

# Vedvarende energi



Vejle vindmølle. Kilde:<http://www.vejlemuseerne.dk>



Et udsnit af Rosborg gymnasiums solcelleanlæg.

Af Michael Andrew Dolan Møller

November 2019/april 2024.

## Indholdsfortegnelse

1. Vindmøller.....	3
1.1. Vindmøllens virkemåde.....	3
1.2. Vindens effektindhold.....	4
1.3. Udnyttelsen af vindens energi.....	5
Opgave 1. Betz' effektivitet.....	5
Eksempel.....	6
Opgave 2. Vindmøllers effekt ved Kentish Flats.....	6
Opgave 3. Nyttvirkning af vindmølle.....	7
Opgave 4. Vindmøllers effekt/Anholt havmøllepark.....	8
Opgave 5. Boligopvarmning med solfanger.....	8
2. Varmepumpen.....	9
Opgave 6. Vindmøller som varmegivere.....	9
Opgave 7. Bredsten-Balle kraftvarmeværk.....	9
Opgave 8. Tysklands energiproduktion.....	10
3. Solcellers effekt.....	11
Eksperiment 1. Solcelleanlæg.....	13
Opgave 9. Vandforsyning i Jequitinhonha-dalen.....	14
Opgave 10. Grøn effekt/energi i USA og Danmark.....	15
Opgave 11. Danmarks elproduktion.....	16

# 1. Vindmøller

## 1.1. Vindmøllens virkemåde

Når vinden blæser ind mod en moderne vindmølles 3 vinger, påvirkes disse dermed af kræfter, som får vingerne til at snurre rundt. Vingerne har en avanceret form, som kan ses på illustration 1 og 2. Hvis man betragter et tværsnit af en vindmøllevinge, ser man, at den minder ganske meget om en flyvinge.



Illustration 1: Vindmøllevinger. Kilde:  
<https://windenergy.dtu.dk/nyheder/2018/06/lange-vindmoellevinger-kræver-nye-kompositmaterialer?id=bc6e4779-b21a-4005-9776-10f5acb8a3fe>



Illustration 2: Vingeprofil. Kilde:  
<https://rival.dk/vingeprofil/>

Formen på over- og undersiden af vingen er uens, og det bevirker, at det tager kortere tid for luften at passere den ene side af vingen. Derfor falder trykket på den side i forhold til den anden. Tryk er som bekendt kraft pr. areal, så derfor vil trykforskellen mellem de to sider bevirke, at møllevingen påvirkes af en kraft, der sætter den i bevægelse. På illustration 2 vil den øverste del af profilen opleve det mindste tryk, og derfor vil der være en opadgående kraft på vingen – hvis den altså udsættes for en vindstrømning. På illustration 3, er vist en profil, som er anbragt i en vindtunnel, hvor man har tilsat røg til luften, så man kan se bevægelsen. Røgen starter i samme afstand på venstre side af billedet, men efter et tidsrum er røgen, som passerer øvre del af vingen nået meget længere end røgen, der passerer nedre del af vingen. Vingen oplever en opadgående kraft.

Når møllen igangsættes drejes vingerne, så vinden blæser vinkelret ind på vingeprofilen, dvs. på illustration 2 blæser det ind fra venstre side. Efterhånden som rotationshastigheden vokser, drejes vingeprofilen, så den vender ligesom vist på illustration 1, hvor luften bevæger sig parallelt med rotationsaksen. *Kanten* af profilen

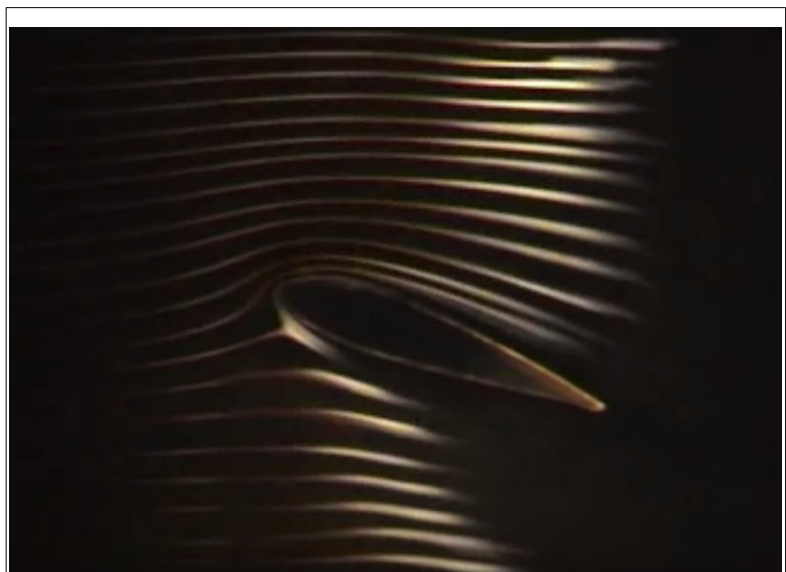


Illustration 3: Simulering af Holger Babinsky, University of Cambridge. Simuleringen er en del af en video. Kilde:  
<https://www.youtube.com/watch?v=e0I31p6RlaY>

bevæger sig stadigvæk ind i vinden, så opdriften fortsætter. Læseren anbefales at se videoen, der er henvist til i illustration 3.

Princippet bag virkemåden kaldes for *Bernoullis princip*, og den kan eleven for eksempel arbejde videre med i et SRP-projekt.

## 1.2. Vindens effektindhold

En vindmølle producerer elektrisk effekt, ved at vinden får møllevingerne til at snurre. Akslen, som er forbundet til vingerne, er forbundet til en generator, som omdanner bevægelseseffekten i akslen til elektrisk effekt. Her vil vi udlede et udtryk for den effekt, som er til rådighed i vinden.

Formlen for kinetisk energi af et legeme med massen,  $m$ , og som bevæger sig med hastigheden,  $v$ , er givet ved  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ . Vi kan finde hastigheden ved at montere et anemometer på vindmøllens tårn. Et klassisk anemometer kan du se på illustration 4.

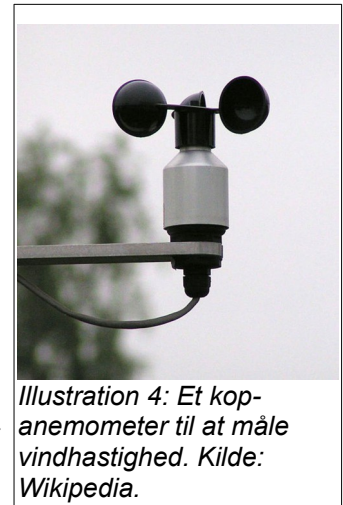


Illustration 4: Et kop-anemometer til at måle vindhastighed. Kilde: Wikipedia.

Effekten,  $P$ , er defineret som den omsatte energi,  $\Delta E$ , pr. tid,  $\Delta t$ . Dvs:

$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ . I vores tilfælde er  $\Delta E$  den kinetiske energi, og derfor fås:

$P_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \Delta t}$ . Det er umuligt at måle massen af den luft, der passerer møllevingerne, men vi kan regne massen ud, som funktion af vindhastigheden og overfladearealet af møllevingerne.

