

2.4

TEMA: ENERGI-FORSYNING

Siden industrialiseringens begyndelse i første halvdel af 1800-tallet har verdens energiforbrug været i en konstant og næsten eksplosiv vækst. Industrialiseringen i Europa blev drevet frem af store kulforekomster i England og Frankrig, og den dag i dag er fossile brændstoffer som kul, olie og gas stadig vores vigtigste kilde til energi. Men det har haft sin pris på miljø og klima. Verden er i stigende grad ved at blive opmærksom på, at vores nuværende energiforsyning ikke er bæredygtig, og flere og flere lande anerkender behovet for at finde alternative energikilder. Temaerne i dette kapitel handler om, hvordan de traditionelle kraftværker fungerer, samt hvilke alternativer vi har til energikilder for fremtiden.

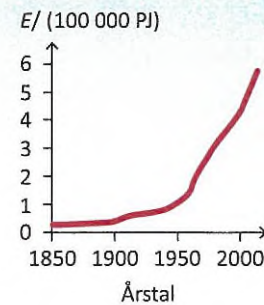


Traditionelle kraftværker

Industrialiseringen er betegnelsen for den overgang fra manuel til maskinel produktion, der fandt sted i Europa i første halvdel af 1800-tallet. De nye maskiner krævede energi, og siden midten af 1800-tallet er verdens samlede energiforbrug vokset til mange gange det daværende niveau (se figur 2.37).

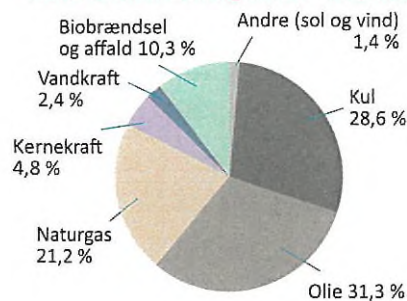
I år 2014 var verdens samlede energiforbrug 580 000 PJ (dvs. $5,8 \cdot 10^{20}$ J). Langt hovedparten af verdens energi kommer fra fossile brændstoffer i form af kul, olie og naturgas (se figur 2.38). Tilsammen bidrager disse med mere end 80 % af den forbrugte energi. Også i Danmark bidrager de fossile brændstoffer med hovedparten af energien, knap 70 %. Man prøver på verdensplan at reducere brugen af fossile brændsler, da det udleder kuldioxid (CO_2) til atmosfæren, hvilket kan forstærke Jordens drivhuseffekt og føre til global opvarmning (yderligere beskrevet i afsnit 3.4.7, side 135). I stedet arbejder man på at omlægge energiproduktionen til bæredygtige energikilder (se afsnit 2.4.3, side 78).

2.4.1

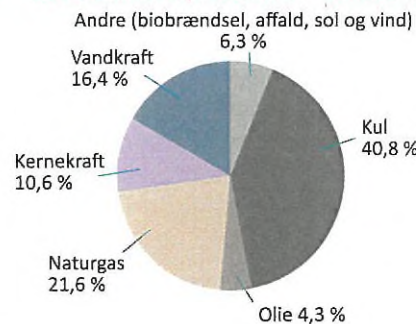


FIGUR 2.37 ▲ Verdens samlede energiforbrug siden år 1850, angivet i enheder af 100 000 petajoule (en petajoule er 10^{15} J).

