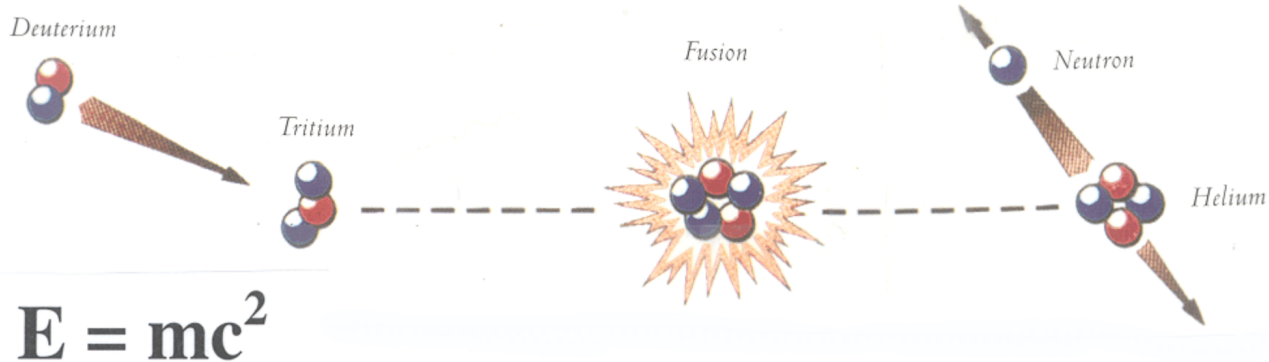


FUSIONSENERGI

Fremtidens dominerende energikilde?

Vagn O. Jensen



Til mit barnebarn Philip, som blev født, da denne bog blev planlagt. Bogen er skrevet i håbet om, at han og hele hans generation må kunne leve deres liv i et rent og uforstyrret miljø og samtidig have tilstrækkelig energi til rådighed

Indhold

Forord, 4

1 Indledning, 6

2 Det globale energiforbrug, 8

- 2.1 Definition og måling af energi, 7
- 2.2 Menneskehedens energiforbrug før, nu og fremover, 9
- 2.3 De primære energikilder, deres potentialer og miljøpåvirkning, 10
 - 2.3.1 De vedvarende energikilder, 10
 - 2.3.2 De fossile energikilder, 12
 - 2.3.3 Atomenergi, 13
 - 2.3.3.1 Fission, 14
 - 2.3.3.2 Fusion, 14
- 2.4 Resume og konklusioner, 15

3 Fusionsprocesserne, 16

- 3.1 Lidt om atomkernefysikkens historie, 16
- 3.2 Fusionareaktorens virkemåde, 18
 - 3.2.1 Fusionsprocesser, der er egnet til en fusionsreaktor, 18
 - 3.2.2 Forekomster af fusionsbrændstoffer i naturen, 19
 - 3.2.3 Termonuklear fusion. Plasmabegrebet, 20

Boks 3.1 Kinetisk temperatur, 21

Boks 3.2^s Lidt gasteori og den producerede effekt i et fusionsplasma, 23

- B.3.2.1 Kinetisk gasteori, 23
- B.3.2.2 Beregning af den producerede effekt i et fusionsplasma, 25
 - B.3.2.2.1 Fusionsprocesserne tværsnit, 25
 - B.3.2.2.2 Reaktionshastighed og effekttæthed i fusionsplasma, 27
- 3.2.4 Antænding i fusionsplasma, 30
- 3.2.5 Lawson-kriteriet, 33

4 Plasmafysik, magnetisk indeslutning, 35

- 4.1 Plasmabegrebet, 35
 - 4.1.1 Et plasmas hovedparametre, 35
 - 4.1.2 Plasma egenskaber, der er fælles med almindelige gassers, 35
 - 4.1.3 Specielle plasmaegenskaber. Stødfri plasmaer og kollektiv vekselvirkning, 36

4.2	Kvalitativ forklaring på magnetisk indeslutning og instabiliteter, 37
4.2.1	Definition af magnetfelt, 37
4.2.2	Magnetfeltets kilder og deres fremstilling, 37
4.2.3	Kræfter i magnetfelter, 39
4.2.4	Ladede partiklers bevægelse i magnetfelter, 39
4.2.5	Magnetisk plasmaindeslutning i simple toroidale systemer, 41
4.2.6	Tokamakken 43
4.3	Sammenfattende om magnetisk plasmaindeslutning, 44
5	Plasmaopvarmning, 45
5.1	Ohmsk opvarmning, 45
5.2	Højfrekvensopvarmning, 46
5.3	Opvarmning ved injektion af neutrale partikler, 47
6	Plasmadiagnostik, 49
6.1	Tætheds- og temperaturmålinger ved Thomsonspreddning, 49
7	Fusionsforskningen fremover, 56
7.1	De næste fusionseksperimenter: ITER-FEAT, 56
7.2	Fusionskraftværket, 58
7.3	Sikkerhed og miljø omkring fusionsenergien, 58
Boks 7.1	Fusionsforskningens omkostninger og administration, 61
	Stikordsregister, 63
	Supplerende læsning, 65

Forord

Fusionsforskningen er det største forskningsprojekt, som menneskeheden nogensinde har sat i gang. Forskningens mål er at sætte os i stand til at beherske og udnytte Solens og stjernernes energikilde, fusionsenergien, hvorved vi vil få en uudtømmelig og miljøvenlig energikilde til rådighed. Hovedemnet for denne bog er en beskrivelse af fusionsforskningens problemer og de resultater, som er opnået. Da argumentationen for at forske i fusionsenergien er, at den vil kunne komme til at dække den dominerende del af menneskehedens energiforsyning på langt sigt, har det været naturligt at begynde bogen med et kapitel, der omhandler vort globale energiforbrug og de vanskeligheder, vi har med skaffe os den energi. Alle de øvrige kapitler omhandler selve fusionsforskningens problemer, resultater og udsigter.

