

TSFS17 Elkraftsystem Fö 7 – Förnyelsebar elproduktion

Lars Eriksson, professor
ISY, Fordonssystem



Reklam

Lunchträff om Elektromobilitet

Linköping universitet och Swedish Electromobility Centre (SEC) bjuder in till en informationsträff om möjligheter att studera och arbeta inom den starkt växande elektromobilitetssektorn.

Transportsektorn står inför en spännande och utmanande omställning. Behovet av kompetens och arbetskraft är mycket stort inom såväl näringsliv som akademi och civilsamhället.

Agenda:

- Swedish Electromobility Centre
- Kurser inom området och LiUs forskning inom Elektromobilitet
- VTIs verksamhet inom Elektromobilitet
- Presentation av företag i panelen
- Paneldiskussion: Elektrifiering av transportsektorn - Ett expansivt och spännande arbetsfält!
- Lunchmingel med SAAB, Scania och Tekniska Verken och diskussion med företag och lärare

Tid: 7 december 11.00 - 13.00
Plats: Ada Lovelace B-huset,
Campus Valla

Anmält dig, så bjuder vi på
en lunchmacka.



Frågor: henrik.gillstrom@liu.se



1. Elmarknaden

Elhandel och aktörer

- Två vägar
- Fysiska
 - Producent
 - Stamnät
 - Regionalt nät
 - Lokalt nät
- Ekonomiska
 - Komplext samspel mellan många aktörer



Aktörer i elhandeln

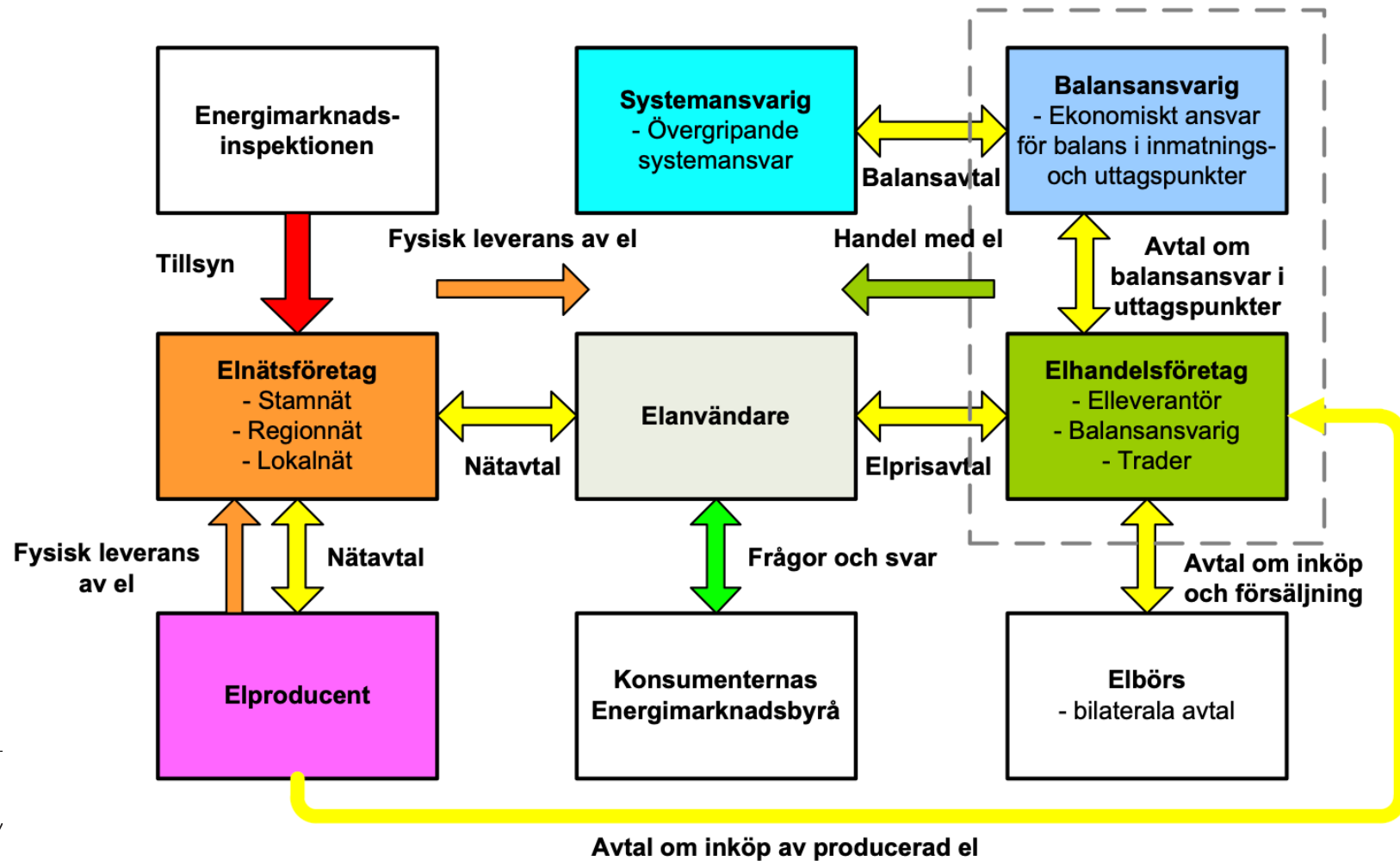
- Elproducent:
 - Stora elbolag: vatten, kärn, vind
 - Eget företag som säljer överproduktion av el
 - Prosument: Konsument och producent
- Nätägare: Bolag som äger och förvaltar elnät
 - Stamnätet: Ägs av staten och förvaltas av **svenska kraftnät (SVK)**
 - Regionalt nät: Vattenfall, E-ON, Ellevio
 - Lokalt nät: 155 olika nätägare
- Elhandelsföretag
 - Elleverantör (återförsäljare av el)
 - Balansansvarig
 - Eltrader



Viktiga Aktörer runt Elanvändaren

- Energimyndigheten: Ansvar för samhälle och omställning.
- Systemansvarig (SVK myndighet):
 - Myndigheten ansvarar för att elöverföringssystemet är leveranssäkert, kostnadseffektivt och miljöanpassat. SVK övervakar kraftsystemet dygnet runt och har ansvar för att bygga ut nätet för att möta samhällets behov av el.
- Balansansvarig (elhandelsbolag):
 - Har kontrakt med SVK. Ansvarig för balans mellan kunderna och producenterna.
- Elhandelsföretag

Elmarknadshandbokens.se bild av aktörerna

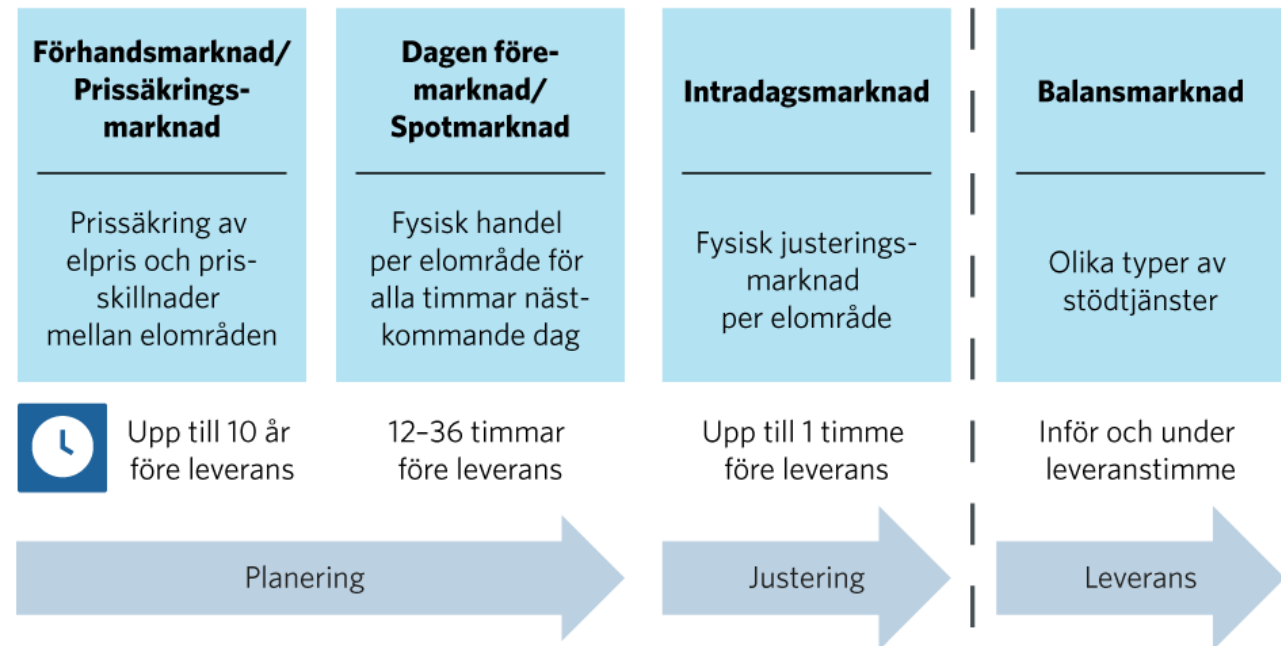


Sätt att handla el

- El handlas

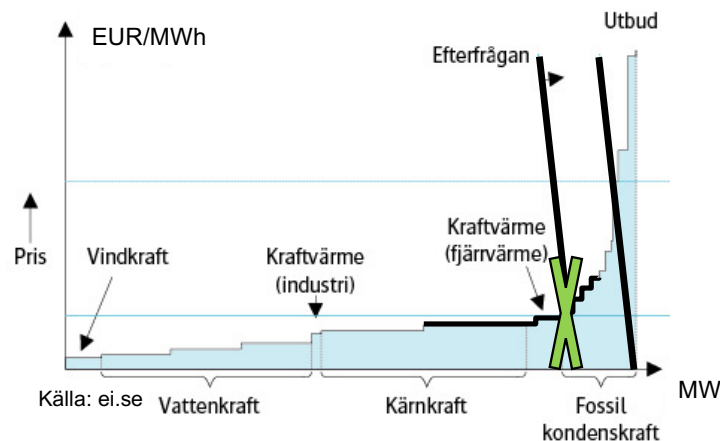
- Via bilaterala avtal (ca 15 % av elen i Sverige)
- Via NordPool Elspot – timvis dygnet före (ca 85 % av elen)
- Via NordPool Elbas – till en timme före leverans

- Sidokommentar: rollen för Balansansvarig görs om 17 maj 2024



Prissättning på spotmarknaden

- Före kl 12:00 mottar Nordpool bud för varje timme 00-24 nästa dag:
 - Produktionsbud (volym och pris) via balansansvarig
 - Förbrukningsprognos via balansansvarig
- Nordpool sorterar buden i prisordning, antar bud till behovet är tillgodosett



Dyr el vid
hög efterfrågan

...eller brist på vind/vatten eller
snabbstopp/nedläggning kärnkraft

Billig el vid
normal efterfrågan

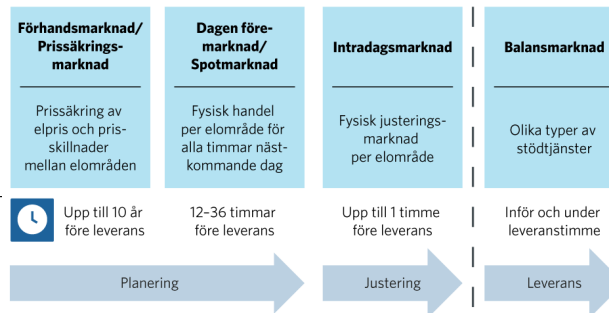
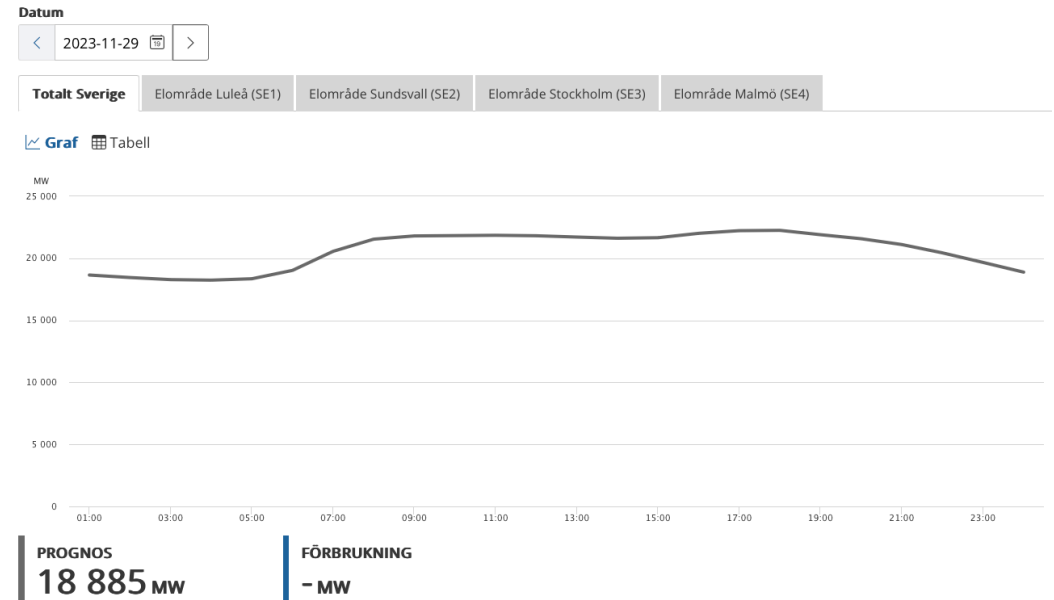
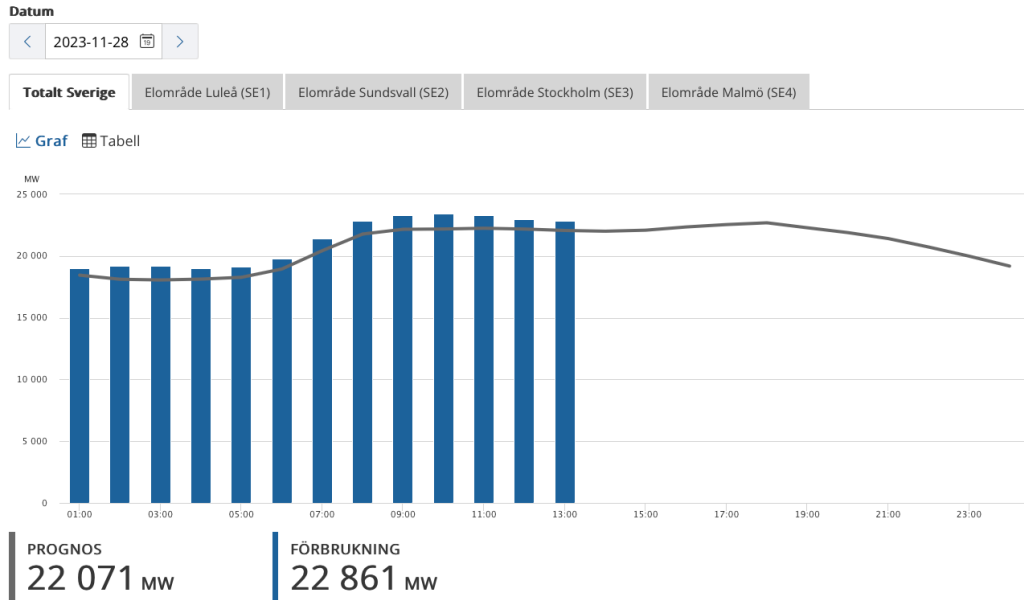
...eller mycket vind/vatten →
förnybart mindre lönsamt

- Senast antagna bud avgör systempriset (X) – alla antagna bud betalar systempriset

Vindbrist höjer priset mer än vindöverskott sänker priset

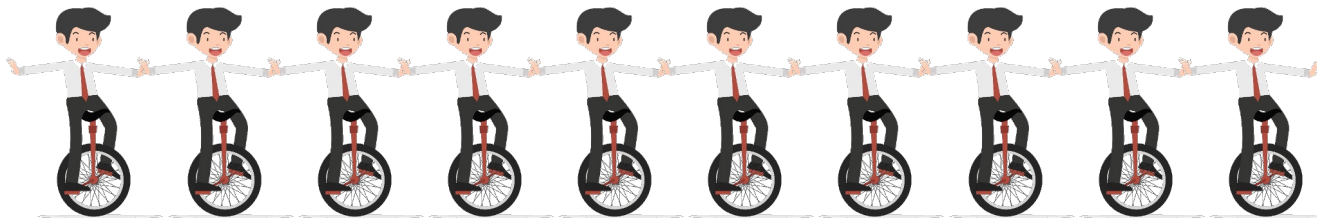
Spot- och Intradagsmarknaden (13.30)

Plockade ut data 13.30 då dagen var igång och nästkommande dags prognoser var behandlade.



Balansmarknad

- SVK köper in stödtjänster som kan kopplas in med kort varsel för att balansera akut.
- En stödtjänst bidrar med en viss förmåga: såsom en upp- eller nedreglering av produktion eller förbrukning av el.
- Olika krav och pris på snabbhet och uthållighet. Många hjälper till.



- “Balansbovarna” de med dåliga prognoser, identifieras och debiteras för balanskostnderna som uppstår.