Betragt illustration 5. Hvis en vindmøllevinge har længden  $R$  er tværsnitsarealet af den luftstrøm, som passerer møllen givet ved  $A = \pi \cdot R^2$ . Hvis vindhastigheden er  $v$ , vil luften i tidsrummet,  $\Delta t$ , bevæge sig afstanden  $s = v \cdot \Delta t$ . Derfor må størrelsen af det rumfang luft,  $V$ , der passerer møllen i tidsrummet  $\Delta t$  være givet ved udtrykket  $V = s \cdot A = v \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot R^2$ .

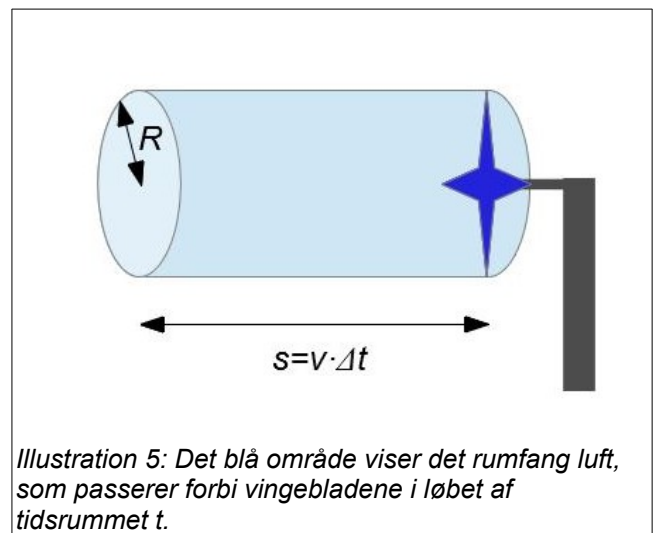


Illustration 5: Det blå område viser det rumfang luft, som passerer forbi vingebladene i løbet af tidsrummet  $t$ .

Hvis luftens massefylde udtrykkes ved symbolet,  $\rho$ , får vi, at massen af luft, der passerer møllevingerne i tidsrummet  $\Delta t$ , er givet ved  $m = \rho \cdot V = \rho \cdot v \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot R^2$ .

Altså kan vi nu opskrive et færdigt udtryk for den effekt, som vinden indeholder.

$$P_{vind} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot v \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^2}{2 \cdot \Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3. \quad (1)$$

Ovenstående effekt er den teoretiske værdi – i virkeligheden er det ikke alt luften, der rent faktisk rammer møllevingerne. Man kan heller ikke bremse luften helt ned – det ville jo øge trykket på

bagsiden af møllen, og så kan ny luft ikke bevæge sig forbi møllevingerne. Derfor kan man ikke udnytte al luftens effekt.

Det vigtige i formlen er dog, at den effekt, der er til rådighed afhænger af kvadratet på vingernes størrelse samt vindhastigheden i 3. potens. Derfor vil selv en lille ændring i vingestørrelse eller vindhastighed få stor betydning for den effekt, som er til rådighed.

De kraftigste og mest konstante vinde blæser på havet, og derfor bygger man i disse år flere havmølleparker. Havmøller kan også bygges meget store, da støj og lysrefleksioner ikke generer nogen. Ulempen er, at der skal bygges fundamenter under vandet, hvilket er dyrt, og det er også dyrere at komme til møllerne, når de skal serviceres.

### 1.3. Udnyttelsen af vindens energi

Hvis man ønsker en mere præcis bestemmelse af hvor meget af vindens energi, man teoretisk set kan udvinde fra luften, skal man kende til *Betz' effektivitet*,  $C_P$ . Formlen lyder som følger:

$$C_P = \frac{1}{2} \cdot (1 - \beta^2) \cdot (1 + \beta), \quad (2)$$

hvor  $C_P = \frac{P_{mølle}}{P_{vind}}$ , og  $\beta = \frac{v_{efter}}{v_{før}}$ .  $v_{før}$  og  $v_{efter}$  angiver vindens hastighed hhv. før og efter den rammer møllen.

Tyskeren Albert Betz (1885-1968) offentliggjorde udledelsen af formel (2) i 1920 [Elvekjær & Nielsen skriver dog, at det skete i 1927], og udledelsen<sup>1</sup> kan eftergøres af eleven, såfremt emnerne *Newtons love*, *impuls (bevarelse)* og *arbejde* er forstået.

Betz var dog ikke den eneste, der udledte formelen. F. Lanchester fra England udledte den allerede i 1915 og russeren N. Zhukowsky gjorde det også i 1920.

#### Opgave 1. Betz' effektivitet

- Tegn en  $(\beta, C_P)$ -kurve og aflæs topunktet.
- Hvad er den størst mulige effektivitet en mølle kan have?
- Hvor stor er vindhastigheden bagved møllen i forhold til foran?



Illustration 6: 2 Vestas V90-3,0 MW møller. Kilde: Vestas.

<sup>1</sup> Se f. eks. Finn Elvekjær og Henry Nielsen: "Vindenergi og vindmøller", F & K-forlaget, 1980 eller [https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law)

I opgaven ovenfor ser man, at der er ét toppunkt på grafen, og umiddelbart er det den værdi vindmøllefabrikanter går efter, når de udvikler nye vindmølle designs. Moderne vindmøller har i dag effektiviteter på ca. 0,50, men for en given mølle er effektiviteten faktisk ikke den samme, da man for at beskytte møllen ved høje vindhastigheder drejer vindmøllevingerne, og det får effektiviteten til at falde. Det ses tydeligt på effektkurven på illustration 7.

Når man aflæser effektiviteten af en vindmølle, skal man være varsom. Nogle gange er effektiviteten forstået som den procent af vindeffekten, der udnyttes målt i forhold til den maksimalt størst mulige udnyttelse, dvs. 59,3 %.

## Eksempel

Vindeffekten er  $P_{\text{vind}}$ . En bestemt mølle udnytter for eksempel 40 % af denne effekt, dvs.  $P_{\text{mølle}} = 0,40 \cdot P_{\text{vind}}$ . Vi kan sige, at nyttevirkningen eller effektiviteten er 40 %.