Bogen er skrevet for brug i gymnasiets naturvidenskabelige linie. Det er tilstræbt at skrive hovedteksten, så den med udbytte også kan læses af studerende på det obligatoriske niveau og give dem et bredt indtryk af fusionsforskningen uden at gå i detaljer med fysiske forklaringer og beviser. En mere dybtgående fysisk og matematisk behandling af detailproblemer svarende til det høje niveau er henvist til bokse, som er mærket §. Det er op til et valg at afgøre, i hvilken grad disse bokse skal indgå i undervisningen. Bogen indeholder også en række opgaver, som illustrerer de problemer, der omtales i teksten. De fleste opgaver vil kunne løses på obligatorisk niveau. De, der er så svære, at de kræver viden, der kun kan forudsættes på højt niveau, er også mærket §.

Fusionsforskningen er i udstrakt grad baseret på plasmafysik, som er en relativ ny gren af den generelle fysik. Der er derfor medtaget et kapitel, hvori de mest basale plasmaegenskaber nævnes. Plasmafysik har den særlige karakter, at den kombinerer en række af de kendte fysikdiscipliner som mekanik, varmelære, elektricitets- og magnetismelære m.m. En del af opgaverne har også til formål at give eleverne mulighed for at arbejde med at kombinere disse nævnte discipliner.

Ideen til at skrive denne bog stammer fra et fusionskursus for gymnasielærere, som Elmuseet i Bjerlingbro arrangerede i efteråret 1998 i samarbejde med Forsøgscenter Risøs fusionsforskergruppe og EURATOMs fusionsforskningsprogram. Jeg skylder Elmuseet og de deltagende lærere stor tak for deres interesse for at udbrede viden om fusionsforskningen til gymnasieelever og for den inspiration, de gav mig til at skrive denne bog. Som nypensioneret forsker, der har tilbragt hele sit aktive liv med fusionsforskning og undervisning i dette fag på DTU, troede jeg, at det ville være en let sag at skrive bogen. Det var det ikke. Mit kendskab til nutidens gymnasieundervisning var simpelthen for lille, så det var meget svært at ramme det rigtige niveau. Under arbejdet med at skrive bogen har jeg brugt tidligere og nuværende medlemmer af fusionsforskergruppen på Risø som sparringspartnere; de har med stor velvillighed og tålmodighed diskuteret forskellige dele af teksten med mig og givet mig mange gode råd, hvilket jeg er meget taknemmelig for. Forsøgscenter Risø har velvilligt stillet kontor-

faciliteter til min rådighed, mens jeg skrev bogen. Det er jeg meget taknemmelig for. Ove Østergaard har som gymnasielærer været min støttepædagog; han har læst teksten igennem og givet mange gode råd med henblik på at få den lagt på det rette pædagogiske niveau. Jeg og læserne skylder ham megen tak. Uden hans råd ville bogen have været meget tungere at læse. Også tak til Niels Trautner fra Roskilde Katedralskole, som har gennemlæst manuskriptet og givet mange nyttige rettelsesforslag. Endelig skal der lyde en stor tak til Bitten Skårup og Monika Jensen, som begge har læst sproglig korrektur på manuskriptet og rettet mange af mine værste bommerter.

Det er mit håb, at denne bog vil hjælpe med til at øge interessen og forståelsen for fusionsforskningen blandt gymnasieelever. Nogle skulle gerne blive så interesserede, at de lader sig rekruttere som forskere inden for dette felt. Mange andre skulle gerne få en så reel viden om området, at de på sagligt grundlag kan deltage i den demokratiske beslutningsproces om fusionsforskningen .

Forsøgscenter Risø, sommeren 2001.

Vagn O. Jensen

PS.

Dette manuskript er skrevet med henblik på at blive offentliggjort i bogform. Det er derfor udarbejdet i henhold til forlagets ønsker, både hvad angår omfang, indhold og form. Da manuskriptet var færdigt, følte forlaget ikke, at det ville trykke det i bogform, men i stedet gøre det tilgængeligt på internettet. I den forbindelse ville det have været naturligt at omskrive og udvide manuskriptet med fx. opgaveløsninger og en vektorbehandling af ladede partiklers bevægelse i magnetiske og elektriske felter. For at fremskynde offentliggørelsen blev det dog besluttet her og nu at lægge det oprindelige manuskript ind på nettet. Af samme grund er figurerne ikke blevet rentegnet.

Februar 2002.

Vagn O. Jensen

1 Indledning

Fusionsenergi er en energi, der frigøres i atomkernereaktioner, hvor lette kerner smelter sammen (fusionerer) til tungere. Fusionsprocesserne er væsentlig forskellige fra de fissionsprocesser, der foregår i de kendte atomkraftværker, hvor energien frigøres, når tunge atomkerner bringes til spaltning (fission). Fusionsprocesserne har været kendt af fysikere i mere end 60 år, men trods et meget stort forskningsarbejde gennem det sidste halve århundrede kan man endnu ikke bygge en reaktor, der producerer fusionsenergi i kontrolleret form. Solen og stjernerne er store fusionsreaktorer, idet al den energi, de danner og udstråler i verdensrummet, er dannet ved fusionsreaktioner i deres indre. Her på Jorden har vi også fremstillet fusionsenergi, men kun i ukontrolleret form, nemlig i de såkaldte brintbomber.

