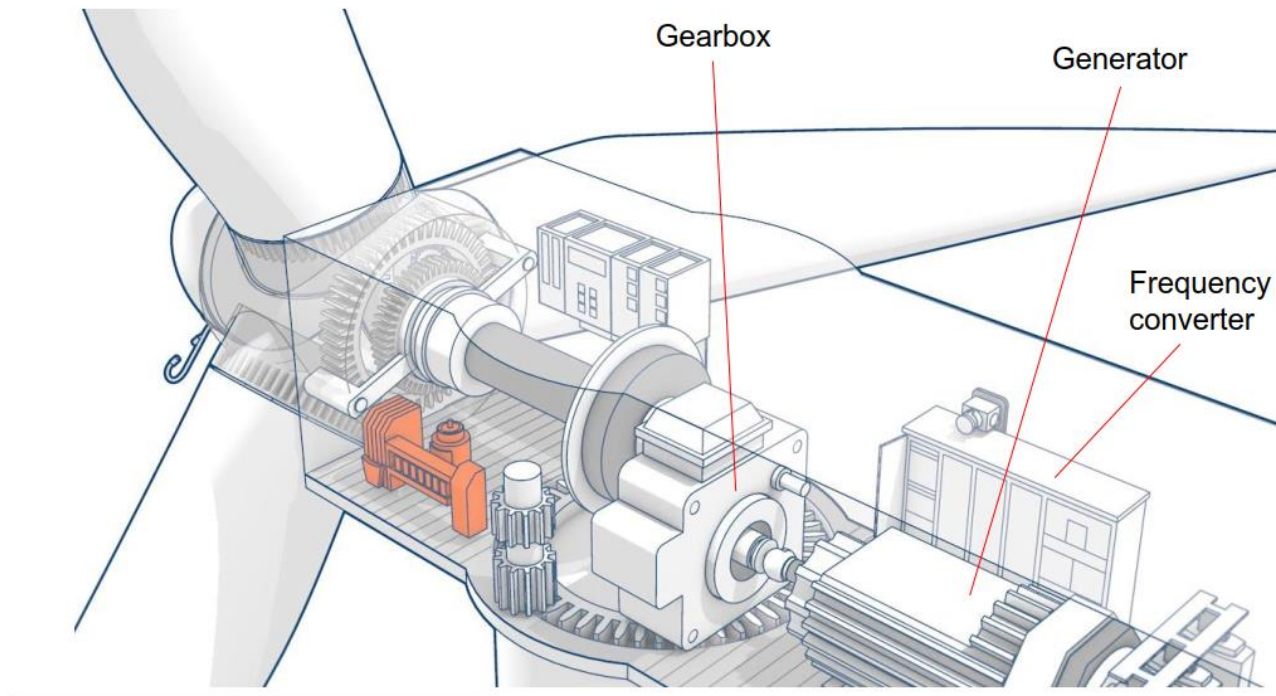


Figure: ABB (modified)

Siivet



(a)



(b)

Figure 6.40 (a) Housing and (b) blade of a 1.8 MW wind generating system.

Aerodynaamisen voiman tuotto lavoissa

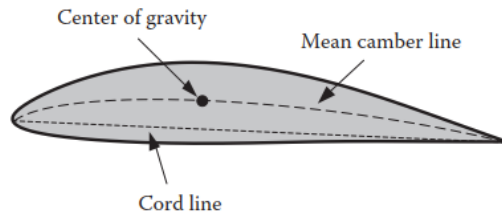


Figure 6.42 Mean camber line, center of gravity of airfoil, and cord line.

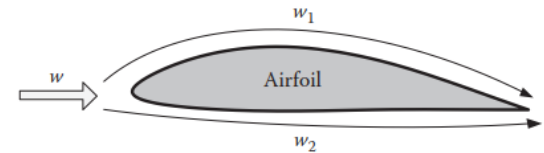


Figure 6.43 Flow of air around airfoil.

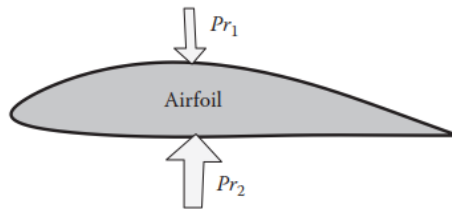


Figure 6.44 Bernoulli's principle.

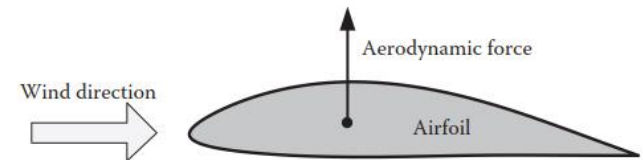


Figure 6.45 Aerodynamic force.

Kohtaamiskulma, α

F_L , nostovoima, lift force
 F_D , työntövoima, drag force

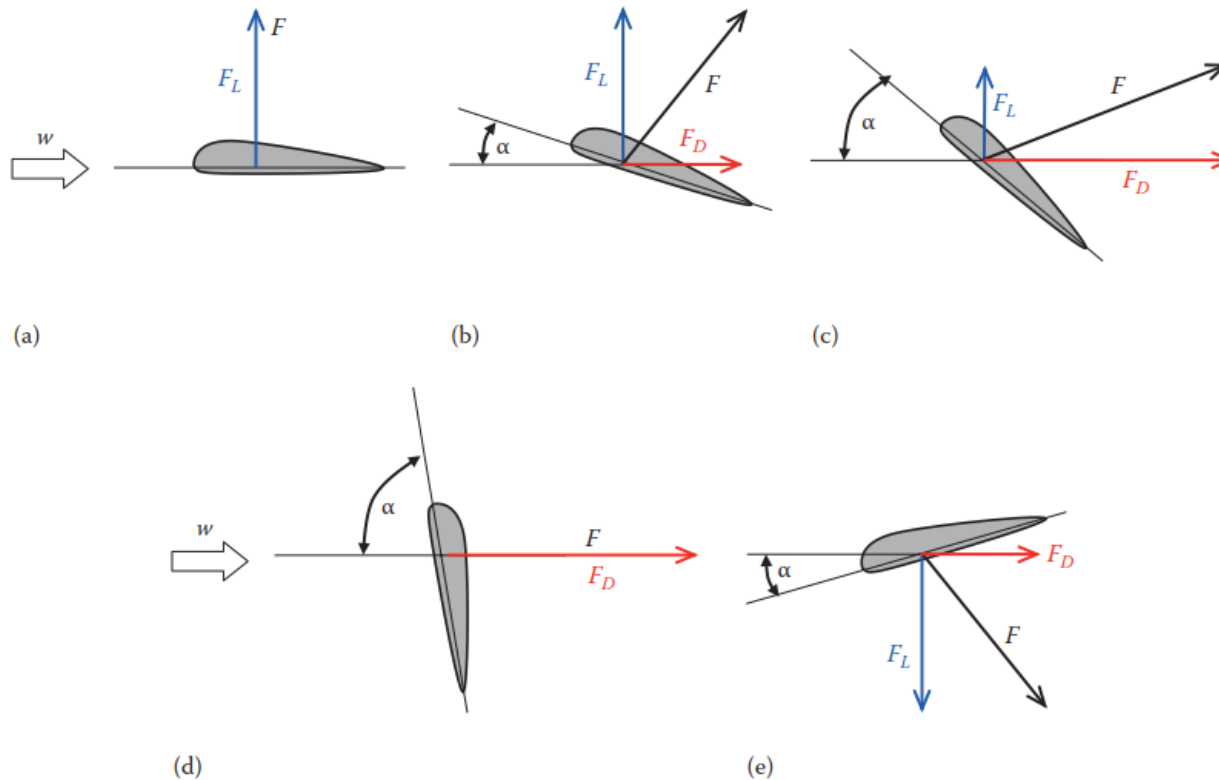


Figure 6.46 Aerodynamic forces and angle-of-attack: (a) horizontal position—all aerodynamic force is lift; (b) positive angle-of attack—aerodynamic force has lift and drag; (c) increasing positive angle-of attack, less lift, and more drag; (d) increasing positive angle-of attack until aerodynamic force is all drag; and (e) negative angle-of attack—lift is reversed.

Nostovoima ja lapakulma β

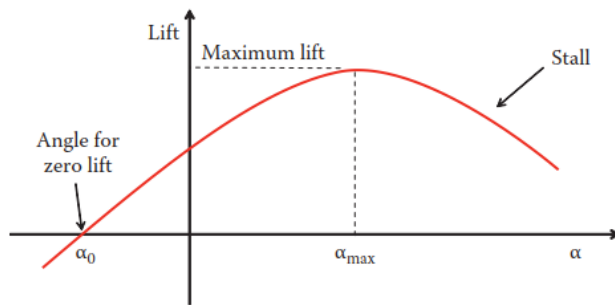


Figure 6.47 Lift force as a function of angle-of-attack.

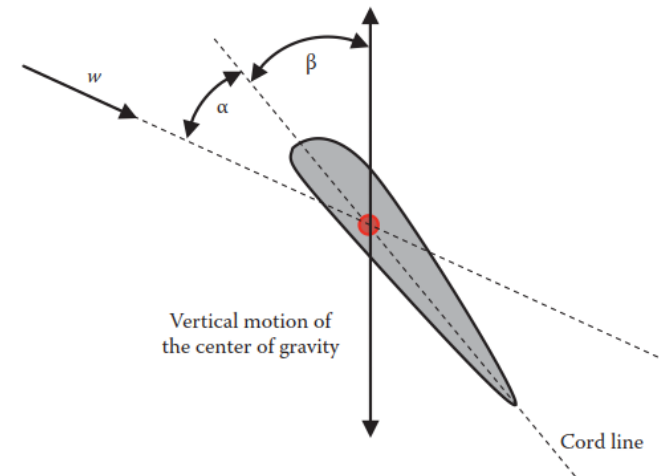


Figure 6.48 Relative wind speed, angle of attack and pitch angle.