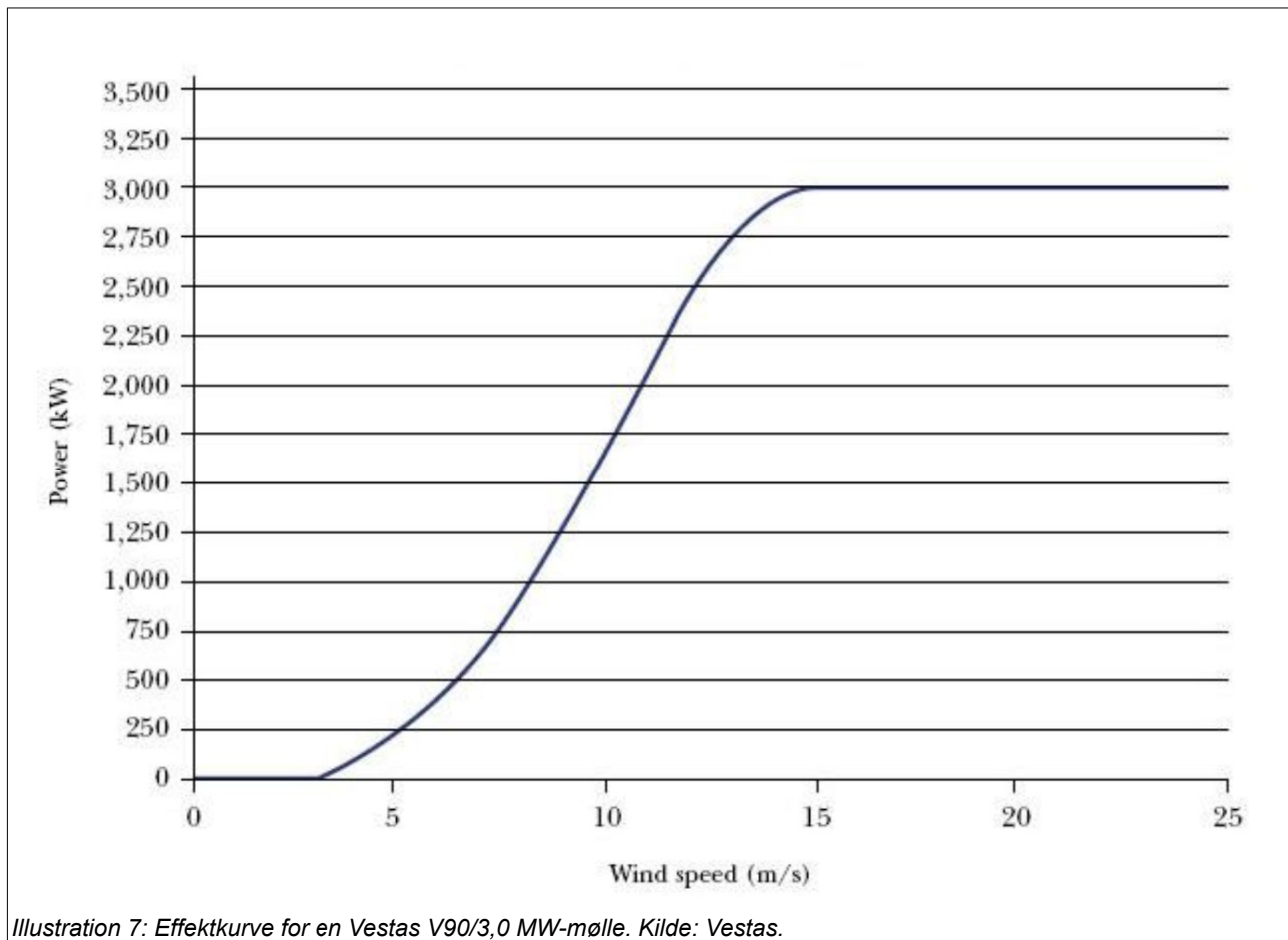
Den teoretiske størst mulige effektudnyttelse er ifølge Betz' lov 59,3 % af vindeffekten. (Se opgave 1.) Derfor gælder, at  $P_{\text{maks}} = 0,593 \cdot P_{\text{vind}}$ . En vindmølleproducent vælger derfor at beregne effektiviteten til  $\eta = \frac{P_{\text{mølle}}}{P_{\text{maks}}} = \frac{0,40 \cdot P_{\text{vind}}}{0,593 \cdot P_{\text{vind}}} = 67 \%$ .

## Opgave 2. Vindmøllers effekt ved Kentish Flats

I denne opgave skal du undersøge forskellige egenskaber ved en vindmølle fra Vestas.

En V90-3,0 MW havmølle producerer, som navnet vel antyder, maksimalt 3,0 MW. Møllens vingspan er  $d = 90$  m. Møllen har en levetid på mindst 20 år.

Møllen producerer energi afhængig af mængden af vind. På illustration 7 kan du se en graf, der viser sammenhængen mellem vindhastighed og produceret effekt. Ved Kentish Flats i England, er der opsat 30 V90'ere.



- Hvor stor en vindhastighed kræves, før møllerne begynder at lave elektrisk energi?
- Ved 25 m/s standser møllerne, så vingerne ikke løber løbsk. Find ud af hvordan meteorologerne betegner denne vindstyrke. (Altså – er det orkan, let vind, kuling osv.)
- Den årlige energimængde fra mølleanlægget er anslået til 280 GWh. Hvor stor er middel-effekten fra parken? Og hvor meget pr. mølle?
- Hvor mange 9 W-pærer kan en enkelt mølle holde tændt?

At bygge en mølle, flytte den hen til produktionsstedet og opsætte den samt at servicere møllen koster også energi. Vestas har beregnet denne energimængde til 8098 MWh.

- Beregn hvor stor en procentdel af den dannede vindenergi, der skal gå til at dække produktionen og servicen af parken.
- En V90-mølle koster inkl. opsætning ca. 20 millioner kr. Hvad koster en kWh elektrisk energi, når den er produceret i Kentish Flats?
- Hvilke andre udgifter i forbindelse med elproduktionen, kan du udtænke?

### Opgave 3. Nyttevirkning af vindmølle

På illustration 7 er angivet en kurve, der viser hvordan produktionen af elektrisk effekt afhænger af vindhastigheden.

- Aflæs effekten for vindhastighederne: 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s og 25 m/s.

- b) Vingefanget har en radius  $R = 45$  m. Lufts massefylde ved  $20$  °C er  $1,205$  kg/m<sup>3</sup>. Beregn hvor stor en effekt luften kan levere ved de vindhastigheder, som er anført i spørgsmål a.
- c) Beregn nyttevirkningen af vindmøllen ved de anførte hastigheder.

### Opgave 4. Vindmøllers effekt/Anholt havmøllepark

Anholt havmøllepark<sup>2</sup> består af 111 vindmøller, der hver kan levere 3,6 MW elektrisk energi. Møllerne er leveret af Siemens Gamesa. (Model: SWT 3,6-120). De første 20 TWh elektrisk energi koster 1,051 kr/kWh. Derefter bliver prisen solgt på alm. markedsvilkår. Det er anslået, at det tager 12 år at producere 20 TWh.

- a) Beregn den maksimale effektproduktion for vindmølleparken.
- b) Beregn den gennemsnitlige effektproduktion for vindmølleparken. Hvorfor er den gennemsnitlige effektproduktion mindre end den oplyste?
- c) Parken kostede 10 milliarder kr. at opføre. Hvad er prisen for en enkelt mølle inkl. opsætning? (Den høje pris skyldtes, at parken skulle opføres meget hurtigt, og at der var skrappe udbudskrav mht. bøder ved forsinkelser af byggeriet.)

