

# Fö 11 - TSFS11 Energitekniska System Kraftkällor

Christofer Sundström

15 maj 2018

## 1 Vattenkraft

## 2 Solkraft

- Potential
- Solceller
- Solvärme

## 3 Vindkraft

## 4 Fossila kraftkällor och värmeverk

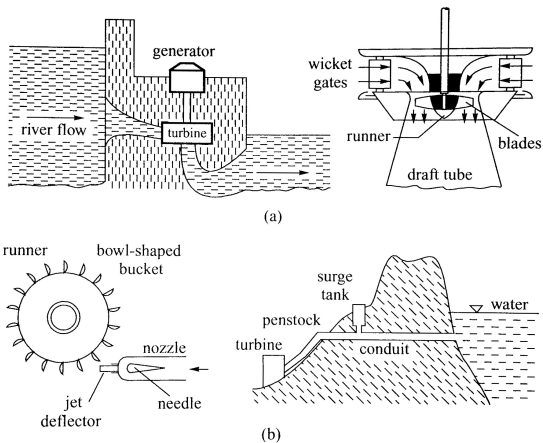
- Kol, olja, naturgas och sop-förbränning
- Kraftvärmeverk
- Kärnkraft
- Gasturbin

Vattenkraftverk är den äldsta typen av kraftverk för elgenerering.

Storleken på ett vattenkraftverk karakteriseras främst av dess fallhöjd eller *head*. Vi har kraftverk med high-head, medium-head och low-head, där low-head typisk är kraftverk som körs direkt i flodådran.

Olika typer av kraftverk kräver olika typer av turbiner. För mindre kraftverk används ofta vanlig turbiner (*reaction-turbines*) som skapar vridmoment genom att reagera på mediets tryck och vikt.

För större kraftverk används ofta s.k. peltonturbiner, eller impulsturbiner, som använder kraftfulla jet-strålar som bromsas av turbinen som då omvandlar rörelsemängden till vridmoment. Tryckskillnaden över turbinen antas obefintlig.



**Figure 2.10** Hydro turbines: (a) low- and medium-head reaction turbine; (b) high-head Pelton wheel.



## 1 Vattenkraft

## 2 Solkraft

- Potential
- Solceller
- Solvärme

## 3 Vindkraft

## 4 Fossila kraftkällor och värmeverk

- Kol, olja, naturgas och sop-förbränning
- Kraftvärmeverk
- Kärnkraft
- Gasturbin

# Solkraft - Potential

Solen som direkt energikälla har stor potential. Mängden energi som strålar från rymden är ca  $1367 \text{ W/m}^2$  (Solkonstanten).

Egentligen varierar instrålningen över året, men endast marginellt. Vi har att solinstrålningen  $I_0$  kan skrivas

$$I_0 = 1367 \cdot (1 + 0.034 \cos(2\pi \cdot N/365)) \text{ W/m}^2$$

där  $N$  är dagen på året.

Av detta reflekteras ca 30% ut igen. Mängden som kommer ner till ytan är dock i genomsnitt betydligt lägre än så och varierar beroende på årstid, väder, geografisk position mm.

I medeltal så ligger solinstrålningen till jordytan på ca  $170 \text{ W/m}^2$ , vilket svarar mot  $4 \text{ kWh/m}^2/\text{dag}$ .

**TABELL 9-1** Genomsnittlig daglig solinstrålning över året i  $W/m^2$  för valda städer

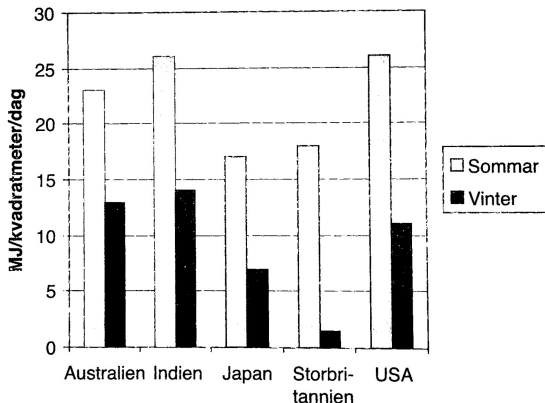
Stad	Solinstrålning	Stad	Solinstrålning
Seattle	125	Neapel	200
El Paso	240	Kairo	280
Rio de Janeiro	200	Johannesburg	230
Glasgow	100	Bombay	240
Tokyo	125	Sydney	210

Källa: Data från Trewartha & Horn, 1980.

I praktiken handlar det alltså om genomsnittliga effekter mellan 100 och 300  $W/m^2$ .

Notera dock att varaktigheten i antal timmar varierar stort beroende på plats och årstid. Maxeffekten ligger alltså betydligt högre och kan vara så hög som 900  $W/m^2$ .

# Sokraft - Potential, genomsnitt på årsbasis

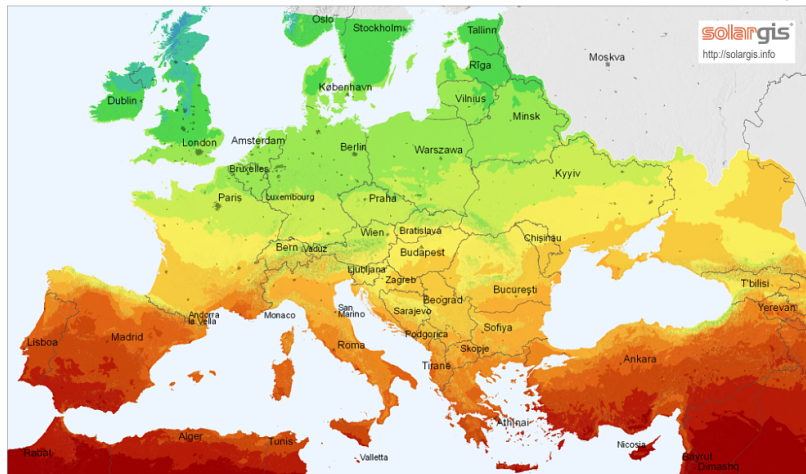


**FIGUR 9-1** Genomsnittligt årstidsbaserat inflöde av solenergi per kvadratmeter i valda länder. (Källa: Norton [1992].)