Uppdaterad 11 oktober 2023

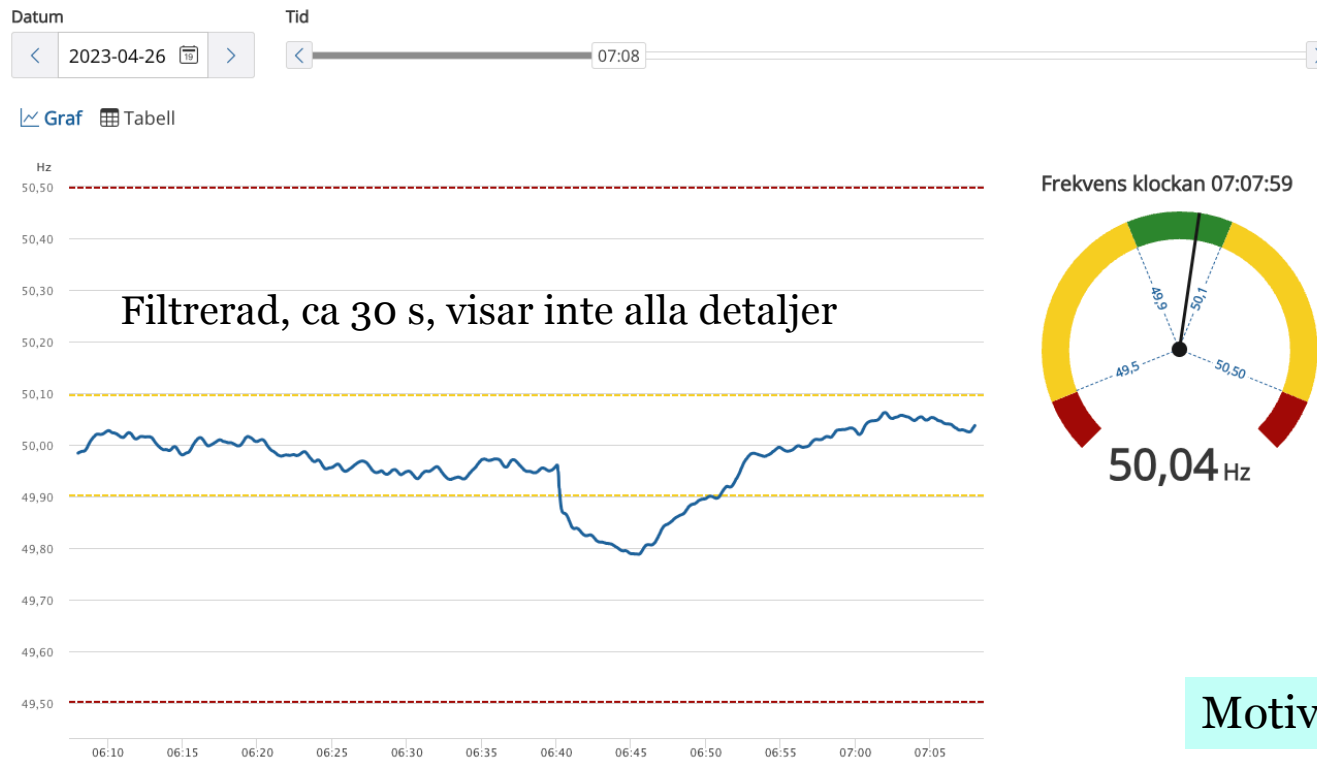
Avhjälpanande åtgärd	Frekvenshållningsreserver			Frekvensåterställningsreserver	
<p>FFR</p> <p>Snabb frekvensreserv (Fast Frequency Reserve)</p> <p>Uppreglering</p> <p>Minsta budstorlek 0,1 MW</p> <p>Aktivering Automatiskt vid frekvensförändringar vid låg nivå av rotationsenergi</p> <p>Aktiveringstid Tre alternativ för 100 %: - 0,7 sek (vid 49,50 Hz) - 1,0 sek (vid 49,60 Hz) - 1,3 sek (vid 49,70 Hz)</p> <p>Volymkrav för Sverige Upp till ca 100 MW</p> <p>Uthållighet - Uthållighet: 30 sek alternativt 5 sek - Repeterbarhet: Redo för aktivering inom 15 minuter</p>	<p>FCR-D upp</p> <p>Frekvenshållningsreserv -Störning uppreglering (Upward Frequency Containment Reserve - Disturbance)</p> <p>Uppreglering</p> <p>Minsta budstorlek 0,1 MW</p> <p>Aktivering Automatisk linjär aktivering inom frekvensintervallet 49,90-49,50 Hz</p> <p>Aktiveringstid Aktiveringstid för FCR-D upp redovisas i dokumentet med tekniska krav för frekvenshållningsreserver (FCR)</p> <p>Se krav 2 på sida 18</p> <p>Volymkrav för Sverige Upp till 558 MW</p> <p>Uthållighet Uthållighet: Minst 20 min</p>	<p>FCR-D ned</p> <p>Frekvenshållningsreserv -Störning nedreglering (Downward Frequency Containment Reserve - Disturbance)</p> <p>Nedreglering</p> <p>Minsta budstorlek 0,1 MW</p> <p>Aktivering Automatisk linjär aktivering inom frekvensintervallet 50,10-50,5 Hz</p> <p>Aktiveringstid Aktiveringstid för FCR-D ned redovisas i dokumentet med tekniska krav för frekvenshållningsreserver (FCR)</p> <p>Se krav 2 på sida 18</p> <p>Volymkrav för Sverige Upp till 538 MW*</p> <p>Uthållighet Uthållighet: Minst 20 min</p>	<p>FCR-N</p> <p>Frekvenshållningsreserv -Normaldrift (Frequency Containment Reserve - Normal)</p> <p>Symmetrisk upp- och nedreglering</p> <p>Minsta budstorlek 0,1 MW</p> <p>Aktivering Automatisk linjär aktivering inom frekvensintervallet 49,90-50,10 Hz</p> <p>Aktiveringstid Aktiveringstid för FCR-N redovisas i dokumentet med tekniska krav för frekvenshållningsreserver (FCR)</p> <p>Se krav 1 på sida 14 samt krav 9 på sida 28</p> <p>Volymkrav för Sverige 231 MW</p> <p>Uthållighet Uthållighet: 1 h</p>	<p>aFRR</p> <p>Automatisk Frekvensåterställningsreserv (Automatic Frequency Restoration Reserve)</p> <p>Upp- och/eller nedreglering</p> <p>Minsta budstorlek 1 MW</p> <p>Aktivering Automatiskt vid frekvensavvikelse från 50,00 Hz</p> <p>Aktiveringstid 100 % inom 5 minuter</p> <p>Volymkrav för Sverige Upp till 111 MW</p> <p>Uthållighet Uthållighet: 1 h</p>	<p>mFRR</p> <p>Manuell Frekvensåterställningsreserv (Manual Frequency Restoration Reserve)</p> <p>Upp- och/eller nedreglering</p> <p>Minsta budstorlek Kapacitetsmarknad: 1 MW** Energiaktiveringsmarknad: 5MW</p> <p>Aktivering Manuellt på begäran av Svenska kraftnät</p> <p>Aktiveringstid 100 % inom 15 min</p> <p>Volymkrav för Sverige Kapacitetsmarknad: Upp till 200 MW Energiaktiveringsmarknad: Inga volymkrav</p> <p>Uthållighet Uthållighet: 1 h</p>

* Aktuell upphandlingsplan är lägre än volymkravet då FCR-D ned är en ny produkt sedan januari 2022. Upphandlingsplanen uppdateras kvartalsvis.
Mer information finns på Svenska kraftnäts webbplats: www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/behov-av-reserver-nu-och-i-framtiden/

** Ett avropat bud på kapacitetsmarknaden innebär ett åtagande om att lämna bud på energiaktiveringsmarknaden.

För mer utförlig information om kraven, se Balansansvaravtal och tillhörande regeldokument. De finns för nedladdning på Svenska kraftnäts webbplats: www.svk.se/aktorsportalen/balansansvarig/balansansvaravtalet/

26 April 2023, 06.40: Fel i Hagby ställverk, Forsmark 1 & 2 kopplar bort sig själva.



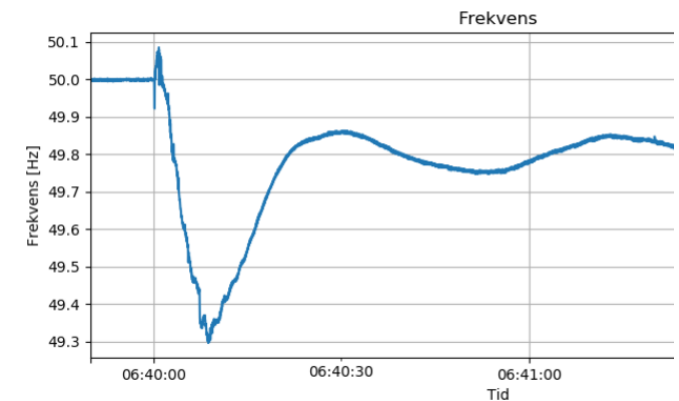
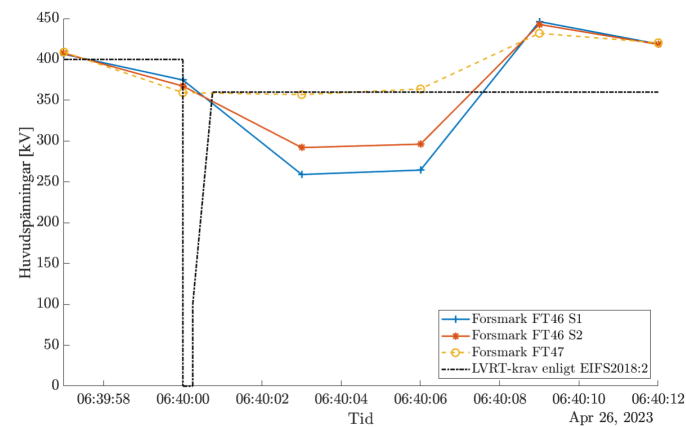
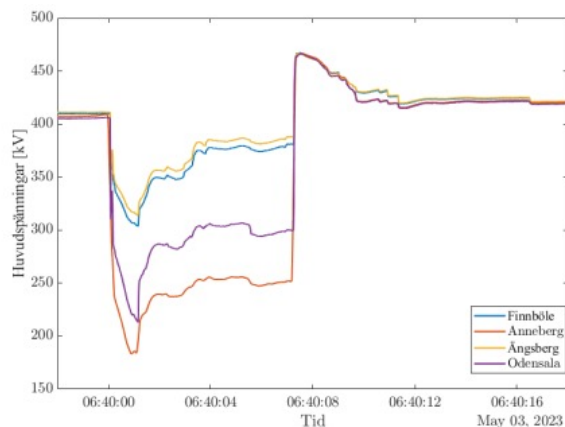
- Olika aktörer aktiva i olika tidsfönster.
- FFR
- FCR-N
- FCR-D upp
- aFRR
- mFRR

Motiv till Labb 1 uppgift 3

Sweden: Near blackout 26 April 2023

- Serious: One fault causes loss of two and almost three nuclear units

”During planned maintenance in Hagby switchyard, a 220 kV disconnecter carrying load current was opened. As disconnectors are not designed for this it led to arcing. This caused fault current in two phases, which developed into fault current in three phases. Forsmark 1 and 2 disconnected from the 400 kV grid because of undervoltage after approximately 1 s and shortly after the generator breakers open. The fault in Hagby is cleared first after approximately 7 s, which causes very low voltages in transmission and distribution networks in the area during the fault.”



Figur 4. Uppmätta huvudspänningar (positiv sekvens) i stationer i det elektriska närområdet till Hagby.

Station i Hallsberg

Summer 2018: Nordic system not N-1 secure

- N-1 secure = Can manage worst single “contingency”
- Low summer load → little generation on-line → low H_{total}
- Oskarshamn 3 nuclear unit 1450 MW largest on-line
- Too large f dip if 1450 MW lost with low H_{total}
- O3 ordered to reduce output by to 1350 MW to adapt worst possible disturbance to available H_{total}

Motiv till: Labb 1, uppgift 4 (& 3)

Minskad stabilitet sätter mycket på spel

i Elsystemet 16 oktober, 2018 Johan Svenningsson 0 Kommentarer



Av Johan
Svenningsson
vd, Uniper
Sverige

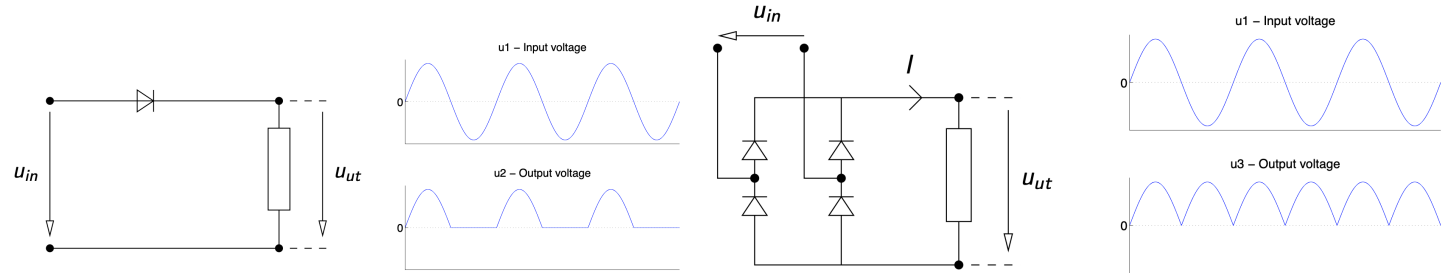
Uniper Sveriges vd Johan Svenningsson vittnar om överraskande tecken på instabilitet i elsystemet. “Vid tre tillfällen i somras var bristen på svängmassa i elsystemet så påtaglig, att Svenska Kraftnät beordrade nedreglering av Oskarshamn 3 med 100 MW.”, skriver han och öppnar för att utvärdera livstidsförlängning av kärnkraftverk.

2. Kraftelektronik

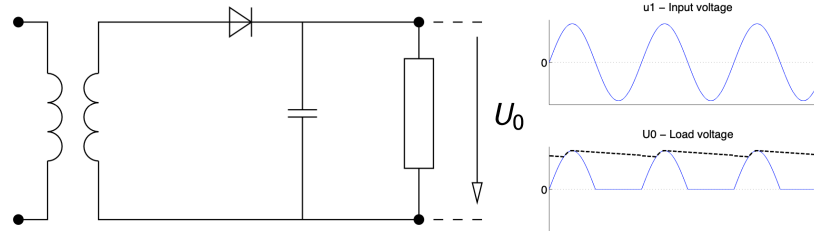
Kort repetition från TSFS16.

Byggstenar

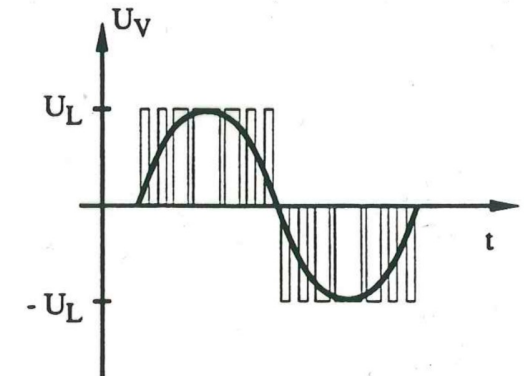
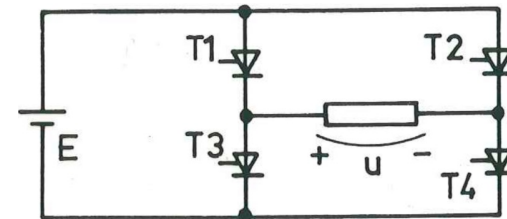
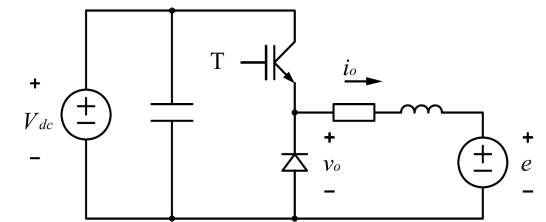
- Likriktare: AC-DC



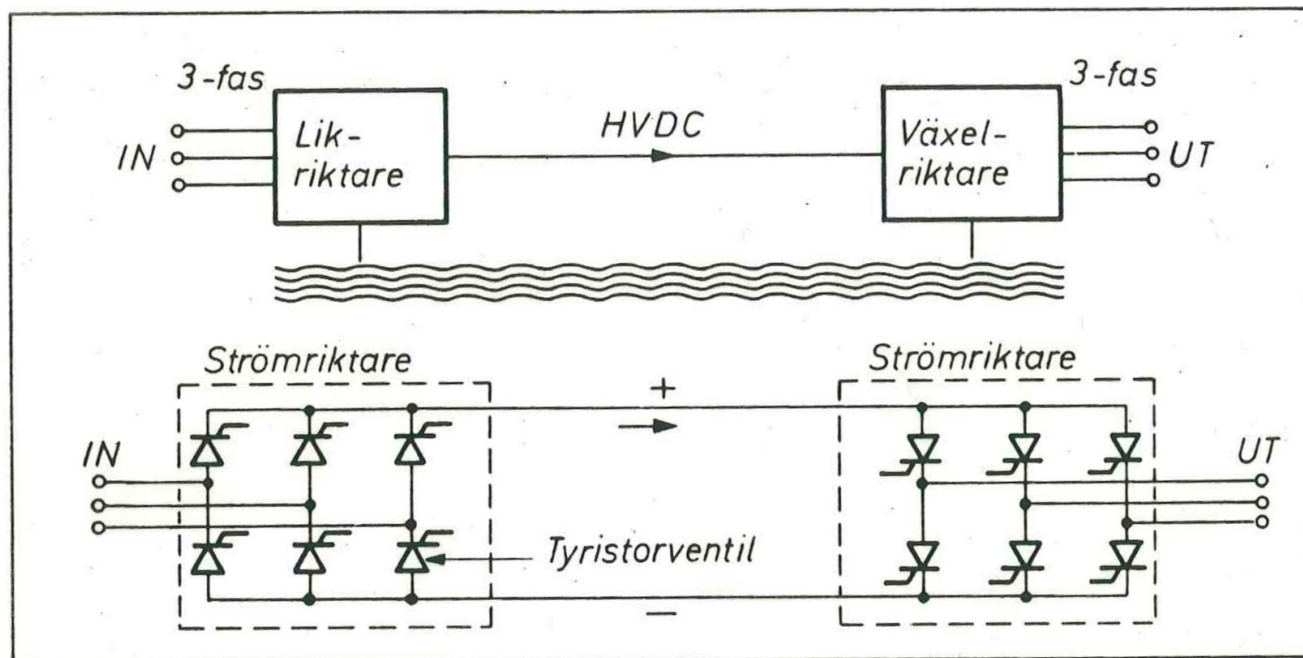
- Filter:



- Växelriktare (Inverter):
- Switching med amplitud och fas över spolen och mot nätet
 - Kan styra aktiv och reaktiv effekt
 - Andra kurser i kraftelektronik