En fusionsreaktor vil i princippet komme til at virke som en almindelig ovn, hvor kul eller olie forbrændes under dannelse af varmeenergi. I en sådan ovn opvarmes brændstoffet til en så høj temperatur, at forbrændingsreaktionerne går i gang, hvorved brændstoffets kulatomer iltes til kuldioxid. Ved forbrændingen produceres der varme. En del af den dannede varmeenergi afsættes i den resterende del af brændstoffet, som derved holdes så varmt, at forbrændingen kan fortsætte. Vi siger, at forbrændingen er antændt. Almindelig forbrænding er kemiske reaktioner, hvor kun elektronskyerne i brændstofatomerne reagerer med hinanden, medens atomkernerne er upåvirkede. Det er derfor ret let at få reaktionerne til at forløbe, og antændelsestemperaturen er relativt lav. De fleste af vore almindeligt brugte brændstoffer har antændelsestemperaturer omkring 1000 °C.

I en fusionsreaktor vil vi få tilsvarende forhold. Brændstoffet, der her består af en gas af lette atomkerner som brintisotoperne deuterium (tung brint) og tritium (supertung brint), opvarmes i reaktorens ovn, indtil de energiproducerende fusionsreaktioner går i gang. En del af den dannede energi afsættes som varme i det resterende brændstof, som derved holdes så varmt, at reaktionerne kan fortsætte. Vi siger, at fusionsforbrændingen er antændt. Ved fusion er det selve atomkernerne, der skal reagere, og de skal derfor bringes meget tæt sammen. Da de er positivt elektrisk ladede og derfor frastøder hinanden med stærke elektriske kræfter, er kravene til temperaturen meget større end for almindelig forbrænding. Antændelsestemperaturen i en fusionsreaktor er meget høj, nemlig ca. 100 millioner °C.

Det er denne meget høje temperatur, der gør det svært at bygge en fusionsreaktor. For det første skal man finde metoder til at opvarme brændstoffet til den høje antændelsestemperatur. For det andet skal brændstoffet i fusionsovnen være indesluttet, så det ikke kommer i direkte berøring med væggene, som jo ellers ville afkøle brændstoffet, hvorved reaktionerne ville gå i stå. Gennem de godt 40 år, hvor der er forsket i fusionsenergi, har hovedproblemet været at finde metoder til at opvarme og indeslutte et fusionsbrændstof. Der er nu udviklet metoder til at nå de ca. 100 millioner °C, men problemerne med indeslutningen er endnu ikke helt løst. Man er imidlertid nået så langt, at det nu er realistisk at tro på, at det om ca. 40 år vil være muligt at bygge fusionskraftværker, så vi derefter kan lade fusionsenergien indgå som en væsentlig del af menneskehedens energiforsyning. Derved får vi en erstatning for

de fossile brændstoffer kul, olie og naturgas, som jo har begrænsede forekomster og uheldige miljøpåvirkninger.

Fusionsforskningen er et verdensomspændende projekt, hvori alle de industrialiserede lande deltager. Det samlede årsbudget er på ca. 10 milliarder danske kroner. Hvad kan menneskeheden så håbe at få for disse store beløb? Vi kan håbe, at vi om ca. 40 år behersker en ny energikilde, fusionsenergien, som gør, at vi kan bygge fusionsreaktorer, der

- repræsenterer en udtømmelig energikilde, idet de naturlige forekomster af brændstofferne deuterium og tritium er meget store og tilgængelige overalt på Jorden,
- producerer energi på en miljømæssig forsvarlig måde, idet den ikke sender nogen form for forurening ud i atmosfæren under normal drift og kun har begrænsede problemer med radioaktivt affald ved udskiftning af reaktorelementer og ved nedlukning,
- kan producere energi til stort set samme pris, som de andre energiformer har nu.

Hvad er så forudsætningerne for, at vi når dette mål?

- Der må ikke opstå fysiske eller teknologiske problemer, som vi ikke kan løse. De meget opløftende resultater af de sidste års forskning har nu fået de fleste forskere til at tro, at alle problemer kan løses.
- De bevilgende politiske myndigheder skal være indstillet på at stille de nødvendige midler til rådighed for forskningen.
- Der skal være en stor og engageret forskerstab, som er indstillet på at løse alle forskningens problemer.

Inden vi i kapitlerne 3 til 7 omtaler forskellige sider af fusionsforskningen, skal vi i kapitel 2 se nærmere på menneskehedens problemer med at skaffe sig en stabil energiforsyning, så vi kan se behovet for allerede nu at arbejde med udvikling af en fusionsreaktor.

2 Det globale energiforbrug

Alle levende organismer må have tilført energi for at opretholde livet. Dannelse af organiske stoffer til opbygning af organismene er en livsnødvendig proces, der kræver energi. Visse organismer kræver en temperatur, der er højere end omgivelsernes. For at opretholde en sådan temperatur må de have tilført energi. Endelig skal mere højtstående organismer som fx dyr, fisk og fugle kunne bevæge sig for at skaffe sig føde og dermed overleve. Bevægelse kræver også energi.

Planter og lavtstående organismer kan udnytte Solens stråler direkte som energikilde. Via fotosyntese kan de omdanne den indkommende solstråling til forskellige former for organisk materiale, som bruges til opbygning af disse planter og organismer. Dette materiale kaldes under et biomasse, og det indeholder energi i form af kemisk energi, som vi kan frigøre i form af varme ved afbrænding.

