



Energiøkonomi 2005 - 2030

Veje til et energisystem

Af Klaus Illum
ECO Consult

Udgivet af Nyhedsmagasinet Ingeniøren på www.ing.dk
November 2004

Indhold

Forfatterens forord	5
1. Indledning	9
2. Energipolitiske problemstillinger	13
2.1 Nye ressourceøkonomiske vilkår	13
2.2 Energimarkederne	15
2.2.1 El-markedet	15
2.2.2 Naturgasmarkedet	16
2.3 Energipolitikkens strategiske råderum - institutionelt og teknologisk ..	17
2.4 Opfattelsen af energi som varer	19
3. Teoretiske prognosemodeller og analytiske modeller	21
3.1 Teoretiske prognosemodeller	21
3.2 Analytiske modeller	22
3.3 Teknologisk fremsyn	23
4. Energisystemet og dets terminologi	25
4.1 Energisystemet	25
4.2 Lokale energisystemer	27
4.3 Energi, tab og effektivitet	27
4.4 Nogle eksempler	30
4.5 Et næsten tabsfrit energisystem med masser af vindkraft og uden el-overløb ?	32
4.6 Vedvarende energi - et kvalitativt begreb, ikke en kvantitativ størrelse ..	33
4.7 Energiressourcer og ressourceforbrug	34
4.8 Geotermiske anlæg og solvarmeanlæg	35
4.9 Energiomsætnings- og transmissionssystemets effektivitet	36
4.10 Tekniske og adfærdsmæssige forbrugsfaktorer	37
5. Energisystemets geografiske afgrænsning og el-udveksling over landegrænser	39
6. SESAM-modeller	41
6.1 Multi-scenariedatabaser	41
6.2 Beregningsprogrammerne	42
6.3 Dokumentation og verifikation	44
6.4 Samfundsøkonomiske omkostningsberegninger	45
6.5 Komparative scenarie-analyser	45
7. SESAM-databasens indhold	47

8. Alternative strategier for udviklingen i de kommende årtier	53
8.1 Målsætning	54
8.2 Fremtidig vækst i energiforbrugende materiel omsætning	54
8.3 Energisystemets afgrænsning	55
8.4 Fem alternative strategier	55
8.5 Energiomsætnings- og transmissionssystemet	56
8.6 Solfangeranlæg	58
8.7 El-effektregulering	58
8.8 Brintproduktion og andre alternativer	59
8.9 Forbrugssystemets stationære enheder	59
8.10 El-apparater og biler	60
8.11 Transport og transportmidler	63
8.12 Sammenlignende samfundsøkonomiske analyser	63
9. Konklusioner	67
Efterskrift	71

Scenarieregningerne er foretaget ved hjælp af SESAM-modellen, som er beskrevet i SESAM-bogen:

Klaus Illum: *SESAM - The Sustainable Energy Systems Analysis System*.
Aalborg Universitetsforlag, 1995.

Tabeller:

Forskellene mellem de fem scenarier S1, S2, S3, S4 og S5, der sammenlignes i denne analyse, er sammenfattende beskrevet i tabel 8.1 og i tabellerne 8.3 - 8.11, som findes bagest i rapporten.

Tabel 8.1	Karakteristiske forskelle mellem de fem scenarier.	55
Tabel 8.2	Energibalanceregnskab for et lokalt energisystem med fjernvarme-solfangeranlæg og solceller.	57
Tabel 8.3	Ændringer af energiomsætnings- og transmissionssystemet (EOTS) i de forskellige scenarier.	73
Tabel 8.4	Kvantitative og kvalitative udviklingsforløb for forbrugssystemets stationære enheder.	74
Tabel 8.5	Udvikling i transportvoluminer og transportteknologi i scenarierne S1 - S5.	75
Tabel 8.6	Marginale ændringer af brændselsforbrug og CO ₂ -udslip ved marginale ændringer af el-og varmekonsum henholdsvis ydelser fra vedvarende energikilder.	76
Tabel 8.7	Brændsels- og el-eksport priser. Sammenfattende oversigt over de tre scenarier for fremtidig udvikling af brændsels- og el-eksportpriser	77
Tabel 8.8	Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse. Brændselsprisudvikling B1.	78
Tabel 8.9	Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse. Brændselsprisudvikling B2.	79
Tabel 8.10	Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse. Brændselsprisudvikling B3.	80
Tabel 8.11	Sammenligning af de økonomiske resultater for scenarierne S1 - S5.	81
Tabel 8.12	Omkostninger ved CO ₂ -reduktion.	82

Grafiske fremstillinger:

Et grafisk sammenfatning af forskellene i energiomsætning og CO₂-udslip i de fem scenarier findes i diagram 1 - 6 bagest i rapporten:

- Diagram 1: El-forbrug og el-eksport
- Diagram 2: El-produktion
- Diagram 3: Netto-varmekonsum
- Diagram 4: Varmeproduktion
- Diagram 5: Brændselsforbrug
- Diagram 6: CO₂-udslip

24. november 2004

Forord fra Nyhedsmagasinet Ingeniøren,

Gennem hele 2004 har der været stigende fokus på olieprisen, som har brudt den ene grænse efter den anden, 40 dollar pr. tønde, 45 dollar pr. tønde, 50 dollar... En væsentlig årsag blandt flere til dette er den store vækst i forbruget i Kina, en vækst som tilsyneladende er kommet bag på selv erfarne folk.

Samtidig er der med Ruslands ratificering af Kyotoprotokollen for klima ikke længere nogen form for tvivl om, at Danmark og EU skal leve op til denne protokols forpligtelser om at sænke udslippene af CO₂.

Endelig viste en stor strømafbrydelse på Sjælland og i Sydsverige for et år siden, at elsystemet er blevet langt mere sårbart. Denne sårbarhed øges markant med beslutningen om at lukke den sidste reaktor på akraftværket Barsebäck.

Ovenstående er tre ud af en lang række meget stærke argumenter for, at energiforsyningen vil komme voldsomt på dagsordenen i de kommende år, primært med spørgsmålet om, hvordan og med hvilke teknologiske løsninger vi på bedste vis kommer væk fra olieafhængigheden uden at krænke CO₂-rammerne. Regeringen er i gang med at overveje de samme spørgsmål og forventes at offentliggøre en langsigtet energistrategi senest 1. marts 2005.

Energispørgsmålene er alvorlige og fortjener at blive debatteret blandt fagfolk og bredt i samfundet. Derfor sætter Nyhedsmagasinet Ingeniøren nu fokus på de kommende årtiers energiforsyning. Vi har herunder bedt en af landets førende energiforskere docent, civ.ing, lic.techn., Klaus Illum belyse, hvilke konsekvenser, vores energivalg vil få økonomisk og miljømæssigt.

Klaus Illum råder over et avanceret modelværktøj, som kan regne på økonomiske og miljømæssige konsekvenser af valg mellem forskellige energiscenarier. Dermed kan beregningerne belyse, hvad der bedst kan betale sig under givne forudsætninger.

Resultatet af projektet er derfor dels en serie scenarieberegninger, som danner baggrund for artikler i Nyhedsmagasinet Ingeniøren i november-december 2004 og dels denne rapport, som diskuterer energiplanlægningens politiske vilkår og informationsgrundlag og dokumenterer scenarieberegningernes metode, forudsætninger og resultater.

Det er Nyhedsmagasinet Ingeniørens håb, at vi dermed skaber en fremadrettet debat i Ingeniøren og i samfundet om de bedste energipolitiske valg for de næste 20-30 år. Herunder om, hvilke teknologier og systemer vi skal satse på, som både billigst og miljømæssigt bedst vil sikre fremtidens forsyning.

Rolf Ask Clausen
redaktionschef,
Nyhedsmagasinet Ingeniøren

Forfatterens forord

“Hvad udad tabes, skal indad vindes” var E.M. Dalgas valgsprog, da han i 1866, efter at Tyskland havde taget Sønderjylland, grundlagde Hedeselskabet. Der måtte indvindes ny dyrkningsjord på heden og de store ingeniøropgaver med tørlægning og dræning af lavvandede fjorde skulle løses. Nu står vi overfor en langt større ingeniøropgave - nok historiens største - nemlig den opgave at ombygge vores nuværende på fossile brændsler baserede energisystem til et nyt system, der med et meget mindre forbrug af fossile brændsler skal udgøre en ny teknologisk basis for alle samfundets funktioner. En opgave, der er overmåde vanskelig, fordi den ikke kun er en ingeniøropgave, men en opgave hvis løsning forudsætter, at de institutionelle forhold og de økonomiske fordelingsmekanismer, som en målrettet udvikling af energisystemet er betinget af, indrettes på en formålstjenlig måde.

Den første barriere, der skal forceres for at bane vej for en rationel ingeniørmæssig analyse af de muligheder, som tegner sig, består i de stereotype opfattelser af betydningerne af de ord, der bruges i fremstillingen og diskussionen af energiproblemerne. Revisionen af betydningen af ordet “energi” og dets afledninger i ordsammenstillinger som “vedvarende energi”, “energi-tab” og “energi-varer” er derfor et primært anliggende for udredningen i denne rapport. Fordi denne begrebsrevision er essentiel for diskussionen af den kategoriske forskel mellem på den ene side konventionelle energistatistiske opgørelser og makro-økonomiske fremskrivninger og på den anden side den analytiske metode, der ligger til grund for de her fremlagte beregninger.

Danmark har et blandt alle verdens lande enestående udgangspunkt for en strategisk energiplanlægning. Foranlediget af den første oliekrise i 1974 iværksatte folketing og regering i slutningen af 1970'erne udarbejdelsen af det for en velfunderet energiplanlægning nødvendige datagrundlag. I et samarbejde mellem staten, amterne, kommunerne, el- og fjernvarmeselskaberne er der siden blevet udarbejdet en række enestående databaser, bl.a. Energistyrelsens EnergiDataBase.

Forudsætningen for, at dette omfattende datamateriale løbende kan bringes i anvendelse i tilrettelæggelsen og opfølgningen af en strategisk energiplanlægning, er, at der til databasen er knyttet et system af computer-programmer, der kan bringe de indsamlede data for alle energisystemets delsystemer - incl. transportområdet - i anvendelse i sammenhængende scenarie-beregninger, som under forskellige forudsætninger om den fremtidige økonomiske udvikling kan vise de resultater, der kan opnås ved at gennemføre forskellige investeringsprogrammer. Sådan at man, så at sige, kan kortlægge energipolitikens teknologiske og samfundsøkonomiske råderum.

Databasen i forening med et sådant programsystem kan tjene til at besvare spørgsmål om, hvad de forskellige miljømæssige og økonomiske konsekvenser af at følge forskellige teknologiske udviklingsstrategier vil være. Og, når en bestemt strategi er valgt, vil systemet, når databasen derefter løbende opdateres efterhånden som udviklingen skrider frem, kunne tjene til overvågning af den faktiske udvikling,

og dermed tilvejebringe et informationsgrundlag for den løbende revision af den energipolitiske planlægning. En revision, der også kan blive aktuel, når nye teknologier kommer på markedet, eller hvis de økonomiske planlægningsforudsætninger ikke længere holder.

Der kan således etableres et informationssystem, der kan tjene som et redskab for den politiske planlægning. Et informationssystem, der kan levere konsistent, veldokumenteret information til befolkningen og dens politiske repræsentanter om de teknologiske udviklingsmuligheder, der tegner sig i praksis, og om grundlaget for valget af en bestemt politisk planlægningsstrategi. Og som med minimale omkostninger løbende kan uddrage den for opfølgning og revision af den valgte strategi nødvendige information af de store datamængder, der findes i databasen, i en form, der gør denne information tilgængelig for befolkningen og dens politiske beslutningstagere.

I princippet er der tale om et offentligt databasebaseret informationssystem af samme art som de informationssystemer, større private virksomheder anvender i deres strategiske planlægning, fordi ingen større virksomhed i nutidens informationssamfund kan afsætte ressourcer til en ad hoc planlægning, hver gang dens ressourcemæssige og økonomiske vilkår skal revideres.

En prototype af et sådant energi-informationssystem er blevet udarbejdet i form af SESAM-modellen, The Sustainable Energy Systems Analysis Model. SESAM blev udviklet i 1990'erne og er blevet anvendt i en række lokale, regionale og nationale energiplanlægnings- og uddannelsesprojekter i Danmark, Tjekkiet, Tyskland, de baltiske lande og Slovenien, gennemført med økonomisk støtte fra Energistyrelsen, Miljøstyrelsen, Nordisk Ministerråd og EU-kommissionen. En multi-national SESAM-model af det nordiske energisystem (Norge, Sverige, Finland og Danmark) er for tiden under indkøring.

I denne rapport beskrives SESAM-modellens metodiske grundlag og indhold og der fremlægges en serie af scenarie-beregninger, der kan tjene til at belyse nogle karakteristisk forskellige fremtidige udviklingsmuligheder indenfor det teknologiske råderum, der i dag tegner sig for den energipolitiske planlægning. Rapporten demonstrerer således, hvordan et nationalt eller multi-nationalt energiinformationssystem kan bidrage til informationsgrundlaget for den energipolitiske planlægning.

Jeg tror, at metoden er relevant med hensyn til at opnå indsigt i de fremtidige teknologiske udviklingsmuligheder og de forventelige samfundsøkonomiske konsekvenser af at følge forskellige udviklingsstrategier. Og jeg tror, at der af de her fremlagte beregningsresultater kan udledes noget, som er af væsentlig betydning for den energipolitiske diskussion. Men jeg tror ikke, at der med de ressourcer, der har kunnet afsættes til denne udredning, er tilvejebragt resultater, der ikke kan forbedres ved en nøjere revision af databasens indhold. Og jeg forestiller mig ikke, at mulighederne for udvikling af et formålstjenligt energi-informationssystem er udtømt med SESAM-modellen.

Det er således mit håb, at denne rapport kan befordre en saglig diskussion af de konkrete forhold, den beskriver.

Spørgsmålet om, hvorvidt SESAM sammenlignet med andre analytiske modeller udgør et mere eller mindre adækvat metodisk grundlag for energisystemanalyser, der kan bidrage til at frembringe et konsistent grundlag for energipolitiske beslutninger, må naturligvis stilles. Dette spørgsmål må besvares ved at sammenholde beskrivelser af andre modeller med den i kapitel 4 (afsnit 4.1 og 4.2) og i kapitlerne 6 og 7 givne koncise beskrivelse af en SESAM-models afbildning af energisystemet, datagrundlaget for denne afbildning og den dokumenterede information, der kan udledes af en sådan repræsentation af energisystemet. En anden analytisk model, der på et andet metodisk grundlag kan frembringe et yderligere udbygget, dokumenteret informationsgrundlag, må naturligvis foretrækkes frem for SESAM. Energistyrelsen, el-selskaberne og andre anvender andre analytiske modeller. Der er imidlertid ikke i nærværende udredning foretaget en sammenligning af SESAM med andre analytiske modeller.

November 2004
Klaus Illum

1. Indledning

Det drejer sig om at konstruere nye energisystemer, der kan tilvejebringe et bæredygtigt grundlag for videreførelsen af et velfærdssamfund. Det betyder, at forbruget af fossile brændsler skal nedtrappes så hurtigt, at forsyningssikkerheden kan opretholdes, og at CO₂-udslippet reduceres i en sådan takt, at Danmark opfylder sin andel af den globale CO₂-reduktion, der er nødvendig for at begrænse klimaændringerne.

Vores nuværende energisystem, der har udviklet sig under de vilkår, at fossile brændsler har været billige og til rådighed i ubegrænsede mængder, og hvor det deraf affødte klimaproblem ikke har været taget i agt, har sine særegne kendetegn, der også afspejler sig i opfattelsen af betydningen af ordet "energi". Den teknologiske omstilling til nye energisystemer med andre egenskaber indebærer en revision af opfattelsen af energisystemet som et system opdelt i sektorer, der statistisk og analytisk kan behandles hvert for sig. Der bliver nu tale om et i alle henseender integreret system, hvori de til rådighed værende ressourcer skal udnyttes effektivt i mangfoldige samspil mellem systemets forskellige delsystemer.

Der er intet erfaringsgrundlag for konstruktionen af sådanne energisystemer, baseret på nutidens teknologier. En hensigtsmæssig sammensætning og dimensionering må udledes af resultaterne af computer-beregninger af en række alternative løsningsmuligheder. Og da der er tale om et projekt, der vil forløbe over flere årtier, skal konstruktionstegningerne løbende revideres, efterhånden som projektet skrider frem, og nye vilkår og muligheder viser sig.

Om en sådan konstruktiv tilgang til udviklingen af fremtidens energisystemer kan vinde politisk tilslutning, er et spørgsmål, som ikke søges besvaret i denne rapport. Men det påpeges, at en konstruktiv planlægning ikke falder i tråd med indførelsen af energimarkeder.

I de tre årtier, der er forløbet siden oliekriserne 1974 - 80, har en række analyser og officielle energiplaner belyst nogle teknologiske udviklingsmuligheder, og udviklingen af det danske energisystem med vindkraft, decentrale kraftvarmeværker, store biogasanlæg og energibesparende foranstaltninger er på den baggrund sket i henhold til en politisk energiplanlægning. Indførelsen af de liberaliserede energimarkeder har imidlertid afgørende ændret vilkårene for den energipolitiske planlægning. Samtidigt er forsyningssikkerhed og klimaforandringer blevet stadigt mere påtrængende problemer. Hvis forbruget af olie og gas ikke nedbringes, er forsyningssikkerheden truet indenfor et kortere åremål, og det bliver stadigt mere vanskeligt at opnå en betydelig nedbringelse af CO₂ -udslippet.

Vi kører på autopilot, politisk og økonomisk. De fleste tager for givet, at den hidtidige verdensorden vil fortsætte. Det vil den ikke. Vi befinder os i ikke-kortlagt farvand.

Jørgen Ørstrøm Møller

Danmarks ambassadør i Singapore, Brunei, Australien og New Zealand

I et interview med dagbladet Information d. 2.-3. oktober 2004

Denne udtalelse refererer ikke til den globale energisituation, men den gælder også i den henseende. Vi lever i et verdenssamfund, hvis teknologiske udvikling i den sidste halvdel af det 19. århundrede, i alle henseender hvad angår byernes vækst, industri- og landbrugsproduktionen, transportinfrastrukturer og den fly- og skibstransport, der betinger internationaliseringen af verdenshandelen, har været betinget af adgangen til billige fossile brændsler - først og fremmest olie - i ubegrænsede mængder. Denne udvikling vil ikke fortsætte. Hvad der kommer til at ske i de kommende årtier, er på den ene side bestemt af og bestemmende for den politiske og økonomiske udvikling, som Jørgen Ørstrøm Møller beskæftiger sig med. På den anden side beror den på indsigt i de teknologiske muligheder for at udvikle nye energisystemer, der i langt mindre grad drives af fossile brændsler, og af de politiske og/eller markedsøkonomiske vilkår for at udnytte disse muligheder.

Det er uvist, i hvilket omfang en målrettet udvikling af det danske energisystem i de kommende år vil kunne gennemføres i henhold til en sammenfattende energipolitisk planlægning. Men kortlægningen af farvandet - som i denne rapport kaldes "Energipolitikens strategiske råderum" - er en nødvendig om end ikke tilstrækkelig forudsætning for en sådan planlægning.

I kapitel 2 diskuteres de overordnede ressourceøkonomiske og politiske vilkår for den energipolitiske planlægning indenfor rammerne af EU's energimarkedsdirektiver, og det påpeges, at opfattelsen af "energi" som varer, der skal handles på kommercielle markeder, har sin oprindelse i den historisk korte periode, hvor "energi" stort set har været et synonym for fossile brændsler.

Uanset de begrænsninger og muligheder disse vilkår udstikker for den strategiske planlægning, må beslutningsgrundlaget for en sammenfattende planlægning bero på konsistente analyser af de teknologiske udviklingsmuligheder, der tegner sig, og på sammenlignende samfundsøkonomiske vurderinger af de omkostninger, der under forskellige antagelser om fremtidige brændselspriser kan forventes som konsekvenser af valg blandt alternative strategier. Sådanne analyser må foretages ved hjælp af computer-modeller af det samlede energisystem. I kapitel 3 beskrives den kategoriske forskel mellem på den ene side den kategori - *teoretiske prognosemodeller* - som prognoser baseret på makroøkonomiske teorier udspringer af og på den ene side den modelkategori - *analytiske modeller* - hvortil hører den SESAM-model af det danske energisystem, denne rapports beregningsresultater er baserede på.

En kvalificeret diskussion af de beregningsresultater, der udspringer af en kompleks computer-model, forudsætter ikke kun en præcis afgrænsning og beskrivelse af det system, modellen repræsenterer, men også en fælles forståelse af betydningen af de termer, der bruges i beskrivelsen af systemets funktionelle egenskaber. Kapitel 4 tjener til at opfylde denne forudsætning ved at beskrive den klasse af energisystemer,

SESAM-modellen dækker, og diskutere de intuitive opfattelser eller begreber, de i den almindelige energi-diskussion anvendte termer dækker over.

Energisystemets geografiske afgrænsning betinger en afgørende forudsætning for relevansen af beregningsresultaterne hvad angår den nedtrapning af det fossile brændselsforbrug, der er bestemmende for forsyningssikkerhed og CO₂-udslip. Denne forudsætning diskuteres i kapitel 5.

I kapitel 6 gives en summarisk beskrivelse af SESAM-modellers databaser samt af de til en database hørende beregnings- og dokumentationsprogrammer. Denne beskrivelse er langt fra udtømmende. Den tjener kun til at give et første indblik i modellens opbygning og funktioner. Tilsvarende gælder det for den i kapitel 7 givne oversigt over databasens indhold, at den langt fra gør krav på en udtømmende beskrivelse.

Med kapitlerne 2 - 6 er grundlaget for fortolkningen og diskussionen af de i kapitel 7 fremlagte scenarie-beregningsresultater lagt. Beregningerne er baseret på det datagrundlag, der i dette projekt har kunnet frembringes ved en opdatering af en i 1998 udarbejdet SESAM-database for det danske energisystem. Hvad angår de data, som specificerer energisystemets nuværende tilstand, kan indholdet i denne database utvivlsomt forbedres ved en gennemgribende revision, men det vil næppe medføre betydelige ændringer af resultaterne. Tilføjelser af flere alternative specifikationer af mulige fremtidige ændringer af forsyningssystemets struktur kan derimod fremdrage udviklingsmuligheder, der ikke er indeholdt i det rum af fremtidige udviklingsmuligheder, databasens nuværende indhold repræsenterer.

SESAM multi-scenariedatabasen giver således mulighed for at inddrage mange andre mulige scenarier for den fremtidige udvikling i den energipolitiske diskussion.

2. Energipolitiske problemstillinger

Det er et centralt energipolitisk anliggende at sørge for landets forsyningssikkerhed. Forsyningssikkerheden er ikke kun et spørgsmål om energisystemets tekniske robusthed. Det drejer sig først og fremmest om at sikre den for samfundets økonomi og primære funktioner nødvendige forsyning med fossile brændsler til priser, der ikke er så høje, at de skaber økonomisk recession. Den globale forsyningssituation udvikler sig imidlertid, sådan at forsyningssikkerhed i denne henseende kun vil kunne opnås ved en nedtrapning af behovet for fossile brændsler, først og fremmest olie. Efter at have opbygget et energisystem, der i alle henseender er baseret på fossile brændsler, må vi derfor nu forholde os til udviklingen i en fremtid, hvor forbruget af fossile brændsler skal nedtrappes - både af hensyn til forsyningssikkerheden og af hensyn til vores forpligtelser, hvad angår begrænsning af klimaændringerne. To endemål, der er indbyrdes kompatible.

I denne situation skal de omkostninger, der er forbundet med foranstaltninger til nedbringelse af brændselsforbrug og CO₂-udslip, ikke betragtes som samfundsøkonomiske meromkostninger. De skal derimod sammenholdes med de omkostninger, samfundsøkonomien kan forventes at blive belastet med, hvis sådanne foranstaltninger ikke gennemføres.

Den energipolitiske diskussion føres indenfor en begrebs- og forståelsesramme - hvortil hører et problematisk, abstrakt energibegreb - som tilhører de fossile brændsels æra. Det er en nødvendig betingelse for en rationel, målrettet energipolitisk diskussion, at denne begrebs- og forståelsesramme revideres, så vejen til nye teknologiske infrastrukturer ikke blokeres af de særlige tankegange, der hidtil har behersket diskussionen.

2.1 Nye ressourceøkonomiske vilkår

Det nuværende danske energisystem såvel som de andre industrialiserede landes energisystemer er blevet til under de historisk særegne ressourceøkonomiske betingelser, der var gældende i den sidste halvdel af det 20. århundrede. Priserne på fossile brændsler (korrigeret for inflation) var gennemgående aftagende, indtil OPEC-landenes politisk bestemte produktionsbegrænsninger i en kortvarig periode fra 1974 - 81 bragte råolieprisen op på næsten det dobbelte af 1950-niveauet. Efter ophøret af disse begrænsninger faldt prisen igen, så den allerede i 1985 igen var under 1950-niveauet. Derefter var råolieprisen igen gennemgående faldende frem til århundredeskiftet. For naturgas og kul er prisudviklingen sket i takt med råolieprisudviklingen, dog med mindre udsving i kulprisen.

Forudsætningen for denne prisudvikling var en voldsom vækst i verdens oliereserver i perioden 1950 - 1980, hvor der blev fundet store, forholdsvist lettilgængelige oliereserver udenfor USA - først og fremmest i Mellemøsten, Nordsøen og Sydamerika. Det stadigt voksende globale olieforbrug har således kunnet dækkes af relativt billig råolie, selvom produktionen i USA, som førhen var verdens største olieproducent, har været faldende siden 1970.

Under disse historisk særegne vilkår har energisystemet, inklusive transportmidler, og de dertil hørende fysiske infrastrukturer - bygninger med energiforbrugende inventar; byernes geografiske strukturer, veje, motorveje, broer, lufthavne; samt industri- og landbrugsproduktionen - udviklet sig til det nuværende system, der, bortset fra mindre bidrag fra vindmøller og biobrændsler, teknisk er baseret på fossile brændsler, og økonomisk har haft lave fossile brændselspriser som forudsætning for såvel offentlige som private investeringsbeslutninger.

I 1990'erne har olieforbruget imidlertid været ca. 3 gange større end den reservetilgang, der er opnået ved fund af nye oliefelter. De globale reserver - opgørelsen af hvilke er behæftet med en betydelig usikkerhed - har dog været nogenlunde konstante på ca. 1000 mia. tønder i 1990'erne (heraf ca. 685 i Mellemøsten), fordi de beregnede reserver i eksisterende felter er blevet opjusterede, i nogle tilfælde på grund af forbedrede - og dyrere - udvindingsteknologier. De opgjorte reserver er imidlertid ikke et udtryk for produktionskapaciteten, bl.a. fordi en del af reservetilvæksten er sket i oliefelter, hvorfra produktionen er faldende, og således kun bremser produktionsfaldet i disse felter. Ca. 40% af den nuværende olieproduktion kommer nu fra disse felter med faldende produktion. Det vendepunkt, hvor olieproduktionen ikke længere kan følge med væksten i efterspørgslen, som nu er over 2% om året, ligger derfor indenfor en energiplanlægningshorisont på 20 år - måske nås det allerede om få år¹.

Priserne på fossile brændsler har aldrig været bestemt af produktionsomkostningerne, som for olie varierer fra et par dollar per tønde i de store felter i Mellemøsten til mere end 15 dollar per tønde i felter på store havdybder. Prisen har altid været reguleret af udbud og efterspørgsel. I USA blev olie-udbuddet før produktionen toppede i 1970 reguleret af The Texas Railway Commission², og siden 1970'erne har OPEC reguleret udbuddet i forhold til efterspørgslen, i de senere år sådan at OPEC tilstræbte en råoliepris på 23 - 28 dollar per tønde, idet Saudi Arabien har haft reservekapacitet til at spille den afgørende rolle som "swing producer".

Med den nuværende stigning i det globale olieforbrug på mere end 2% om året stiller det imidlertid meget store investeringskrav til de nationale og private olieselskaber fortsat at opretholde en reservekapacitet, der er tilstrækkelig til at regulere produktionen opad i takt med den stigende efterspørgsel. Når det af geologiske, tekniske og økonomiske grunde, og fordi de største oliereserver findes i uroplagede lande, ikke længere lader sig gøre, vil olieprisen være bestemt af forholdet mellem udbud og efterspørgsel. Hvilket betyder, at prisen bliver så høj, at de mindre bemedlede må sænke deres efterspørgsel så meget, at den samlede efterspørgslen balancerer med udbuddet.

¹ På grundlag af data fra det Saudi Arabiske olieselskab Aramco's website og det Internationale Energi Agentur IEA's Monthly Report august 2004 forudsiger en analytiker indenfor olieindustrien, at Saudi Arabiens olieproduktion vil toppe i indeværende år (2004). ASPO Newsletter October 2004: www.asponews.org

² Se den af Teknologirådet og IDA publicerede udredning: *Oil-based Technology and Economy - Prospects for the Future*, april 2004, section 6.3.

Olieforbruget i de industrialiserede lande - OECD landene og de tidligere Comecon lande, med et samlet befolkningstal på ca. 1.5 mia. - udgør ca. 65% af det nuværende globale forbrug. Når produktionen begynder at falde, vil disse lande, heriblandt Danmark, derfor blive nødsaget til at nedtrappe deres olieforbrug, hvis ikke de nye industrilande og udviklingslandene - herunder Kina og Indien - med en befolkning på flere end 5 mia. og med en hurtigere stigning i deres olieforbrug end i de industrialiserede lande skal nedbringe deres forbrug så meget, at deres økonomier bryder sammen.

Da naturgas- og kulpriserne vil stige i takt med råolieprisen, bliver de ressourceøkonomiske betingelser for Danmarks fremtidige forsyningssikkerhed således fundamentalt ændrede, når produktionen af råolie ikke længere kan reguleres, sådan at udbud og efterspørgsel er i balance, men en stagnerende og efterhånden faldende produktion tvinger efterspørgslen ned i kraft af en stigende råoliepris. Problemet er, at brændselspriserne kan forblive lave lige indtil det tidspunkt, hvor produktionen ikke længere kan øges i takt med efterspørgslen, sådan at en fortsat forbrugsstigning gør samfundet stadigt mere afhængig af fossile brændsler - indtil forsyningen svigter. At den teknologiske udvikling således fortsat underminerer sit ressourcegrundlag.

Under disse omstændigheder kan forsyningssikkerheden kun opretholdes ved at iværksætte en ombygning af vores energisystem, sådan at forbruget af fossile brændsler nedtrappes ved målrettede og indbyrdes koordinerede investeringer, der vedvarende formindsker vores afhængighed af fossile brændsler - i stedet for at afvente det tidspunkt, hvor høje brændselspriser tvinger forbruget ned.