HVDC exemplet

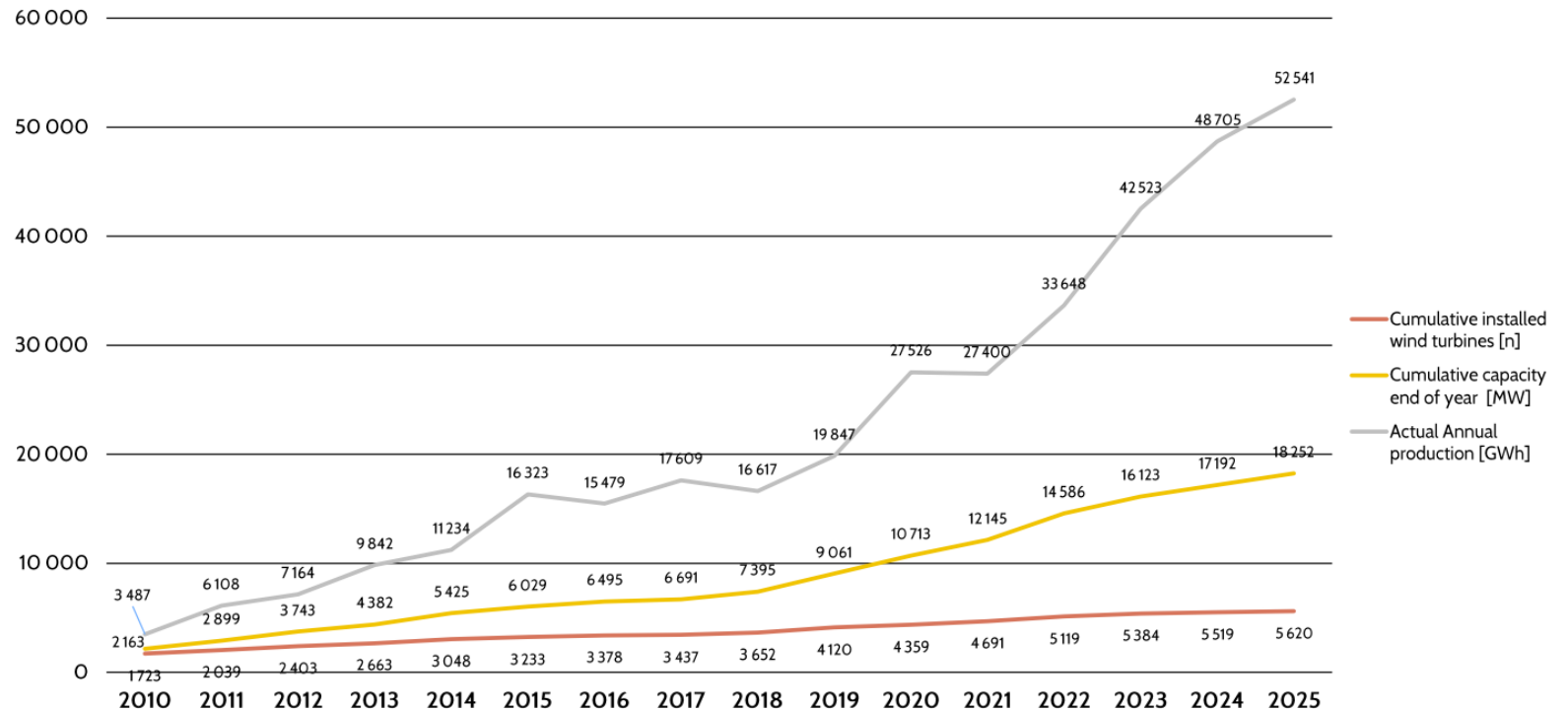


Principen för kraftöverföring med HVDC

3. Vindkraft

Svensk vindkraft växer snabbt

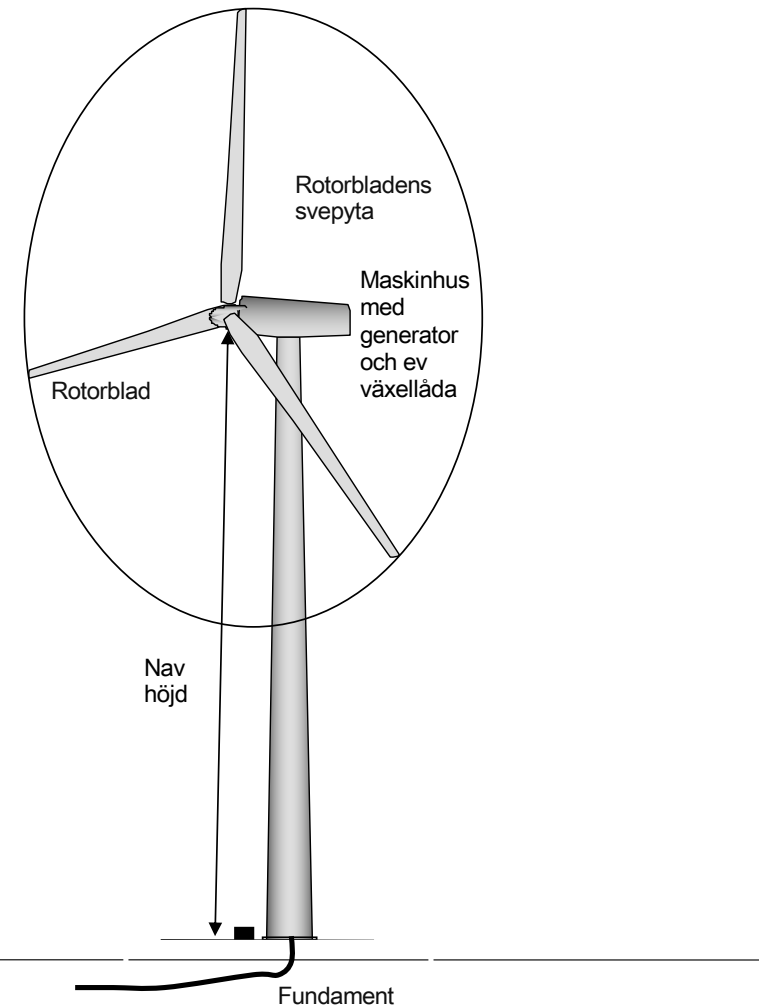
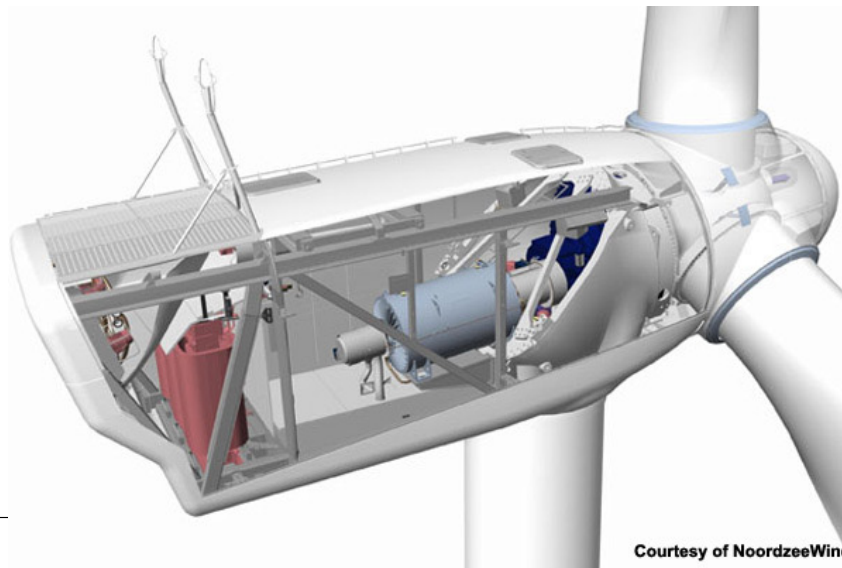
Short term forecast, 2022-09-30

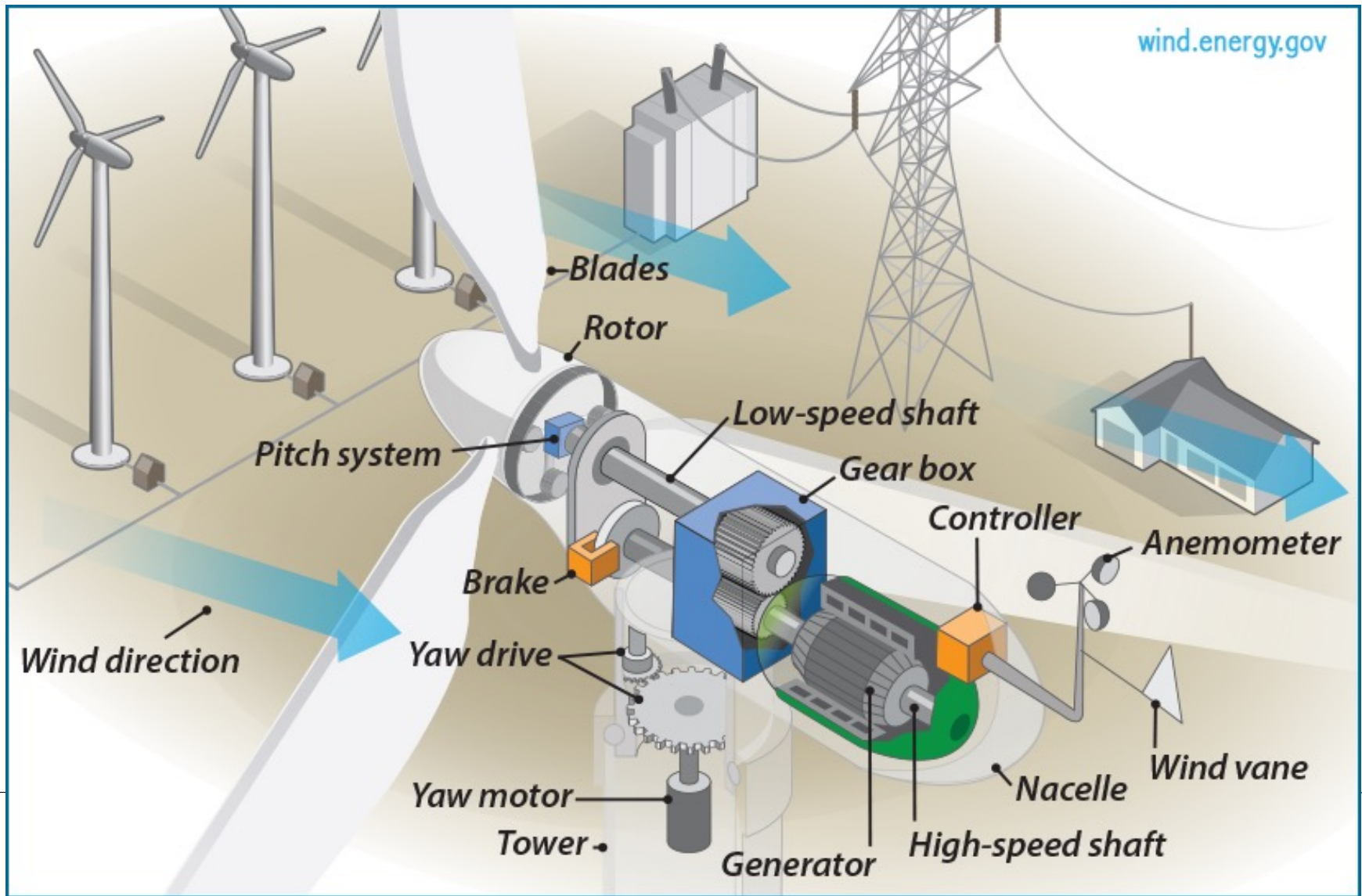


Vindkraftverk mekaniskt

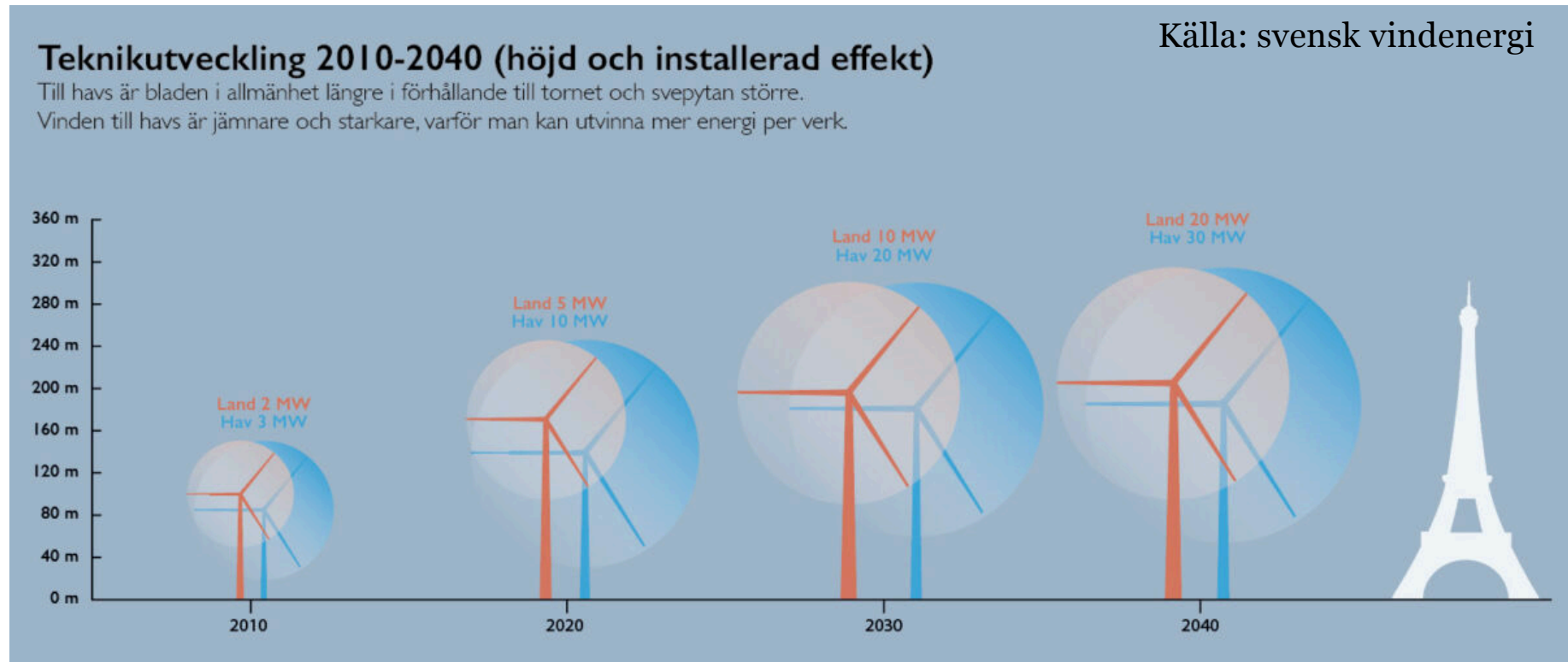
Vestas V90, 3 MW, 265 ton

- Rotor: 90 m diameter, svepyta 6362 m², 28 ton
- Maskinhus: 68 ton (transformator, generator, växellåda)
- Torn: 63-103 m, 155-235 ton
- Fundament





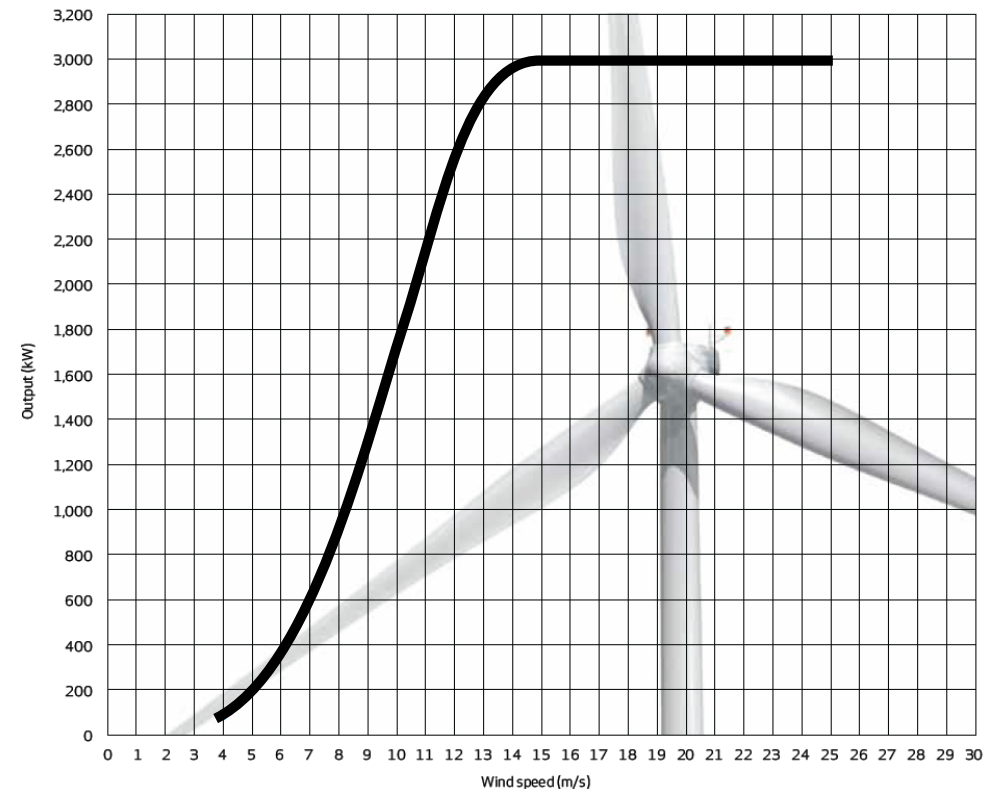
Teknikutveckling



Vindkraft - styrning & reglering

Exempel

- Startvind 3,5 m/s
- Nominell effekt @ 15 m/s
- Stoppvind 25 m/s
- Rotorvarvtal 9-19 rpm
- Effektreglering via bladvinkelreglering (pitch) + kraftelektronik



Vindresursen i Europa - på land



- Karta: vindhastighet på 80 m höjd
- Effekten i vinden beskrivs enligt:

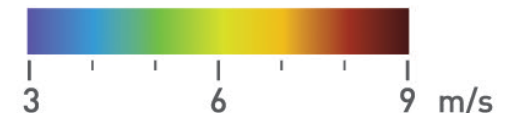
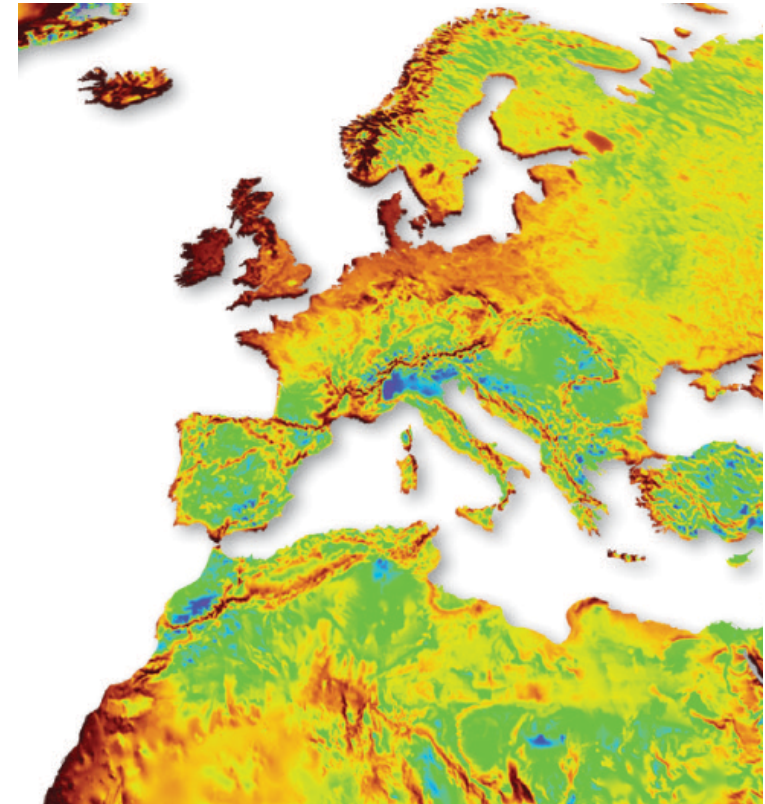
$$P = \frac{\rho A v^3}{2}$$

A = svept rotorarea,

v = vindhastighet,

ρ = luftens densitet

- Vindhastigheten viktigaste faktorn
 - Fördubbling ger 8 gånger mer



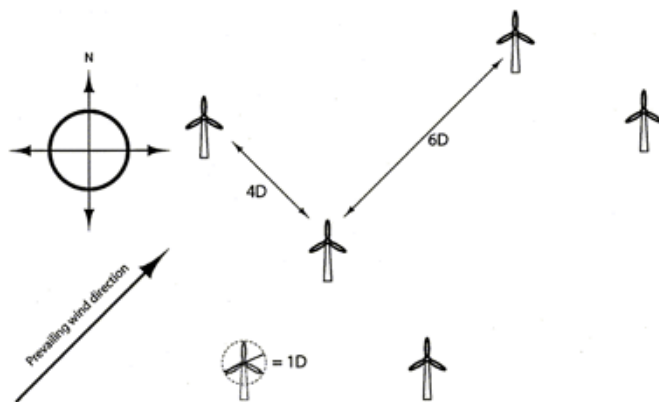
Källa: vindbrukskollen.se

Källa: 3tier.com

Vindkraftsparker

- Undvika aerodynamisk interferens mellan turbiner
- Kräver tillräckliga avstånd mellan turbinerna

Example turbine spacing in a wind farm with a South Westerly prevailing wind direction



4. Vindkraftsteori

Teorin som behövs för förståelse av planering och integration i elsystemet.