Man anslår, at parken vil reducere CO<sub>2</sub>-udledningen med  $1,3 \cdot 10^9$  kg/yr ift. alm. kulraft.

- d) Beregn reduktionen af kuldioxid pr. dansker pr. år.
- e) Beregn massen af den kul, der spares pr. år såfremt du antager perfekt forbrænding af kul. (Molarmasser kan du slå op i Databogen.)

En mølles nacelle, dvs. den bygning med generatoren, der står ovenpå vindmølletårnet, er anbragt 81,6 m over havniveau, og vindmøllespidserne når op i en højde på 141,6 m.

- f) Benyt Google Earth til at vurdere hvor højt et menneske er over havniveau, hvis han står i Stensmark lidt nord for Grenå.
- g) Benyt Google Earth til at måle afstanden fra parken til Stensmark.
- h) Benyt Pythagoras' sætning, samt kendskab til Jordens radius ved parkens breddegrad<sup>3</sup> til at vurdere hvor langt væk man kan se vindmølleparken, hvis man står i samme højde over havet som i Stensmark.

### Opgave 5. Boligopvarmning med solfanger

En familie bruger 150 MJ om dagen til opvarmning. Familien investerer i en solfanger<sup>4</sup>, der monteres på taget af deres hus. Se illustration 8. Solfangeren har et areal på 10 m<sup>2</sup> og i gennemsnit indstråles 300 W/m<sup>2</sup> i 4 timer om dagen. Vi antager, at al den indstrålede energi absorberes af vandet i solfangerens rør. Energien fra vandet i solfangeren oplagres i en tank, der indeholder 1000 L vand.

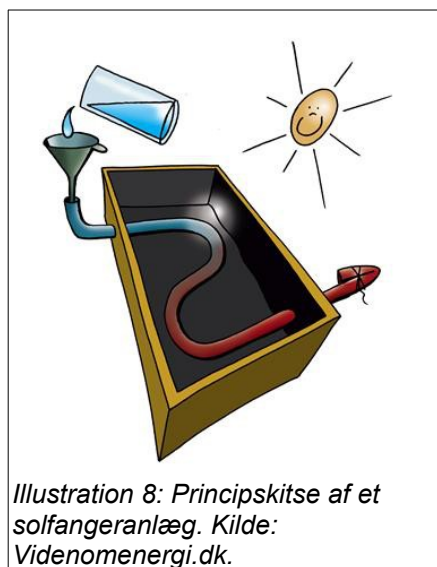


Illustration 8: Principskitse af et solfangeranlæg. Kilde: Videnomenergi.dk.

- a) Hvor meget energi lagres i gennemsnit om dagen i tanken?

<sup>2</sup> [Ørsted.com](http://Ørsted.com)

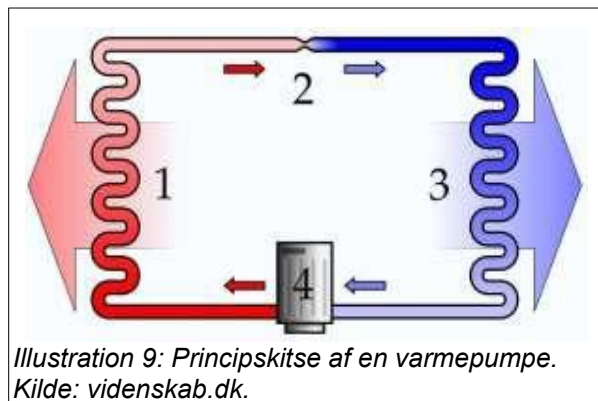
<sup>3</sup> Overvej parameterfremstillingen for en ellipse, og benyt ækvator- og polradius samt stedet breddegrad til at finde R(b).

- b) Hvilken temperaturstigning får vandet, såfremt der ikke udstråles energi til omgivelserne?
- c) Hvor mange procent af familiens varmeforbrug kan teoretisk set dækkes af solenergien fra anlægget?

## 2. Varmepumpen

En varmepumpe er et apparat, som kan transportere varme fra et sted til et andet. Der bruges en kompressor til apparatet, og den bruger elektrisk energi. En principskitse kan ses på illustration 9.

Ved (1) strømmer en varm gas, som afleverer sin varme til f.eks. en tank med vand. Ved (2) udvides gassen, og dens temperatur falder derfor. Ved (3) glider den kolde gas forbi et område, som er varmere end gassen. Derfor overføres varme til gassen. Ved kompressoren (4) komprimeres gassen, så dens temperatur stiger. Alt i alt har varmepumpen altså flyttet varme fra (3) til (1). Prisen har været den elektriske energi, som kompressoren (4) har omdannet.



En god varmepumpe kan flytte 3-3,5 kWh varme med et elforbrug på 1 kWh. En af de smarte ting ved en varmepumpe er også, at den kan flytte varmen fra f.eks. jorden ind i et hus; en proces, der aldrig kunne foregå af naturlig vej. Rosborg gymnasiums blok 6 har i øvrigt et tilsvarende system indbygget i de piloteringspæle, som bygningerne står på.

### Opgave 6. Vindmøller som varmegivere

I takt med at vi får flere og flere vindmøller bliver elproduktionen til tider så stor, at vi ikke kan forbruge strømmen. Det gælder især, når vandreservoarerne i Norge er fyldte, så Norge ikke kan slukke for deres vandkraftværker. (Vi deler el på kryds og tværs af landegrænser.) Derfor kan det blive nødvendigt at omdanne vindenergien til andre energiformer. En af de mest effektive måder, er at anvende varmepumper til at opvarme vandet i landets fjernvarmetanke.