2014 Globale energikilder · 580 000 PJ

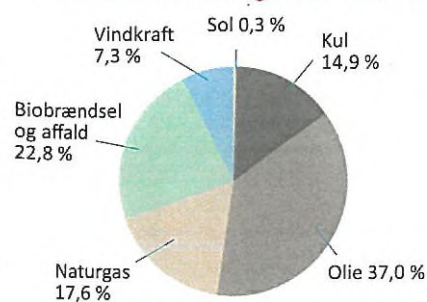


2014 Global elproduktion · 86 000 PJ

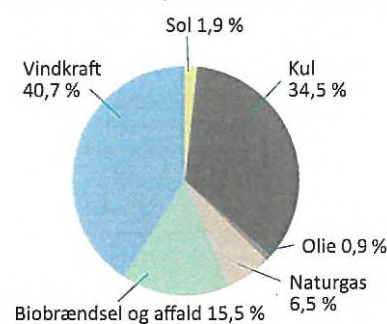


FIGUR 2.38 ◀ Kilder til samlet energiproduktion og specifikt til elproduktion i 2014, henholdsvis globalt og i Danmark. Energien er angivet i enheden petajoule, dvs. 10^{15} J. Tallene er opgjort af det internationale energiagentur (IEA). Olie er den vigtigste kilde til energi, men udgør en meget lille del af elproduktionen, da olien stort set udelukkende giver energi til transportsektoren. Kul er den vigtigste kilde til elektrisk energi på verdensplan, men er i Danmark blevet overhalet af vindkraft.

2014 Danske energikilder · 679 PJ



2014 Dansk elproduktion · 116 PJ



TEMA

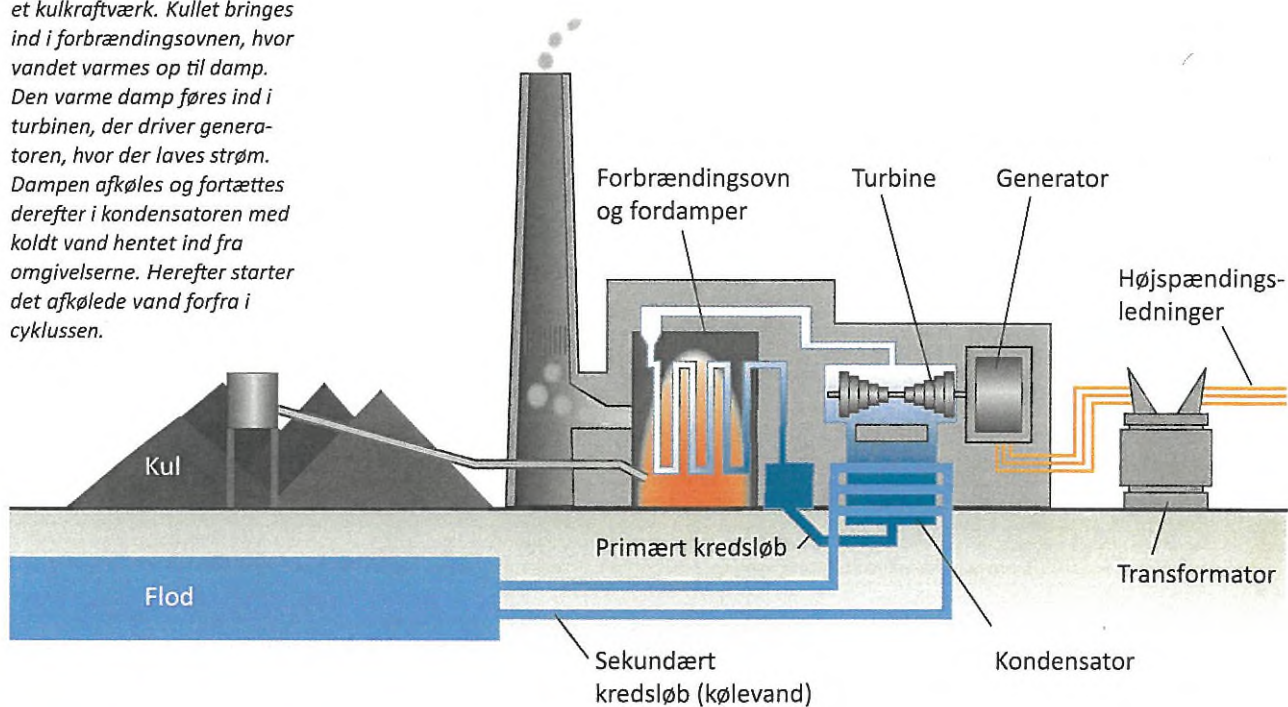
Et traditionelt kraftværk er et anlæg, der skaber elektrisk energi ved forbrænding af brændsler som kul, olie, træ, affald, biobrændsel eller lignende. Specielle kraftværker som kernekraftværker, vandkraftværker og solcelleanlæg vil kortfattet blive omtalt i afsnit 2.4.4, side 80.