Menneskene får opfyldt de livsnødvendige energibehov gennem den føde i form af biomasse, som de indtager og forbrænder. I gennemsnit har et menneske hver dag behov for at indtage føde, der har en brændværdi på ca. 10 MJ. Da et døgn har 86.400 sekunder, svarer vort livsnødvendige energiforbrug til en middeleffekt på godt 100 Watt, hvilket svarer til en stor elpæres effektforbrug. Allerede for ca. en million år siden begyndte menneskene at bruge mere energi end det, der var nødvendigt for at dække de livsnødvendige behov. De begyndte at benytte ild til opvarmning af huler og til tilberedning af føde. Senere begyndte de at bruge trækdyr som heste og okser til tunge energikrævende opgaver. Også brug af vinden som energikilde til skibe og vindmøller blev indført på et tidligt stadium. En meget stor forøgelse af menneskenes energiforbrug startede med opfindelsen af dampmaskinen og industrialiseringens gennembrud midt i 1700-tallet. Siden da er energiforbruget steget meget stærkt til det høje niveau, det har nu.

2.1 Definition og måling af energi

Energi kan optræde i mange former. En masse i bevægelse har **bevægelsesenergi**. En masse, der er flyttet imod en kraft, har fået forøget sin **potentielle energi**. Ved opvarmning får et legeme forøget sin **varmeenergi**. **Kemisk energi** er en energiform, der kan frigives (eller bindes) i kemiske processer: Brændværdien af et brændstof er et eksempel på kemisk energi. Elektriske og magnetiske felter indeholder **elektrisk og magnetisk energi**. Inden for visse begrænsninger kan man omsætte alle disse energiformer til de andre.

Da energi kan optræde i mange former, er det svært at give en kort og klar definition af glosen energi. Den mest anvendte definition er, at et system siges at have energi, hvis det kan udføre et arbejde på omgivelserne og derved ændre deres energiindhold. Det kan fx være ved at sætte dem i bevægelse, hæve dem i et tyngdefelt eller varme dem op. Den energi, som systemet har, er altså lig det arbejde, det kan udføre. Arbejde og dermed alle former for energi måles derfor i samme enhed. SI-enheden for energi er Joule (J), og den er defineret som det arbejde, der udføres af en kraft på 1 N, når et legeme bevæger sig 1 m i kraftens retning. Ser vi på en masse på 1 kg, så er den påvirket af en tyngdekraft, $F_t = 1\text{kg} \times g$, hvor g er accelerationen i Jordens tyngdefelt $= 9,82 \text{ m/s}^2$. Vi har altså $F_t = 9,82 \text{ N}$, og vi ser, at 1 J, stort set er det arbejde, vi udfører, når vi løfter det ene kilogram 0.1 m op. 1 J er derfor en meget lille enhed, hvis vi skal bruge den til måling af den samlede menneskeheds årlige energiforbrug. På den anden side er 1 J en meget stor enhed, hvis vi ser på en atomar proces som forbrænding eller en kerneproces som fusion. Det er derfor praktisk at indføre både nogle meget store energienheder og nogle meget små. I tabel 2.1 vises omsætningsforholdene mellem nogle ofte anvendte energienheder.

Energienhed	Joule J	Kilowatttime kWh	Terawattår TWy	Tons olieækvi- valent / toe	Elektronvolt eV
1 J	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$3,17 \cdot 10^{-20}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	-
1 kWh	$3,6 \cdot 10^6$	1	$1,14 \cdot 10^{-13}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	-
1 TWy	$3,16 \cdot 10^{19}$	$8,77 \cdot 10^{12}$	1	$7,5 \cdot 10^8$	-
1 toe	$4,2 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^{-9}$	1	-
1 eV	-	-	-	-	1

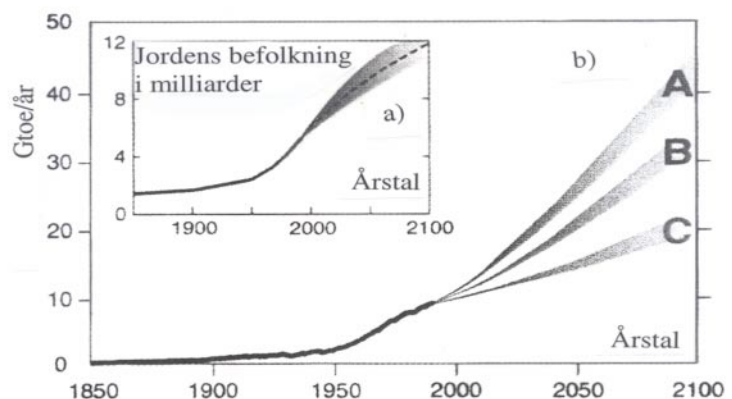
Tabel 2.1. Omsætningstabel mellem nogle ofte anvendte energienheder. 1 toe (ton olie ækvivalent) er brændværdien af en ton olie. 1 eV er den tilvækst i kinetisk energi, som en elektron får, når den gennemløber et spændingsfald på 1 V. eV er altså en meget lille enhed, den benyttes mest ved atomare processer.

2.2 Menneskehedens energiforbrug før, nu og fremover

Mennesker bruger energi til mange formål. Ved siden af den livsnødvendige energi, vi indtager med føden, er de væsentligste formål: til transport med biler, toge, skibe og fly, til produktion i industri, landbrug og fiskeri samt til opvarmning og køling af vore bygninger og transportmidler. Vi så i 2.1, at alle former for energi kan måles i samme enhed. Vi skal nu se på menneskehedens samlede årlige energiforbrug, og vi vælger at benytte energienheden toe, som er brændværdien af et ton olie. Her ved årtusindeskiftet er menneskehedens samlede årlige energiforbrug på ca. **10 milliarder toe** eller ca. **10 Gtoe**. Vi er godt fem milliarder mennesker på Jorden, så i snit bruger hver af os om året lige så meget energi, som der frigøres ved afbrænding af ca. to tons olie.