2.2 Energimarkederne

EU-direktiverne om indførelse af liberaliserede energimarkeder bygger på den præmis, at energi i forskellige former kan betragtes som varer, der ligesom andre varer skal produceres af private producenter, og at konkurrencen mellem disse producenter skal sikres, ved at transmissions- og distributionselskaber (naturlige monopoler) giver forbrugernes adgang til at vælge deres leverandør. På den måde antages det, at forbrugerne til enhver tid vil kunne skaffe sig de billigste leverancer, og at der således vil ske en samfundsøkonomisk optimering. Energimarkedet opfattes således som markeder af samme art som f.eks. telekommunikationsmarkedet.

2.2.1 El-markedet

Tele-markedet og el-markedet har det til fælles, at de begge leverer immaterielle ydelser, tele-markedet i form af elektriske og elektromagnetiske impulser, el-markedet i form af et elektrisk potentiale, en spændingsforskel mellem faseledninger og jorden, som tilvejebringer elektrisk kraft fra alle elektriske kontakter. Endvidere er de to markeder gensidigt afhængige: telekommunikation kræver elektrisk kraft, og styring og regulering af el-produktionen kræver telekommunikation.

Der er imidlertid fundamentale forskelle mellem telekommunikationsmarkedet og el-markedet. Indenfor telekommunikation er der, når netværkets kabler og

radiomaster er installeret, ikke meget store omkostninger forbundet med at forøge én leverandørs kapacitet, hvis en anden falder ud, og den enkelte leverandørs omkostninger og fortjeneste er ikke væsentligt afhængig af brændselspriser eller deraf afhængige priser på andre råvarer. Indenfor el-sektoren er der derimod store omkostninger forbundet med etablering og vedligeholdelse af ny produktionskapacitet, og for kraft- og kraftvarmeværkerne er produktionsomkostningerne først og fremmest bestemt af prisen på det eller de brændsler, værkerne kan fyre med. De dækningsbidrag, der i fremtiden kan opnås til forrentning og afskrivning af den investerede kapital og til fortjeneste, er således bestemt af de fremtidige brændselspriser, de varierende el-markedspriser og - for kraftvarmeværkerne - de indtægter, der kan indhentes ved salg af fjernvarme. Da der endvidere er tale om anlæg med lang opførelsestid og lang levetid, er der stor usikkerhed forbundet med vurderingen af de afkast, kapitalanbringelser i kraft- og kraftvarmeværker kan give. Som det har vist sig i Californien og New York, kan samfundet derfor løbe en alvorlig risiko ved at lade forsyningssikkerheden afhænge af de investeringer, private ikke-koncessionerede selskaber finder lukrative.

Det centrale i el-markedsproblematikken er dog, at den el-sektor, markedet omfatter, er en økonomisk fiktion. Den fysiske sammenkobling af el- og fjernvarmeproduktion i kraftvarmeværker betyder, at der ikke i vores nuværende energisystem i funktionel henseende kan udskilles en el-sektor fra en varmforsyningssektor. Og et fremtidigt energisystem, hvori de samlede kraftressourcer, der frembringes i kraft- og kraftvarmeværker, vindmøller og måske også solceller, skal udnyttes effektivt i samspil med fjernvarmeproduktion og produktion af brint til transportmidler, vil ikke kunne etableres ved gennemførelse af sektoropdelte investeringer. Der kan således ikke udskilles en el-sektor fra det samlede energisystem. Integrerede energisystemer kan ikke sektor-opdeles.

Handel med el betyder, at det er forbrugerne, der ud fra de enkelte el-producenters pristilbud bestemmer, hvor meget de enkelte værker skal producere på et givet tidspunkt. I et internationalt marked er det under de omstændigheder overordentligt vanskeligt at regulere el-produktionen i samspil med varmeproduktionen og brintproduktionen, sådan at energiressourcerne udnyttes effektivt under de stadigt af varmebehov og el-produktion i vindmøller og solceller bestemte varierende driftsforhold. Det kan betyde, at de store investeringer i vindmøller, solceller og elektrolyseanlæg, der foretages med det formål at formindske forbruget af fossile brændsler og dermed CO₂-udslippet, ikke bliver udnyttet effektivt, og at de samfundsøkonomiske omkostninger ved CO₂-reduktion derfor bliver unødigt store.

2.2.2 Naturgasmarkedet

Hvad angår forsyningen med naturgas, som i modsætning til elektrisk kraft er en kemisk substans, der i gasform transporteres i rørledningen og i flydende form i tankskibe, er der tale om et brændstof, som landets energiforsyning kan være afhængig af, men ikke om forsyningsanlæg, der i teknisk henseende er integreret i samfundets energiforsynings-infrastruktur. Naturgas kan derfor ligesom råolie handles på et særskilt marked. Så længe producenterne er i stand til at tilføre disse markeder naturgas og råolie i takt med efterspørgslen, og den nødvendige raffinaderi-kapacitet

er til rådighed, kan disse markeder fungere med de periodiske prisudsving, der sker, når produktionen af politiske eller andre grunde kommer ud af takt med efterspørgslen. Denne situation kan imidlertid kun opretholdes under to forudsætninger. Den ene er, at det er teknisk og økonomisk muligt at forøge produktionskapaciteten i eksisterende og nye naturgas- og oliefelter i takt med forbrugsstigningen. Den anden er, at de private og nationale olie- og gasselskaber i tide foretager de nødvendige investeringer i efterforskning og udvinding.

Hvor længe den første af disse to forudsætninger holder, er som nævnt ovenfor et spørgsmål om måske ét, måske to årtier - for naturgas noget længere, bl.a. afhængigt af udviklingen i den globale handel med flydende gas, især fra Mellemøsten til de østasiatiske lande og USA - og af udfaldet af konkurrencen mellem Europa og Fjernøsten om gasleverancer fra Sibirien.

Hvad angår den anden forudsætning fremgår det af den internationale finansverdens analyser af årsagerne til de kraftige råolieprisstigninger i denne sommer (2004), at det er den fremherskende opfattelse, at den væsentligste årsag - udover de risikopræmier, er betales på grund af forholdene i Mellemøsten - er, at reserveproduktionskapaciteten er opbrugt, sådan at produktionen er oppe på det eksisterende produktionsapparats maksimale niveau. Dette skyldes, at såvel private som nationale olieselskaber har været tilbageholdende med at foretage de for øgelse af produktionskapaciteten nødvendige investeringer. For de private selskaber formodes denne tilbageholdenhed at skyldes, at de hidtil har baseret deres rentabilitetskalkuler på relativt lave råoliepriser - under 20 USD per tønde - i de kommende år. For nogle af de nationale selskaber i Mellemøsten kan forklaringen være, at de har lagt mere langsigtede strategiske overvejelser til grund for deres investeringsplaner.

Det kan således konstateres, at de ressourcemæssige vilkår og de selskabsøkonomiske og politiske interesser, der gør sig gældende på olie- og naturgasmarkederne, ikke giver grundlag for forventninger om, at forsyningssikkerheden vil kunne opretholdes under en fortsat stigning i det globale forbrug på mere end 2% om året.

2.3 Energilpolitikens strategiske råderum - institutionelt og teknologisk

Afgrænsningen af energipolitikens strategiske råderum har to dimensioner: en institutionel og en teknologisk.

- Institutionelt er råderummet for statslig energipolitisk planlægning afgrænset til
- de investeringsprogrammer, der kan gennemføres i offentligt regi, eller som staten ved lovgivning kan pålægge ikke-offentlige energiforsyningsselskaber at gennemføre;
 - de investeringsprogrammer, staten kan sikre gennemført ved aftaler med ikke-offentlige forsyningsselskaber;
 - statens muligheder for at gennemføre lovgivning, som begrænser ikke-offentlige forsyningsselskabers muligheder for at foretage nærmere bestemte investeringer eller som pålægger dem at anvende eller ikke anvende bestemte brændsler;
 - statens muligheder for at indføre tekniske energieffektivitets-normer for bygninger, energiforbrugende udstyr og transportmidler;

- statens muligheder for ved økonomiske incitamenter i form af afgifter, afgiftsfritagelse og beskatningsregler at påvirke forbrugsmønstre og private selskabers investeringer;
- statens muligheder for at udlicitere retten til opførelse af energiforsyningsanlæg - typisk vindmølleparker - på bestemte arealer.

I 1970'erne og 1980'erne, hvor der ikke var planer om at overdrage el-, fjernvarme- og naturgasforsyningen fra non-profit andelsselskaber og offentlige selskaber til private selskaber, kunne staten i henhold til rammelove om elforsyning, varmeforsyning og naturgasforsyning styre investeringerne i energiforsyningsanlæg i henhold til overordnede energiplaner for landet som helhed. Privatiseringen af el- og gasforsyningen indenfor et liberaliseret europæisk energimarked har nu kraftigt indskrænket statens muligheder for at sikre en koordineret udvikling af de delsystemer og anlæg - inklusive transportmidler og transportanlæg - sådan at der fremkommer en samlet energisystem-infrastruktur, som opfylder fordringerne om forsyningssikkerhed og nedtrapning af CO₂-udslippet. Hvad angår planlægning og styring af udviklingen af energiforsyningssystemets teknologiske infrastruktur, er det energipolitiske råderum således blevet kraftigt indskrænket i den institutionelle dimension.

Teknologisk er det strategiske råderum bestemt af de tekniske muligheder, der med de nu og i fremtiden til rådighed værende teknologier er for at opbygge en energisystem-infrastruktur, der på en samfundsøkonomisk hensigtsmæssig måde - dvs. uden unødige omkostninger - opfylder fordringerne om forsyningssikkerhed og nedtrapning af CO₂-udslippet. Da disse muligheder afhænger af den fremtidige kvantitative udvikling i den energiforbrugende materielle omsætning - bestemt af vækst i opvarmede bygningsarealer, el-apparatbestande, industriel produktion af forskellig art, transportmængder, etc. - må analysen af det teknologiske råderum foretages under forskellige antagelser om den økonomiske vækst, der kommer til udtryk i disse kvantitative parametre.

Denne tekniske og samfundsøkonomiske analyse af forskellige udviklingstrajektorier (scenarier) indenfor det teknologiske råderum er emnet for de følgende kapitler. Det skal understreges, at der ikke på nogen måde er tale om forudsigelser af den fremtidige udvikling, end ikke om vurderinger af hvilke udviklingsforløb, der er mest sandsynlige. Der er kun tale om et bidrag til belysningen af det spektrum af mulige udviklingsforløb, som udgør det teknologiske råderum, indenfor hvilket politiske strategier kan tilrettelægges under de begrænsninger, det institutionelle råderum betinger.

I det omfang tilrettelæggelse og gennemførelse af en politisk ønskelig strategi indenfor det teknologiske råderum vanskelig gøres eller forhindres af det institutionelle råderums afgrænsninger, kan analysen bidrage til at fremdrage institutionelle uhensigtsmæssigheder.

2.4 Opfattelsen af energi som varer

I kapitel 4 nedenfor diskuteres det energi-begreb, der - ureflekteret - ligger bag brugen af ordet "energi" i den energipolitiske diskussion. Her skal det kun bemærkes, at den herskende opfattelse, der gemmer sig bag brugen af ordet "energi", er, at energi

ligesom penge er et værdimål for nogle ydelser - materielle eller immaterielle - af forskellig art. Ligesom den økonomiske værdi af en vare eller ydelse af en eller anden form angives ved dens pris i kroner, opgøres energiværdien af brændstof, elektricitet eller fjernvarme i Joule eller Watt-timer.³ Heri ligger en forjættende forenkling. Et energibalanceregnskab kan opstilles ligesom et penge-bogholderi, og alle kan være med i diskussionen af, hvordan man i fremtiden kan få det til at gå op. Derfor har det økonomiske fakultet fremfor det teknisk-naturvidenskabelige fakultet kunnet dominere udformningen af beslutningsgrundlaget for energipolitiske beslutninger, udfra den besnærende enkle betragtning at "energi" betegner varer, der ligesom alle andre varer skal udbydes på markedet.

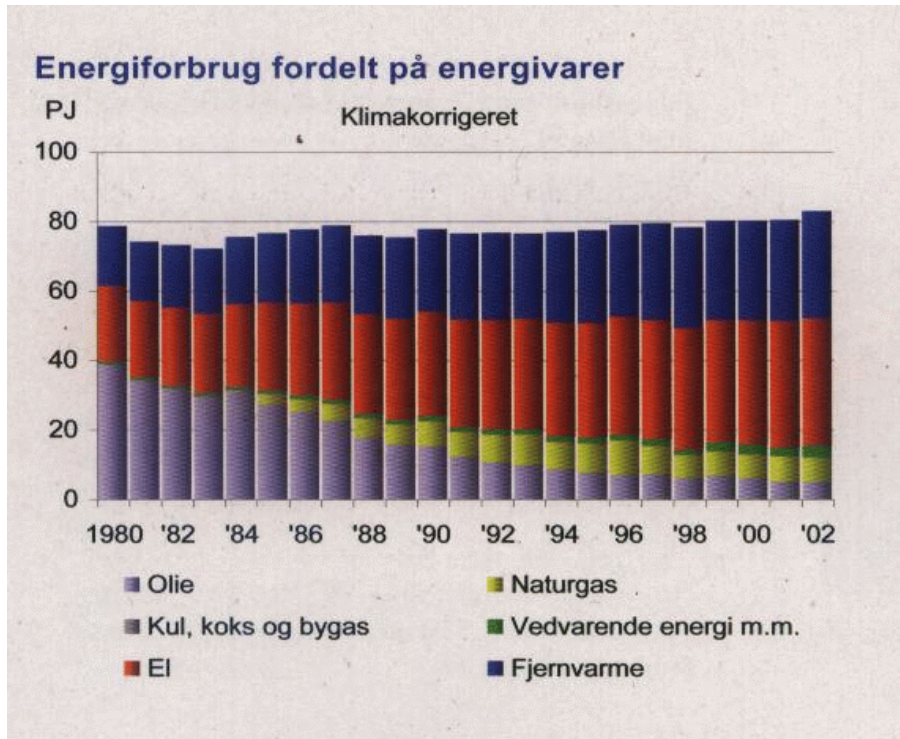
Som det fremgår af diskussionen i kapitel 4, er virkeligheden ikke så enkel, som denne betragtning lader formode. I virkeligheden indebærer opnåelsen af de energipolitiske endemålen overgang til nye energisystem-infrastrukturer, som ikke er slet så enkle som de, vi har kunnet klare os med, så længe billige fossile brændsler har været til rådighed i ubegrænsede mængder, og klimaproblemet ikke har været et centralt energipolitisk anliggende. I disse systemer kan man ikke på et rationelt grundlag opretholde den betragtning, at elektrisk og termisk energitransmission i almindelighed skal indgå som varer i det økonomiske regnskab.

Det er rimeligt, at el-forbrugerne betaler for deres el-forbrug, så i den forstand kan elektricitet betragtes som en vare. Men det forvrider selskabsøkonomien og dermed mulighederne for løbende at udnytte energiresourcerne på en effektiv måde, hvis lokale energiselskaber, der råder over vindmøller, kraftvarmeværker, varmepumpeanlæg og elektrolyseanlæg, ikke uden videre kan bruge det offentlige el-net til krafttransmission mellem deres forskellige enheder, men skal sælge el til én pris i den ene ende og købe den tilbage til en anden pris i den anden ende.

Økonomi i ordets oprindelige betydning angår ressource-husholdningen: en hensigtsmæssig anvendelse af den arbejdskraft med forskellige kvalifikationer og de naturressourcer, der er til rådighed, sådan at den måde ressourcerne anvendes på ikke underminerer produktionsgrundlaget, men at produktionsgrundlaget opretholdes og udbygges. I den klassiske græske tradition skelnes mellem "oikonomia" og "chrematistika" (chrema: penge), som udspringer af værdiansættelsen af ressourcer i talstørrelser: pengeværdier. Hvis markedet skal fungere på en økonomisk hensigtsmæssig måde, skal denne værdiansættelse afspejle de virkelige ressourceværdier. Som nævnt i afsnit 4.7 er det derfor uheldigt i den samfundsøkonomiske analyse at værdiansætte elektrisk transmitteret kraft fra vindmøller og solceller, som ikke indebærer et ressourceforbrug, på linie med brændselsforbrug, som udgør et forbrug af ikke-fornyelige ressourcer.

³ Der dog den forskel, at den økonomiske prisfastsættelse er bestemt af mange forskellige samfundsforhold, medens de tilskrevne energiværdier er fysiske størrelser, der kan måles ved hjælp af et kalorimeter. Som et særligt kuriosum skal det noteres, at det i mange skrifter anføres, at denne fysiske størrelse kan forekomme i forskellige kvaliteter. Man taler om energi af høj kvalitet og energi af lav kvalitet og måske noget derimellem. Svaret på spørgsmålet om, hvad det er for et stof, man således taler om, fortøner sig i det obskure, men har nok sin oprindelse i kalorieteori om varmens natur, der endegyldigt blev falcificeret for 150 år siden.

Endeligt skal det bemærkes, at opfattelsen af energi som varer, fører til i alle henseender irrelevante statistiske opgørelser. Et eksempel er vist i fig. 2.1.



Figur 2.1. Energiforbrug i handels- og serviceerhverv, Energistyrelsens Energistatistik 2002.

Forudsat at "Vedvarende energi m.m." betyder biomassebrændsler, evt. + affald, og brændselsforbrugene angiver forbrug til opvarmningsformål, er tallene hvert især relevante for belysningen af energiomsætningen i denne erhvervssektor. De ved søjlerne angivne summer er imidlertid i enhver henseende irrelevante størrelser: Summen siger intet om det ressourceforbrug, der medgår til sektorens drift, eller om nogen anden relevant størrelse. At kalde summen af disse inkommensurable størrelser for sektorens "energiforbrug" er vildledende.

3. Teoretiske prognosemodeller og analytiske modeller

Computer-modeller tjener til at besvare spørgsmål, der ikke kan besvares ved nogle få simple manuelle beregninger. En computer-model repræsenterer således i almindelighed et sammensat system, hvis funktion er bestemt af relationerne mellem systemets forskellige komponenter. Når der er tale om et nationalt, regionalt eller lokalt energisystem, er systemets funktion bestemt af mangfoldige relationer mellem de mange indbyrdes koblede komponenter, hvori energiomsætningen foregår. Og når der er tale om scenarier for systemets fremtidige udvikling, bliver relationerne mellem udviklingen i de kvantitative energiforbrugsparametre og de investeringer, der skal foretages i tekniske anlæg af forskellig art, af afgørende betydning.

Da en model tjener til at besvare spørgsmål, må de forskellige modeller kategoriseres i henhold til de kategorier af spørgsmål, de hver især besvarer. Modeller, som omhandler energisystemet, kan i den henseende opdeles i to hovedkategorier: teoretiske prognosemodeller og analytiske modeller.⁴

Relevansen af en teoretisk prognosemodel såvel som relevansen af en analytisk model er betinget af, at modellen uden stort besvær muliggør beregninger af mange kvantitativt og kvalitativt forskellige scenarier for energisystemets fremtidige udvikling, sådan at der kan foretages systematiske sammenlignende analyser og følsomhedsanalyser. De sammenlignende analyser tjener til kortlægningen af det energipolitiske råderum. Følsomhedsanalyser tjener til at vise, hvordan ændringer af de gjorte forudsætninger påvirker beregningsresultaterne, og dermed dels til at belyse, hvilke forudsætninger, det er vigtigst at opfylde, dels til at verificere modellen ved at påvise, at den reagerer begribeligt på ændringer af beregningsforudsætningerne.

3.1 Teoretiske prognosemodeller

En *teoretisk prognosemodel*, tjener til at besvare spørgsmål om, hvad der vil ske under givne økonomiske omstændigheder:

- Hvordan vil energiforbruget og energiforsyningen udvikle sig, og hvad vil konsekvenserne mht. forbruget af fossile brændsler, CO₂-udslip og samfundsøkonomiske omkostninger blive ?

hvis

- de økonomiske vækstparametre, herunder brændselspriserne, udvikler sig sådan som prognosticeret ved hjælp af en makroøkonomisk model, og
- der med skatter og afgifter foretages reguleringer af markedsaktørernes præferencer, og

⁴ I den konventionelle model-diskussion skelnes mellem “top-down” og “bottom-up” modeller, som om der er tale om to forskellige metoder til besvarelse af de samme spørgsmål, hvilket ikke er tilfældet. Teoretiske prognosemodeller må nødvendigvis beskrive systemet “top-down”, fordi deres teoretiske ligningssystemer kun kan udtrykke abstrakte relationer. Analytiske modeller, som tjener til besvarelse af andre spørgsmål, må nødvendigvis beskrive systemet “bottom-up” i den forstand, at der er tale om beskrivelse af konkrete fysiske egenskaber og relationer. “Bottom-up” betyder imidlertid ikke, at man under alle omstændigheder skal gå helt til bunds i alle detaljer. Der kan være tale om mere eller mindre aggregerede modeller. Så betegnelsen “bottom-up” er dårlig.

- der forudsættes en given udvikling af nogle abstrakte teknologiske udviklingsparametre, som typisk udtrykker forbedringer af “energieffektiviteten” indenfor de forskellige økonomiske sektorer.

De svar, der gives, er bestemt af (a) de teoretiske relationer mellem de mange forskellige økonomiske faktorer, der udtrykkes i modellens ligninger, og (b) de på grundlag af historiske data empirisk bestemte værdier af de parametre, der indgår i disse ligninger. Svarene er således kun gyldige, hvis (a) *modellen er komplet*, dvs. at dens ligninger udtrykker alle de relationer, som har væsentlig betydning for samfundets økonomiske udvikling, og (b) *modellen er valid* indenfor den klasse af mulige fremtidige systemer, den dækker - dvs. at dens ligninger og værdierne af de deri indgående parametre udtrykker generelt gyldige relationer, som også vil være gældende under de i fremtiden ændrede teknologiske og ressourceøkonomiske omstændigheder.

En forudsætning for, at en teoretisk prognosemodel kan bidrage til et realistisk energipolitisk beslutningsgrundlag ved at forudsige, hvordan forskellige regulerende indgreb i markedsøkonomien vil kunne påvirke et af markedet bestemt udviklingsforløb, er således, at modellen er komplet og valid. Om dette er tilfældet kan kun fremtiden vise, fordi validiteten til enhver tid kun kan bedømmes ved at sammenholde prognosen med den faktiske udvikling.

Ligesom en analytisk model inddrager en teoretisk prognosemodel ikke de institutionelle organisatoriske forhold, der betinger energisystemets udvikling. En teoretisk prognosemodel baseret på en makroøkonomisk ligevægtsmodel forudsætter imidlertid i udgangspunktet, at det til enhver tid gælder, at “økonomien, herunder produktionen og konverteringen af energi, er effektiv”⁵, dvs. at markedet sikrer, at den økonomiske ligevægt opnås ved en under de givne økonomiske vilkår optimal anvendelse af samfundets ressourcer. Ifølge denne teori “vil CO₂-reduktion altid være forbundet med tab af produktion.”⁶, fordi ressourceforbruget i energisektoren forøges. Om teorien holder stik kan efterprøves ved med en analytisk model at undersøge, om der findes teknisk mulige forandringsforløb, der medfører en betydelig nedbringelse af CO₂-udslippet, og som ikke er forbundet med investeringer med en tilbagebetalingstid, der overstiger tilbagebetalingstiden for andre infrastrukturinvesteringer.

3.2 Analytiske modeller

En *analytisk model* tjener til at besvare spørgsmål angående de teknologiske muligheder, der tegner sig for at opnå bestemte energipolitiske mål:

- Hvilke resultater, hvad angår forbrug af fossile brændsler og CO₂-udslip, kan opnås?
? og

⁵ Frandsen, S.E, Hansen, J.V., Trier, P.: Modelberegninger af CO₂ reduktion. Samfundsøkonomen, 1996:6

⁶ Ibid.

- hvad kan de samfundsøkonomiske omkostninger (målt som udgifter til investeringer, drift og vedligeholdelse) forventes at blive under forskellige antagelser om brændselsprisudviklingen?

hvis det forudsættes,

- at de kvantitative forbrugsparametre (opvarmede bygningsarealer, el-apparatbestande, transportmængder, osv., samt forbrugeradfærd, hvad angår anvendelsen af disse energiforbrugende faciliteter) udvikler sig på en nøjere specificeret måde;
- at der på forbrugssiden gennemføres nøjere specificerede teknologiske forbedringer mht. energiforbrug (byggningsforbedringer, bedre el-apparater, mere energiøkonomiske transportmidler, osv.);
- at der foretages bestemte investeringer i energikildeanlæg (vindmøller, solenergianlæg, biomasse-fyrede anlæg, m.fl.); og
- at den teknologiske energiomsætnings-infrastruktur (som udgøres af samspillet mellem energiomsætningen i kraftværker, kraftvarmeværker med tilhørende varmepumpeanlæg, fjernvarmenet, individuelle opvarmnings- og kraftvarmeanlæg, elektrolyseanlæg, energilagring m.fl.) udvikles på en nøjere specificeret måde.

Der er således tale om spørgsmål, hvis besvarelse tjener til kortlægningen af energipolitikens teknologiske råderum. Ikke om at forudsige, hvad der under givne omstændigheder angående den institutionelle og økonomiske udvikling vil ske.

SESAM er en analytisk model. De i denne rapport fremlagte SESAM-beregningsresultater viser, at der findes teknisk mulige udviklingsforløb, der fremkommer ved investeringer, som resulterer i kraftige reduktioner af CO₂-udslippet, og som i kraft af formindskede udgifter til fossile brændsler tilbagebetales så hurtigt, at de samlede udgifter til energiforsyningen formindskes længe før investeringerne er afskrevet. Disse resultater modsiger således den teoretiske antagelse om, at "CO₂-reduktion altid vil være forbundet med tab af produktion".

3.3 Teknologisk fremsyn

Teknologisk fremsyn indebærer indsigt i nye teknologier, der vil kunne indgå i et nyt energisystem, og vurderinger af, hvornår nye teknologier kan forventes at blive markedsført. Hvor hurtigt teknologiudvikling frem til markedsføring finder sted, afhænger imidlertid af forventningerne til markedsudviklingen. Udviklingen af vindmølleindustrien og kraftvarme-industrien var ikke sket så hurtigt, hvis ikke den politiske energiplanlægning og den tilhørende økonomiske markedsregulering i slutningen af 1980'erne havde åbnet de nye markeder.

Som forudset allerede i 1980'erne, medførte udbygningen med vindmøller og kraftvarmeværker uden samtidige tiltag til en effektiv udnyttelse af den varierende ressourcetilførsel, der blev opnået ved denne udbygning, at der opstod et ressourceudnyttelsesproblem, som kaldes "el-overløb". Den lære, der heraf kan drages, er, at det teknologiske fremsyns søgelys først og fremmest skal rettes mod udviklingen af teknologiske infrastrukturer, hvori nye teknologier er integrerede på en sådan måde, at systemet som helhed kan udnytte de tilvejebragte ressourcer på en effektiv måde. Når der foreligger en energipolitisk strategi for den fremtidige

infrastrukturudvikling - billedligt talt et samlet puslespil af mange indbyrdes sammenhængende brikker - åbnes markederne for de industrier, der skal udvikle de enkelte brikker.

Danmark har et enestående datagrundlag for den fysiske infrastrukturplanlægning. Ved at samle de mange dataregistre i en database, der er struktureret i overensstemmelse med energisystemets geografiske og tekniske strukturer, og til denne database at knytte et system af scenarie-beregnings- og dokumentationsprogrammer, fremkommer en analytisk model, som kan tjene til at besvare spørgsmålet, hvad de forskellige miljømæssige og økonomiske konsekvenser af at følge forskellige teknologiske udviklingsstrategier vil være.

Når en bestemt udviklingsstrategi er valgt, og databasen derefter løbende opdateres, efterhånden som udviklingen skrider frem, kan en sådan model tjene til overvågning af den faktiske udvikling, og dermed tilvejebringe et informationsgrundlag for den løbende revision af planlægningen. En revision, der også kan blive aktuel, når nye teknologier kommer på markedet, eller hvis de økonomiske planlægningsforudsætninger ikke længere holder stik.

SESAM-modellen af det danske energisystem er en prototype af et sådant energi-informationssystem.

4. Energisystemet og dets terminologi

Energi handler om at opretholde uligevægtstilstande (temperaturforskelle, elektriske spændingsforskelle, kemiske potentialforskelle) i sammensatte strukturer.

Når man tænker over det, er det påfaldende, at alle taler om “energi” og “energiforsyning” og endda “energieffektivitet” og “energi-kvalitet” og sætter tal på det, disse ord betegner - selvom de færreste, hvis de blev spurgt derom, ville være i stand til at forklare, hvad “energi” egentlig er for noget, endsiges at definere “energi” i fysisk forstand. Det er endog kommet dertil, at man taler om “energisystemer”, der er opdelt i en el-sektor, en varmesektor og en transportsektor og lægger denne sektoropdeling til grund for statistiske opgørelser og systemanalyser - uden nøjere at overveje de begreber og opfattelser, der ligger bag disse opgørelser og analyser. Det burde mane til eftertanke, at ikke blot “energi”-debatten, men også professionelle analyser af forholdene på dette for samfundsøkonomien helt afgørende område bygger på intuitive begrebsdannelser, der ikke som på andre tekniske og videnskabelige områder gøres til genstand for stringente definitioner. I særdeleshed fordi det, når man skraber blot lidt ned under intuitionernes overflade, viser sig, at de ikke er grundfæstede.

Det er ikke fordi, det er særligt vanskeligt at forstå de begreber, der skal lægges til grund for en rationel beskrivelse og analyse af vores energisystemer. Tværtimod udspringer disse begreber af de iagttagelser, alle har gjort sig i dagligdagen, men måske ikke nøjere har overvejet - fordi tankegangener blevet indhyllet i de intuitioner, der er udsprunget af tilværelsen i et samfund, hvor “energi” har betydet fossile brændsler. Når det nu drejer sig om at undersøge, hvordan de fossile teknologier kan afløses af andre, er det selvfølgelig helt galt at basere analysen på de fossile intuitioner - nu må vi præcist definere betydningen af de ord vi bruger, sådan at vi gør os fri af de forestillinger, der binder os til den fossile forståelse af problemstillinger og muligheder.

Her er det bedst at tage udgangspunkt i beskrivelsen af energisystemet. Umiddelbart giver den ikke anledning til de store overraskelser, men den rummer dog nogle betragtninger, som bryder med den gængse måde at beskrive systemet på.