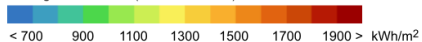
Notera att 1 MJ/dag motsvarar en medeleffekt på ca 11.6 W, så 210 W/m<sup>2</sup> i Sydney (från föregående slide) motsvarar ca 18 MJ/m<sup>2</sup>/dag.

## Global horizontal irradiation

## Europe



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)

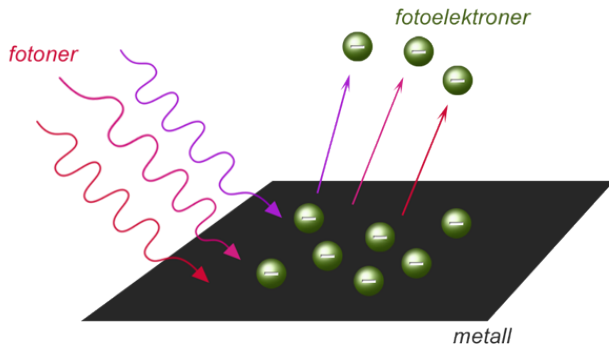


0 250 500 km

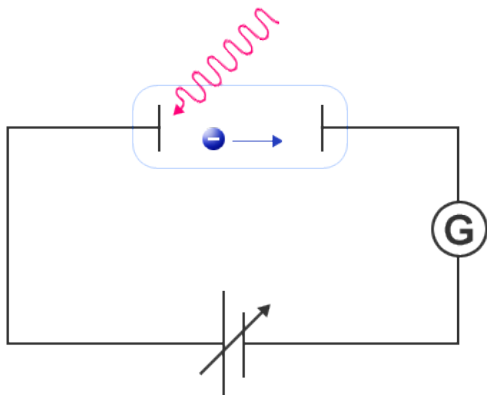
© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

# Solceller - Fotoelektrisk effekt

Solceller bygger på den fotoelektriska effekten, dvs det fenomen som gör att elektroner emitteras från en yta när det belyses av strålning med tillräckligt högt energiinnehåll.



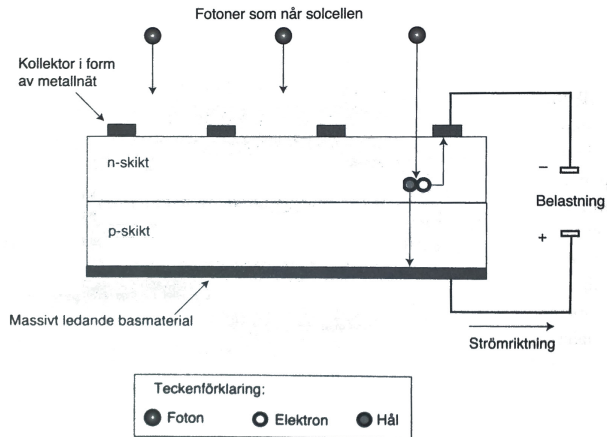
# Solceller - Fotoelektrisk effekt



Einsteins försöksupställning för att mäta fotoelektrisk effekt påminner i grova drag om dagens solceller.

I försöksupställningen används en spänningskälla för att mäta energin i de utslagna elektronerna. I en solcell försöker man istället fånga upp elektronerna och leda iväg dem till externa anslutningspunkter.

# Solceller - Konstruktionsprincip



FIGUR 10-2 Tvärsnitt av en solcell.

I en kiselbaserad solcell används två lager kisel som dopats för att bli mer benägen att producera fria elektroner eller *hål* i molekylstrukturen.



N-skiktet i cellen dopas med fosor som har 5 valenselektroner medan P-skiktet dopas med bor som har 3 valenselektroner för att kunna fånga upp frigjorda elektroner.

I figuren har det övre skiktet överskott på elektroner (N-dopat) medan det undre skiktet har underskott (P-dopat). Elektroner som frigörs inne i materialet stimuleras alltså att röra uppåt från P-N övergången medan hålet rör sig nedåt.

När en foton med tillräcklig energi träffar en molekyl i N-skiktet frigörs alltså en elektron som sedan vandrar upp mot kollektorn som utgörs av ett metallnät.

Energien som krävs för att slå ut en elektron måste vara större än bandgapsenergin  $E_G$  för P-N övergången.

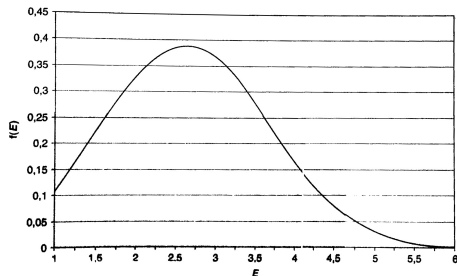
# Solceller - Ljusströmmen

Ljusinducerande strömmen från en cell (mA / cm<sup>2</sup>) blir

$$I_L = e \int_{E_G}^{\infty} \eta_{col}(E) S(E) \alpha(E, W) dE \text{ med}$$

$$\alpha(E, W) = 1 - \rho(E) - \tau(E, W)$$

där  $S(E)$  är antalet fotoner per ytenhet och tidsenhet fördelat efter energi enligt figuren nedan.



FIGUR 10-3 Fördelning av fotonfrekvens som funktion av fotonernas energi 10<sup>-19</sup>J.

De förluster som uppstår i solcellen beror både på sannolikheten att en foton ska träffa något på vägen och möjligheten att fånga upp den innan den återgår till sitt ursprungliga läge.

**Kvantförluster:** Fotoner med för litet energiinnehåll producerar ingen fotoelektrisk effekt. Energigränsen för att *slå ut* en foton betecknas  $E_G$  och fotoner med energi  $E < E_G$  ger alltså ingen fotoelektrisk effekt.

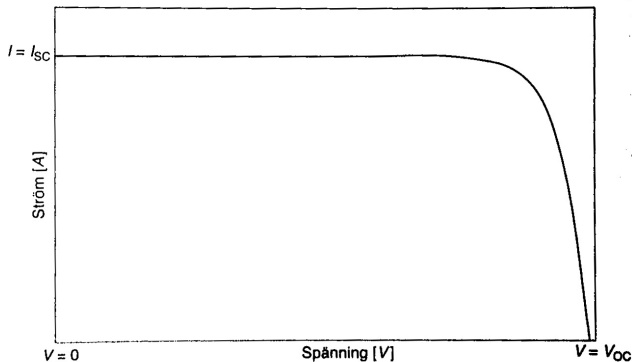
**Reflektionsförluster:** Fotoner som reflekteras ut när de träffar cellens yta. Denna tecknas vanligen  $\rho(E)$ .

