

Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk

DTU Vindenergi E Rapport 2018



Asger Bech Abrahamsen¹, Thomas Thingstrup² og Allan Christensen²

¹DTU Vind Energi

²Lindebjergskolen

DTU Wind Energy Report-I-0757

April 2018

DTU Vindenergi
Institut for Vindenergi



Forfatter(e): Asger Bech Abrahamsen, Thomas Thingstrup og Allan Christensen

Titel: "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk"

Institut: Institut for vind energi

Resume (maks. 2000 char.):

Denne rapport indeholder baggrundsmateriale og uddybende forklaringer til undervisningsmaterialet "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk", som er blevet udviklet over en årerække med udgangspunkt i skolens klimauge der afholdes hvert år i uge 39.

Det er håbet at undervisningsmaterialet kan bruges af andre skoler i Roskilde Kommune og at CO₂ fodaftrykket fra alle skolerne i kommunen på sigt kan sammenlignes af eleverne på de forskellige skolerne. Desuden er håbet, at eleverne bliver i stand til, at diskutere hvilke løsninger der findes på klimaudfordringerne og hvilke af disse de syntes skal vælges først.

Undervisningsmaterialet sigter på, at bruge matematik på folkeskole niveau, som det bærende fag for, at lave analysen og på at bruge matematik som grundlaget for at træffe et valg af fremtidens klimaløsninger.

2018

Kontrakt nr.:

"Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk"

Oktober 2016

Projektnr.:

Sponsorship:

Klima- og miljøudvalget i Roskilde Kommune

Forside:

Fremvisning af Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk på Stændertorvet i Roskilde d. 4 April 2017, som en del af Affaldimperiets arrangement. CO₂ fodaftrykket for 2014 er vist med baloner, som er pustet op i forhold til en model af skolen (hvid plade). **Blå:** El og naturgas i 2013.

Orange: efter installation af solceller i 2014. **Grøn:** Hvis jordvarme installeres. **Lilla:** Hvis 25 m høj vindmølle også installeres.

Danmarks Tekniske Universitet

DTU Vindenergi
DTU Risø Campus
Frederiksborgvej 399
Bygning 118
4000 Roskilde
Telefon: 45 25 25 25

www.vindenergi.dtu.dk

Forord

Kan det lade sig gøre at undervise elever i folkeskolen i hvordan man udregner et CO₂ fodaftryk og hvordan man diskuterer om det er stort eller lille?

Dette er ambitionen for klimaundervisningen på Lindebjergskolen og denne rapport beskriver ideer til hvordan klimaundervisningen kan gøres konkret ved, at beregne CO₂ udledningen fra el og varme forsyningen for Lindebjergskolen i 2014.

Denne rapport indeholder baggrundsmateriale og uddybende forklaringer til undervisningsmaterialet "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk", som er blevet udviklet over en årerække med udgangspunkt i skolens klimatema-uge, der afholdes hvert år i uge 39.

Det er håbet at undervisningsmaterialet kan bruges af andre skoler i Roskilde Kommune og at CO₂ fodaftrykket fra alle skolerne i kommunen på sigt kan sammenlignes af eleverne på de forskellige skolerne. Desuden er det håbet, at eleverne bliver i stand til at diskutere hvilke løsninger der findes på klimaudfordringerne og hvilke af disse de syntes skal vælges først.

Undervisningsmaterialet sigter på, at bruge matematik på folkeskole niveau, som det bærende fag for at lave analysen og på at matematik er grundlaget for at træffe et valg af fremtidens klimaløsninger.

DTU Vind Energi & Lindebjergskolen, april 2018

Asger Bech Abrahamsen

Senior forsker ved Afdelingen for Vind Energi
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde
Danmark

Thomas Thingstrup og Allan Christensen
Lærer på overbygningen inden for naturfag

Lindebjergskolen
Store Valbyvej 248B
4000 Roskilde

Indhold

1.	Lindebjergskolen som klimaskole	9
2.	Klimaundervisning på Lindebjergskolen	10
3.	Formål med "Lindebjergskolens CO ₂ fodaftryk" undervisningsmateriale.....	11
4.	CO ₂ fodaftrykkets del-spørgsmål	12
5.	Hvor meget strøm har skolen brug for?	13
6.	Hvor meget varme har skolen brug for?.....	16
7.	Hvad er fossile brændsler?	18
8.	Hvordan skabes CO ₂ ved forbrænding?	19
9.	Hvorfor kaldes CO ₂ for en drivhusgas?.....	21
10.	CO ₂ og energi produktion fra naturgas?	23
11.	CO ₂ fra el produktion	26
12.	Skolens CO ₂ fodaftryk i 2014?	27
13.	Hvordan kan CO ₂ fodaftrykket reduceres?	33
14.	Kan det gøres med sol og vind energi?	34
15.	Konklusion for "Lindebjergskolens CO ₂ fodaftryk"	37
16.	Diskussion	38
17.	Konklusion	42
18.	Bibliografi.....	43
19.	Tak til	43
20.	Bilag A: Regneark til beregning af el- og varme forbrug	44
21.	Bilag B: Energiproduktion fra vindmølle ved skolen.....	46
22.	Bilag C: Slides "Lindebjergskolens CO ₂ fodaftryk"	49

Summary

I denne rapport bruges effekt, som det centrale begreb til, at vise, at man som forbruger af strøm trækker en vis mængde energi per tid, når man tilslutter et elektrisk apparat til sin stikkontakt. Den mængde energi man forbruger vil derfor afhænge af apparatets effekt og hvor lang tid der er tændt for stikkontakten. Måleenheden for effekt er Watt, som skrives med bogstavet W. Man kan derfor definere en måleenhed for energi, som den mængde energi der bruges, hvis man tilslutter et apparat med en effekt på 1 Watt i 1 time, som 1 Watt-time. Ordet Watt kommer efter navnet på James Watt, som fandt på begrebet effekt. Da James Watt snakkede engelsk, så kaldte han en Watt-time for Watt-hour på engelsk. Enheden for elektrisk energi bliver derfor forkortet Wh i dag. Hvis man bruger 1000 Watt-timer, så kalder man det en kilo-Watt-time eller på engelsk Kilo-Watt-hour, som skrives kWh. Denne enhed bliver brugt af el-målere til at registrere, hvor meget elektrisk energi, som der bliver brugt i bygninger, så som Lindebjergskolen. Når man har forstået begrebet Kilo-Watt-timer vil man være i stand til at udregne forbruget fra et elektrisk apparat og også udregne, hvor meget man skal betale for sin el-regning.

Ordet "drivhusgas" indføres i forbindelse med en diskussion af restproduktet CO₂ fra afbrænding af fossile brændsler. Da CO₂ er en usynlig, lugtfri og ikke giftig gas er det paradoksalt, at den omtales af mange stemmer i medierne, som den største trussel mod menneskeheden. For at forstå udfordringen med CO₂ er det vigtigt at forstå, at hvis der er tilstrækkeligt mange mennesker på jorden, så vil deres samlede handlinger kunne få indflydelsen på jordens klima. Man har kunne måle at mængden af CO₂ i luften omkring jorden har været stigende igennem de sidste par årtier og da CO₂ giver anledning til mindre udstråling fra jorden af solens varme, så vil man forvente at jorden burde blive varmere jo mere CO₂ der er i luften. Et billede på denne proces er, at jorden puttes i et drivhus og at drivhuset er den øgede mængde af CO₂ i luften omkring jorden. Deraf kommer begrebet "drivhus effekten" og at CO₂ kaldes en "drivhusgas".

Et af de store spørgsmål er hvor meget CO₂ kan man udlede til luften om jorden og hvor meget vil temperaturen så stige? Desuden vil man ofte spørge hvad betyder det at jordens temperatur vil stige med mellem 2 og 6 grader Celsius? Disse spørgsmål er svære at svare på og er kernen for meget klimaforskning i dag. Generelt kan man sige at det bliver ikke nemmere at være menneske på jorden, hvis temperaturen stiger, da der kan opstå problemer med at finde drikkevand og mad nok til alle. Desuden vil en øget temperatur kunne medføre mere ekstremt vejr med flere og kraftigere storme samt en stigning af havvandstanden, hvis isen på polerne smelter.

Udfordringerne med stigende temperatur som følge af CO₂ udledning vil ikke blive behandle i denne rapport, da den i stedet vil spørge hvad der skal til for at rydde op efter sig selv, når det drejer sig om CO₂ som kommer fra vores energiforbrug. For at kunne overveje dette skal man først gøre sig klart hvor meget CO₂ man udleder. Da CO₂ ophobes i luften omkring jorden, så vil den mængde CO₂ som udledes hvert år bidrage til den samlede menneske skabte mængde CO₂. Nogle har beskrevet dette som at alle mennesker efterlader et usynligt "CO₂ fodaftryk" i luften på jordens overflade hvert år, som følge af deres aktiviteter og forbrug af energi til alt fra mad, opvarmning, transport, husholdning apparater med mere. Så man kan definere "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk", som den mængde CO₂ gas der udledes fra skolen hvert år, som et resultat af alle aktiviteter på skolen. Man burde starte med at skrive en lang liste over aktiviteter, gå i gang

med at udregne hvor meget CO₂ der kommer fra hver aktivitet og så lægge dem alle sammen for at få udledningen på et år. I denne rapport er aktiviteterne begrænset til at udregne CO₂ fodaftrykket fra opvarmning og brug af el på Lindebjergskolen. Fremover kan dette udvides med den CO₂ som kommer fra produktionen af den mad som spises på skolen eller fra transporten af elever, når de skal på udflugt eller kører til og fra skolen. Et godt spørgsmål er dog om transporten burde høre til skolens eller til hjemmets CO₂ fodaftryk?

I denne rapport forklares det hvordan man udregner, hvor meget CO₂ der udledes, når man i 2014 brugte en kilo-Watt-time (1 kWh) strøm eller afbrændte en kubik meter (1 m³) naturgas. De valgte enheder er hvad henholdsvis el-målerne og gasmåleren på naturgasfyret på Lindebjergskolen bruger til at måle forbruget.

CO₂ udledning fra produktion af strøm i Danmark afhænger af om den kommer fra et kulkraftværk, fra afbrænding af affald eller fra bæredygtige kilder, så som vindmøller eller solceller. Da strømmen fra de forskellige kilder blandes i el-nettet er det ikke muligt at afgøre hvilken kilde strømmen kommer fra. Når CO₂ udledningen fra brug af el skal bestemmes gøres det ud fra sammensætningen af hele Danmarks el-forbrug eller det såkaldte energi mix for strøm. I 2014 blev halvdelen af Danmark's el-forbrug dækket fra kraftværker som brændte kul, 12 % ved afbrænding af naturgas, 2 % fra afbrænding af olie, 10 % fra vedvarende energi kilder og endeligt 24 % fra atomkraft. Nogle bliver overrasket over atomkraften, men den blev importeret fra nabolandene omkring Danmark. CO₂ udledning i 2014 fra forbrug af 1 kWh el kan udregnes ud fra forbruget af kul, naturgas og olie. Svaret er, at der udledtes omkring ½ kg CO₂ per kWh forbrugt strøm. Når først man har det tal kan man omregne skolens elforbrug opgivet i kWh til udledning af CO₂ ved at gange elforbruget med ½ kg CO₂ per kWh. Dette tal gælder dog kun for el-energi mikset i 2014 og da Danmark har en ambition om at være 100 % fossil frit forsynet i 2050, så må det forventes at udledning per kWh forbrugt el skal falde til nul. Hvis dette materiale bruges et stykke tid efter 2014 til at undersøge et CO₂ fodaftryk for en skole eller anden bygning i Danmark, så vil det være en god ide at lave en informations-søgnings-opgave, hvor energimikset og CO₂ udledning fra det Danske elforbrug opdateret med tal fra året før.

Udledning af CO₂ fra afbrænding af naturgas vil ikke ændre sig med tiden og er givet ved kemien for afbrændingen. Da naturgas forbruget er opgivet i kubik meter per år, så er det svært at sammenligne med elforbruget og dermed bliver det svært at diskutere om det vil give mening at opvarme skolen med el-varme. Derfor omregnes naturgas forbruget i kubik-meter gas først til den varmeenergi i kWh som sendes ud i skolens varmesystem.

Lindebjergskolens energiforbrug fra el og varme-forsyning i 2014 kan vises for hver måned på en samlet graf ved at bruge opgørelsen fra elregningen og omregningen af naturgas regningen, som skolens tekniske personale kan udtrække fra kommunens energiovervågningssystemer.

CO₂ fodaftrykket fra energiforbruget kan nu udregnes ved at gange med udledningen for el og udledningen for naturgas. Endeligt skal tallene for hver måned lægges sammen og det totale CO₂ fodaftryk kan udregnes og årsvariationen kan illustreres ved at lave grafer. I denne rapport lægges der op til at dette gøres i et regneark, for at illustrere for eleverne, at regneark er et nyttigt og effektive værktøj. Et eksempel regneark for 2014 er at finde på projekt hjemmesiden for "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk" og dette kan bruges som inspiration til at lave sit eget regneark med nye tal eller det kan bruges som det er.

Den sidste del af dette materiale stiller spørgsmålet om et givet CO₂ fodaftryk er stort eller lille. I tilfældet Lindebjergskolen er resultatet for 2014 at CO₂ fodaftrykket er 111 tons CO₂ på et år. Er det stort eller småt? Denne rapport forsøger at formulere et simpelt princip til at vurdere et CO₂ fodaftryk ved at foreslå, at man skal passe på sin egen luft. Dette gøres ved, at forestille sig, at der sættes glasplader op langs skolens grund og at glaspladerne rækker helt ud i verdensrummet. Den luft som er indespærret af glaspladerne kaldes skolens egen luft. På nuværende tidspunkt indeholder luften omkring jorden 400 millionte dele CO₂ i forhold det rumfanget. Men hvad vil der ske med skolens egen luft hvis man udleder 111 tons CO₂ fra skolen på et år? I rapporten skitseres det hvordan man kan prøve at regne dette ud. Svaret der bliver fundet er, at CO₂ indholdet i skolens egen luft vil øges med 69 millionte dele på et år og at dette vil gentage sig år efter år, hvis ikke CO₂ udledningen reduceres. Mange forskere har udtalt at en CO₂ grænse på 450 millionte dele vil medføre store ændringer af jordens klima. Man må altså sige at Lindebjergskolen ikke kan passe på sin egen luft uden at mængden af CO₂ stiger mere end hvad mange forskere mener er grænsen. Burde vi så lukke skolen i morgen for at redde jorden? Svaret er nej, da luften over Lindebjergskolen blandes med frisk luft og ikke er lukket inde i et usynligt akvarie af glasplader. Men man kan godt sige at Lindebjergskolen låner nogen andres luft for at få opblandet CO₂ udledningen fra skolen. Og hvis der er en masse andre som også låner nogens luft for at opblende CO₂, så betyder det at CO₂ mængden i jordens luft begynder at stige mærkbart.

Den sidste del af denne rapport rejser spørgsmålet om hvad man kan gøre for at mindske CO₂ udledningen fra Lindebjerg skolen. I 2013 blev der installeret solceller på flere af skolens tage og el-produktionen fra disse er taget med i regnearket for skolens energiforbrug for 2014. Den strøm der bliver produceret af skolens solceller kan dække noget af skolens forbrug og dermed bliver der færre måneder om året, hvor der skal købes strøm fra el-nettet. CO₂ udledningen vil derfor blive reduceret og som man kan se af regnearket vil solcellerne på Lindebjergskolen i løbet af et år producere lige så meget strøm som der bruges på skolen. Man kan stille spørgsmålet om skolen, så er blevet selvforsynende med strøm og her er svaret nej. Om sommeren producerer solcellerne dobbelt så meget strøm, som der bruges på skolen, og om vinteren dækker de en meget lille del af strømforbruget. Dette viser, at skolen vil få svært ved at blive selvforsynende med strøm ved at installere flere solceller. Et alternativ kunne være at installere en vindmølle, da vinden blæser kraftigt om vinteren og også nogle gange når det er mørkt. I regnearket for energiforbruget er der medtaget den forventede produktion fra en husstandsmølle med en højde på 25 meter, hvis denne blev installeret på skolens grund. Man vil se at denne kan dække noget af el-forbruget om vinteren, men at der enten vil være brug for flere husstandsmøller eller en større vindmølle, hvis el-forbruget skulle dækkes om vinteren. Når man kigger på produktion fra solcellerne kan man se at det ville være smart, hvis man kunne gemme dem strøm, man producerede om dagen til om aftenen, eller den strøm man producerede om sommeren til om vinteren. Dette kan gøres i batterier, men en udfordring er, at der tapes en hel del af solcelle energien, når den overføres til batterierne og derfor er det dyrt at gemme store mængder strøm på batterier. Hvis batterierne bliver forbedret vil dette måske ændre sig i fremtiden og så kan det være de vil blive brugt til at gennem sol eller vindmølle strøm til dage hvor solen ikke skinner eller dage hvor vinden ikke blæser.

Afslutningsvis skal det nævnes, at man på Lindebjerg skolen har arbejdet med at vise, hvordan CO₂ fodaftrykket for skolen blev reduceret ved at installere solceller i 2013. Dette blev gjort ved

at lave en skala model af skolen på en træplade og ved at puste balloner op til en størrelse, som viste hvor meget CO₂ mængden udledt på et år vil fylde i forhold til modellen. På den måde lavede nogle elever fra skolen en ballon for CO₂ fodaftrykket før solcellerne, en ballon efter solcellerne blev installeret, en ballon for CO₂ fodaftrykket hvis der bliver installeret jordvarme på skolen og sidst en ballon for hvis der også bliver installeret en 25 m husstandsmølle på skolen. Disse balloner og skole modellen er vist på forsiden af denne rapport.

Det er håbet, at dette materiale kan inspirere nuværende og fremtidige generationer af elever og lærer på Lindebjergskolen og andre skoler til at have en handlingsorienteret tilgang til de klimaudfordringer, som bliver diskuteret af politikere, forskere, virksomheder, institutioner og borgere. Der findes allerede teknologier, så som vindmøller, solceller, jordvarme og varmepumper, der kan reducere CO₂ udledningen fra vores moderne samfund, men et af de store spørgsmål er hvad man skal vælge at gøre først? Her er det nyttigt at kunne udregne hvad der giver den største reduktion af CO₂ fodaftrykket og bruge udregningen som grundlag for beslutningen. Så hvis du skulle bestemme hvordan din skole skulle reducere sit CO₂ fodaftryk, hvad syntes du så der skal gøres?