Traditionelle kraftværker er langt den vigtigste kilde til elektrisk energi på verdensplan, idet mere end 70 % af verdens elproduktion i 2014 kom fra afbrænding af enten kul, olie, gas eller biobrændsel (se figur 2.38). Ud over relativt stor tilgængelighed af disse ressourcer, har traditionelle kraftværker den fordel, at de er billige at bygge, er sikre i drift, og kan levere en høj effekt. Verdens største kulkraftværker i Kina leverer en effekt på over 5 GW, og kan på den måde levere strøm nok til en storby. Bagsiden af medaljen ved kulkraftværker er en voldsom forurening samt klimaproblematikken nævnt ovenfor.

Der er vist en simpel model af et kulkraftværk i figur 2.39. Traditionelle kraftværker med andre brændsler fungerer helt på samme måde, og kernekraftværker fungerer efter tilsvarende principper. Kraftværkets funktion kan inddeles i fire overordnede punkter:

- 1) I *forbrændingsovnen* brændes kullet af. Herved fordampes vandet i det *primære kredsløb*.
- 2) I *kondensatoren* afkøles dampen i det primære kredsløb, så den kondenserer og går tilbage på væskeform. Afkølingen sker ved hjælp af kølevand i det sekundære kredsløb.

FIGUR 2.39 ▼ En simpel model af et kulkraftværk. Kullet bringes ind i forbrændingsovnen, hvor vandet varmes op til damp. Den varme damp føres ind i turbinen, der driver generatoren, hvor der laves strøm. Dampen afkøles og fortættes derefter i kondensatoren med koldt vand hentet ind fra omgivelserne. Herefter starter det afkølede vand forfra i cyklussen.



- 3) Når dampen strømmer i det primære kredsløb fra forbrændingsovn til kondensatoren passerer den *turbinen*. Turbinen sættes derved i rotation.
- 4) Rotationen af turbinen driver *generatoren*, der ved hjælp af roterende magneter og spoler genererer en elektrisk strøm. Den elektriske strøm transformeres op til højspænding i *transformatoren*, hvorefter den kan sendes ud i elnettet.

Det er vigtigt at bide mærke i, at der er to adskilte vandkredsløb i kraftværket. Dels det primære kredsløb, der består af vandet som skiftevis fordampes og fortættes og undervejs driver turbinen. Dels det sekundære kredsløb med kølevand, der består af koldt vand, der bruges til at kondensere dampen og derefter udledes igen. Kølevandet hentes ofte ind fra omgivelserne, og derfor bygges kulkraftværker som regel ved en flod eller et tilsvarende sted med rigelig vandforsyning. Hvis dette ikke er muligt, kan der bygges køletårne, hvor energien i stedet afgives til luften.

Vandet i det primære kredsløb udvider sig, når det fordamper under opvarmning ved passage igennem rørene i forbrændingsovn. Herved stiger trykket i rørene i det primære kredsløb. Vandet i det primære kredsløb trækker sig sammen igen, når det fortættes i kondensatoren. Herved falder trykket i rørene i det primære kredsløb. Det er det høje tryk i det primære kredsløb i området inden turbinen, der giver dampen høj energi, og som gør den i stand til at drive turbinen.

OPGAVER

2.55 Gennemgå processerne i kulkraftværket startende med forbrændingsovn. Beskriv alle energiomdannelser og energioverførsler, der finder sted undervejs i kraftværket.

2.56 I kulkraftværket omdannes kemisk energi til elektrisk energi. Dette er tilsyneladende i modstrid med termodynamikkens 2. hovedsætning. Forklar, hvorfor 2. hovedsætning i realiteten er overholdt.

2.57 Asnæsværket i Kalundborg har i mange år været Danmarks største kulkraftværk målt på effekt. Det har en maksimal effekt på lige over 1 GW. Asnæsværkets nyttevirkning mht. produktion af el er 40 %.

- a. Beregn, hvor meget stenkul der skal brændes af på et døgn, hvis værket skal yde den maksimale effekt i hele døgnnet. Angiv svaret i enheden ton.
- b. Prøv at forklare, hvorfor det er usandsynligt, at værket skal køre med maksimal effekt i alle døgnets 24 timer.
- c. Beregn, hvor meget kul, der kan spares, hvis nyttevirkningen for elproduktion kunne øges til 45 %.