**Transmissionsförluster:** Fotoner som går tvärs igenom solcellen utan att träffa på någon elektron, betecknas vanligen  $\tau(E, W)$  där  $W$  är tjockleken på cellen.

**Kollektorförluster:** Elektroner som återabsorberas innan de lämnar cellen. Kollektoreffektiviteten tecknas vanligen  $\eta_{col}(E)$ .

# Solcell - V/I-kurva

För höga spänningar läcker ström tillbaka genom cellen precis som för en vanlig diod. Utseendet blir typiskt enligt figuren



**FIGUR 10-4** Ström som funktion av spänning i en ideal solcell för värden mellan  $V = 0$  och  $V = V_{oc}$ .

# Solcell - Maximal uteffekt

Maximal uteffekt från solcellen kan beräknas genom att maximera ekvationen

$$P = V \cdot I = V \cdot \left( I_L - I_0 \left( e^{\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right)$$

Parametrarna i ekvationen för  $I_L$  i effektuttrycket går att bestämma genom att mäta  $V_{OC}$  och  $I_{SC}$  men eftersom  $I_L$  beror på solinstrålning, temperatur och andra parametrar så ändras förhållandena kontinuerligt.

I praktiken gör man det dock mycket enklare för sig och använder sig av *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Tekniken går ut på att man helt enkelt mäter ström och spänning kontinuerligt och styr strömmen så att maximal uteffekt uppnås.

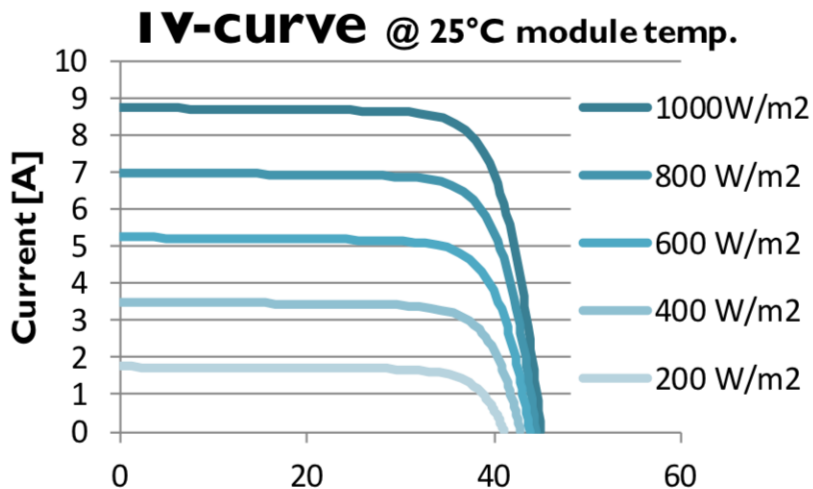
Samma teknik kan även användas av små vindkraftverk kopplade till ett batteripaket.

Vid konstruktion av solcellerna försöker optimera konstruktionen för maximal effektivitet. Vissa avvägningar står dock i direkt konflikt med varandra. T.ex. kan man genom att lägga till mer kollektormaterial få en bättre verkningsgrad i mängden uppsamlade elektroner men minskar då samtidigt den mängd ljus som kan tränga in i cellen.

**Koncentrering:** Produktionen går att öka genom att spegla in ljus och på så sätt öka mängden ljus som faller in mot solcell. För dagens celler kan koncentrering upp till 15-20 ggr öka produktionen innan resistansförluster börjar dominera.

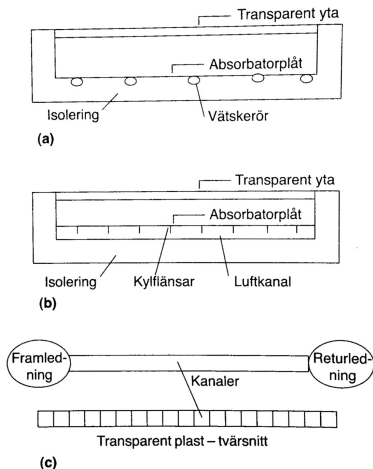
# Solceller - exempel







# Solvärme - Plattsolångare



**FIGUR 11-1** Tvärsnitt av tre typer av plattsolångare: (a) väskebaserad, (b) luftbaserad, (c) vattenbaserad utan glas (för badanläggningar)

## Plattsolångare

En plattsolångare består i princip av en plåt som absorberar solljusets värme samt värmeledningsrör som leder bort värmen till en värmeväxlare.

Den absorberande plåten är nästan uteslutande svart samt belagd med någon typ av beläggning som minskar reflektion.

Det värmebärande mediet kan vara vatten, luft, eller något annat köldmedium.

# Solvärme - Plattsolångare

Huvudanvändningsområdet för plattsolångare är i uppvärmningssystem.

Plåten är oftast isolerad med en glasskiva för att minska värmeläcket till omgivningen. Vid tillämpningar där vatten värms direkt, som t.ex. en solvärmd dusch för användning på sommarhalvåret kan dock isolerande skikt saknas.

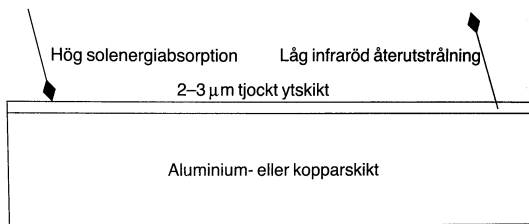
Fördelar med vatten är värmekapaciteten och densiteten som ger stor mängd energi per volym och små dimensioner på solångarens tuber och framledningsrör.

Vatten riskerar dock att frysa men med lagom glykolblandning så elimineras det problemet.

Luftburen solvärme kan vara lämplig för lokal uppvärmning och torkning av t.ex. spannmål i jordbruk. Värmeöverföringen mellan en yta och en gas sker genom konvektion. Därför kan det vara nödvändigt med flänsar och fläktar för att maximera värmeöverföringen i ett luftburet system.

# Solvärme - Plattsolångare, Selektiva ytor

Absorptionsplattorna är oftast gjorda i aluminium eller koppar, p.g.a. behovet av god värmeledningsförmåga.