Tuulivoimalan häviöt

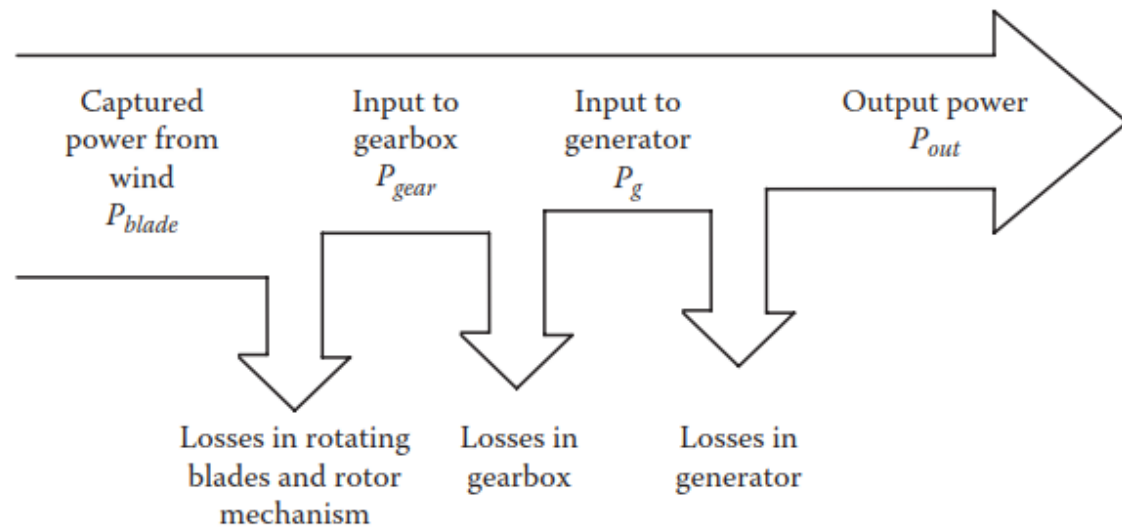


Figure 6.49 Power flow of a wind turbine.

Lähtöteho pyörimisnopeuden funktiona

- Alkunopeus (cut-in speed) $w_{\min}$
- Nopeuden w_B jälkeen turbiinin tehoa on rajoitettava säätämällä lapakulmaa, jotta turbiini nimellisteho ei ylitä

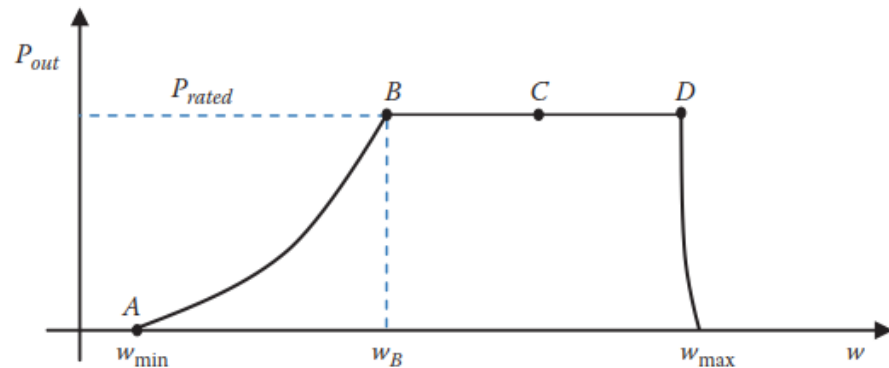


Figure 6.50 Output power of wind turbine.

Kärkinopeus ja nopeussuhde

Tip speed ratio, TSR

$$v_{tip} = \omega r = 2\pi \frac{n}{60} r$$

$$TSR = \frac{v_{tip}}{w}$$

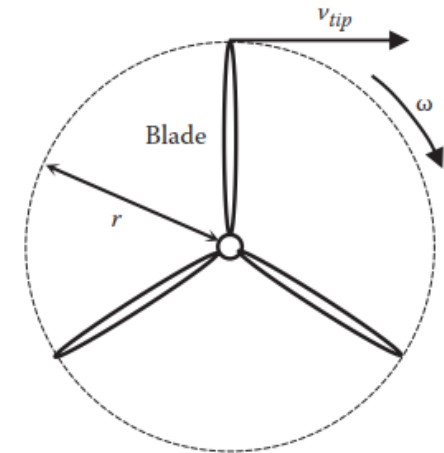


Figure 6.51 Tip velocity.

v_{tip} kärjen nopeus m/s

ω siiven kulmanopeus (rad/s)

n kierrosnopeus (r/min)

r siiven pituus (m)

w tuulen nopeus

Tehokkuuskerroin

- Tehokkuus $C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}}$
- Kuvaa kuinka paljon tuulen tehosta muuttuu lapojen tehoksi
- Betzin raja, C_p on aina pienempi kuin 0,5926 ja käytännössä pienempi kuin 0,5
- Moderneissa tuuliturbiineissa TSR voidaan säätää optimaaliseksi säätämällä generaattorin nopeutta ja lapakulmaa

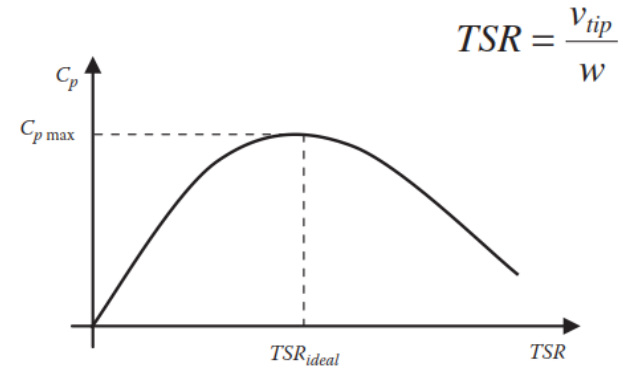


Figure 6.52 Coefficient of performance as a function of TSR .

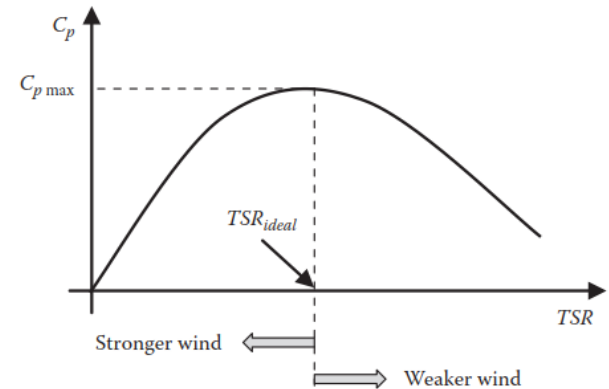


Figure 6.53 Tracking maximum C_p by adjusting the speed of the blade.

Vaakasuuntainen akseli on yleisin

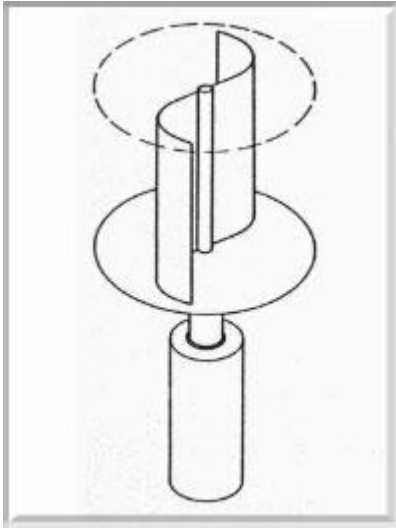


Figure 6.57 Horizontal axis wind turbines.



Figure 6.58 Lifting of gearbox and brakes of HAWT. (Courtesy of Paul Anderson through Wikipedia.)

Pystyakselisia turbiineja on jonkin verran



Savoniusroottori



Figure 6.59 Vertical axis wind turbine. (Courtesy of US National Renewable Energy Lab.)

Kytöntä sähköverkkoon

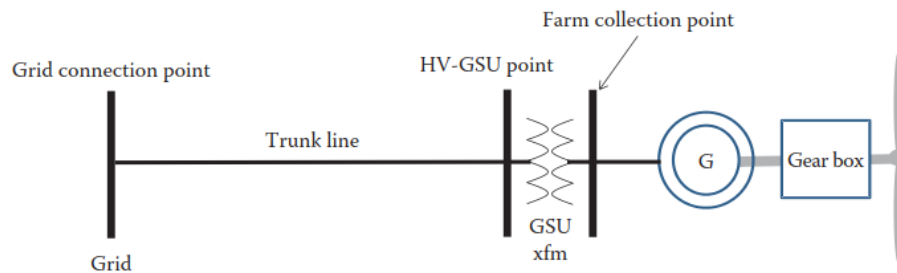


Figure 6.60 Type 1 wind turbine system.

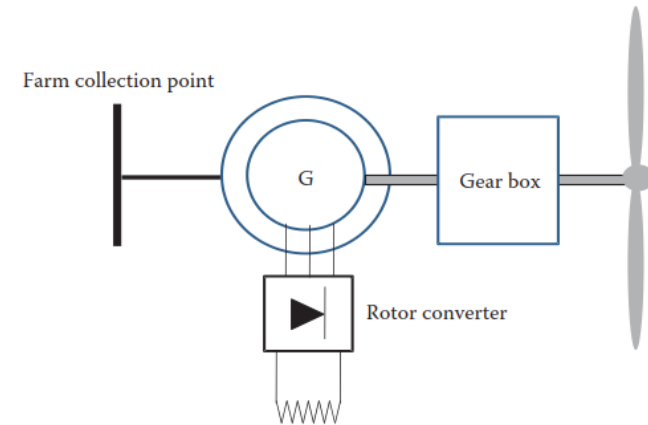


Figure 6.61 Type 2 wind turbine system.

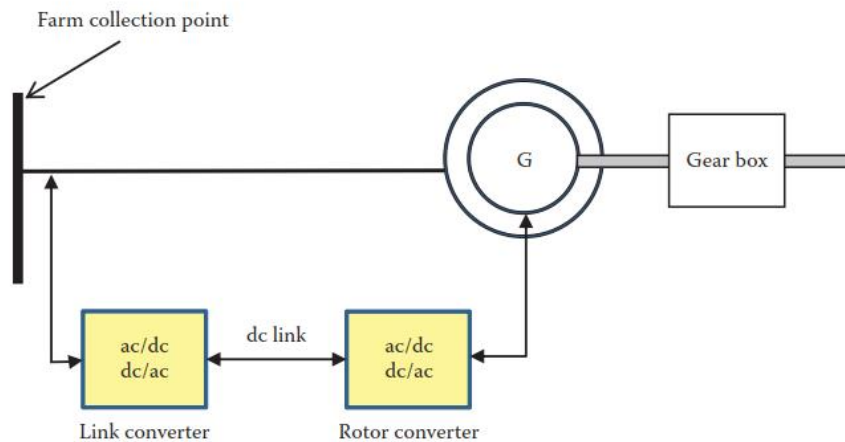


Figure 6.62 Type 3 wind turbine system.