1. Lindebjergskolen som klimaskole

Lindebjergskolen er en folkeskole som ligger i byen Gundsølle 7 km nord for Roskilde. Skoledistriktet for Lindebjergskolen ligger i landzone og omfatter en række mindre byer Ågerup, Herringløse, Hvedstrup, Kirkerup og Østrup. Den landlige placering gør at skolen gerne vil arbejde aktivt med klimaløsninger og skolen formulerede nogle visioner for at blive en klimaskole i 2013. Disse visioner er:

Lindebjergskolen er klimaskole. Det betyder at, Lindebjergskolens elever skal blive de bedste til at tackle de udfordringer, som vi står overfor med hensyn til klimaændringer- både inden for energi, håndtering af regnvand, transport og mad.

Skolen har følgende 5 del-visioner:

- 1) Skolen skal håndtere regnvand på egen grund
- 2) Skolen skal være selvforsynende med el og varme
- 3) Skolen skal visualisere forbruget af el, vand og varme på et display på internettet, der opdateres hvert 12. minut.
- 4) Skolen skal skabe sammenhæng mellem læring om sund og klimarigtig mad på Lindebjergskolen og i praksis i Gundsøllehallen
- 5) Skolen skal hvis muligt indtænke bæredygtig transport, fx skolebus drevet af brændselsceller, el eller biogas produceret af lokal biomasse

Disse ambitiøse klimavisioner har medført at der er blevet bygget flere klimaløsninger på skolen, hvor regnvandsbede, legeplads med skybrudsikring og solceller på skolens tagene kan nævnes. Et vigtigt element af klimaskolen er også at skabe god læring baseret på skolens klimaløsninger og at diskutere hvilke yderlige tiltag der er brug for før at skolen kan kalde sig 100 % selvforsynende. Endeligt skal det nævnes at Lindebjerg skolen i 2018 har redefineret visionen og at et inspirations katalog til klimaundervisning på alle alderstrin er blevet udarbejdet (Lindebjergskolen, 2018).

2. Klimaundervisning på Lindebjergskolen

Denne rapport understøtter et undervisningsforløb, hvor eleverne i udkolingen på Lindebjergskolen i en klimauge i 2016 arbejdede med at fastlægge CO₂ fodaftrykket fra skolen, som følge af skolens el og varme forbrug. Undervisningsforløbet blev planlagt i et samarbejde mellem Danmarks Tekniske Universitet og lærer fra udkolingen på Lindebjergskolen. Undervisningsmaterialet blev i første omgang formuleret som en række slides, som brød problemstillingen med at bestemme CO₂ fodaftrykket ned i delspørgsmål, der kunne behandles i forskellige fag og med forskellig sværhedsgrad. Disse slides kan derfor bruges i hele deres sammenhæng eller tages ud enkeltvis i en time i et fag. Erfaringen fra klimaugen i 2016 er, at dette format er meget anvendeligt og at det har potentiale til at inspirere lærerkolleger og elever til at tage klimaproblemstillinger op i den almindelige undervisning. Det blev dog klart, at flere af lærerne involveret i klimauge-undervisningen efterspurgte en beskrivelse af baggrunden og overvejelser om læringsmål for de enkelte slides. Formålet med denne rapport er at give en baggrundsbeskrivelse for hver slide og at opsummere læringsmål for undervisningen i folkeskolen. Det er håbet at materialet kan genbruges både på Lindebjergskolen i fremtidige undervisningsforløb, men også at andre skoler i Roskilde kommune kan bruge materialet til at udregne hvad CO₂ fodaftrykket er for deres skoler.

Rapporten er struktureret med en overordnet beskrivelse af formålet med "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk" og derefter følger der kapitler med baggrund for hver slide fra undervisningsmaterialet.

3. Formål med "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk" undervisningsmateriale

Det overordnede læringsmål med "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk" er at skabe en bevidsthed hos eleverne om sammenhængen mellem skolens anvendelse af energi og den resulterende udledning af drivhusgassen CO₂. Da CO₂ er en usynlig gas er et vigtigt element af undervisningen at gøre transformationen fra fossilt brændstof til vægten og rumfanget af den resulterende CO₂ så konkret som muligt. Materialet tager udgangspunkt i skolens el- og varme forbrug og kan derfor overføres direkte til elevernes eget hjem efterfølgende. Et andet vigtigt aspekt af undervisningen er, at vise eleverne, at man kan afhjælpe klimaproblemerne ved for eksempel at installere solceller på skolen. Endeligt åbner materialet for en diskussion om hvordan Danmark bliver fossilfrit i 2050 og hvordan Lindebjergskolen forhåbentligt bliver det lang tid før.

4. CO₂ fodaftrykkets del-spørgsmål

For at bestemme CO₂ fodaftrykket for Lindebjergskolen skal man først finde en masse informationer og dernæst lave en række mellemregninger før CO₂ udledningen for el og varme forbruget kan udregnes. Denne proces vises ved, at formulere en hel række del-spørgsmål, som kan ses som enkeltstående opgaver. Hvert af disse del spørgsmål bliver behandlet som en slide i undervisningsmaterialet. Desuden danner hvert spørgsmål basis for et kapitel i denne rapport og beskriver hvordan man kan svare på dem.

De 12 spørgsmål er vist neden for

- 1) Hvor meget strøm har skolen brug for?
- 2) Hvor meget varme har skolen brug for?
- 3) Hvad er fossile brændsler?
- 4) Hvordan skabes der CO₂ ved forbrænding?
- 5) Hvorfor kaldes CO₂ en drivhusgas?
- 6) Hvor meget CO₂ får man ved at brænde 1 m³ naturgas?
- 7) Hvor meget energi får man ved at brænde 1 m³ naturgas?
- 8) Hvor meget CO₂ kommer der som følge af elforbruget på skolen?
- 9) Hvor meget CO₂ kommer der som følge af varmeforbruget på skolen?
- 10) Hvad er skolens samlede CO₂ udledning per år (fodaftryk)?
- 11) Hvad kan der gøres for at reduceres skolens CO₂ fodaftryk?
- 12) Kan det gøres med solceller og en vindmølle i nærheden af skolen?

De indledende spørgsmål er meget generelle og har til formål at introducere en række ord og begreber i forbindelse med forbrug og produktion af energi. Det centrale er, at forstå, at energi findes i flere former, så som elektrisk, kemisk, varme, bevægelse og lys, og at man kan konvertere energi mellem de forskellige former ved for eksempel forbrænding, turbiner eller solceller. Et vigtigt element er desuden, at formidle en forståelse af begrebet "Effekt", som fortæller hvor meget energi per tid, der udveksles eller konverteres mellem enheder i energi systemet.

5. Hvor meget strøm har skolen brug for?

Formål:

Strømforbruget på skolen er en del af energiforbruget. Hvor stort det er afhænger af hvor mange apparater, som skolen har forbundet til deres stikkontakter eller elinstallationer. Men hvor meget strøm bruger man på skolen og hvordan regner man det ud? Man kan finde ud af hvad strømforbruget er ved, at spørge om en kopi af elregningen fra skolen. Denne kan senere bruges til at udregne hvor meget CO₂ der kommer fra at producere denne strøm.

Baggrund:

Når man bruger strøm fra en stik kontakt, så er denne strøm blevet produceret af enten et kraftværk eller en anden energikilde som f.eks. solceller eller vindmøller. Elektriske apparater bruger en vis mængde energi per sekund og dette kalder man effekten af apparatet. På alle apparater skal der stå hvor meget energi per sekund som de bruger, hvis man sætter dem i stikkontakten. Dette angives i enheden Watt, som har fået navnet efter James Watt (1736-1819) der var med til udviklingen af dampmaskinen. Forkortelsen for Watt er bogstavet W og på elektriske apparater skal der stå et tal (f.eks. 20) og så forkortelsen for enheden (W). På små elektriske apparater står der små tal og på store apparater store tal. Prøve at lave en list over apparater i klassen og skriv ned hvor mange Watt de bruger.

Hvis et apparat sidder i en stik kontakt i et stykke tid, så vil den energi, som apparatet har brugt være givet ved gange stykket mellem hvor meget energi det bruger per sekund og hvor lang tid det sidder i stik kontakten.

Lad os prøve nogle regneeksempler. Hvis en mobiltelefonoplader bruger 20 W og den sidder i stikkontakten i 2 timer, så vil den have brugt en energi på $20 \text{ W} \times 2 \text{ timer} = 40 \text{ W} \times \text{timer}$. Eller hvis en el-kogekedel bruger 2000 W og sidder i stikkontakten i 1 time, så vil den have brugt en energi på $2000 \text{ W} \times \text{timer}$. Man kan se at den brugte energi er angivet ved et tal og man kan også se at der er en ny enhed for energi som er Watt gange med timer. Denne enhed kalder man Watt-timer på dansk, men da James Watt var skotte, så er det ofte den engelske version man bruger. På engelsk siger man "Watt-hour" og man skriver enheden som Wh, som er den korte form for "Watt-hour". Denne enhed bruges i dag af mange lande (f.eks. alle lande i Europa) og har den fordel at alle er enige om hvor meget en Watt-hour energi er og dermed kan man også handle med energi mellem lande.

Udregningen af energiforbruget kan også skrives som en formel. Man kan sige, at formler er som en bageopskrift, idet formler fortæller hvilket tal der indgår i en udregning og hvordan de skal regnes sammen til det endelige resultat.

Hvis man angiver energien med bogstavet E , så kan man skrive en formel for hvordan man regner E ud. Men først skal vi fortælle hvilke tal som indgår i formlen. I energiudregningen er dette to tal, energi forbruget per sekund og tiden som energien bruges i. Hvis vi kalder energi forbruget per sekund for bogstavet P og tiden for bogstavet t , så kan vi skrive formel for energien som

$$E = P \cdot t \quad (1)$$

Lad os prøve at bruge formlen på de to regneeksempler fra før. I tilfældet med mobiltelefon opladeren, så er effekten (eller energi forbrugt per sekund) $P = 20 \text{ W}$ og tiden $t = 2$ timer eller 2 hours.

Formlen viser, at vi skal gange P sammen med t for at få energien, som bliver,

$$E = P \cdot t = 20 \text{ W} \cdot 2 \text{ hours} = 40 \text{ Wh} \quad (2)$$

I tilfældet med el-koge kedlen får vi, at effekten $P = 2000 \text{ W}$ og tiden $t = 1$ time eller 1 hour, hvilket giver

$$E = P \cdot t = 2000 \text{ W} \cdot 1 \text{ hour} = 2000 \text{ Wh} \quad (3)$$

Det smarte med formler er, at man kan skrive en meget kort form for hvordan noget skal regnes ud og så kan beregneren selv finde sine tal og sætte dem ind i regnestykket.

Af regneeksemplet ovenfor kan man se at en el-koge-kedel bruger en hel del energi og hvis man skal regne ud hvad alle apparater på en skole eller i et hus bruger, så får man nogle meget store tal. Derfor indfører man ofte nogle forkortelser for 1000 Wh eller 1000000 Wh. Dette gøres ved at sætte kilo eller Mega foran den enhed man snakker om. Dette kendes fra vægtenheder for 1000 gram skrives som 1 kilo-gram eller 1 kg. Et andet eksempel med mange flere nuller på kendes fra størrelsen af hukommelser i computere eller tablets. Her er grundenheden en byte, som bare er, at computeren kan huske et tal mellem 0 og 255. Hvis den kan huske flere tal samtidigt, lad os sige 1000 bytes, så skrives det som 1 kB. Hvis en computer kan huske mere så skrives det

1 byte =	1 byte
1000 bytes =	1 kilo-byte = 1 kB
1000000 bytes = 1000 kB =	1 Mega-byte = 1 MB
1000000000 bytes = 1000 MB =	1 Giga-byte = 1 GB
1000000000000 bytes = 1000 GB =	1 Tera-byte = 1 TB

Hvor mange bytes kan den tablet eller computer i bruger i skolen huske?

Når man skal skrive hvor meget energi der bliver brugt på en skole, så skal man også bruge store tal og her bruges følgende system

1 Wh =	1 Wh
1000 Wh =	1 kWh
1000000 Wh = 1000 kWh =	1 MWh
1000000000 Wh = 1000 MWh =	1 GWh
1000000000000 Wh = 1000 GWh =	1 TWh

Fra el-koge kedel eksemplet kunne man se at energiforbruget var 2 kWh. Mindre vindmøller producerer MWh per år, store vindmøller producerer GWh per år og endeligt bruger Danmark TWh per år i energi.

Når man har energiforbruget, så kan man udregne hvor meget man skal betale på sin strømregning, hvis man kender prisen for energien. I Danmark bliver strømregninger for almindelige huse opgjort ved, at man får at vide hvor mange kWh man har brugt i løbet af et år. Dette tal ganges så med prisen per kWh og resultatet viser hvor meget man skal betale for sit el-forbrug.

Den typiske pris for el i Danmark lidt over 2 kr / kWh (i 2017) for private med et forbrug omkring 4000 kWh per år.

En klasseopgave kan være at lave en liste over apparater i klasselokalet. Finde ud af hvor mange watt de er på, gætte på hvor lang tid de er tændt, beregne energi forbruget og endeligt beregne elregningen for en dag, en uge og et år.

Relation til slides:

Slide 4) forklarer sammenhængen mellem effekt og energi. Desuden blive enheden Watt og Watt-timer indført.

Slide 5) viser et simpelt eksempel på en udregning af et el-forbrug i løbet af nogle timer og hvor stor en el-regning det vil medføre.

Læringsmål i undervisningen:

Hvad er sammenhængen mellem energiforbrug og effekt for elektriske apparater?

Hvordan regner man energiforbruget ud ved at kende effekten af et apparat?

Hvilket enheder bruger man for energi og effekt?

Hvordan bruger man kilo-, Mega-, Giga- og Tera for store enheder?

Hvordan beregner man energiforbrug i et tidsrum som et år?

Hvordan beregner man elregningen for et energiforbrug?

6. Hvor meget varme har skolen brug for?

Formål:

Lindebjergskolen forsynes med strøm fra el-nettet, men laver også selv strøm med solceller på taget. Men ud over strømforbruget har Lindebjergskolen også et naturgasfyr i kælderen, som bruges til at opvarme skolen. Her skal de samlede energi forbrug beregnes.

Baggrund:

Lindebjergskolen får strøm fra el-nettet, men fik også installeret solceller på taget i 2013 til at dække noget af elforbruget på skolen. Solcellerne fylder et areal på 802 m² fordelt på 4 af skolens tage og kan levere en effekt på 105 kW eller 105000 W, hvis solen skinner fra en skyfri himmel og direkte ned på solcellerne. Forbruget af strøm leveret fra kraftværkerne registreres på en elmåler på skolen hvert minut, mens at den el som bliver produceret af skolens solceller registreres af en anden elmåler hvert minut. Dette gør at elforsyningselskabet kan bruge en pris, hvis skolen køber strøm og en anden pris, hvis skolen sender strøm tilbage i el-nettet og dermed sælger strømmen. De to priser er meget forskellige og salgsprisen er lavere end købsprisen. Skolen sparer derfor penge, hvis solcellestrømmen kan bruges af skolen selv. Forbruget af strøm og produktionen fra solcellerne bliver opgjort per måned og man kan få disse tal fra skolens tekniske personale eller fra Roskilde kommune.

Ud over strømforbruget, så har Lindebjergskolen et naturgasfyr i kælderen, som brænder naturgas og varme vand op som sendes igennem radiatorerne og ud til de varme vandhaner på skolen. Der sidder en gasmåler med siden af gasfyret, som måler hvor mange liter gas der kommer igennem gasrøret. Skolen får derfor også en gas-regning, som viser hvor meget gas der er blevet brændt af hver måned. Denne gasregning opgøres i rumfanget af gas, hvilket måles i kubik meter eller m³. Da en liter svarer til en kasse med 10 cm store sider, så svarer 1 M³ til 1000 Liter.

Man kan måle hvor meget energi man får ved at brænde 1 m³ gas af og derned omregne et rumfang gas til energi forbrug. Omregnings faktoren er 11 kWh/m³ for naturgas. Dermed kan man tage el og gas regningen for skolen og omregne både el og gasforbrug til energiforbrug, således at de kan vises i samme diagram.

Til dette undervisningsmateriale er blevet lavet et regneark, hvor strømforbruget, solcelle produktionen og naturgas forbruget for 2014 på Lindebjergskolen er angivet i koloner for de 12 måneder i året (se Bilag B). Disse tal kan udskiftes med tal for nyere år eller med tal for andre skoler, hvis man gerne vil beregne sine egne tal. Der er tilføjet en kolonne med en mulig el-produktion fra en husstandsvindmølle med en højde på 25 m og hvordan disse tal er fundet er forklaret i Bilag C.

Relation til slides

Slide 6) viser hvordan Lindebjergskolen bliver forsynet med el fra kraftværker, solceller på taget og naturgas fra gas nettet.

Slide 7) Diagram af Lindebjergskolens energiforbrug for 2014, når strøm og gas forbrug vises i enheden kWh.

Læringsmål i undervisningen:

Hvordan bliver Lindebjergskolen forsynet med el og gas?

Hvordan får man fat i skolens el og gasregning?

Hvordan regner man ud hvad det samlede energiforbrug er ud fra el og gas regningen?

7. Hvad er fossile brændsler?

Formål:

Fossile brændsler er kemiske forbindelser af kulstof og brint, som er opstået fra gamle plante rester, som har ligget dybt nede i jorden i millioner af år.

Baggrund:

For millioner af år siden var det mest af jorden dækket af store mængder planter, som på et tidspunkt blev dækket af tykke jordlag og dermed begravet. Planter opbygger deres strukturer ved at omdanne sollys, vand, CO₂ og næringsstoffer til organiske kemiske forbindelser, som mest består af kulstof atomer og brint, som kommer fra vandet H₂O og fra CO₂, som planterne optager fra jorden og fra luften. Når planter nedbrydes omdannes de til kemiske forbindelser som kaldes kulbrinter, hvilket inkluderer olie, gas og kul.