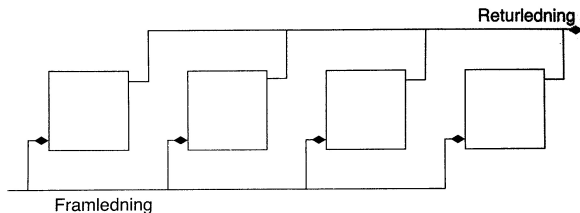
**FIGUR 11-2** Tvärsnitt genom absorberplåten med selektiv yta.

Solabsorptansen ligger på i storleksordningen 95%, vilket dock betyder att även emittansen är hög. (Absorptans och emittans är lika för en given frekvens.)

Speciella ytbehandlingar används därför för att göra få en frekvensberoende absorptans vilket då minskar värmeförlusten. En sådan yta kallas *Selektiv*.

# Solvärme - Plattsolfångare, anslutning

Solfångare arbetar av naturliga orsaker bäst parallellkopplade.  
(Annars skulle ju den sista solfångaren ha högre inloppstemperatur än de övriga.)

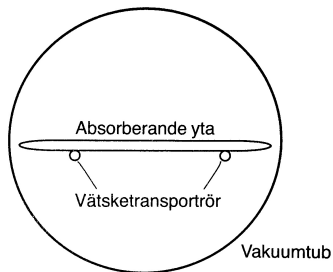


**FIGUR 11-3** *Omvänd returanslutning av solfångargrupp.*

För att få samma motstånd längs alla tänkbara vägar genom anläggningen ansluts de ofta med s.k. omvänd returanslutning.

Vatten beter sig i princip som elektrisk ström men påverkas även av gravitationen vilket kan ge udda flödesfenomen.

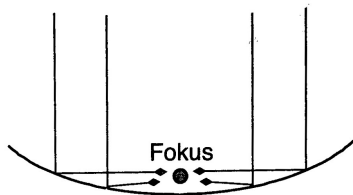
För att bättre utnyttja solens värme även vid kallt väder kan vakuumrör användas. Principen är samma som för vanliga plattsolfångare men ger högre verkningsgrad p.g.a. bättre isolering



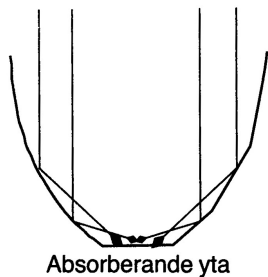
**FIGUR 11-4** Tvärsnittsbild av glas/metall-solfångare med vakuumtuber.

Solfångare med vakuumrör kan användas vid högre systemtemperaturer som från 50 °C och upp till nära kokpunkten och är därför även lämpliga för varmvatten.

# Solvärme - Koncentrerande solfångare



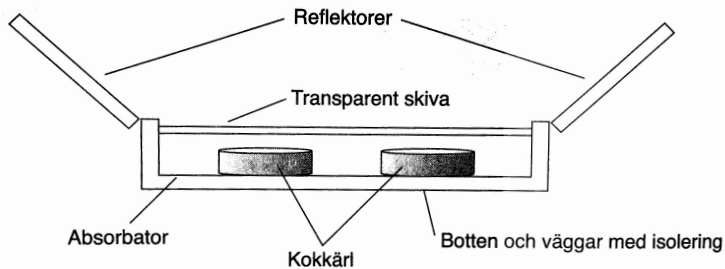
Plattsolfångares effektivitet och därmed arbetstemperatur är något begränsad. Arbetstemperaturen är i allmänhet under kokpunkten för vatten.



En lösning för att öka effektiviteten är att öka mängden instrålat ljus med hjälp av reflektorer.

Några tillämpningar på detta är Solspisen och soltorn för kommersiell produktion av elektricitet.

# Solvärme - Direkt tillämpning: Solspis



**FIGUR 11-8** Schematisk bild av solspis med sidoreflektorer.

## Solvärme - Gigaskala, Soltorn



Exempel på Soltorn som koncentrerar solens instrålade effekt. På så sätt kan tillräcklig värme uppnås för att driva en turbin eller värmemotor typ stirlingmotor.



## 1 Vattenkraft

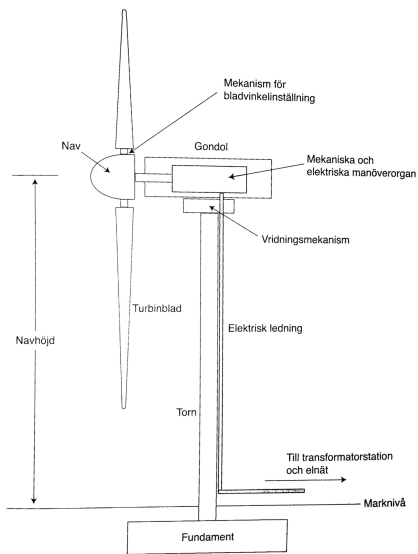
## 2 Solkraft

- Potential
- Solceller
- Solvärme

## 3 Vindkraft

## 4 Fossila kraftkällor och värmeverk

- Kol, olja, naturgas och sop-förbränning
- Kraftvärmeverk
- Kärnkraft
- Gasturbin



**FIGUR 12-5** Huvuddelarna av ett större vindkraftverk. Mekanik och elsystem sitter i gondolen. Här finns bland annat rotorbroms, mekanisk växel, generator och styrsystem. Vridningsmekanismen vrider gondolen kring tornets vertikala axel så att turbinen alltid är vänd mot vinden.

Ett typiskt vindkraftverk består av en rotor med nav och blad samt en gondol med generator och manöverorgan.

Bilden illustrerar ett Vindkraftsverk med horisontell axel, ett s.k. HAWT-verk.

Även kraftverk med vertikal axel, s.k. VAWT-verk är intressanta, speciellt i småskalig produktion.

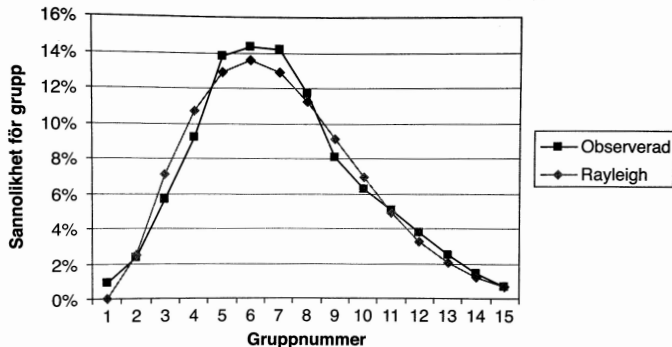
Större kraftverk har i princip alltid ställbar vinkel på bladen för att maximera utbytet.