4.1 Energisystemet

Et analytisk udsagn om et system har kun mening, hvis systemet tilhører en veldefineret klasse af systemer. Økonomiske systemer repræsenteret ved makro-økonomiske modeller tilhører en anden klasse end fysiske systemer repræsenteret ved en model som SESAM. Modeller som indeholder såvel makro-økonomiske som tekniske relationer (som f.eks. TIMES-modellen) repræsenterer en tredje klasse af systemer. I analytisk forstand eksisterer et system således kun i kraft af beskrivelsen af den klasse af systemer, det tilhører. En generisk model er en model, der repræsenterer en klasse af systemer, idet ethvert system, der tilhører denne klasse, kan specificeres som et eksemplar af den generiske model. En generisk model implementeret i form af et computerprogram udgør således den formelle definition af

den klasse af systemer, som modellen repræsenterer. Følgelig har modellens beregningsresultater kun mening med reference til beskrivelsen af denne klasse af systemer og til den terminologi, der anvendes i denne beskrivelse.

SESAM repræsenterer en klasse af energisystemer, der består af tre delsystemer, se fig. A. På den ene side *forbrugssystemet*, som omfatter bygninger med deres el-forbrugende inventar og elektriske maskiner samt transportmidler. På den anden side systemet af *energikilder*, som omfatter kemiske energikilder (fossile brændsler og biomassebrændsler) og elektriske energikilder (vindmøller, solceller, vandkraftværker og i fremtiden måske også bølgeenergianlæg).

Energiomsætnings- og transmissionssystemet (EOTS) omfatter de anlæg, hvori kemisk energi og/eller elektrisk kraft fra energikilderne omsættes til elektrisk eller mekanisk kraft og/eller termisk energi (i kraft- og kraftvarmeværker, fjernvarmeværker, individuelle opvarmningsanlæg, motorer i transportmidler og i fremtiden måske elektrolyseanlæg); de anlæg, der tjener til energilagring (kemiske energilagre (brint) og termiske energilagre); og de anlæg, der tjener til transmission af elektrisk kraft og termisk energi (el-net og fjernvarmenet). Endvidere er termiske industrielle processer inkluderet i EOTS, fordi sådanne processer kan sammenkobles med el-producerende anlæg (industriel el-produktion) og/eller tilkobles fjernvarmenet, sådan at lav-temperatur varme fra processerne kan udnyttes i forbrugssystemet.

Den generelle tekniske sammensætning af de komponenter, der kan indgå i et SESAM-energisystems elektriske, elektrokemiske og termiske omsætning, er vist i fig. B.

Det skal bemærkes, at et energisystem indenfor den klasse af systemer, som denne beskrivelse dækker, kan være alt fra et simpelt system, der kun består af et hus med et oliefy, til et regionalt system, der f.eks. omfatter de nordiske lande, og hvori indgår anlæg af alle de i fig. B viste typer.

De kemiske og elektriske energikilder, som tilføres EOTS fra energikilderne, kan udnyttes i mange forskellige energiomsætningsanlæg overalt i landet. Lav-temperatur termisk energi fra kollektive, solfangeranlæg kan derimod kun anvendes i de anlæg (kraftvarmeværker og fjernvarmeværker med tilhørende fjernvarmenet), som solfangeranlæggene er tilsluttet. I systembeskrivelsen indgår kollektive solfangeranlæg derfor i EOTS, hvor de bidrager til at formindske brændselsforbruget og/eller el-forbruget til varmepumper i de værker, de er tilsluttet.

Tilsvarende indgår individuelle solfangere i forbrugssystemet, hvor de - på linie med solstråling gennem vinduer - tjener til at formindske varmetilførslen fra EOTS.

EOTS udgør et termodynamisk system, hvis effektivitet kan måles som forholdet mellem de termodynamiske potentialer, der tilføres forbrugssystemet fra EOTS, og de potentialer, der tilføres EOTS fra systemet af energikilder og kollektive solfangeranlæg. Nærmere herom i afsnit 4.9 nedenfor.

4.2 Lokale energisystemer

Begrebet "lokalt energisystem" stammer fra navnet på SESAM's forgænger *LOCUS: LOcal Cogeneration Utility Systems*, et computerprogram som blev udviklet i forbindelse med energiplanlægningsprojekter på Bornholm midt i 1980'erne⁷. Idéen var at opdele et regionalt energisystem i lokale systemer, der hver især regulerer energiomsætningen indenfor deres respektive områder, sådan at lokale ressourcer og produktionsanlæg udnyttes så effektivt som muligt. Dette betyder, at langdistance el-transmission begrænses til det nødvendige med henblik på at opnå en effektiv udnyttelse af ressourcer og produktionsanlæg i energisystemet som helhed. Dette princip er illustreret i fig. C. Den hensigtsmæssige geografiske afgrænsning af et lokalt energisystem er et organisatorisk såvel som et ressourcemæssigt anliggende. I 1990'erne blev der med SESAM gennemført analyser af udviklingsmuligheder i et system omfattende Nordjyllands amt og i et system omfattende 11 lokale energisystemer i den tjekkiske region Øst-Bøhmen⁸.

Det er evident, at dette decentrale princip for detailplanlægning og forvaltning i lokale energisystemer, som indgår som integrerede dele af et regionalt eller nationalt system, er i direkte modstrid med udvikling af et el-marked, der domineres af store nationale og multi-nationale el-selskaber.

4.3 Energi, tab og effektivitet

Fysikken beskæftiger sig ikke med, hvad der er nyttigt for mennesker, og derfor ikke med tab af energi. For et tab betyder, at noget, der har værdi for mennesker, går tabt. Energiens bevarelse indenfor et lukket system er derimod ét af den klassiske fysiks grundlæggende konservative principper, ved siden af principperne om massens bevarelse og den elektriske ladnings bevarelse.

Den klassiske (makroskopiske) termodynamik udgør imidlertid et særligt annekset til fysikkens hus. Fordi den udsprang af et genialt spørgsmål den franske militæringenør Sadi Carnot (1791 - 1831) stillede sig, og som var udgangspunktet for hans skelsættende bog: *Refleksioner over ildens bevægende kraft og de maskiner, som egner sig til at udnytte denne kraft* (*Réflexions sur la Puissance motrice de la Feu et les Machines propre a developper cette Puissance*. 1824). I den tid, hvor ingeniører kappedes om at få mest muligt arbejde (i fysisk forstand: $\text{kraft} \cdot \text{vej}$) ud af en ton kul, stillede han sig spørgsmålet om, hvor grænsen lå. Og - selvom han baserede sin teori på den siden falsificerede kalorieteori om varmens natur - udledte han den grundsætning, at den øvre grænse for det arbejde, en hvilken som helst dampmaskine kan få ud af en ton kul, er det arbejde, der ville kunne præsteres af en reversibel og

⁷ Klaus Illum: Lokale energisystemer i Åkirkeby kommune, 1986.

Klaus Illum: Lokale kraftvarmesystemer med vedvarende energi, 1987.

⁸ Klaus Illum: Bæredygtige Energisystemer. Brundtland-planlægning for Nordjylland amt, 1992.

Klaus Illum: Towards Sustainable Energy Systems in Europe. Regional Energy Planning in the Hradec Králové and Pardubice Regions, Eastern Bohemia, The Czech Republic, 1993.

dermed tabsfri maskine - hvis ensådan i praksis kunne konstrueres. At forøge engiven dampmaskines specifikke arbejdsydelse betyder således at formindske de tab af arbejdsydelsesevne, der sker i maskinen, bl.a. alle de steder, hvor der sker en varmeoverførsel mellem områder med en betydelig temperaturforskel.

Carnot's indførelse af den reversible maskine som termodynamikkens grundlæggende teoretiske redskab og identifikationen af tab i termodynamiske maskiner markerer én af videnskabens store milepæle, solidt plantet ved den vej, hvor ad teknologiudviklingen bevægede sig fremad for at opfylde menneskelige formål. En vej som førte helt andre steder hen end den mekaniske fysiks.

En historisk forklaring på, at det stadig er den Newton'ske mekanik fremfor den Carnot'ske termodynamik, børn lærer i skolerne (hvis de overhovedet lærer om disse ting), findes i følgende citat fra James Joule (1818 - 1889), hvori han angriber Carnot's teori, som blev videreført af bl.a. Emile Clapeyron (1799 - 1864):

I conceive that this theoryis opposed to the recognised principles of philosophy because it leads to the conclusion that vis viva (i.e. energy) may be destroyed by an improper disposition of the apparatus: thus Mr. Clapeyron draws the inference that 'the temperature of fire being from 1000 degrees to 2000 degrees higher than that of the boiler, there is an enormous loss of vis viva in the passage of heat from the furnace to the boiler'. Believing that the power to destroy belongs to the Creator alone I affirm ...that any theory which, when carried out, demands the annihilation of force, is necessarily erroneous.

Her citeret fra D.S.L. Cardwell: From Watt to Clausius - The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age. Cornell University Press, New York, 1971.

Det var, som bekendt, Joule der på grundlag af sine epokegørende eksperimenter, der viste "varmehedens mekaniske ækvivalens" (som det vist stadig hedder i skolen), nåede frem til det konservative princip om energiens bevarelse i et lukket system. Det forekommer imidlertid overraskende, at han påkaldte sig Skaberen selv, for at forsvare sin erkendelse overfor Carnot's og Clapeyron's erkendelse af de tab, der sker i termodynamiske maskiner. For uden det religiøse argument, er der ikke andet tilbage end at konstatere, at Joule og Carnot/Clapeyron bruger ordene "vis viva"/"energi" i to forskellige betydninger. Joule bruger ordet "energi" i en ny betydning, nemlig som betegnelse for 'noget', som bevares: det konservative princip, medens Carnot og Clapeyron bruger det i dets oprindelige betydning: evnen til at præstere et fysisk arbejde.

Ordet "energi" har sin etymologiske oprindelse i det indo-europæiske ord "uergon", som i moderne europæiske sprog - som man kan høre - er blevet til "work", "werk", "værk". Det betyder "arbejde". På græsk blev det til "energon" - "energi" - som betyder iboende evne til at præstere et arbejde. Og den betydning har ordet jo stadig i vores almindelige dagligsprog: at have energi til noget, at være energisk. Og det er velkendt, at energien fortabes, hvis den ikke til stadighed fornyes.

Hvis man anbringer et fuldt opladet akkumulator-batteri i en lukket, isoleret beholder og slutter en kontakt, der kortslutter batteriet, er det klart, dets evne til at

præstere et arbejde - d.e. dets energi i den oprindelige forstand - er gået tabt. Men det er også rigtigt, at dette lukkede systems energi i den Joule'ske betydning er uændret⁹. Så problemet er kun, at Joule brugte ordet "energi" i en ny betydning og dermed skabte blivende forvirring i den almindelige diskurs.

I erkendelse af, at den nye betydning, Joule tillagde ordet "energi", havde slået rod i det almene uddannelsessystem, indførte den tyske termodynamiker Z. Rant i 1951 ordet "exergi", som betegnelse for det, "energi" oprindeligt betød - og stadig i dagligsproget betyder - nemlig arbejdsydelsesevne.

Det tankevækkende er nu, at den moderne skolastiske indoktrinering er så stærk, at de fleste tror, at de forstår betydningen af et så abstrakt begreb som det Joule'ske energi-begreb, men finder exergi-begrebet svært at begribe. Når man betænker, at definitionen af "energi" i Joule'sk forstand beror på det aksiom, at

det arbejde et system udveksler med omverdenen, når det gennemløber en adiabatisk¹⁰ termodynamisk proces fra én tilstand X_1 til en anden tilstand X_2 , kun afhænger af X_1 og X_2 - dvs. er uafhængigt af den "vej" processen følger¹¹, skulle man tro, at de fleste ville erkende, at de ikke aner, hvad der er tale om. Ikke desto mindre er det exergi-begrebet, de fleste opfatter som vanskeligt at begribe, skønt det rummer, hvad mennesket langt tilbage i historien har erfaret i deres dagligdag - nemlig arbejdsydelsesevne i forskellige former, som uafvendeligt og ustandseligt går tabt i alverdens processer.

⁹ Energiøkonomisk svarer el-varme til, at man kortslutter en akkumulator i sin dagligstue for at holde varmen eller bruger et elektrisk piskeris til at røre rundt i en varmtvandsbeholder for at få varmt vand.

¹⁰ En adiabatisk proces er en proces, hvorunder den eneste mulige form for vekselvirkning mellem systemet og dets omverden er arbejde (der kan repræsenteres ved, at et lod løftes eller sænkes i tyngdefeltet) - der kan ikke ske vekselvirkninger i form af varmeveksling eller stråling.

¹¹ På grundlag af dette aksiom defineres systemets termodynamiske tilstandsfunktion *energi*: ændringen af energi-funktionen, når systemet gennemløber en adiabatisk proces fra tilstanden X_1 til tilstanden X_2 , er det arbejde (positivt eller negativt), der under processen udveksles med systemets omverden. Heraf følger umiddelbart termodynamikkens 1. hovedsætning: I et lukket system - d.e. et system, der ikke på nogen måde kan vekselvirke med dets omverden - er værdien af tilstandsfunktionen *energi* konstant.

I modsætning til 1. hovedsætning udtrykker termodynamikkens 2. hovedsætning noget velkendt, nemlig at et lukket system fra en vilkårlig tilstand kan (vil) gennemløbe en proces, der bringer systemet i en stabil (dvs. død) tilstand, hvorfra det ikke af egen kraft kan ændre dets tilstand. Det betyder, at hvis man isolerer et system, der befinder sig i en ikke-stabil tilstand, f.eks. en plante, en mus og et stykke ost, i en fuldstændigt isoleret kasse, og således afskærer det fra enhver vekselvirkning med omverdenen, så vil systemet ende i en stabil tilstand, dvs. afgå ved døden og blive til en ustruktureret samling af molekyler.

Hvad angår energisystemer som de i fig. A og B viste, handler termodynamikken om, hvordan der ved stadig styring af termodynamiske processer i anlæg, der vekselvirker med deres omverden, kan opretholdes ikke-stabile tilstande.

Et systems henfald mod dets stabile (døde) tilstand kommer kvantitativt til udtryk ved den voksende værdi af den termodynamiske tilstandsfunktion entropi.

Hvis Joule havde brugt et andet ord - f.eks. "exergi" - som betegnelse for det konservative princip og ladet ordet "energi" beholde sin oprindelige, intuitivt forståelige betydning, ville menneskeheden ikke være blevet kastet ud i denne begrebsforvirring.

Dette er ikke et epistemologisk skoleridt, der kun har akademisk interesse. Begrebsforvirringen har væsentlige og meget uheldige praktiske konsekvenser, fordi den forleder til fejlagtige analyser af, hvor tabene i vores energisystemer sker. Dette er af central betydning, fordi det nu er så vigtigt at forbedre energiomsætningssystemernes effektivitet, hvilket er ensbetydende med at reducere de tab, der sker i systemerne. Hvis man ikke er klar over, hvor tabene sker, kan man ikke sætte ind de rigtige steder.

Det er svært at forstå, at Joule og hans efterkommere ikke har indset, at der sker et tab af noget potentielt værdifuldt, når man brænder kul - i vore dage olie og gas - af i et bål og kun får noget varmt vand ud af det. Med kul kan man drive dampmaskiner i fabrikker, lokomotiver og skibe; med olie kan man endda flyve. Men varmt vand har meget begrænsede anvendelsesmuligheder. Hvis der ikke var andre opvarmningsteknikker til rådighed, måtte man acceptere tabet i bålet. Men så ville videnskaben termodynamik ikke eksistere, for den opstod i og med, at Carnot viste, at der findes en meget mere effektiv opvarmningsteknik, nemlig en kraftmaskine (i vore dage en motor eller en brændselscelle) koblet til en kompressionsvarmepumpe.

De relevante tab, er de termodynamiske tab, som er tab af det, der har værdi, nemlig potentiel arbejdsydelsesevne, exergi. I energiomsætningsanlæg (termodynamiske maskiner) sker de største tab:

- i brændkamre (kedler, cylindre, gasturbine-brændkamre). Derfor kan der i brændselsceller opnås en højere termodynamisk effektivitet end i termiske kraftmaskiner, fordi omsætningen af kemisk energi til elektrisk kraft, sker i en elektrokemisk proces;
- ved varmeveksling over store temperaturforskelle;
- ved trykfald uden udnyttelse af det potentielle arbejde, der er til rådighed i stof i gasfase under højt tryk, f.eks. ved trykreduktion gennem en dyse i et dampkredsløb.

4.4 Nogle eksempler

Hvor ofte har man ikke hørt om de store "energitab", der sker, ved at dampturbine-kraftværker udleder kølevand med en temperatur under 20 grader C. Tabet opgøres til omkring 50% af den indfyrede energi. Men vand med en temperatur under 20 grader C har ingen værdi - hvis det havde, ville der være gode penge at tjene ved at hente det fra de varme have. Følgelig kan der ikke gå noget af værdi tabt ved at udlede det. Tabene sker i dampmaskinens indre kredsløb. Det største tab sker i forbrændingsprocessen i brændkammeret, det næststørste skyldes den store temperaturforskel mellem brændkammeret og vandet i kedlen. Mindre tab sker på grund af turbulens i turbinerne og temperaturforskellen mellem dampen og kondensatet på kondensatorens ene side og kølevandet på den anden. Jfr. Camot og Clapeyron. Det er de ingeniører, der konstruerer kraftværker, naturligvis helt klar

over, og derfor bestræber de sig på at hæve damptemperatur og -tryk så meget som muligt, og at sænke kondensatortemperaturen så meget som muligt. Men disse ingeniører blander sig sjældent i den offentlige energipolitiske debat.

Det almindelige argument i denne debat er, at damp turbine-kraftværker har en lav nyttevirkning på kun omkring 40% - meget lavere end f.eks. nyttevirkningen af et naturgasfyr, som kan komme op over 90%. Hvis man nu hæver kraftværkets kondensatortemperatur til omkring 90 grader og bruger et fjernvarmenet i stedet for fjordvand til at køle værket med, så opnås en "samlet nyttevirkning" af det, der nu er et kraftvarmeværk, på 85 - 90%, dvs. omtrent samme nyttevirkning, som den, der kan opnås i et naturgasfyret fjernvarmeværk, et individuelt naturgasfyr eller et decentralt kraftvarmeværk med en gasmotor. Og så - skulle man tro - kan det ene være lige så godt som det andet. Så hvorfor investere i dyre decentrale kraftvarmeværker, når et meget billigere fjernvarmeværk har den samme nyttevirkning? Og når nu de decentrale kraftvarmeværker skaber problemer med "el-overløb", hvorfor så ikke bare koble dem ud og producere varme i naturgaskedler i stedet for? Eller bruge el-patroner til opvarmning i fjernvarmeværker, så man får brugt noget af den overskydende el-produktion?

Svaret på disse spørgsmål er, at de nyttevirkninger, der beregnes ud fra et simpelt energibalanceregnskab - energi i Joule'sk forstand - ikke har noget med effektivitet at gøre. At f.eks. et naturgasfyr har en nyttevirkning på 90% siger ikke noget om dets effektivitet mht. at tilvejebringe den opvarmning, det yder. Det høje nyttevirkningstal er kun udtryk for, at naturgasfyrets effektivitet ikke kan forøges ret meget, fordi kun skorstenstabet, som allerede er relativt lille, kan formindskes. At naturgasfyrets effektivitet er lille fremgår af, at man med andre anlæg - f.eks. en gasmotor - eller endnu bedre en brændselscelle - der driver en varmepumpe, kan opnå den samme opvarmning med et brændselsforbrug, der er mindre end halvt så stort som naturgasfyrets brændselsforbrug.

Effektiviteten af et anlæg udtrykker forholdet mellem den nedre grænse for den energitilførsel (målt som exergi), der skal til for at opfylde anlæggets formål, og den faktiske energitilførsel (formålet kan f.eks. være at opvarme et givet vandvolumen per minut fra 40 til 80 grader og/eller at levere en given elektrisk effekt). Den nedre grænse bestemmes som energitilførslen ved en reversibel, dvs. tabsfri proces. Effektiviteten er således et tal i intervallet fra 0 til 1. Den forøges i og med, at tabene i anlægget formindskes ($e = 1 - t$, hvor e er effektiviteten og t er tabene), men da der i praksis altid sker betydelige tab i processerne, når den aldrig op på 1.

For eksempel:

- Med hensyn til det formål at opvarme vand fra 35 til 60 grader ved en udetemperatur på 0 grader opnår naturgasfyret på skalaen fra 0 til 1 en effektivitet på 0.15.
- Ved en fjernvarmefremløbstemperatur på 70 grader, en returtemperatur på 40 grader og en udetemperatur på 0 grader kan effektiviteten af et varmeværk med en gasmotor, der driver en varmepumpe, komme op på 0.33. Med en SOFC-

brændselscelle¹² i stedet for en gasmotor kan effektiviteten blive 0.43. Forøgelsen skyldes, at tabene ved den elektrokemiske omsætning i brændselscellen er mindre end tabene i forbrændingsprocesserne i motorens cylindre.

- Et moderne dampturbine-kraftværk klarer el-produktionsopgaven med en effektivitet på omkring 0.45 (omtrent lig den såkaldte el-nyttevirkning: el-produktionen divideret med brændværdien af det indfyrede brændsel). Som kraftvarmeværk, der foruden elektrisk effekt leverer fjernvarme med en fremløbstemperatur på 90 grader og en returtemperatur på 40 grader ved en udetemperatur på 0 grader, bliver effektiviteten omkring 0.5.
- Når det øjeblikkelige el-forbrug delvist dækkes af el-produktion i brændselsfyrede kraftværker, vil elektrisk vandopvarmning indebære en øget el-produktion i disse værker - fordi vindkraftproduktionen er uafhængig af el-forbruget. Hvis det antages, at el-produktionen i kraft- og kraftvarmeværker sker med en gennemsnitlig effektivitet på 0.45 (incl. nettab) bliver den effektivitet, der opnås ved opvarmning af vand fra 8 til 60 grader i en elektrisk varmtvandsbeholder, omkring 0.05. Dvs. at det samme opvarmningsformål kan opfyldes med et ressourceforbrug (brændselsforbrug), der er 6 - 7 gange mindre, f.eks. med et motor+varmepumpeanlæg.

Man behøver ikke at ty til termodynamikken for at indse, at da de brændselsdrevne maskiner, der bruges til el-produktion, under alle omstændigheder skal køles, sparer man brændsel ved at bruge radiatorerne i husene til at køle dem med i stedet for at bruge fjordvand eller køletårne. I dampturbine-kraftværker kræver det ganske vist, at man hæver kondensatortemperaturen så meget, at man kan opnå den nødvendige fremløbstemperatur i fjernvarmenettet, hvilket formindsker el-produktionen noget. Men denne meromkostning modsvarer rigeligt af den besparelse, der opnås ved at få de meget ineffektive olie- eller naturgasfyr ud af systemet. I gasmotorer og brændselsceller er der ikke nogen formindskelse af el-produktionen forbundet med at bruge husenes radiatorer (og fjernvarmenettene) til at køling af maskinerne. Men de skal selvfølgelig befinde sig i nærheden af husene. Derfor decentraliseringen af el-produktionen.

4.5 Et næsten tabsfrit energisystem med masser af vindkraft og uden el-overløb ?

Lad nu "tab" betyde tab i kalorimetrisk forstand. Dvs. at der indregnes et stort tab ved udledning af kølevand med en temperatur under 20 grader fra kraftværker, medens tabene i olie- og gasfyr er relativt små, idet de kun består i røggastab gennem skorstene, og el-varmeradiatorer og el-patroner i elektriske varmtvandsbeholdere er tabsfri.

Så kan man let konstruere et næsten tabsfrit energisystem med en stor vindkraftproduktion og en stor varmeproduktion i kraftvarmeværker, uden at der opstår el-overløb. Man skal blot ombygge kraftværkerne til kraftvarmeværker, der er udstyret med f.eks. naturgasfyr og/eller varmtvandstanke med el-patroner til supplerende varmeproduktion. Andre fjernvarmenet forsynes fra varmeværker, evt.

¹² SOFC: Solid Oxide Fuel Cell

med el-patroner. De bygninger, der ikke er tilsluttet fjernvarmenet opvarmes med olie-, gas- eller biomasse-fyr suppleret med el-varme. Når el-produktionen i vindmøllerne plus den varmebundne el-produktion i kraftvarmeværkerne begynder at overstige elforbruget - dvs. begyndende el-overløb - så kan man nedtrappe el- og dermed varmeproduktionen i kraftvarmeværkerne og i stedet levere fjernvarme fra naturgasfyrene og/eller el-patronerne og om nødvendigt også tilslutte el-varme i de ikke-fjernvarmetilsluttede huse.

Energibalanceregnskabet går op uden el-overløb, og tabene i energiomsætningssystemet er små, fordi de store kølevandstab fra kraftværkerne er elimineret. Det kan næsten ikke gøres bedre.

Dette er som bekendt forkert, jfr. afsnit 4.3 og 4.4. Følgelig er den kalorimetriske tabsopgørelse irrelevant, hvad angår identifikationen af de tab, der skal formindskes for at forøge energiomsætningssystemets effektivitet - og dermed formindske brændselsforbruget.

4.6 Vedvarende energi - et kvalitativt begreb, ikke en kvantitativ størrelse

Begrebet "vedvarende energi" vil naturligvis kun opstå i et samfund, der drives af ikke-vedvarende (dvs. ikke-fornyelige) brændsler. Før disse ikke-vedvarende energikilder blev dominerende, var der ingen anledning til at give alle de forskelligt artede kraft- og varmekilder (heste, vindmøller, vandmøller, sejlg og brænde) en fælles betegnelse. Begrebet "vedvarende energi" er således knyttet til de fossile brændsels æra, i og med at det dækker enhver form for energiforsyning, der ikke er fossil - eller nuklear. Det er således et kvalitativt samlebegreb, som det kan være formålstjenligt at bruge i den generelle energipolitiske argumentation i den afsluttende fase af de fossile brændsels æra. Men det er ikke udtryk for en relevant kvantitativ størrelse.

De vedvarende energikilder er af forskellig art. Vindmøller, vandkraftværker, bølgeenergikanlæg og solceller leverer et elektrisk kraftpotentiale. Halm og træ har et kemisk energipotentiale. Solfangere yder et lav-temperatur termisk potentiale ved at hæve temperaturen i et vandkredsløb. Man kan selvfølgelig med kalorimetre måle den "energi" i Joule'sk forstand, der kommer fra disse energikilder, men summen af de i GigaJoule kalorimetrisk målte ydelser, er ikke relevant for nogen analyse af energisystemets egenskaber.

Energisystemet er der for at opfylde nogle behov for elektrisk og mekanisk kraft og termisk energitransmission ved forskellige temperaturer. I analysen af systemets funktion og effektivitet mht. dets formål og af virkningerne af mulige forandringer af systemet, optræder summen af de kalorimetrisk målte ydelser fra de forskellige vedvarende energikilder overhovedet ikke.

Elektrisk transmitteret kraft fra vindmøller kan direkte udnyttes til alle mulige formål - i lamper, køleskabe, el-motorer, elektriske tog, varmepumper, etc. og til brintproduktion. Kemiske potentialer i biobrændsler skal omsættes til elektrisk eller mekanisk kraft i kraft/varme-værker eller andre motorer eller til varme i fjernvarmeværker eller individuelle fyr. Varmt vand fra solfangere kun kan bruges i

de huse, der er tilkoblet solfangeranlægget. Summen af de kalorimetrisk målte ydelser fra disse forskelligt artede energikilder kan således ikke på nogen måde komme til at indgå i en analyse af energisystemets nuværende funktion eller de fremtidige udviklingsmuligheder. Summen er i enhver henseende en irrelevant størrelse.

Ikke desto mindre optræder denne sum i alverdens energistatistikker, også i Energistyrelsens opgørelser, hvor bidragene til energibalanceregnskabet fra de forskelligt artede vedvarende energikilder opgøres.

Helt besynderligt bliver det, når en varmepumpe, som er en maskine, der tjener til at opretholde en temperaturforskel (et termisk potentiale) mellem et såkaldt varmereservoir - udeluften eller vandet i en fjord - og et varmtvandskredsløb, betragtes som vedvarende energikildeanlæg og den varme, der overføres fra varmereservoiret til varmepumpens fordampere, medregnes i summen af bidrag fra vedvarende energikilder. Fordi energibalanceregnskabet ellers ikke går op. Men, som det fremgår af afsnit 4.3 ovenfor, skelnes der ikke i det kalorimetriske energibalanceregnskab mellem potentielle ressourcer og de størrelser, som kun indgår for at vise, at regnskabet ikke er i modstrid med det konservative princip - at bogholderiet balancerer. At opfatte udeluften eller vandet i en fjord som en energikilde ("omgivelsesvarme") og indregne den som et bidrag fra vedvarende energikilder på linie med elektrisk kraft fra vindmøller er åbenbart vildledende.¹³

4.7 Energiressourcer og ressourceforbrug

Et sejlskib bruger ingen ressourcer til dets fremdrift. Det samme gælder for et energisystem, der alene drives af vedvarende energikildeanlæg: vindmøller, vandkraftværker, bølgeenergianlæg, solceller og solvarmeanlæg, og således - ligesom sejlskibet - fungerer i kraft af solstrålingen og de energikredsløb, solstrålingen opretholder i atmosfæren. Intet som kunne være brugt til andre formål og intet ikke-fornyeligt bruges i et sådant system. Og udnyttelsen i sådanne anlæg af de kræfter og temperaturforskelle solstrålingen frembringer har ingen blivende ændringer af klodens klima og miljøtilstande til følge. Den energi, der forbruges til at producere og forny de vedvarende energikildeanlæg, frembringes i et sådant system af vedvarende energikildeanlæg. Anlæggene frembringer ressourcer, men forbruger ikke ressourcer.

¹³ En lille anekdote. Kaffebrød i haven. Sukkerskålen er ved at være tom. "Vi har masser af sukker", siger værtinden, "der var hul i sukkerposen, så det meste dryssede ud på stien. Det er bare med at få det samlet op." Ligeledes er der, som mange forfattere fremhæver, masser af vedvarende energi. Det er bare med at få det samlet op. Det er ulige meget lettere med det, naturen i de sidste 100 millioner år har samlet sammen til os. Men der er nogle sukkerknalder i form af vindkraft, som ret hurtigt kan samles op.

I vores nuværende energisystem udgøres *ressourceforbruget* af:

- forbruget af ikke-fornyelige fossile brændsler, og
- forbruget af biomasse-brændsler, i det omfang produktion af biomasse-brændsler ikke er “bæredygtig”, dvs. er forbundet med betydelige energi- og miljømæssige omkostninger på grund af:
 - ressource-forbrug til gødskning, jordbehandling og transport,
 - udvinding af kulstof fra det biologiske kulstofkredsløb (f.eks. i form af methan fra biogasanlæg) i et omfang, som formindsker jordens indhold af næringsstoffer for regnorme og mikro-organismer og dermed planternes vækstbetingelser, og /eller
 - dyrkning af særlige energiafgrøder eller træer, som formindsker produktionen af fødevarer eller gavntre på de til rådighed værende arealer, eller
 - fældning af træer i et omfang udover den årlige tilvækst i træbestanden, eller
 - miljøbelastninger (f.eks. udvaskning af næringsstoffer), som formindsker andre ressourcer (f.eks. fiskebestande).