Den mest simple struktur er naturgas med følgende kemiske formel



Naturgas består af et kulstof atom og 4 brint atomer bundet sammen i et gas molekyle.

Tungere gasser og olier består af kulstof kæder, som kan skrives



Hvor x angiver hvor mange kulstof atomer og y hvor mange brint atomer der sidder i en molekylekæde.

Kul består hovedsageligt af kulstof atomer, men indeholder ofte også brint og mindre mængder af svovl (S) og kvælstof (N).

Relation til slides

Slide 8) oversigt over de kemiske strukturer af kulbrinterne naturgas, olie og kul.

Læringsmål i undervisningen:

Hvad er fossile brændsler?

Hvordan er de dannet?

Hvilke grundstoffer består de af?

8. Hvordan skabes CO₂ ved forbrænding?

Formål:

Når kulbrinter brændes af, så dannes der varme, vand og kul-di-oxid (CO₂). Varmen kan bruges til at omdanne vand til damp, som kan fødes igennem en turbine på et kraftværk. Hvis turbinen driver en generator, så kan man lave strøm der kan sendes ud på el nettet.

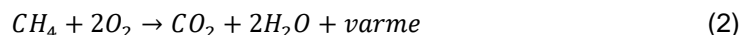
Baggrund:

Når kulbrinter brændes sker der en kemisk reaktion med ilt molekyler (O₂) og der dannes varme og nye kemiske forbindelser. Den kemiske reaktion for afbrænding af kul er den simpleste:



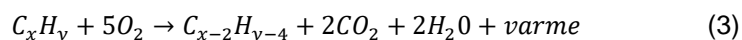
Dette viser, at man får CO₂ som rest produkt ved afbrænding af kul, men hvis kullet også indeholder svovl, kvælstof eller andre ting kan man også få andre rest produkter, som giver anledning til forurening.

Afbrænding af naturgas giver



Her kan det ses, at man både får kul-di-oxid (CO₂) og vand (H₂O) som rest produkter. Desuden kan man se at der skal bruges 2 ilt molekyler (O₂) for at reagere med et naturgas molekyle.

Afbrænding af olie er mere kompliceret, men en mulig reaktion kan skrives på følgende form:



Hvor man kan se 5 ilt molekyler omdanner noget af kulstofkæden til CO₂ og vand. Denne proces kan så fortsætte indtil hele kulbrinte kæden er brændt op.

Som det kan ses af ovenstående kemiske reaktioner, så vil afbrænding af alle fossile brændsler (kul, olie, gas) give anledning til dannelse af CO₂.

Når fossile brændsler skal bruges til at lave el, så benytter man oftest varmen fra afbrændingen til at omdanne vand til damp, som kan ledes gennem en turbine der driver en generator. Man kan sige at den kemiske energi, som er oplagret i de fossile brændsler først bliver omdannet til varme energi. Varmen bliver derefter omdannet til bevægelsesenergi, som til sidst bliver omdannet til elektrisk energi i generatoren på kraftværket. Den elektriske energi kan derefter transporteres i højspændingsledninger til stikkontakten i folks huse, hvor den igen kan omdannes til varme i vandet af en elkogekedel eller til bevægelsesenergi, hvis man tilslutter f.eks. en røre maskine.

Hver gang man omdanner energi fra en form til en anden form vil man miste noget og man siger ofte at der er et energi tab i systemet. Dette betyder at der skal laves mere energi på kraftværket en det der kommer ud af stikkontakten hjemme i husene.

Relation til slides

Slide 9) Simple kemiske reaktioner for forbrænding af kulbrinter

Læringsmål i undervisningen:

Hvilke kemiske reaktioner sker der ved afbrænding af kulbrinter?

Hvorfor dannes der CO₂ ved afbrænding af kulbrinter?

Hvilke energiformer findes der i et kraftværk der laver el?

9. Hvorfor kaldes CO₂ for en drivhusgas?

Formål:

Grunden til at CO₂ kaldes en drivhusgas er, at hvis man øger mængden af CO₂ i luften omkring jorden, så vil flere af solens stråler blive opfanget af jorden og dermed vil der blive varmere på jorden. Det er det samme der sker, når man sætter et drivhus op i sin have. Så vil solens stråler blive fanget inde i drivhuset, som bliver varmere end udenfor, når solen skinner.

Baggrund:

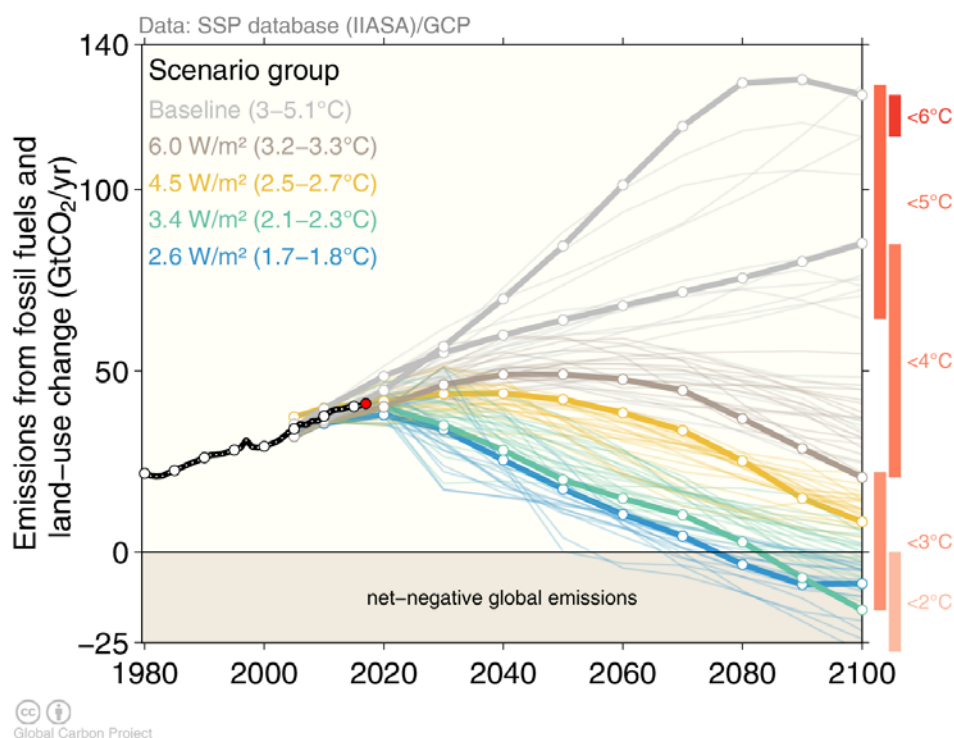
De fleste danskere vil sikker syntes at det ville være rart, hvis vejret i landet var varmere og med mere sol. Så når man hører om "drivhus effekten" i medierne, så kunne man måske tænke at det lyder da meget godt. Problemet er bare at hvis hele jorden kommer i et drivhus, så kan man ikke gå uden for eller åbne et vindue, hvis det bliver for varmt. Og hvis det bliver for varmt kan det bliver et problem at skaffe drikkevand og mad til alle de væsner der bor på planeten.

"Drivhus effekten" beskriver at, der nok er en sammenhæng mellem hvor store mængder drivhus gasser, som menneskene på jorden udleder, og hvor varmt der bliver på jorden i fremtiden. CO₂ er en af drivhus gasserne, som giver anledning til øget opvarmning af jorden, men naturgas CH₄ giver faktisk mere opvarmning end CO₂ og skal også tages med i "drivhus effekten".

Der er mange forskere som arbejder med at lave matematiske modeller, som kan bruges til at udregne, hvor varmt der bliver på jorden de næste 100 år. Disse modeller starter ofte med at sige hvor meget energi, som solen skinner ind på jorden. Derefter skal man sige hvor meget energi som jorden skinner tilbage ud i verdensrummet og her er det at drivhusgasser skal tages med i beregningen, fordi de ligger i luften uden om jorden. Klimaforskerne snakker derfor ofte om hvor meget CO₂ der er i luften omkring jorden i forhold til den normale sammensætning af luften. Den normale sammensætning af luften omkring jorden er ca. 78 % kvælstof (N₂), 21% ilt (O₂) og ca. 1 % af andre gasarter. Blandt de andre gas arter er det meste argon (Ar), mens at CO₂ og metan (CH₄) udgør en meget lille del. Andelen af kvælstof i atmosfæren er angivet som en procent del af det samlede rumfang af atmosfæren. Det vil sige, at hvis man fylder en mælkekarton (1 Liter) med luft og man kunne splitte de forskellige luftarter fra hinanden, så ville kvælstof N₂ fylde 78% af 1 liter, hvilket er 0.78 liter. På tilsvarende vis vil ilten fylde 21 % af 1 liter, hvilket er 0.21 liter. Mængden af CO₂ er omkring 0.04% og derfor meget lille. Når man angiver procent % betyder det 1 del ud af 100 og hvis man angiver promille betyder det 1 del ud af 1000. Man har dog også en mindre inddeling, som er 1 del ud af en million. På engelsk kalder man dette for "parts per million", hvilket man forkorter til ppm. Det er denne enhed man bruger til at måle, hvor meget CO₂ der er i atmosfæren. Så i stedet for at skrive 0.04 % CO₂ skriver man 400 ppm, som er samme værdi.

Man har målt CO₂ koncentrationen i atmosfæren i gennem lang tid og det kan ses der er kommet mere og mere CO₂ i atmosfæren de sidste 50 år. CO₂ frigives fra naturlige biologiske processor og derfor kan ændringer i jordens plante bestand give anledning til ændringer af CO₂ indholdet i luften. Mange forskere mener dog at stigningen af CO₂ skyldes, at mennesker på jorden brænder fossile brændstoffer af i store mængder.

Et spørgsmål som mange forskere prøver, at svare, er hvor meget temperaturen på jorden vil stige hvis CO₂ mængden i atmosfæren øges med en vis mængde. Et af de seneste forsøg på, at svare på spørgsmålet kan ses i figur 9.1, som er blevet offentliggjort i forbindelse med FN klimatopmøde COP 23 i 2017 (Global Carbon Project, 2018) (Rogelj, Popp, Calvin, & al., 2018). Figuren viser hvordan forskerne mener gennemsnits temperaturen på jorden vil ændre sig afhængigt af hvordan menneskenes CO₂ udledning vil være i fremtiden. Tallene angivet med farver viser hvor meget balancen mellem indstrålet og udstrålet varme fra solen vil være i år 2100, hvis de forskellige CO₂ udledningsscenarioer finder sted. Forskerne viser altså at temperaturen vil stige op mod 5-6 grader, hvis udledningen af CO₂ fortsætter med at stige. Hvis temperaturændringen skal holdes mindre en 2 grader i år 2100, så skal man til at suge CO₂ ud af atmosfæren fra omkring år 2075-2085.



Figur 9.1 Global udledning af CO₂ og forudsigelser for hvordan jordens gennemsnits temperatur vil ændre sig, hvis udledningen enten stiger eller falder. Enheden for udledningen er "Giga tons CO₂ per år" eller "milliarder tons CO₂ per år". Reproduceret fra Global Carbon Budget 2017 under betingelser af Creative Commons Attribution 4.0 International license (Global Carbon Project, 2018).

Relation til slides

Slide 10 nævner kort hvorfor en CO₂ kaldes en drivhusgas.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Argumenterne for hvorfor at CO₂ bliver kaldt en drivhusgas.

10. CO₂ og energi produktion fra naturgas?

Formål:

Når et naturgasmolekyle (CH₄) reagerer med et ilt molekyle (O₂) frigives der CO₂, H₂O og en lille mængde energi. Hvis man kan regne ud hvor mange gas molekyler der er i en liter naturgas, så vil man også kunne udregne, hvor mange CO₂ molekyler og hvor meget varme der frigives ved afbrænding af 1 kubikmeter naturgas. Disse omsætningstal kan bruges til at udregne hvor meget CO₂ og energi eller varme, man får fra et natur gasfyr.

Baggrund:

Det kræver en del viden om kemi og kemiske reaktioner for at udregne CO₂ og energifrigivelsen ved afbrænding af 1 kubikmeter gas. I stedet for en udregning kan man i stedet måle CO₂ og varmegifrigivelsen ved en kontrolleret afbrænding. Dette er blevet gjort af ingeniører og bliver brugt af energistyrelsen til at finde ud af hvor meget CO₂ og varme man får fra afbrænding af naturgassen i det danske gas system. Energistyrelsen offentliggør disse omsætningstal, som er vist på slide 11.

Lad os starte med energifrigivelsen, hvor man kan se at omsætningsfaktoren er

$$C_{\text{GastilEnergi}} = 0.0396 \text{ GJ/m}^3 \quad (1)$$

Det vil sige, at man får frigivet en energi mængde på 0.0396 Giga Joule for hver kubik meter gas som brændes af. Men hvordan skal vi sammenligne denne energi med den elektriske energi, som blev angivet som Watt timer eller kWh?

Først skal vi huske hvad Giga betyder. Det betyder, at tallet skal ganges med 1000000000 eller en milliard. Det vil sige

$$C_{\text{GastilEnergi}} = 0.0396 \times 1000000000 \text{ J/m}^3 = 3960000000 \text{ J/m}^3 \quad (2)$$

Så skal vi huske hvordan Watt er relateret til energi. Watt angav energi forbrug per tid og derfor er elektrisk energi lig med effekt forbrug gange med tiden for forbruget. Skrevet som en formel bliver det $E = P \cdot t$. Hvis man isolerer effekten får man $P = E/t$. Vi ved at effekten måles i Watt, men hvis energien E måles i Joule og tiden i enheden sekunder, så må enheden Watt være givet ved

$$\text{Watt} = \text{Joule} / \text{sekund} \quad (3)$$

Det må så også betyde at 1 Joule er den energi der bliver brugt hvis man har et elektrisk apparat med en effekt på 1 Watt tilsluttet i 1 sekund. Vi kan skrive

$$\text{Joule} = \text{Watt} \times \text{Sekund} \quad (4)$$

Den elektriske effekt var dog givet i Watt timer (Wh) og ikke Watt sekund. Hvis man bruger 1 Watt på 1 sekund, hvor meget energi har man så brugt på 1 time? Der går 60 sekunder per minut og 60 minutter per time, hvilket giver 3600 sekunder per time.

Det vil sige at

$$1 \text{ W} \times \text{time} = 1 \text{ W} \times 3600 \text{ sekunder} = 3600 \text{ W} \times \text{sekunder} = 3600 \text{ Joule} \quad (5)$$

Og tilsvarende bliver

$$1 \text{ kWh} = 1000 \times 3600 \text{ Joule} = 3600000 \text{ Joule} \quad (6)$$

Nu kan vi udregne hvor mange kilo Watt timer (KWh) energi som man får ved afbrænding af 1 kubik meter gas:

$$\begin{aligned} C_{\text{GastilEnerg}} &= 3960000000 \text{ J/m}^3 \\ &= 3960000000 \text{ J/m}^3 / 3600000 \text{ Joule/kWh} \\ &= 1100 \text{ kWh} / \text{m}^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Med denne omregningsfaktor kan man bestemme hvor mange kilo watt timer energi, som der bliver frigivet ved afbrænding af 1 kubik meter gas, som er den enhed som de fleste gas målere benytter.

Det næste omsætningstal fortæller hvor meget CO₂ man får ved afbrænding af naturgas. Denne omsætningsfaktor er opgivet til

$$C_{\text{gastilCO}_2} = 57.06 \text{ tons CO}_2/\text{TJ} \quad (8)$$

Her angiver T at der er tale om Tera Joule, hvilket er 1000000000000 Joule. Dette kan dog skrives om til kilo-Watt-timer ved at bruge formel (6). Man får

$$\begin{aligned} 1 \text{ TJ} &= 1000000000000 \text{ Joule} / (3600000 \text{ Joule} / \text{kWh}) \\ &= 277777.8 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (9)$$

Hvorned

$$\begin{aligned} C_{\text{gastilCO}_2} &= 57.06 \text{ tons CO}_2/\text{TJ} \\ &= 57.06 \times 1000 \text{ kg CO}_2 / 277777.8 \text{ kWh} \\ &= 0.205 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh} \end{aligned} \quad (10)$$

Eller man kan skrive omsætningen per kubik meter gas ved at bruge (7)

$$\begin{aligned} C_{\text{gastilCO}_2} &= 0.205 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh} \\ &= 0.205 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh} \times 1100 \text{ kWh} / \text{m}^3 \\ &= 226 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3 \end{aligned} \quad (11)$$

Relation til slides

Slide 11 viser hvor meget CO₂ og energi man får fra afbrænding af naturgas.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Forståelses af relation mellem en kemisk reaktion $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{E}$ og en formel som viser at energien fra afbrænding af gas kan skrives som : energi er lig med gas rumfang gange med omsætningsfaktoren.
- 2) Eller som formel $E = V_{\text{gas}} \times C_{\text{GastilEnergi}}$, hvor $C_{\text{GastilEnergi}} = 0.0396 \text{ GJ/m}^3$
- 3) At der går 3600 Joule på en Watt time
- 4) At der går 3600000 Joule på en kilo-Watt time
- 5) At energi mængden fra afbrænding af en kubik meter gas kan skrives som $C_{\text{GastilEnergi}} = 3960000000 \text{ J/m}^3 = 1100 \text{ kWh / m}^3$
- 6) At CO_2 udledningen fra afbrænding af naturgas er $0.205 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}$
- 7) Eller $226 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$

11. CO₂ fra el produktion

Formål:

El produktionen i Danmark bliver foretaget på både kraftværker, som brænder kul, naturgas eller affald og ved at bruge vindmøller eller sol celler. Hvis der afbrændes fossile brændsler for at lave strømmen, så udledes der CO₂. Men hvordan kan man se om den strøm man modtager kommer fra et kraftværk eller en vindmølle? Det kan man ikke og derfor er der brug for at vide hvor meget af den danske strøm som kommer fra fossile kilder og hvor meget der kommer fra bæredygtige kilder. Man kan derefter regne den samlede CO₂ udledning ud for Danmark og fordele den på alle de kilo watt timer energi der bliver produceret. Resultatet er at der blev udledt omkring ½ kg CO₂ per kWh i 2014. Dette tal forventes at blive mindre og mindre efterhånden som de fossile energi kilder udfases fra det Danske el-system.