Mycket av materialet är hämtat från:

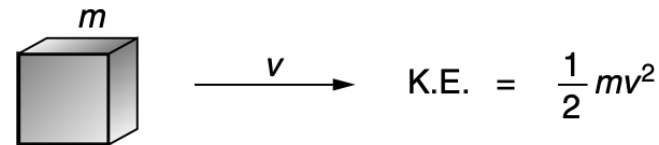
Renewable and Efficient Electric Power Systems

Gilbert M. Masters (2004)

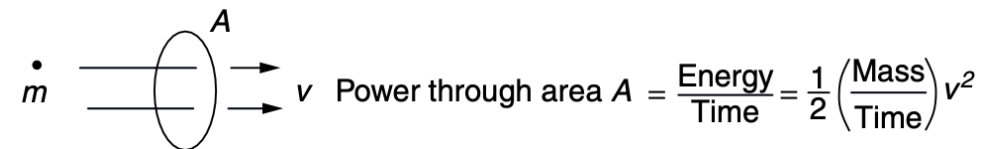


Grundläggande vindkraftsteori

- Energin i vinden som kan träffa bladen i vindkraftverket.
-Kinetisk Energi i ett luftelement.

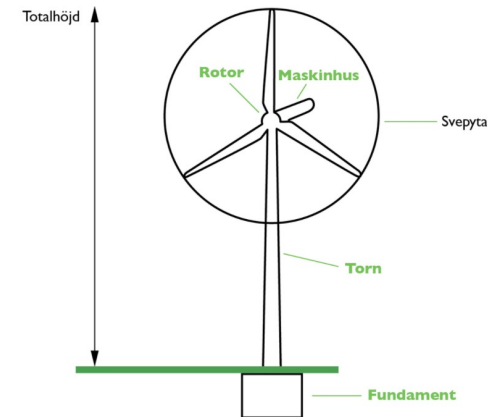


- Effekt genom en area A (svepytan) är energi per tidsenhet



- Massflödet av luft $\left(\frac{\text{Mass passing through } A}{\text{Time}} \right) = \dot{m} = \rho A v$

- Vindens effekt genom en Area A : $P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3$ (Studera Ekv.)



Grundläggande vindkraftsteori

- Vindens effekt genom en Area A:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3$$
- Olinjär gör att medelvinden inte är ett bra mått på medelenergi
- Statistik och fördelning på vindhastighet över året behövs som underlag
- Statistiska fördelningsfunktioner används vid analys

v (m/s)	Hrs/yr
0	24
1	276
2	527
3	729
4	869
5	941
6	946
7	896
8	805
9	690
10	565
11	444
12	335
13	243
14	170
15	114
16	74
17	46
18	28
19	16
20	9
21	5
22	3
23	1
24	1
25	0
Total hrs	8,760

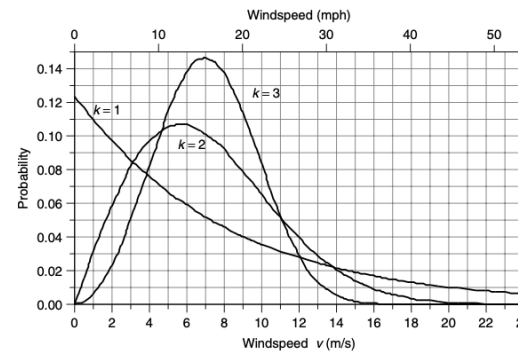
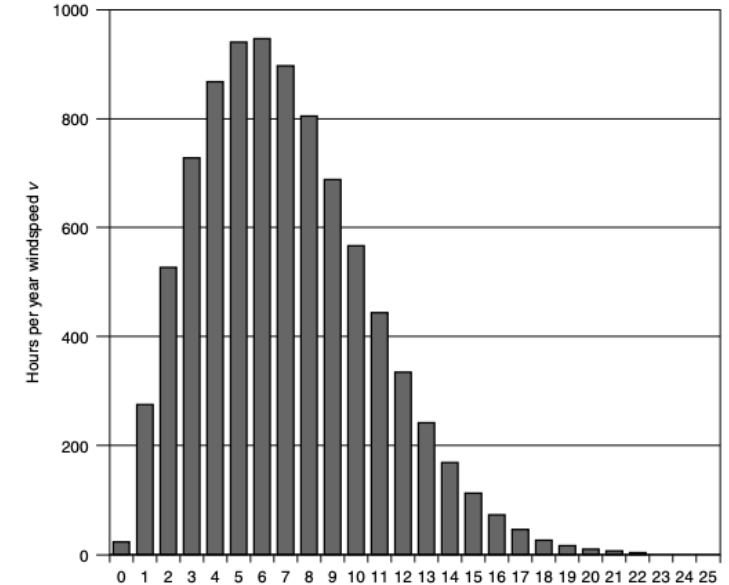


Figure 6.24 Weibull probability density function with shape parameter $k = 1, 2, \text{ and } 3$ (with scale parameter $c = 8$).

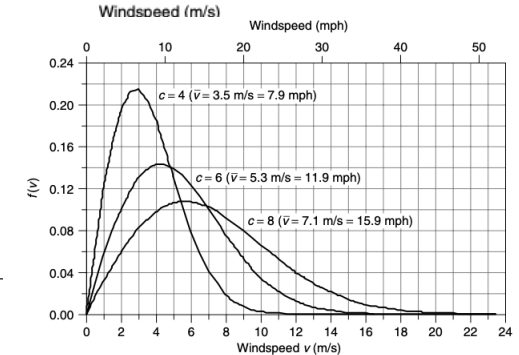


Figure 6.25 The Rayleigh probability density function with varying scale parameter c . Higher scaling parameters correspond to higher average windspeeds.

Maximal effektivitet hos vindturbiner

- Uppströms vindhastighet v
- Nedströms vindhastighet v_d
- Avlämnad effekt (blad och förluster)

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} (v^2 - v_d^2)$$

- Bestäm \dot{m} vid rotorn, antar medelhastighet $\dot{m} = \rho A v_b$

- Får nu effekten på bladen $P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + v_d}{2} \right) (v^2 - v_d^2)$

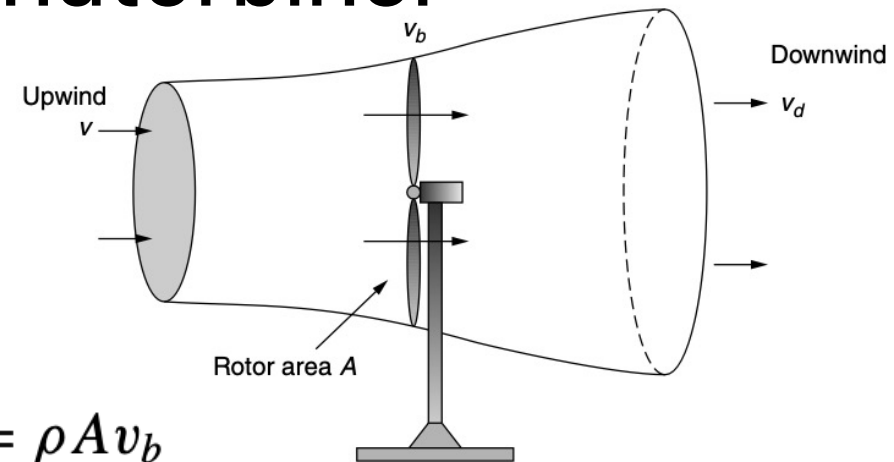
- Inför $\lambda = \frac{v_d}{v}$

- Får nu Betz gräns $P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + \lambda v}{2} \right) (v^2 - \lambda^2 v^2) = \underbrace{\frac{1}{2} \rho A v^3}_{\text{Power in the wind}} \cdot \underbrace{\left[\frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \right]}_{\text{Fraction extracted}}$

- Turbinekvationen $P_b = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$

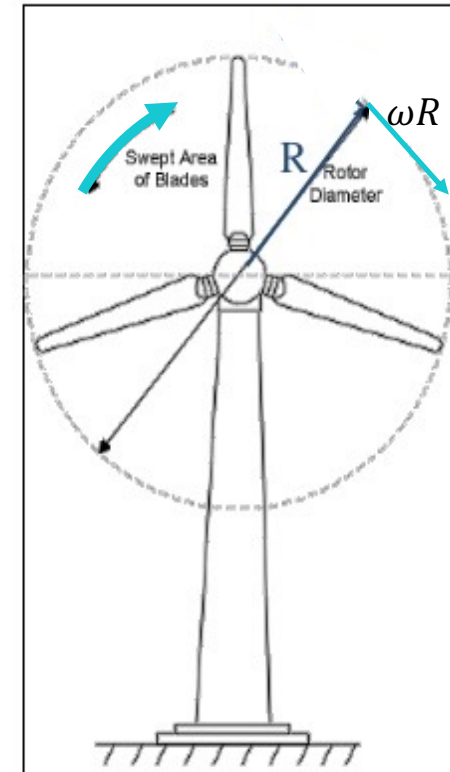
Rotor effektivitet, C_p , max för $\lambda = \frac{1}{3}$

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.593$$



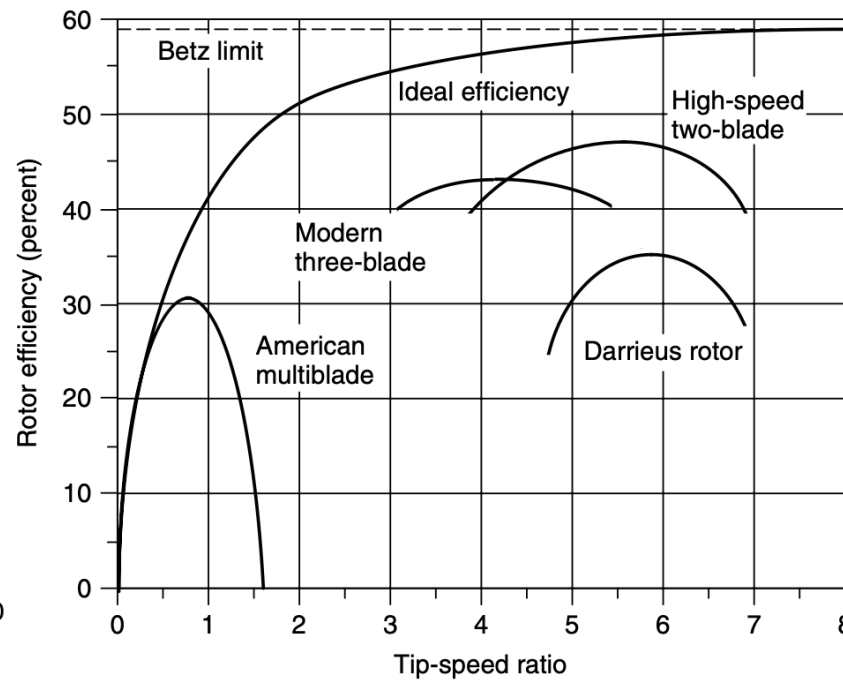
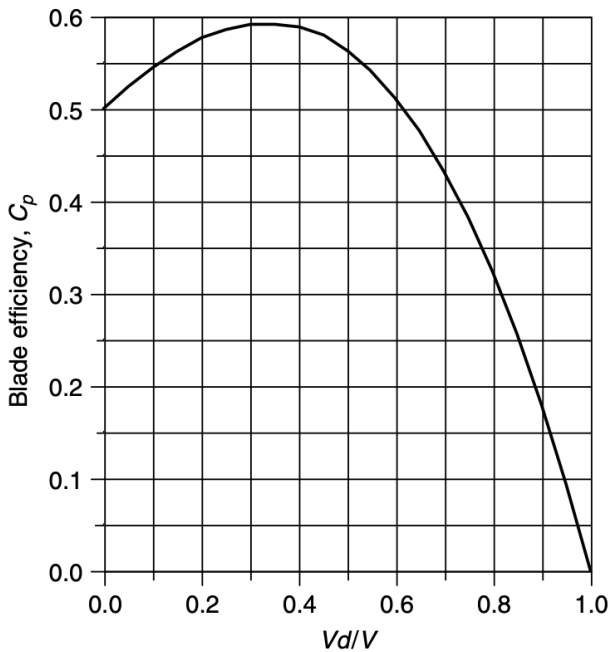
Tip speed ratio

- Rotationshastighet hos bladen
 - Varv per minut: n [rpm]
 - Vinkelhastighet: $\omega = 2\pi\frac{n}{60}$ [rad/s]
- Toppens hastighet ökar med radien
 - $v_{tip} = \omega R$ [m/s]
- Vindens hastighet, v_w [m/s]
- Tip speed ratio
 - Tip speed to wind speed ratio (ej samma λ som Betz)
$$TSR = \lambda = \frac{v_{tip}}{v_w} = \frac{\omega R}{v_w}$$
 - Blade Speed Ratio (BSR) för turbiner
- Starkt kopplad till turbineffektiviteten



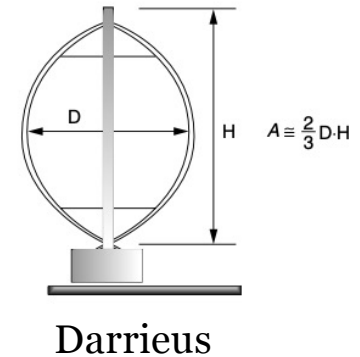
Maximal effektivitet hos vindturbiner

Betz teoretiska kurva



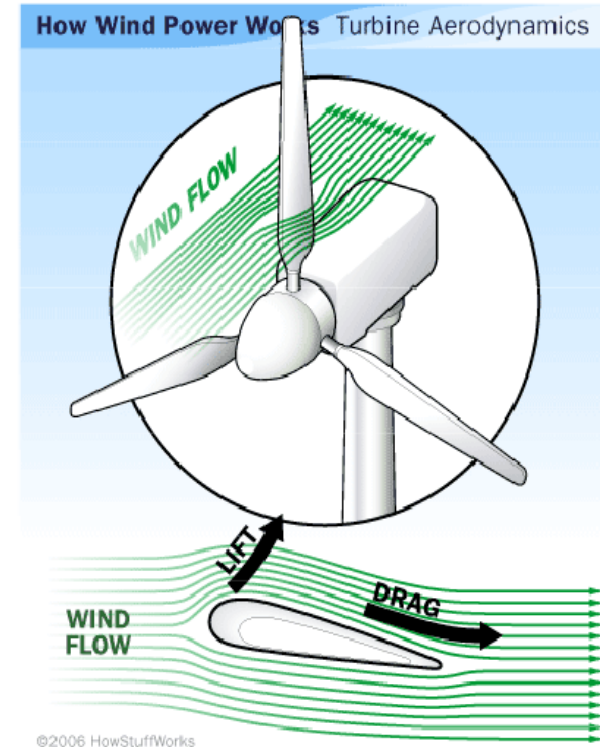
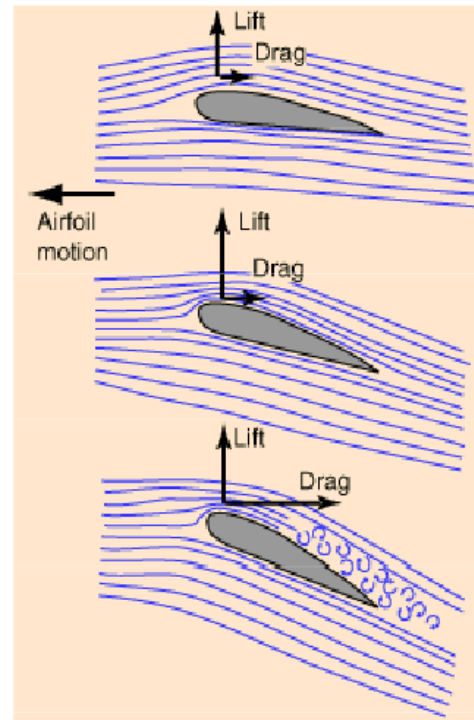
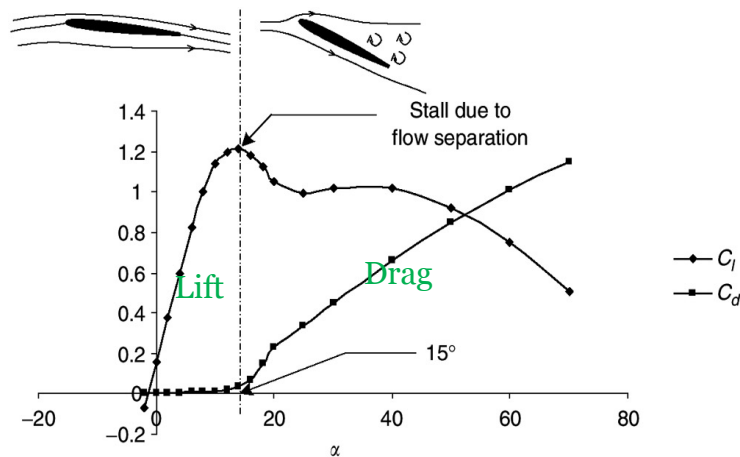
I praktiken:

Moderna turbiner når
ca 80% av Betz gräns



Optimera bladeffekten med vinklar (Blade pitch)

- Varvtal, vindhastighet och bladvinkel påverkar prestandan, styrs aktivt mot optimal TSR
- Ni bör veta om att det görs Detaljerna utanför denna kurs



Installationshöjd

- Vindhastighet som funktion av höjd

TABLE 6.3 Friction Coefficient for Various Terrain Characteristics

Terrain Characteristics	Friction Coefficient α
Smooth hard ground, calm water	0.10
Tall grass on level ground	0.15
High crops, hedges and shrubs	0.20
Wooded countryside, many trees	0.25
Small town with trees and shrubs	0.30
Large city with tall buildings	0.40

TABLE 6.4 Roughness Classifications for Use in (6.16)