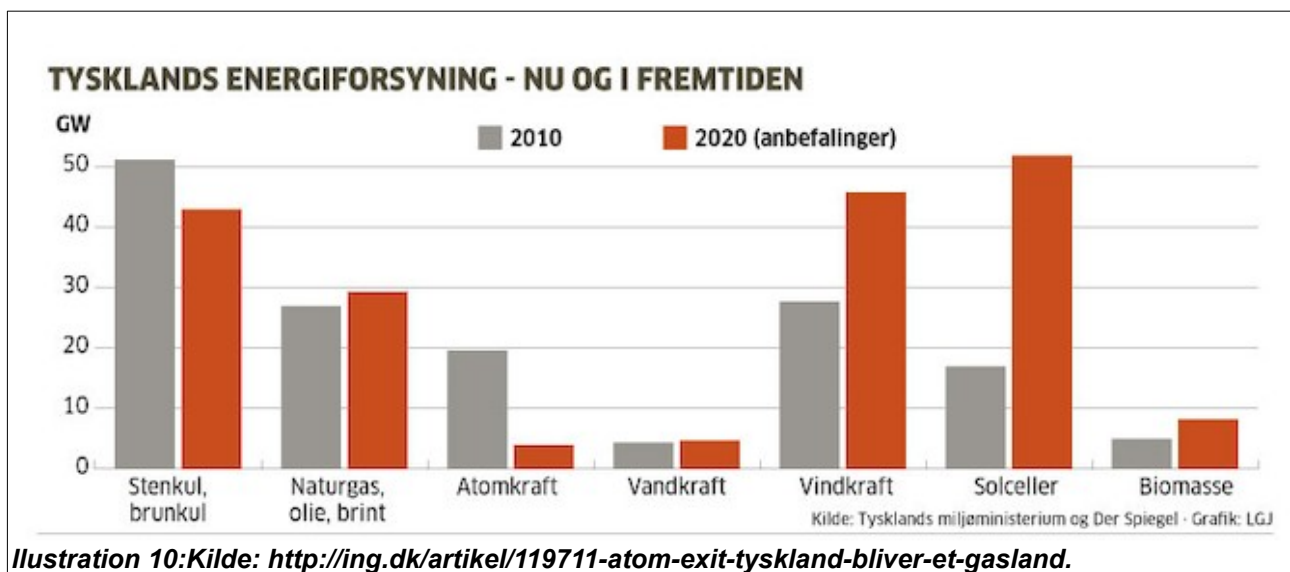
- a) Et fjernvarmeverk har en tank vand på  $3000 \text{ m}^3$ . Vandet skal opvarmes 45 grader. Hvor stor en energi, skal vandet modtage?
- b) En varmepatron omdanner direkte den elektriske energi til varme. Nytttevirkningen er 95 %. Beregn hvor meget elektrisk energi, der er nødvendig for at varme vandet op.
- c) En varmepumpe kan flytte 3 kWh varme ved et elforbrug på 1 kWh. Beregn hvor meget elektrisk energi, der kræves for at varme tanken op ved hjælp af en varmepumpe.

### Opgave 7. Bredsten-Balle kraftvarmeverk

Vandtanken på kraftværket har et rumfang på  $1150 \text{ m}^3$ . Vandet varmes op fra  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  til  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- a) Hvor meget energi skal kraftvarmeverket bruge på at varme tankens vand op?
- b) Varmeenergi koster 0,45 kr/kWh. Hvor mange penge ligger der lagret i tanken såfremt, man kunne sælge det hele?
- c) Hvorfor kan al varmen i tankene ikke sælges?

4 En solfanger omdanner solenergi til varmeenergi. Den er altså forskellig fra et solpanel, som omdanner solenergi til elektrisk energi.



## Opgave 8. Tysklands energiproduktion

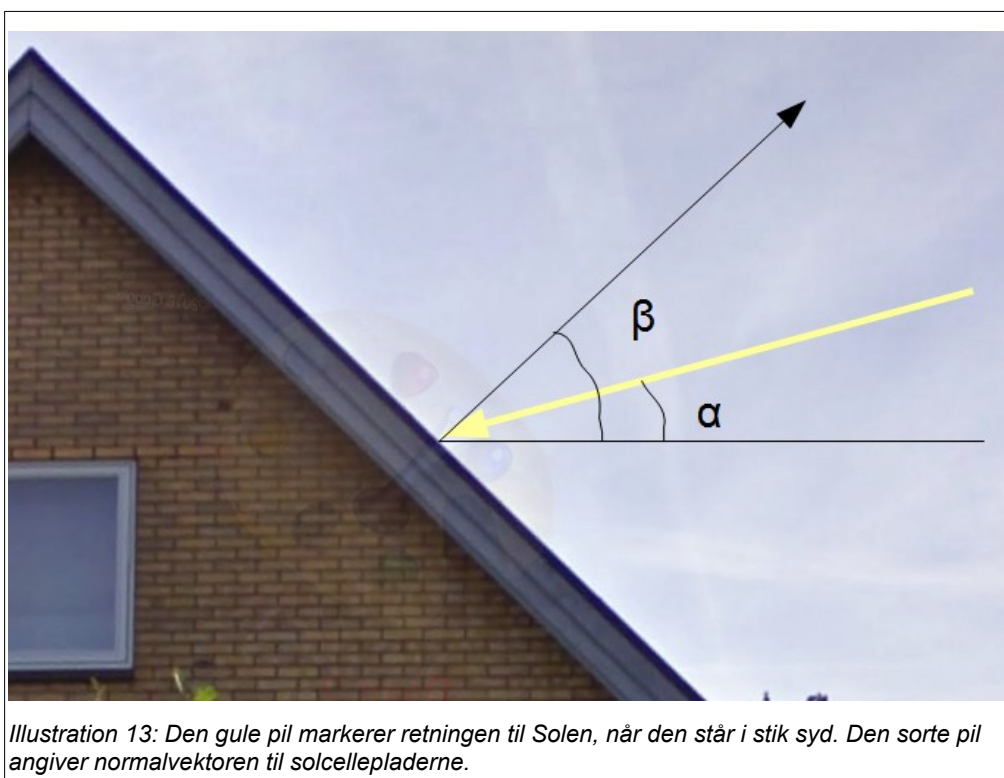
Tyskland er ved at ændre sin forsyningspolitik. Se illustration 10.

- Aflæs så nøjagtigt som muligt, hvor stort Tysklands samlede effektforbrug er i 2010.
- Aflæs så nøjagtigt som muligt det forventede forbrug i 2020.
- Beregn den relative del af effektproduktionen, der kommer fra atomkraft i 2010 og 2020.
- Beregn den relative del af effektproduktionen, der kommer fra vindkraft i 2010 og 2020.
- De største havvindmøller, der sættes i produktion i 2012-2015 ligger på ca. 6,5 MW. Den anførte effekt er møllens maksimumeffekt. Hvor mange moderne vindmøller skal tyskerne opsætte under forudsætning af, at møllerne producerer optimalt?
- Vinden blæser jo ikke konstant. På illustration 11 kan du se et eksempel på hvordan man i Spanien lagrer vindmølle-energi til senere brug. Forestil dig at man anlægger en kunstig sø 100 m over havoverfladen. Vurder hvor stort et volumen en sådan sø skal have, hvis den skal lagre elektrisk energi, der svarer til en dags elforbrug i Tyskland i 2020.
- Hvis den kunstige sø får en dybde på 50 m og den er kvadratisk i areal, hvor lange er siderne i søen så?