Baggrund:

På slide 12 kan man se hvor meget el der er blevet produceret i Danmark fra 2010 og til 2014. Desuden kan man se hvilke kilder der er blevet brugt til denne produktion. Når man kender kilderne kan man også udregne hvor meget CO₂ som det giver anledning til. På slide 13 kan man se hvor meget strøm der er blevet brugt i Danmark og dette er forskellig fra hvad der er produceret, fordi der importeres strøm fra vores nabo lande (Sverige, Norge og Tyskland). Ud fra Danmarks forbrug kan man beregne hvor meget CO₂ der udledes per brugt kWh, hvilket er vist på den nederste graf.

Resultatet er at der udledes omkring ½ kg CO₂ per brugt kWh for perioden 2010-2014. Dette tal vil ændre sig i fremtiden, når der ændres på sammensætningen af kilderne.

Relation til slides

Slide 12 og 13 viser el deklARATIONEN for 2014, hvor det kan ses hvilket energi kilder som blev brugt for at lave strømmen til Danmark.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Hvilke kilder bruges der til at producere el i Danmark
- 2) Hvor meget el og fra hvilke kilder kommer der fra udlandet
- 3) CO₂ udledningen fra el forbruget i Danmark er ca. ½ kg CO₂ per kWh for 2010-2014

12. Skolens CO₂ fodaftryk i 2014?

Formål:

Vi skal have regnet ud hvor meget CO₂ skolen udleder om året og dette kunne man kalde skoles CO₂ fodaftryk, fordi det bliver hængende i luften uden af man kan se det. Men hvor er fodaftrykket og hvordan skal man forstå det? Endeligt skal vi prøve at svare på om CO₂ fodaftrykket er stort eller lille?

Baggrund:

Hvis man går et sted hvor der er mudret jord, så kan man efterlade et fodaftryk i mudderet, som bliver der efter man er gået videre. Dette billede har inspireret til at man i de sidste par årtier har snakket om at mennesker efterlader et "CO₂ fodaftryk" eller "carbon foot print", som det hedder på engelsk. Ideen med CO₂ fodaftrykket er at det skal vise, at personer efterlader CO₂ når de "går" igennem et år og størrelsen af det årlige fodaftryk viser hvor meget CO₂, som de aktiviteter mennesket har lavet (spist mad, kørt i bil, opvarmet sit hus, fløjet på ferie, ...) har givet.

På samme måde kan man spørge hvad er Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk ved at definere det som den CO₂ der er udledt for at varme skolen op med naturgas og forsyne skolen med el i 2014. Dette tal kan findes ved at lægge alle tallene sammen på figuren på slide 14. Energiforbruget og produktionen er vist på figur 15 og den tilsvarende udledte CO₂ mængde i tons er angivet.

Resultatet er, at Lindebjergskolen udledte 111 tons CO₂ i 2014.

Er det lidt eller meget? Hvad vejer en elefant og hvor mange elefanter svarer 111 tons til?

Som man kan se af tallene så producerer skolen lige så meget solcellestrøm, som der bliver brugt af strøm på et år og dermed kan man sige at skolen har grøn eller bæredygtig strøm. Dette er dog ikke helt rigtigt, fordi hvis man kigger på slide 14, så trækkes strømmen fra el nettet om vinteren, hvor det er mørkt og solcellerne ikke laver så meget el. Hvis den strøm kommer fra fossile energi kilder, så som kulkraft, så vil der være en CO₂ udledning fra produktionen af strømmen.

En måde at undersøge om 111 tons CO₂ er meget eller lidt er at udregne, hvor meget det fylder. Dette kan gøres ved at bruge massefylden af gassen ved almindeligt tryk og omkring 0 grader Celsius

$$\rho = 2.0 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

Rumfanget af CO₂ gassen $V_{CO_2 \text{ Lindebjerg}}$ udregnes ved at dividere vægten m af CO₂ gassen med massefylden ρ . Dette kan skrives som

$$V_{CO_2 \text{ Lindebjerg}} = \frac{m}{\rho} = \frac{111 \text{ ton} \cdot 1000 \text{ kg/ton}}{2.0 \text{ kg/m}^3} = \frac{111000 \text{ kg}}{2.0 \text{ kg/m}^3} = 55500 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Det vil sige, at CO₂ gassen udledt i 2014 fylder 55500 kubikmeter.

Hvis dette rumfang samles i en kasse, hvor stor er siden på kassen så?

Dette kan udregnes hvis man siger kassen har en bund med bredden B , længde L og en højde H . Kassens rumfang V_{kasse} kan skrives som

$$V_{Kasse} = B \cdot L \cdot H \quad (3)$$

Lindebjergskolen's grund er cirka $L = 190$ m og bredden er cirka $B = 140$ m. Hvor høj bliver højden H af kassen, hvis vi bruger Lindebjergskolens grund, som bund i kassen?

Så skal vi flytte rundt på formlen ovenover, hvormed vi får

$$H_{Kasse} = \frac{V_{kasse}}{L \cdot B} = \frac{55500 \text{ m}^3}{190 \text{ m} \cdot 140 \text{ m}} = 2.1 \text{ m} \quad (4)$$

Det vil sige, at hele skolens grund ville blive fyldt med et lag af CO₂ gassen i 2 meters højde, hvis alt den udledte CO₂ lagde sig nede ved jordoverfladen.

Ville det være et problem?

Hvis der er ren CO₂ i 2 meters højde på hele skolen, så vil man ikke kunne trække vejret, da vi har brug for ilt. Så det vil ikke være særligt godt. Nu går det ikke så galt, fordi CO₂ gassen flyder ud igennem siderne af kassen og fordi den bliver blandet med den luft der allerede er på skolen.

Det er dog en interessant tanke, at forestille sig at man satte glasvægge ved kanten af Lindebjergskolens grund og at disse glasvægge ville holde Lindebjergskolens luft inde på skolen. Man kan jo spørge hvor høje sådan nogle glasvægge skulle være, hvis de skulle holde på alt skolens luft? Så skulle de faktisk gå ud i verdensrummet og være omkring 30 kilometer høje. Dermed ville vindene ikke kunne blæse luften ud af den tænkte glaskasse.

Et godt spørgsmål er nu hvad der sker med sammensætningen af luften i glaskassen, når skolens CO₂ udledes i et år. Vi skal have lagt det nye rumfang CO₂ til det rumfang CO₂ som allerede findes. Men hvad er rumfange af luften i glaskassen? Det kan findes ved at sætte højden i kasseformlen til $H = 30$ km, hvormed man får

$$V_{Glas\ kasse} = B \cdot L \cdot H = 190 \text{ m} \cdot 140 \text{ m} \cdot 30000 \text{ m} = 798000000 \text{ m}^3 \quad (5)$$

I kapitel 9 blev det vist at jordens luft indeholder 400 ppm CO₂. Det vil sige at rumfaget af CO₂ i glaskassen fra starten er

$$V_{CO_2\ kasse} = V_{Glas\ kasse} \cdot 400 \text{ ppm} = 798000000 \text{ m}^3 \cdot \frac{400}{1000000} = 319200 \text{ m}^3 \quad (6)$$

Hvis CO₂ udledningen fra Lindebjergskolen i 2014 lægges til rumfanget af den mængde CO₂ der allerede er så kan den nye koncentration af CO₂ bestemmes

$$ppm_{CO_2} = \frac{V_{CO_2 \text{ kasse}} + V_{CO_2 \text{ Lindebjerg}}}{V_{\text{Glas kasse}}} = \frac{319200 \text{ m}^3 + 55500 \text{ m}^3}{798000000 \text{ m}^3} = 469 \text{ ppm} \quad (7)$$

Hvis der i 2015 udledes ligeså meget CO₂ vil man igen se en stigning af CO₂ koncentrationen på yderligere 69 ppm, hvilket vil forsætte år efter år indtil udledningen fra skolen ændres.

Der melder sig nu det spørgsmål om denne stigning af CO₂ koncentrationen er stor eller lille.

Nogle forskere har formuleret at CO₂ koncentrationen i atmosfæren ikke skal overstige 450 ppm på global skala. Dermed må man konkludere, at udledningen fra Lindebjergskolen er temmelig høj, hvis skolen skulle passe på sin egen luft i en tænkt glaskasse, som havde skolens grundareal og gik helt ud til verdens rummet.

Men kan man ikke sige, at skolen kan låne noget af luften omkring skolens areal, så som luften over markerne omkring skolen?

Det er i hvert fald det som sker ved at skolens luft blandes med luften over markerne ved siden af skolen. Normalt når man låner noget af nogen laver man ofte en aftale, som beskriver hvordan det man har lånt skal afleveres tilbage og hvad det eventuelt skal koste at låne det man har lånt. Som eksempler kan nævnes udlån af bøger fra skolebiblioteket eller hvis man låner et sommerhus. Bøgerne på skolebiblioteket udlånes til eleverne gratis, hvis de lover at aflevere dem tilbage efter en uge og uden af bøgerne er blevet ødelagt, så de kan udlånes igen og igen til andre elever. Hvis man låner et sommerhus af nogen, som man kender, kan det også ske på sammen måde ved, at man aftaler, at man må bruge det en uge, hvis man lover at passe på sommerhuset og gøre det rent, når man rejser fra sommerhuset. Hvis man låner et sommerhus af nogen, man ikke kender, skal man ofte betale en leje for at låne sommerhuset i en uge. Desuden skriver man et stykke papir, hvor der står hvordan man må bruge sommerhuset, hvordan der skal gøres rent og endeligt hvad der skal betales for leje af sommerhuset og hvordan der skal betales for strøm, vand og varme for den uge man er der. Dette stykke papir kaldes en kontrakt. I kontrakten står der også hvad der kommer til at ske, hvis man ikke overholder aftalen om at passe på sommerhuset. Hvis der f.eks. går noget i stykker i sommerhuset, står der at man selv skal betale for at få det repareret (et eksempel kan være en fodbold der skydes på et vindue som smadrer). Hvis man nægter at betale for reparationen af et smadret vindue, kan den som ejer sommerhuset gå til politiet med kontrakten og bede om at få en dommer til at indkalde til et møde i retten, for at afgøre hvem der skal betale. I retten vil der være en anklager, som vil forklare at man ifølge kontrakten selv skal betale for et smadret vindue. Der vil også være en forsvarer, som måske vil sige at vinduet allerede var meget gammelt og at den som lejede sommerhuset ikke skal betale den fulde pris. Dommeren vil lytte på argumenterne fra anklageren og forsvareren og træffe en afgørelse om hvem der skal betale i forhold til de love man har i Danmark.

Hvis Lindebjergskolen skulle lave en aftale om at låne nogens luft, hvem skulle aftalen så laves med og hvor meget luft skulle der lånes?

En måde at besvare et sådant spørgsmål kan gøres ved at vende tilbage til Figur 9.1, som viser hvad den globale udledning af CO₂ er nu og bør være i fremtiden. Spørgsmålet er dog hvordan man skal sætte den globale udledning i forhold til udledningen fra Lindebjerg skolen? Man kunne

tage den globale udledning og dele den ud på alle mennesker på jorden og så spørge om eleverne på Lindebjerg skolen udledte mere en gennemsnittet.

Lad os prøve, at regne udledningen per menneske på jorden ud. Det må være den globale udledning i 2017 divideret med hvor mange mennesker der er på jorden. Ifølge Wikipedia var der 7.6 milliarder mennesker på jorden i 2017.

$$m_{CO_2 \text{ per menneske}} = \frac{40 \text{ milliarder tons } CO_2 \text{ per år}}{7.6 \text{ milliarder mennesker}} = 5.3 \text{ tons } CO_2 \text{ per år per menneske} \quad (8)$$

Der går omkring 420 elever på Lindebjergskolen og derfor er udledningen per elev

$$m_{CO_2 \text{ per elev}} = \frac{111 \text{ tons } CO_2 \text{ per år}}{420 \text{ elever}} = 0.3 \text{ tons } CO_2 \text{ per år per elev} \quad (9)$$

Dette viser, at CO₂ udledningen fra skolen kun udgør omkring 5 % af den gennemsnitlige udledning per menneske på jorden. Man kan derfor sige at det er ikke så galt og at skolernes varme og el-forbrug ikke er de største bidrag til CO₂ udledningen fra menneskene på jorden.

Men ovenstående beregning viser også at der er en modsætning mellem udregningen i formel (7), som viste at skolen vil have svært ved at passe på sin egen luft, og resultatet af formel (9), som viser at skolens udslip ikke er så stort i forhold til udslippet per menneske på jorden. Årsagen til denne modsætning skyldes nok, at der er mange mennesker på jorden, som regner med at de kan låne nogle andres luft uden at der sker noget ved det. Problemet er bare, at hvis for mange mennesker tænker sådan, så overlåner man af luften og så stiger CO₂ koncentrationen betydeligt.

En anden måde at fordele den globale CO₂ udledningen på er, at dividere den globale udledning med overflade arealet af jorden, fordi man dermed vil fordele udledningen i tænkte glasbokse, som svarer til luften over et stykke land eller vand på jorden. Jorden kan beskrives som en kugle og overflade arealet af en kugle A_{kugle} med radius R er givet ved

$$A_{kugle} = 4\pi R^2 \quad (10)$$

Ifølge Wikipedia er jordens radius $R_{Jorden} = 6373$ km. Når det indsættes i (10) får man at overflade arealet er

$$A_{Jorden} = 4\pi R_{Jorden}^2 = 4\pi(6373 \text{ km})^2 = 510 \text{ millioner } km^2 \quad (11)$$

Nu kan CO₂ udledningen per overflade areal af jorden udregnes ved at dividere den globale udledning med A_{Jorden} :

$$m_{CO_2 \text{ per areal}} = \frac{m_{CO_2}}{A_{Jorden}} = \frac{40 \text{ milliarder tons } CO_2 \text{ per år}}{510 \text{ millioner } km^2} = 78.4 \text{ tons } CO_2 \text{ per år per } km^2 \quad (12)$$

Dette kan omregnes til udledning per kvadratmeter ved at benytte at $1 \text{ km}^2 = 1000000 \text{ m}^2$ og at $1 \text{ ton} = 1000 \text{ kg}$. Resultatet er

$$m_{CO_2 \text{ per areal}} = \frac{m_{CO_2}}{A_{Jorden}} = 0.078 \text{ kg } CO_2 \text{ per år per } m^2 = 78 \text{ g } CO_2 \text{ per år per } m^2 \quad (13)$$

Lindebjergskolens areal blev tidligere udregnet til at være omkring

$$A_{skolen} = L \cdot B = 190 \text{ m} \cdot 140 \text{ m} = 26600 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Dermed bliver CO₂ udledningen per areal for Lindebjergskolen

$$m_{CO_2 \text{ per Lindebjerg areal}} = \frac{m_{CO_2}}{A_{skolen}} = \frac{111000 \text{ kg } CO_2 \text{ per år}}{26600 \text{ m}^2} = 4.2 \text{ kg } CO_2 \text{ per år per m}^2 \quad (15)$$

Dette er betydeligt større en udledningen per areal af jorden i formel (13) og viser at skolen skal låne en hel del luft før, at udledningen svarer til jordens areal gennemsnit.

Man kan nu udregne hvor meget ekstra areal som Lindebjergskolen skal låne luft fra ved at dividere skolens udledning i formel (15) med jordens udledning i formel (13). Resultatet bliver

$$\frac{A_{låne}}{A_{skole}} = \frac{m_{CO_2 \text{ per Lindebjerg areal}}}{m_{CO_2 \text{ per areal}}} = \frac{4.2 \text{ kg } CO_2 \text{ per år per m}^2}{0.078 \text{ kg } CO_2 \text{ per år per m}^2} \sim 54 \quad (16)$$

Dette viser, at arealet af skolens grund burde være 54 gange større, hvis udledningen skulle svare til det globale gennemsnit i formel (13). Eller at længde og bredde af skolens grund skulle ganges cirka med en faktor 7, hvormed $L = 7 \cdot 190 \text{ m} = 1330 \text{ m}$ og $B = 7 \cdot 140 \text{ m} = 980 \text{ m}$.

På nuværende tidspunkt er der ikke nogen aftale med skolens naboer om at låne deres luft for, at få blandet CO₂ udledningen fra Lindebjergskolen op. Hvis en sådan aftale skulle laves, så kan man spørge om skolen burde købe 54 gange mere jord for at kunne bruge luften over denne ekstra jord til opblanding af CO₂ udledningen. Hvis ikke landmændene omkring Lindebjerg skolen vil sælge deres jord, så kan det jo være at de vil leje deres luft ud til Lindebjerg skolen. Men hvis luften skal bruges til opblanding så er det jo vigtigt at naboerne ikke selv udleder CO₂ til deres luft fra egne naturgas fyr. Ellers skal man vel til at modregne deres egen udledning. Endeligt er det et godt spørgsmål hvor meget det skal koste at leje luften?

En alternativ strategi til at låne frisk luft fra naboerne er, at reducere udledningen fra Lindebjerg skolen, så denne kommer ned på det globale gennemsnit givet ved formel (13). Dette vil betyde at CO₂ udledningen fra skolen skal reduceres til

$$\begin{aligned} m_{CO_2 \text{ Lindebjerg}} &= m_{CO_2 \text{ per areal}} A_{skolen} = 0.078 \text{ kg } CO_2 \text{ per år per m}^2 \cdot 26600 \text{ m}^2 \\ &= 2075 \text{ kg } CO_2 \text{ per år} = 2.1 \text{ tons } CO_2 \text{ per år} \end{aligned} \quad (17)$$

Hvis det sammenlignes med udledningen på 111 tons i 2014, så kan man se at udledningen er 50 gange for høj i forhold til jordens gennemsnit for 2017. Her skal det også nævnes, at figur 9.1 viser at det globale CO₂ udslip skal være reduceret til 0 omkring år 2075-2085, hvis jorden skal holdes inden for en global opvarmning på 2 grader Celsius.

Man kan derfor sige, at når Lindebjerg skolen allerede i 2017 burde reducere CO₂ udledningen med omkring en faktor 50 fra 111 tons til 2 tons per år, så er det nok en rimelig ambition, at have en CO₂ udledning på 0 tons om året inden 30 år og inden Danmark skal være fossil frit i år 2050.