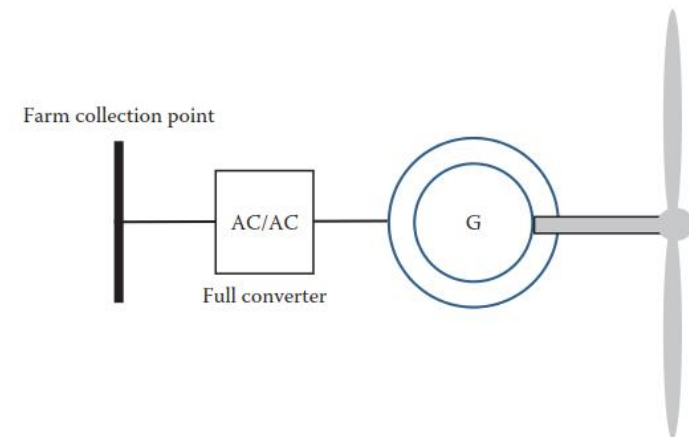


Figure 6.63 Type 4 wind turbine system.

Tuulipuistot



Figure 6.65 Wind farm located in California. (Images are courtesy of the U.S. Department of Energy, Washington, DC.)



Figure 6.66 Two megawatt offshore wind turbine farm in Denmark. (Image courtesy of LM Glasfiber Group.)

Future Concepts: Superconducting Direct-Drive Generators

High Temperature Superconductor (HTS), Operated at 30...50 K

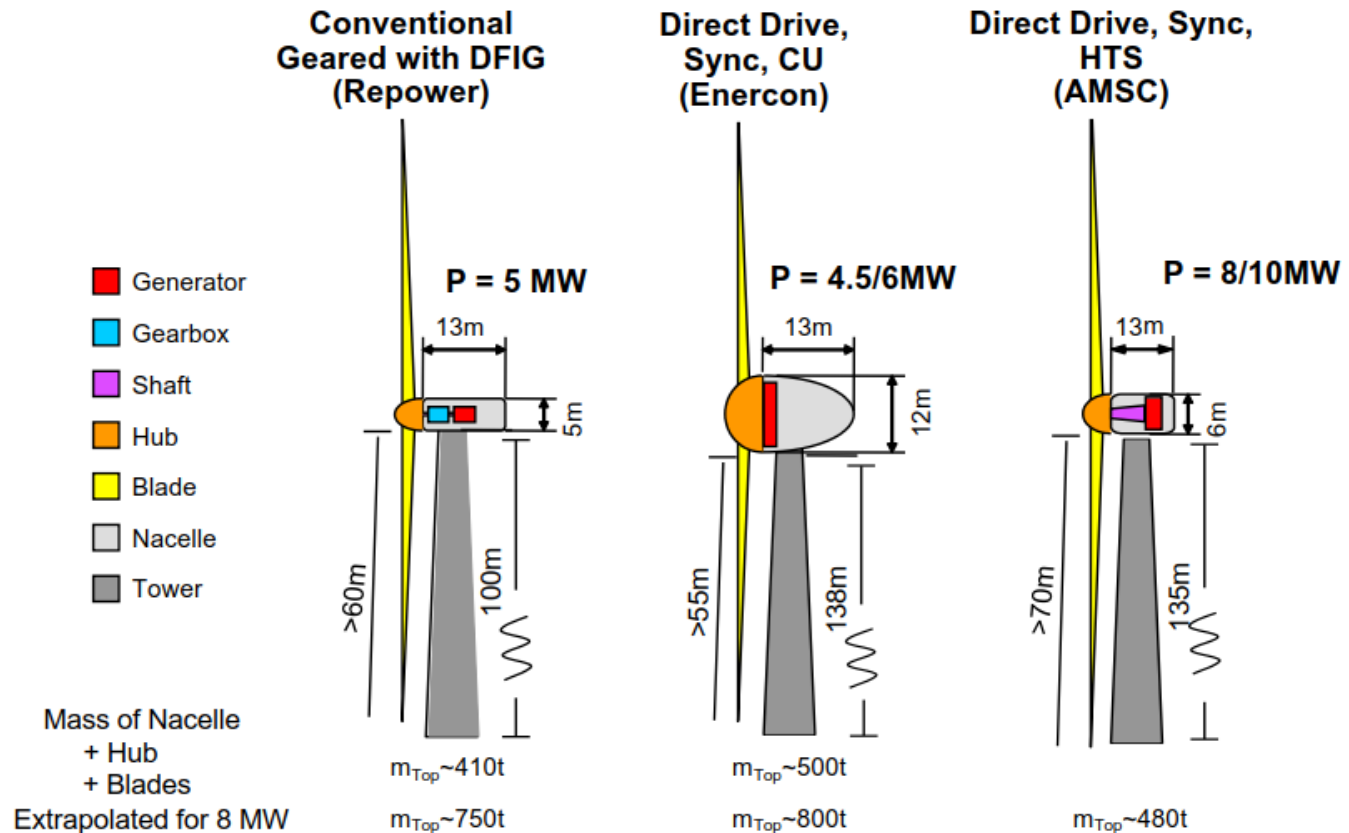


Figure (modified): D. McGahn, "Drivetrains: direct drive generators and high temperature superconductor based machines," MIT Windweek, 2009, <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/P7%20-%20McGahn.pdf>

Growth in Turbine Size

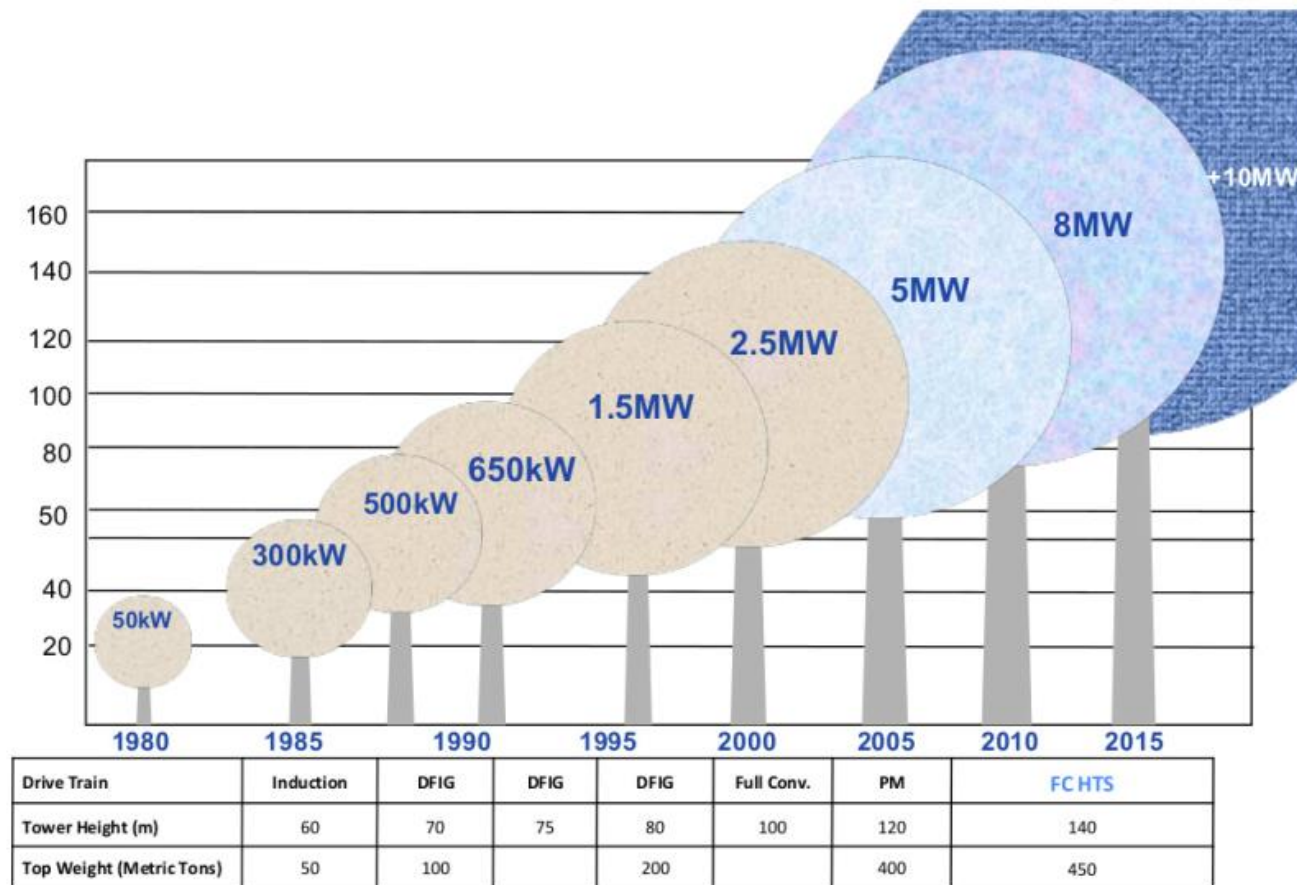


Figure (modified): D. McGahn, "Drivetrains: direct drive generators and high temperature superconductor based machines," MIT Windweek, 2009, <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/P7%20-%20McGahn.pdf>

6.3 Hydrokineettiset järjestelmät

- Pienet vesivoimalat
- Vuorovesivoimalat
- Aaltoenergia

- Eri ratkaisujen periaatteet, mutta mekaniikan yhtälöt yms. yksityiskohdat ovat oheislukemista