# Vindkraft - Effektinnehåll i vinden

Effektinnehållet i vinden är proportionellt mod vindhastigheten i kubik enligt

$$P = 0.5 \cdot \rho AU^3$$

där  $U$  är vindhastighet,  $A$  arean, och  $\rho$  luftens densitet. Fördelningen av vindhastighet på en plats sprider sig typiskt som en Rayleigh-fördeling.



**FIGUR 12-9** Jämförelse av observerade och Rayleigh-uppskattade sannolikheter för olika vindhastigheter i en given grupp, för vindhastigheter upp till 14 m/s.

# Vindkraft - Effektinnehåll

Vid dimensionering bör hänsyn tas till hur maximal utvunnen energi uppnås. Det är t.ex. viktigare att ha god driftsekonomi vid del-last än att klara maximal vindhastighet även om energiinnehållet är större där.

Även andra aspekter på driftsekonomi finns. Kostnadmässigt brukar det löna sig med så stora konstruktioner som praktiskt möjligt givet en viss tillvekningsprocess.

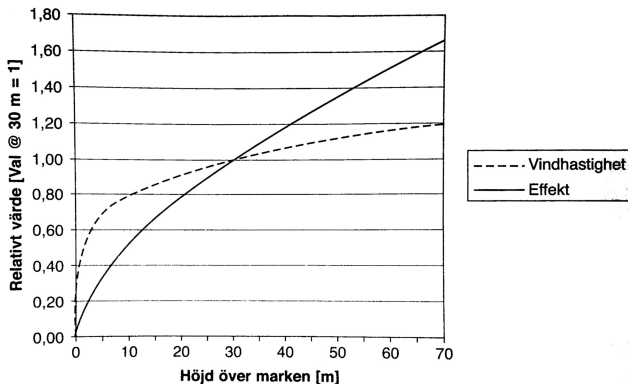
Stora verk ger mycket yta och hög effekt men även hög rotorspetshastighet. Hög hastighet skapar dock missljud, problem med sandblästring, vibrationer samt problem vid uppstart.

## **Notera**

Eftersom energin är gratis är det inte nödvändigtvis så att vi måste sträva efter absolut högsta verkningsgrad. Istället är det kr/kWh som är viktigt, dock påverkar möjligheten att sätta upp många vindkraftverk.

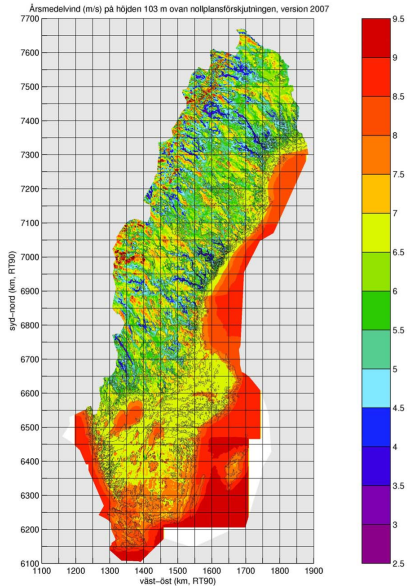
# Vindkraft - Vindhastighet s.f.a höjd

P.g.a. s.k. vindskjuvning minskar vindhastigheten nära jordytan, typiskt enligt formeln  $U(z) = U(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha$ , där  $\alpha \approx 0.2$



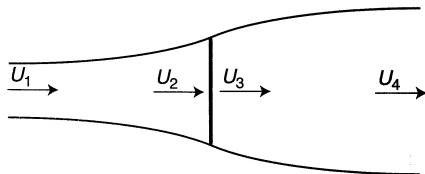
**FIGUR 12-10** Relativvärde på vindhastighet och effekt som funktion av höjden över mark, indexerat till värdet vid 30 m = 1,00. Vid 30 m höjd, i detta exempel, är vindhastigheten 8,86 m/s, och tillgänglig effekt är 396 W/m<sup>2</sup>.

# Vindkraft - Vindhastigheter i Sverige



# Vindkraft - Maximal verkningsgrad , Betz-gränsen

Med hjälp av några ideala antaganden kan den maximala effekt-verkningsgraden, eller Betz-gränsen, räknas ut.



**FIGUR 12-12** Diagram över luftflöde genom skivan.

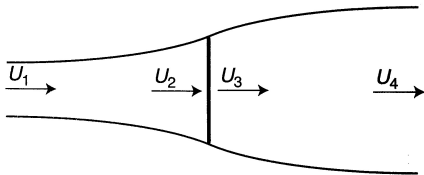
Antag en ideal skiv-rotor-konstruktion med area  $A_2$  och ingångshastighet  $U_1$ , vindhastighet  $U_2 = U_3$  över bladet och utgångshastighet  $U_4$ . Effektkoefficienten över skivan är då

$$C_p = \frac{\text{uteffekt}}{\text{ineffekt}} = 4a(1 - a)^2$$

där  $a = 1 - U_2/U_1$  ( $U_4$  bestäms av Bernoullis lag). Detta ger för  $a = 1/3$  ( $U_2 = 2U_1/3$ ) en **maximal verkningsgrad på 59.3%**

# Vindkraft - Maximal verkningsgrad , Betz-gränsen

Med hjälp av några ideala antaganden kan den maximala effekt-verkningsgraden, eller Betz-gränsen, räknas ut.