FIGUR 2.40 ▼ Asnæsværket i Kalundborg har i mange år været Danmarks største kraftværk med en effekt på lige godt 1 GW. Værket er dog ved at blive lukket ned for kuldrift på grund af faldende elforbrug. I stedet skal det køre med en mindre ydelse ved afbrænding af træflis, hvilket belaster miljøet mindre end afbrænding af kul.

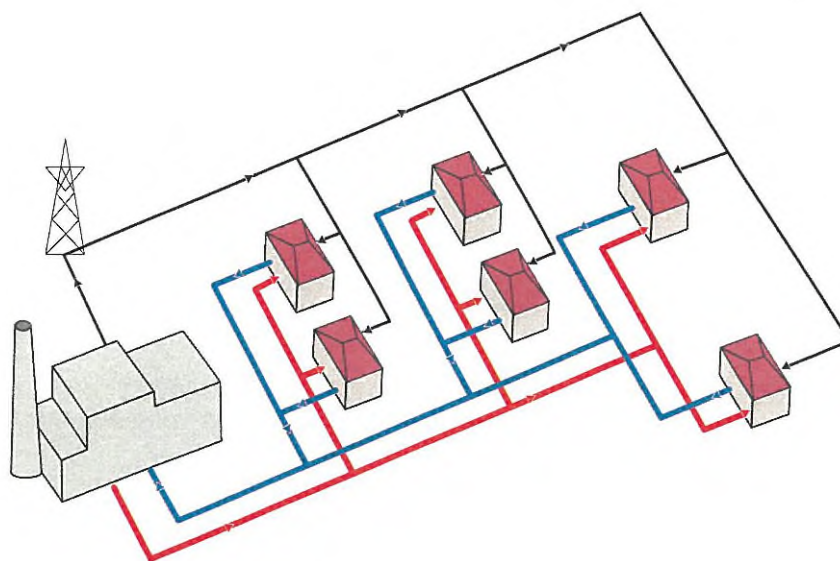


2.4.2 Kraft-varmeværker

I kraftværker dannes der elektrisk energi af høj kvalitet. Når den elektriske energi skal dannes fra energiformer af lavere kvalitet, nødvendiggør termodynamikkens 2. hovedsætning derfor et „tab“ af energi af lavere kvalitet. I et traditionelt kraftværk vil der blive udledt en stor mængde termisk energi med det opvarmede kølevand i det sekundære kredsløb. Energien fra forbrændingen af kullet går altså både til den elektriske energi og til opvarmning af kølevand (samt spildvarme i turbine, forbrænder mv.). Det er dog kun den elektriske energi, der er nyttig, og i et normalt kraftværk er nyttevirkningen mindre end 50 %.

For at opnå en højere nyttevirkning er man i Danmark gået over til *kraft-varmeværker*, hvor det opvarmede kølevand sendes ud af kraftværket og anvendes til opvarmning af huse (såkaldt fjernvarme). I et sådant værk falder effektiviteten af produktionen af elektrisk energi en smule, fordi dampen i det primære kredsløb ikke køles lige så effektivt ned, hvilket giver et mindre trykfald over turbinen. Den samlede nyttevirkning bliver imidlertid meget højere, idet en del af varmen fra kølevandet udnyttes til at varme huse op. Meget af den termiske energi, der i et traditionelt kraftværk er unyttig energi, bliver nu nyttig. Kraft-varmeværker er meget udbredte i Danmark, men ikke lige så udbredte i resten af verden.

FIGUR 2.41 ► Principtegning for kraft-varmeværk. Kraftværket leverer både elektricitet (sorte pile) og varme (røde pile) til husene. Det varme vand løber fra kraftværket ud til husene, hvor vandet afleverer en del af sin termiske energi i radiatorer mv. Det afkølede vand (blå pile) løber så tilbage til kraftværket, hvor det varmes op på ny.



OPGAVER

2.58 Som omtalt i teksten er kraft-varmeverker mere udbredt i Danmark end i mange andre lande. Diskuter, hvilke fordele og ulemper, der kan være forbundet med et kraft-varmeverk i forhold til andre kraftværker. Prøv at finde forklaringer på, at ikke alle lande er gået over til kraft-varmeverker, som Danmark er det.