Det skal her nævnes at Lindebjerg skolen efter 2014 er blevet forsynet med biogas, som betragtes som mere klimavenligt. Der afbrændes dog stadig store mængder gas og dermed udledes der fortsat CO₂. En fremtidig opgave for klimaskolen kan være at undersøge om CO₂ fodaftrykket er blevet reduceret nok med biogas til at være under jordens globale areal udledning givet ved formel (13).

Relation til slides

Slide 14 og 15 opsummerer energi forbruget og CO₂ udledningen for skolen i 2014.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) I de natur-faglige fag i folkeskolen skal eleverne kunne formulere modeller, som forklarer hvordan sammenhænge i naturen virker.
- 2) Udregning af rumfang af kasse og areal af skolens grund bruges til at undersøge om CO₂ udledning fra skolen er stor eller lille.
- 3) Udregning af jordens overflade areal ved hjælp af kugle formel bruges til at relatere den globale CO₂ udledning til skolens CO₂ udledning.

13. Hvordan kan CO₂ fodaftrykket reduceres?

Formål:

Hvis man skal reducere CO₂ udledningen fra Lindebjergskolen, så bliver man nød til at udarbejde en plan for hvordan man gør det og hvad man starter med. Hvad syntes I?

Baggrund:

Der bliver i disse år snakket om hvordan man skal lave en grøn omstilling af energiforsyningen i Danmark, hvor man i år 2050 ikke længere bruger fossile brændsler. Dette vil kræve, at kul- og gas kraftværker udskiftes med bæredygtige energikilder og dette kræver en langsigtet plan. På samme måde kan man spørge hvad der skal gøres på Lindebjergskolen for at skolen bliver 100 % fri af fossile brændsler?

Her lægges der op til en brain-storm med eleverne om hvad der giver anledning til CO₂ udledningen og en diskussion af hvilke teknologier der kan bruges i stedet. F. eks kan man sige, at a-kraft ikke giver anledning til CO₂ og dermed faktisk kan siges at høre til de grønne teknologier. Man kan dog med rette spørge til hvordan man kommer af med affaldet fra a-kraft værker og hvem der betaler hvis et a-kraftværk forurener sine omgivelser ved et uheld.

Relation til slides

Slide 16 rejser spørgsmålet om hvordan CO₂ udledningen kan reduceres til 0.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Kendskab til energi produktions teknologier. Både de traditionelle og de grønne.
- 2) Kendskab til udledning fra de forskellige teknologier.
- 3) Tage stilling til hvordan en langsigtet plan kan laves og hvad man skal starte med.

14. Kan det gøres med sol og vind energi?

Formål:

Lindebjergskolen har allerede solceller på taget og man kan spørge om ikke bare der skal installeres flere solceller? Eller vil man kunne opsætte en vindmølle ved siden af skolen for at dække energi forbruget?

Baggrund:

Solceller og vindmøller er faldet i pris i perioden fra 2010 og til 2018. Mange steder vil de kunne levere energi, som er billige end fra et nybygget kul- eller gas-kraftværk. Spørgsmålet er dog om man skal installere solceller eller en vindmølle lokalt for at blive 100 % selvforsynende eller om man skal trække noget af energien fra el nettet.

Hvis man kigger på el produktionen fra solcellerne på slide 7, så er det tydeligt at se at produktionen stort set går til 0 i vinter månederne. Dette viser, at der skal installeres rigtig mange solceller, hvis de skal dække energibehovet i vinter måneder og at der tilsvarende vil blive en voldsom overproduktion om sommeren, som skal sendes tilbage på elnettet. I princippet kan man overveje et stort batteri, som kan gemme solcelle strømmen produceret om sommeren til om vinteren. Udfordringen med dette er dog at det kræver et meget stort og dyrt batteri, og at man mister noget af energien, når batteriet oplades og aflades.

En vindmølle høster energi fra vinden og da det blæser mere om vinteren end om sommeren i Danmark, så passer el produktionen fra en vindmølle bedre til energiforbruget fra skolen. Dette er vist på slide 17, hvor man kan se den forventede el produktion fra en husstands vindmølle, hvis denne bliver installeret ved siden af skolen. På figuren kan man se at installationen af en vindmølle vil øge el produktionen om vinteren og dermed kan gøre skolen mere selvforsynende. Men det er også tydeligt at husstandsvindmøllen ikke kan dække hele el forbruget og kun en meget lille del af energi forbruget til opvarmning.

Et godt spørgsmål er derfor hvor stor en vindmølle skolen her brug for, hvis energi forbruget til opvarmning skal dækkes af en vindmølle?

Dette kan man svare på ved at beregne, hvor meget energi en vindmølle producerer, hvis den kører et helt år eller kun i januar måned.

En simple måde at give et overslag på produktionen fra en vindmølle er at ved, at definere hvor mange fuldlast timer, som den producerer per år. Dette betyder at man siger at enten står vindmøllen stille eller også producerer den ved fuld effekt, som vist i bilag C. Man kan definere kapacitets faktoren CF af en vindmølle, som antallet af fuldlast timer divideret med antallet af timer på et år. For en vindmølle på land ser man ofte $CF_{land} = 0.15 - 0.25$, hvilket betyder at møllen i gennemsnit kører ved fuld kraft hver 4 dag. For en vindmølle på havet er kapacitets faktoren $CF_{hav} = 0.4$, hvilket viser at det blæser mere på havet og at møllen i gennemsnit kører ved fuld kraft 4 ud af 10 dage.

Når man kender maksimum effekten af en vindmølle P , så kan man bestemme energi produktionen E ved at gange effekten P med antallet af fuldlasttimer på et år $t_{\text{Fuldlasttimer}}$. Fuldlasttimerne er givet ved kapacitetsfaktoren CF multipliceret med antallet af timer på et år, som er $t_{\text{år}} = 24 \text{ timer / dag} \times 365 \text{ dage} = 8760 \text{ timer}$. Resultater bliver dermed

$$E = P \cdot CF \cdot t_{\text{år}} \quad (1)$$

I stedet for at beregne en energi produktion kan man omskrive formel, så man kan beregne en mølleeffekt P ud fra et energi behov. Dette gøres ved at dividere begge sider af formel med $CF \cdot t_{\text{år}}$ hvormed man får

$$P = \frac{E}{CF \cdot t} \quad (2)$$

Hvor t angiver i hvor mange timer som møllen producerer.

Man kan nu bruge ovenstående formel til at udregne hvor stor en effekt en mølle skal have hvis den skal forsyne Lindebjergskolen med den energi der bruges til opvarmning. Denne energi forsynes nu af naturgas og derfor vil man skulle ændre til opvarmning med elektriske radiatorer, hvis en vindmølle skal bruges til opvarmningen.

Energiforbruget til opvarmning af Lindebjergskolen i 2014 var $E_{\text{varme,2014}} = 545 \text{ MWh}$. Ved at indsætte dette i formel (2), antage at $CF = 0.15$ og ved at sætte $t = 8760 \text{ timer}$ (1 år) fås

$$P_{2014} = \frac{E}{CF \cdot t} = \frac{545 \text{ MWh}}{0.15 \cdot 8760 \text{ timer}} = 0.42 \text{ MW} \quad (3)$$

En mølle på $\frac{1}{2}$ MW er en forholdsvis stor mølle og svarer til en Vestas V-39 vindmølle med en højde på omkring 53 m. En sådan mølle kan ikke placeres lige ved siden af Lindebjergskolen og skal stå med en afstand på 4 gange højden til nærmeste beboede bygning.

Hvis en vindmølle skal dække varmebehovet i januar måned, så vil der være brug for en energi på $E_{\text{varme, januar 2014}} = 106 \text{ MWh}$ som skal produceres i $t = 30 \text{ dage} \times 24 \text{ timer / dag} = 720 \text{ timer}$. Dette vil kræve en vindmølle med en effekt på

$$P_{\text{Januar}} = \frac{E}{CF \cdot t} = \frac{106 \text{ MWh}}{0.15 \cdot 720 \text{ timer}} = 0.98 \text{ MW} \quad (4)$$

En 1 MW vindmølle svarer til en Vestas V-52 som har en effekt på 0.85 MW og har en højde på omkring 78 m.

Ovenstående viser, at det vil kræve en installation af en forholdsvis stor vindmølle, hvis Lindebjergskolen skal blive selvforsynende med energi til både el og varme. I ovenstående beregning er det antaget at skolen opvarmes med el-radiatorer, men disse er ikke lige så effektive, som opvarmning med en varmepumpe. Med en varmepumpe kan den elektriske effekt omdannes til omkring 3-4 gange mere varme energi. Gundsøllille Hallen ved siden af Lindebjergskolen har f.eks. installeret jordvarme under fodboldbanerne og har en varmepumpe tilsluttet til opvarmning. Hvis noget tilsvarende blev gjort på Lindebjergskolen vil en mindre vindmølle kunne forsyne skolen, men størrelsen skal stadig være $P = 100 - 250 \text{ kW}$. Hvis det skal gøres med

husstandsmøller så vil det kræve mellem 4 til 10 møller. Dette viser, at det nok vil være en god ide at undersøge om noget af energien til skolen kan forsynes med vindmølle strøm fra el-nettet om vinteren. Dette kan være fra vindmølleparker i Danmark eller fra hav vindmøller på havet.

Relation til slides

Slide 17-19 undersøger om skolen kan forsynes med vindmølle strøm.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Forklare hvilke grønne energi kilder, som vil kunne dække energi behovet for skolen i løbet af året.
- 2) Udregne hvor meget energi der kan produceres med en vindmølle.

15. Konklusion for "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk"

Formål:

Hvad har vi lært af at udregne CO₂ fodaftrykket for Lindebjergskolen?
Konklusionen opremser i punktform hvad man har lært af arbejdet.

Baggrund:

Konklusionen viser hvilken ny viden der er opnået ved at undersøge Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk. Hovedpunkterne kan opsummeres til:

- 1) Bestemmelse af det samlede energi forbrug og produktion på skolen i 2014 udregnet, så de kan sammenlignes.
- 2) Der bruges ca. 5 gange så meget energi på opvarmning, som til el forsyning på skolen.
- 3) CO₂ udledningen fra el og varme i 2014 er 59 tons CO₂ og 111 tons CO₂
- 4) Varmeforbruget vil ikke kunne dækkes af solceller, da disse mest producerer om sommeren.
- 5) Vindmøller producerer mest om vinteren og passer derfor bedre som forsyning til opvarmning.
- 6) Hvis en vindmølle skal dække skolens årsforbrug af varme med el radiatorer skal møllen have en effekt på 410 kW. Dette er en mølle betydeligt større end en husstandsmølle.
- 7) Hvis en vindmølle skal dække skolens januar forbrug af varme skal møllen have en effekt på 950 kW. De ovennævnte vindmøller kan være mindre, hvis opvarmningen foretages med jordvarme eller varmepumper, som kan give en bedre virkningsgrad end el radiatorer.

Relation til slides

Slide 20 viser hoved punkter for konklusionen.

Læringsmål i undervisningen:

- 1) Hvordan samler man det man har lært i en kort konklusion.

16. Diskussion

Undervisning materialet omkring CO₂ fodaftrykket for Lindebjerg skolen udspringer af nogle diskussioner i klimarådet på Lindebjergskolen i 2013, hvor det blev undersøgt hvordan man kunne integrere klimaudfordrings aspekter i undervisningen på skolen efter, at det var blevet besluttet at skolen skulle være en klimaskole. Diskussionerne i klimarådet blev ført mellem nogle af naturfagslærerne og forældre, som til dagligt arbejdede med klimaudfordringer ud fra en ingeniør vinkel.

En af de første udfordringer var, at få defineret hvordan klimaudfordringerne skulle italesættes over for eleverne og nogle af de første erfaringer fra undervisningssessionerne med især de mindre elever var det gode spørgsmål fra en i 3 klasse: "Hvis jorden er ved at gå under hvorfor gør vi så ikke noget?". Dette viste med tydelighed, at man godt kan give naturvidenskabelige forklaringer på f.eks. global opvarmning, men at sådanne forklaringer straks leder til diskussioner af mere samfundsfags karakter.

En anden udfordring var at finde undervisningsmateriale, som var til at gå til for lærerne på skolen uden at de skulle bruge meget tid på at læse en masse baggrunds materiale for at danne sig et overblik over argumenterne i klimaforskningen og ikke mindst debatten.

Endeligt var det klart, at klimaudfordringerne fra klimadebatten var meget abstrakte for eleverne og at de havde svært ved at relatere sig til problemstillingen.

Som en mulig løsning til ovenstående udfordringer blev det foreslået, at prøve at fremstille noget undervisnings materiale, som tog konkret udgangspunkt i elevernes hverdag ved, at undersøge om skolen var blevet grønnere af at der blev installeret solceller på taget af skolen i 2013. Dette gav for det første nærhed, da eleverne kunne se solcellerne, men det gjorde også, at undervisningen viste løsninger til klima-problemet og dermed kunne gøre eleverne i stand til at handle. Med udgangspunkt i naturfagene ville man kunne stille spørgsmålet om hvilke løsninger der var til rådighed, men også hvilket der var bedst og endeligt hvilke løsninger, som eleverne syntes man skulle vælge først.

Det første oplæg til undervisning materiale blev fremstillet i 2015 som en række slides med overskriften "Skal Lindebjergskolen have en vindmølle?". Disse slides tog udgangspunkt i skolens el-regning, og lagde op til at kigge på om skolen var blevet 100 % selvforsynende med strøm. Set over hele året blev der produceret lige så meget energi fra solcellerne, som der blev forbrugt i el-installationerne på skolen, men da solcellerne ikke producerede om vinteren, så er det nødvendigt at trække strømmen fra el-nettet om vinteren. Man kan derfor ikke kalde skolen for 100 % selvforsynende med strøm. Spørgsmålet om skolen kunne blive selvforsynende, hvis der blev installeret en husstands vindmølle på 25 m højde, blev derfor behandlet. Eleverne blev spurgt om hvor på skolen de syntes vindmøllen skulle stå og om en 25 m vindmølle ville gøre skolen selvforsynende. Resultatet var at det ville hjælpe, men at der skal mere til.

Undervisnings materialet i form af en række slides blev først diskuteret med naturfagslærerne og de brugte efterfølgende materialet, som oplæg til nogle af emnerne for klimaugen, som afholdes hvert år i uge 39 på Lindebjerg skolen. I første omgang var emnerne rettet mod elever i

overbygningen, men det gav også inspiration til at bygge modelvindmøller af papir og tape i de mindre klasser.

Det viste sig, at formatet med at undervisnings materialet klædte lærerne på til emneuge undervisning, virkede meget bedre end at eleverne fik et foredrag om klimaudfordringerne, som en del af klimaugen. En anden fordel var også at materialet kunne gives videre til andre af skolens lærer i efterfølgende klimauger og at det kunne inddrages i den normal undervisning efter klima-ugen.

I forbindelse med forberedelserne til klimaugen i 2016 blev ideen om at udregne Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk derfor født. Formatet skulle igen være en række slides, som behandlede nogle del spørgsmål, som man skulle besvare for at bestemme Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk fra el og varmforsyningen i 2014. På den måde blev næste generation af undervisningsmaterialet en udbygning af de forrige slides, men hvor energi forbrug nu også blev omregnet til en CO₂ udledning på 111 tons i 2014. I løbet af klimaugen fik eleverne fra overbygningen også regnet ud hvor stor en ballon som skal fyldes hvis den skal indeholde skolens CO₂ udledning i 2014.

I løbet af foråret i 2017 blev der arrangeret Bæredygtighedsdage på Stænder torvet i Roskilde og den 4 april var der en række elever fra overbygningen på Lindebjergskolen som kunne præsentere deres arbejde i et valgfag med Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk. Eleverne havde fremstillet en skalamodel af Lindebjergskolen og oppustet nogle balloner med en størrelse der svarede til CO₂ udledningen per år inden skolen fik solceller, efter skolen fik solceller, hvis skolen fik installeret jordvarme (som Gundsøllille Hallen) og endelig hvis skolen også fik installeret en hudstandsvindmølle på 25 m. Figur 16.1 viser fremvisningen af elevernes arbejde på Stænder torvet.

Der var dog nogle af de kvikke elever som fik stillet spørgsmålet "Er 111 tons CO₂ udledning meget eller lidt?". Tja det svarer til en hel del elefanter, men ud over at sige, at vi på sigt bør reducere denne udledning, så måtte forfatterne til denne rapport erkende, at det var svært, at give eleverne et værktøj til at forstå, om 111 tons CO₂ er per år er meget eller lidt. I denne rapport er der i kapitel 12 "Skolens CO₂ fodaftryk?" derfor indført et koncept, som spørger om skolen kan passe på sin egen luft? Ideen er, at tænke at skolens grund indhegnes med glasplader, som går helt ud til verdensrummet og derefter spørge hvordan det vil gå med CO₂ indholdet i luften, hvis der udledes 111 tons CO₂ hvert år i det tænkte glasakvarie.



Figur 16.1 Skalamodel af Lindebjergskolen og grundareal med balloner som viser hvor meget CO₂ udledningen fyldte inden skolen fik solceller (Blå), efter skolen fik solceller (Orange), hvis skolen får jordvarme (Grøn) og hvis skolen også får en husstandsvindmølle på 25 m højde(Lilla). Billedet er taget på Stændertorvet i Roskilde d. 4 april 2017 under Bæredygtighedsdagene.

For at diskutere om 111 tons CO₂ er meget eller lidt inddrages en global klimamodel fra COP23 klimatopmødet i FN i 2017 i kapitel 12. Denne model antyder, at den globale CO₂ udledning bør toppe inden for få årtier, hvis jordens gennemsnitstemperaturstigning skal holdes inden for et par grader. Men hvordan kan man relatere en global klima model til Lindebjergskolens hverdag? Dette kan gøres ved at dele den nuværende globale CO₂ udledning ud på hele jordens overflade areal. Dette kan elever i overbygningen godt regne ud ved at bruge formlen for areal af en kugle, som har en radius givet ved jordens størrelse. På den måde får eleverne knyttet deres matematikundervisning sammen med naturfagsundervisningen som f.eks. geografi og astronomi. Analysen viser, at den globale CO₂ udledning i 2017 er på 78 gram CO₂ per kvadratmeter, hvilket betyder at Lindebjergskolen burde udlede omkring 2 tons CO₂ om året, hvis skolens udledning skal svare til det globale gennemsnit. Man kan også sige at Lindebjergskolen låner noget frisk luft over nogle andres jord, hvis CO₂ udledningen skal fortyndes ned til det globale gennemsnit. Men hvis luft er det som lånes, er der en aftale og endeligt skal der betales for at låne denne luft?