**FIGUR 12-12** Diagram över luftflöde genom skivan.

Antag en ideal skiv-rotor-konstruktion med area  $A_2$  och ingångshastighet  $U_1$ , vindhastighet  $U_2 = U_3$  över bladet och utgångshastighet  $U_4$ . Effektkoefficienten över skivan är då

$$C_p = \frac{\text{uteffekt}}{\text{ineffekt}} = 4a(1-a)^2$$

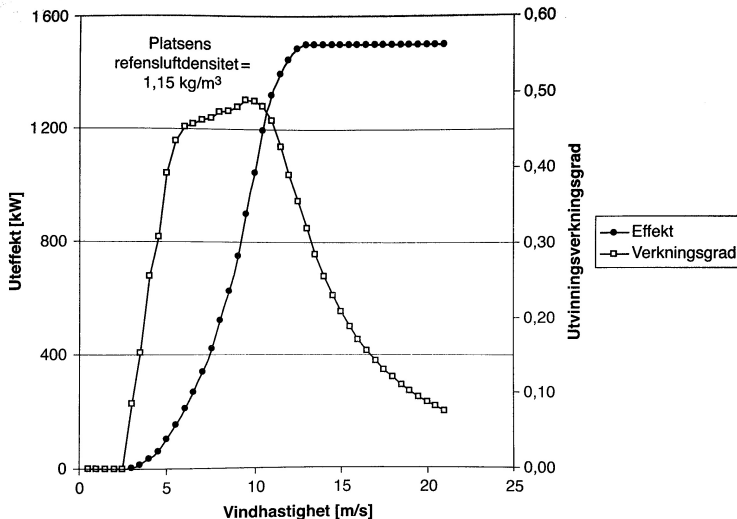
där  $a = 1 - U_2/U_1$  ( $U_4$  beror på  $U_1$  och  $U_2$ )  
 $a = 1/3$  ( $U_2 = 2U_1/3$ ) en

## Betz-gränsen

Den teoretiskt maximala verkningsgraden för en vindturbin ligger på ca 59.3%.

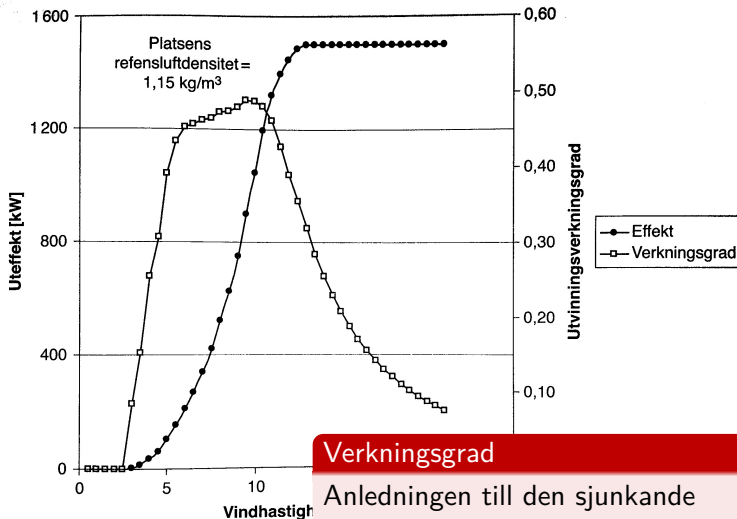


# Vindkraft - Exempel på faktisk verkningsgrad



**FIGUR 12-11** Effektkurva för 1,5 MW-turbin för vindhastigheter från 0 till 21 m/s, med utviningsverkningsgrad (uteffekt dividerad med effekt tillgänglig i vinden).

# Vindkraft - Exempel på faktisk verkningsgrad



**FIGUR 12-11** Effektkurva för 1,5 MW vindkraftverk med utvinningverkningsgrad (uteffekt dividerad med effekt tillgänglig i vinden).

# Vindkraft - Verkningsgrad för en turbin

Under starthastigheten är hastigheten för låg för att driva runt kraftverket alls.

Över starthastigheten ökar uteffekten snabbt till sitt maximala värde för att sedan plana ut.

Vid större vindhastigheter blir krafterna på vindkraftverket stora och man tvingas minska bladvinkeln för att krafterna inte skall bli för stora.

Eftersom priset per genererad kWh skall hållas nere så väljer man att inte dimensionera verket för att kunna utvinna all energi.

I turbiner med fast bladvinkel uppstår stall och turbulens bromsar bladens hastighet. Stora turbiner har praktiskt taget alltid variabel bladvinkel så att effektuttaget kan varieras.

Vid extrema vindhastigheter stängs kraftverket ned för att inte skadas.

## 1 Vattenkraft

## 2 Solkraft

- Potential
- Solceller
- Solvärme

## 3 Vindkraft

## 4 Fossila kraftkällor och värmeverk

- Kol, olja, naturgas och sop-förbränning
- Kraftvärmeverk
- Kärnkraft
- Gasturbin

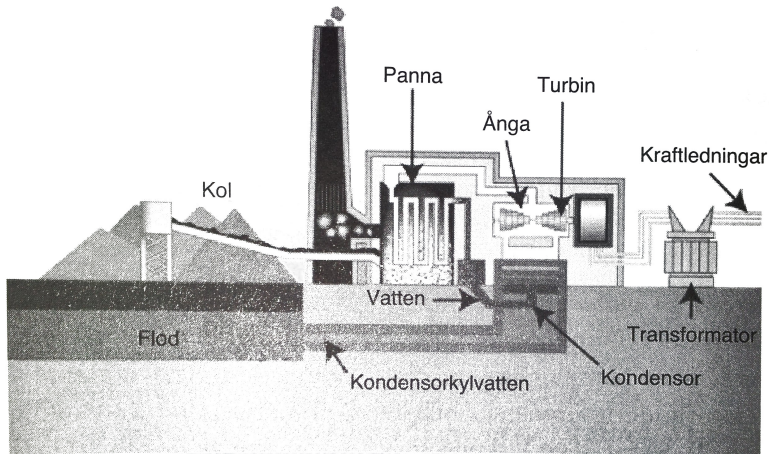
# Fossila kraftkällor och eldning

Gemensamt för fossila kraftkällor i elkraftssammanhang är att de används för att värma vatten eller andra medium som i sin tur får driva en turbin.

Även eldning av förnybara resurser så som spannmål, rötgas, sopor eller skogsråvara används på samma sätt. Det är därför av intresse att studera olika typer av värmecykler för gas och ång-turbiner.

Även kärnkraftverk använder likartade principer för energiutvinningen.

# Kol, olja, naturgas och sop-förbränning



**FIGUR 6-1** Schematisk vy av komponenter i ett koleldat kraftverk med omvandling av kol till elenergi via panna, turbin och generator. Observera den stora naturliga eller artificiella källan till kylvatten. (Källa: Tennessee Valley Authority, U.S. Federal Government.)