2.59 Avedøreværket syd for København er primært et kulfyret kraft-varmeverk. Nytttevirkningen for elproduktionen ved Avedøreværket er over 45 %, når der kun produceres el, hvilket er en af de højeste nyttevirkninger for et kulfyret kraftværk på verdensplan. Avedøreværket består af to blokke, der tilsammen kan levere en maksimal effekt på 810 MW el. Beregn, hvor meget stenkul, der skal brændes af hvert sekund, hvis der skal leveres en effekt på 810 MW med en nyttevirkning på 45 %.

2.60 Avedøreværket består som omtalt (se opgave 2.59) af to blokke. Blok 1 er kulfyret, og når værket drives både med elproduktion og varmeproduktion, kan den levere el med en effekt på 225 MW samt varme med en effekt på 330 MW. Under kombineret el- og varmeproduktion er nyttevirkningen for elproduktionen 37 %. Beregn blokkens samlede nyttevirkning (inklusive varme) under disse omstændigheder.

FIGUR 2.42 ▼ Avedøreværket syd for København. Værket har to blokke, hvoraf den ene frem til 2016 har været kulfyret (blok 1), mens den anden har været i stand til at fyre både med olie, gas og biobrændsler som træ og halm. I 2016 blev blok 1 ombygget til at køre på træ, hvilket gør hele værket i stand til at køre på CO₂-neutrale brændsler.



2.4.3 Bæredygtighed

Verdens voldsomt stigende energiforbrug er en alvorlig udfordring for fremtiden. De traditionelle energikilder forbruger ressourcer i deres produktion af elektricitet og varme, og disse ressourcer er ikke ubegrænsede. Ydermere er miljø- og klimaproblemerne ved udbredt forbrænding af fossile brændstoffer ved at være alment anerkendte. Det er derfor blevet et internationalt anliggende at sikre fremtidens energiforsyning.

År 2017 markerer 30-året for, at de Forenede Nationer (FN) definerede begrebet bæredygtig udvikling (engelsk: Sustainable development). Det defineres som:

„Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ (World Commission on Environment and Development, 1987)

Bæredygtighed handler om at sikre en balance imellem den økonomiske og samfundsmæssige udvikling og hensynet til miljø og klima.

I 2015 indgik FN's medlemslande en aftale om at arbejde mod 17 mål for bæredygtig udvikling som del af den såkaldte 2030 Agenda for Bæredygtig Udvikling. Et af disse mål, mål nr. 7, handler om bæredygtig energi. Her forpligter medlemslandene sig til at arbejde på følgende fem indsatsområder for verdens energiforsyning frem mod år 2030:

- At sikre universel adgang til billig, pålidelig og moderne energi.
- At sikre en væsentlig stigning i andelen af energi fra vedvarende kilder.
- At fordoble vækstraten i energiproduktionens nyttevirkning.

FIGUR 2.43 ▼ Internationale organisationer som FN arbejder på at lave handlingsplaner, der sikrer holdbare løsninger til internationale problemstillinger som fx fremtidens energiforsyning.



- At øge det internationale samarbejde og fremme investering i forskning og udvikling af nye teknologier til at skabe ren energi, herunder vedvarende energi, mere effektiv produktion og renere udnyttelse af fossile brændsler.
- At udvide og opgradere infrastrukturen i forhold til at distribuere moderne og bæredygtig energi til udviklingslande.

FN's mål specificerer altså, at der både skal fokuseres på at forbedre de nuværende energikilder og på at finde alternative energikilder til de fossile brændstoffer. Forbedringen af de eksisterende kilder skal ske ved mindre forurening og større nyttevirkning i deres anvendelse. Blandt de alternative energikilder ligger fokus på *vedvarende energikilder*. Det er energikilder, der ikke gør brug af en udtømmelig ressource. Solenergi og vindkraft er eksempler på vedvarende energikilder. I afsnit 2.4.4 diskuteres fordele og ulemper ved en række af de vigtigste alternative energikilder.

I Danmark har man fra politisk side aftalt mål for mere bæredygtig energi. Blandt disse mål kan nævnes at:

- 35 % af Danmarks energiforbrug i 2020 skal komme fra vedvarende energikilder.
- 50 % af Danmarks elproduktion i 2020 skal komme fra vindmøller.
- Danmark skal være helt uafhængigt af fossile brændstoffer i 2050.