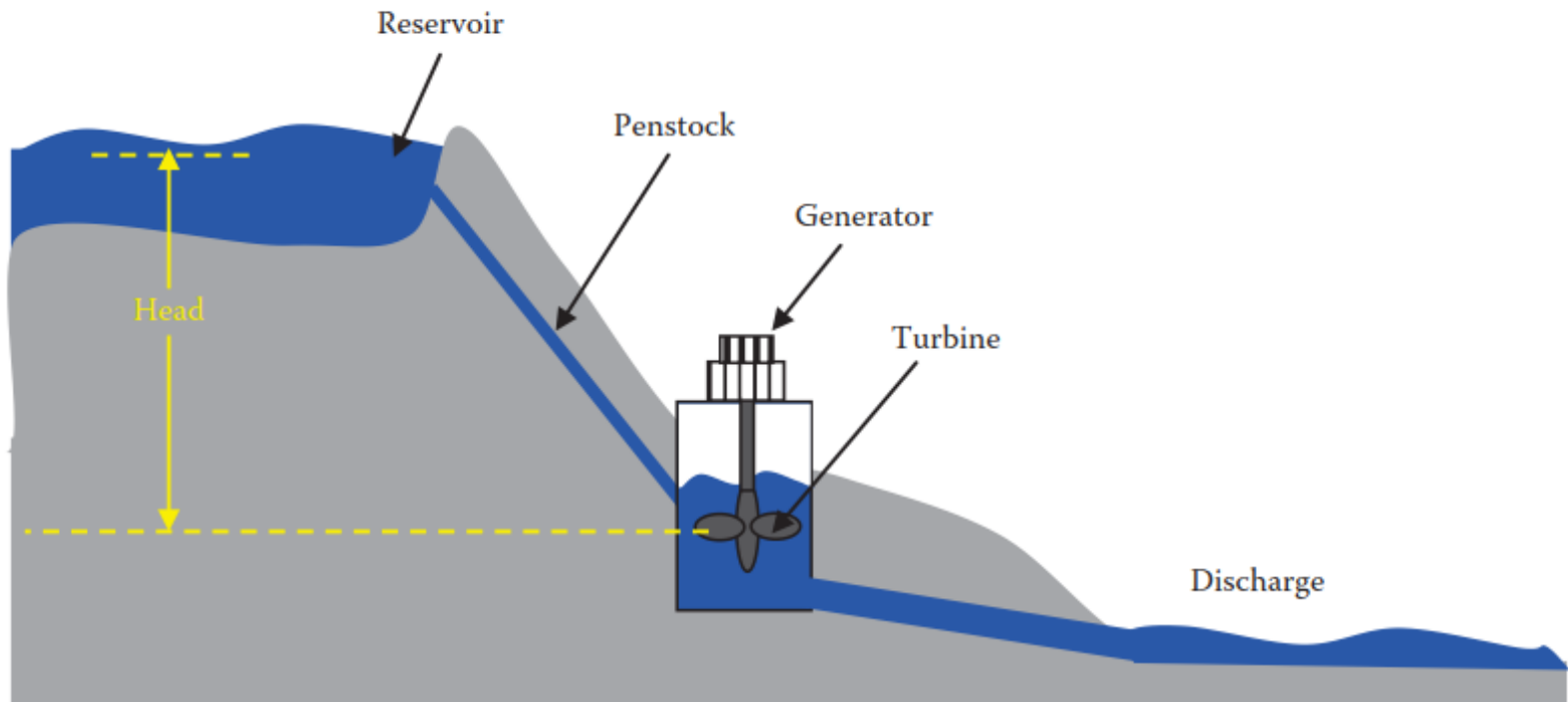


Figure 6.69 Small hydroelectric system with reservoir.

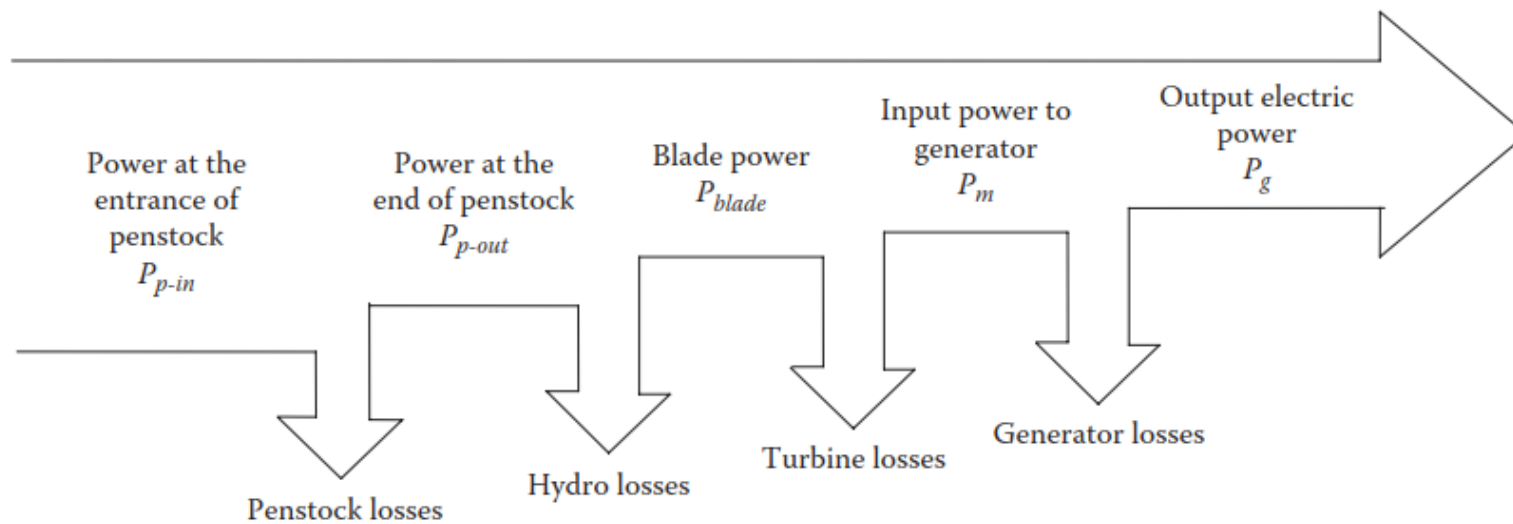


Figure 6.70 Power flow in small hydroelectric system.

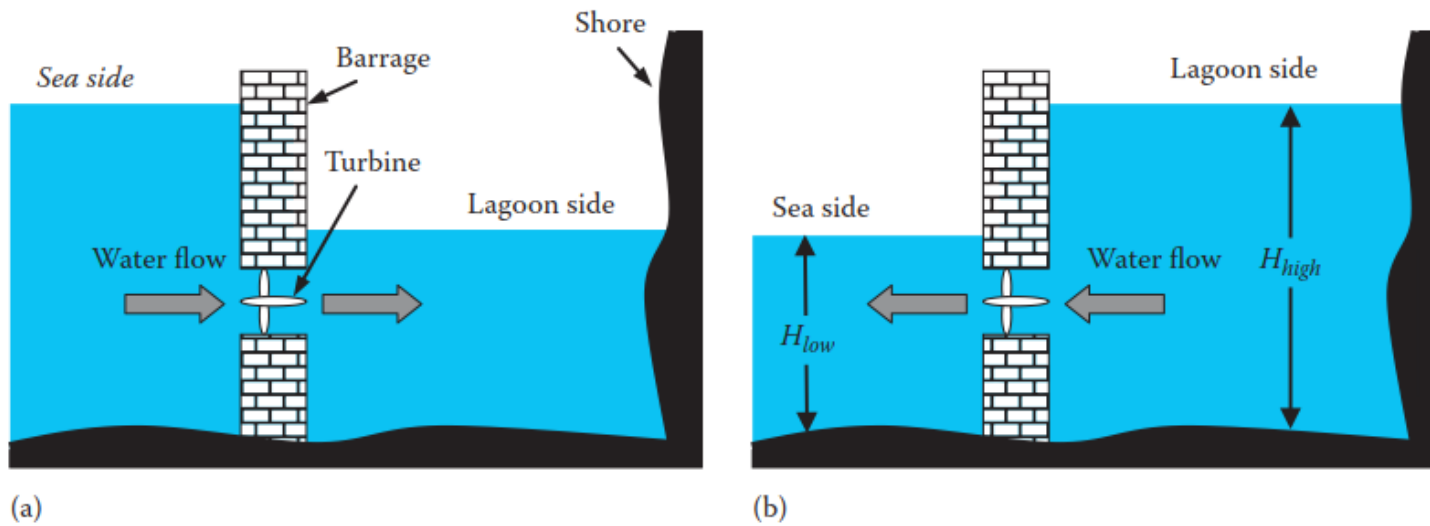


Figure 6.71 Barrage tidal energy system: (a) high tide and (b) low tide.

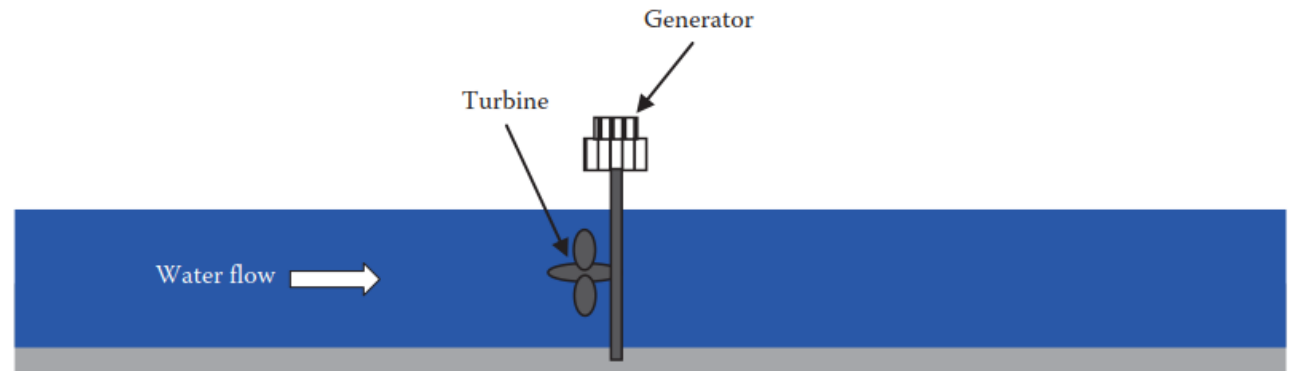


Figure 6.73 Diversion-type small hydroelectric system.



(a)



(b)

Figure 6.74 WS energy system: (a) turbine and (b) conceptual design of a farm. (Images courtesy of Marine Current Turbines Limited.)

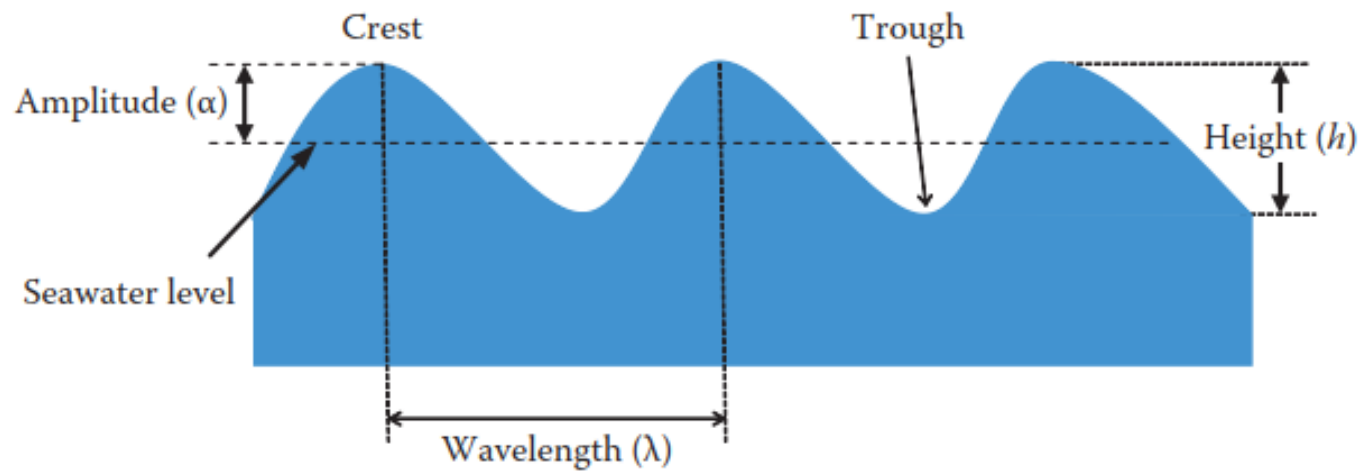


Figure 6.75 Wave parameters.