Hvis Lindebjergskolen skulle sørge for at have jord nok med luft oven over for at udledningen skal svare til det globale gennemsnit vil skolens grund skulle være ca. 50 gange større end den er i dag.

Dette aspekt og diskussion er endnu ikke blevet behandlet i klimaundervisningen på Lindebjergskolen, men det er forfatterens håb at det kommer med fremover. Desuden kan ideen om lånt luft bruges i fremtiden til at diskutere hvor meget en bil, et skib eller et fly låner af luft, når det bringer folk fra A til B.

Det skal siges, at der er foretaget nogle meget grove forsimplinger af beregningerne i dette undervisningsmateriale og at resultaterne og specielt forudsætningerne for beregningerne kan diskuteres. Ambitionen er dog, at eleverne med matematik på folkeskole niveau kan udregne nogle kvantitative bud på CO₂ udledning fra skolen og at eleverne kan foretage en kvantitativ sammenligning af disse tal med nogle grænseværdier for at finde ud af om det er et lille eller stort problem og om der kan gøres noget ved det.

17. Konklusion

Arbejdet med "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk" har givet anledning til god og inspirerede undervisningen omkring klimaudfordringerne og gjort disse mere håndgribelige for skolens elever ved at undersøge de lokale installationer på skolen og i Gundsøllille Hallen.

Det er lykkedes at vise eleverne, at matematik kan bruges til at analysere viden omkring skolens fysiske rammer og at matematik kan bruges til at undersøge om nogle løsninger på klimaudfordringerne er bedre end andre. Det sidste aspekt er vigtigt, fordi det giver eleverne en oplevelse af, at kunne handle på klimaudfordringerne. Det er håbet for forfatterne at undervisningsmaterialet kan hjælpe til at uddanne de næste generationer af "klimakøbmænd", som ikke kun kan komme med gode ideer, men også undersøge om deres løsninger virker og om de kan sælges til forældre, skoleinspektøren, skolebestyrelsen og måske politikerne i kommunen eller resten af landet.

18. Bibliografi

- Global Carbon Project. (10. April 2018). *Global Carbon budget 2017*. Hentet fra <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm>
- Lindebjergskolen. (18. April 2018). *Lindebjergskolen - Klima skolen i Roskilde*. Hentet fra www.klimaskolen.dk
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., & al., e. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 325–332.

19. Tak til

Klima-og Miljøudvalget i Roskilde Kommune for økonomisk støtte i 2016 til udarbejdelse af denne rapport.

Gundsøllehallen for fremvisning af jordvarmeanlæg for Lindebjergskolens elever som del af arbejdet med materialet.

Elever og lærer på Lindebjergskolen som har arbejdet og kommenteret på materialet.

Lindebjergskolen for at prioritere tid til udarbejdelse af dette materialet.

Asger Bech Abrahamsen, Senior forsker, ingeniør og PhD i anvendt fysik

DTU Vind Energi
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
DTU Risø Campus
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde

Email: asab@dtu.dk
Telefon: 24921613

20. Bilag A: Regneark til beregning af el- og varme forbrug

Nedenfor er vist regneark til beregning af Lindebjerg skolens CO₂ fodaftryk for året 2014.

Første udsnit af regnearket indeholder el og naturgas forbrug for 2014. Disse tal kan skolens tekniske personale udtrække og videregive til lærerne og eleverne. Egen produktion fra skolens sol celler og en mulig fremtidig husstandsvindmølle er også medtaget i regnearket. Naturgas forbruget omregnes til varmekonsum i kWh, således at det kan sammenlignes direkte med el forbruget.

	Forbrug 2014 [kWh]	Sol 2014 [kWh]	Forbrug+Sol [kWh]	Vind [kWh]	Total El [kWh]	Varme gas [m ³]	Varme [kWh]	Total energi (% vind) [kWh]
Jan	13375	956	12419	5541	6878	9203	105834,5	118253,5
Feb	10320	4688	5632	4155	1477	6994	80431	86063
Mar	12159	11180	979	4579	-3600	5855	67332,5	68311,5
April	9850	15318	-5468	3424	-8892	4146	47679	42211
Maj	9648	20171	-10523	3271	-13794	2194	25231	14708
Juni	8961	19968	-11007	2809	-13816	693	7969,5	-3037,5
Juli	4686	20454	-15768	2347	-18115	373	4289,5	-11478,5
Aug	9791	16461	-6670	2847	-9517	432	4968	-1702
Sep	12439	12367	72	3424	-3352	1180	13570	13642
Okt	12759	5184	7575	3809	3766	3422	39353	46928
Nov	13757	1994	11763	4502	7261	5298	60927	72690
Dec	12023	1156	10867	4887	5980	7596	87354	98221
Total	129768	129897	-129	45595	-45724	47386	544939	544810

Figur A.1 Udsnit af regneark til udregning af Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk. Dette første udsnit viser skolens forbrug af el og naturgas i 2014. Desuden er el produktion fra skolens sol celler medtaget og en mulig produktion fra en husstandsvindmølle er også vist.

Den anden del af regnearket i figur B.2 omregner energiforbruget til den mængde CO₂ som er blevet udledt fra skolen i 2014. Det sidste tal i sidste kolonne viser at udledning var 111,8 tons CO₂ i 2014. Der er desuden også kolonner til udregning af energi regningen, men da dette afhænger af lokale aftaler vil der ikke blive behandlet her.

Regnearket kan downloades fra projekt hjemmesiden og tal fra andre år eller andre skoler kan indsættes, hvormed man kan udregne sit eget CO₂ fodaftryk.

CO2 El [kg]	CO2 El+sol [kg]	CO2 gas [kg]	CO2 total [kg]
6018,8	5588,6	21740,1	27328,6
4644,0	2534,4	16521,8	19056,2
5471,6	440,6	13831,2	14271,7
4432,5	-2460,6	9794,0	7333,4
4341,6	-4735,4	5182,9	447,5
4032,5	-4953,2	1637,1	-3316,1
2108,7	-7095,6	881,1	-6214,5
4406,0	-3001,5	1020,5	-1981,0
5597,6	32,4	2787,5	2819,9
5741,6	3408,8	8083,7	11492,5
6190,7	5293,4	12515,4	17808,7
5410,4	4890,2	17943,9	22834,1
58395,6	-58,1	111939,2	111881,1

Figur A.2 Udsnit af regneark til udregning af Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk. Forbruget af el fratrukket produktionen fra solcellerne og forbruget af naturgas omregnes til den udledte CO₂ mængde angivet i kilo.

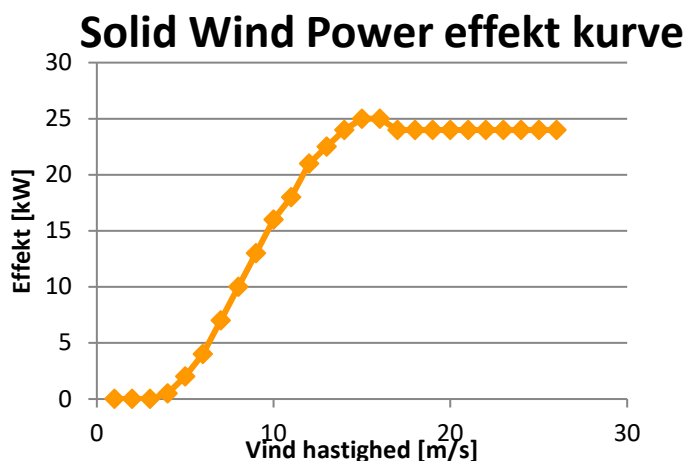
21. Bilag B: Energiproduktion fra vindmølle ved skolen

I 2014 blev spørgsmålet "Skal Lindebjergskolen have en vindmølle?" undersøgt af eleverne i overbygningen i løbet af skolens klimauge og i samarbejde med DTU Vind Energi. Her blev det gennemgået hvordan man beregner hvor meget energi en vindmølle kan producere i løbet af et år, hvis man kender vindmøllens effektkurve og vindhastighedsfordelingen på det sted som møllen skal opsættes. I dette bilag bliver metoden vist for at forklare hvordan produktionen fra en Solid Wind Power 25 kW husstandsmølle er blevet tilføjet til regnearket over skolens energi forbrug i 2014.

21.1 Effektkurver for vindmøller

En vindmølle bremser luftens bevægelse og omdanner dermed luftens bevægelse til bevægelse af vindmøllens vinger. Vingerne sidder på en akse, som drejer en generator rundt og dermed kan vindmøllen omdanne luftens kinetiske energi til elektrisk energi, som sendes videre gennem el-kablerne fra møllen.

Figur B.1 viser effekten eller energi produktionen per sekund for en Solid Wind Power SW-25 husstandsvindmølle som funktion af hvor stor vindhastigheden er. En SWP-25 har en højde fra jorden og til vingetip på 25 m og en vinge længde på 7 m. Vindmøllens effekt stiger fra vindhastigheder på $v = 4$ m/s og indtil 16 m/s, hvorefter den holdes konstant på omkring $P = 25$ kW ved at man drejer vingerne i forhold til den indkomne vindretning. Når vindhastigheden overstiger 25 m/s, så stopper man vindmøllen for ikke at slide for meget på den i storm vejr.

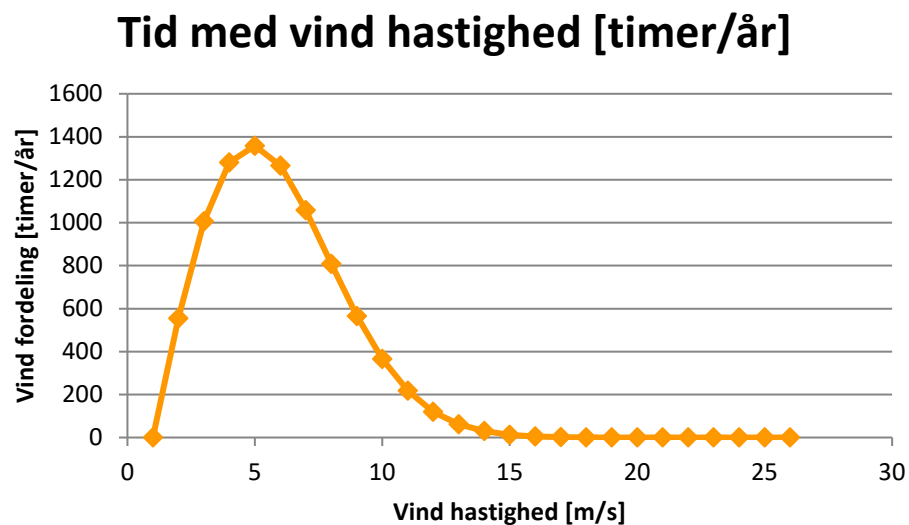


Figur B.1 Effekt kurven for en Solid Wind Power $P = 25$ kW vindmølle. Vindmøllen producerer ikke noget strøm, hvis vindhastigheden er mindre end 4 m/s. For vindhastigheder mellem 4 m/s og 16 m/s stiger strøm produktionen, men den er konstant på maksimal produktionen for vindhastigheder over 16 m/s.

21.2 Fordeling af vindhastigheder på sted for installation af vindmølle

Hvis man ved hvad vindhastigheden er et sted man vil installere en vindmølle, så kan man kigge på figur B.1 og aflæse hvor meget energi per sekund, som vindmøllen vil producere. Vinden blæser dog ikke med samme hastighed hele tiden og derfor har man brug for fordelingen af vindhastigheder for installations stedet. Figur B.2 viser vindhastighedsfordelingen ved Lindebjergskolen, som antallet af timer per år det blæser med en given vindhastighed.

Årsenergi produktionen fra en vindmølle kan derfor beregnes ved at gange antallet af timer for en given vindhastighed fra Figur B.2 med effekten, som vindmøllen producerer fra figur C.1, og så lægge alle energi bidragene sammen. Resultater bliver i enheden kilo watt timer [kWh].



Figur B.2. Vindfordeling ved Lindebjergskolen givet ved antal timer det blæser ved en given vindhastighed per år. Man kan se at den mest sandsynlige vindhastighed er $v \sim 5.5$ m/s og at man kan forvente denne vindhastighed i 1350 timer hvert år.

21.3 Forventet energi produktion fra vindmølle på et år

Nedenfor viser Figur B.3 hvordan man udregner energi produktionen fra en vindmølle ved at gange effekten fra effekt kurven i Figur B.1 med antallet af timer det blæser ved en given vindhastighed fra Figur B.2. På den måde udregnes den årlige energi produktion for hver vindhastighed og til sidst lægges de alle sammen til den årlige energi produktion.

Regnearket for energiforbrug og produktion for Lindebjergskolen indeholder også energi produktionen fra en SWP-25 husstands vindmølle.

Vind [m/s]	Effekt [kW]	Tid med vind hastighed [timer/år]	Energi [kWtimer]		
0	0	0	0,00		
1	0	555	0,00		
2	0	1006	0,00		
3	0,5	1281	640,50		
4	2	1358	2716,00		
5	4	1265	5060,00		
6	7	1059	7413,00		
7	10	808	8080,00		
8	13	565	7345,00		
9	16	365	5840,00		
10	18	218	3924,00		
11	21	120	2520,00		
12	22,5	62	1395,00		
13	24	30	720,00		
14	25	13	325,00		
15	25	5	125,00		
16	24	2	48,00		
17	24	1	24,00		
18	24	0	0,00		
19	24	0	0,00		
20	24	0	0,00		
21	24	0	0,00		
22	24	0	0,00		
23	24	0	0,00		
24	24	0	0,00		
25	24	0	0,00		
Total			46175,50	kWtimer / år	

Figur B.3 Udregning af årlig energi produktion fra Solid Wind Power SWP-25 husstandsvindmølle.

22. Bilag C: Slides "Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk"

Efterfølgende er slides til undervisningsmaterielet vedhæftet.

Hvad er Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk?

- Vejen til en 100 % klimaskole

Asger Bech Abrahamsen (ingeniør og PhD i Anvendt Fysik)

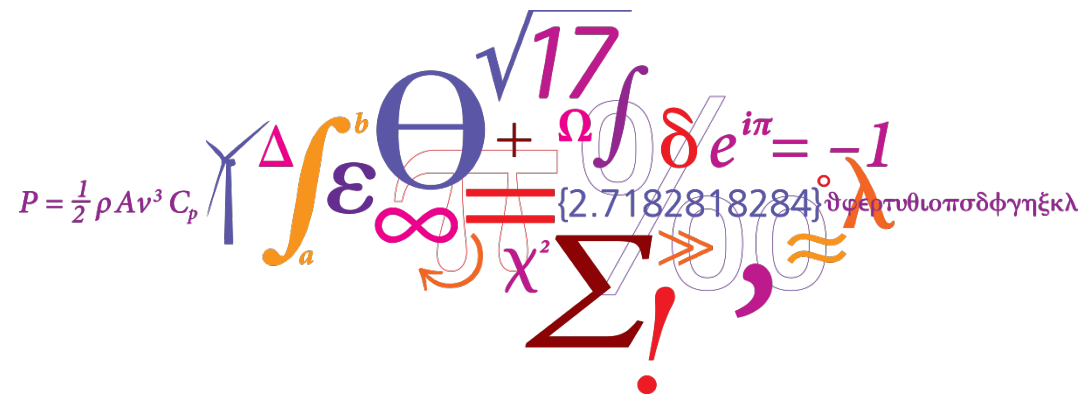
Senior forsker ved Afdelingen for Vind Energi,
 Danmarks Tekniske Universitet,
 DTU Risø Campus
 Frederiksborgvej 399,
 DK-4000 Roskilde

Version 1: September 2016

Version 4: April 2018

Repræsentant for DTU i skolebestyrelsen for
 Lindebjergskolen, Store Valbyvej 248B, Gundsøllille, 4000 Roskilde

DTU Vindenergi
 Institut for Vindenergi



Naturfaglig inspiration til undervisningen på Lindebjergskolen

Baggrund

Opgaven "Hvad er Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk?" er stillet for at inspirere med naturfaglige udfordringer i fagene i folkeskolen.

Den tager udgangspunkt i Lindebjergskolens klima-ambition om at være selvforsynende med strøm og varme. Strømforsyningen er tidligere blevet behandlet i en opgave der hed "Skal Lindebjergskolen have en vindmølle?", men dette udbygges nu med at undersøge hele skolens energiforbrug og ved at beregne hvor meget CO₂ der udledes som følge af skolens forbrug.

Den samfundsmæssige baggrund for opgaven er udgivelsen af EU's 2030 mål for reduktion af CO₂ udledningerne fra diverse EU lande. Med afsæt i dette skal det diskuteres hvordan Lindebjergskolen bliver 100 % forsynet med bæredygtige energiformer.

Formuleringen af denne opgave er lavet i et samarbejde mellem Lindebjergskolens naturfagslærere Thomas Thingstrup og Allan Christensen, Gundsøllille Hallen og Asger B. Abrahamsen fra DTU Wind Energy, DTU Risø Campus.

Opgavens del-spørgsmål

For at besvare spørgsmålet "Hvad er Lindebjergskolens CO₂ fodaftryk?" er der en lang række del-spørgsmål som skal besvares enkeltvis. En del af dem er vist nedenfor og kan besvares i den rækkefølge som du finder mest interessant eller lettest:

- 1) Hvor meget strøm har skolen brug for?
- 2) Hvor meget varme har skolen brug for?
- 3) Hvad er fossile brændsler?
- 4) Hvordan skabes der CO₂ ved forbrænding?
- 5) Hvorfor kaldes CO₂ en drivhusgas?
- 6) Hvor meget CO₂ får man ved at brænde 1 m³ naturgas?
- 7) Hvor meget energi får man ved at brænde 1 m³ naturgas?
- 8) Hvor meget CO₂ kommer der som følge af elforbruget på skolen?
- 9) Hvor meget CO₂ kommer der som følge af varmeforbruget på skolen?
- 10) Hvad er skolens samlede CO₂ udledning per år (fodaftryk)?
- 11) Hvad kan der gøres for at reduceres skolens CO₂ fodaftryk?
- 12) Kan det gøres med solceller og en vindmølle i nærheden af skolen?