Det er særligt vindkraft, der i Danmark har været i fokus som erstatning for de fossile brændstoffer. Som det kan ses af figur 2.37 (side 73) har vind overhalet kul som den vigtigste kilde til elektrisk energi i Danmark. Ørsted, der er Danmarks største energiselskab, har i 2017 udmeldt, at selskabet i 2023 vil være ophørt fuldstændigt med at afbrænde kul. Derimod har udfasning af olie længere udsigter, fordi man stadig ikke har teknologier, der til fulde kan erstatte benzin og diesel som energikilder til biler.

OPGAVER

2.61 Tabellen nedenfor viser en opgørelse af, hvor stor en procentdel af den danskproducerede strøm, der stammer fra vindmøller:

Årstal	2010	2011	2012	2013	2014	2015
% vindstrøm	22,0	28,3	30,0	32,7	39,1	42,1

- Lav en graf, der viser udviklingen i vindstrøm afhængigt af året.
- Vurder, om det er realistisk at nå målet om 50 % vindstrøm inden 2020.

FIGUR 2.44 ▼ Ørsted omlægger deres kraftværker fra at fyre med kul til blandt andet at fyre med træ og biomasse. Afbrænding af træ er CO_2 -neutralt, fordi træet ved fotosyntese under væksten selv har optaget CO_2 fra atmosfæren.





2.4.4 Alternative energikilder



FIGUR 2.45 ▲ Afbrænding af fossile brændstoffer har negative konsekvenser for miljøet både på kort og lang tidsskala.

Vores nuværende energiforsyning er i høj grad baseret på de fossile brændsler: Kul, olie og naturgas. Til sammen udgjorde de i 2014 over 80 % af klodens samlede energiforbrug (se figur 2.38, side 73). Der er betydelig usikkerhed om, hvor lang tid klodens reserver af fossile brændstoffer kan understøtte det nuværende forbrug. Nogle bud lyder på, at verden vil løbe tør for olie allerede omkring år 2050. Andre modeller viser, at øget efterspørgsel vil gøre det økonomisk at udvinde reserver, det p.t. ikke kan betale sig at udvinde. Det vil i givet fald forøge holdbarheden betydeligt. Uanset hvilken model man stoler på, er der bred enighed blandt klimaforskere om, at det vil være skadeligt for klimaet at fortsætte den nuværende udledning af CO_2 fra fossile brændstoffer (se også afsnit 3.4.7, side 135, om drivhuseffekten).

Fremtidens energiforsyning er derfor nødt til i større grad at basere sig på alternative energikilder til fossile brændstoffer. Ellers bliver det ikke muligt at leve op til de globale målsætninger om bæredygtighed og at begrænse klimaforandringerne. Der er allerede mange alternative energikilder i anvendelse, men de fleste er forbundet med problemer i form af høje omkostninger, lav pålidelighed eller lav effektivitet. Det er derfor usandsynligt, at det er en enkelt energikilde, der skal erstatte de fossile brændstoffer. Her præsenteres fordele og ulemper for nogle af de vigtigste alternative energikilder.