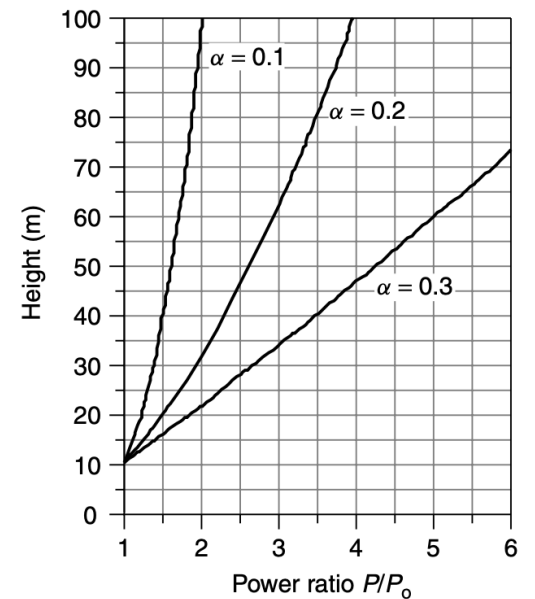
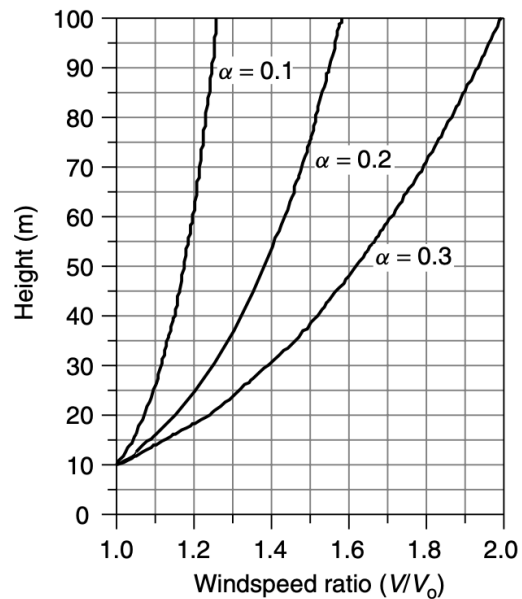
Roughness Class	Description	Roughness Length $z(m)$
0	Water surface	0.0002
1	Open areas with a few windbreaks	0.03
2	Farm land with some windbreaks more than 1 km apart	0.1
3	Urban districts and farm land with many windbreaks	0.4
4	Dense urban or forest	1.6

US

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha$$

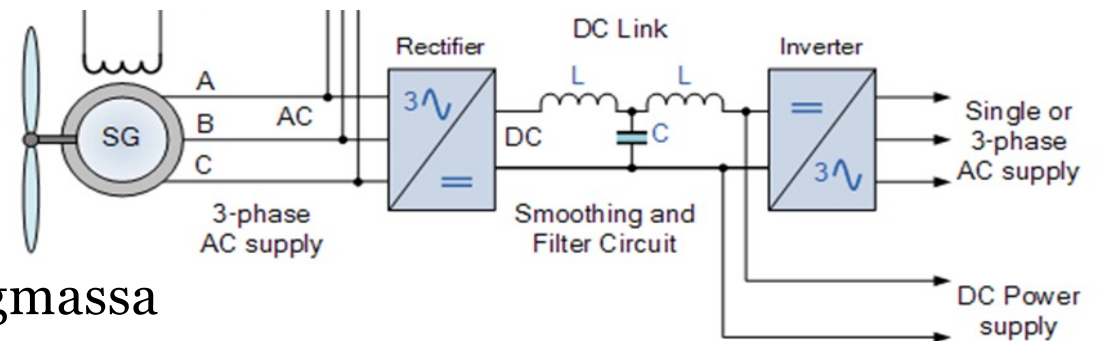
Europa (6.16)

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)}$$



Leverans av energi till nätet

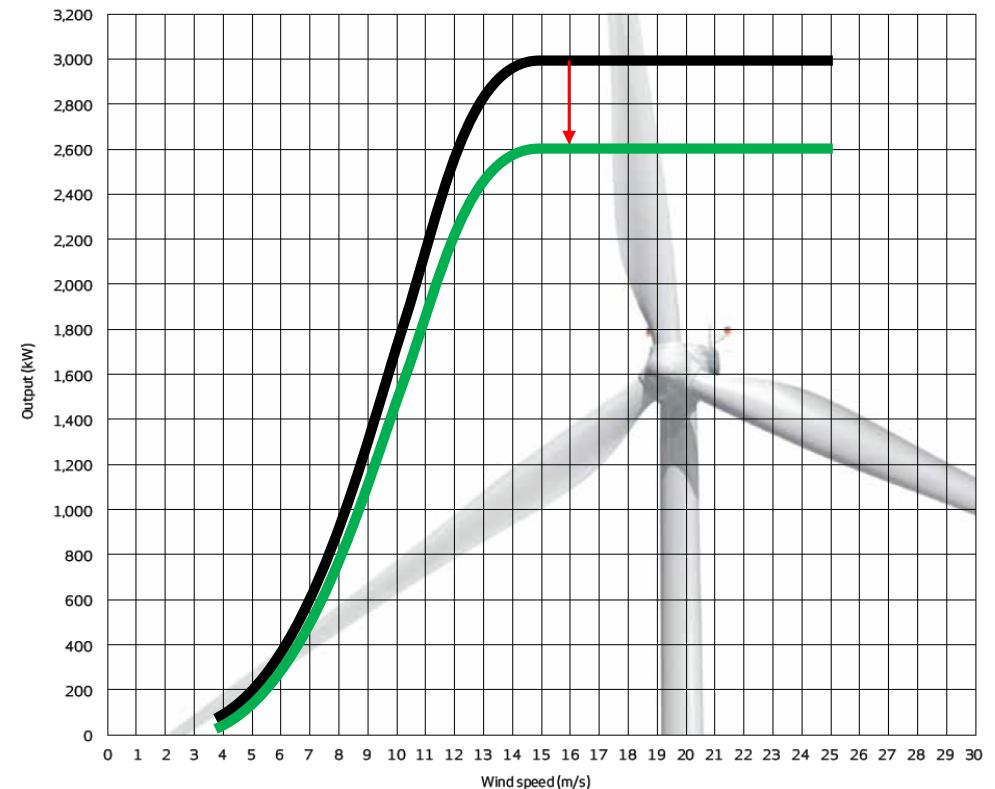
- Rotationshastighet varierar med vindhastighet



- Särkopplad från nätet, ingen svängmassa
- Generatorerna 3-fas
 - Permanentmagnetiserad synkrogenerator
 - DC-exciterad synkrogenerator
 - Asynkrogenerator

Vindkraft - styrning & reglering, mm

- Ingen svängmassa (inertia)
- Reducera effekt stationärt/dynamiskt för att kunna hoppa upp vid behov
 - Kan stötta nätet
 - Kan få betalt för att hålla en reserv som kan användas för stabilisering
 - Virtuellt svängmassa
- Inte planeringsbar (men prognosbar)
 - Stor installationsbas kan behöva stötts av energilagrar för elkraftsbalans
 - Växande framtidsområde



5. Solel

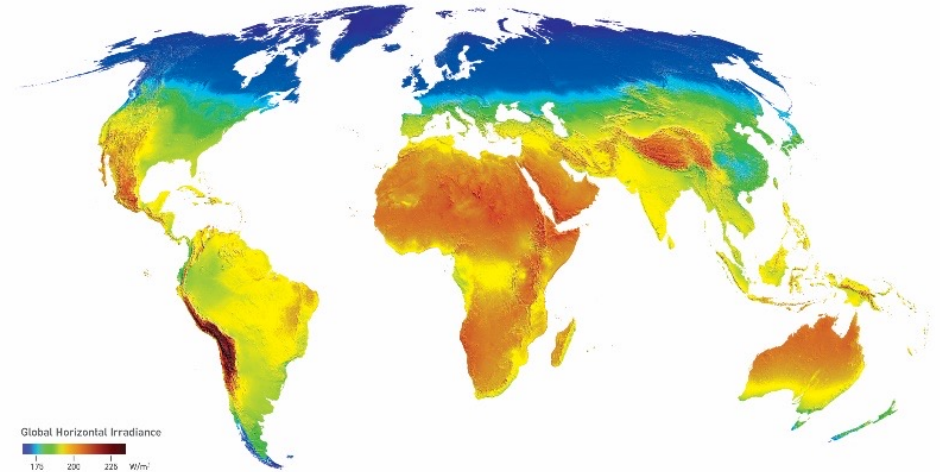
Om solen som energikälla

Solkraft

- **Sol till värme**
 - Värmer vatten
- **Koncentrerad sol till värme till el**
 - Ångturbin driver elektrisk generator
- **Solceller (Photovoltaic PV)**



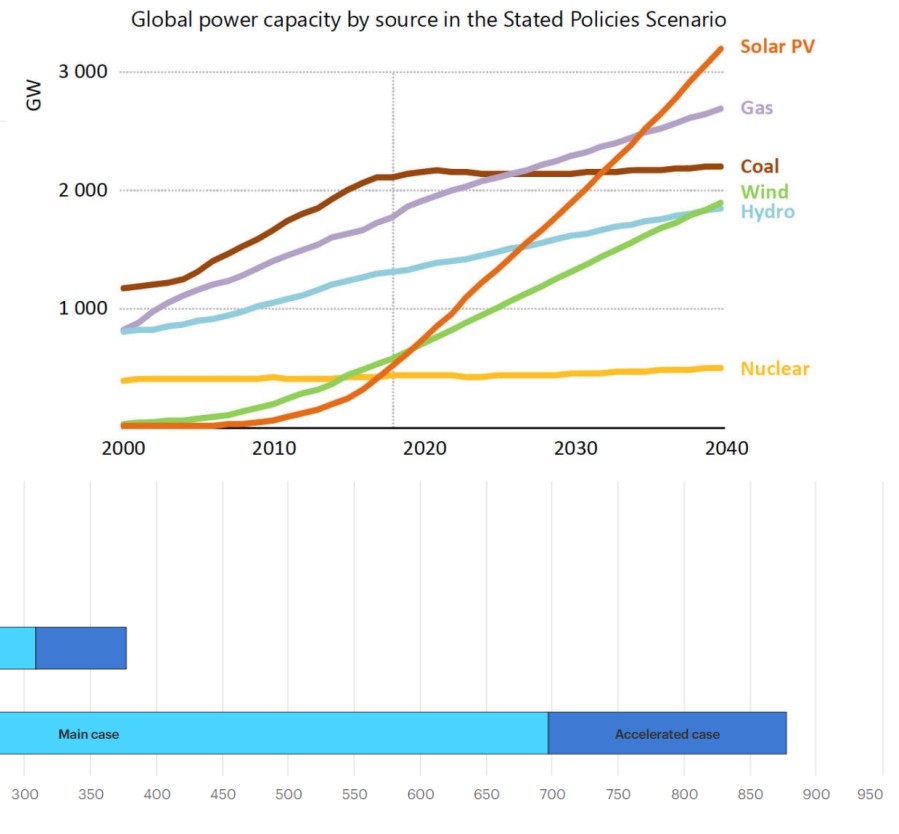
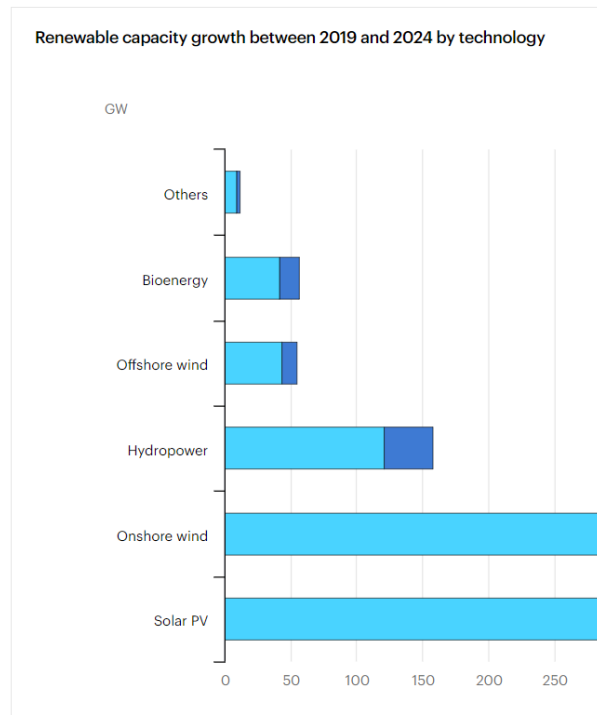
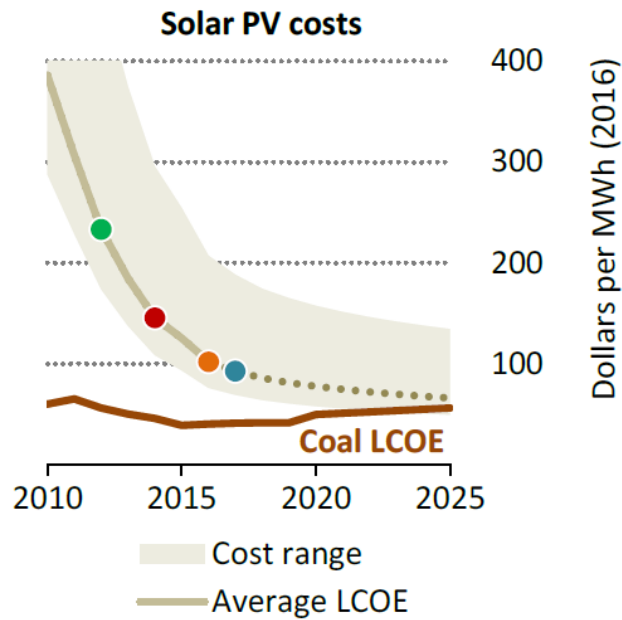
Solel växer snabbt



- Flest soltimmar kring ekvatorn, men används överallt
- Globalt större än vindkraft
- I Sverige ger solel ca 1000 fulleffekttimmar
- Teknik
 - Solcell (halvledare) ger DC
 - kraftelektronik omvandlar till AC med nätfrekvens

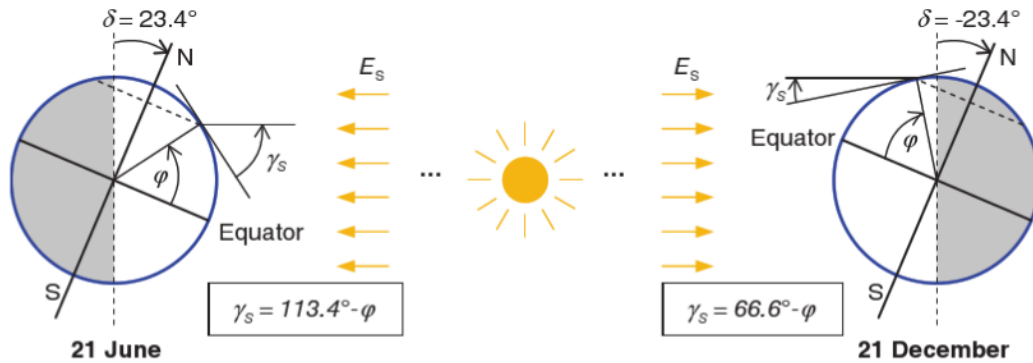
Tillväxt av solceller

[IEA – International Energy Agency](https://www.iea.org/)



Levelized cost of energy (LCOE)

Solens position - Följande positionsservo



Local solar altitude above horizon, γ_s

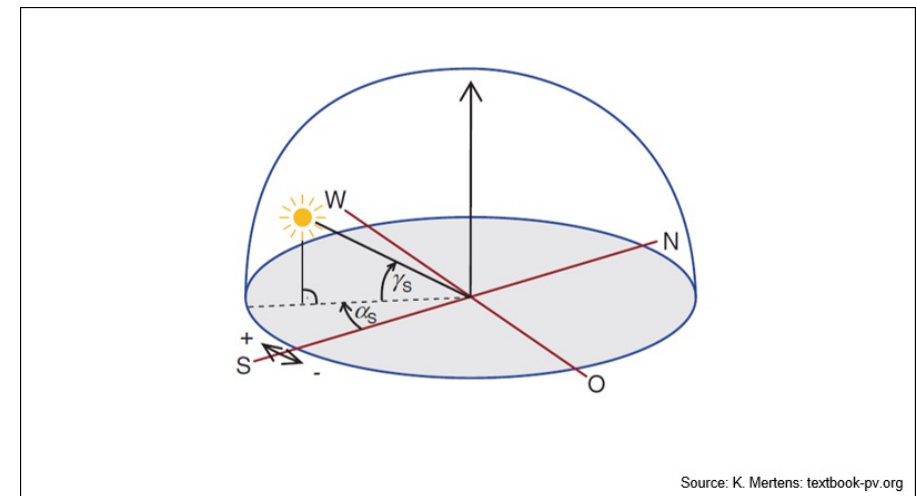
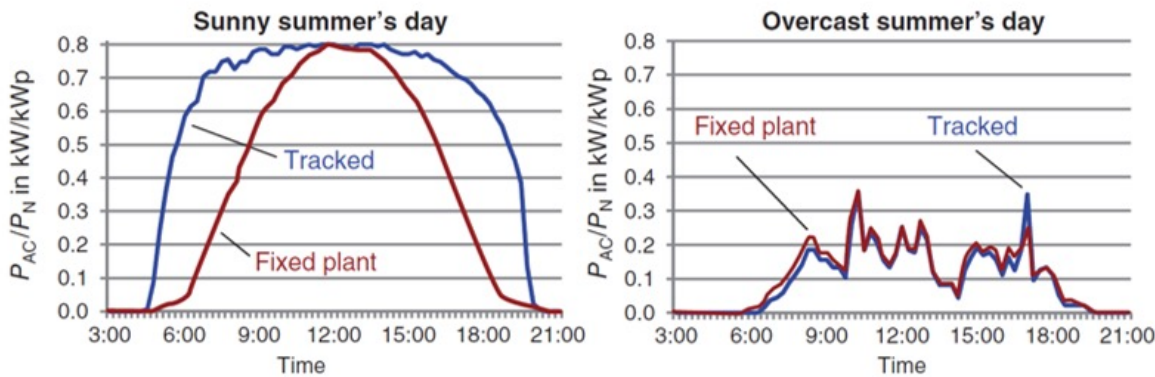
- Time of year
- Latitude

$$\gamma_{s_Max} = 113.4^\circ - \varphi.$$

$$\gamma_{s_Min} = 66.6^\circ - \varphi.$$

Azimuth of the sun, α_s

- Orientation of solar modules related to south



Source: K. Mertens: textbook-pv.org

Solstrålning i Linköping

Example:

Optimal angle

$$\beta = 39^\circ$$

$$H(39) = 3.0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{Yearly: } 365 \cdot H(39) = 1095 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$$