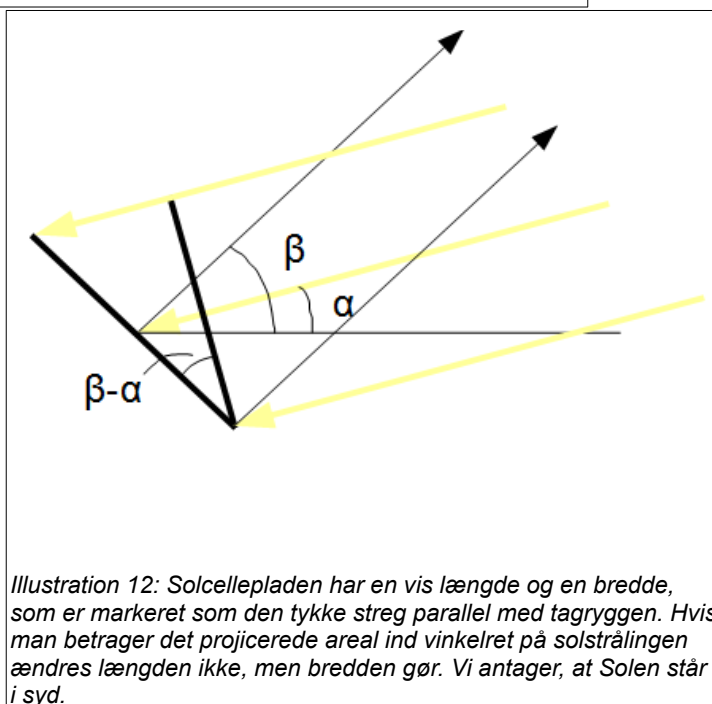
**Illustration 11:** Lagring af elektrisk energi kan ske ved at anvende potentiel energi. Kilde: ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA REVERSIBLE "POZOS DE NOJA". M<sup>a</sup> Purificación Cocho Ferreras. Santander, juli 2017.

### 3. Solcellers effekt



Solceller står tit på et tag eller er anbragt, så de står med en bestemt vinkel i forhold til vandret. Derfor bliver det en anelse kompliceret at modellere deres effektproduktion i løbet af en dag. En matematisk model opstilles her. Her antages det, at der er solskin i hele måleperioden og at solcellepladerne altid er sydvendte. Vi antager også, at nyttevirkningen af solcellepladerne er uafhængig af deres temperatur, hvilket ikke er korrekt, dvs. modellen passer bedst for en blæsevejrsmåned, hvor temperaturen af cellerne er nogenlunde konstant.

Betragt illustration 13. Solens højde er markeret med vinklen  $\alpha$ . Hvis solvinklen og vinklen for normalvektoren er ens, vil solcellerne blive mest muligt bestrålet.



Betragt illustration 12. Her ser man en enkelt solcelleplade, og derudover er tegnet det tværsnit ind, som peger vinkelret på solstrålingen.

Solstrålingen lyser med en flux  $F_0$ . Den effekt, der rammer solcellepladen, er givet ved det projicerede areal,  $A_{\text{proj}}$ , gange fluxen.

Sammenhængen mellem solcellepladens faktiske areal  $A$  og det projicerede areal er givet ved formlen

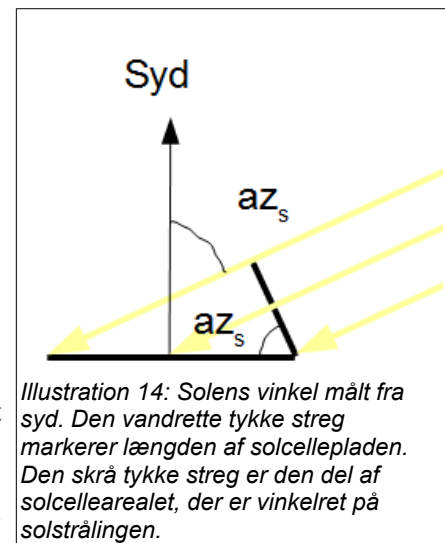
$A_{\text{proj}} = A \cdot \cos(\beta - \alpha)$ , fordi den projicerede bredde er en cos-faktor mindre.

Dvs. den modtagne effekt bliver  $P = F_0 \cdot A_{\text{proj}} = F \cdot A$ , hvor  $F$  er den effektive flux, som solcellepladerne med arealet  $A$  registrerer. Dvs.  $F = F_0 \cdot \cos(\beta - \alpha)$ .

I specialtilfældet hvor solcellepladerne ligger vandret, får man at

$$F = F_0 \cdot \cos(90 - \alpha) = F_0 \cdot \sin(\alpha).$$

Solen flytter sig som bekendt i løbet af dagen, og derfor vil ovenstående beregning kun gælde, når Solen står sydvendt. Herunder korrigeres der for Solens azimutvinkel målt fra syd,  $az_s$ . Betragt illustration 14. Her ser vi solcellepladen ovenfra, dvs. vi står ovenover taget og kigger ned på pladen.



Sammenhængen mellem solcellepladens faktiske areal  $A$  og det projicerede areal er givet ved formlen

$A_{\text{proj}} = A \cdot \cos(az_s)$ , fordi den projicerede længde er en cos-faktor mindre.

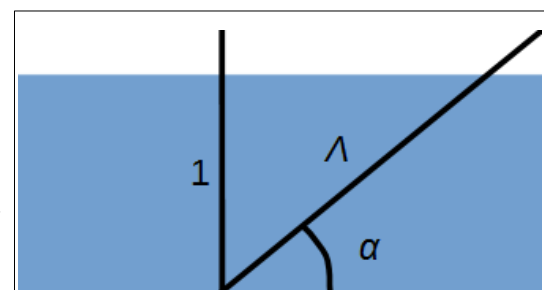
Dvs. den modtagne effekt  $P = F_0 \cdot A_{\text{proj}} = F \cdot A$ , hvilket vil sige, at

$$F = F_0 \cdot \cos(az_s)$$

Dvs. hvis vi tager højde for både ændret solhøjde og afhængigheden af Solens sydazimuth, får vi formlen

$$F = F_0 \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(az_s).$$

Til slut mangler vi at tage højde for, at noget af Solens lys spredes i atmosfæren. Man definerer luftmassen, som beskrevet i illustration 15. Ifølge illustrationen får man at  $A = 1/\sin(\alpha)$ .



Hvis man antager, at sandsynligheden for at en foton spredes pr. luftmasseenhed er konstant,  $k$ , så gælder

$$F'(A) = -k \cdot A \cdot F$$

Konstanten  $k$  kaldes for *ekstinktionskoefficienten*. Hvis man løser ovenstående differentiaalligning får man, at  $F(A) = I_0 \cdot \exp(-k \cdot A)$ , hvor  $I_0$  er *solarkonstanten*.

Strålingen aftager altså eksponentielt. (Den kvikke læser genkender sikkert argumentationen fra svækkelsesloven eller henfaldsloven.)

Dermed når vi frem til den næsten færdige formel til at beskrive den modtagne intensitet på et solcelleanlæg

$$F = I_0 \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(\alpha_z) \cdot \exp(-k \cdot \Lambda).$$

Hvis man foretrækker at regne med effekter, så ganges solcellepladernes faktiske areal på fluxen, og så får man

$$P = A \cdot I_0 \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(\alpha_z) \cdot \exp(-k \cdot \Lambda).$$

Til allersidst skal man tage højde for, at solcellerne har en vis nyttevirkning  $\eta$ . Dermed får vi den færdige formel

$$P = \eta \cdot A \cdot I_0 \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(\alpha_z) \cdot \exp(-k \cdot \Lambda) \quad (3)$$

Solarkonstanten  $I_0 = 1368 \text{ W/m}^2$ . Ekstinktionskoefficienten,  $k$ , ligger i omegnen af 0,25. Nytttevirkningen,  $\eta$ , er, afhængig af fabrikatet, ca. 10-20 %.  $k$  og  $\eta$  er fitteparametre for det anvendte anlæg.