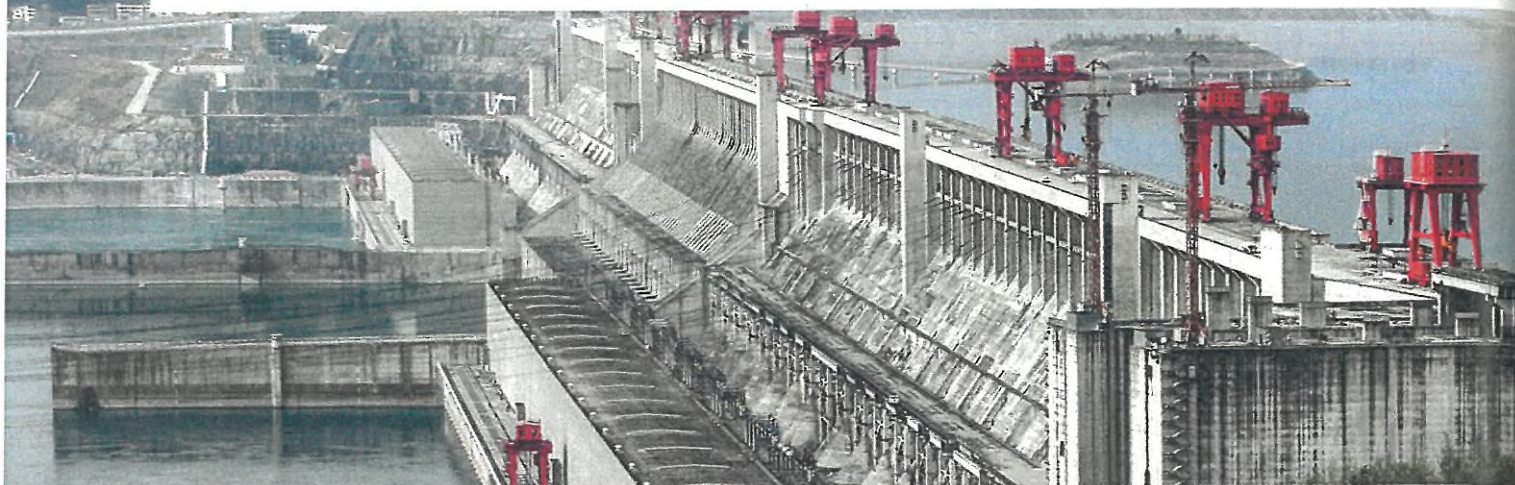
Kernekraft (også kaldt „atomkraft“) har været kendt og brugt siden midten af 1900-tallet. Kernekraft er baseret på fission som energikilde, dvs. spaltning af store atomkerner til mindre dele. Denne energikilde er dog selv forbundet med flere ulemper. Dels er der igen tale om en energikilde af begrænset mængde, dels er denne energikilde forbundet med et problem i form af radioaktivt affald. En række alvorlige ulykker med udslip af radioaktivt materiale har også fået folk til at sætte spørgsmålstegn ved kernekraft som løsningen på fremtidens energibehov. Især ulykken på Tjernobylkraftværket i Ukraine i 1986 og ulykken på Fukushima-værket i Japan så sent som i 2011 har givet næring til dette. Ironisk nok er kernekraft den af alle energikilde, der resulterer i færrest dødsfald pr. produceret joule, selv når disse ulykker medregnes. Kernekraft stod i 2014 for godt 11 % af verdens elproduktion (se figur 2.38).

I Danmark var der udbredt modstand mod atomkraft i 1970'erne og 80'erne. Siden 1985 har det fra politisk side været besluttet, at dansk elproduktion ikke skal inkludere kernekraft. De voksende klimaproblemer har dog igen gjort spørgsmålet aktuelt, og i 2016 blev det meldt ud politisk, at man vil fjerne forhindringerne for forskning i nye atomkraftteknologier. Den nuværende atomkraft er baseret på grundstoffet uran, hvis reserver kun menes at kunne holde i et par århundreder med den nuværende forbrugsrate. Der arbejdes dog på at udvikle atomkraft baseret på grundstoffet thorium. Reserverne af thorium er langt større, og man mener, at dette grundstof vil give færre problemer med radioaktivt affald.

FIGUR 2.46 ▼ 2016 markerede 30-året for ulykken på Tjernobylkraftværket i Ukraine, og rundt omkring i verden er der fortsat protester mod anvendelsen af kernekraft. Billedet her er fra en demonstration ved et atomkraftværk i Tyskland. Det ikoniske solmærke med „Atomkraft? Nein Danke“ logoet blev designet og lanceret i Danmark tilbage i 1975.