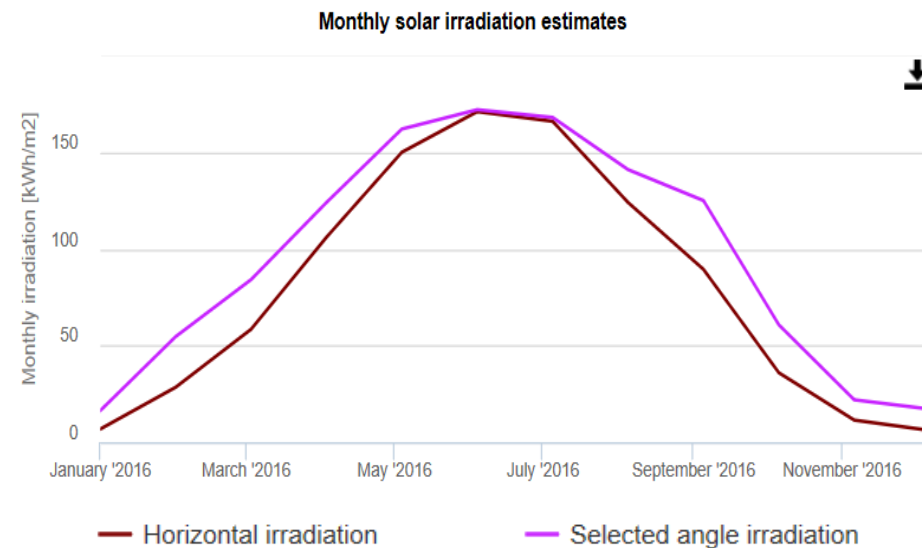
$$E_{LKPG} = 1 \text{ kW/m}^2$$

$$\frac{1095 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \right]}{1 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} = 1095 \text{ h/a}$$

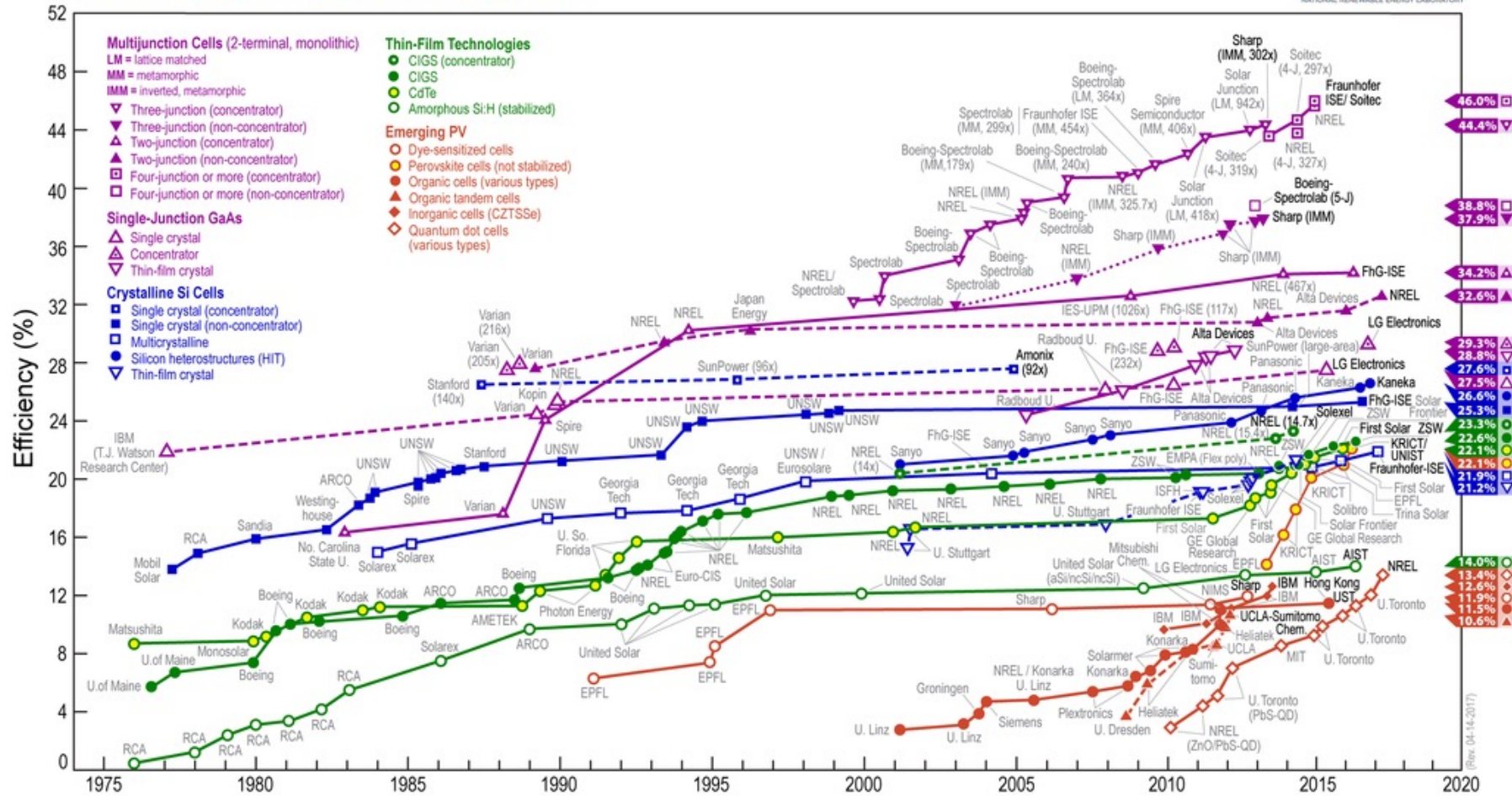
1095 full-load sun hours

PV-GIS

European Commission,
Institute of Energy and Transport (IET)



Best Research-Cell Efficiencies



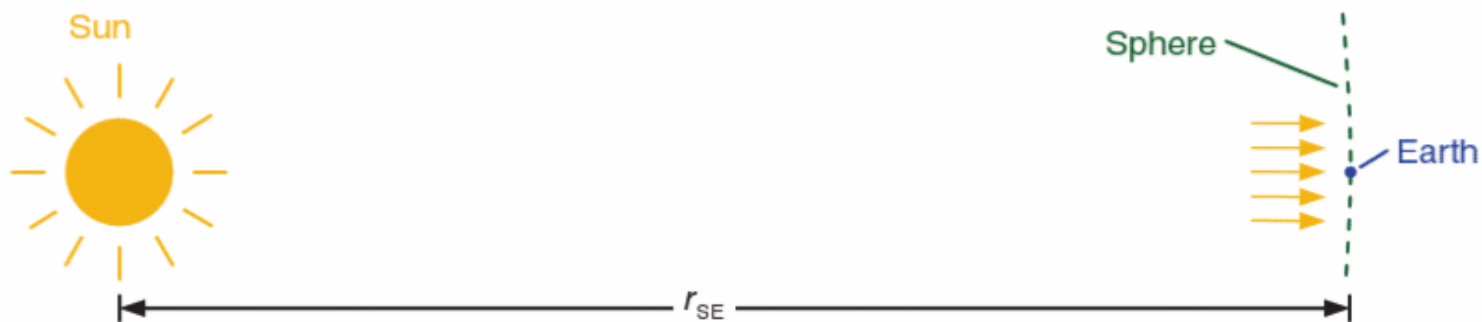
6. Solcellsteori

Teorin som är viktig för att förstå planering, installation, och drift.

Energikällan!

- Solens strålningskonstant, effekttäthet (power density, irradiance):
- $E_S = 1367 \text{ W/m}^2$

$$E_S = \frac{\text{Radiation power}}{\text{Area of sphere}} = \frac{P_{\text{Sun}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\text{SE}}^2} = \frac{3.845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (1.496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ W/m}^2$$



Instrålat spektrum

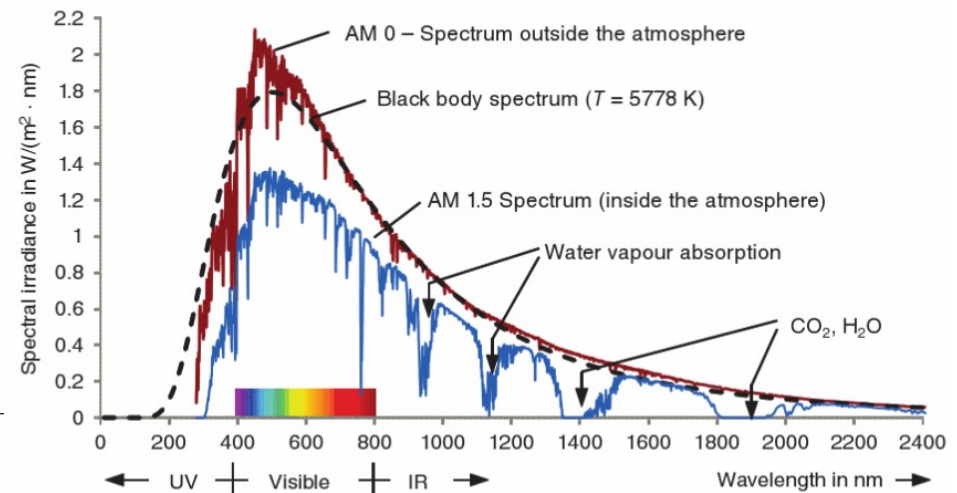
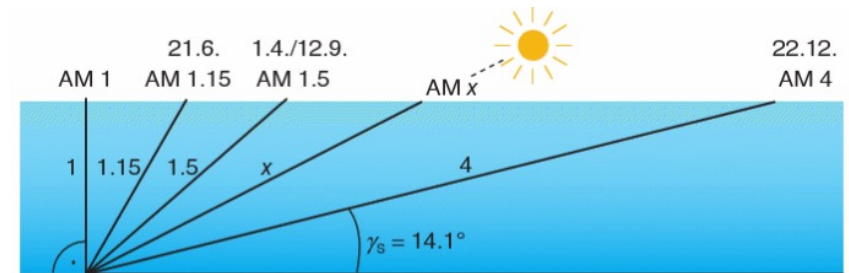
Spektrum och effekt förändras när ljuset passerar genom atmosfären

- Reflektion
- Absorption
- Spridning (Scattering)

Air mass (AM):

- The relative distance of light travel through atmosphere

- $E_{Direct}(AM0) = 1367 \text{ W/m}^2$
- $E_{Direct}(AM1.5) = 835 \text{ W/m}^2$
- $E_{Direct}(LKPG) \approx 1000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$



Solcellens grundfunktion & uppbyggnad

Halvledare, solstrålningen blir en strömkälla

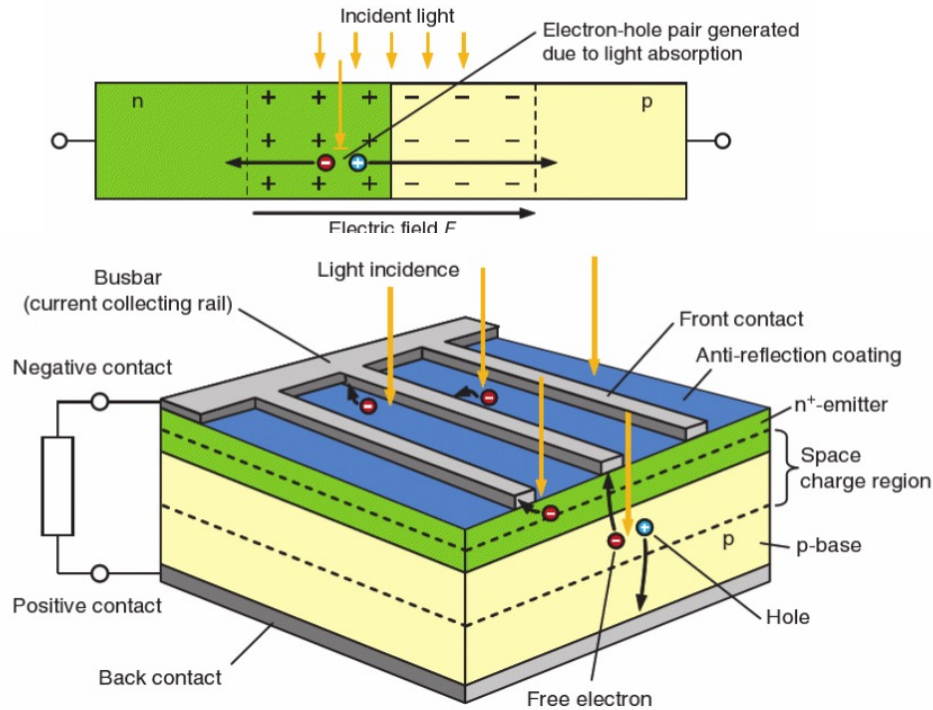


Figure 4.4 Typical silicon solar cell

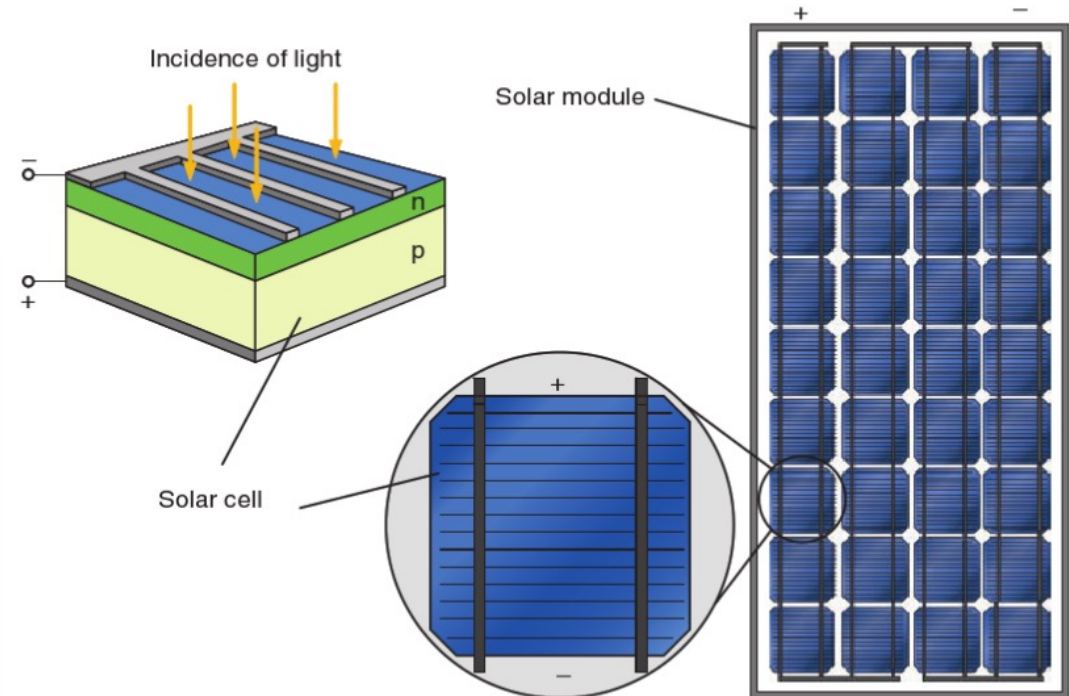
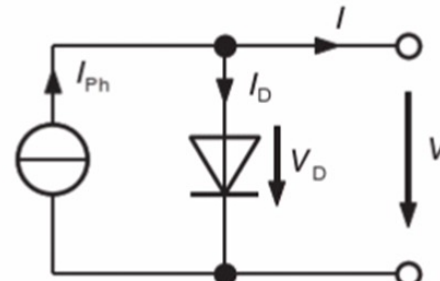


Figure 1.8 The solar cell and solar module as basic components of photovoltaics

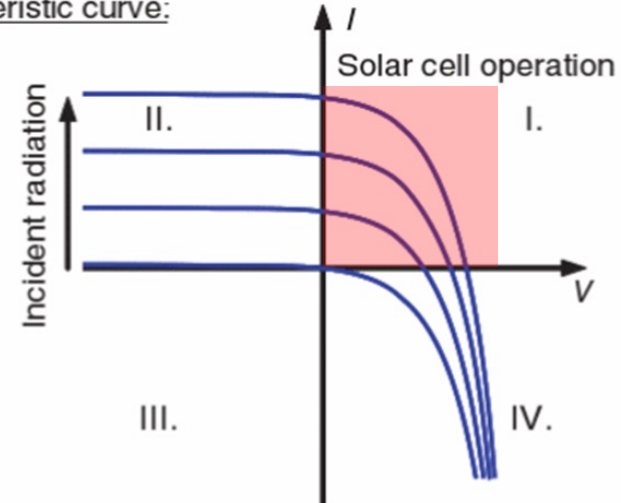
Grundfunktionen hos en solcell

- Solcellen definierad med generator referens
- Strömriktningen är ut ur cellen
- Endast första kvadranten används

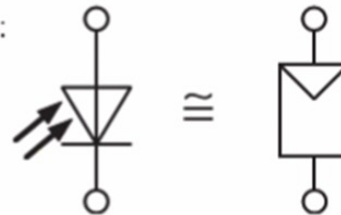
Generator reference-arrow system:



Characteristic curve:



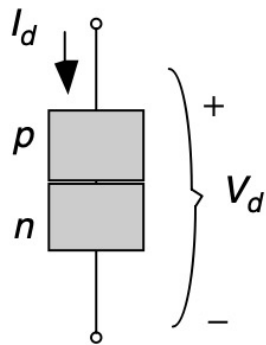
Solar cell symbol:



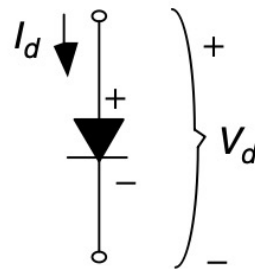
Steg 1 - Diodekvationen

- Karaktäristik för Diod: Shockley Equation $I_d = I_0 \left(e^{\frac{k}{qT} V_d} - 1 \right)$
 - k – Boltzmann's konstant ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
 - q – elektronladdning ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
 - I_0 – backström i mättnad ($\sim 10^{-12} \text{ A/cm}^2$)

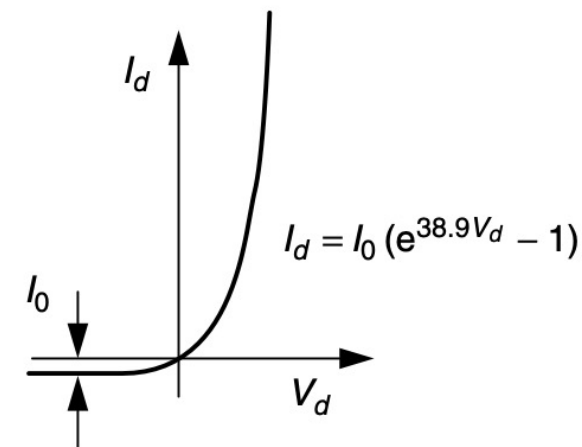
V_d Endast svagt beroende på strömmen ca 0.6-0.7 V