Da “bæredygtig” producerede biomasse-brændsler reproduceres i de årlige biologiske kredsløb, er det ressourceforbrug, der knytter sig til produktionen af disse brændsler, meget mindre end deres energiværdi. Endvidere er det CO₂-udslip der afstedkommes ved produktionen og forbrændingen meget mindre per energienhed end for fossile brændsler.

Ressourceøkonomisk og miljømæssigt skal ressourceforbruget i form af fossile brændsler derfor tillægges en langt større vægt end forbruget af “bæredygtig” producerede biomasse-brændsler. Desuagtet er der i almindelighed ressourceøkonomiske og miljømæssige grunde til at begrænse biomasse-brændselsforbruget så meget som muligt. Ligesom udbygningen af vedvarende energikildeanlæg af økonomiske, landskabelige og andre æstetiske grunde skal begrænses til det nødvendige, hvilket vil sige at de ressourcer, der frembringes i disse anlæg skal udnyttes effektivt.

4.8 Geotermiske anlæg og solvarmeanlæg

I undergrunden under nogle danske byer, bl.a. København og Thisted, findes vandførende lag med en temperatur på 40- 60 grader - noget lavere end de fremløbstemperaturer fjernvarmenettene er dimensioneret til. Hvis fjernvarmereturtemperaturen er tilstrækkeligt lav i forhold til det geotermiske reservoirs temperatur, kan vand fra reservoiret ved simpel varmeveksling bruges til forvarmning af fjernvarmereturvandet. Derefter kan opvarmning til fjernvarmefremløbstemperaturen ske ved varmeveksling med kølevand og røggas fra en gasmotor eller et brændselscelleanlæg evt. suppleret med en varmepumpe eller med en varmepumpe alene. Eller i en fjernvarmekedel fyret med halm eller flis.

Forudsat at udnyttelsen af det geotermiske reservoir ikke sker hurtigere, end at dets temperatur forbliver konstant i en overskuelig fremtid, er opvarmningen af fjernvarmevandet kun forbundet med et ressourceforbrug, hvis der bruges elektricitet eller mekanisk overført arbejde til at drive en varmepumpe, eller hvis der bruges brændsel i en fjernvarmekedel. I det sidstnævnte tilfælde kan ressourceforbruget

direkte opgøres som brændselsforbruget i kedlen. De ressourcer, der medgår til at levere arbejde til en varmepumpe, afhænger derimod af de varierende driftsforhold i det samlede energisystem og kan derfor kun beregnes ved at gennemregne energiomsætningen i det samlede system måned for måned med, henholdsvis uden varmepumper i geotermiske anlæg. I almindelighed kan man således umiddelbart kun sige, at geotermiske reservoirer kan tjene til at reducere det samlede ressourceforbrug i systemet. Hvor stor reduktionen bliver i et givet tilfælde, afhænger i almindelighed af sammensætningen og driften af energisystemet i dets helhed.

Et stort kollektivt solfangeranlæg kan i sommerhalvåret opvarme vandet i et sæsonvarmelager, der ligesom et geotermisk reservoir kan tjene som varmereservoir i efterårs- og vintermånederne, dog med den forskel, at reservoirtemperaturen falder, efterhånden som reservoiret "tømmes". Hvis reservoiret indgår i et kraftvarmeanlæg, kan overskydende køle- og røggasvarme fra kraftmaskinen i sommermånederne også tilføres reservoiret. Når reservoirtemperaturen i løbet af vinteren er faldet så meget, at der ikke længere kan ske en forvarmning af fjernvarme-returvandet ved simpel varmeveksling, kan yderligere nedkøling af reservoiret ske ved hjælp af en varmepumpe. Hen på foråret er reservoiret således nedkølet så meget, at det kan optage varme fra solfangeranlægget ved lave temperaturer.

Ligesom for geotermiske reservoirer gælder det for et solfangeranlæg med varmereservoir, at den formindske af ressourceforbruget i det samlede energisystem, anlægget medfører, afhænger af, hvordan det vekselvirker med andre anlæg i systemet.

Individuelle solfangere tjener til at formindske ressourceforbruget til opvarmning af brugsvand. Hvor stor formindskelsen ved installation af en solfanger er, afhænger af det ressourceforbrug, der i den pågældende bygning medgår til varmtvandopvarmning uden solfanger. Hvis der er tale om et hus med olie- eller gasfyr til brugsvandsopvarmning, kan dette ressourceforbrug umiddelbart beregnes. Hvis der er tale om el-varme eller fjernvarme, afhænger det af energiomsætnings- og transmissionssystemets sammensætning og drift.

4.9 Energiomsætnings- og transmissionssystemets effektivitet

Ordsammenstillingen energi-effektivitet - energy efficiency - bruges i den almindelige energipolitiske diskussion som et udtryk for noget ønskeligt, nemlig at energi-ressourcer, dvs. ressourcer som tilføres energiomsætnings- og transmissionssystemet (ETOS) fra systemet af energikilder (se fig. A) udnyttes effektivt. Spørgsmålet må så til enhver tid være: Hvordan kan ressourcerne med de til rådighed værende teknologier udnyttes mere effektivt ?

Bemærk at der på engelsk er to ord: "effective" og "efficient", medens vi på dansk kun har ét: "effektiv", som bruges i begge betydninger. "To be effective" betyder, at man faktisk når et mål/opfylder et formål/løser en opgave. "To be efficient" betyder, at det sker på en ressource-økonomisk måde. Det er i den betydning, vi bruger ordet "effektiv", når vi taler om energi-effektivitet. Og det er klart, at ordet kun har mening i kvantitativ forstand med hensyn til et givet mål/formål/en given opgave.

I energisystemet har EOTS til formål at udnytte de ressourcer, det modtager fra energikildesystemet, til at levere bestemte ydelser i form af varme ved bestemte temperaturer, elektrisk kraft og mekanisk kraft til transportmidler til forbrugssystemet. Idet de tilførte ressourcer såvel som de leverede ydelser måles ved deres exergiværdier¹⁴, bestemmes den termodynamiske effektivitet af EOTS med hensyn til dette formål som forholdet mellem den (teoretiske) nedre grænse for de ressourcer, det skal tilføres for at opfylde formålet, og de ressourcer, der faktisk tilføres, jfr. afsnit 4.3.¹⁵

Det i praksis relevante mål for en effektivitetsforbedring af EOTS er imidlertid den opnåede formindskelse af ressourceforbruget. For givne elektriske energitilførsler fra vindmøller, solceller, bølgeenergianlæg og vandkraftværker og givne ydelser til forbrugssystemet (alle størrelser givet som funktioner af tiden, dvs. varierende over døgnet, månederne og året) er den opnåede formindskelse af brændselsforbruget således det i praksis relevante mål for en effektivitetsforbedring af EOTS.

4.10 Tekniske og adfærdsmæssige forbrugsfaktorer

I den sidste ende er det størrelsen af de fordrede ydelser fra EOTS til forbrugssystemet, der er bestemmende for ressourceforbruget. For givne ressourcetilførsler fra de el-producerende vedvarende energikilder og en given sammensætning af EOTS kan brændselsforbruget formindskes ved at formindske de ydelser EOTS i form af varme og elektrisk og mekanisk transmitteret kraft skal levere til forbrugssystemet. Det kan ske ved energitekniske forbedringer i forbrugssystemet: efterisolering af bygninger; bedre udnyttelse af solstrålingen på bygninger, bl.a. ved installation af individuelle solvarmeanlæg; bedre regulering af opvarmningsanlæg; udskiftning af el-apparater og maskiner til mere energi-effektive modeller; og ved formindskelse af den samlede mekanisk eller elektrisk transmitterede kraft, der skal til for at drive transportmidlerne.

Tekniske forbedringer på disse områder henføres i den almindelige energipolitiske diskussion til begrebet "energibesparelser" (energy savings) eller "energibesparende foranstaltninger", selvom det "at spare på noget" ellers betyder, at man ved sin adfærd nedbringer sit forbrug - lader være med at bruge så meget, som man kunne have lyst til. Spar på vandet, især det varme, og på varmen og elektriciteten. Lad være med at frådse.

¹⁴ Exergi-værdien af tilført kemisk energi i form af brændsler er med tilnærmelse lig brændslernes (nedre) brændværdi. Exergi-værdien af elektrisk eller mekanisk overført energi er lig energi-værdien. Exergi-værdien af termisk overført energi (varme) til et fjernvarmenet eller et radiator kredsløb er lig den overførte energi multipliceret med Carnot-faktoren C , $C = 1 - [(T_0/(T_2 - T_1))] * \ln(T_2/T_1)$, hvor T_0 er omgivelsestemperaturen (udetemperaturen), T_1 er returtemperaturen og T_2 er fremløbstemperaturen.

¹⁵ SESAM-programmet beregner for hvert år i et scenarieforløb den termodynamiske effektivitet af EOTS ved integration af de over året varierende ressourcetilførsler til EOTS henholdsvis ydelserne til forbrugssystemet.

I analysen af fremtidige muligheder for at nedbringe ressourceforbruget, herunder vurderingen af de samfundsøkonomiske forskelle mellem forskellige udviklingsstrategier, må man desuagtet skelne mellem på den ene side ændringer af *tekniske forbrugsfaktorer*, som indebærer investeringer i tekniske forbedringer, og på den anden side *adfærdsbestemte besparelser*.

5. Energisystemets geografiske afgrænsning og el-udveksling over landegrænser

Alle el-producerende og el-forbrugende anlæg i Europa er forbundet gennem de europæiske el-transmissionslinier. Fysisk set og med hensyn til CO₂-udslip er der således tale om ét energisystem. I et europæisk el-marked foregår handel med el, dvs. den af forbrugerne bestemte produktionsfordeling af el-produktionen på markedets el-værker, indenfor dette europæiske energisystem.

Med hensyn til CO₂-kvoter, handel med CO₂-kvoter, energipolitiske markedsreguleringer og energipolitisk planlægning med henblik på nedtrapning af CO₂-udslippet er der derimod tale om mange forskellige nationale energisystemer.

Energi&miljøpolitisk planlægning af energisystemforandringer med henblik på forsyningssikkerhed og nedtrapning af CO₂-udslippet angår således nationale energisystemer, der er vidt åbne for el-udveksling med andre nationale energisystemer.

En tilstrækkeligt stor fælleseuropæisk CO₂-afgift vil kunne regulere el-markedet, sådan at CO₂-udslippet fra el-værker bliver så lille som muligt i det nuværende europæiske energisystem. En CO₂-afgift kan imidlertid ikke i sig selv afstedkomme de indbyrdes koordinerede investeringsindsatser i energibesparende foranstaltninger, vedvarende energikildeanlæg, kraftvarmeværker og andre energiomsætningsanlæg, der skal til for at opfylde fordringen om forsyningssikkerhed og nedtrappe CO₂-udslippet så meget, at det har væsentlig betydning for drivhuseffekten, dvs. med 50-80 procent indenfor de næste 2 - 3 årtier. For at opnå et optimalt udbytte af disse store investeringer skal de planlægges i henhold til en hensigtsmæssig ombygningsstrategi for energisystemet som helhed.

Det er utænkeligt, at én EU-planlægningsinstans skulle kunne tilrettelægge og implementere en teknologisk og samfundsøkonomisk formålstjenlig energi&miljøplanlægning for det samlede EU. Men man kunne forestille sig, at de nordiske lande og andre små nabolande i EU blev enige om at koordinere udviklingen af deres energisystemer, sådan at samspilsmuligheder mht. ressourceudnyttelse ikke afskæres af for snævre geografiske afgrænsninger.¹⁶

Man kommer imidlertid ikke udenom, at der med hensyn til forsyningssikkerhed og CO₂-udslip kun kan planlægges indenfor, hvad der i den almindelige systemteori kaldes et relativt lukket system, dvs. et system hvis vekselvirkninger med dets omverden - her i form af el-transmission målt i kWh - er relativt små i forhold til den interne omsætning i systemet, således at vekselvirkningerne med omverdenen ikke har en væsentlig indflydelse på systemets funktion. Af den simple grund, at det, der ligger

¹⁶ Greenpeace har fået udarbejdet en SESAM-model af det nordiske energisystem (Norge, Sverige, Finland og Danmark) med henblik på at belyse, hvordan en afvikling af atomkraften kan ske samtidigt med nedtrapning af CO₂-udslippet.

udenfor det område, planlægningen omfatter, ligger udenfor planlægningens geografiske horisont.

En langsigtet strategisk planlægning af udviklingen af det danske energisystem (eller bedre: det nordiske energisystem) må derfor ske under den forudsætning, at netto el-import/eksport mellem Danmark (de nordiske lande) og udlandet på årsbasis kun sker i et begrænset omfang, og sådan at det er realistisk at antage, at den el-udveksling, der kommer til at ske, kan realiseres uden meget store prisudsving. En udbredt udbygning med vindkraft og kraftvarmeforsyning vil imidlertid betyde, at el-udveksling på time- døgn- og månedsbasis mellem lande med store vandkraftressourcer - Norge og Sverige og landene i den alpine region - og de øvrige europæiske lande får afgørende betydning for den løbende el-effektregulering.

Det skal i denne sammenhæng bemærkes, at en dansk indsats for forsyningssikkerhed og nedtrapning af CO₂-udslip vil være uden betydning, hvis der ikke gøres tilsvarende indsatser i de andre europæiske lande. Danmark må derfor i EU-regi gøre fordringer gældende om tilrettelæggelse af en fælles europæisk energi&miljøpolitik, som forpligter alle EU's medlemslande til at udvikle nye energisystemer, som kan sikre, at samfundene i fremtiden kan fungere med et meget mindre forbrug af fossile brændsler. Hvis det lykkes at gennemføre en sådan fælleseuropæisk politik, vil de enkelte lande eller sammenslutninger af nabolande først og fremmest skulle udnytte deres regionale og lokale ressourcegrundlag. Dette princip er illustreret i fig C, når "lokale energisystemer" udskiftes med "nationale energisystemer". Under en sådan fælleseuropæisk planlægningsstrategi, kan behovet for langdistance el-transmission på tværs af landegrænser blive kraftigt reduceret.

6. SESAM-modeller

En SESAM-model af et multi-nationalt, nationalt, regionalt eller lokalt energisystem er en fysisk model af et system af den i kapitel 4, afsnit 4.1, beskrevne klasse. Specifikationen af et energisystem udgøres af en SESAM-database, der består af et bygningsregister og 25 datafiler, som indeholder specifikationer af: systemets geografiske struktur, de fysiske egenskaber af dets nuværende og mulige fremtidige komponenter og vekselvirkningerne imellem dem; de årlige klimavariationer og variationer i andre forbrugsbestemmende parametre. I kapitel 7 gives en koncis beskrivelse af indholdet i de forskellige databasefiler.

Der er mange relationer mellem posterne i de forskellige filer, idet der i de forskellige poster i én fil henvises til poster i andre filer. Et særligt database-program kan bistå ved opbygningen af databasen. Dette program sørger for, at poster, der henvises til fra poster i én fil, oprettes i de filer, hvor de hører hjemme.

Der er udarbejdet SESAM-modeller af energisystemer i en række lande: Danmark, Tjekkiet, Polen, Tyskland, de Baltiske lande og Slovenien samt en model af det nordiske energisystem omfattende Norge, Sverige, Finland og Danmark. Den i denne rapport beskrevne model af det danske energisystem er fremkommet ved en opdatering af den database, der i 1996-1998 blev udarbejdet i et af Energistyrelsen finansieret projekt¹⁷.

6.1 Multi-scenariedatabaser

De i en SESAM databases filer indeholdte data er i almindelighed tidsrække data. Første tal i en tidsrække er den nuværende værdi af den pågældende egenskab. Derefter følger en serie af mulige, alternative fremtidige værdier. For eksempel specificeres varmetransmissionsstab for en bestemt bygningstype som

```
{Specifikt varmetransmissionstab, W/(m2*K):  
  PARCELUSE bygninger opført efter 1979 }  
  2002    2010    2020  
  1.26    1.26/1.25/1.24    1.26/1.22/1.13 ;
```

Der er her angivet 3 alternative fremtidige værdier:

1. alternativ: ingen efterisolering, uændret varmetab.
2. alternativ: nogen efterisolering, det gennemsnitlige varmetab for denne bygningskategori formindskes gradvist fra 1.26 til 1.22.
3. alternativ: noget kraftigere efterisolering, så det gennemsnitlige varmetab reduceres til 1.13 i 2020.

Der interpoleres lineært mellem de angivne værdier.

¹⁷ REVEILLE-projektet (Regulering i Energisystemer med Vedvarende Energi i den Landsdækkende og Lokale Energiplanlægning). Projektrapport: Klaus Illum og Bernd Möller: *Energipolitikens teknologiske råderum*, Aalborg Universitet 1998.

Der kan angives et vilkårligt antal alternative værdier, og tidsrækken kan indeholde værdier for et vilkårligt antal år indenfor det tidsrum, scenarieberegningerne omfatter. Hvis det sidste årstal i en tidsrække er tidligere end det sidste år i det tidsrum en scenarieberegning dækker, regnes de for det sidste årstal angivne værdier for uændrede i de følgende år. Hvis scenarie-tidsrummet er 2002 - 2030, regnes de i dette eksempel viste værdier for 2020 således uændrede efter 2020.

Der kan således for hver af databasens variable angives en række alternative fremtidige udviklingsforløb. Et bestemt udviklingsscenarie for energisystemet som helhed specificeres ved for de forskellige variabel-kategorier (bygningers specifikke varmetab; varmtvandsforbrug; fjernvarmeproduktionens fordeling på forskellige kraftvarme- og fjernvarmeverker i de forskellige lokalsystemer; vindkraftudbygning; etc. etc.) at angive hvilke af de alternative tidsrække-data for den fremtidige udvikling, der skal anvendes i den pågældende scenarie-beregning. Antallet af forskellige kombinationer af fremtidige værdier af de mange variabler og dermed antallet af forskellige scenarier, der kan specificeres, kan således tælles i milliarder. I almindelighed medfører en ændring af blot én variabel-værdi, at alle energiomsætningsværdier i systemet ændres.

Specifikationen af et sæt af scenarie-beregninger, som ønskes gennemført, sker i en scenarie-specifikationsliste, hvori hvert scenarie angives ved en identifikator, der indeholder 11 såkaldte makrovariabelværdier, der refererer til underliggende makrovariabel-specifikationstabeller. Forskellene mellem de forskellige scenarier kan således aflæses af scenarie-identifikatorerne. Også SESAM's scenariosammenlignings- og analyseprogrammer kan udfra scenarie-identifikatorerne identificere forskellene mellem de forskellige scenarier.

Der er således tale om en egentlig multi-scenariemodell, der gør det let at specificere og få gennemregnet og foretaget sammenlignende analyser af et stort antal forskellige scenarier indenfor det praktisk taget uendelige rum af alternative fremtidige udviklingsmuligheder, som databasen repræsenterer.

6.2 Beregningsprogrammerne

SESAM-beregningsprogramsystemet udgøres af 7 programmoduler, der eksekveres sekventielt, idet hvert programmodul afleverer beregningsresultater til de efterfølgende moduler. Eksekveringen af en serie scenarieberegninger sker automatisk, efter at brugeren i sin scenarie-specifikationsliste har udpeget de scenarier, der ønskes beregnet. Beregningsresultaterne gemmes i en resultat-database, hvorfra de forskellige dokumentationsprogrammer, der indgår i programsystemet, kan hente de resultater, der ønskes udskrevet i forskellige tabeller og grafer.

Alle beregninger foretages for hvert af de år, der er angivet i scenarie-specifikationen. For den nøjere beskrivelse af beregningsgangen henvises til SESAM-bogen (se reference under indholdsfortegnelsen). Her skal kun gives en ultra-kort summarisk beskrivelse:

1. modul beregner varme- og el-forbrug i bygninger og industrielle anlæg. Forbrugene beregnes for hvert af systemets lokale energisystemer, og varmemeforbruget fordeles på de forskellige individuelle opvarmningsanlæg og kraftvarme- og fjernvarmeanlæg, der indgår i de enkelte lokale systemer.
2. modul beregner de over året varierende ydelser fra vindmøller, solcelleanlæg, vandkraftanlæg, evt. bølgeenergianlæg og individuelle solfangeranlæg. Endvidere indlæses data for transportvolumener fordelt på transportmidler.
3. modul indlæser og bearbejder data for de anlæg, der indgår i energiomsætnings- og transmissionssystemet (se fig. A).
4. modul beregner måned for måned fordelingen af den månedlige el-produktion i kraft- og kraftvarmeværker på de centrale værker og de decentrale værker indenfor de enkelte lokale energisystemer. Fordelingen sker i henhold til en i databasen indeholdt prioriteringsliste under hensyntagen til den varmeproduktion, der skal ske i kraftvarmeværkerne.
5. modul beregner måned for måned energiomsætningen (herunder brændselsforbrug) i alle systemets energiomsætnings- og forsyningssystemets anlæg og dermed i alle de individuelle og kollektive anlæg, der indgår i de enkelte lokale energisystemer. Det sikres således, at der for hvert lokalt energisystem er balance mellem varmemeforbrug og varmeproduktion, og at der for energisystemet som helhed tillige er balance mellem el-forbrug (+/- el-eksport/import) og el-produktion. Endvidere beregnes de sæsonlagerkapaciteter, der er nødvendige for udnyttelsen af varmeproduktionen i store solfangeranlæg i den årlige cyklus.
6. modul beregner de kapaciteter (i MW elektrisk eller termisk effekt), der skal være til rådighed i de enkelte forsyningsanlægsheder, for at systemet kan fungere under de på forskellige årstider over døgnet varierende driftforhold. For el-produktionen beregnes last-fordelingen på de forskellige kraft- og kraftvarmeværker med korte tidsintervaller (f.eks. 15 minutter) ud fra den øjeblikkelige el-produktion i vedvarende energikildeanlæg, det øjeblikkelige el-forbrug og en i databasen givet last-prioriteringsliste. I systemer, hvor varmepumper og/eller elektrolyseanlæg til brintproduktion indgår i nogle kraftvarmeanlæg, fordeles el-forbruget i disse anlæg over døgnet, sådan at produktionen i de brændselsfyrede kraft- og kraftvarmeværker udjævnes mest muligt. Endvidere kan der ved regulering af el-produktionen i vandkraftværker opnås en udjævning af el-produktionen i kraft- og kraftvarmeværkerne. Det forudsættes, at kraftvarmeværkerne er udstyret med varme-bufferlagre (se fig. B), sådan at varmeproduktionen over døgnet ikke behøver at følge varmemeforbruget. De nødvendige kapaciteter af disse bufferlagre beregnes.
Det skal bemærkes, at de beregnede anlægskapaciteter ikke har nogen indflydelse på den månedlige og årlige energiomsætning i systemet og således ikke på brændselsforbrug og emissioner. De indgår kun i de økonomiske omkostningsberegninger.
7. modul kompilerer tidsrække data, som angiver de i de foregående programmoduler over årene beregnede
 - ændringer af varmetabstal for bygninger af de forskellige bygningskategorier. Disse ændringer er udtryk for, at der er foretaget investeringer i efterisolering m.m.
 - ændringer i el-apparatbestande og bestandenes sammensætning af modeller med forskellig energieffektivitet. Disse ændringer er udtryk for bestandstilvækster og apparatudskiftninger.

- tilvækster i vindmøllebestande og solcelle-anlægskapaciteter.
 - kapacitetsfornyelser og kapacitetsforøgelser af energiomsætningsenheder af forskellig type (kraft- og kraftvarmeværksenheder; varmepumpeenheder; kedler; elektrolyseanlæg; m. fl.), sådan som beregnet af modul 6.
- Disse ændringsforløb danner grundlag for beregningerne af de investeringsomkostninger, der afholdes i scenarie-forløbet, idet der til hver ændring af de forskellige typer tilskrives en specifik investeringsomkostning med efterfølgende drifts- og vedligeholdelsesomkostninger, se afsnit 6.4.

6.3 Dokumentation og verifikation

Den klasse af energisystemer SESAM-modellen repræsenterer er fysiske systemer, hvis funktion er bestemt af stadigt varierende samspil mellem systemets mange delsystemer og komponenter, og hvis sammensætning er forskellig fra system til system og for hvert system ændres fra år til år. En sådan klasse af energisystemer lader sig ikke repræsentere i form af matematiske ligningssystemer. SESAM-beregningsprogrammerne udgøres derfor af algoritmer (beregningsprocedurer) som opererer på netværk af dynamiske datastrukturer. Et program af en sådan kompleksitet kan ikke verificeres ved inspektion af dets hundreder af komplekse algoritmer. Det kan kun verificeres ved dokumentation af, at de mange beregningsresultater er indbyrdes konsistente og konsistente med de i databasen givne input-data.

Programsystemet producerer derfor resultat-tabeller, der giver en oversigt over energiomsætningen i systemet som helhed og i dets forskellige forsyningsområder og lokale energisystemer. Disse tabeller viser, at der måned for måned er balance mellem varmekonsum og varmeproduktion i systemet som helhed og i hvert enkelt lokalt energisystem og mellem el-forbrug (+/- el-eksport/import) og el-produktion. Andre udskrifter viser, at el-forbrug og el-produktion balancerer time for time under de valgte styrings- og reguleringsstrategier. Iøvrigt kan beregningsresultaterne inspiceres på et ethvert (af databasens detaljeringsgrad) bestemt detaljeringsniveau.

Derudover kan beregningsprogrammerne verificeres ved at gennemregne en række scenarier, hvor værdierne af forskellige variable - f.eks. varmekonsum, el-forbrug, installeret vindmøllekapacitet, mængden af til rådighed værende biomassebrændsler, m.fl. - successivt ændres. Hver af disse ændringer vil i større eller mindre grad ændre alle de beregnede værdier, og det vil kunne konstateres, at ændringerne er i overensstemmelse med funktionen af det energisystem, modellen repræsenterer.¹⁸

Foruden en række standard dokumentationsudskrifter, kan der ved hjælp af SESAMs dokumentationsprogrammer udskrives beregningsresultater for systemets delsystemer, anlæg, anlægskategorier, etc.

¹⁸ Ændringer af brændselsforbrug og emissioner ved marginale ændringer af varmekonsum, el-forbrug, vindkraftproduktion m.fl. beregnes og udskrives automatisk.

6.4 Samfundsøkonomiske omkostningsberegninger

De årlige samfundsøkonomiske omkostninger omfatter:

- investeringer i kapitalgoder i form af energikildeanlæg, kollektive forsyningsanlæg og individuelle opvarmningsanlæg;
- investeringsafskrivninger og udgifter til drift og vedligeholdelse af anlæg;
- investeringer i kapitalgoder i form af energitekniske bygningsforbedringer;
- evt. meromkostninger ved udskiftninger af el-apparater og elektrisk drevne maskiner med mere energieffektive enheder;
- udgifter til køb af brændsler;
- udgifter til el-import minus indtægter fra el-eksport.

Som nævnt i afsnit 6.2 ovenfor kompilerer programmodul 7 en resultatfil, der indeholder tidsrække data for de ændringer af energisystemet (udbygning af bestandene af energikildeanlæg af forskellige typer; udskiftning af eksisterende forsyningsanlægsenheder og tilføjelse af nye enheder; energitekniske bygningsforbedringer; m.fl.) som indebærer økonomiske investeringer. Endvidere registreres det årlige ressourceforbrug i form af brændsler i denne fil. I modellen af det danske energisystem indholder denne fil flere tusinde poster, nemlig én post for hvert af de eksisterende anlæg og hver af de specifikke investeringer, der finder sted i et scenarieforløb.

Til hver af disse mange poster knyttes en "prisseddel", der vælges fra et "priskatalog", som indeholder prisangivelser for en lang række forskellige anlægs- og investeringstyper samt specifikationer af brændselsprisudviklingen, el-importprisen og el-eksportprisen.

For kapitalgoder angiver "prissedlerne"

- den specifikke kapitalværdi af investeringen (investeringsudgifter),
- årlige udgifter til drift og vedligeholdelse,
- udgifter til reinvesteringer (renovation, hovedreparation) efter en given drifttid, samt
- anlæggets tekniske levetid.

Tilknytningen af "prissedler" til de enkelte anlæg, bygningstyper, el-apparatyper og brændselstyper sker manuelt ved hjælp af et særligt program, der letter arbejdet.

Når der således er knyttet "prissedler" til alle de omkostningsbærende kvantiteter, beregnes de samlede økonomiske omkostninger fordelt på de forskellige kapital- og forbrugsgoder ved at multiplicere kvantiteterne og de på de tilhørende "prissedler" givne specifikke omkostninger.

6.5 Komparative scenarie-analyser

Den virkelige kompleksitet af et integreret nationalt energisystem afspejler sig i den overvældende mængde af indbyrdes korrelerede beregningsresultater, der for hver scenarieberegning gemmes i SESAM-resultatdatabasen. De mange mere eller mindre detaljerede resultatudskifter er i almindelighed kun af interesse for den professionelle

analytiker. Det er en særlig opgave at sammenfatte den detaljerede information i tabeller og grafer, sådan at der kan formidles et begribeligt overblik over de karakteristiske forskelle mellem de fremtidige udviklingsforløb, der kommer til udtryk i de forskellige scenarier.

Blandt dokumentationsprogrammerne findes derfor programmer, der for et antal udvalgte scenarier udskriver hovedresultater i parallelle kolonner, sådan at resultaterne direkte kan sammenlignes. Endvidere findes et særligt analyseprogram, der foretager følsomhedsanalyser ved at beregne ændringer i brændselsforbrug, CO₂-udslip og økonomiske omkostninger som følge af ændringer af de forskellige variabelsæt (makrovariable), som repræsenterer de forskellige systemegenskaber.

7. SESAM-databasens indhold

For en nøjere beskrivelse af en SESAM-databases indhold henvises til SESAM - bogen. Her skal kun gives en summarisk beskrivelse af indholdet i databasens filer, med det formål at formidle et indblik i de mange forskellige størrelser og forhold, der indgår i specifikationen af energisystemet i dets nuværende tilstand og de mulige fremtidige forandringsforløb.

Som nævnt i afsnit 6.1 er data i almindelighed tidsrække-data med alternative fremtidige værdier.

1. Bygningsmassen

Bygningsregistret i modellen af det danske energisystem er en opdateret udgave af Energistyrelsens EnergiDatabase (1995). Det indeholder data for den danske bygningsmasse fordelt på landets knap 5000 energidistrikter. For hvert energidistrikt indeholder registret en række poster, der for de forskellige bygningstyper og anvendelseskategorier angiver etageareal, nuværende opvarmningsform, m.m.

2. Geografisk strukturering

I den geografiske struktureringsfil angives de 10 forsyningsområder og 70 lokale energisystemer, energisystemet i denne model er opdelt i, se tabel 7.1. Et forsyningsområde omfatter et antal lokale energisystemer, som hvert især er bestemt ved de energidistrikter, det omfatter.