Figur 2.1 viser, a) hvordan Jordens samlede befolkning har udviklet sig siden 1850, og b) hvordan denne befolknings samlede energiforbrug har udviklet sig i samme periode. De to kurver viser også, hvordan man forestiller sig, at udviklingen vil gå frem til år 2100. Gennem det 21. århundrede forventes en fordobling af Jordens befolkningstal til ca. 12 milliarder individer. Det skyggebelagte område omkring kurven viser usikkerheden i disse forudsigelser. Energiforbruget forventes at ville vokse stærkere. Det skyldes først og fremmest, at vi bliver flere og flere, men også, at man må forvente og håbe, at levestandarden og dermed energiforbruget i udviklingslandene vil nærme sig forholdene i de industrialiserede lande. En væsentlig reduktion i forbruget pr. person i de industrialiserede lande gennem energibesparelser og mere effektiv udnyttelse af energien er næppe sandsynlig. Kurverne H, R og L på

Figur 2.1.
Forudsigelse om Jordens
befolkningsudvikling og
energiforbrug de næste
100 år.



forbrugsdiagrammet på figur 2.1 svarer til: H det største forbrug, man kan tænke sig, R et mere sandsynligt og realistisk forbrug og L er det mindste forbrug, man kan forestille sig. De tre kurver viser den ret store usikkerhed i disse forudsigelser. Det mest sandsynlige forløb svarer altså til, at Jordens samlede årlige energiforbrug vil stige med en faktor godt 3 fra de nuværende ca. 10 Gtoe til op mod 35 Gtoe ved udgangen af det 21. århundrede.

Tabel 2.2 viser, hvor skævt det gennemsnitlige energiforbrug pr. person var fordelt i 1995 mellem forskellige områder.

Land	Gennemsnitsforbrug pr. person i W	Land	Gennemsnitsforbrug pr. person i W
USA	11.200	Tidl. Sovjetunionen	4.000
Japan	5.700	Kina	990
Danmark	5.100	Indien	170
Hele Europa	4.800	Verdensgennemsnit	2.100

Tabel 2.2. Det gennemsnitlige energiforbrug pr. person i 1995 i nogle lande og områder.

Opgave 2.1. Beregn hvor stort det gennemsnitlige effektforbrug målt i W er for en person, der brænder 2 tons olie af om året og sammenlign resultatet med de ca. 100 W, som er vort livsnødvendige forbrug.

Opgave 2.2. Beregn menneskehedens samlede effektforbrug målt i TW ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$)

2.3 De primære energikilder, deres potentialer og miljøpåvirkning

Menneskehedens nuværende energiforbrug dækkes næsten udelukkende af tre primære hovedkilder: **vedvarende energi, fossil energi og kerneenergi**. Ved primære energikilder forstås kilder, som naturen direkte stiller til vor rådighed. Der er tale om kilder som direkte opfangning af energien i Solens stråler, vindenergi, bølgeenergi, fossile energikilder og kerneenergi. Sekundære kilder bliver så energikilder, der ikke findes i naturen, men som fremstilles ud fra de primære kilder. Elektricitet er den mest brugte sekundære energikilde i øjeblikket. En anden sekundær kilde, som nok vil få voksende betydning, er brint. Brint kan fremstilles ved elektrolyse ud fra primære kilder. Når den nødvendige teknologi er udviklet, vil brint sikkert få stor betydning som erstatning for olie og benzin inden for transportsektoren, fordi den ikke forurener med CO_2 eller giver anden kemisk forurening ved afbrænding.

2.3.1 De vedvarende energikilder

Solen er vor altdominerende energikilde. Den energimængde, som er i de solstråler, der i løbet af et år rammer Jorden, ligger på ca. 100.000 Gtoe, og den er altså fire størrelsesordener større end vort samlede årsforbrug. Vedvarende energikilder er kilder, der på forskellige måder får omsat energien i solstrålerne til energiformer, som vi kan udnytte. Her skal kort omtales fem af de væsentligste vedvarende energikilder, som hver giver et begrænset bidrag til energiforsyningen.

1. Direkte opfangning af energien i Solens stråler i solenergianlæg er således en vedvarende energikilde. Sådanne anlæg er dyre at etablere, de har en lille virkningsgrad, og de kan kun afgive energi, når Solen skinner. At dække Danmarks samlede energiforbrug ved brug af nutidens solfangeranlæg ville kræve et areal på størrelse med Fyn samt store energilagringsanlæg.

Opgave 2.3. Det antal joule solenergi, som pr sekund passerer gennem en kvadratmeter lagt vinkelret på retningen til Solen, kaldes solkonstanten og betegnes ofte S_0 . I Jordens afstand fra Solen er $S_0 = 1,35 \text{ kW/m}^2$. Ca. 30 % af den solstråleeffekt, der er rettet mod Jorden, absorberes eller reflekteres i Jordens atmosfære, så den effektive solkonstant på jordoverfladen bliver ca. 1 kW/m^2 . Beregn den energimængde i Gtoe, som solstrålingen om året leverer på jordoverfladen, og sammenlign dette resultat med menneskehedens samlede årsforbrug.