1) Hvor meget strøm har skolen brug for?

For at svare på dette spørgsmål skal vi først forstå skolens elforbrug.

Når man putter et apparat i en stikkontakt løber der en strøm igennem apparatet fra den ene ledning og tilbage til den anden ledning. I nogle apparater så som en ipad lader løber der en lille strøm, mens der i en el-kogekedel løber meget strøm. På alle elektriske apparater skriver man hvor meget energi de bruger på 1 sekund. Dette kaldes deres effekt og skrives som et tal efterfulgt af enheden Watt, som forkortes W.

Når man skal bestemme hvor meget energi et apparat bruger kan man regne det ud ved at gange apparatets effekt (eller energi forbrug per tid) med hvor lang tid det er tændt.

For at gøre det nemmere bruger man Watt og ganger dem med hvor mange timer apparatet bruges.

Derfor måles elektrisk forbrugt energi i Watt-Timer (på engelsk skrives Wh for Watt-hours)

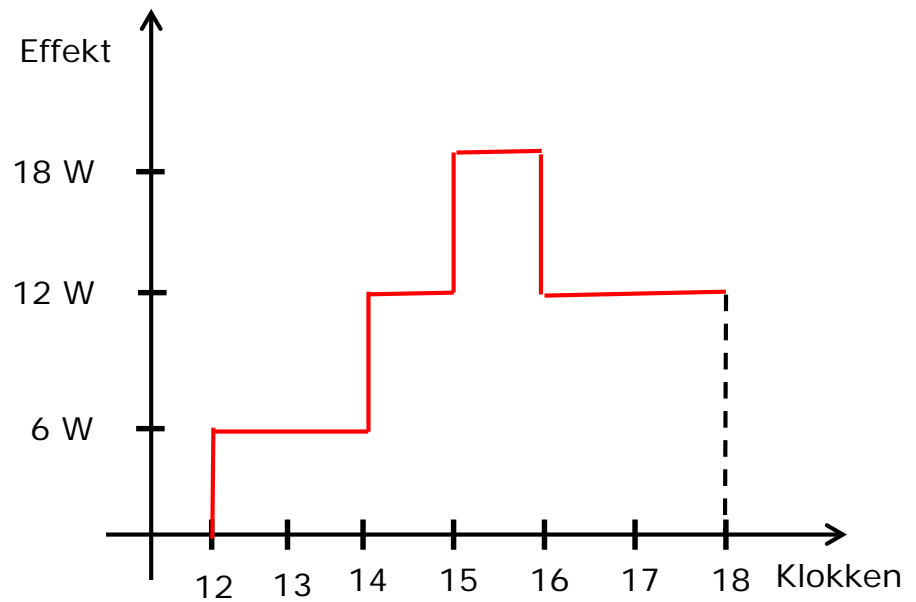
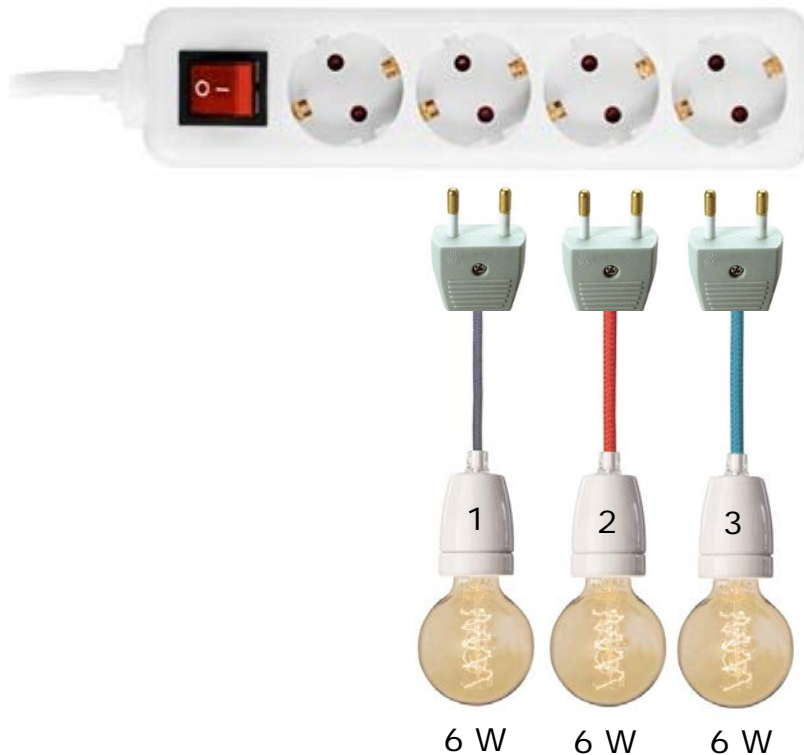


Eksempel på el-regning

Pære 1 sættes i stikdåsen kl 12, pærer 2 sættes i dåsen kl. 14 og pærer 3 sættes i kl 15. kl. 16 tages pærer 1 ud igen.

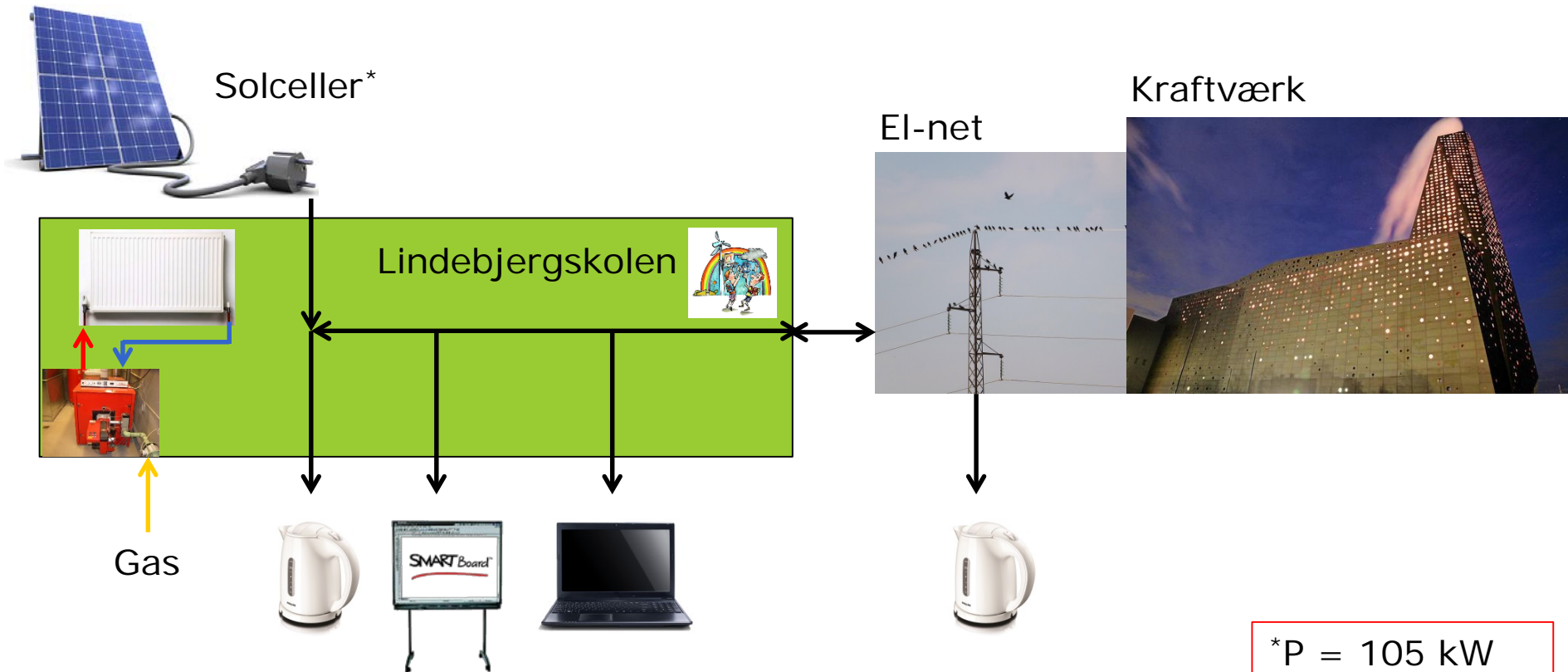
Hvor mange watt-timer (Wh) energi har pærerne brugt kl. 18?

Hvis hver watt-time koster 0.25 øre hvad skal man så betale i el-regning?



Lindebjergskolens energiforbrug og produktion?

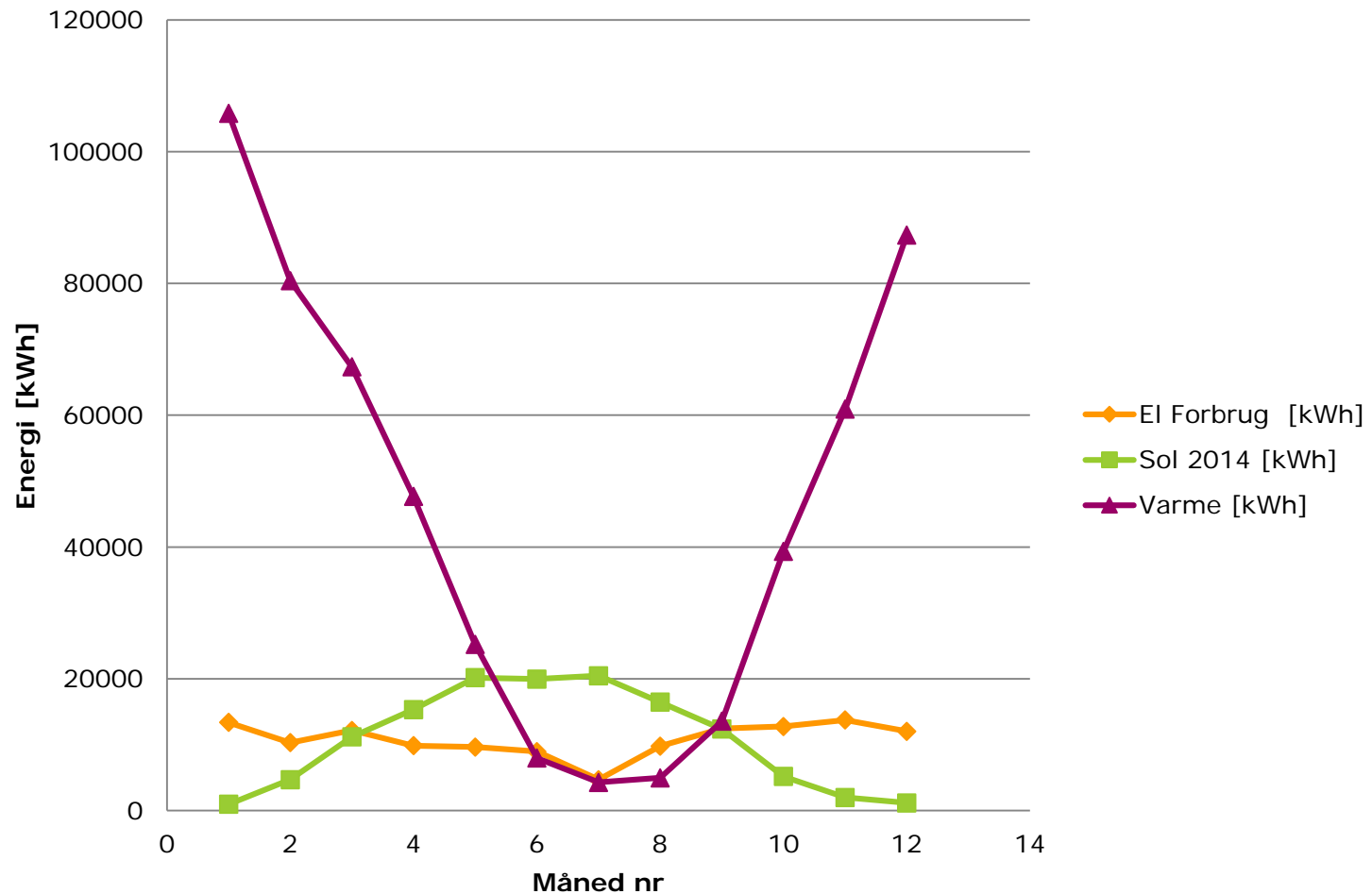
Lindebjergskolen har solceller på taget som kan levere strøm til alle de apparater som bruger strøm på skolen. Hvis ikke solcellerne leverer strøm nok trækkes der ekstra strøm fra el-nettet. Hvis solcellerne laver mere strøm end der bruges på skolen sendes den overskydende strøm tilbage til el-nettet. Til opvarmning bruges naturgas, som brændes af og opvarmer vand som cirkuleres i radiatorer.



$$*P = 105 \text{ kW}$$
$$A = 802 \text{ m}^2$$

2) Lindebjergskolens energiforbrug 2014

Lindebjerg Skolens Energiforbrug 2014



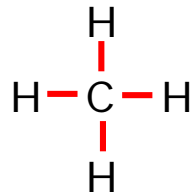
3) Hvad er fossile brændsler

Planter i fortiden blev dækket af mudder under oversvømmelser og efter lang tid blev de omdannet til en blanding af gas, olie og kul ved højt tryk dybt under jordens overflade.

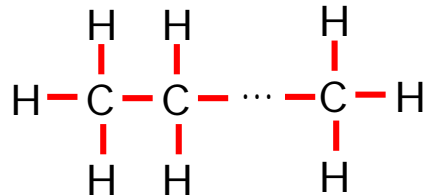
Disse kemiske forbindelser kan i dag bringes op til jordens overflade ved enten naturgas- og olie borerer eller ved at grave kul i miner.

De kemiske forbindelser for gas og olie består alle af kul-brinte kæder med forskellig længde, mens at kul overvejende indeholder kulstof atomer.

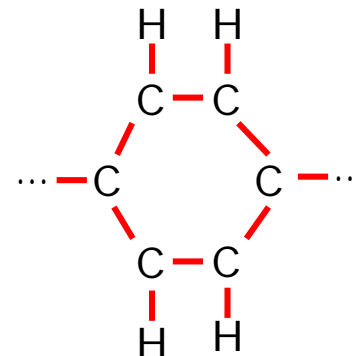
Naturgas: CH_4



Olie: C_xH_y



Kul:

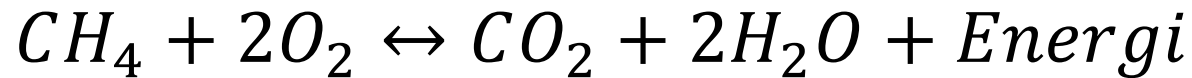


4) Hvordan skabes CO₂ ved forbrænding?

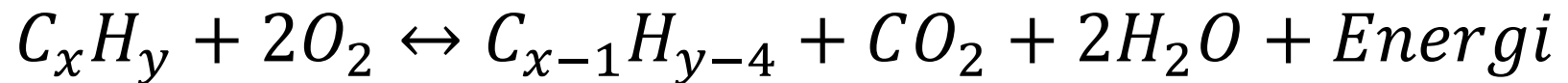
Kulforbrænding



Naturgas forbrænding



Olie forbrænding



5) Hvorfor kaldes CO₂ en drivhusgas?

Solens stråler indeholder mange farver. Når de rammer jorden omdannes mange af dem til varme. Varme kan udstråles fra jorden, men hvis der er drivhusgasser i atmosfæren omkring jorden, så vil noget af varmestrålingen blive reflekteret tilbage til jorden. Dette gør at jorden langsomt bliver varmere.

Den ekstra CO₂ omkring jorden virker derfor som om at jorden bliver puttet ind i et drivhus og derfor kalder man CO₂ for en drivhusgas.

6&7) CO₂ og energi produktion per m³ naturgas?