(a) p - n junction diode



(b) Symbol for real diode



(c) Diode characteristic curve

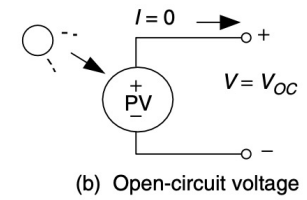
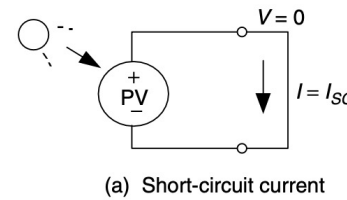
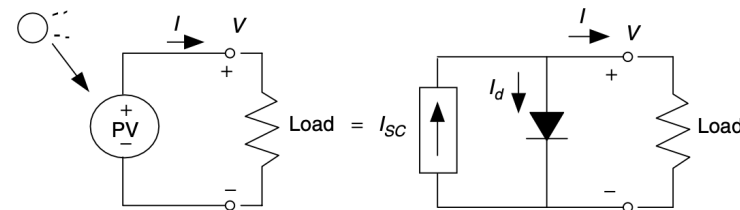
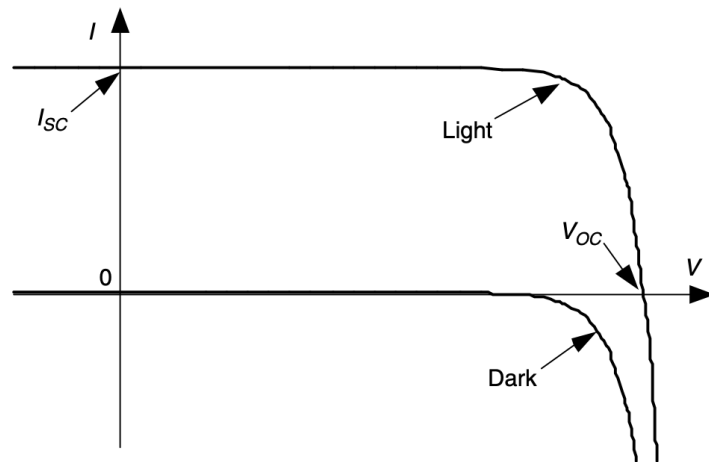
Nu vänder vi på kurvan $-I_d$

Steg 2a: Strömkälla + Diodekvationen

Strömmen I_{SC} ges av instrålning

$$I = I_{SC} - I_d$$

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{k}{qT} V_d} - 1 \right)$$



Steg 2b: Strömkälla + Diodekvationen

Strömmen I_{SC} ges av instrålning

$$I = I_{SC} - I_d$$

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{k}{qT} V_d} - 1 \right)$$

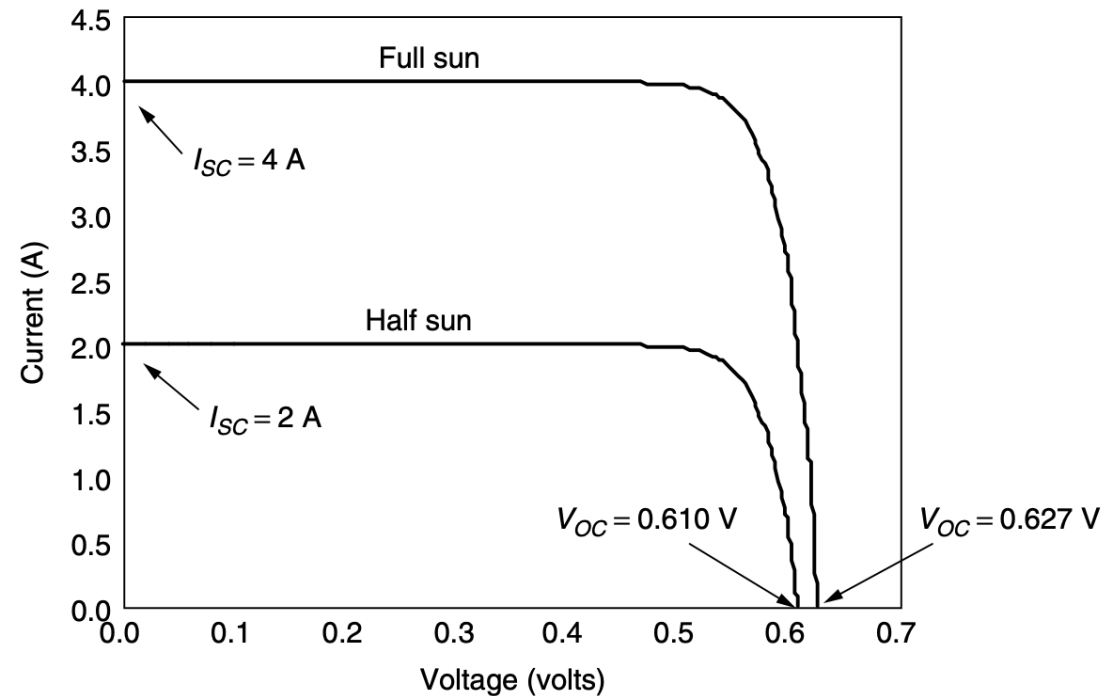
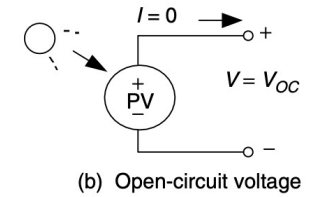
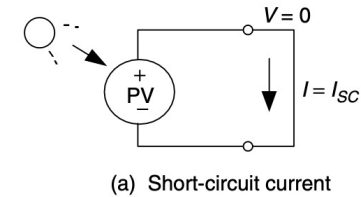
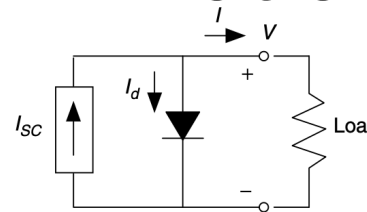
Lös för V_{OC} , $I = 0$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right)$$

vid 25° fås

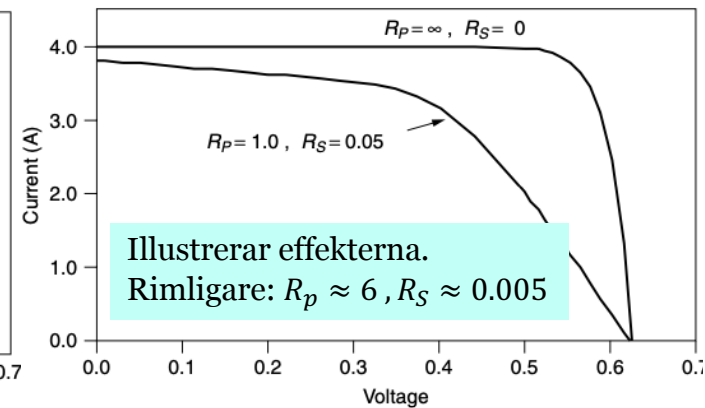
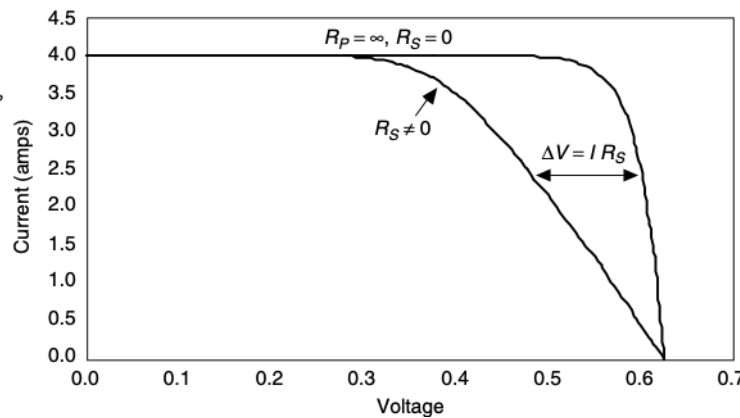
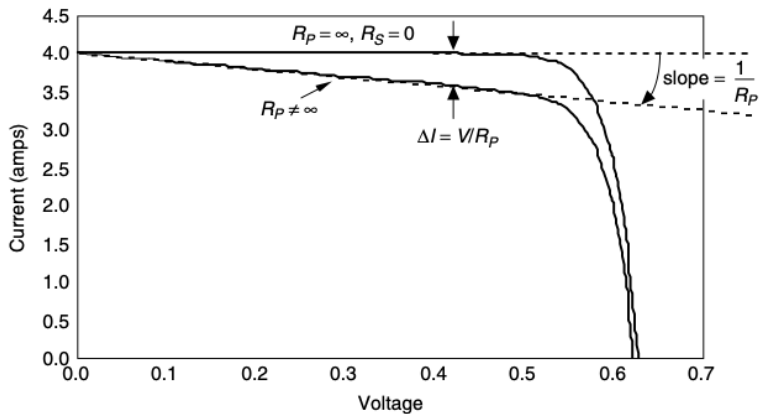
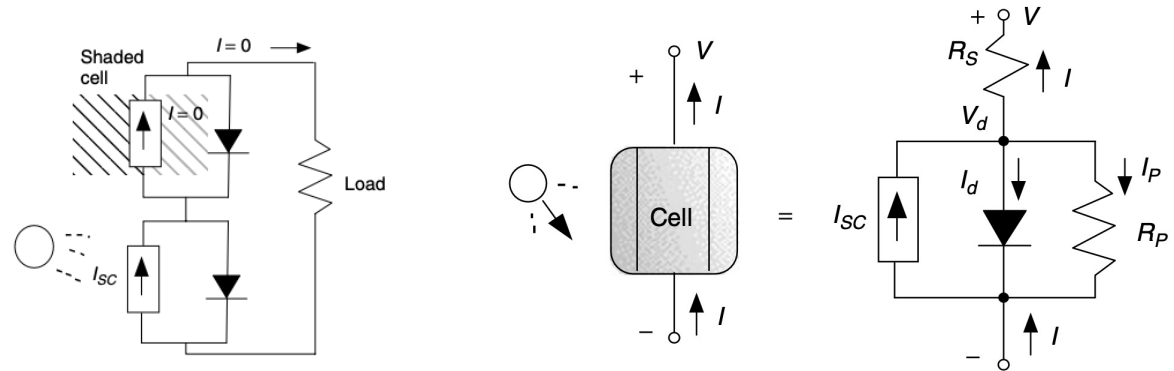
$$I = I_{SC} - I_0 (e^{38.9 V_d} - 1)$$

$$V_{OC} = 0.0257 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right)$$



Steg 3: Full cellmodell

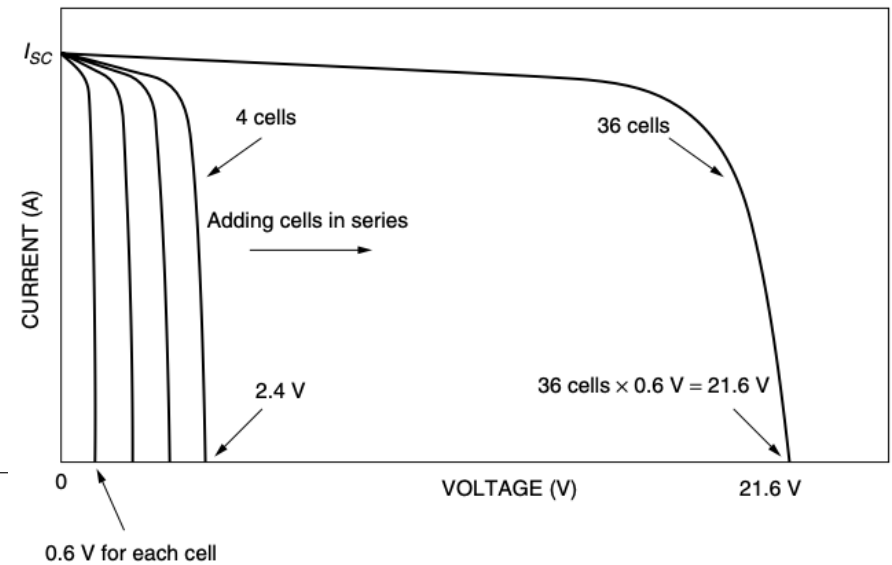
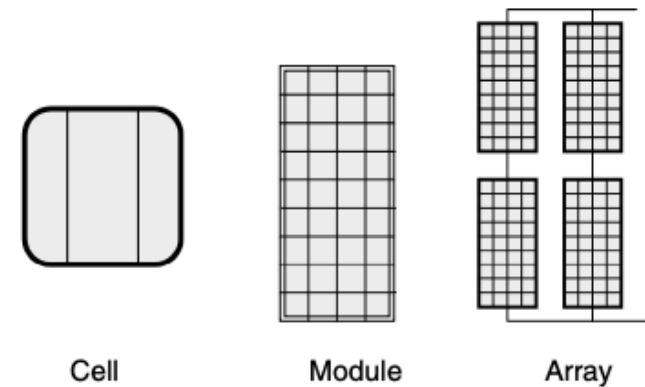
- Behöver två till funktioner
 - Skuggad solcell $I_{SC} = 0$
 - Diod blockerar
 - Ström går genom R_P
 - Resistiva serieförluster R_S



Cell till modul

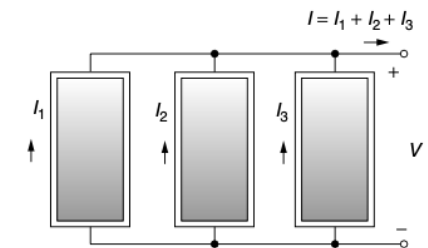
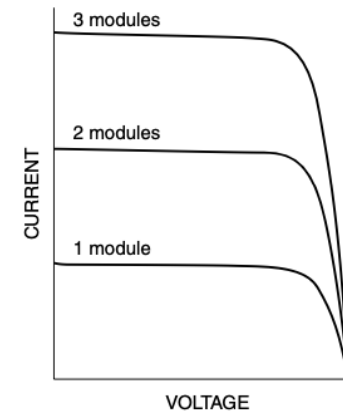
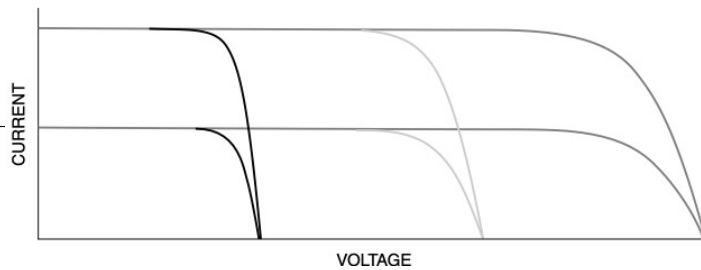
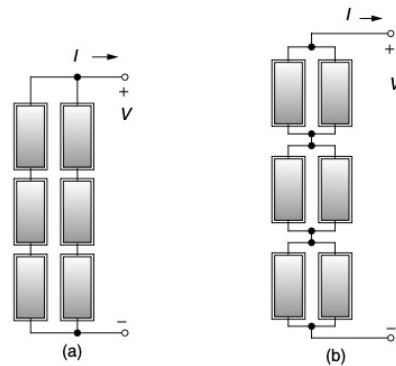
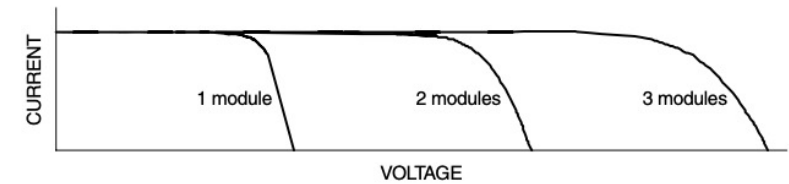
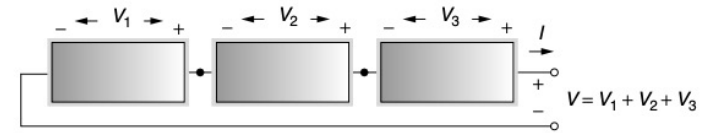
- Ökar modulspänning med seriekoppling
- En modul har ofta 36/72 celler
- Spänningarna adderas

$$V_m = n (V_d - I R_s)$$



Uppskalning modul till array

- Seriekoppling: Öka spänning
- Parallellkoppling: Öka ström
- Kombinera: Samma karaktäristik på a&b, men a) föredras i branschen.



Skuggning - En skuggad cell

- Spänning från en modul med en skuggad cell
 - n-1 celler är aktiva
- Omskriven uttryckt i normalspänning V