Den solenergi, som rammer jordoverfladen, udstråles igen som varmestråling i alle retninger ud i verdensrummet. Faktisk er Jordens gennemsnitstemperatur bestemt ved, at den udstrålede varmestrålingseffekt, der er proportional med jordtemperaturen i fjerde potens, er lig den modtagne effekt i solstrålingen. En del af energien i den indkommende solstråling omsættes til andre energiformer på jordoverfladen. Disse energier vil efterhånden af sig selv igen omdannes til varme og udstråles, men i den tid, de optræder i de andre former, har vi mulighed for at udnytte dem. Blandt de vigtigste af disse energiformer har vi:

2. Vindenergi. Vindene opstår, fordi Solen ikke afsætter sin varmestråling jævnt over Jordens overflade. Områderne omkring ækvator opvarmes stærkere end polområderne. Havene opvarmes mindre end de nærliggende landområder. Over de stærkest opvarmede områder bliver luften også varmere, så den udvider sig og stiger til vejrs. Herved strømmer den kolde luft fra koldere områder som vinde ind mod de varme områder. Det er bevægelsesenergien i disse vinde, der kan samles op i vindmøller. Man regner med, at det kun er ca. 0.1 % af den solstråleenergi, der rammer jorden, som omsættes til vindenergi. Da vindene er fordelt over meget store arealer og højder, er det ikke realistisk at tro, at vindmøller vil kunne levere mere end få procent af menneskehedens samlede energiforbrug.

3. Bølgeenergi. Når vindene blæser hen over havene, får de bølgerne til at rejse sig. En del af vindenergien går over i bølgerne, hvorfra vi kan opsamle en del i bølgeenergianlæg. Det er naturligvis kun en lille del af atmosfærens vindenergi, der omdannes til bølgeenergi, og det, der dannes, er spredt over meget store havområder. Da man kun vil kunne bygge bølgeenergianlæg nær kysterne, vil denne energiform kun kunne dække en meget lille del af vort samlede forbrug.

4. Vandkraft. Når Solen skinner på vandoverflader, fordampes noget af vandet. Dampen stiger til vejrs og føres med vinden til andre steder, hvor den fortættes og falder ned som regn. En lille del af den samlede mængde regnvand falder i højtliggende bjergområder, hvor det samler sig i søer. Dette vand har nu en stor potentiel energi, som vi kan udvinde ved at lade det løbe igennem og dermed trække elturbiner på dets vej tilbage til havene. Denne energi udnyttes allerede i ret stort omfang. Der er kun begrænsede muligheder for at få mere energi ud af denne kilde, da størstedelen af steder, der kan udnyttes, allerede bliver udnyttet.

5. Energi fra biomasse. Planter og lavtstående organismer danner biomasse ved at absorbere solstrålernes energi. Biomasse udgør en bred vifte af forskellige organiske stoffer: det meste som træ, men også som urter, havplanter, plankton og alle de levende væsner. Denne biomasse kan vi udnytte som energikilde, idet vi kan få energien ud i form af varme, når vi afbrænder den. Man regner med, at i alt ca. 0,3 % af den energistrøm i Solens stråler, der rammer Jorden, oplagres i biomasse. Energien i den samlede årlige produktion af biomasse over hele Jorden ligger omkring 300 Gtoe, hvilket er ca. 30

gange større end vort nuværende årsforbrug. I øjeblikket dækker biomasse ca. 12 % af menneskehedens samlede energiforbrug. Brugen af biomasse er forholdsvis størst i udviklingslandene, hvor den benyttes til madlavning og varme. Selvom der er megen energi i den biomasse, der dannes om året, er det svært at forestille sig, at det vil blive praktisk muligt at forøge biomassens andel i vor samlede energiforsyning væsentligt. Biomassen er jo spredt over meget store dele af Jordens areal og er derfor meget upraktisk at samle sammen og bruge i stor målestok.

Opgave 2.4. *Middeleffektætheden i de bølger, der rammer Jyllands kyst ved Vesterhavet er ca. 10 kW/m. Hvor stor en del af Danmarks energiforbrug, der er på ca. 5 kW pr. person, kan vi dække med bølgeenergianlæg, hvis vi antager en virkningsgrad på 10 %, og at kystlinien fra Skagen til grænsen er 400 km lang?*

Første søjle i tabel 2.3 viser, i hvor høj grad vi her omkring år 2000 udnytter de fem vedvarende energikilder. En vurdering af den maksimale, realistiske udnyttelse, der vil kunne opnås om 20 år, er vist i anden søjle. Disse vedvarende kilder vil tilsammen højst kunne yde omkring 3 Gtoe om året i 2020, altså kun en lille del af de ca. 15 Gtoe, som til den tid vil være vort årlige forbrug. Der er også gjort forsøg på at forudsige, hvor stort det årlige udbytte af de vedvarende kilder kan blive om hundrede år. Man gætter på, at de tilsammen vil kunne yde måske 5-10 Gtoe om året. Det bliver især bidragene fra direkte opsamling af solenergien og vindenergi, der kan forøges, medens de andre kilders bidrag stort set forventes at forblive uændrede.

Energikilde	Aktuel udnyttelse omkring år 2000 (Gtoe/år)	Maksimal realistisk udnyttelse omkring år 2020. (Gtoe/år)
Direkte opfangning af solenergi	0,02	0,36
Vindenergi	0,006	0,2
Bølgeenergi	Forsvindende	0,05
Vandkraft	0,6	0,9
Biomasse	1,2	1,6

Tabel 2.3. Vurdering af de væsentligste vedvarende energikilders potentialer gennem de næste 20 år.