Ett stort problem med den fossila bränsleanvändningen är  $\text{CO}_2$  utsläpp. För att möta detta har olika tekniker för kol-inlagring utarbetats. Kolinlagring kan ske enligt några olika huvudmetoder

**Indirekt inlagring:** Naturligt upptag av  $\text{CO}_2$  genom t.ex. skogsplantering mm.

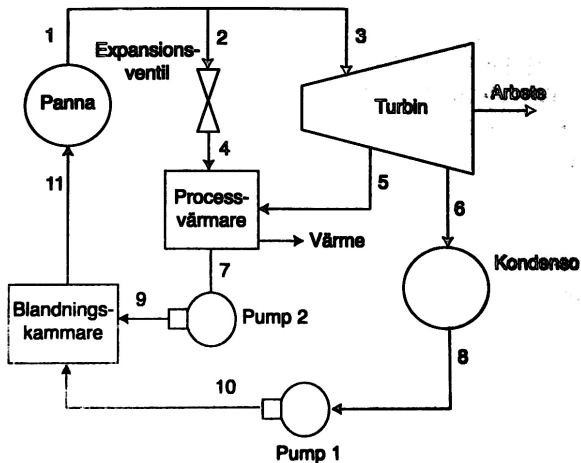
**Geologisk lagring:** Inlagring genom att pumpa ned  $\text{CO}_2$  i befintlig form. Den uppenbara nackdelen är risken för läckage.

**Omvandling till inerta material:** Genom att kemiskt omvandla  $\text{CO}_2$  till mer stabila föreningar så undviks risken för läckage.

Processen för omvandling till inerta material är det dyraste alternativet. Kostnaden skulle dock kunna minska om slutprodukten gick att använda till något med relativt lång livslängd. (Byggmaterial mm)

# Turbiner - Kraftvärmeverk

I ett kraftvärmeverk används istället restvärmen för att värma en extern process. (T.ex. hus eller fjärrkyla)



**FIGUR 6-9** Schematisk vy av komponenterna i ett kraftvärmesystem.



# Kärnkraft - Grundprincip

Principen för energiutvinning i ett kärnkraftverk bygger på att massan hos en atomkärna är massan hos de ingående partiklarna minus massekvivalenten för bindningsenergin.

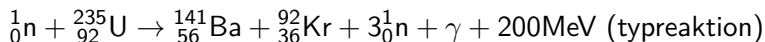
$$E = mc^2$$

Med hjälp av massan av de i reaktionen ingående ämnena kan alltså den frigjorda energin beräknas.

Det vanligaste bränslet i ett kärnkraftverk är idag anriktat uran. Naturligt Uran består av 99%  $U_{238}$  och ca 0.7%  $U_{235}$ . Vid anrikningen ökas andelen  $U_{235}$  genom att  $U_{238}$  avlägsnas i en s.k. gas-centrifug.

Anrikningen är nödvändig eftersom det är  $U_{235}$  som ingår i de reaktioner som används vid energiutvinnigen. En hög andel  $U_{235}$  (2-3%) är nödvändig för att en själv-försörjande reaktion ska upprätthållas samtidigt som energi kan utvinnas.

Vid klyvning av  $U_{235}$  kan följande reaktion inträffa



där, n representerar en neutron och  $\gamma$  högenergistrålning.

En process där i genomsnitt 1 neutron som kan fortsätta klyvningsprocessen frigörs kallas kritisk. Om antalet är fler eller färre kallas reaktionen överkritiskt resp. underkritisk. Styrningen av ett kärnkraftverk bygger på möjligheten öka och minska sannolikheten att en neutron träffar en  $U_{235}$  atom så att reaktionen kan fortsätta.

# Kärnkraft - Stabilitet

För att en kedjereaktion ska kunna upprätthållas måste de partiklar som frigörs ha rätt energi-innehåll. För en s.k. termisk neutron som frigörs vid klyvning av tyngre atomkärnor gäller att den mest sannolika energin är

$$E_p = 0.5 \cdot k \cdot T$$

där  $T$  är temperaturen och  $k$  Boltzmanns konstant.

Temperaturen är alltså viktig för reaktionerna i reaktorn och reaktionerna tenderar att sakta in om temperaturen ökar. Detta gör processen något självreglerande och kallas för negativ *voidkoefficient* då effekten minskar.

De  $U_{238}$  atomkärnor som ingår i bränslet kan delta i andra reaktioner och bilda t.ex. Plutonium,  $Pu_{239}$ . Den större delen av bränslet förblir dock oförändrat i de reaktorer som används för energiframställning idag men andra reaktorkonstruktioner med högre temperaturer ger löften om bättre utnyttjandegrad.

# Kärnkraft - Typkonstruktioner

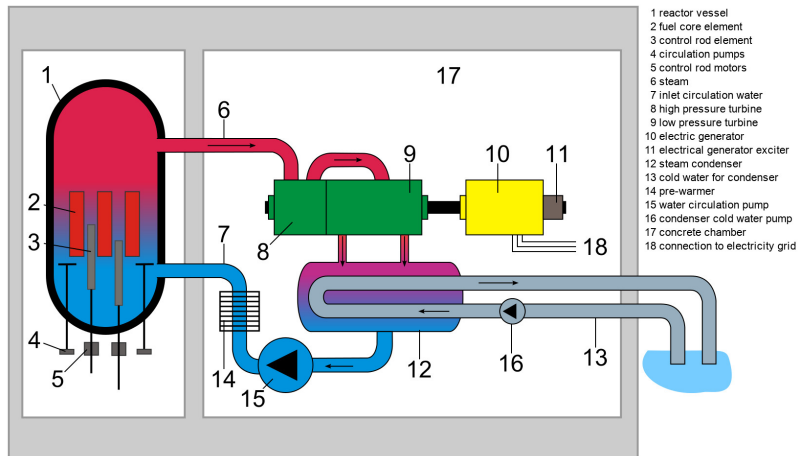
De flesta reaktorer som finns i drift använder idag vatten som energibärande medium, antingen genom att koka vatten till ånga (Boiling Water Reactor, BWR) eller genom att höja temperaturen under högt tryck (Pressure Water Reactor, PWR).

Det som skiljer en PWR-reaktor från en BWR är en värmeväxlare som överför värme från en tryckvattenkrets till en ång-krets.