Hvis man vil inkludere temperaturens indvirkning på den producerede effekt, bør en funktion, der afhænger af temperaturen ganges på (3). Hvis man ønsker at bestemme denne funktion, kan man for eksempel bestråle en isoleret solcelle med konstant belysning, og så ændre temperaturen af cellen mens dens effekt måles.

## Eksperiment 1. Solcelleanlæg

Har du ikke dit eget solcelleanlæg, kan du logge dig ind på Rosborgs anlæg på adressen .

<https://energimonitor.dk/>

Login-data er: Brugernavn: student@rosborg-gym.dk. Password: kattegrus.

Tryk på knappen *Dashboards* og vælg *Solcelleproduktion*.

Find panelet med titlen *Solcelleanlæg (hovedanlæg) produktion*. Tryk på knappen *View* indtil knappen *Export* dukker op. *Range*-knappen ændrer på 1. aksens. Den er anvendelig, når man skal finde en dag, hvor det har været godt med solskin. Tryk på *Export-knappen* og eksporter måledataene i en csv-fil. Importer den derefter i Excel, og du er klar til at fitte produktionen med vores modelformel (3).

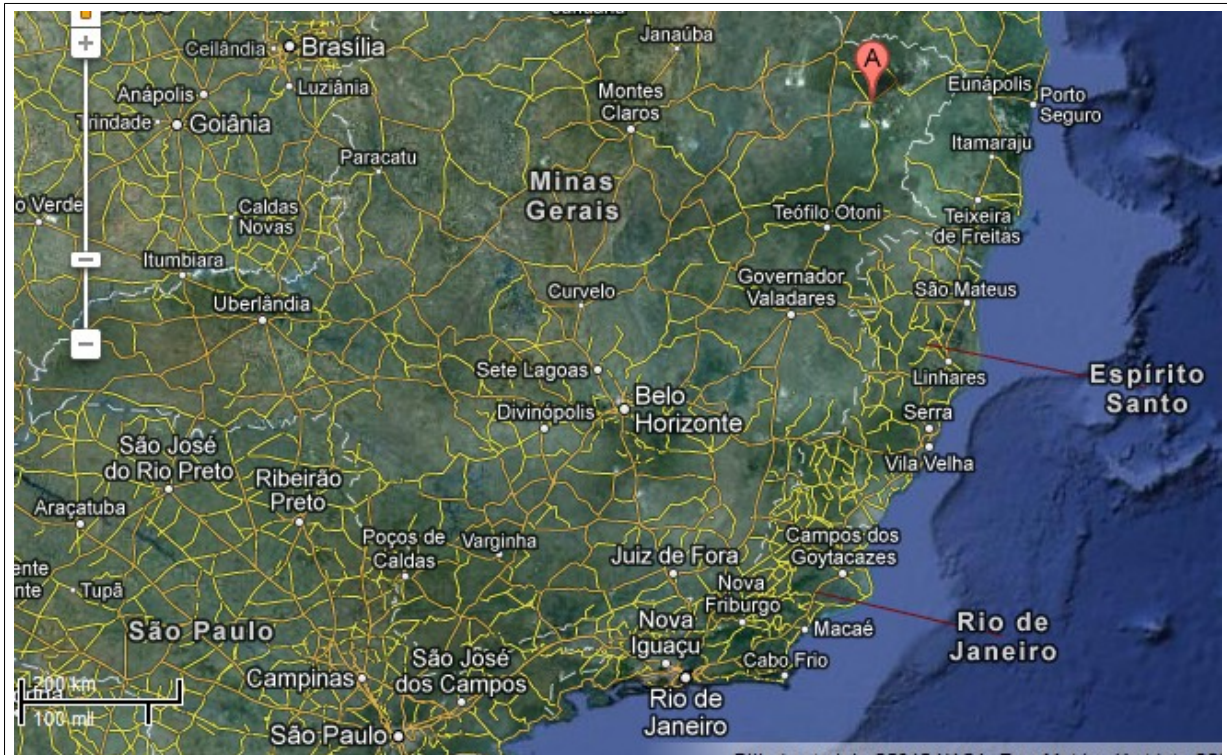
Benyt et program, f. eks. *Stellarium* eller webstedet [gml.noaa.gov](http://gml.noaa.gov) til at finde Solens højde og azimutvinkel til de ønskede tidspunkter. Husk at du skal bruge azimutten målt fra syd, mens Stellarium giver dig vinklerne målt fra nord.

Konstruer nogle celler i regnearket, hvor du kan indtaste startværdier for nyttevirkning og ekstinktionskoefficient.

Beregn modelfunktionens effekt og aftegn  $(t, P_{\text{målt}})$ - samt  $(t, P_{\text{model}})$ -grafer i samme koordinatsystem. Juster på  $k$  og  $\eta$  indtil de to kurver ligger så tæt<sup>5</sup> på hinanden som muligt.

Fortolk dine resultater.

## Opgave 9. Vandforsyning i Jequitinhonha-dalen



**Illustration 16:** Området "Jequitinhonha-dalen" er markeret ved markøren med bogstavet A. Der er knap 600 km til Belo Horizonte.

Erick bor i Badaro i Jequitinhonha-dalen i staten Minas Gerais, som har hovedstaden Belo Horizonte. Området er meget fattigt. Der er masser af sol i området, som oftest er tørkeramt. Befolkningen vil gerne have adgang til rindende vand, som tages fra floden. Det kræver elektriske vandpumper. Der bor omtrent 24000 mennesker i området, der er 3513 km<sup>2</sup> stort.

- Antag at et område, der dækker 10000 indbyggere skal have vand indlagt. Hver indbygger skal bruge<sup>6</sup> 100 L vand i døgnet til mad/drikke, bad, vask og vanding. Beregn massen af det vand, som området skal bruge hver dag.
- Man pumper vand fra floden som ligger 202 m over havet. Vandet pumpes op i et 25 m højt vandtårn, der står på jorden, som er 240 m over havet. Vandet sendes ud til forbrugerne fra vandtårnet. Beregn den potentielle energi, vandet skal have tilført.
- Beregn den tilførte energi fra elværket til pumpen.

### Solcelledata

Dimensioner: 80 cm x 1,60m.

$P_{\text{max}} = 250$  W.

Pris pr. plade = kr. 3000,-

Montering + tilkoblings-udstyr  
pr. plade = kr. 1000,-.

### Pumpedata. Grundfos HS.

Nyttevirkning  $\eta = 87\%$

Pumpehastighed  $v = 2000$  m<sup>3</sup>/h

Maks løftehøjde = 130 m.

<sup>5</sup> Du får nok problemer med at lave et perfekt fit, for der findes et begreb kaldet *diffus*stråling, som vi ikke har taget højde for i teori afsnittet.