Miljømæssigt er de vedvarende energikilder attraktive. Ingen af dem forurener atmosfæren med kemiske eller andre affaldsstoffer. Ved afbrænding af biomasse dannes der godt nok CO₂, som havner i atmosfæren; men den samme mængde CO₂ ville være dannet og sluppet ud, hvis biomassen havde fået lov til at rådne. Imidlertid vil en stærk forøgelse i brugen af de forskellige vedvarende energikilder medføre meget store opsamlingsanlæg, som vil kunne mærkes i miljøet. Tabel 2.4 viser, hvor store dele af menneskehedens nuværende energiforbrug, der dækkes af de forskellige primære energikilder.

2.3.2 De fossile energikilder

Kul, olie og naturgas kaldes fossile energikilder. Gennem de ca. 3,5 milliarder år, der har været liv på Jorden, er en del af den dannede biomasse blevet aflejret i Jordens øverste lag, hvor den har været udsat for forskellige tryk- og varmepåvirkninger. En del af dette materiale findes nu i store forekom-

ster af kul, olie og naturgas, som vi på forskellige måder kan få fat i og udnytte. De fossile energikilder er altså store lagre for en meget lille del af milliarder af års solenergi, som via fotosyntese er bundet i disse organiske stoffer.

Energikilde	Andel af det globale energiforbrug
Kul	34 %
Råolie	23 %
Naturgas	20 %
Atomkraft (fission)	5 %
Vandkraft	6 %
Biomasse (mest træ)	12 %
Sol, vind, bølger m.v.	Under 1 %

Tabel 2.4. Forskellige energikilders andel af den globale energiproduktion.

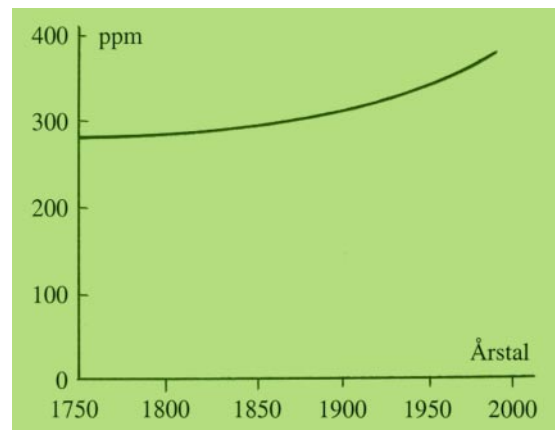
Brændstof	Kendte og tilgængelige energireserver, målt i det antal år, de kan dække Jordens nuværende forbrug
Kul	270
Råolie	40-50
Naturgas	60-70
Uran	40-50 (i nuværende reaktortyper)
Deuterium	2.400-3.000 (i formeringsreaktorer) Mere end 1 mia. (i fusionsreaktorer)

Tabel 2.5. Naturlige forekomster af forskellige råbrændstoffer.

De fossile energikilder dækker i øjeblikket mere end 75 % af menneskehedens energiforbrug, se tabel 2.4. Da der ikke opbygges nye forekomster af disse kilder, vil de på et eller andet tidspunkt kunne blive opbrugt. Tabel 2.5 viser størrelsen af de kendte forekomster af disse kilder. Det er interessant at bemærke, at energimængden i den samlede biomasse på Jordens overflade godt nok er mindre end, men dog sammenlignelig med den samlede energi i de kendte fossile kilder.

Som det fremgår af tabel 2.5, er energien i de fossile kilder stor nok til at dække vort nuværende energiforbrug i flere hundrede år. Når der alligevel er grund til bekymring allerede nu, skyldes det, at afbrænding af fossilt materiale forøger luftens CO_2 -indhold. Fig. 2.2 viser, hvordan CO_2 -indholdet i atmosfæren har ændret sig, siden vi for alvor begyndte at afbrænde fossilt materiale til energiproduktion for ca. 200 år siden. Det forøgede indhold af CO_2 i atmosfæren giver anledning til den såkaldte drivhuseffekt, som forhindrer Jordens varmemstråler i at trænge ud gennem atmosfæren. Herved vil Jordens gennemsnitstemperatur stige, hvilket har mange miljømæssige konsekvenser; det vil bl.a. få store ismængder i polområderne til at smelte, hvorved vandstanden i verdenshavene stiger. Gennem de seneste år er der set sikre tegn på virkningen af drivhuseffekten, så det er på høje tid at standse eller i hvert fald bremse udledningen af CO_2 i atmosfæren. Afbrænding af fossilt materiale forurener også vort miljø på andre måder. Vi kender allerede forureningen af regnvandet, som fører til syge træer og planter og til forvitring af kalkholdigt bygningsmateriale. Også nedbrydningen af ozonlagene over polområderne, som beskytter mod Solens ultraviolette stråling, skyldes til dels afbrænding af fossilt materiale.

Figur 2.2.
Udviklingen i atmosfærens
 CO_2 -indhold gennem de sidste 200
år målt i ppm (antal CO_2 -molekyler
pr. million atmosfæremolekyler).



En anden risiko ved fortsat at basere energiforbruget på fossile kilder er forsyningsstabiliteten. Forekomsterne af de fossile brændstoffer er koncentreret i forholdsvis få lokaliteter. Efterhånden som forekomsterne begynder at blive udtømt, vil de regeringer, der behersker disse lokaliteter, opnå en magtposition, så resten af Verden kan komme til at lide under deres forgodtbefindende. Energikriserne gennem de sidste 30 år i 1900-tallet er blot forløbere for en sådan situation.