For hvert lokalsystem er den nuværende fjernvarme- og/eller naturgasdækning specificeret.

3. Generelle forbrugsudviklingsdata

I denne fil specificeres den samlede vækst i opvarmede bygningsarealer fordelt på forbrugerkategorier. Endvidere specificeres væksten i industriel produktion og generelle energieffektivitets-faktorer for industrielle produktionsprocesser. (Energiforbrug i enkelte industrivirksomheder eller grupper af industrivirksomheder kan specificeres særskilt, se pkt. 14, Industrielle procesanlæg, nedenfor).

4. Fremtidige bygninger

I denne fil specificeres hvordan tilvæksten i bygningsmassen fordeler sig på energisystemets lokale energisystemer, forbrugerkategorier og bygningskategorier.

5. El-apparater og elektriske maskiner

For de forskellige typer af el-apparater og elektriske maskiner specificeres:

- tekniske data: det gennemsnitlige specifikke el-forbrug for den nuværende bestand, for de apparater, der i dag sælges på markedet, og for modeller, der kan komme på markedet i fremtiden.

For hver forbrugerkategori specificeres for hver af de forskellige apparat- og maskintyper:

- den historiske bestandsudvikling, som ligger til grund for beregninger af udskiftninger i de kommende år.

Endvidere specificeres forskellige scenarier for bestandsudvikling og udskiftninger, som medfører, at bestandssammensætningerne i en hurtigere eller langsommere takt bliver domineret af mere energieffektive apparater og maskiner.

KØBENHAVN	1101		2506	Struer
Kbh.Fjv.vand			2507	Lemvig
Kbh.Fjv.damp	1102		2508	Thyborøn
Kbh.Vestforbr	1103		2509	Nykøbing.M
Lyngby-Tårnbæk	1104		2510	Thisted
	1105	Ballerup	2606	Ebeltoft
	1106	Kbh.Omegn	2701	Hobro
STO.BYER.Ø	1201	Farum	2702	Aars
Frederikssund	1202		2704	Brønderslev
Frederiksværk	1203		2706	Hirtshals
	1204	Roskilde	2708	Sæby
	1205	Hillerød	2709	Skagen
	1206	Helsingør	2710	Dronninglund
	1207	Køge		
	1208	Holbæk	SMÅ.BYER.V	2801
	1209	Kalundborg	Små.byer.Vest	
	1210	Ringsted	LANDSBYE.V	2901
	1211	Sorø	Landsbyer.Vest	
	1212	Slagelse	LANDDIST.V	2911
	1213	Korsør	Landområder.Vest	
	1214	Næstved		
	1215	Vordingborg		
	1216	Nykøbing.F		
	1217	Nakskov		
	1218	Maribo		
	1219	Sakskøbing		
SMÅ.BYER.Ø	1301			
Små.byer.Øst				
LANDSBYE.Ø	1401			
Landsbyer.Øst				
LANDDIST.Ø	1501			
Landområder.Øst				
ST.BYER.V	2101	Odense		
	2102	Nyborg		
	2103	Svendborg		
	2106	Middelfart		
	2201	Vejle		
	2202	Fredericia		
	2203	Kolding		
	2301	Sønderborg		
	2302	Haderslev		
	2303	Aabenraa		
	2402	Esbjerg		
	2404	Varde		
	2502	Holstebro		
	2503	Herning		
	2504	Viborg		
	2505	Skive		
	2511	Ikast		
	2601	Horsens		
	2602	Skanderborg		
	2603	Silkeborg		
	2604	Aarhus		
	2605	Grenaa		
	2607	Randers		
	2703	Aalborg		
	2705	Hjørring		
	2707			
Frederikshavn				
MEL.BYER.V	2104	Fåborg		
	2105	Assens		
	2304	Tønder		
	2401	Ribe		
	2403	Skjern		
	2405	Bræmning		
	2501	Ringkøbing		

Tabel 7.1
I SESAM-modellen af det danske
energisystem indgår de her angivne
70 lokale energisystemer

6. Bygningstekniske data

Den nuværende bygningsmasse er opdelt i to alderskategorier: Bygninger opført før 1979 og bygninger opført efter 1979. Indenfor hver af disse to alderskategorier er bygningsmassen opdelt på 15 bygningskategorier, som er underopdelt på el-opvarmede bygninger og ikke-el-opvarmede bygninger. Fremtidige bygninger er opdelt på 6 forskellige kategorier. Filen indeholder en bygningsdata-post for hver af disse i alt 66 kategorier. En bygningsdata-post specificerer indetemperaturen; den specifikke varmetransmission gennem klimaskærmen ($W/(m^2 \cdot K)$); ventilationsvarmetabet; og solindfaldets variation over året.

Filen indeholder endvidere specifikationer af varmtvandsforbrug (liter per person per døgn, og koldt vands- og varmtvands-aftapningstemperatur) og specifikationer af den udnyttede varme fra el-apparater (såkaldt "gratisvarme").

7. Fremtidige ændringer af bygningers varmforsyning

Denne fil indeholder tabeller, der for hvert energidistrikt og for forskellige forbrugergrupper specificerer fremtidige ændringer i bygningernes opvarmingsform (individuelle opvarmningsanlæg af forskellig art, elvarme og fjernvarme).

8. Fjernvarmeforsyning

I denne fil angives for hvert lokalsystem de kraftvarme- og/eller fjernvarmeanlæg, der bidrager til fjernvarmeforsyningen og for hvert anlæg dets relative bidrag til forsyningen.

9. Forsyningsområde-specifikationer

Denne fil er ikke en datafil. Den indeholder erklæringer af de navne, der betegner de forsyningsanlæg af forskellige typer, som indgår i eller i fremtiden kan komme til at indgå i de enkelte forsyningsområder.

Endvidere navngives de industrielle procesanlæg, der kan indgå i et forsyningsområdes forsyningsystem, og det angives for hvert anlæg, hvilket lokalt energisystem det tilhører.

Også de vindkraftanlæg, solcelleanlæg og individuelle solfangeranlæg af forskellige typer, der kan indgå i de forskellige forsyningsområder, navngives.

Transportmidler betragtes som et særskilt "forsyningsområde". De transportmidler (biler, lastbiler, tog, skibe, fly), der kan indgå i energisystemet, navngives i denne fil.

10. Forsyningsanlæg (stationære energiomsætningsanlæg)

Denne fil indeholder specifikationer af sammensætningerne af de forskellige typer af forsyningsanlæg, der indgår i eller i fremtiden kan komme til at indgå i energisystemet. Et forsyningsanlæg kan være et individuelt anlæg eller et kollektivt anlæg. Det kan bestå af én eller flere energiomsætningsenheder:

- én eller flere motorer af forskellig type ("motor" anvendes som fællesbetegnelse for kraftmaskiner : stempelmotorer, gas- og dampturbiner, brændselsceller, m.fl.);
- et varmepumpeanlæg, evt. koblet til et geotermisk reservoir;
- én eller flere kedler af forskellige typer;
- et solfangeranlæg med sæsonlager;
- et biogasanlæg.

I kraftvarmeanlæg indgår et buffer-varmelager, der tjener til udligning af forskelle mellem varmeproduktion og -forbrug over døgnet.

Også elektrolyseanlæg til brintproduktion kan indgå i kollektive anlæg med fjernvarmeproduktion, hvor kølevarmen fra anlæggene kan bidrage til fjernvarmeproduktionen. Da der endnu ikke er grundlag for en nøjere specifikation af, hvor eventuelle fremtidige elektrolyseanlæg vil blive placeret, fordeles elektrolyseanlægskapaciteten på landets fjernvarmeanlæg i forhold til disses fjernvarmeproduktion.

Anlægsspecifikationerne indeholder ikke specifikationer af anlægskapaciteter. Kapaciteterne beregnes som de for systemets funktion under de over året varierende driftsforhold nødvendige kapaciteter.

11. Energiomsætningsenheder

I denne fil angives de tekniske data for de forskellige typer af stationære energiomsætningsenheder, der indgår i specifikationerne af forsyningsanlæggene, herunder de brændsler, der kan anvendes i de forskellige enheder.

Endvidere angives de tekniske data for motorer i transportmidler.

12. Biogasanlæg

De forskellige typer af biogasanlæg specificeres ved deres specifikke el- og procesvarmeforbrug og procestemperaturer.

13. Fjernvarmenet

Fjernvarmenettene i de forskellige lokale energisystemer specificeres ved fremløbs- og returtemperatur, omgivelsestemperatur (i Danmark normalt jordtemperaturen), en varmetabsfaktor, og det specifikke el-forbrug til pumper.

14. Industrielle procesanlæg

Større industrielle procesanlæg, specielt anlæg med egen el-produktion og anlæg, der kan levere fjernvarme, specificeres ved deres el- og procesvarmeforbrug og deres el-produktion og potentielle fjernvarmeproduktion. Endvidere kan energiforbrug i grupper af industrivirksomheder specificeres.

15 Vedvarende energikildeanlægstyper og individuelle solfangertyper

Vindmøller af forskellige typer specificeres ved deres specifikke produktion (kWh per kW installeret effekt) i årets forskellige måneder.

Solcelleanlæg af forskellige typer specificeres ved deres specifikke produktion (kWh per 1000 m²) i årets forskellige måneder.

Vandkraftanlæg specificeres ved den maksimale el-produktion (kWh), de kan levere i årets forskellige måneder, samt el-transmissionskapaciteten (kW) fra værkerne (f.eks. fra norske og svenske vandkraftværker).

Individuelle solfangeranlæg af forskellige typer specificeres ved deres varmeproduktion i årets forskellige måneder og deres specifikke el-forbrug.

16. Allokering af vedvarende energikildeanlæg og individuelle solfangeranlæg

I denne fil angives for de forskellige vindmølletyper den installerede effekt og for de forskellige solcelleanlægstyper det installerede antal kvadratmeter. Anlæggene kan allokere til lokale energisystemer, således at deres produktion helt eller delvist udnyttes til at dække det lokale el-forbrug og, når det er hensigtsmæssigt, anvendes til drift af varmepumpeanlæg og/eller elektrolyseanlæg til brintproduktion. Eller de kan

allokeres til energisystemet som helhed, sådan at udnyttelsen af deres el-produktion reguleres centralt.

Solfangeranlæg allokeres til bygninger med forskellige opvarmningsformer, idet det specificeres hvor stor en del af varmtvandsforbruget, der i sommermånederne dækkes af solfangere.

17. Prioritering af el-produktion på de forskellige kraft- og kraftvarmeværker

Når el-produktionen over døgnet (GWh/døgn) i vindmøller og solcelleanlæg og den varmebundne el-produktion i kraftvarmeværker ikke er tilstrækkelig til at dække el-forbruget, skal den resterende el-produktion fordeles på systemets forskellige kraft- og kraftvarmeværker. Hvis omvendt el-produktionen i vindmøller og solcelleanlæg og den varmebundne el-produktion i kraftvarmeværker overstiger el-forbruget, skal el-produktionen i kraftvarmeværker så vidt muligt nedreguleres ved at igangsætte varmepumper i de kraftvarmeværker, der har varmepumper installeret, og varmepumpeproduktionen skal fordeles på disse kraftvarmeværker.

Ved denne fordeling skal der bl.a. tages hensyn til, at de brændselsmængder, der er til rådighed for biomasse-, biogas- og affaldsfyrede kraftvarmeværker er begrænsede. Fordelingsstrategien specificeres ved at tilskrive de enkelte kraft- og kraftvarmeværker en el-produktionsprioritet og at tilskrive værker med varmepumpeanlæg en varmepumpe-produktionsprioritet.

18. Last-prioritering af kraft- og kraftvarmeværker

Energiomsætningssystemets dimensionering, dvs. beregning af de for dets funktion under forskellige driftsomstændigheder nødvendige anlægskapaciteter (som er bestemmende for de økonomiske omkostninger) indebærer, at lastfordelingen på de forskellige kraft- og kraftvarmeværker sker på en sådan måde, at driften af systemet ikke kræver unødigt store anlægskapaciteter. Som summarisk beskrevet i afsnit 6.2 (modul 6) fordeles el-forbruget i varmepumper og elektrolyseanlæg i et givet døgn, sådan at den samlede døgn-produktionskurve for kraft- og kraftvarmeværkerne udjævnes mest muligt. Den således udjævnede samlede belastning skal derefter henover døgnet (f.eks. med 15 minutters intervaller) fordeles på kraft- og kraftvarmeværkerne.

Fordelingsstrategien specificeres ved at tilskrive hvert værk en last-prioritering, således at værker med de højeste prioriteter kommer til at levere grundlast, medens værker med de laveste prioriteter kommer til at levere spidslast.

19. Eksisterende forsyningsanlægskapaciteter

I de økonomiske omkostningsberegninger skal drifts- og vedligeholdelsesomkostninger i nuværende forsyningsanlæg indregnes. Denne fil indeholder specifikationer af anlægstyper og kapaciteter af de i udgangspunktet for scenarieberegningerne eksisterende anlæg.

20. Røggasrensningsanlæg

Specifikationer af røggasrensningsprocenter for SO₂ og NO_x i de forskellige værker, der er udstyret med røggasrensningsanlæg.

21. Transportmidler

Specifikationer af fremdriftmidler (forbrændingsmotorer, brændselsceller, el-motorer) i transportmidler af de forskellige arter og deres energitekniske parametre.

22. Transportmængder

Her specificeres person- og godstransportvolumener (i personkilometer og tonkilometer) og deres fordeling på de forskellige transportmidler.

23. Brændsler

For hver type af fossile brændsler og biomassebrændsler angives her de specifikke brændværdier og emissionsdata.

For biomassebrændsler og affald specificeres endvidere de til rådighed værende mængder og evt. de prioriteter mht. brændselstildelinger, der tilskrives de forskellige anlæg, som anvender disse brændsler. (Beregningsprogrammerne sikrer, at det samlede forbrug af de forskellige brændsler i fremtidige energisystemer ikke overstiger de til rådighed værende mængder).

24. Årlige variationer

Det er et generelt princip, at årlige variationer (af udetemperaturer, temperaturer i fjernvarmenet, vindkraftproduktion, el-forbrug, solindfald, etc. etc.) specificeres ved angivelse af den årlige gennemsnitsværdi eller maximumværdi og den årlige minimumværdi med reference til en variationsfunktion (årlig variationskurve), som angiver variationens form. I denne fil specificeres det sæt af forskellige variationsfunktioner, der kan refereres til i databasens forskellige poster.

25. Døgnvariationer

Til brug ved dimensioneringen af forsyningsanlæg (bestemmelse af de for systemets drift nødvendige anlægskapaciteter, som indgår i de økonomiske omkostningsberegninger) specificeres for hver af årets måneder nogle typisk forskellige døgnvariationer af el-forbrug, vindkraftproduktion, solindfald, el-import/eksport og varmekonsum.

De nødvendige anlægskapaciteter bestemmes ved at simulere systemets drift under de for el-produktion og belastning givne prioriteter (se 17 og 18 ovenfor) i 36 karakteristisk forskellige døgnvariationstilfælde.

26. Specifikke økonomiske omkostninger

Denne fil indeholder de i afsnit 6.4 ovenfor nævnte "prissedler", d.e. dataposter, der specificerer de specifikke økonomiske omkostninger, der knytter sig til anlæg af forskellige typer og tekniske forbedringer af forskellig art. Endvidere indeholder den brændselsprisspecifikationer.

8. Alternative strategier for udviklingen i de kommende årtier

I de foregående kapitler er det beskrevet, hvad en konstruktiv tilgang til løsning af forsyningssikkerheds- og CO₂-problemerne på en samfundsøkonomisk hensigtsmæssig måde indebærer. Fremgangsmåden er som i andre store projekter, at ingeniører udarbejder nogle teknisk mulige alternativer og belyser deres miljømæssige og samfundsøkonomiske konsekvenser. Disse alternativer fremlægges for befolkningen og dens politiske beslutningstagere, som efter at have studeret de fremlagte alternativer kan anmode om også at få andre alternativer belyst. På den måde udvikles et beslutningsgrundlag for en strategisk planlægning i en demokratisk proces, hvor mange forskellige hensyn kan gøres gældende.

Det kan være, at en sådan tilgang til løsning af problemerne er utopisk, så længe den gængse anskuelse af problemerne er indskrænket til den forståelsesramme, der udstikkes af den opfattelse, at "energi" er en fællesbetegnelse for varer, der som andre varer skal handles på et frit marked. At der i denne situation ikke er andet at gøre, end at forlade sig på forhåbninger om, at "markedets usynlige hånd" på én eller anden måde uden dirigent og nodeblade vil kunne dirigeres til at spille i akkorder, der ikke udvikler sig til den kakofoni, der bliver resultatet, hvis den basale infrastruktur, energisystemet udgør, ikke længere kan fungere på grund af forsyningsbegrænsninger, og/eller hvis følgerne af klimaændringer underminerer verdensøkonomien.

Desuagtet fremlægges i dette kapitel nogle eksempler, der viser nogle mulige alternative fremtidige udviklingsforløb, og dermed kan tjene til at demonstrere, hvordan information om energipolitikken teknologiske råderum kan tilvejebringes og formidles. De beskrevne scenarier er ikke fiktive, og der er ikke tale om forudsigelser af den fremtidige udvikling. Der er i overensstemmelse med almindelig ingeniørmæssig praksis tale om at belyse, hvad der vil kunne opnås med forskellige konstruktioner, dvs. ved at gennemføre forskellige investeringsprogrammer under givne forudsætninger om de belastninger i form af energiforbrug af forskellig art, som konstruktionen skal kunne bære.

Når det politiske formål er forsyningssikkerhed og nedtrapning af CO₂-udslippet, er det som forklaret i kapitel 5 en forudsætning for sådanne konstruktionsanalyser, at det energisystem, der er genstand for analysen - in casu det danske energisystem - udgør et relativt lukket system, dvs. at netto el-import/eksport fra/til systemets omverden ikke i væsentlig grad påvirker analysens relevans med hensyn til dens formål. Derfor kan kun de scenarier, hvor netto el-import eller -eksport over året begrænses til et minimum, betragtes som relevante for beskrivelsen af energipolitikken teknologiske råderum.

Indledningsvist skal det endvidere bemærkes, at det i beregningerne er forudsat, at det danske energisystem udgør et sammenhængende system, og således implicit at Øst- og Vestdanmark forbindes med et Storebæltskabel.

8.1 Målsætning

Målsætningen er som hidtil at sikre den nødvendige energiforsyning, dvs. at opretholde forsyningssikkerheden, med de lavest mulige omkostninger. Ikke kun i de nærmeste år, men indenfor en overskuelig planlægningshorisont, dvs. den forventede levetid af de store infrastrukturinvesteringer, der planlægges gennemført. Planlægningshorisonten må derfor ligge 25 - 30 år ude i fremtiden.

Indenfor den periode er det altovervejende sandsynligt, at den globale olieproduktion vil toppe og derpå begynde at falde med mindst 2% om året. Det vil medføre uforudsigeligt høje oliepriser, med mindre der indtræder en voldsom global økonomisk recession.

For at begrænse risikoen for at den globale opvarmning accelererer og skaber andre uoverskuelige problemer for den globale økonomi, er der med Kyoto-protokollen opnået omfattende global konsensus om initiativer til begrænsning af CO₂-udslippet. Kyoto-aftalerne frem til 2012 er dog kun en spæd begyndelse til en nedtrapning, der kan få væsentlig betydning for en begrænsning af risikoen for global opvarmning. Der skal meget mere til.

Under disse omstændigheder er der en stor risiko - for ikke at sige altovervejende sandsynlighed - for, at det bliver overordentligt dyrt, hvis ikke både penge- og ressourceøkonomisk umuligt, at opretholde samfundets funktioner, hvis ikke både økonomiens olie-afhængighed og CO₂-udslippet nedtrappes i en relativt hurtig takt.

Udgangspunktet for de undersøgelser af forskellige udviklingsstrategier, der er beskrevet ved de her fremlagte scenarie-beregninger, har derfor været at finde frem til konstruktioner af det danske energisystem, der under de antagne forudsætninger om vækst i energiforbrugende materiel omsætning, opfylder det stipulerede mål: *at formindske både olieforbruget og CO₂-udslippet med mindst 50% før 2030.*

Det må forventes, at også den globale naturgasproduktion begynder at falde (måske mere brat end olieproduktionen) om ikke før så i 2030'erne. Derfor skal også naturgas-afhængigheden nedtrappes så meget som muligt.

8.2 Fremtidig vækst i energiforbrugende materiel omsætning

Den energiforbrugende materielle omsætning sker i bygninger (opvarmning, elforbrug), i transportmidler, i bygge- og anlægsvirksomheder, fremstillingsvirksomheder og i landbruget. Der er ikke tale om energiforbruget, men om omsætning, der indebærer et energiforbrug. Hvis der i fremtiden sker en energieffektivisering af bygninger, energiforbrugende udstyr og transportmidler, vil energiforbruget vokse i en langsommere takt end kvantiteterne af de faciliteter, der indgår i denne kvantitative omsætning.

Hvis omsætningen vokser i takt med en økonomisk vækst på omkring 2% om året, vil den i 2030 være 75% større end i dag og i 2040 mere end dobbelt så stor. Der er ikke i dag nogen udsigt til, at målet kan nås, hvis væksten bliver så stor - og det er svært at forestille sig, hvad en så stor omsætningsforøgelse skulle tjene til. Befolkningstallet forventes jo ikke at stige væsentligt.

Der må derfor tilstræbes en omlægning af indholdet i den økonomiske vækst, sådan at væksten i højere grad sker ved investeringer, der tjener til at opfylde den energipolitiske målsætning, end ved investeringer i fortsat vækst i den energiforbrugende materielle omsætning.

Væksten i denne omsætning er derfor i de her beskrevne scenarier begrænset til en lineær vækst på ca. 1.4% p.a. af den nuværende omsætning, for boligmassen kun ca. ½ % p.a., se tabel 8.4. Dog er der i transportsektoren regnet med en kraftigere vækst, se afsnit 8.11 og tabel 8.5.

8.3 Energisystemets afgrænsning

Det her betragtede energisystem omfatter ikke

- olie- og gasudvindingsanlæg i Nordsøen
- raffinaderier
- udenrigsluftfart
- maskiner i bygge- og anlægssektoren
- landbrugsmaskiner.

Det beregnede olie- og naturgasforbrug og det beregnede CO₂-udslip i 2002 er derfor mindre end i Energistyrelsens opgørelser for det samlede energisystem.

8.4 Fem alternative strategier

De i det følgende fremlagte resultater af fem forskellige scenarie-beregninger tjener til at belyse det brede spektrum af forskellige strategier for den fremtidige udvikling af det danske energisystem og til at tegne et billede af, hvad der skal til for at nå det ovenfor stipulerede mål. De fem forskellige strategier og de tilsvarende scenarier har betegnelserne S1, S2, S3, S4 og S5.

		S1	S2	S3	S4	S5
Vindkraft udbygges til	MW		5500			7600
	TWh/år		11			16
Solceller i 2030	Mill. kvm		0			16
	TWh/år		0			2
Effektivisering af energiomsætnings- og transmissionssystemet. Se tabel 8.3	Indsats:	Svag	Større		Størst	
Kollektive solfangere tilkoblet nogle kraftvarmeværker. Varmeproduktion i 2030	PJ/år		0			16
Energibesparelser i forbrugssystemet Se tabel 8.4			Meget begrænsede		Omfattende	
Indførelse af mere energieffektive transportmidler Se tabel 8.5			I meget begrænset omfang		I stort omfang	
Netto el-eksport til udlandet i 2030 Se figur 4.	TWh/år	15		Ubetydelig		

Tabel 8.1 Karakteristiske forskelle mellem de fem scenarier.

Hovedresultaterne af scenarie-beregningerne er vist i tabel 8.11 og i diagrammerne 1 - 6.

8.5 Energiomsætnings- og transmissionssystemet

I tabel 8.3 gives en oversigt over de ændringer af energiomsætnings- og transmissionssystemet, der finder sted i de fem scenarier.

I S1 eksporteres den overskydende kraftressource, der i form af el-produktion udover el-forbruget er opnået ved investeringer i vindmøller og kraftvarmeværker. Da de opstillede forudsætninger om brændselsbesparelser i udlandet på grund af dansk el-eksport og de fremtidige priser, elektriciteten kan sælges til, er fiktive (jfr. kapitel 5), kan de i S1 beregnede reduktioner af CO₂-udslip i udlandet og de beregnede indtægter ved el-eksport kun betragtes som svagt indikative.

I S2 bruges overskydende kraft i el-patroner i kraftvarmeværkernes fjernvarmekredsløb, hvorved kraftoverskuddet samtidigt nedbringes.

I S3, S4 og S5 nedreguleres forholdet mellem el- og varmeproduktion i kraftvarmeværker ved hjælp af varmepumper tilkoblet fjernvarmekredsløbene, og det derefter resulterende kraftoverskud bruges til brintproduktion.

Der opstår således ingen betydelig netto-el-eksport i scenarierne S2 - S5.

Forholdet mellem varmeproduktion fra og el-forbrug i et varmepumpeanlæg - den såkaldte effektfaktor - er i almindelighed større end 3. En el-patron svarer til en varmepumpe med en effektfaktor på 1. Den brændselsbesparelse, der for en given varmeproduktion opnås ved at nedregulere el-produktionen ved hjælp af el-patroner, er derfor kun ca. halvt så stor, som den brændselsbesparelse, der opnås ved hjælp af varmepumper. At brændselsforbruget i S3 er mindre end i S2 (se diagram 5) skyldes derfor delvist, at der i S3 bruges varmepumper, medens der i S2 bruges el-patroner.

I forhold til S2 nedbringes brændselsforbruget i S3 endvidere ved en yderligere udbygning af fjernvarmeforsyningen, sænkninger af temperaturerne i fjernvarmenet samt installation af individuelle mini-kraftvarmeværker i ca. 55% af de bygninger, der er tilsluttet naturgasnet. En mindre reduktion af brændselsforbruget opnås ved udnyttelse af geotermiske reservoirer.

I S4 og S5 investeres der i yderligere effektivitetsforbedringer og mulighederne for at nedregulere el-produktion øges ved installation af varmepumper i bygninger med mini-kraftvarmeværker, se tabel 8.3.

Det skal bemærkes, at der i S5, hvor vindkraftproduktionen forøges til 16 TWh om året i 2030 eller 65% af el-forbruget, bliver tale om små benyttelsestider for de decentrale kraftvarmeværkers kraftmaskiner, fordi en stor del af varmeproduktionen dækkes af varmepumper. Udskiftningen af gasmotorer med SOFC-brændselsceller har derfor i S5 kun en lille indflydelse på brændselsforbruget. Da brændselscellerne kan opbygges i stakke af enheder, der kan startes én ad gangen, kan brændselsceller have bedre reguleringsegenskaber end gasmotorer.

Forsyningsanlæg: **SØNDERBORG**

Aar: 2030

Enhed: PJ/år Enhed: MW

	2030	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Netto-varmeforbrug:	0.590	42.080	39.713	30.000	14.764	3.078	3.169	3.229	3.169	3.078	15.947	29.211	36.951
Varmedeforbr.e-anleg:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Indiv.solf.ydelse :	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
El-varme :	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
Prim.fjv.ledn.tab :	0.114	3.760	3.736	3.761	3.643	3.539	3.481	3.506	3.481	3.431	3.536	3.667	3.677
Fjv/ctr.varmedeforbr:	0.703	45.840	43.449	33.761	18.407	6.618	6.650	6.736	6.650	6.510	19.483	32.878	40.628
Fjv.solf.ydelse :	0.295	2.971	5.336	8.308	12.091	15.874	14.726	14.861	12.767	10.943	7.430	4.458	2.431
KV-varmedepumper :	0.380	37.876	33.725	22.408	5.357	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.328	32.925
Stand-alone varmedep:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Motor-varme :	0.025	1.962	1.749	1.316	0.496	0.325	0.363	0.179	0.255	0.324	0.000	0.723	1.777
Kedel-varme :	0.010	0.903	0.724	0.248	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.826
Elektrolyse-varme :	0.026	1.962	1.749	1.316	0.496	0.245	0.239	0.179	0.192	0.250	0.513	1.098	1.511
Fjv.fra processer+:	0.005	0.165	0.165	0.165	0.165	0.166	0.149	0.122	0.131	0.166	0.166	0.165	0.157
Proces fjv.oversk.:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fjv.fra processer-:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fra sæsonlager :	-0.000	0.000	0.000	0.000	-0.197	-9.992	-8.826	-8.605	-6.695	-5.174	11.374	14.107	14.008
Sæsonlager til VP :	-0.037	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-14.008
Fjv/ctr.varmedeprod.:	0.703	45.840	43.449	33.761	18.407	6.618	6.650	6.736	6.650	6.510	19.483	32.878	40.628
Sæsonvarmelager-kapacitet, 1000 m3 : 292													
El-forbrug :	0.175	6.083	5.958	5.621	5.354	5.369	5.351	5.182	5.391	5.137	5.347	5.512	6.104
El-forbrug,e-anleg:	0.002	0.021	0.037	0.058	0.085	0.111	0.103	0.104	0.089	0.077	0.052	0.031	0.017
El-forbrug,fjv.net:	0.006	0.365	0.346	0.269	0.146	0.052	0.052	0.053	0.052	0.051	0.155	0.262	0.324
El-forbr.fjv.kedel:	0.000	0.023	0.022	0.017	0.009	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.010	0.016	0.020
El-varme :	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
St.alone varmedepum.:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Transport :	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
El-ledningstab :	0.032	1.813	1.665	1.352	0.790	0.623	0.617	0.564	0.589	0.604	0.799	1.198	1.519
El-export :	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
El-forbrug ialt :	0.214	8.305	8.029	7.316	6.384	6.158	6.126	5.907	6.125	5.871	6.362	7.019	7.984
El-prod.motorer :	-0.115	-12.655	-11.101	-6.837	-1.260	0.076	0.118	0.000	0.060	0.071	0.000	-4.576	-7.524
El-prod.vindmøller:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
El-prod.solceller :	0.065	0.556	1.116	1.820	2.716	3.612	3.340	3.372	2.876	2.444	1.612	0.908	0.428
El-prod.vandkraft :	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
El-forbr.elektroly:	-0.197	-15.092	-13.457	-10.126	-3.814	-1.883	-1.839	-1.377	-1.476	-1.922	-3.950	-8.443	-11.623
El-produkt. ialt :	-0.247	-27.191	-23.442	-15.143	-2.358	1.805	1.619	1.995	1.460	0.593	-2.337	-12.111	-18.718

Tabel 8.2 Energibalanceregnskab for et lokalt energisystem med fjernvarme-solfangeranlæg og solceller.