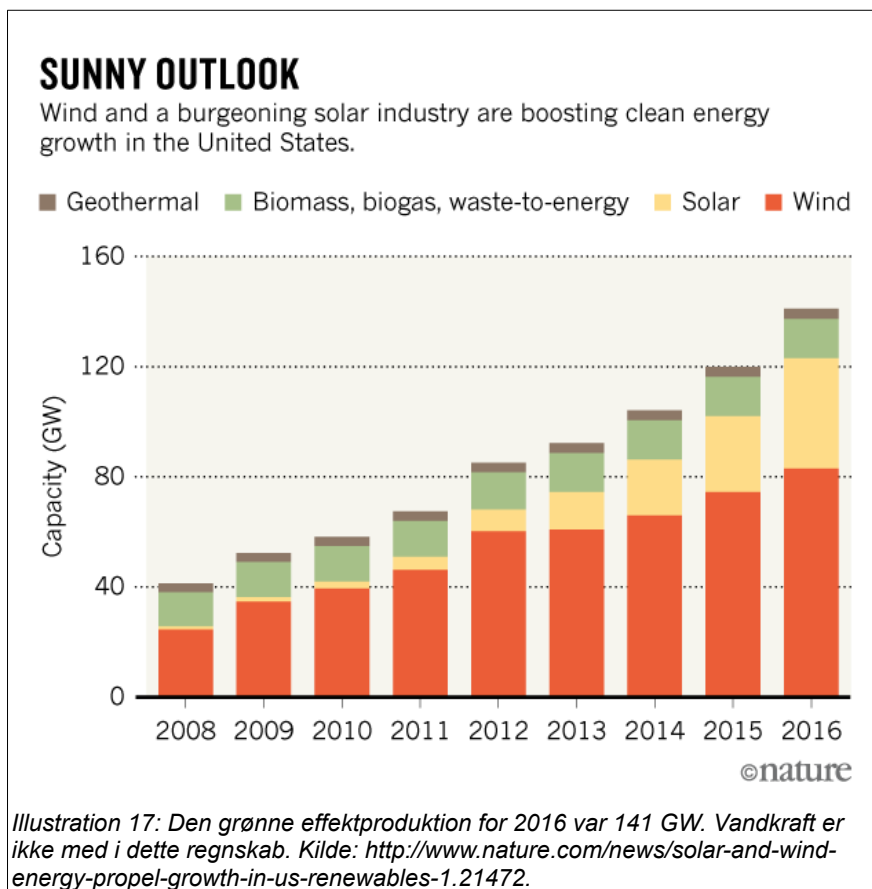
<sup>6</sup> En gennemsnitsdansker bruger ca. 200 L vand i døgnet.

Solcellers elektriske effekt afhænger af mængden af indstrålet lys.  $P_{\max}$  er effekten ved middagstid, dvs. den faktiske effekt er mindre om morgenen og om eftermiddagen.

- Vurder en gennemsnitlig effekt for solcellepladerne. Begrund vurderingen.
- Hvor mange solcelleplader, skal man montere, for at området får vand nok?
- Hvad koster det at opføre solcelleanlægget?

## Opgave 10. Grøn effekt/energi i USA og Danmark

I denne opgave skal du undersøge nogle tal for effektproduktion i USA. Betragt illustration 17. Den viser effektproduktionen af grøn energi i de senere år.



- Hvor mange procent af den samlede grønne effektproduktion (minus vandkraft) udgør hhv. sol og vind?

Foruden ovenstående energibidrag har USA også installeret 103 GW vandkraft. Bidraget fra vandkraft samt de ovenstående bidrag udgør i alt 15 % af USAs elforbrug, som er 3913 TWh. (Kilde: Wikipedia.)

- Beregn den faktiske middeleffekt USA har brug for til at dække sit elforbrug.

DKs totale forbrug af elektrisk energi: 33,6 TWh.  
DKs totale produktion af vedvarende energi: 18,546 TWh.  
(Den var 66,9 % af den samlede el-produktion.)  
DK importerede 5,912 TWh.  
Alle tal er for 2015.

**Kilde:**  
<http://energinet.dk/DA/KLIMA-OG-MILJOE/Miljoerapportering/Sider/Forbrug-i-Danmark.aspx>

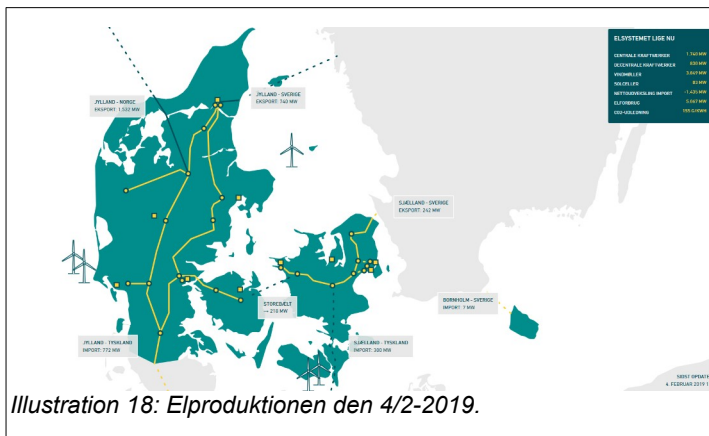
- Beregn den energi, som den grønne energi + vandkraft kan producere på et år. Sammenlign tallet med den faktiske produktion og kommenter.
- Hvor stort et effektforbrug er der pr. indbygger i USA?
- Hvor stort et effektforbrug er der pr. indbygger i Danmark?
- Hvor stor en del af det danske elforbrug kommer fra vedvarende energi?
- Artiklen fra DR<sup>7</sup> nævner nogle problemer med omstillingen til grøn energi. Hvilke problemer omtales?

## Opgave 11. Danmarks elproduktion

På hjemmesiden

<https://energinet.dk/#energysystem> kan man se Danmarks aktuelle el-produktion ved sol- og vindenergi samt landets naturgasproduktion og -forbrug. Der er også mulighed for at se på historiske data.

- Besøg webstedet ovenfor og forklar hvad tabellen øverst til højre beskriver.
- Tryk på knappen *historiske data* og træk musen henover billedet. Læg mærke til at du kan se den aktuelle produktion interaktivt. Vælg en dag, som for dig ligner en gennemsnitlig dag. (Vælg f. eks. 10 forskellige datoer og vurder så, hvilken dag, der ser mest gennemsnitlig ud.)
- Aflæs den producerede effekt ved vind- og solenergi samt den forbrugte effekt for hver time den pågældende dag.
- Beregn hvor meget elektrisk energi, vi brugte samt producerede ved sol og vind den pågældende dag.
- Hvor stor en procentdel af vores forbrug var dækket af sol- og vind den pågældende dag?



7 <http://www.dr.dk/nyheder/viden/miljoe/solcelle-rekord-usa-fordobler-antal-af-nye-installationer-paa-et-aar>