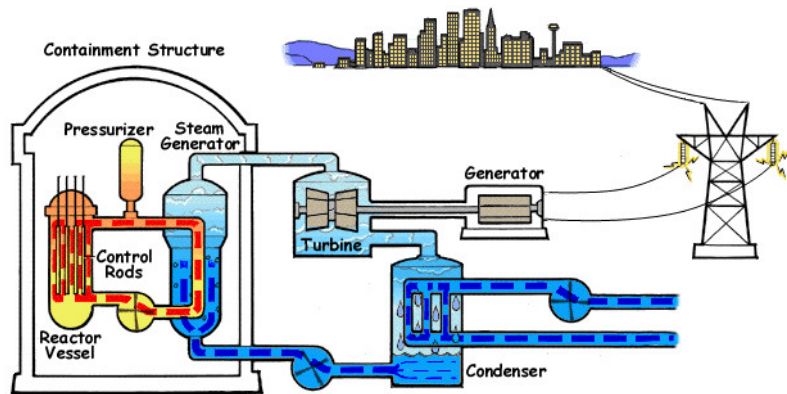
Kokvatten och tryckvatten-reaktorer kan användas tillsammans med vanligt vatten eller med s.k. tungt vatten och man skiljer på Lättvattenreaktorer och Tungvattenreaktorer.

Regleringen av BWR/PWR reaktorerna sker delvis automatiskt tack vare temperaturberoendet hos klyvningsprocessen. Extra styrning möjliggörs dock tack vare att termiska energin i de emitterade neutronerna från  $U_{235}$  klyvningen i princip alltid är för hög för att naturligt klyva nya  $U_{235}$  atomer. Neutronerna behöver därför bromsas.

# Kärnkraft - BWR exempel



# Kärnkraft - PWR exempel



För att styra effektuttaget samt möjliggöra start och stopp av kraftverken finns följande komponenter.

**Moderator:** Det vatten som finns i reaktorhärden fungerar som moderator och bromsar den termiska energin så att en reaktion kan upprätthållas. Även grafit används för detta syfte. En fördel med användningen av vatten är att om vattnet skulle koka bort så avstannar reaktionen, dock riskerar bränslestavarna att smälta i en s.k. härsmälta vilket då förstör reaktorn, men utan att processen skenar.

**Styrstavar:** För att fånga upp neutroner som annars skulle ha kunnat träffa en  $U_{235}$  atom och på så sätt bromsa reaktionen används styrstavar. Styrstavarna är gjorda av t.ex. stål med hög borhalt eller borkarbid.

# Kärnkraft - Utvikning Tjernoby

Reaktorn var av typen RBMK-1000 som var grafitmodererad. Konstruktionen betedde sig vid låga effekter instabilt, dvs. att en ökning av effekten leder till ökad ånghalt och ytterligare effektökning.

Ytterligare en olycklig designparameter var att styrstavarnas spetsar var gjorda av ett annat material än styrstavarna och därför accelererade reaktionerna innan den bromsade effekten inträdde.

Instabiliteten var inget problem vid normal drift, men vid olyckstillfället hade man kört reaktorn på låg-effekt länge för att testa ett nytt system varpå vissa sidoreaktioner som skapar bromsande isotoper inte skedde normalt. Reaktorn blev då förgiftad och riskerade att stanna helt.

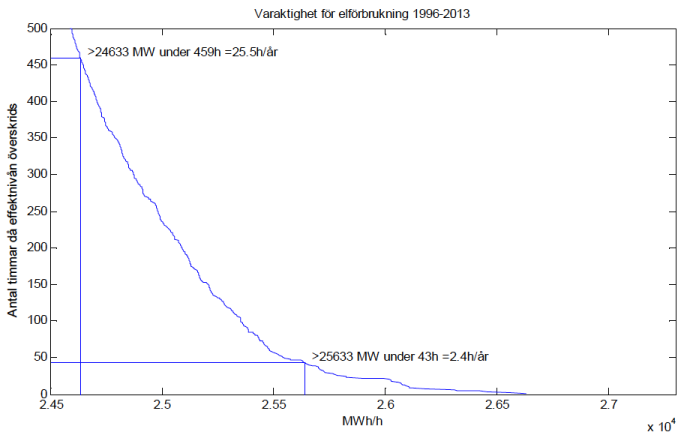
För att kraftverket inte skulle självstanna när man beslutade att avbryta testet var man tvungen att dra ut styrstavarna helt. Kraftverket gick då på tomgång trots att man gasade maximalt.



När kraftverket hade bränt bort de förgiftande isotoperna från sidoreaktionerna accelererade reaktionen kraftigt och skapade en ång-explosion, som accelererade reaktionerna ytterligare. När man sedan försökte skjuta in styrstavarna ökade först effekten ytterligare vilket förvillade personalen.

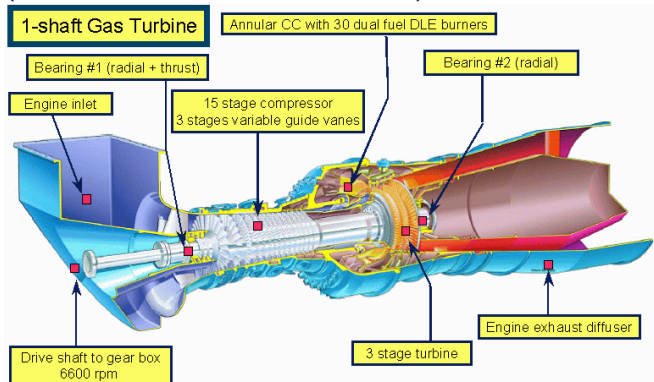
När reaktorinneslutningen exploderade så frilades reaktorhärden. Grafiten, som användes som moderator, brann därefter okontrollerat under lång tid i den öppna reaktorhärden varpå stora mängder radioaktivt material spriddes över världen.

# Gasturbin - bakgrund



# Gasturbin

En gasturbin består av en kompressor, brännkamare, och en turbin (kompressorturbin och kraftturbin).



- Gasturbiner har hög effekt i förhållande till sin storlek
- Generellt lägre verkningsgrad än exempelvis kolvmotorer.
- Ett bra alternativ som reservkraft eftersom det går snabbt att förändra avgiven effekt från en gasturbin.