8.6 Solfangeranlæg

I S5 indgår solfangeranlæg med sæsonlagre i nogle naturgasfyrede decentrale kraftvarmeværker. Som et eksempel på solfangerbidraget er energibalanceregnskabet for året 2030 for ét af disse værker er vist i tabel 8.2.

De i tabel 8.2 angivne negative værdier af “El-produktion i motorer” betyder, at el-produktionen i kraftvarmeværkets motor er mindre end el-forbruget i varmepumpeanlægget, dvs. at der undtagen i sommermånederne på månedsbasis sker en netto-“el-import” til anlægget. Dette skyldes den store el-produktion i vindmøller og solceller, se tabel 8.1 (S4).

I månederne april-september, hvor den samlede varmeproduktion i solfangeranlæg, motor, elektrolyseanlæg med tilskud af varme fra industrielle processer overstiger varmeforbruget, opvarmes sæsonlageret (negative værdier af “Fra sæsonlager”). I månederne oktober - december tømmes sæsonlageret (positive værdier af “Fra sæsonlager”). I december er nedkølingen aflageret så langt fremskredet, at yderligere nedkøling (til ca. 5 grader) sker ved at bruge lageret som varmereservoir for varmepumpen (værdien af “Fra sæsonlager til varmepumpe” er negativ, fordi den modregnes værdien af varme fra lageret. Der er ikke tale om et bidrag til varmeproduktionen, kun om at vise opvarmnings-tømningsforløbet i lageret. I andre tilfælde bliver lageret først “tømt” i januar - februar, og udnyttelse af lageret som varmereservoir for varmepumpen kan forløbe over flere måneder. Over året vil summen af “Fra sæsonlager” altid være nul, fordi lagertemperaturer altid vil være den samme, når opvarmningen begynder om foråret.

Selvom solfangeranlæg med sæsonlagre i tilfælde, som det i tabel 8.2 viste, på årsbasis dækker omkring 40% af det lokale kraftvarmeværks varmeproduktion, er den marginale reduktion af henholdsvis brændselsforbruget i det samlede energisystem og det samlede CO₂-udslip ved en forøgelse af solvarmeproduktionen med 1 PJ beskeden, se tabel 8.6. Det skyldes, at solfangeranlæggene medfører en formindskelse af den varmebundne el-produktion og dermed samtidigt en formindskelse af naturgasforbruget og en forøgelse af olieforbruget, fordi brintproduktionen bliver mindre.

8.7 El-effektregulering

På tidspunkter hvor summen af vindkraft-effekten, solcelle-effekten og den varmebundne el-effekt fra kraftvarmeværker (uden indkobling af varmepumper) overstiger effekt-forbruget i forbrugssystemet afbalanceres produktions- og forbrugs-effekt ved:

- 1) indkobling af varmepumper i kraftvarmeværker, sådan at effekt-ydelsen fra kraftvarmeværker med varmepumpeanlæg (i S2 el-patroner, se afsnit 8.5) så vidt muligt tilpasses effekt-forbruget i forbrugssystemet. Hvis der efter indkobling af varmepumper stadig er effekt-overskud, så
- 2) indkobles elektrolyseanlæg til brintproduktion. For elektrolyseanlæggene er der specificeret en bestemt årlig minimums-benyttelsestid, som sætter en øvre grænse for deres kapacitet. (I de her beskrevne scenarier er minimums-benyttelsestiden sat

relativt lavt, nemlig til 2000 timer. Det betyder, at der i de økonomiske omkostningsberegninger indgår investeringer i store elektrolyseanlægskapaciteter, omkring 3000 MW i S4 og 4000 MW i S5. Se dog afsnit 8.8 nedenfor). Hvis der derefter stadig er effekt-overskud, så

- 3) eksporteres effekt til Norge og/eller Sverige, dvs. at produktionen i norske og svenske vandkraftværker nedtrappes, sådan at der bliver effekt-balance i det samlede europæiske system. På årsbasis modsvares eksporten af en import på andre tidspunkter. Den nødvendige samlede transmissionskapacitet i S5 (stor vindkrafteffekt, se tabel 8.1) er beregnet til ca. 1000 MW.

SESAM er ikke egnet til en egentlig kapacitets-dimensionering af de anlæg og transmissionsforbindelser, der indgår i effekt-reguleringen. Som nævnt i kapitel 6, afsnit 6.2, pkt. 6, og i kapitel 7, pkt. 25, foretages beregningerne af de nødvendige anlægskapaciteter kun med henblik på de økonomiske omkostningsvurderinger, idet der på timebasis gennemregnes 36 forskellige belastningstilfælde. Figur 8.1 viser to belastningstilfælde.

8.8 Brintproduktion og andre alternativer

Det er for tiden en udbredt opfattelse, at kemisk energi i form af brint i et større eller mindre omfang vil kunne erstatte kemisk energi i form af olie som drivmiddel i transportmidler. Der er imidlertid flere alternativer til kemisk energioverførsel til transportmidler. Der er i S3, S4 og S5 regnet med at 12% af personbilerne og 46% af busserne er el-drevne i 2030 (med batterier eller køreledninger), se tabel 8.5. Flasker med trykluft eller flydende luft kan også være måde at overføre drivkraft fra el-nettet til køretøjer, tog og skibe på.

I de her fremlagte scenarier skal brintproduktion ved elektrolyse opfattes som en beregningsmæssig repræsentation af ikke-elektrisk energioverførsel fra el-nettet til køretøjer. Investeringer i elektrolyseanlæg kan i praksis, hvis det er hensigtsmæssigt, erstattes med investeringer i f.eks. kompressionsanlæg eller flydende-luft-anlæg.

Som det fremgår af tabel 8.2, er brintproduktionen (eller andre former for energiproduktion til transport) ujævnt fordelt over året, stor om vinteren, lille om sommeren. Det betyder, at den beregnede kapacitet af elektrolyseanlæg, som indgår i de økonomiske omkostningsberegninger, bliver meget stor, og at der bliver behov for meget store brintlagringsanlæg. I praksis vil det være nødvendigt at udjævne produktionen over året ved el-eksport til Norge og Sverige om vinteren og import af de samme transmissionslinier om sommeren. En sådan udjævning kan indføres i modellen ved at indkorporere regulering af el-produktionen i norske og svenske vandkraftværker.

8.9 Forbrugssystemets stationære enheder

Tabel 8.4 viser udviklingsforløbene for forbrugssystemets stationære enheder. I S4 og S5 sker markeds-indtrængningen af nye, mere effektive el-apparater og elektriske maskiner i en hurtigere takt end i S1, S2 og S3. Derfor er el-forbruget i S4 og S5

faldende i hele scenarie-perioden, medens det i de andre tre scenarier stiger frem til 2016 for derefter at falde.

I S1, S2 og S3 forbedres varmeisoleringsstandarden kun i nye bygninger, hvorfor varmemeforbruget fortsat stiger. I S4 og S5 investeres der i betydelige varmeisoleringsforbedringer i den i 2002 eksisterende bygningsmasse. Derved reduceres det samlede varmemeforbrug i 2030 til 79% af forbruget i 2002.

I S5 scenariet er der endvidere indregnet en 5-dobling af varmeproduktion i individuelle solfangeranlæg til varmtvandsforsyning i forhold til 2002, sådan at produktionen i 2030 kommer op på 1.5 PJ.

8.10 El-apparater og biler

Medens vindmøller, solcelleanlæg, kraftvarmeværker, fjernvarmenet, jernbaner etc. er infrastrukturanlæg med lang levetid, er el-apparater og biler forbrugsenheder, som løbende udskiftes. Det er karakteristisk for den økonomiske tankegang i vores samfund, at f.eks. vindkraftens økonomi er genstand for megen debat, og at vindmølleindustrien må gøre sig store anstrengelser for at nedbringe de økonomiske omkostninger per produceret kWh, medens energiøkonomi ikke er et afgørende konkurrencemoment for el-apparat- og bilfabrikanter. Selvom det et langt stykke henad vejen er billigst at nedtrappe CO₂-udslippet og olieforbruget ved at udskifte el-apparater og biler med meget mere energiøkonomiske modeller.

Det er også bemærkelsesværdigt, at el-selskaber og industrivirksomheder pålægges begrænsninger af deres CO₂-udslip, medens der ikke er lovfæstede grænser for el-apparaters og bilers energiforbrug og CO₂-udslip. Uden EU-direktiver, der fastsætter sådanne grænser, vil el-apparatfabrikker og bilfabrikker ikke ombygge deres produktionslinier til produktion af langt mere energieffektive modeller. I hvert fald ikke før el- og oliepriserne stiger så meget, at der ikke længere er et marked for de nu markedsførte modeller.

Mere energieffektive modeller er ikke nødvendigvis væsentligt dyrere at producere, og forbrugerpriserne behøver ikke at stige væsentligt, med mindre kraftige stigninger i el- og oliepriserne skaber en efterspørgsel, som kan tillade producenterne at sætte priserne op.

Den samfundsøkonomiske omkostning ved at formindske el-forbruget og olieforbruget ved udskiftninger af henholdsvis el-apparater og biler med mere energiøkonomiske modeller vil derfor hovedsageligt skyldes, at den eksisterende el-apparatbestand og bilpark udskiftes i en lidt hurtigere takt end det normalt vil være tilfældet.

Der kan i SESAM-modellens omkostningsopgørelser medregnes specificerede omkostninger ved udskiftning af el-apparater og evt. også ved udskiftning af biler i en hurtigere takt end normalt. Det er imidlertid ikke gjort i de her fremlagte beregninger. Fordi det er vanskeligt at prissætte disse omkostninger. Fordi investeringer i udskiftninger, afhængigt af el- og oliepriserne kan give besparelser, som er tilstrækkelige til at dække afskrivning af de gamle enheder og forrentning af investeringerne. Og fordi der er tale om forbrugsgoder, som løbende udskiftes, og derfor ikke om opbygning af et varigt kapital, sådan som det er tilfældet for infrastruktur-investeringer og investeringer i bygningsforbedringer.

Berettigelsen af denne udeladelse kan måske diskuteres, men indregning af udskiftningsomkostninger til el-apparater vil ikke ændre de konklusioner, der kan drages af de her fremlagte samfundsøkonomiske beregningsresultater. Hvis merudgifter til en hurtigere udskiftning af el-apparater, sådan som det sker i S4 og S5, anslås at være 15,000 kr per husstand i 2 mill. husstande, bliver den samlede omkostning i perioden frem til 2030 i alt 30 mia.kr. Indregning af denne sum i de i tabellerne 8.8 - 8.10 viste opgørelser for S4 og S5 medfører ikke i noget af de tre brændselspris-tilfælde nogen signifikant ændring af de samlede omkostninger. Forudsat brændselspris-scenariet B2, bliver de samlede omkostning i S4 stadig mindre end i S2 og S3, og forudsat B3 bliver de samlede omkostninger i S4 og S5 stadig betydeligt mindre end i S2 og S3.

Tallene i tabel 8.11 ændres ikke ved indregning af omkostninger til en hurtigere udskiftning af el-apparater.

Den omstændighed, at der i S4 og S5 indgår en "gratis" formindskelse af el-forbruget, ændrer således ikke ved den konklusion, at beregningerne ikke giver grundlag for at antage, at opfyldelse af den i afsnit 8.1 stipulerede målsætning, vil være forbundet med samfundsøkonomiske meromkostninger.

8.11 Transport og transportmidler

Tabel 8.5 viser udviklingsforløbene på transportområdet for henholdsvis S1, S2, S3 (transport-scenarie T1) og S4 og S5 (transport-scenarie T2). Der er regnet med en overordentligt stor vækst i både persontransport-voluminet (53% forøgelse i 2030) og i godstransport-voluminet (86% forøgelse i 2030). I T1 er der endvidere regnet med, at vejtransport med personbiler og lastbiler udgør stigende andele af de samlede transportvolumener, medens der i T2 er regnet med, at offentlige transportmidler udgør en stigende andel af persontransporten og jernbaner og skibe overtager en større del af godstransporten.

Endvidere sker der i T1 kun små energiøkonomiske forbedringer af transportmidlerne, medens der i T2 sker en overgang til mere energieffektive benzin- og dieseldrevne køretøjer og til el-biler og biler med brint-drevne PEM-brændselsceller.

For ikke at kompromittere forsyningssikkerheden ved også at gøre transportsektoren afhængig af naturgas, er der ikke regnet med naturgas som brændstof i forbrændingsmotorer eller som drivmiddel i brændselsceller.

Anvendelse af biodiesel og ethanol fremstillet af biomasse som brændstof i transportmidler indgår ikke i de her beskrevne scenarier. Dette er begrundet i en formodning om, at det er mest hensigtsmæssigt at anvende de til rådighed værende mængder af fermenterbare faste biomassebrændsler i decentrale kraftvarmeværker fremfor at bruge dem til fremstilling af brændstof til transportmidler. Og at de mængder biodiesel og ethanol, det vil være hensigtsmæssigt at producere, kun kan dække hvad der svarer til olieforbruget i landbruget. Om denne formodning holder stik kan undersøges ved at gennemføre andre scenarie-beregninger, hvor betydelige dele af den til rådighed værende fermenterbare faste biomasse overføres fra kraftvarmeværker til biodiesel- og ethanol- produktion.

Den i scenarierne indregnede store vækst i transportvolumenerne må antages at være urealistisk. Olieforbruget i transportmidler i 2030 må derfor antages at blive mindre end i de her beskrevne scenarier. Det betyder, at det beregnede olieforbrug i 2030 også vil kunne dække forbruget i landbrug, fiskebåde (hvis der er nogen tilbage til den tid), i bygge- og anlægssektoren og tildels til udenrigsluftfart, som ikke er indregnet i de her beskrevne scenarier.

8.12 Sammenlignende samfundsøkonomiske analyser

Beregningerne af samfundsøkonomiske omkostninger sker som beskrevet i kapitel 6, afsnit 6.4. Ansættelse af fremtidige priser på kapitalgoder er naturligvis behæftet med stor usikkerhed. I nogle tilfælde vil priserne være for højt i andre for lavt ansatte. Når der som her er tale om flere hundrede prisansættelser, som knyttes til flere tusinde enheds-investeringer, hvis størrelser også er behæftet med usikkerheder, er det imidlertid i henhold til de store tals lov sandsynligt, at de for de forskellige scenarier beregnede samlede omkostninger giver et retvisende grundlag for sammenlignende omkostningsvurderinger, hvad angår omkostninger til kapitalgoder og til drift og

vedligeholdelse af disse - forudsat at markedspriser er udtryk for reale samfundsøkonomiske omkostninger.

Hvad angår brændselspriser er der tale om pengeoverførsler til private og nationale olie-, naturgas- og kulselskaber i et omfang, hvis størrelse er bestemt af udbud og efterspørgsel på det globale oliemarked, idet udviklingen af naturgas- og kulpriserne vil følge udviklingen af olieprisen.

For de i tabel 8.7 viste tre brændsels- og eksport-prisscenarier B1, B2 og B3 er resultaterne af omkostningsberegningerne for de fem scenarier S1 - S5 opstillet sideløbende i tabellerne 8.8 - 8.10. I de beregnede omkostninger indgår investeringer, reinvesteringer, udgifter til drift og vedligeholdelse af anlæggene samt brændselsudgifter.

Selv under den hypotetiske forudsætning, at brændselspriserne ikke stiger i de kommende år (pris-scenarie B1), modsvares de omkostninger, der knytter sig til de større investeringer i vedvarende energikilder, forsyningsanlæg og bygninger (varmeisolering), af besparelser på brændselsudgiftskontoen, sådan at de samlede omkostninger i 2030 i S4 og S5 ikke afviger signifikant fra omkostningerne i S2. Men CO₂-udslippet bliver omtrent halveret i S4 og S5 i forhold til S2. Se tabel 8.8.

Under forudsætning af stigende brændselspriser (B2 og B3) bliver de samlede omkostninger i S4 og S5 ikke større end i S2 - snarere lidt mindre forudsat B2 og signifikant mindre forudsat B3, se tabel 8.9 og 8.10.

Mere væsentligt er det imidlertid, at der i S4 og S5 opbygges et kapitalapparat som under alle de tre brændselsprisforudsætninger vedvarende formindsker energiforsyningens årlige omkostninger, se tabel 8.11.

Tabellerne 8.8 - 8.10 viser de opsummerede omkostninger (tilbagediskonteringsrente 0%) såvel som nuværdierne af omkostningerne ved en tilbagediskonteringsrente på 5%. Sammenligning af nuværdier er imidlertid kun relevant, når der er tale om alternative investeringsprogrammer, der i løbet af den givne scenarie-periode fører til det samme resultat. Det er ikke tilfældet her, fordi de i de forskellige scenarier opnåede resultater er meget forskellige, både hvad angår CO₂-reduktion, og hvad angår fremtidige driftsomkostninger, se tabel 8.11.

Det skal understreges, at investeringer i S5 ikke er økonomisk optimale. I scenarie-perioden investeres 49 mia. kr. i en forøgelse af den installerede vindkrafteffekt på 5000 MW, som giver en forøgelse af el-produktionen på 8 TWh/år. Derudover investeres 24 mia. kr. i solfangeranlæg med tilhørende sæsonvarmelagre, som kun giver en beskednen reduktion af brændselsforbrug og CO₂-udslip (se tabel 8.6 og afsnit 8.6). Endvidere er de nødvendige elektrolyseanlægs-kapaciteter og dermed investeringsbehovet i disse anlæg - 10 mia. kr. - overvurderet (se afsnit 8.8). Endvidere er den opnåede reduktion af olieforbruget formodentligt mindre end det i virkeligheden vil være tilfældet, fordi den antagne kraftige vækst i transportvolumener er urealistisk, se afsnit 8.11.

Selvom de beregnede investeringer i solcelleanlæg - 24 mia. kr. for i alt 16 mill. kvadratmeter, som producerer 2 TWh/år - måske er undervurderet, betyder dette alt i alt, at de beregnede omkostninger ved at opnå de i S5 beregnede reduktioner af henholdsvis brændselsforbrug og CO₂-udslip formodentligt er mindre end de i tabellerne 8.8 - 8.10 og tabel 8.11 viste.

9. Konklusioner

Den konklusion, der kan drages af beregningsresultaterne er, at konkrete, sammenlignende samfundsøkonomiske omkostningsvurderinger, dvs. vurderinger, der er baseret på de omkostninger, der knytter sig til konkret specificerede investeringsprogrammer, ikke bekræfter de konventionelle, teoretiske analysers resultater, som viser, at en betydelig formindskelse af CO₂-udslippet er forbundet med betydelige samfundsøkonomiske omkostninger. Tværtimod indikerer beregningsresultaterne, at der kan være store samfundsøkonomiske fordele ved at gennemføre investeringsprogrammer, der afstedkommer en betydelig formindskelse af CO₂-udslippet og dermed også en afgørende forbedring af forsyningssikkerheden.

For S4-scenariet viser beregningerne, at hvis

- den fremtidige vækst i energiforbrugende materielomsætning bliver som beskrevet i afsnit 8.2, 8.9 og 8.11 og i tabellerne 8.4 og 8.5 (S4), og
- den i tabel 8.1 og tabel 8.11 for S4 angivne vindkraftudbygning gennemføres, og
- de i tabel 8.3 for S4 angivne ændringer af energiomsætnings- og transmissionssystemet (se figur A) gennemføres, og
- de i afsnit 8.9 og tabel 8.4 beskrevne bygningstekniske forbedringer, udskiftninger af el-apparater og elektriske maskiner og effektiviseringer og omlægninger af industrielle produktionsprocesser realiseres, sådan at varme- og elforbruget nedbringes som angivet i tabel 8.11 og diagram 1 og 3 (S4), og
- der sker en transportteknologisk udvikling som beskrevet i afsnit 8.11 og tabel 8.5 (S4)

så vil CO₂-udslippet i 2030 være 42% af udslippet i 2002 og olieforbruget vil i 2030 være 59% af forbruget i 2002.

Uanset om der regnes med uændrede eller relativt kraftige brændselsstigninger bliver de beregnede samfundsøkonomiske omkostninger ikke større i S4 scenariet end i S2- og S3-scenarierne, og i S2 og S3 nedbringes CO₂-udslippet kun til henholdsvis 82% og 73% af 2002-værdien, medens olieforbruget i S2 og S3 stiger med henholdsvis 20% og 3%. (S1-scenariet udelades i scenarie-sammenligningerne på grund af den store el-eksport i dette scenarie, jfr. kapitel 5).

Endvidere er der i 2030 i S4 opbygget et kapitalapparat i energisystemet, som vedvarende formindsker de årlige energiforsynings-omkostninger i forhold til S2 og S3, se tabel 8.11. De således opnåede årlige besparelser på omkring 20 - 30 mia.kr./år kan helt eller delvist dække forrentning og afskrivning af de yderligere investeringer i modernisering af transport-infrastrukturen, der er indeholdt i T2 i forhold til T1, men ikke er indeholdt i omkostningsberegningerne (se tabel 8.5 og 8.11 (B2 og B3)).

I S5-scenariet investeres i en yderligere udbygning med vindkraft og i solcelleanlæg og solfangeranlæg, se tabel 8.1. I forhold til S4 opnås derved en yderligere formindskelse af CO₂-udslippet (til 37% af 2002-udslippet) og olieforbruget (til 55% af 2002-forbruget) med de samme langsigtede samfundsøkonomiske fordele som i S4.

Hvis den i beregningerne forudsatte urealistisk store vækst i transportvoluminer (svarende til hidtidige vækstprognoser) reduceres til en mindre, mere realistisk vækstrate, vil det beregnede olieforbrug i S4 og S5 i 2030 blive mindre end 50% af forbruget i 2002), og det samlede olieforbrug i 2030 incl. forbruget i de i afsnit 8.3 nævnte sektorer, som ikke indgår i beregningerne, kan antages at kunne reduceres til højst 50% af forbruget i 2002.

Den konklusion, der kan drages af disse beregningsresultater er, at konkrete, sammenlignende samfundsøkonomiske omkostningsvurderinger, dvs. vurderinger, der er baseret på de omkostninger, der knytter sig til konkret specificerede investeringsprogrammer, ikke bekræfter de konventionelle, teoretiske analysers resultater, som viser, at en betydelig formindskelse af CO₂-udslippet er forbundet med betydelige samfundsøkonomiske omkostninger. Tværtimod indikerer beregningsresultaterne, at der kan være store samfundsøkonomiske fordele ved at gennemføre investeringsprogrammer, der afstedkommer en betydelig formindskelse af CO₂-udslippet og dermed også en afgørende forbedring af forsyningssikkerheden.

Det er ikke overraskende, at beregningsresultaterne viser, at det under forudsætning af kraftigt stigende brændselspriser er økonomisk fordelagtigt at foretage investeringer, der afstedkommer betydelige formindskelser af brændselsforbruget. Det bemærkelsesværdige er, at det også under forudsætning af, at brændselspriserne forbliver på det nuværende lave niveau (brændselspris-scenarie B1), tegner til at være samfundsøkonomisk fordelagtigt at foretage sådanne investeringer. For det betyder, at det nuværende energisystem er langt fra det samfundsøkonomisk optimale. At priserne på fossile brændsler hidtil har været så lave, at de færreste for alvor har bestræbt sig på at holde energiforbruget nede, selvom det kan betale sig.

Energiforsyningen er vital for alle samfundets funktioner, men udgifterne til energiforsyning har i de sidste årtier kun andraget nogle få procent af husholdningernes og virksomhedernes budgetter og derfor været økonomisk uinteressant. Ligesom vandforsyningen. Under de omstændigheder er de samfundsøkonomiske besparelser, der kan opnås ved en økonomisk optimering af energisystemet også relativt små i forhold til BNP - og det vedbliver de med at være, selv hvis brændselspriserne stiger kraftigt. I S4 og S5 andrager de årlige besparelser i forhold til S2 og S3 i 2030 kun omkring 35 mia. kr. (tabel 8.11 brændselsprisscenarie B3) eller 3 - 4 % af BNP. Problemet er, at hvis forsyningen svigter, vokser denne procent voldsomt, fordi brændselspriserne stiger og BNP falder.

Derfor er den reale samfundsøkonomiske værdi af investeringer, der tjener til at opretholde forsyningssikkerheden og nedbringe CO₂-udslippet, af en helt anden størrelsesorden end resultaterne i tabel 8.11 viser.

Dertil kommer de fordele med hensyn til frugtbar beskæftigelse og placering i det teknologiske førerfelt, der ligger i at iværksætte en modernisering af det samlede energisystem.

Den komplementære konklusion, at det under energimarkedernes nuværende vilkår ikke lader sig gøre at planlægge og gennemføre en samfundsøkonomisk fordelagtig modernisering af det samlede energisystem og derved at forbedre

forsyningssikkerheden og nedbringe CO₂-udslippet, skal ikke drages her. Det er et politisk anliggende.

Men hvis folk og deres politikere eller - om man vil - politikerne og deres folk skal kunne danne sig et virkelighedstro billede af de teknologiske muligheder for ikke kun at leve op til Kyoto-aftalens beskedne forpligtelser frem til 2012, men på lidt længere sigt at opnå en betydelig formindskelse af CO₂-udslippet og dermed også at forberede sig på en fremtid, hvor olieproduktionen og derefter også gasproduktionen falder, så må der ske en revision og styrkelse af det informationsgrundlag, den politiske energiplanlægning hidtil har bygget på.

Efterskrift

I sin bog *The Logic of Scientific Discovery* (1959) skriver Karl R. Popper

...I shall certainly admit a system as empirical or scientific only if it is capable of being *tested* by experience. These considerations suggest that not the *verifiability* but the *falsifiability* of a system is to be taken as a criterion of demarcation. In other words: I shall not require of a scientific system that it shall be capable of being singled out, once and for all, in a positive sense; but I shall require that its logical form shall be such that it can be singled out, by means of empirical tests, in a negative sense: *it must be possible for an empirical or scientific system to be refuted by experience.*

.....

Not for nothing we call the laws of nature 'laws': the more they prohibit the more they say.

(op.cit. p. 40-41, 1975 ed.)

Man tør nok sige, at de makro-økonomiske teorier, der tages i anvendelse til at forudsige fremtiden, opfylder Popper's falsifikations-kriterium. De er igen og igen retrospektivt blevet *refuted by experience*. Men det er svært at tage de næste skridt ind i tågen uden forventninger om, hvad der kommer. Derfor bliver de mekanistiske makro-økonomiske teorier ikke forkastet og afløst af kaos-teorier. Det er jo ikke godt for aktiekurser og huspriser, hvis det 'økonomiske opsving' ikke forventes at være lige om hjørnet. Og enhver tanke om, at naturens love skulle indebære forhindringer, som moderne teknologi ikke kan overvinde, er *a priori* udelukket.

Den teori, at

Man is a prisoner of his own way of thinking and of his own stereotypes of himself.

Stafford Beer in *Platform for Change* (1975)

er endnu ikke blevet *refuted by experience*.

Derfor skal jeg også her bringe det Hubbert-citat, jeg fremhævede i min udredning *Oil-based Technology and Economy - Prospects for the Future* (Teknologirådet og IDA, april 2004, www.tekno.dk):

In 1976 M. King Hubbert (1903-1989) concluded his paper *Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History*¹⁹ with the following observations:

¹⁹ M. King Hubbert: *Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History*, 1974. www.hubbertype.com/hubbertype/wwf1976. Presented before the World Wildlife Fund, Fourth International Congress, The Fragile Earth, San Francisco, 1976.

“It appears therefore that one of the foremost problems confronting humanity today is how to make the transition from the precarious state that we are now in to this optimum future state by a least catastrophic progression. Our principal impediments at present are neither lack of energy or material resources nor of essential physical and biological knowledge. Our principal constraints are cultural. During the last two centuries we have known nothing but exponential growth and in parallel we have evolved what amounts to an exponential-growth culture, a culture so heavily dependent upon the continuance of exponential growth for its stability that it is incapable of reckoning with problems of nongrowth.

Since the problems confronting us are not intrinsically insoluble, it behooves us, while there is yet time, to begin a serious examination of the nature of our cultural constraints and of the cultural adjustments necessary to permit us to deal effectively with the problems rapidly arising. Provided this can be done before unmanageable crises arise, there is promise that we could be on the threshold of achieving one of the greatest intellectual and cultural advances in human history.”

Siden Hubbert i 1976 så klart beskrev den essentielle problematik, er den eksponentielle vækst fortsat uhæmmet. Spørgsmålet er, om der endnu er tid til at undgå forlis ved at lægge kursen om.

Med disse citater af Karl Popper, Stafford Beer og M. King Hubbert placeres denne rapport som et beskedent partikulært bidrag til belysningen af den historisk singulære situation, menneskeheden nu befinder sig i. Den lægger op til en diskussion af indholdet i de begreber, der ligger bag den gængse teknologiske diskussions terminologi, og viser resultater af et computer-eksperiment, der er gennemført med det formål, at belyse teknologiske udviklingsmuligheder og deres forventelige samfundøkonomiske konsekvenser.

Tabel 8.1 Karakteristiske forskelle mellem de fem scenarier. Se side 51

Tabel 8.2 Energibalanceregnskab for et lokalt energisystem med fjernvarme-solfangeranlæg og solceller. Se side 53

Energiomsætnings- og transmissionssystem (EOTS):	S1	S2	S3	S4 & S5
Skift fra kul til naturgas i centrale kraft- og KV-værker	*	*		
Fjernvarmedækning 2030 (*)	55%	55%	60%	62%
Sænkning af temperaturer i fjernvarmenet			+	+
Regulering af forholdet mellem el- og varmeproduktion i KV-værker: V.hj. af el-patroner i varmtvandsbeholdere: V.hj. af varmepumper:		*	*	*
Udskiftning af fjernvarmeværker med kraftvarmeværker	+	+	+	+
Mere biomassebrændsel i kraftvarmeværker				+
Skift til mini-KV i bygninger med naturgasfyr (**)			55%	85%
Varmepumper i mini-KV anlæg				*
Udskiftning af gasmotorer med SOFC-brændselsceller i decentrale KV-værker				*
Udnyttelse af geotermiske varmereservoirer i København, Slagelse og Thisted			*	*
Udnyttelse af overskydende el-produktion til brintproduktion i elektrolyseanlæg			*	*

(*) Procent af det samlede varmebehov der i 2030 dækkes af fjernvarme.

(**) Procent af antallet af bygninger i naturgasforsynede områder, der i 2030 har installeret PEM-brændselscelle-mini-kraftvarmeværker.

Tabel 8.3 Ændringer af energiomsætnings- og transmissionssystemet (EOTS) i de forskellige scenarier. Ændringerne er forskellige for de forskellige lokale energisystemer. For de her beskrevne fem scenarier kan ændringerne dog i hovedtræk angives som i denne tabel.

* betyder, at den pågældende teknologi indføres, + at den pågældende ændring finder sted i et vist omfang, ++ at den finder sted i et større omfang.