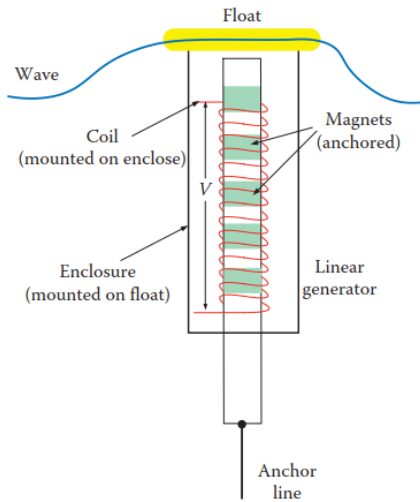


Figure 6.76 Buoyant moored system.

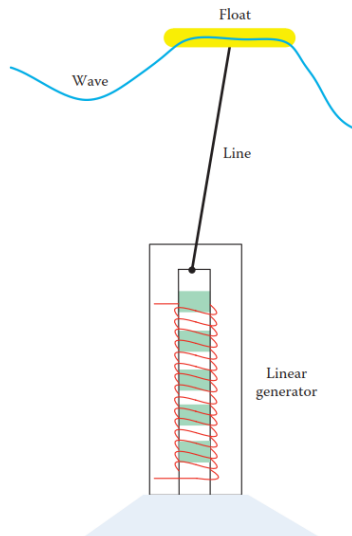


Figure 6.78 Buoyant moored system anchored on ocean floor.



Figure 6.77 Buoyant actuator during the installation. (Courtesy of Carnegie Wave Energy through Wikipedia.)

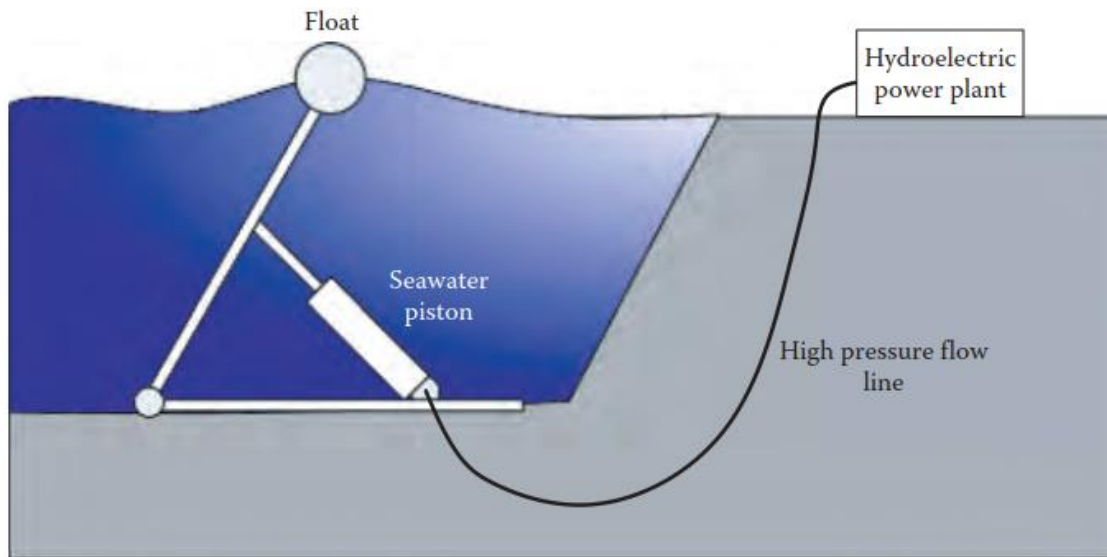


Figure 6.79 Oyster system.

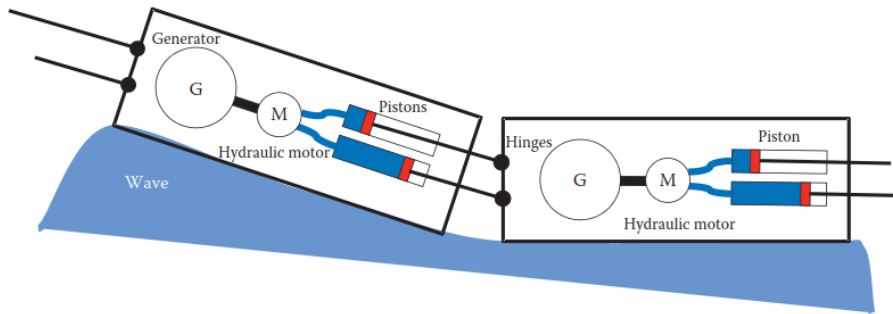


Figure 6.80 Main components of hinged contour system.



Figure 6.82 The front pontoon. (Courtesy of Pelamis Wave Energy through Wikipedia.)



Figure 6.81 HC system. (Courtesy of Pelamis Wave Energy through Wikipedia.)

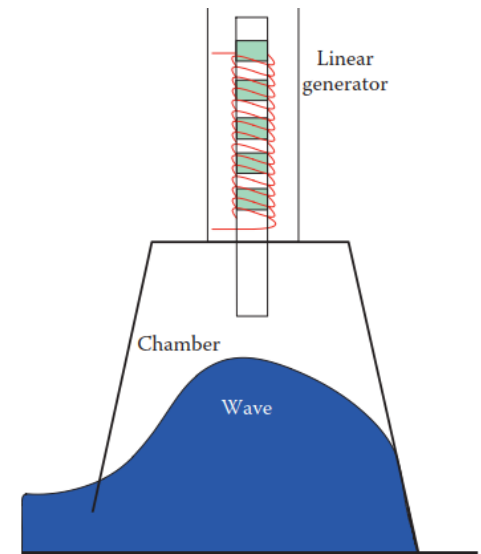


Figure 6.83 Oscillating column system.

6.4 Geoenergia

- Lämpöpumput
- Sähkön tuotanto maalämmöllä
- Maalämpövoimalat

Maankuoren lämpötilajakauma

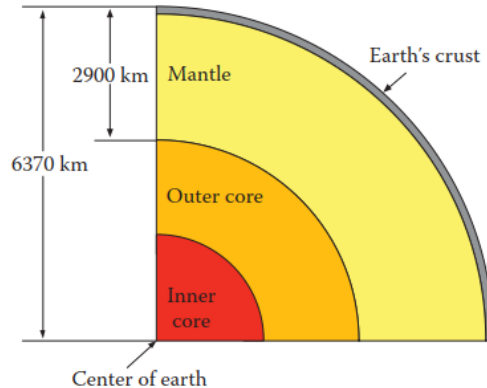


Figure 6.84 Cross section of Earth.

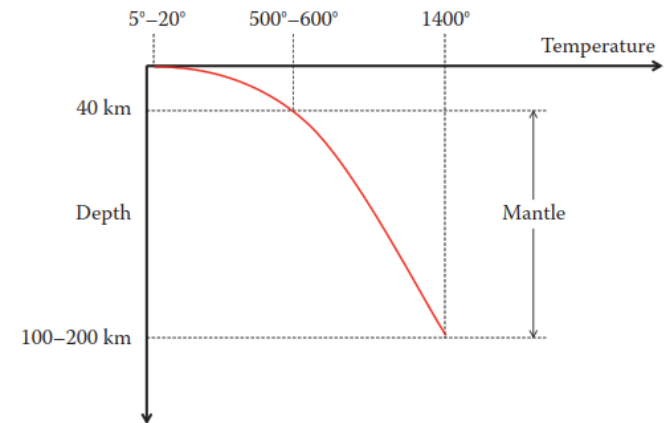


Figure 6.85 Geothermal gradient of Earth.

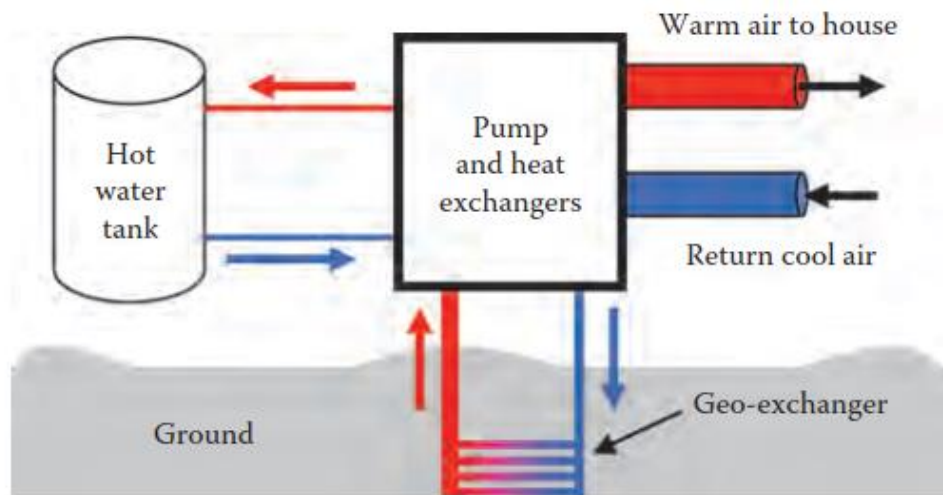


Figure 6.87 Heat pump system.



Figure 6.88 Steam generated from rain even in cold environment.

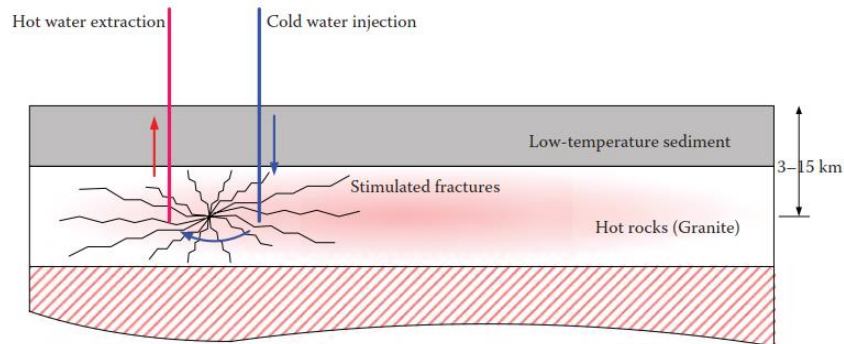


Figure 6.90 Hot dry rock site.