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_P + R_S)$$

$$V_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - I(R_P + R_S)$$

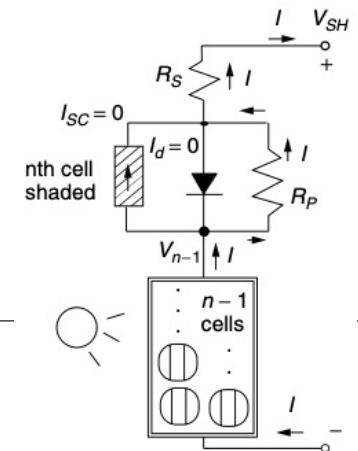
- Spänningsförlust i modulen

$$\Delta V = V - V_{SH} = V - \left(1 - \frac{1}{n}\right)V + I(R_P + R_S)$$

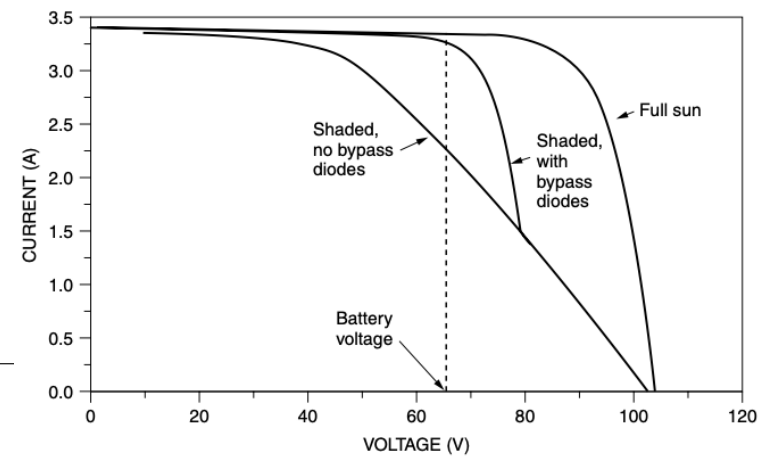
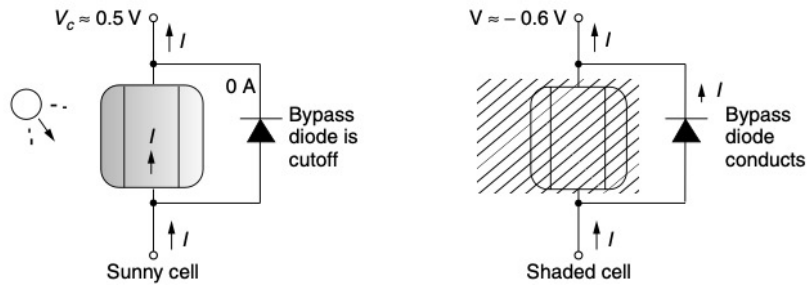
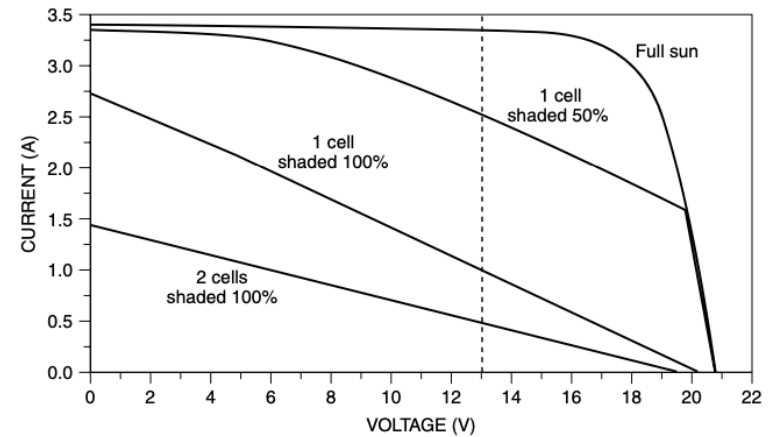
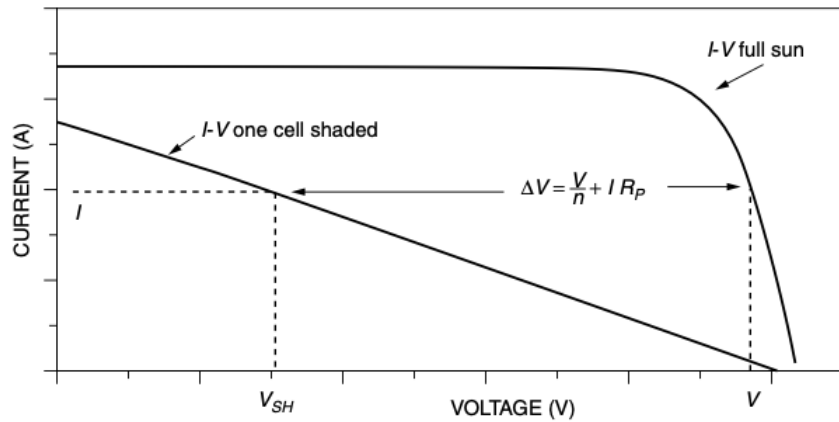
$$\Delta V = \frac{V}{n} + I(R_P + R_S)$$

$$\Delta V \cong \frac{V}{n} + IR_P$$

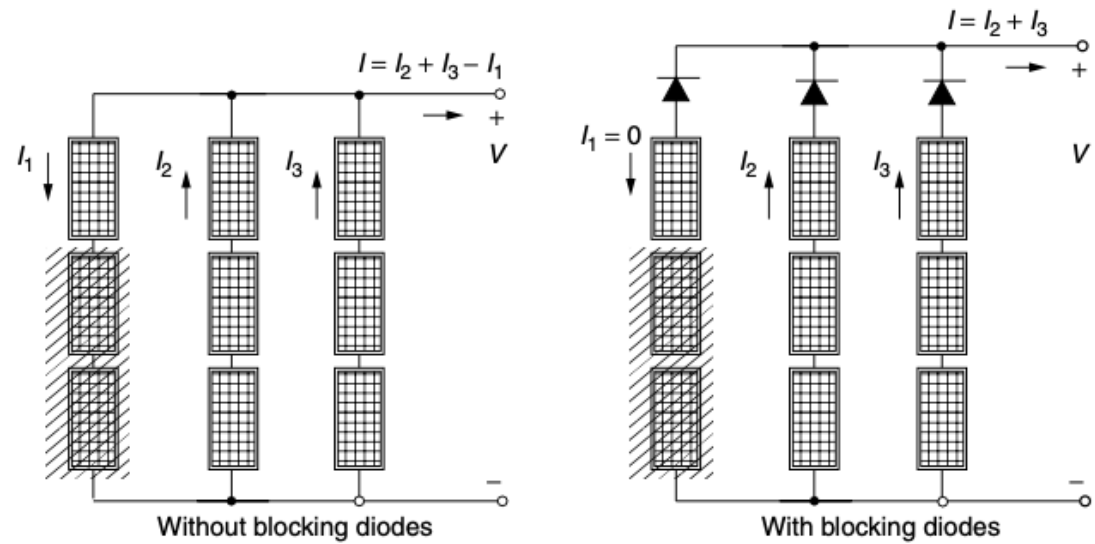
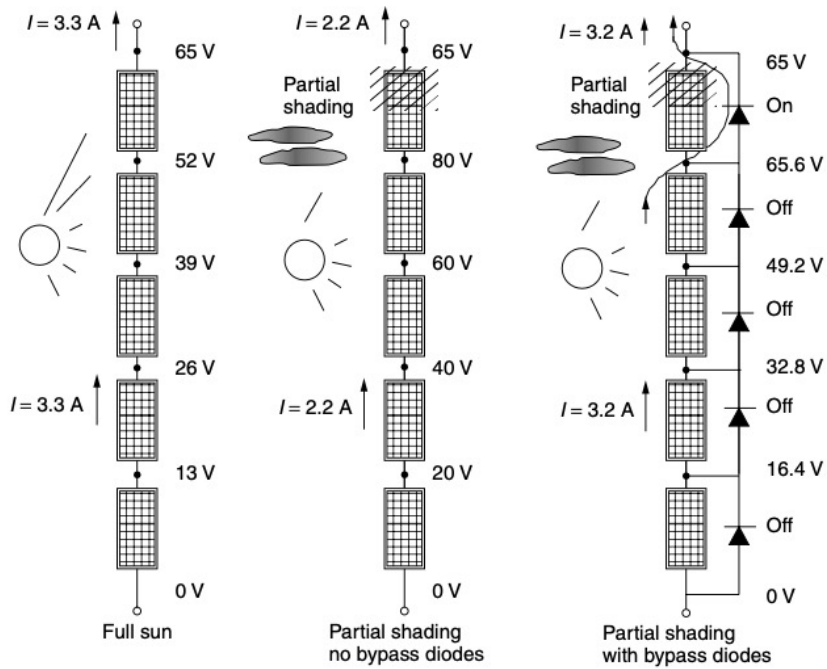
- R_P är mycket större än R_S



Påverkan av skuggning och motmedel



Mer Motmedel

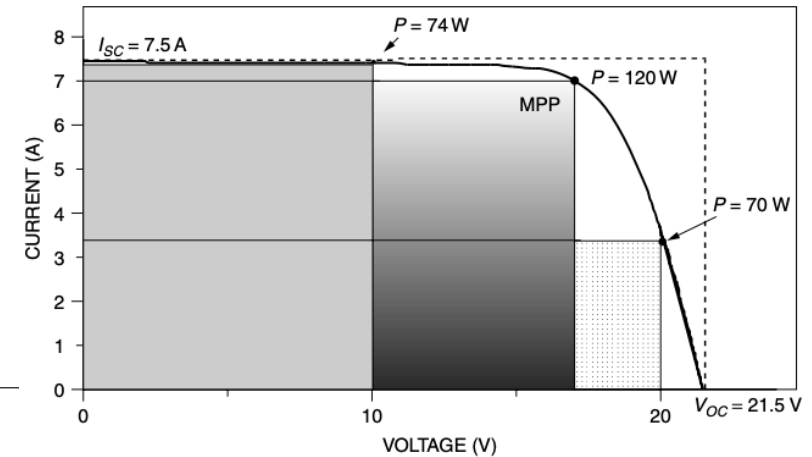
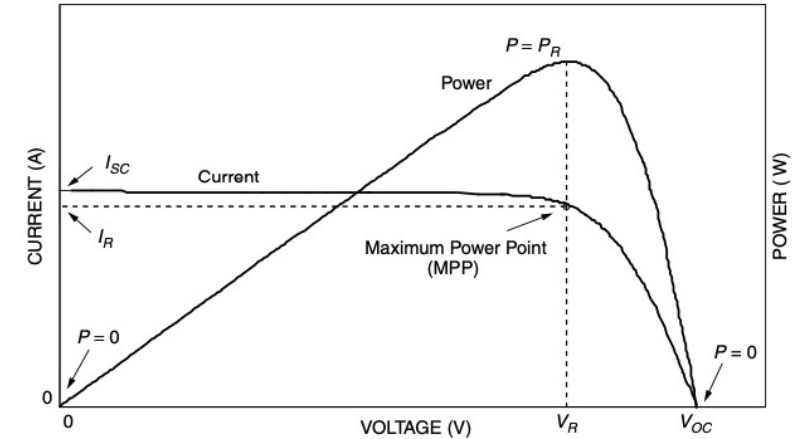
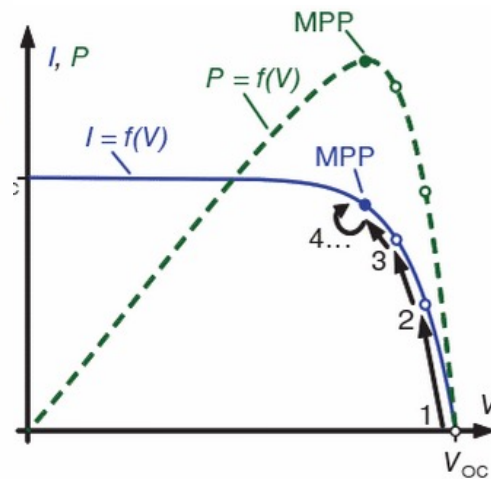
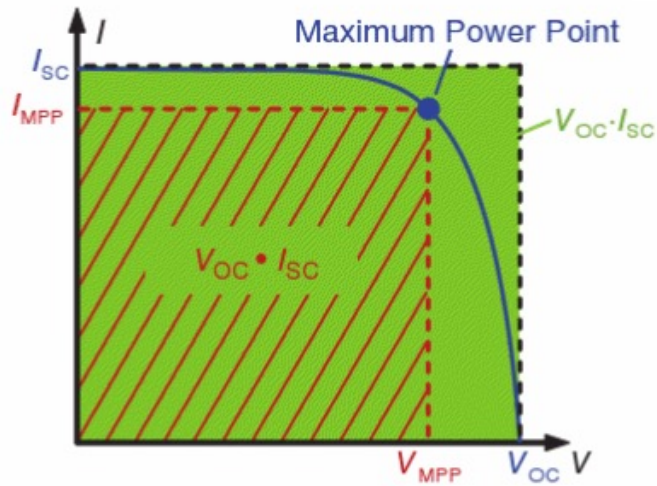


Maxeffekt - Maximum Power Point

- Fyllnads Faktor
- Effektivitet

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Opt}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot A}$$



Solcellssystem - kraftelektronik till nätet, ingen svängmassa

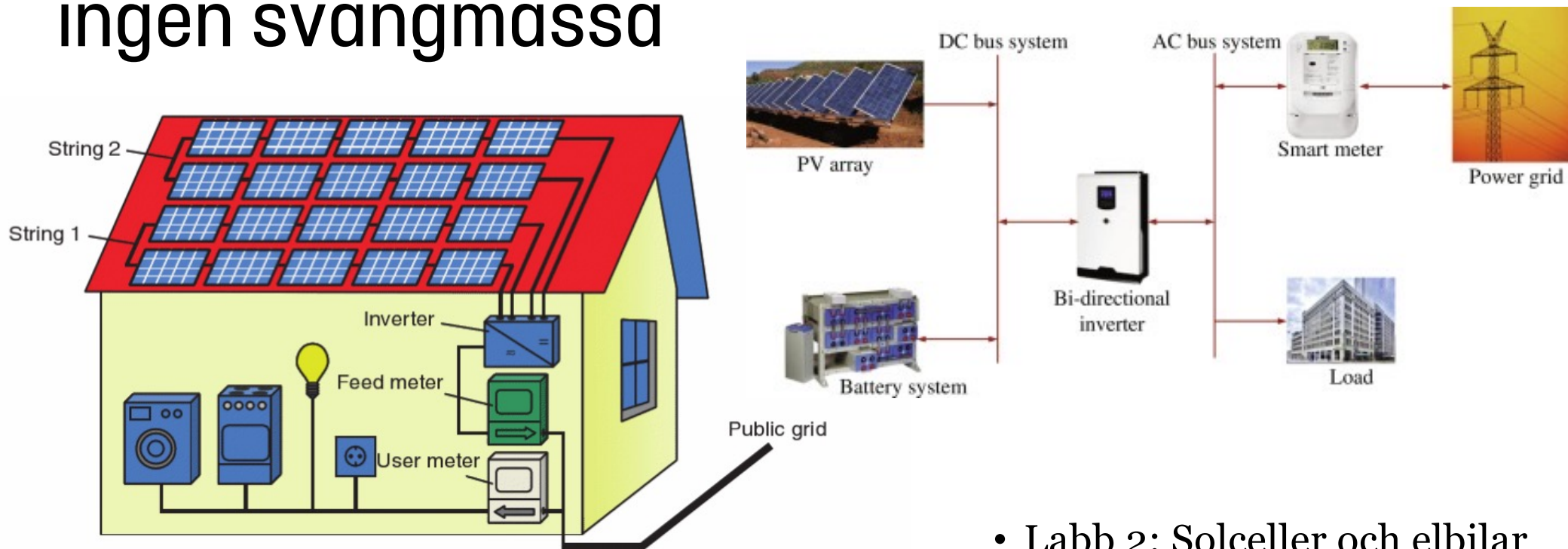


Figure 1.9 Structure of a grid-coupled photovoltaic plant. An inverter converts the direct current supplied by the solar modules into alternating current and feeds it into the public grid

- Labb 2: Solceller och elbilar i distributionsnät

Det finns ett temperaturberoende

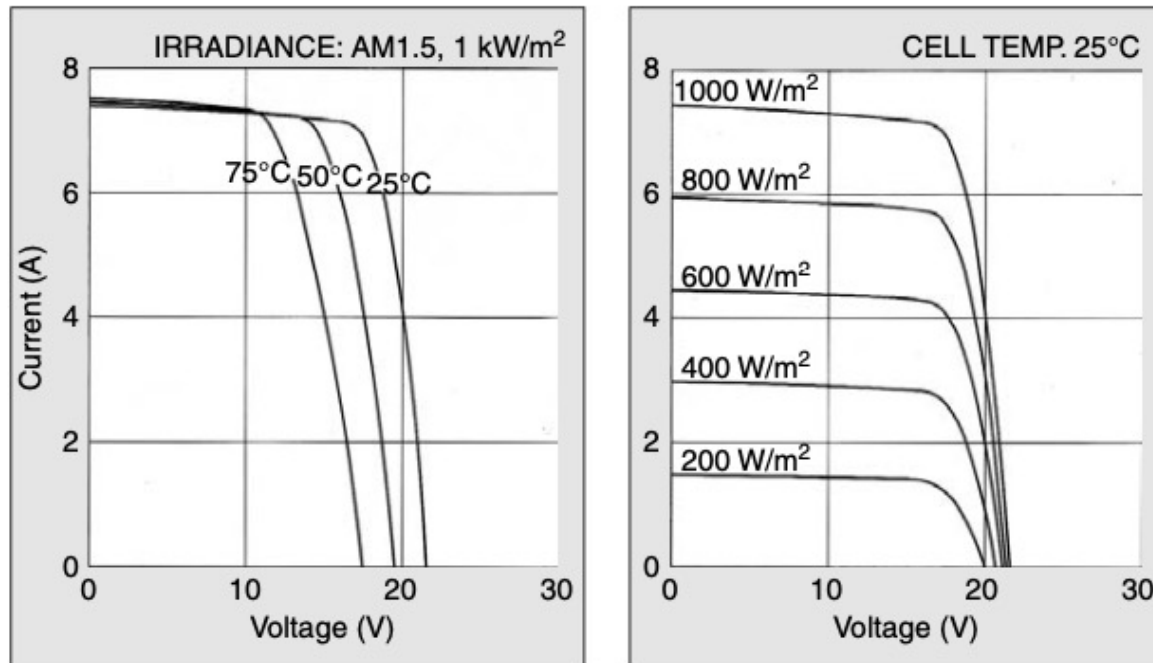
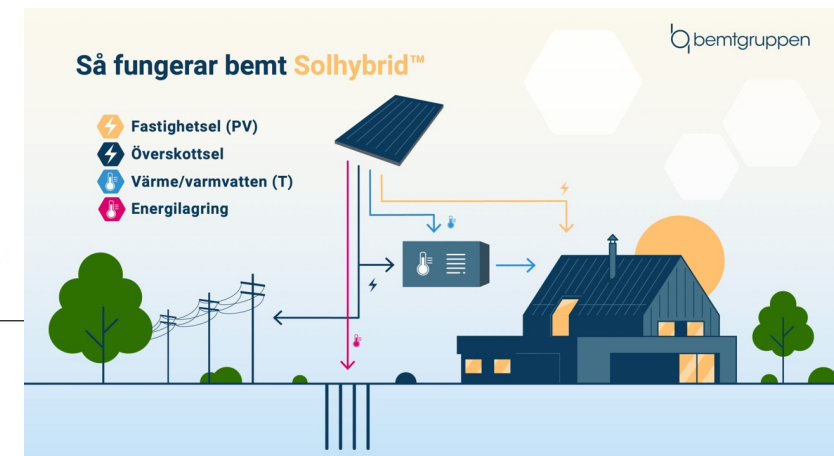


Figure 8.36 Current-voltage characteristic curves under various cell temperatures and irradiance levels for the Kyocera KC120-1 PV module.

- Kylning kan öka maxeffekten, effektiviteten och livslängden.
- Svensk SolHybrid kombinerar
 - Solcell
 - Solvärme
 - Bergvärme



7. Sammanfattning

Sammanfattning

Vindkraft

- Vindhastighet viktigast effekten beror kubiskt på vindhastigheten
- Fördelning av vindhastigheter över året viktigt för planering
- Installationshöjd påverkar vindhastighet (lägre påverkan över hav)
- Effektivitet kopplas till Betz gräns, i praktiken når turbiner ca 80% av denna
- Vindkraftverket styrs med vinklar och rotationshastighet baserat på vindhastighet
- Kraftelektronik särkopplar mekanisk och elektrisk frekvens
- Ingen naturlig svängmassa (kan möjliggöras med styrning)

Solceller

- Solen som energikälla, instrålad effekt per m²
- Solen slår loss elektroner och skapar en strömkälla som interagerar med en diod
- Full modell med strömkälla, diod och två resistorer
- En solcell genererar bara 0.6-0.7 V behöver skalas upp till moduler genom serie- och parallell-kopplade celler
- Skuggning kan skapa stora förluster, skyddsdiodes sätts in för att kopplaförbi skuggade celler
- Maximal uteffekt fås från den största inneslutna rektangeln
- Kraftelektronik behövs för att skapa växelspanning.
- Ingen naturlig svängmassa (behöver kompletteras med energilagring)

TSFS 17 Elkraftsystem

Föreläsning 7

<https://isy.gitlab-pages.liu.se/fs/courses/TSFS17/>

Lars Eriksson, Professor
ISY, Fordonssystem