El-apparater		Index	2002=100	S1	S2	S3			
			2002	2009	2016	2023	2030		
Bestandsudvikling			100	119	130	135	138		
El-forbrugsudvikling			100	109	113	92	79		
Effektivitetsfaktor			1.00	0.92	0.87	0.69	0.57		
				S4	S5				
			2002	2009	2016	2023	2030		
Bestandsudvikling			100	119	130	135	138		
El-forbrugsudvikling			100	86	61	54	55		
Effektivitetsfaktor			1.00	0.72	0.47	0.40	0.40		
Bygningsmassen		Index	2002=100	S1	S2	S3			
			2002	2009	2016	2023	2030		
Opvarmet etageareal			100	104	110	114	119		
Netto varmeforbrug			100	100	102	108	113		
Varmeforbrug pr. m2			1.00	0.96	0.93	0.95	0.95		
				S4	S5				
			2002	2009	2016	2023	2030		
Opvarmet etageareal			100	104	110	114	119		
Netto varmeforbrug			100	101	104	91	79		
Varmeforbrug pr. m2			1.00	0.97	0.95	0.80	0.66		
				S1	S2	S3	S4	S5	
Industriel produktion		Index	2002=100						
			2002	2009	2016	2023	2030		
Produktionsmængder			100	105	115	121	130		

Talrækkerne for el-apparater og bygningsmassen viser de kvantitative og kvalitative udviklingsforløb i scenarierne S1, S2 og S3 henholdsvis S4 og S5.

Udviklingen i el-forbruget er beregnet for en lang række forskellige el-apparater og elektriske maskiner af forskellige typer. For hver type sker der sideløbende en vækst i bestanden og en udskiftning af gamle enheder til nye med en gennemgående bedre energieffektivitet. I S4 og S5 er effektivitetsforbedringerne større end i S1, S2 og S3, hvilket kommer til udtryk i mindre effektivitetsfaktorer. Bestandsudviklingen er det med hensyn til el-forbrug vægtede gennemsnit af væksten i apparater af forskellig type.

Varmeforbruget per kvadratmeter er det med hensyn til opvarmede arealer vægtede gennemsnit for de forskellige bygningstyper, der indgår i bygningsmassen.

Væksten i industrielle produktionsmængder er en faktor, der påføres energiforbruget i industrielle processer. Dette energiforbrug ændres samtidigt ved en gradvis, delvis overgang fra termiske processer til elektrisk manufaktur og en energieffektivisering af termiske

Tabel 8.4 Kvantitative og kvalitative udviklingsforløb for forbrugssystemets stationære enheder.

**Udvikling i transportvoluminer (person-kilometer, tons-kilometer)
fordelt på transportformer**

	2002	2009	2016	2023	2030
Persontransport Index 2002=100					
S1 S2 S3 (T1)					
Ialt	100	116	130	142	153
Personbiler	0.78	0.80	0.81	0.82	0.82
Offentlig transport	0.22	0.20	0.19	0.18	0.18
S4 S5 (T2)					
Ialt	100	116	130	142	153
Personbiler	0.78	0.78	0.77	0.70	0.65
Offentlig transport	0.22	0.22	0.23	0.30	0.35
Godstransport Index 2002=100					
S1 S2 S3 (T1)					
Ialt	100	121	142	164	186
Vare- og lastbiler	0.83	0.87	0.89	0.90	0.91
Tog og skib	0.17	0.13	0.11	0.10	0.09
S4 S5 (T2)					
Ialt	100	121	142	164	186
Vare- og lastbiler	0.83	0.85	0.83	0.78	0.74
Tog og skib	0.17	0.15	0.17	0.22	0.26

Transportteknologisk udvikling eksemplificeret ved personbiler og busser

PERSONBIL S1 S2 S3 (T1)	2002	2009	2016	2023	2030
Transportmængde:	100	119	135	148	160
Drivkraftforbrug per transportmængdeenhed:	100	100	100	100	100
Drivkraftfordeling:					
BENZINMOTOR:	0.91	0.91	0.91	0.89	0.87
DIESELMOTOR:	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
El-motor:	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04
Nyttevirkninger:					
BENZINMOTOR:	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20
DIESELMOTOR:	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22
El-motor:	0.78	0.78	0.79	0.81	0.83
PERSONBIL S4 S5 (T2)					
Transportmængde:	100	116	127	127	127
Drivkraftforbrug per transportmængdeenhed:	100	98	96	93	90
Drivkraftfordeling:					
BENZINMOTOR:	0.91	0.90	0.74	0.60	0.50
DIESELMOTOR:	0.09	0.09	0.07	0.06	0.05
El-motor:	0.00	0.01	0.04	0.08	0.12
Br.celle (brint):	0.00	0.00	0.16	0.26	0.33
Nyttevirkninger:					
BENZINMOTOR:	0.19	0.20	0.24	0.28	0.28
DIESELMOTOR:	0.21	0.22	0.27	0.30	0.30
El-motor:	0.78	0.78	0.79	0.81	0.83
Br.celle (brint):	0.40	0.40	0.41	0.42	0.42
BUS S1 S2 S3 (T1)					
Transportmængde:	100	101	103	109	116
Drivkraftforbrug per transportmængdeenhed:	100	100	100	100	100
Drivkraftfordeling:					
DIESELMOTOR:	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95
El-motor:	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05
Nyttevirkninger:					
DIESELMOTOR:	0.27	0.27	0.29	0.30	0.30
El-motor:	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92
BUS S4 S5 (T2)					
Transportmængde:	100	116	137	173	209
Drivkraftforbrug per transportmængdeenhed:	100	100	98	89	80
Drivkraftfordeling:					
DIESELMOTOR:	1.00	0.97	0.90	0.72	0.54
El-motor:	0.00	0.03	0.10	0.28	0.46
Nyttevirkninger:					

Tabel 8.5 Udvikling i transportvoluminer og transportteknologi i scenarierne S1 - S5.

Ændring af:	År	Forøgelse af brændselsforbrug PJ	Forøgelse af CO ₂ -udslip 10,000 tons
Varmeforbrug til rumopvarmning og varmt vand (*) + 1 PJ	2009	0.90 - 0.92	4.70 - 4.80
	2030	0.87 - 0.91	3.00 - 3.80
El-forbrug + 1 PJ	2009	1.90 - 2.14	15.4 - 18.7
	2030	1.76 - 1.86	9.2 - 12.0
Vindkraft - 1 PJ	2009	2.12 - 2.35	16.2 - 20.7
	2030	1.73 - 1.84	8.5 - 11.6
El fra solceller - 1 PJ	2009	2.33 - 2.34	19.5 - 20.3
	2030	1.77 - 1.91	8.8 - 10.7
Varmeproduktion i fjernvarme-solfangeranlæg - 1 PJ	2009	1.27	8.4 - 8.5
	2030	0.54 - 0.59	0.08 - 1.63

(*) Gennemsnit for alle bygninger. For bygninger, der opvarmes med fjernvarme fra KV-værker eller individuelle mini-KV-anlæg, er tallene mindre. For bygninger med individuelle fyr er tallene større.

Tabel 8.6 Marginale ændringer af brændselsforbrug og CO₂-udslip ved marginale ændringer af el- og varmekonsum henholdsvis ydelser fra vedvarende energikilder. Værdiintervallerne for 2009 og 2030 dækker de i forskellige scenarier fremkomne værdier.

Formålet med investeringer i energibesparende foranstaltninger og vedvarende energikilder er at nedbringe det fossile brændselsforbrug. Vurderinger af de ændringer af brændselsforbruget, der kan opnås ved marginale ændringer af henholdsvis varmekonsumet, el-forbruget og bidragene for vindmøller, solceller og solvarmeanlæg, er derfor af væsentlig interesse.

I forskellige scenarier kan det beregnes, hvor stor den marginale forøgelse af det samlede brændselsforbrug bliver ved marginale ændringer af disse størrelser. De her viste værdier er fundet ved successivt at beregne virkningerne af marginale ændringer i en række scenarie-forløb.

Forskellene mellem 2009- og 2030-værdiintervallerne skyldes, at såvel forholdene mellem forbrugsstørrelserne som energiomsætnings- og transmissionssystemets sammensætning og effektivitet er ændret i perioden 2009 - 2030.

Det skal bemærkes, at tallene gælder for det i dette tilfælde gennemregnede sæt af scenarier (i ingen af disse scenarier opstår en betydelig netto-el-eksport/import). De kan ændres noget i andre scenarie-forløb. De viser imidlertid, at i et integreret energisystem afhænger omkostningerne i form af brændselsforbrug og CO₂-udslip ved henholdsvis forbrugsforøgelser og formindskelser af inputs fra vedvarende energikilder af det samlede energisystems indretning. Generelt er tallene aftagende over scenarie-perioden.

Dette eksempel tjener således til understregning af, at summen af el- og varmekonsum henholdsvis summen af bidragene fra vedvarende energikilder i enhver henseende er irrelevante størrelser, jfr. kapitel 4, afsnit 4.6.

	Pris-scenarie	2002	2005	2010	2020	2030	2030 Procent af 2002
Kul (*) Kr/toe	B1	540	540	540	540	540	100
	B2	540	540	590	700	800	150
	B3	540	540	725	1100	1475	275
Olie (**) Kr/toe	B1	3300	3300	3300	3300	3300	100
	B2	3300	3900	4500	5100	5600	170
	B3	3300	3900	6100	7200	8300	250
Naturgas Kr/toe	B1	2100	2100	2100	2100	2100	100
	B2	2100	2500	2900	3300	3700	175
	B3	2100	2500	4100	4800	5600	270
El-eksport Kr/MWh	B1	150	150	150	150	150	100
	B2	150	150	165	195	225	150
	B3	150	150	200	300	410	270

(*) Afrundede gennemsnit af databasens tal for kul med forskelligt svovlindhold.

(**) Afrundede gennemsnit af databasens tal for fuelolie, gasolie, diesel og benzin.

Tabel 8.7 Brændsels- og el-eksport priser. Sammenfattende oversigt over de tre scenarier for fremtidig udvikling af brændsels- og el-eksportpriser, der indgår i de sammenlignende samfundsøkonomiske vurderinger.

Det skal understreges, at der ikke er tale om forudsigelser, men om forskellige pris-scenarier, der er opstillet med det formål at undersøge, hvordan de samfundsøkonomiske resultater afhænger af den fremtidige udvikling af disse priser. B1-scenariet, hvor der ikke sker nogen prisstigninger frem til 2030, er urealistisk.

I olieprisen indgår råolie, transport af råolie samt raffinering og distribution af olieprodukter.

Det skal bemærkes, at medens prissætningen af investeringer i kapitalgoder i teorien er udtryk for forbrug af råvarer og arbejdskraft, som har alternative anvendelsesmuligheder, og således er udtryk for samfundsøkonomiske omkostninger, er de fossile brændselspriser og el-import/eksportpriserne udtryk for overførsel af købekraft til private og nationale olie-, gas- og kulselskaber. Disse priser har intet at gøre med reale omkostninger ved ressourcernes tilvejebringelse, men er alene bestemt af forholdet mellem udbud og efterspørgsel og af kursen på den valuta, der handles i. Hvis OPEC-landene og Rusland beslutter sig til at handle olie og gas i Euro i stedet for dollar, vil dollar-kursen falde kraftigt i forhold til Euroen, og dollar-hegemoniet i verdensøkonomien vil være afsluttet.

CO2						
	10.000 tons	S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	4423	4441	4326	4094	4083
pro anno	2009-2015	4197	4281	4016	3292	3231
pro anno	2016-2022	3761	4056	3703	2638	2498
pro anno	2023-2030	3244	3792	3377	2082	1892
	2002-2030	112618	119784	111329	86822	83823
Økonomiske omkostninger 1000 million Dkr						
Brændselsprisudvikling B1 (uændrede priser)						
Ialt						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	48.45	48.58	50.27	50.77	51.37
pro anno	2009-2015	51.24	50.24	51.39	52.02	54.14
pro anno	2016-2022	74.35	70.09	69.26	67.94	71.12
pro anno	2023-2030	53.48	49.63	48.37	48.38	54.23
r= 0.0%	2002-2030	1646	1579	1583	1582	1670
r= 5.0%	2002-2030	869.2	843.7	853.6	856.3	892.4
Fossile brændsler						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	29.49	29.40	29.09	28.47	28.43
pro anno	2009-2015	31.84	31.50	30.57	27.24	26.90
pro anno	2016-2022	33.71	32.61	30.95	23.76	22.73
pro anno	2023-2030	34.98	32.74	29.91	19.51	17.97
r= 0.0%	2002-2030	945.2	916.5	873.6	712.3	690.2
r= 5.0%	2002-2030	504.4	493.8	476.3	412.0	403.6
Lokale brændsler						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.71	0.71	0.79	0.80	0.80
pro anno	2009-2015	0.80	0.80	0.96	0.99	0.99
pro anno	2016-2022	1.00	0.98	1.14	1.25	1.25
pro anno	2023-2030	1.18	1.13	1.29	1.61	1.46
r= 0.0%	2002-2030	26.98	26.40	30.48	34.21	32.96
r= 5.0%	2002-2030	13.63	13.43	15.48	16.81	16.45
El-import/export						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	-0.09	0.02	0.02	-0.11	-0.11
pro anno	2009-2015	-0.35	0.02	0.02	-0.15	-0.16
pro anno	2016-2022	-1.08	-0.04	-0.02	-0.03	-0.04
pro anno	2023-2030	-2.17	-0.09	-0.02	-0.03	-0.04
r= 0.0%	2002-2030	-28.03	-0.72	-0.01	-2.32	-2.50
r= 5.0%	2002-2030	-10.41	-0.11	0.11	-1.48	-1.58
Vedvarende energikilder						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	1.91	1.91	1.97	2.03	2.55
pro anno	2009-2015	2.12	2.12	2.26	2.41	4.77
pro anno	2016-2022	4.14	4.13	4.31	4.49	7.62
pro anno	2023-2030	2.53	2.53	2.61	2.67	8.38
r= 0.0%	2002-2030	77.41	77.42	80.71	83.88	171.7
r= 5.0%	2002-2030	38.61	38.61	40.30	41.98	78.37
Forsyningsanlæg						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	16.43	16.54	18.40	18.44	18.56
pro anno	2009-2015	16.83	15.80	17.57	19.90	20.01
pro anno	2016-2022	36.58	32.41	32.88	32.22	33.29
pro anno	2023-2030	16.96	13.32	14.57	14.46	16.29
r= 0.0%	2002-2030	624.6	559.8	598.6	609.6	633.4
r= 5.0%	2002-2030	322.9	298.0	321.4	330.3	339.0
Bygninger						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.00	0.00	0.00	1.13	1.13
pro anno	2009-2015	0.00	0.00	0.00	1.64	1.64
pro anno	2016-2022	0.00	0.00	0.00	6.26	6.26
pro anno	2023-2030	0.00	0.00	0.00	10.16	10.16
r= 0.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	144.5	144.5
r= 5.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	56.62	56.62

Tabel 8.8 Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse.
Brændselsprisudvikling B1.

CO2						
	10.000 tons	S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	4423	4441	4326	4094	4083
pro anno	2009-2015	4197	4281	4016	3292	3231
pro anno	2016-2022	3761	4056	3703	2638	2498
pro anno	2023-2030	3244	3792	3377	2082	1892
	2002-2030	112618	119784	111329	86822	83823
Økonomiske omkostninger 1000 million Dkr						
Brændselsprisudvikling B2 (moderate prisstigninger)						
I alt						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	53.26	53.38	55.01	55.39	55.98
pro anno	2009-2015	62.54	61.47	62.33	61.76	63.75
pro anno	2016-2022	90.55	86.01	84.44	79.63	82.28
pro anno	2023-2030	74.25	69.83	66.94	60.53	65.40
r= 0.0%	2002-2030	2038	1965	1948	1862	1937
r= 5.0%	2002-2030	1045	1017	1019	990.3	1022
Fossile brændsler						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	34.30	34.20	33.83	33.10	33.05
pro anno	2009-2015	43.19	42.73	41.50	36.98	36.52
pro anno	2016-2022	50.22	48.53	46.13	35.44	33.89
pro anno	2023-2030	56.66	52.97	48.48	31.64	29.13
r= 0.0%	2002-2030	1347	1302	1238	991.7	957.3
r= 5.0%	2002-2030	683.4	667.1	641.8	546.1	533.2
Lokale brændsler						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.71	0.71	0.79	0.80	0.80
pro anno	2009-2015	0.80	0.80	0.96	1.00	1.00
pro anno	2016-2022	1.01	0.99	1.15	1.27	1.26
pro anno	2023-2030	1.19	1.14	1.31	1.64	1.49
r= 0.0%	2002-2030	27.16	26.56	30.77	34.64	33.35
r= 5.0%	2002-2030	13.70	13.49	15.58	16.97	16.60
El-import/export						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	-0.09	0.03	0.02	-0.11	-0.12
pro anno	2009-2015	-0.40	0.02	0.03	-0.17	-0.18
pro anno	2016-2022	-1.39	-0.06	-0.02	-0.04	-0.05
pro anno	2023-2030	-3.10	-0.13	-0.03	-0.05	-0.05
r= 0.0%	2002-2030	-38.01	-1.10	-0.10	-2.67	-2.87
r= 5.0%	2002-2030	-13.76	-0.23	0.09	-1.65	-1.77
Vedvarende energikilder						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	1.91	1.91	1.97	2.03	2.55
pro anno	2009-2015	2.12	2.12	2.26	2.41	4.77
pro anno	2016-2022	4.14	4.13	4.31	4.49	7.62
pro anno	2023-2030	2.53	2.53	2.61	2.67	8.38
r= 0.0%	2002-2030	77.41	77.42	80.71	83.88	171.7
r= 5.0%	2002-2030	38.61	38.61	40.30	41.98	78.37
Forsyningsanlæg						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	16.43	16.54	18.40	18.44	18.56
pro anno	2009-2015	16.83	15.80	17.57	19.90	20.01
pro anno	2016-2022	36.58	32.41	32.88	32.22	33.29
pro anno	2023-2030	16.96	13.32	14.57	14.46	16.29
r= 0.0%	2002-2030	624.6	559.8	598.6	609.6	633.4
r= 5.0%	2002-2030	322.9	298.0	321.4	330.3	339.0
Bygninger						
		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.00	0.00	0.00	1.13	1.13
pro anno	2009-2015	0.00	0.00	0.00	1.64	1.64
pro anno	2016-2022	0.00	0.00	0.00	6.26	6.26
pro anno	2023-2030	0.00	0.00	0.00	10.16	10.16
r= 0.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	144.5	144.5
r= 5.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	56.62	56.62

Tabel 8.9 Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse.
Brændselsprisudvikling B2.

CO2	10.000 tons	S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	4423	4441	4326	4094	4083
pro anno	2009-2015	4197	4281	4016	3292	3231
pro anno	2016-2022	3761	4056	3703	2638	2498
pro anno	2023-2030	3244	3792	3377	2082	1892
	2002-2030	112618	119784	111329	86822	83823
Økonomiske omkostninger 1000 million Dkr						
Brændselsprisudvikling B3 (kraftigere prisstigninger)						
Ialt		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	58.99	59.11	60.66	60.87	61.45
pro anno	2009-2015	78.35	77.24	77.65	75.33	77.13
pro anno	2016-2022	112.4	107.8	105.1	95.50	97.44
pro anno	2023-2030	100.0	95.94	90.88	76.13	79.74
r= 0.0%	2002-2030	2548	2476	2431	2231	2290
r= 5.0%	2002-2030	1274	1247	1238	1167	1192
Fossile brændsler		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	40.04	39.92	39.47	38.58	38.53
pro anno	2009-2015	59.13	58.50	56.81	50.58	49.93
pro anno	2016-2022	72.80	70.32	66.81	51.28	49.02
pro anno	2023-2030	84.77	79.14	72.39	47.19	43.44
r= 0.0%	2002-2030	1882	1814	1721	1361	1310
r= 5.0%	2002-2030	921.1	897.0	860.6	722.4	703.5
Lokale brændsler		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.71	0.71	0.79	0.81	0.81
pro anno	2009-2015	0.81	0.80	0.97	1.01	1.01
pro anno	2016-2022	1.03	1.01	1.18	1.31	1.31
pro anno	2023-2030	1.23	1.17	1.36	1.72	1.56
r= 0.0%	2002-2030	27.60	26.98	31.50	35.73	34.34
r= 5.0%	2002-2030	13.87	13.65	15.86	17.38	16.98
El-import/export		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	-0.10	0.03	0.02	-0.13	-0.13
pro anno	2009-2015	-0.54	0.02	0.03	-0.22	-0.24
pro anno	2016-2022	-2.19	-0.09	-0.04	-0.06	-0.07
pro anno	2023-2030	-5.46	-0.23	-0.06	-0.08	-0.09
r= 0.0%	2002-2030	-63.48	-2.07	-0.34	-3.54	-3.83
r= 5.0%	2002-2030	-22.31	-0.52	0.03	-2.09	-2.24
Vedvarende energikilder		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	1.91	1.91	1.97	2.03	2.55
pro anno	2009-2015	2.12	2.12	2.26	2.41	4.77
pro anno	2016-2022	4.14	4.13	4.31	4.49	7.62
pro anno	2023-2030	2.53	2.53	2.61	2.67	8.38
r= 0.0%	2002-2030	77.41	77.42	80.71	83.88	171.7
r= 5.0%	2002-2030	38.61	38.61	40.30	41.98	78.37
Forsyningsanlæg		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	16.43	16.54	18.40	18.44	18.56
pro anno	2009-2015	16.83	15.80	17.57	19.90	20.01
pro anno	2016-2022	36.58	32.41	32.88	32.22	33.29
pro anno	2023-2030	16.96	13.32	14.57	14.46	16.29
r= 0.0%	2002-2030	624.6	559.8	598.6	609.6	633.4
r= 5.0%	2002-2030	322.9	298.0	321.4	330.3	339.0
Bygninger		S1	S2	S3	S4	S5
pro anno	2002-2008	0.00	0.00	0.00	1.13	1.13
pro anno	2009-2015	0.00	0.00	0.00	1.64	1.64
pro anno	2016-2022	0.00	0.00	0.00	6.26	6.26
pro anno	2023-2030	0.00	0.00	0.00	10.16	10.16
r= 0.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	144.5	144.5
r= 5.0%	2002-2030	0.00	0.00	0.00	56.62	56.62

Tabel 8.10 Omkostningsoversigt. Investeringer, drift og vedligeholdelse. Brændselsprisudvikling B3.

2002-værdier:			218	60	106	65	17	0	0.3	0	100	0		36	
Sce- narie År 2030	EOT Trans- port- midler		Varme- forbrug rum+v.v PJ	Varme- forbrug proces PJ	El- forbrug PJ	Bio- masse og aff. PJ	Vind- kraft PJ	Sol- celler PJ	Sol- fangere PJ	El- eksport PJ	CO ₂ Procent af 2002	Opbyg- get kapital Mia.kr	Brændsel Afskrivninger Vedligehold. Mia.kr I alt 2002-30 2030 B1		
S1	F1	T1	268	39	92	105	41	0	1	54	68	251	1395	55	
S2	F2	T1	268	39	92	99	41	0	1	3	82	219	1360	52	
S3	F3	T1	268	39	92	104	41	0	1	1	73	229	1354	50	
S4	F4	T2	198	39	77	122	41	0	1	1	42	368	1215	39	
S5	F5	T2	198	39	77	101	58	7	19	1	37	426	1245	42	
I S1 er (usikre) udenlandske CO₂-reduktioner samt (usikre) indtægter ved el-eksport (se tabellerne 8.8 - 8.10) indregnet. Brændselsprisudviklinger: se tabel 8.7. Opbygget kapital: Investeringer 2002 - 2030 minus løbende afskrivninger. Investeringer i transport-infrastrukturanlæg og transportmidler er ikke medregnet. Tabel 8.11 Sammenligning af de økonomiske resultater for scenarierne S1 - S5. Det fremgår, at investeringer, der nedbringer CO₂-udslippet, også nedbringer de årlige omkostninger til brændsel, afskrivninger og vedligeholdelse af kapitalapparatet. Selvom der i de kommende årtier kun skulle ske moderate brændselsprisstigninger (B2) bliver besparelsen på det årlige budget så stor, at der også er plads til de investeringer i transportsektoren, som ikke er medregnet i de her viste kapital-akkumuleringer. I S4 og S5 scenarierne kan de årlige besparelser i forhold til S2 og S3 scenarierne forrente investeringer på 200-400 mia. kr. i nye transport-infrastrukturanlæg (jernbaner og tog, sporvogne, mono-rails, havne, etc.). Det afgørende er imidlertid, at scenarierne S1 - S3, som indebærer de største omkostninger, må forventes at være ikke-bæredygtige - dvs. katastrofale - fordi der i disse scenarier er tale om en økonomi, der fortsat underminerer sit eget ressourcegrundlag og ikke nedbringer CO₂-udslippet tilstrækkeligt hurtigt til at begrænse risikoen for klimaforandringer med uforudsigelige økonomiske omkostninger til følge.											Brændselsprisudvikling B2				
											S1		251	1788	78
											S2		219	1746	74
											S3		229	1719	70
											S4		368	1494	51
											S5		426	1512	53
											Brændselsprisudvikling B3				
											S1		251	2297	105
											S2		219	2257	102
											S3		229	2202	95
											S4		368	1863	66
											S5		426	1864	67

Investeringer i:	Indikative værdier af CO ₂ -reduktion (10,000 tons)/Omkostninger (mia. kr.)		
	Brændselsprisscenarie (se tabel 8.7)		
	B1	B2	B3
Fjernvarme-solfangeranlæg	12	13	15
Solcelleanlæg	20 - 25	21 - 26	23 - 32
Efterisolering af bygninger	30 - 50	34 - 63	43 - 102
Vindmøller (*)	90 - 150	100 - 200	200 - 700

(*) I nogle scenarier er der ingen meromkostninger ved en marginal udbygning af vindkraftproduktionen.

Tabel 8.12 Omkostninger ved CO₂-reduktion. De angivne værdiintervaller dækker de forskellige værdier, der fremkommer i forskellige scenarier.

Omkostningerne ved at nedbringe CO₂-udslippet ved gennemførelse af brændselsbesparende investeringer af en bestemt art kan estimeres som den opnåede samlede ændring af CO₂-udslippet i perioden 2002 - 2030 divideret med de samlede samfundsøkonomiske meromkostninger, der i samme periode foranlediges af investeringerne. Tabellen viser nogle beregningsresultater i 10,000 tons CO₂/mia. kr. Da de samlede meromkostninger aftager med stigende brændselspriser, er værdierne størst for brændselsprisscenarie B3. Tallene afhænger endvidere af det tidsrum i scenarie-forløbene, hvori investeringerne foretages.

Selvom de beregnede værdier kun er indikative, viser de, at omkostningerne ved at nedbringe CO₂-udslippet ved investeringer i fjernvarme-solfangeranlæg, solceller og efterisolering af bygninger er væsentligt forskellige og meget større end for investeringer i vindmøller.

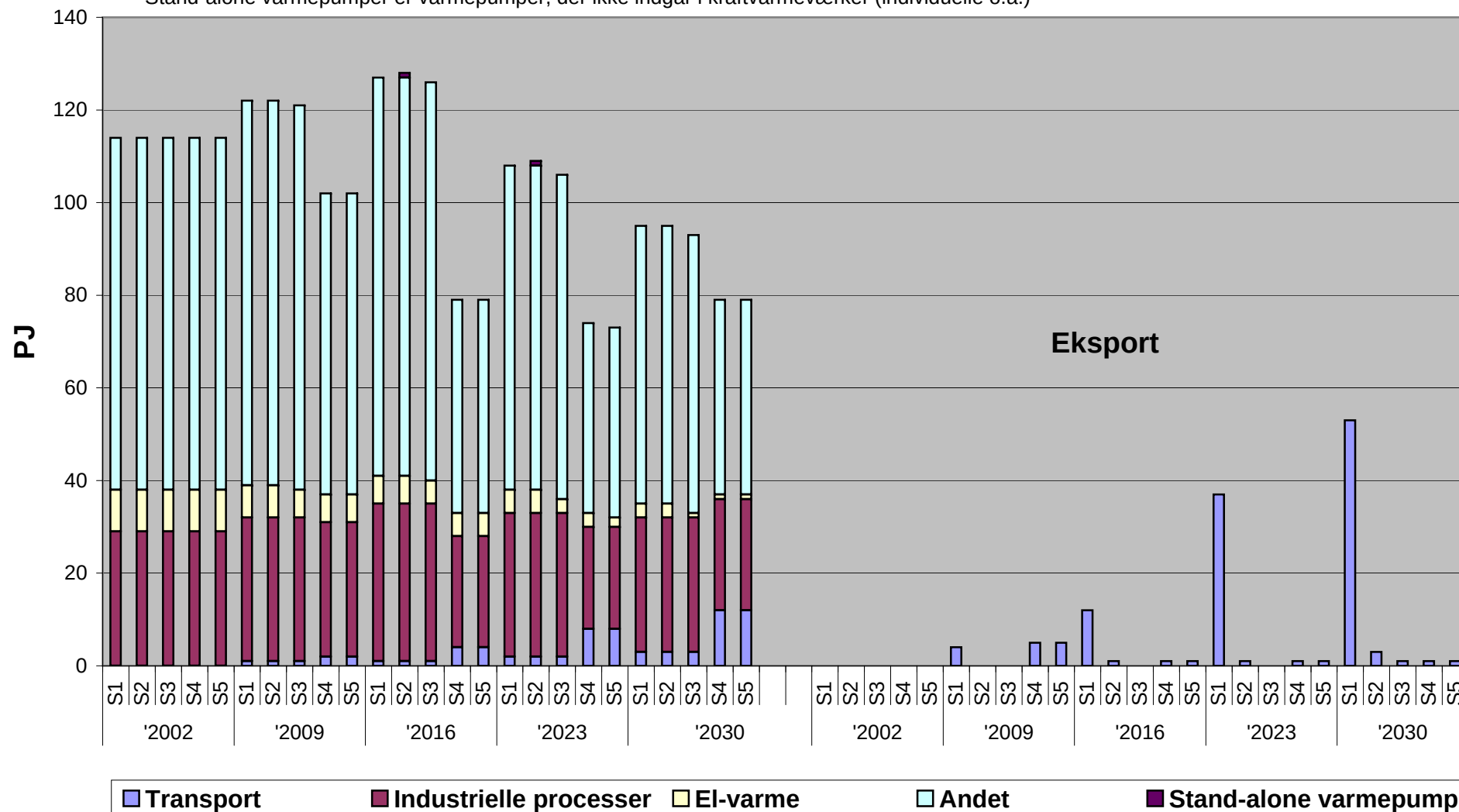
Det betyder ikke, at "det ikke kan betale sig" at investere i solenergianlæg og efterisolering af bygninger, for disse investeringer bidrager til at forbedre vindmølle-økonomien, og de er nødvendige elementer i et fremtidigt energisystem, der kan fortsat videreudvikles, sådan at nedtrapningen af det fossile brændselsforbrug videreføres.