Energi styrelsen har opgivet tal :

Link:

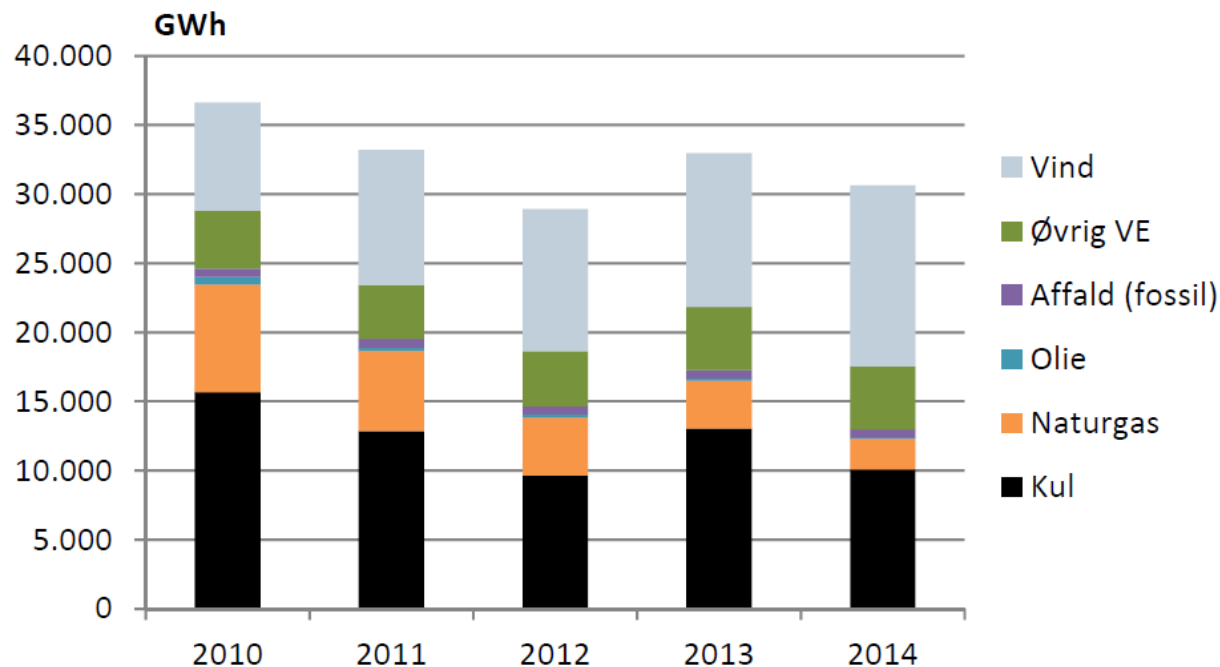
https://ens.dk/sites/ens.dk/files/CO2/standardfaktorer_2005-2016.pdf

Brændsel	Brændværdi	Emissionsfaktor (tons CO ₂ /TJ)	Emissionsfaktor for ikke bæredygtigt flydende biobrændsel ^{D)} (tons CO ₂ /TJ)	Oxidationsfaktor
Naturgas ^{H) I)}	0,0396 GJ/Nm ³	57,06		1,0
Bionaturgas ^{E)}	0,0396 GJ/Nm ³	0		1,0
Bygas ^{A)}	-	-		1,0
Butan	45,75 GJ/ton	66,24		1,0
Fuelolie anvendt i kraftvarmeverker og fjernvarmeverker	40,65 GJ/ton	79,49		1,0
Fuelolie anvendt i øvrige sektorer	40,65 GJ/ton	77,4		1,0
Spildolie ^{F)}	41,90 GJ/ton	73,3		1,0
Gasolie / dieselloolie ^{C)}	35,87 GJ/m ³	74,0		1,0
Benzin ^{C)}	32,85 GJ/m ³	73,0		1,0
Methanol	19,93 GJ/ton	68,96		1,0
LPG	46,00 GJ/ton	63,1		1,0
Kul	26,50 GJ/ton	94,6		1,0
Petrokoks	31,40 GJ/ton	93,0		1,0
Koks	29,30 GJ/ton	107,0		1,0
Affald	10,6 GJ/ton	37,0		1,0
Biogas ^{B) G)}	0,0230 GJ/m ³	0		-
Halm ^{B) G)}	14,50 GJ/ton	0		-
Træpiller ^{B) G)}	17,50 GJ/ton	0		-
Træaffald ^{B) G)}	14,70 GJ/ton	0		-
Træflis ^{B) G)}	9,30 GJ/ton	0		-
Anden fast biomasse ^{B) G)}	14,5 GJ/ton	0		-
Rapsolie ^{C) G)}	34,5 GJ/m ³	0	70,8	1,0
Bioethanol ^{C) G)}	26,7 GJ/ton	0	72,0	1,0
Biodiesel ^{C) G)}	37,5 GJ/ton	0	74,0	1,0
Biolie og anden flydende biobrændsel ^{C) G)}	34,3 GJ/m ³	0	79,6	1,0

8) CO₂ per kWh el

I Danmark produceres el mest på kraftværker. Her brændes kul, naturgas, olie eller affald for at opvarme vand og omdanne det til damp. Dampen føres i gennem en turbine, som driver en generator, der sender strømmen ud på el ledningerne. Ud over de fossile brændsler bruges vindmøller også til at lave strøm. Her skubber vinden på vindmøllernes blade, som driver en generator der leverer strøm til el-ledningerne. Endeligt kan solens stråler få strøm til at løbe i tynde plader af grundstoffet silicium. Dette bruges når solceller leverer strøm til el ledningerne.

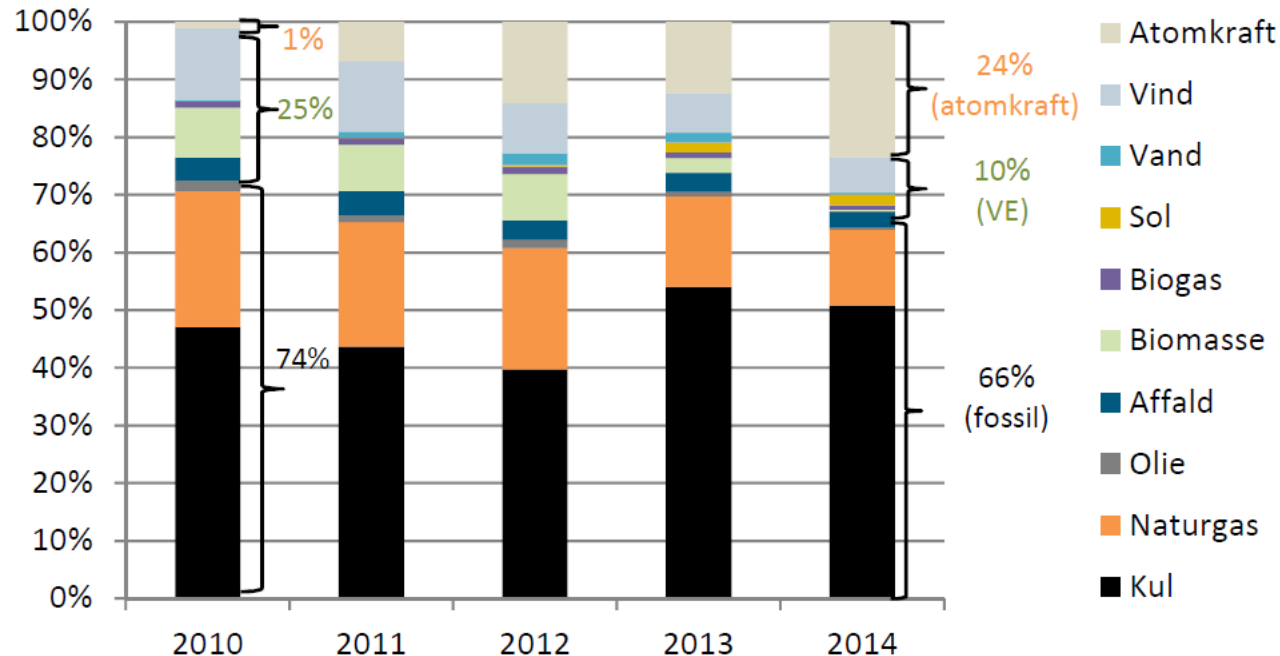
Produktionen i Danmark er vist nedenfor



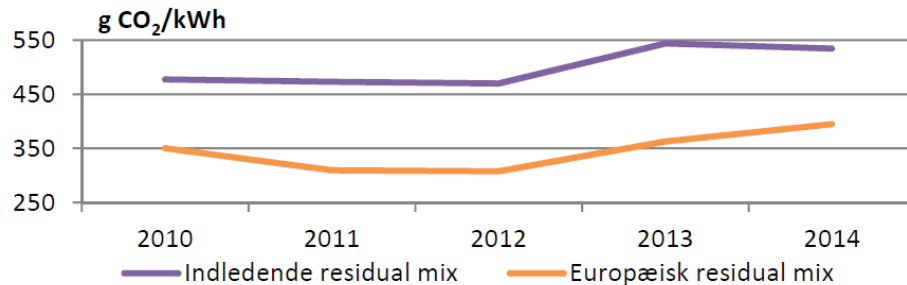
Kilde:
 "Deklarering af
 el i Danmark",
 Energinet.dk, 4
 juni 2015

8) CO₂ per kWh el

Danmark trækker dog også strøm fra vores nabolande og bruger derfor også A-kraft. Når man lægger CO₂ udledningen sammen for alle disse energi kilder får man grafen vist nederst.

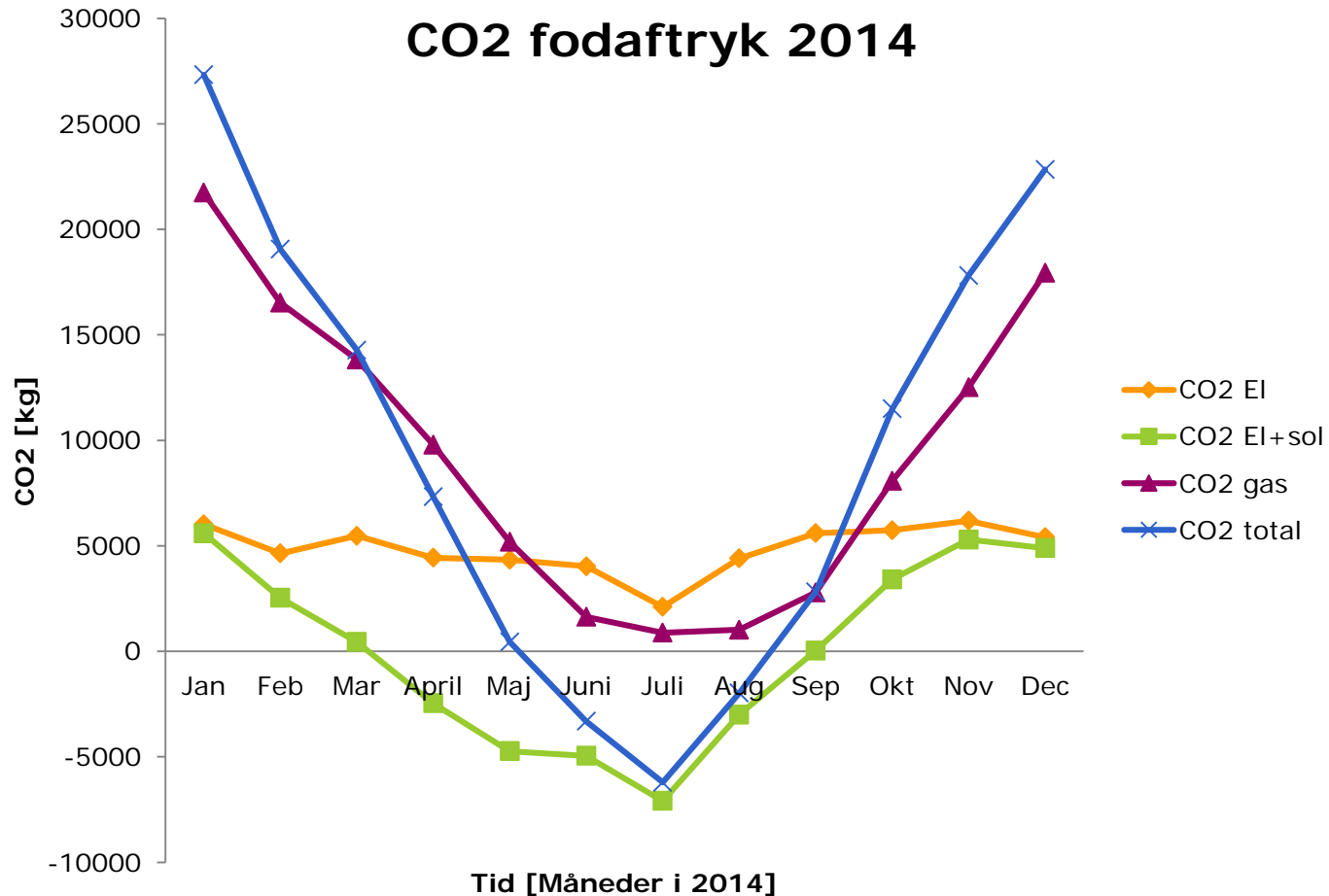


Kilde : "Deklarering af el i Danmark 2015", Energinet.dk



Som et gennemsnit er udledningen ½ kg CO₂ / kWh

8 & 9) CO₂ som følge af skolens forbrug?



10) Skolens CO₂ fodaftryk i 2014?

Energi	El	129786 kWh
	Solceller	-129897 kWh
	Varme	544939 kWh
	<u>Total</u>	<u>544810 kWh</u>
CO ₂	El	58,4 tons CO ₂
	Solceller	-58,4 tons CO ₂
	Varme	111,9 tons CO ₂
	<u>Total</u>	<u>111,9 tons CO₂</u>

11) Hvordan kan CO₂ fodaftrykket reduceres?

Lindebjergskolen har som klimaskole en ambition om at blive 100% bæredygtig.

Så hvad skal der til for at bringe CO₂ udledningen til 0?

Lav en liste over ting som giver anledning til udledning af CO₂ fra skolen.

Hvilke af disse udleder mest? Og hvilke skal man starte med at reducere?

12) Kan det gøres med solceller og vind?

- a) Flere solceller vil producere om sommeren, hvor der er massere af overproduktion.
- b) Vind vil producere mest om vinteren og dermed passe bedre til varmekonsumet.

Husstands mølle

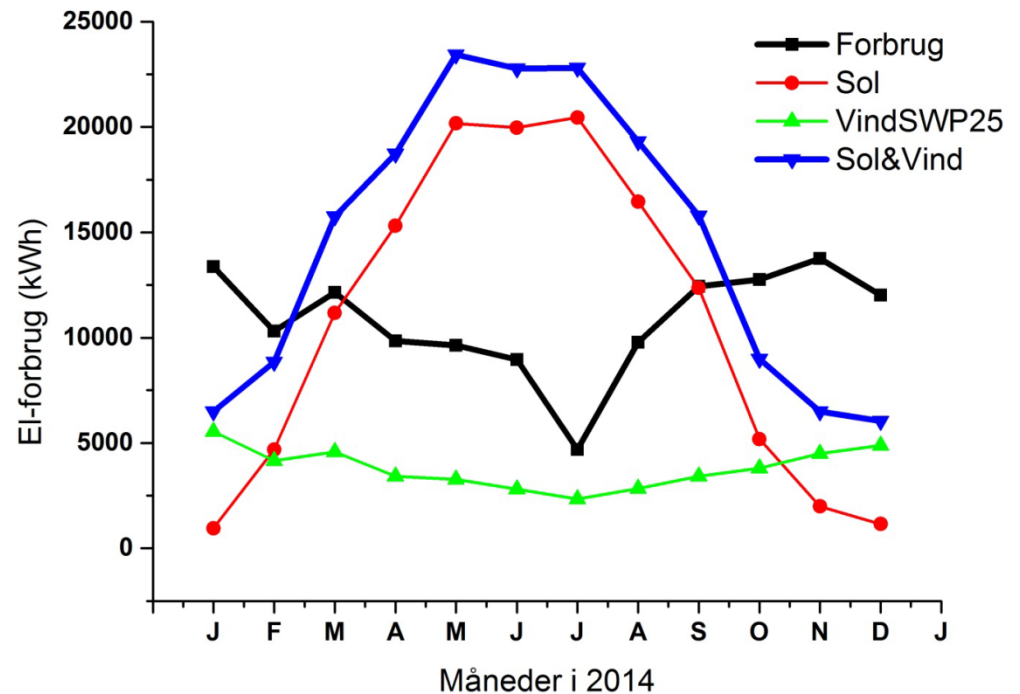
Solid Wind Power (SWP25)

P = 25 kW

D = 13 m

H = 18.5 m

Lindebjergskolens el-forbrug, el fra solceller 2014 og SWP25 vindmølle



12) Kan det gøres med vind?

Størrelse af vindmølle til at dække årsforbrug af varme

$$E = P \cdot t \cdot c \Rightarrow$$

$$P = E / (t \cdot c)$$

$$= 544 \text{ MWh} / (8760 \text{ timer} \cdot 0.15) = \underline{0.41 \text{ MW}}$$

E = Energi [MWh]

P = Effekten [MW]

t = Tid [timer per år]

c = Kapacitets faktoren for vindmøllen

(c = 0.1 - 0.2).

Det blæser ikke hele tiden men cirka hver 5 til 10 dag i gennemsnit.

Ovenstående eksempel er udregnet ved, at man bruger en el-koge kedel til at varme vand. Hvis man bruger en varme pumpe kan det gøres mellem 2-4 gange mere effektivt.

18 Besøg Gundsøllille Hallen og se deres jordvarme.



Vestas V39 500 kW

D = 39 m & h_{HUB} = 53 m

12) Kan det gøres med vind?

Størrelse af vindmølle til at dække januar med varme

$$E = P \cdot t \cdot c \Rightarrow$$

$$P = E / (t \cdot c)$$

$$= 106 \text{ MWh} / (744 \text{ timer} \cdot 0.15) = \underline{0.95 \text{ MW}}$$

E = Energi [MWh]

P = Effekten [MW]

t = Tid [timer]

c = Kapacitets faktoren for vindmøllen

(c = 0.1 - 0.2).

Det blæser ikke hele tiden men cirka hver 5 til 10 dag i gennemsnit.

Sådan en mølle vil dog medføre en voldsom overproduktion om sommeren, som så skal sælges ud på nettet.



Vestas V52 850 kW

D = 52 m & $h_{\text{HUB}} = 44\text{-}65 \text{ m}$

Konklusion

- Vi har udregnet skolens energiforbrug i kWh for 2014
- Vi bruger 5 gange mere energi på opvarmning end på strøm
- CO₂ udledningen fra el og varme er 59 tons CO₂ og 111 tons CO₂
- Varmeforbruget vil ikke kunne dækkes med flere solceller, da de producerer om sommeren, men ikke om vinteren.
- Hvis det skal gøres med vindmølle strøm vil dette passe bedre med forbruget om vinteren.
- Møllestørrelse for at dække års varmeforbruget: $P = 410 \text{ kW}$
- Møllestørrelse for at dække januars varmeforbruget: $P = 950 \text{ kW}$

Der tages forbehold for mere præcise bestemmelser af kapacitets faktorerne for møller ved Lindebjergskolen som skal foretages med beregningsværktøjer fra DTU Wind Energi.

DTU Vindenergi er et institut under Danmarks Tekniske Universitet med en unik integration af forskning, uddannelse, innovation og offentlige/private konsulentopgaver inden for vindenergi. Vores aktiviteter bidrager til nye muligheder og teknologier inden for udnyttelse af vindenergi, både globalt og nationalt. Forskningen har fokus på specifikke tekniske og videnskabelige områder, der er centrale for udvikling, innovation og brug af vindenergi, og som danner grundlaget for højt kvalificerede uddannelser på universitetet.

Vi har mere end 240 ansatte og heraf er ca. 60 ph.d. studerende. Forskningen tager udgangspunkt i ni forskningsprogrammer, der er organiseret i tre hovedgrupper: vindenergisystemer, vindmølleteknologi og grundlag for vindenergi.

Danmarks Tekniske Universitet

DTU Vindenergi
DTU Risø Campus
Frederiksborgvej 399
Bygning 118
4000 Roskilde
Telefon 45 25 25 25

info@vindenergi.dtu.dk
www.vindenergi.dtu.dk