2.3.3 Atomkerneenergi

2.3.3.1 Fission

Atomenergi er en ny energiform, som vi kun har kunnet udnytte i de sidste 50 år, men alligevel dækker den nu ca. 5% af Verdens forbrug. Energien frigøres, når tunge atomkerner spaltes, fissionerer. Det energiproducerende brændstof, uran, findes i naturen. De fleste eksisterende reaktorer, de såkaldte termiske reaktorer, udnytter kun den lette uranisotop ^{235}U . ^{235}U udgør blot ca. 0,7 % af naturlig uran, resten er ^{238}U . De såkaldte formeringsreaktorer udnytter alt uranet. Denne reaktortype er endnu under udvikling og bruges kun i ringe grad. De eksisterende atomkraftværker kan producere energi til priser, der let kan konkurrere med andre energiformer. Tabel 2.5 viser størrelsen af de kendte forekomster af uranbrændstof til de to reaktortyper.

Problemet med atomenergien er, at der ved kerneprocesser også dannes farlige radioaktive stoffer. Selv de termiske reaktorer, der er den mest sikre reaktortype, har haft alvorlige uheld, der har ført til udslip af radioaktivitet (Three Miles Island i 1979 og Tjernobyl i 1986). Formeringsreaktorerne synes at ville blive sværere at sikre i tilstrækkelig grad end de termiske reaktorer. Problemerne med radioaktiviteten har bevirket, at der er mange, der føler, at fissionsenergien er for farlig og derfor ikke bør anvendes. Mange andre mener, at den med et tilstrækkeligt forsknings- og udviklingsarbejde vil kunne gøres så sikker, at den bør benyttes. Spørgsmålet er jo: hvad er mest farligt: CO_2 , som havner i naturen ved afbrænding af fossile brændstoffer, eller en risiko for radioaktive udslip fra atomreaktorer?

2.3.3.2 Fusion

For en fuldstændigheds skyld skal fusionsenergiens muligheder nævnes her. Det vil tage mere end 30 år, før vi kan have fusionskraftværker kørende, og mindst 40 år, før de kan yde væsentlige bidrag til energiforsyningen. Det vigtigste fusionsbrændstof er tung brint, som findes i vand. Forekomsterne i verdenshavene er så store, at de vil kunne dække vort energiforbrug i milliarder af år, se tabel 2.5. Beregninger tyder på, at fusionsenergi vil kunne fremstilles til samme pris som vi nu betaler for energi. Fusionskraftværker vil også danne radioaktivitet. Dybtgående studier har vist, at radioaktiviteten fra fusionsværker bliver meget lettere at håndtere end radioaktiviteten fra fissionsværker. Fusionsenergi er behandlet mere detaljeret i de følgende kapitler.

2.4 Resume og konklusioner

Menneskehedens samlede energiforbrug ligger nu omkring år 2000 på ca. 10 Gtoe om året. Dette forbrug forventes at blive mere end fordoblet i løbet af de næste 50 år. Den dominerende energikilde er i øjeblikket de fossile brændstoffer. De dækker tilsammen mere end 75 % af forbruget. I løbet af relativt kort tid, måske en menneskealder, må vi forudse, at vi ikke længere kan basere hovedparten af energiforbruget på de fossile kilder. Deres miljøpåvirkning vil blive uacceptabel, og deres forekomster vil efterhånden begynde at blive brugt op. Det sidste vil medføre, at forsyningssikkerheden vil komme i fare.

Det er bydende nødvendigt, at vi får lagt vort energiforbrug om til andre kilder. De vedvarende kilder har tilsammen potentialet til at dække en noget større del af forbruget fremover, men det er urealistisk at tro, at de kan dække en dominerende del af det voksende forbrug. En større udbygning af anlæg til opsamling og brug af vedvarende energi bliver meget dyrt og har store miljømæssige konsekvenser. Direkte opfangning af solenergien er den af de vedvarende energikilder, der vil kunne yde det største bidrag til forsyningen, men skal denne kilde dække en væsentlig del af vort forbrug, vil det kræve, at meget store arealer dækkes med solfangeranlæg. Samtidig vil det blive nødvendigt, at der udvikles store - og derfor dyre - energilagringssystemer, som kan sørge for forsyningen, når Solen ikke skinner. Endelig skal der også etableres store energitransportsystemer, som kan føre energien fra anlæggene til forbrugerne.

Kerneenergi fra termiske reaktorer kan kun yde et begrænset bidrag på grund af de begrænsede uranforekomster. Kun hvis formeringsreaktoren kan udvikles og gøres tilstrækkelig sikker, kan fission blive en energikilde, der kan dække en stor del af vort energibehov i flere hundrede år.

Fusionsenergien er en mulig afløser for de fossile energikilder. Den vil med stor sandsynlighed kunne udvikles, så vi om 40 - 50 år i den har en energikilde med rigelige brændstofforekomster overalt på Jorden. Dens miljømæssige skadevirkninger og faren for alvorlige radioaktive udslip vil være minimale, og prisen for energien bliver næppe meget forskellig fra det, vi betaler nu.

Der er derfor gode grunde til at forske i fusionsenergien. Det betyder ikke, at forskning i andre kilder skal standses. Dels er det ikke 100 % sikkert, at det vil lykkes at udvikle fusionsreaktoren, og dels vil det vare mindst 40 år, før den kan begynde at yde en væsentlig energiproduktion. I mellemtiden er det derfor vigtigt at begrænse forbruget af de fossile kilder mest muligt, dels ved energibesparelser og dels ved i størst muligt omfang at udvikle og benytte de andre mindre forurenede kilder.

Oplysningerne ovenfor om de forskellige vedvarende energikilder er i udtrakt grad taget fra forskellige publikationer fra **World Energy Council**. Referencer til World Energy Councils publikationer kan findes på IT-adressen: <http://www.worldenergy.org/wec-geis>.