Spredningerne af værdierne, angivet ved de viste værdiintervaller, viser, at omkostningerne ved CO₂-reduktion for en given brændselsprisudvikling afhænger af udviklingen af det samlede energisystem, hvori investeringerne foretages. Værdierne er tilmed påvirket af, hvorvidt en marginal merinvestering afstedkommer en marginal ændring af el-eksporten til udlandet.

El-forbrug og el-eksport

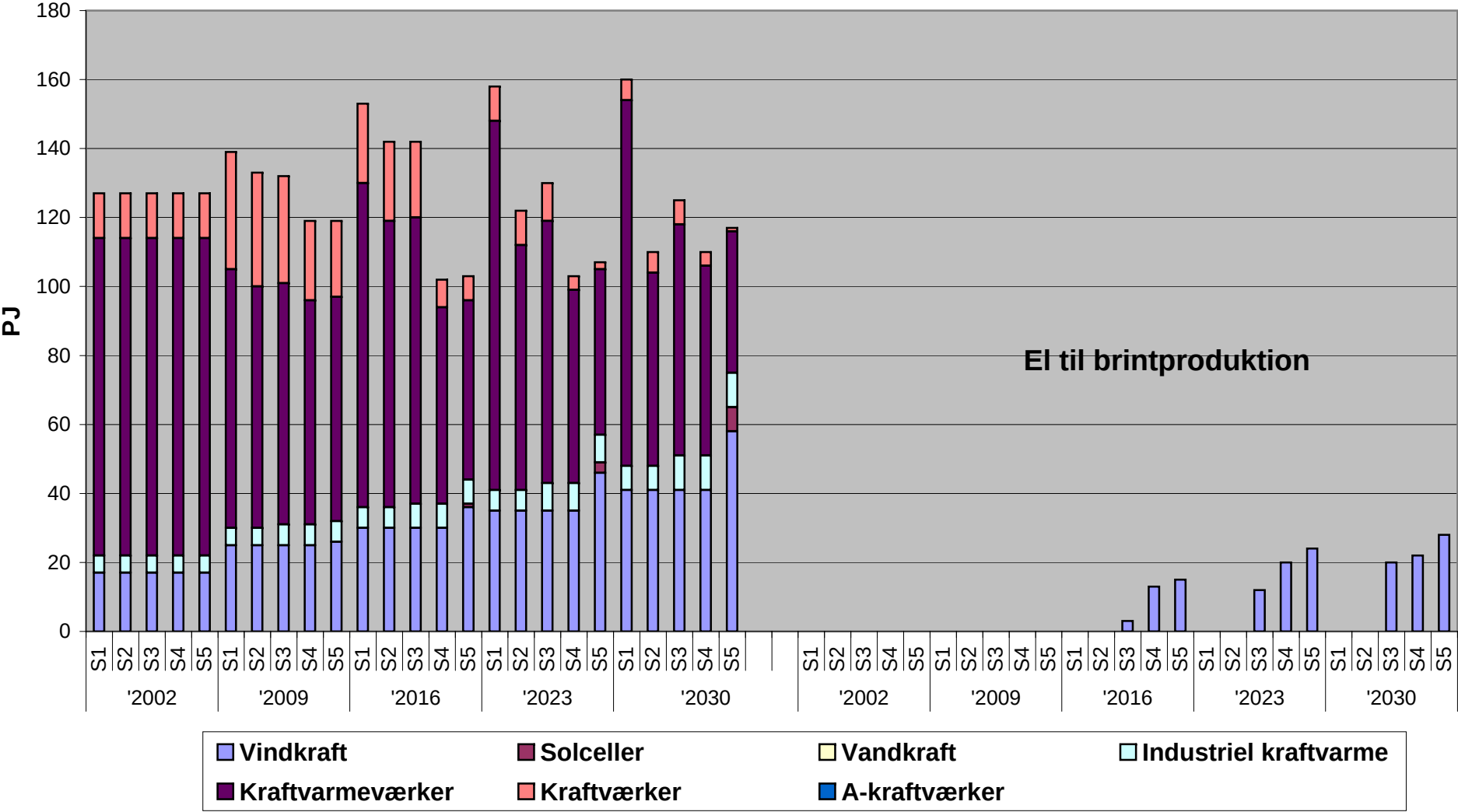
Diagram 1

Stand-alone varmepumper er varmepumper, der ikke indgår i kraftvarmeværker (individuelle o.a.)



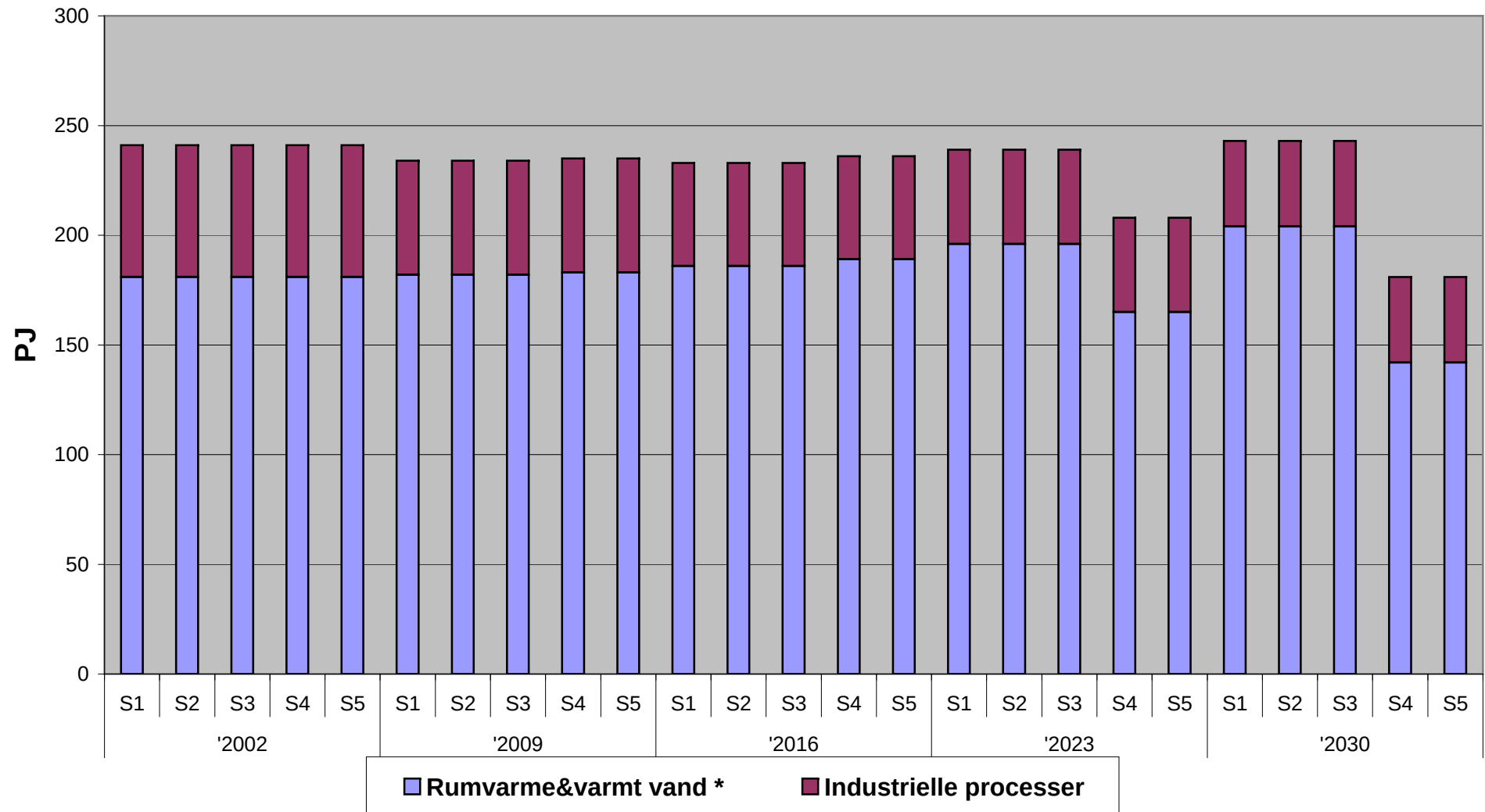
El-produktion

Diagram 2



Netto-varmeforbrug

Diagram 3

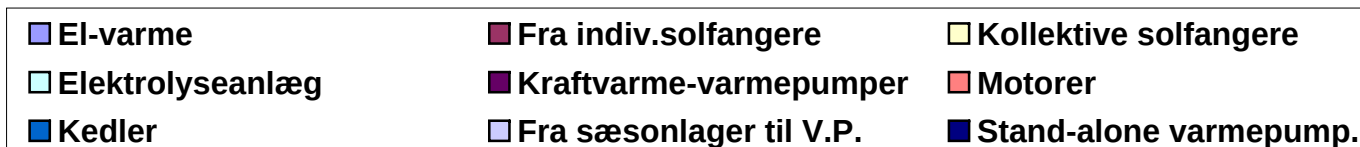
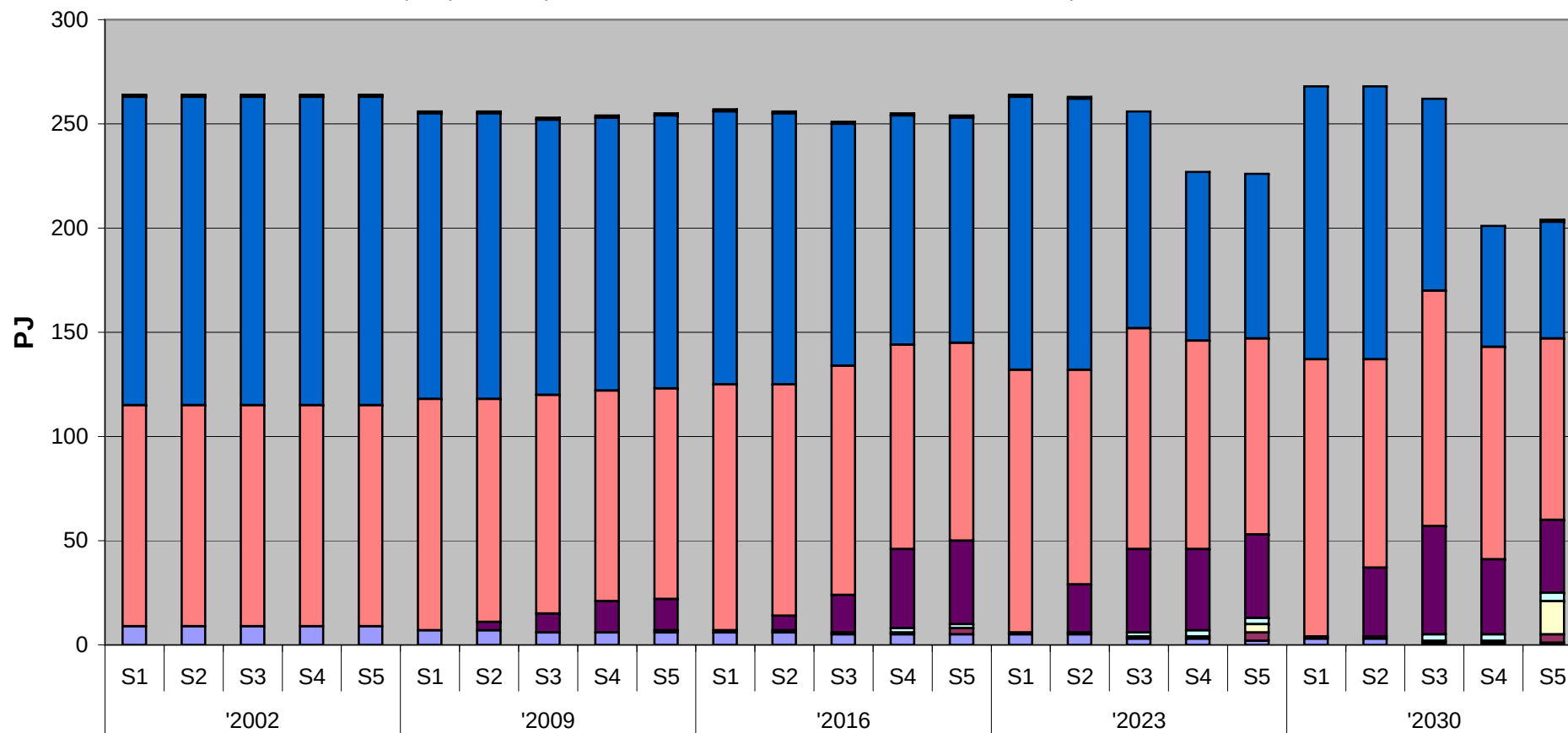


Varmeproduktion

Diagram 4

I S2 er står varmepumper for el-patroner

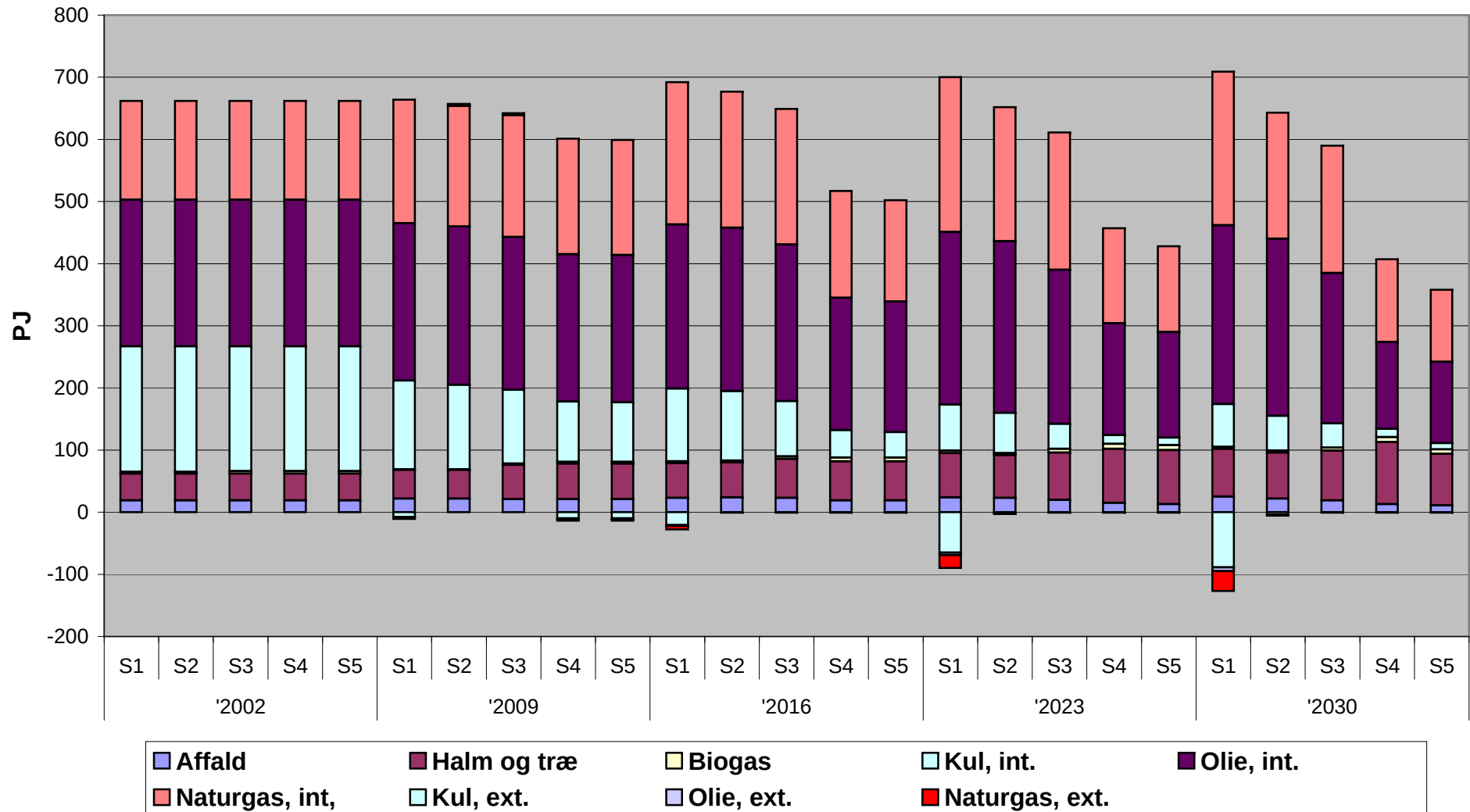
"Motorer": alle former for el-producerende kraftmaskiner



Brændselsforbrug

Diagram 5

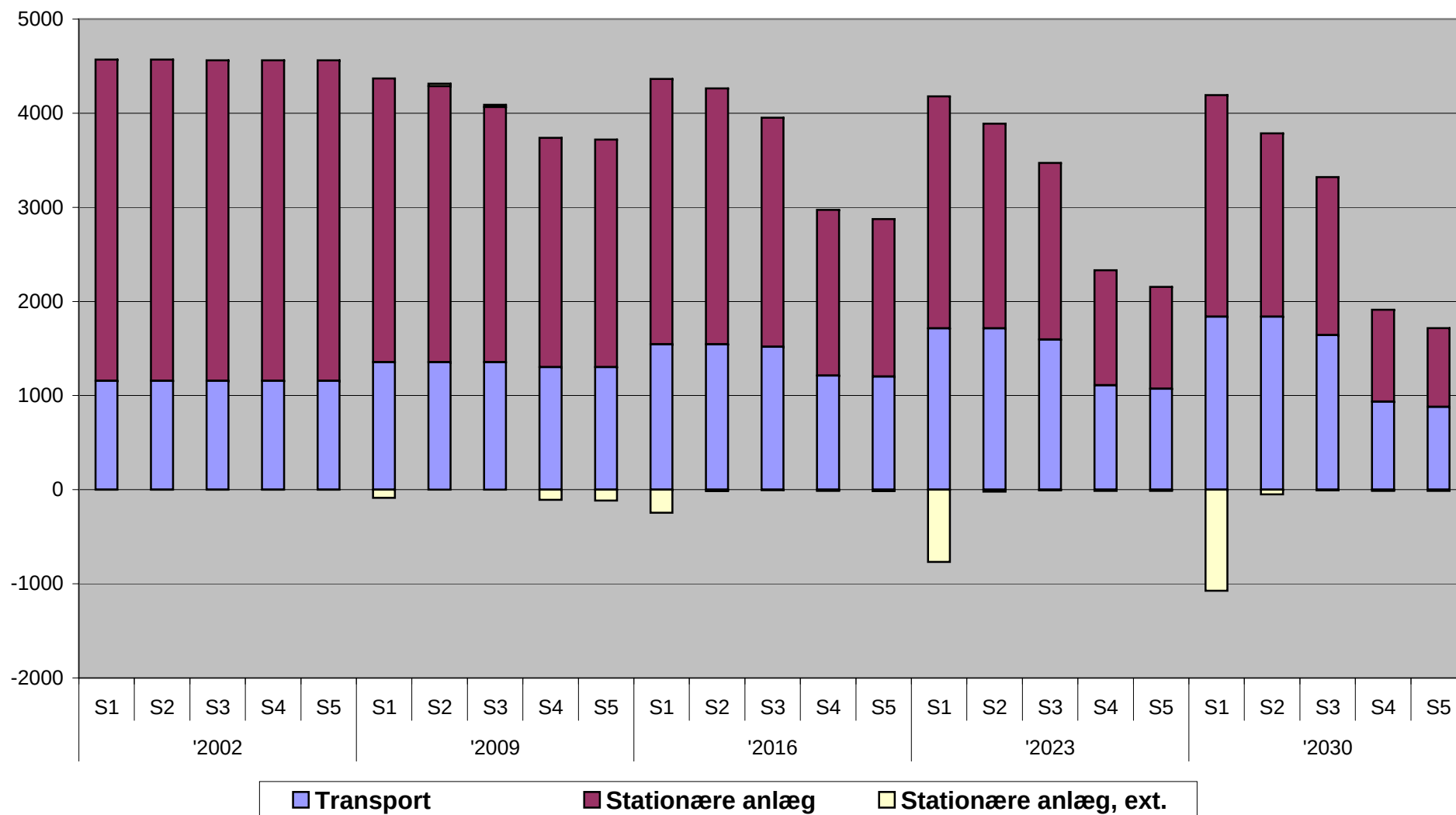
int.: i Danmark ext.: reduktion i udlandet

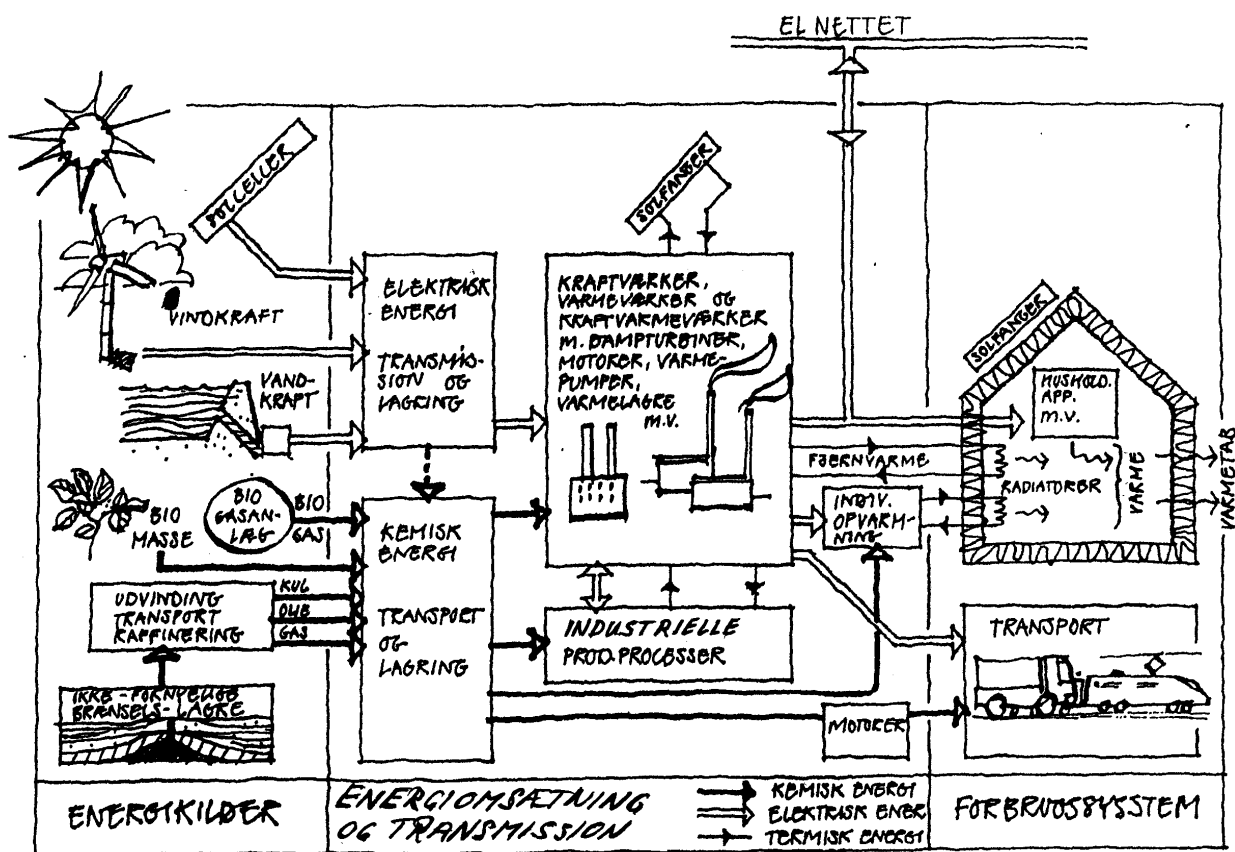


CO2-udslip 10,000 tons

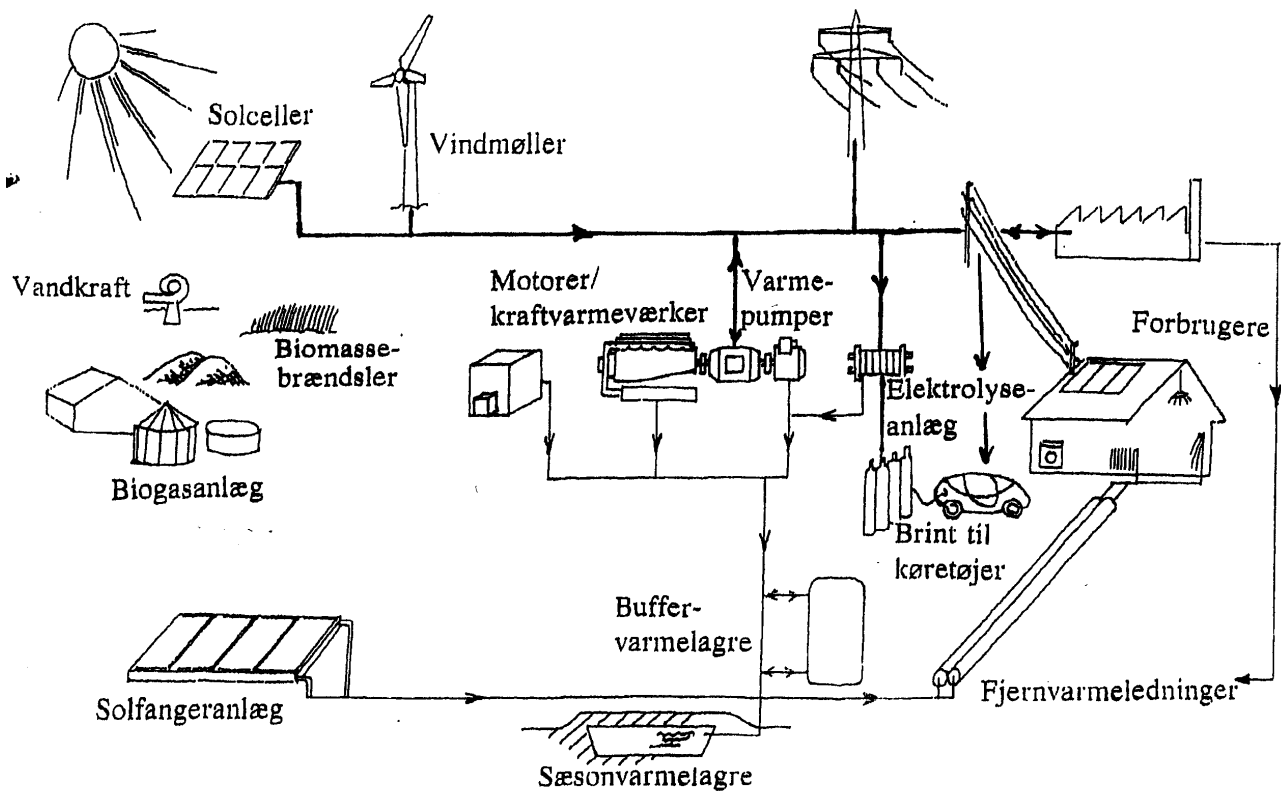
Diagram 6

int.: i Danmark ext.: reduktion i udlandet



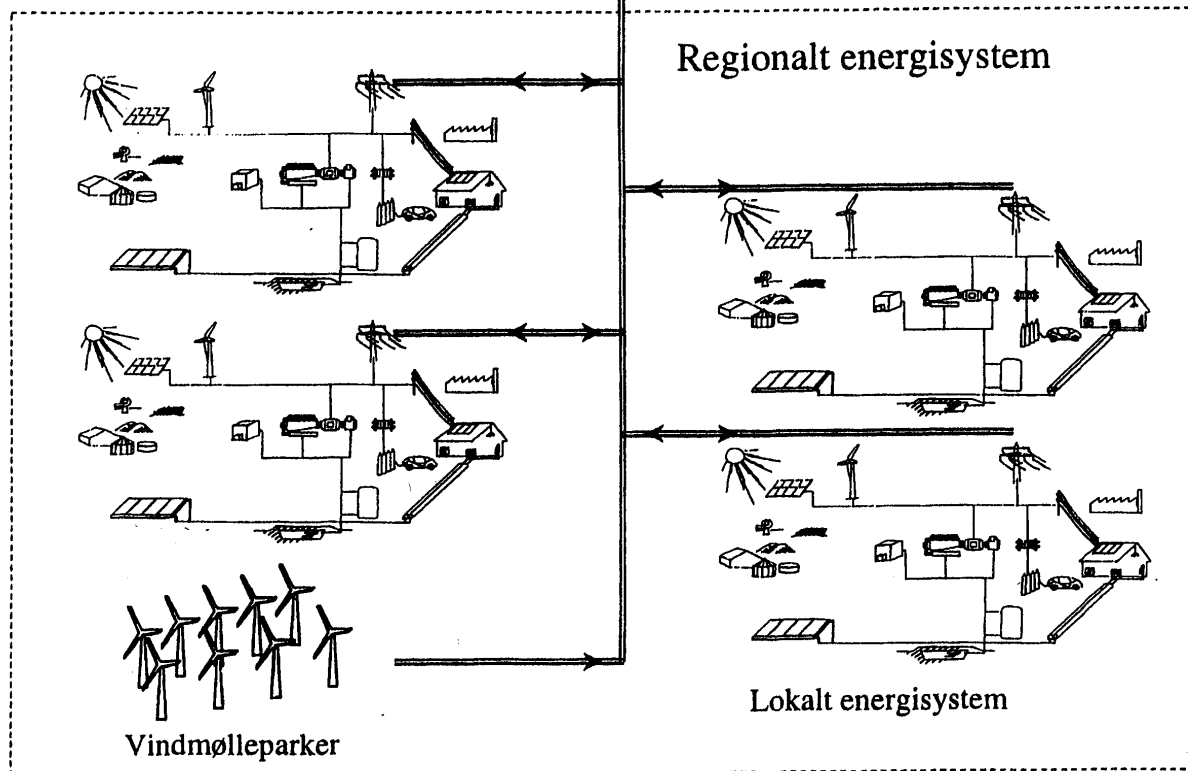


Figur A. Men henblik på tekniske, miljømæssige og samfundsøkonomiske analyser skal energisystemet opfattes som en helhed bestående af tre delsystemer: Forbrugssystemet, energiomsætnings- og transmissionssystemet og systemet af energikilder.



Figur B. Fremtidens energisystem vil ikke kunne opdeles i en 'el-sektor', en 'varmesektor' og en 'transportsektor'. De lokale energisystemer, som systemet vil være sammensat af, skal fungere som en integreret helhed, hvor energiomsætningen i kraftmaskiner, varmepumpeanlæg, elektrolyseanlæg m.f.l. hele tiden afpasses efter det øjeblikkelige el- og varmeforbrug og de til rådighed værende lagerkapaciteter.

Transmission



Figur C. Et regionalt energisystem kan opdeles i lokale systemer, der hvert især regulerer energiomsætningen indenfor deres respektive områder.