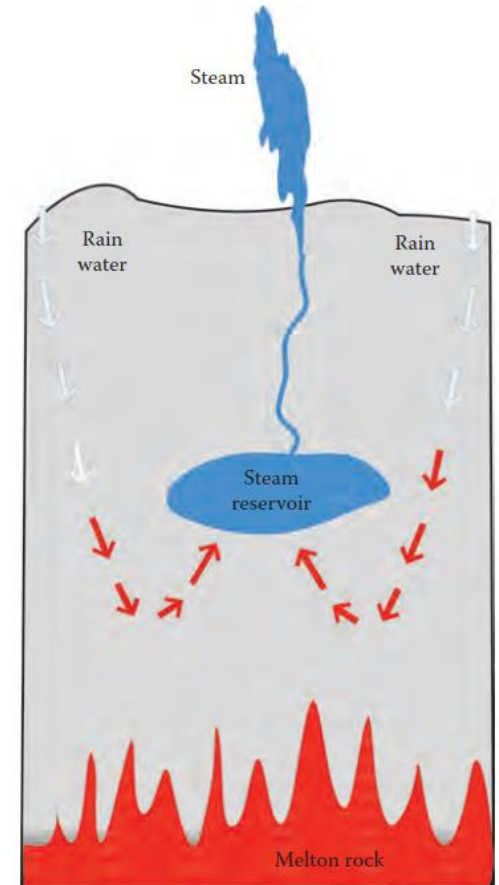


Figure 6.89 Geothermal reservoir.

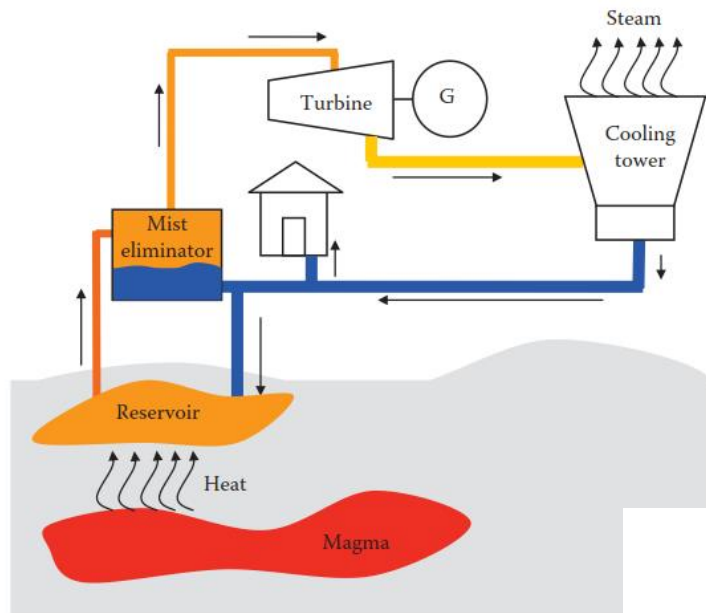


Figure 6.91 Reservoir type geothermal power plant.



Figure 6.93 The Geysers in northern California—the first geothermal power plant in the United States.

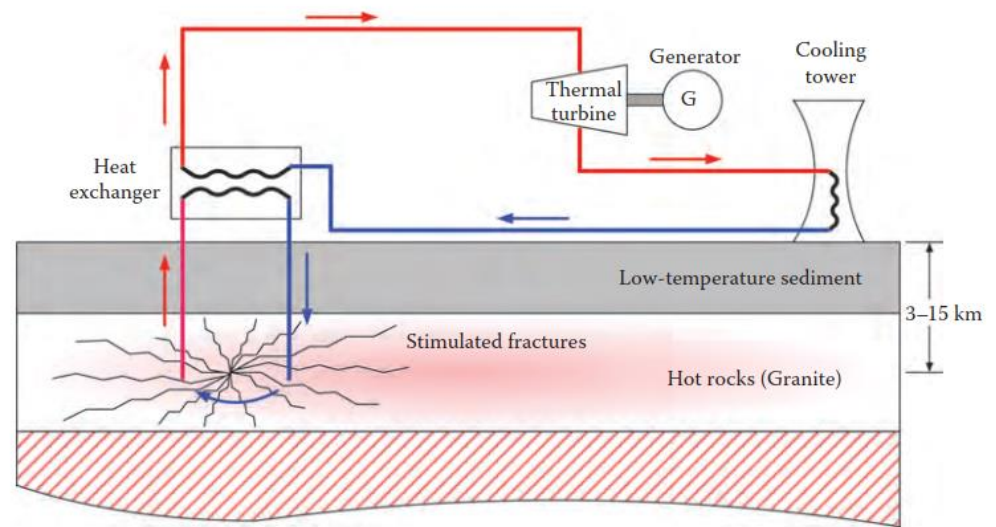
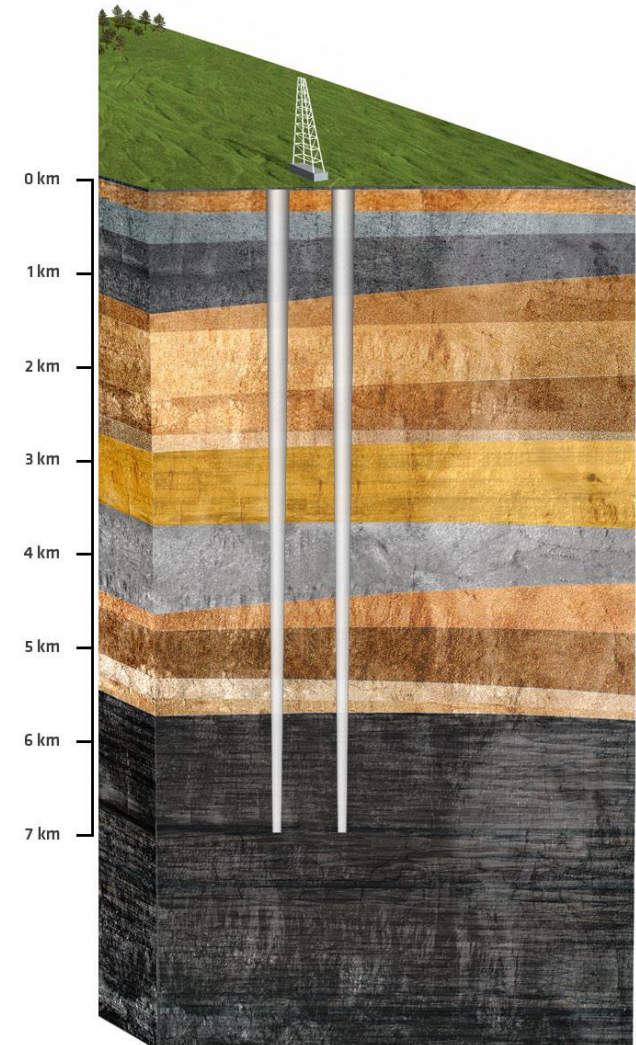


Figure 6.92 Hot dry rock geothermal power plant.

Deep Heat, ST1, Otaniemi

<http://www.st1.fi/deepheat>

40 MW lämmöntuotantoa, tavoite 10 %
Espoon kaukolämmöstä, tähän tarvitaan
kaksi 2 MW:n pumppua



Biomass

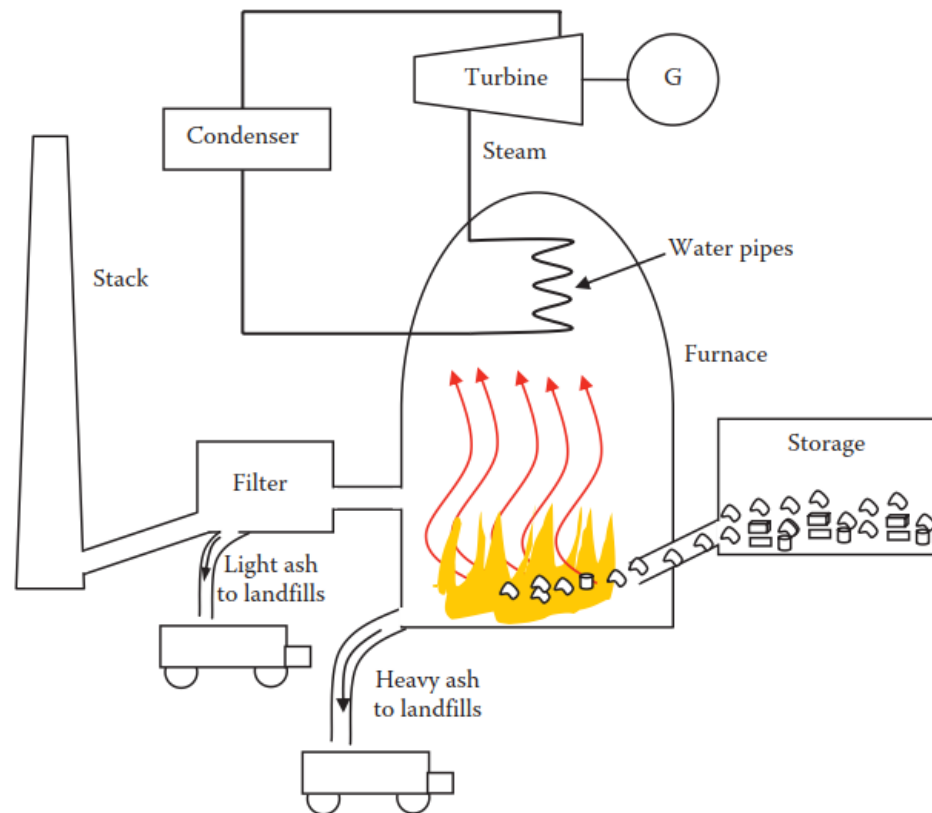


Figure 6.95 Biomass incineration power plant.