TEMA



FIGUR 2.47 ▲ *Three Gorges Dam ved Yangtze-floden i Kina. Værket har en maksimal effekt på 22,5 GW og leverer en årlig energiproduktion på ca. 90 TWh – eller rundt regnet tre gange Danmarks samlede elforbrug. Dæmningen leverer blandt andet strøm til millionbyen Shanghai, men dækker trods dens enorme kapacitet ikke mere end ca. 2 % af Kinas samlede strømforbrug!*

Vandkraft er på verdensplan den vigtigste vedvarende energikilde, idet den i 2014 stod for godt 16 % af verdens elproduktion. Den enorme *Three Gorges Dam* ved Yangtze-floden i Kina er verdens største kraftværk med en maksimal effekt på svimlende 22,5 GW. Vandkraft har ikke de fossile brændstoffers problem med udledning af CO_2 og øvrig forurening. Til gengæld kræver det de rigtige geografiske forhold, og opførelse af storskala vandkraftanlæg har stor betydning for den lokale geografi. Brud på dæmninger kan også have katastrofale konsekvenser, som man oplevede i Kina i 1975. Her døde omkring 170 000 mennesker ved drukning og grundet sygdom og fødevarer mangel efter et dæmningsbrud, der ødelagde store landbrugsområder.

Vindkraft og solenergi er to kilder til vedvarende energi, der i Danmark får relativt meget opmærksomhed. Danmark har foretaget store investeringer i opførelse af større og mere effektive vindmøller, og vi er i Danmark langt fremme med udnyttelse af vindenergi: I 2015 kom 42 % af Danmarks elproduktion fra vindmøller (hvoraf en del dog blev eksporteret). Dette er markant højere end tallene på globalt plan, hvor kun godt 5 % af strømproduktionen kommer fra vindmøller og solenergi.

Vindmøller og solceller har begge en væsentlig begrænsning, nemlig at de ikke er konstante energikilder. Det gør det vanskeligt at blive fuldstændigt dækket ind af disse energikilder, medmindre man finder en måde af oplagre overskudsenergien på de tidspunkter, hvor der er maksimal produktion. Begge energikilder døjer også med en relativt lille effekt pr. produktionsenhed, hvilket gør det pladskrævende at generere tilstrækkeligt med effekt. I Danmark har havvindmølleparker med mange vindmøller vist sig som effektive løsninger, men igen er betydningen for lokalmiljøet et problem. Solceller har i mange år kæmpet med ringe nyttevirkning samt stort energiforbrug til produktion, men der forskes intensivt og sker væsentlige gennembrud på dette område.

Til sidst skal det nævnes, at fysikere længe har været klar over, at en alternativ form for kernekraft potentielt er tilgængelig. Det er fusionsenergi, hvor man sammensmelter (fusionerer) to små atomkerner. Denne form for kerneprocess finder sted i Solen, og hvis den kunne udnyttes på industriel skala, ville man have en næsten uudtømmelig energikilde. Desværre er det endnu ikke lykkedes fysikere at få fusionsprocessen til at forløbe i længere tid med større energiudbytte end forbrug, og et optimistisk bud lyder i dag på, at fusionsenergi kan være en realitet tidligst i år 2050.



FIGUR 2.48 ◀ En konventionel vindmølle har en relativt begrænset effekt i forhold til et gammeldags kulfyret kraftværk. Der skal op imod 300 vindmøller til at levere samme effekt som et konventionelt kraftværk, idet vindmøllens effekt kun er ca. 3 MW. Derfor opsættes vindmøller ofte i stort antal i såkaldte vindmølleparker. Der arbejdes løbende på at udvikle større og mere effektive vindmøller. Det danske firma Vestas har udviklet såkaldte megamøller med en effekt på op til 10 MW.

OPGAVER

2.62 Undersøg, eventuelt i grupper, virkningsmekanismen for forskellige alternative energikilder som vandkraft, vindkraft, solenergi og kernekraft, eller andre former som ikke er omtalt i teksten, fx jordvarme og bølgeenergi. Kom ind på, hvilke energiformer og hvilke energiomdannelser der finder sted ved produktionen af elektricitet. Diskuter fordele og ulemper for de forskellige energikilder i forhold til at løse fremtidens energibehov.

Nøglebegreber

Nedenfor er en liste over de vigtigste begreber, der er introduceret i dette kapitel. Test dig selv – kan du forklare deres betydning?

- Energi og energiformer
- Energiomdannelse
- System
- Energikvalitet
- Brændværdi
- Effekt
- Specifik varmekapacitet
- Nyttetvirkning
- Absolut temperatur
- Absolut nulpunkt
- Tilstandsform
- Faseovergang
- Specifik smeltevarme
- Specifik fordampningsvarme
- Vedvarende energikilde