6.6 Polttokennot

- Ensimmäiset polttokennot on kehitetty jo 1839
- Francis Bacon 1939 ja sen jälkeen käytetty NASAn avaruuslennoilla
- Useimmat polttokennot käyttävät vetyä ja happea sähköön tuottamiseen
 - Sivutuotteena syntyy vettä
- Osa polttokennoista voi käyttää polttoaineen suoraan metanolia eikä silloin tarvita erillistä reformointi-prosessia vedyn tuottamiseen

Polttokennotyytit

TABLE 6.2

Main Types of FCs and Their Operating Characteristics

Fuel Cell	Electrolyte	Anode Gas	Cathode Gas	Approximate Temperature (°C)	Typical Efficiency (%)
Proton exchange membrane (PEM)	Solid polymer membrane	Hydrogen	Pure or atmospheric oxygen	80	35–60
Alkaline (AFC)	Potassium hydroxide	Hydrogen	Pure oxygen	65–220	50–70
Phosphoric acid (PAFC)	Phosphorous	Hydrogen	Atmospheric oxygen	150–210	35–50
Solid oxide (SOFC)	Ceramic oxide	Hydrogen, methane	Atmospheric oxygen	600–1000	45–60
Molten carbonate (MCFC)	Alkali-carbonates	Hydrogen, methane	Atmospheric oxygen	600–650	40–55
Direct methanol (DMFC)	Solid polymer membrane	Methanol solution in water	Atmospheric oxygen	50–120	35–40

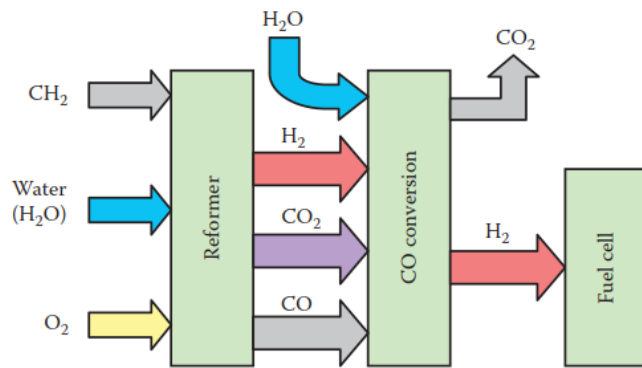


Figure 6.96 Generation of hydrogen.

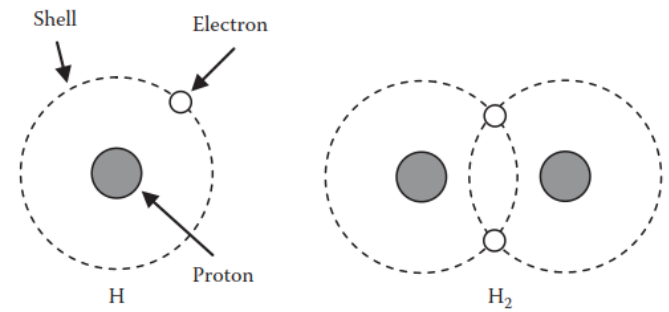


Figure 6.97 Hydrogen atom and hydrogen gas.

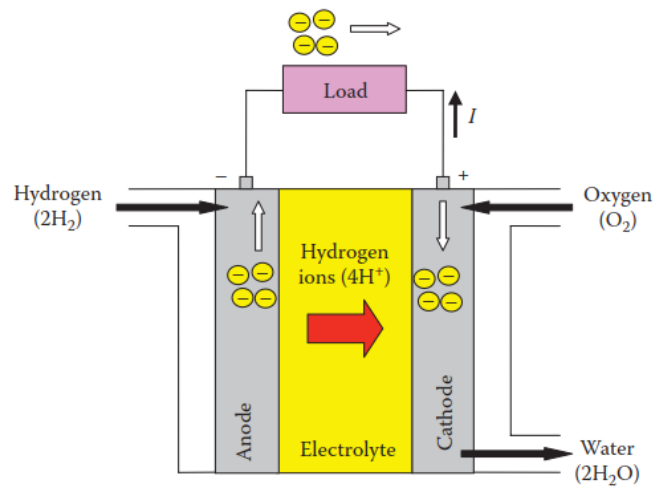


Figure 6.98 PEM FC.



Figure 6.99 PEM fuel cell.

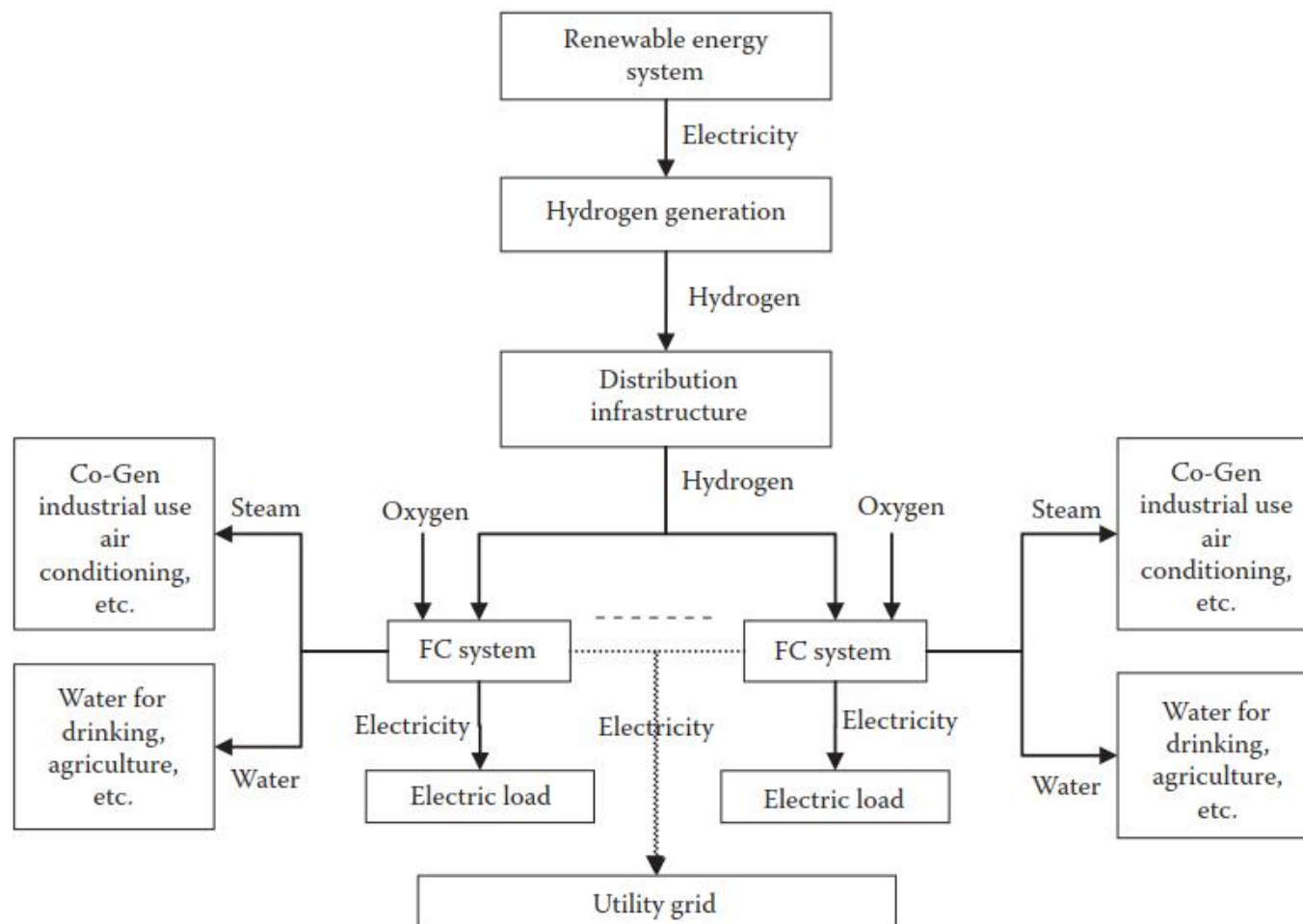


Figure 6.105 Hydrogen-based energy system.

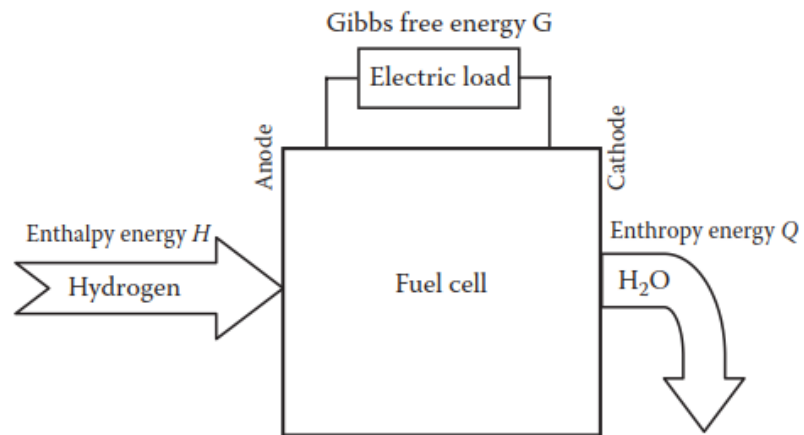


Figure 6.106 Gibbs free energy.

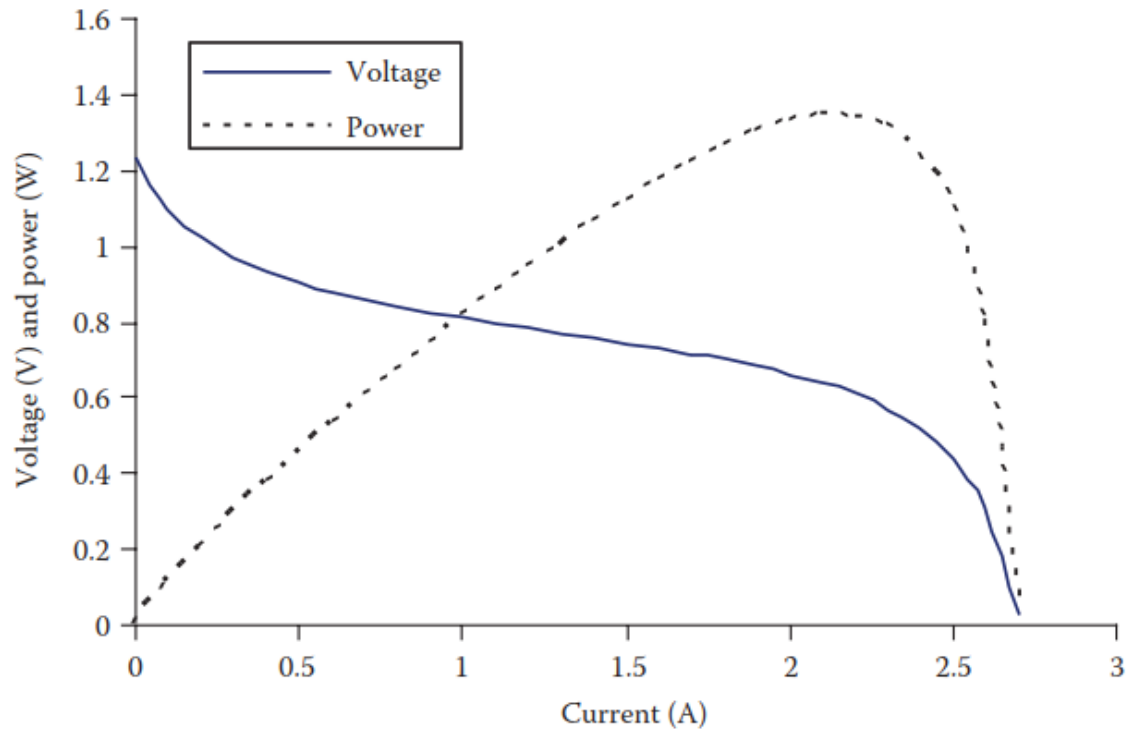


Figure 6.108 Polarization and power curves of FC in Example 6.35.

6.8 Energiavarastot

- Uusiutuvan energian tuotanto on hyvin vaihtelevaa ja usein myös vaikea ennustaa etukäteen
- Tuotannon vaihdellessa tarvitaan
 - Reservituotantoa
 - Varastoja, joihin aiemmin yli tuotannon varastoitu energia varastoidaan
 - Kulutuksen säännöstelyä
- Alessandro Volta kehitti akuston jo 1800, mutta energian laajamittainen ja taloudellinen varastointi on edelleen yksi tärkeimmistä avoimista kysymyksistä

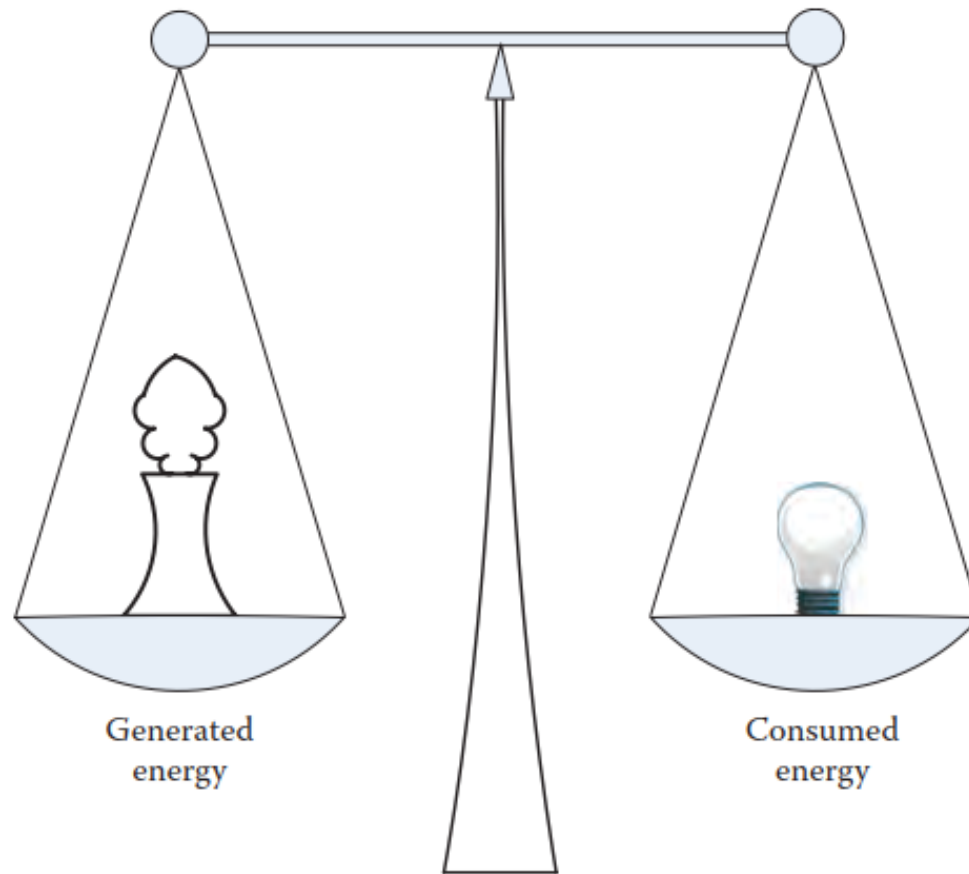


Figure 6.109 Balance of electric energy.



Figure 6.110 PHS system. (Courtesy of the United States Army Corps of Engineers.)

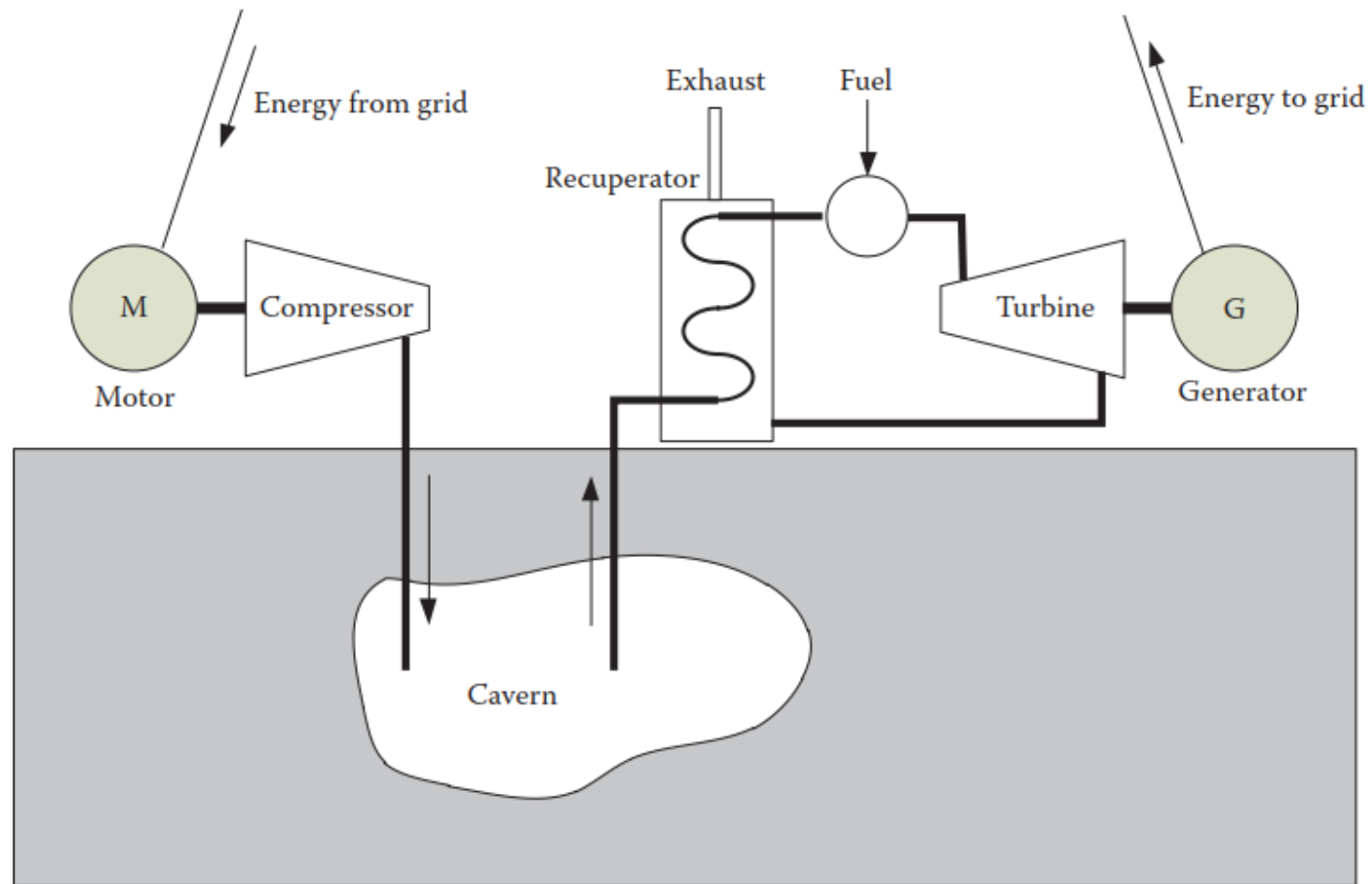


Figure 6.111 Main components of compressed air energy storage system.

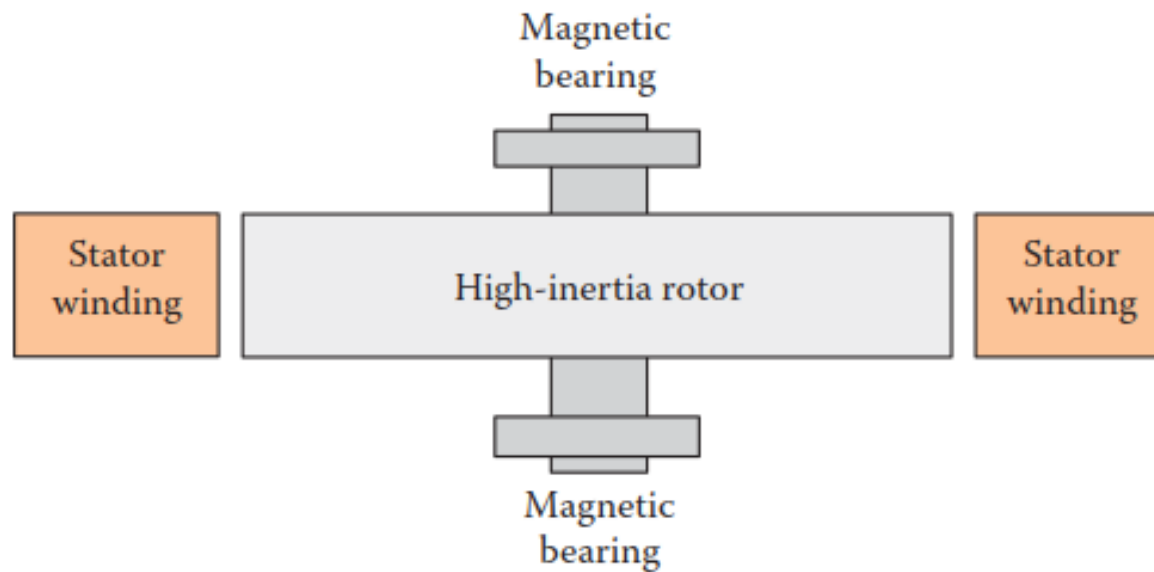


Figure 6.112 Main components of flywheel.