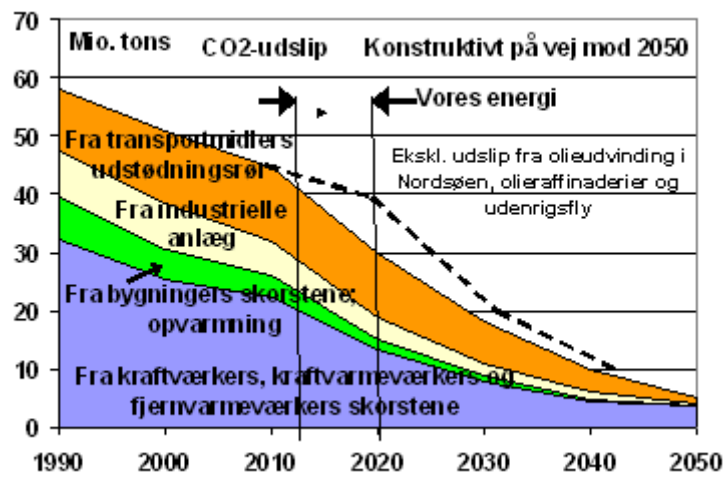


Strategisk energiplanlægning

Tekniske retningslinier for formålstjenlig national og kommunal planlægning

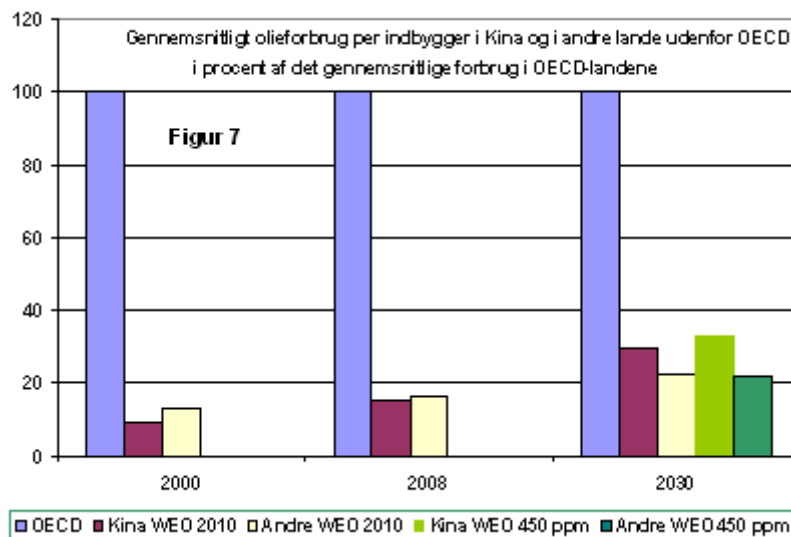
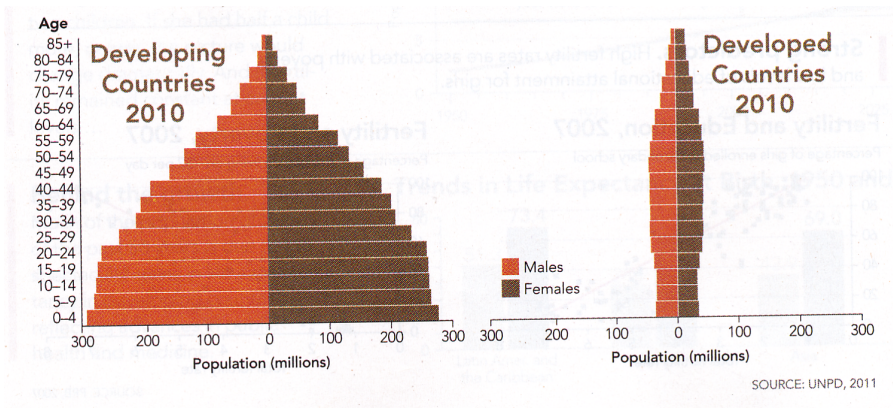
Klaus Illum
ECO-consult
Juni 2012

Denne udredning findes på www.klausillum.dk



Nedtrapning af CO2-udslippet. Målsætning for 2020 stipuleret i regeringens handlingsplan *Vores energi*, november 2011. Den stiplede kurve: hvis det ikke lykkes at knække kurven i løbet af det næste par år, bliver det med høje brændselspriser meget dyrt at nedtrappe udslippet endnu hurtigere efter 2020. (Fra Klaus Illum: *Hvorfor Vores energi kan løbe ud i sandet*. Februar 2012, www.klausillum.dk).

Vores forbrug af fossile brændsler bliver meget mindre i de kommende årtier. Kan vi nedbringe forbruget på en konstruktiv måde, eller skal vi lade det blive tvunget ned af stigende brændselspriser med store samfundsøkonomiske omkostninger til følge?



Befolkningspyramider (*Science*, vol. 333, 29 July 2011) og en urealistisk fremtidig fordeling af det globale olieforbrug (Klaus Illum: *Oplæg til en kvalificeret diskussion af olieforsyningsproblemet*. November 2010, www.klausillum.dk).

Mål og midler

Strategisk energiplanlægning drejer sig om udarbejdelse af investeringsprogrammer, som på en teknisk og samfundsøkonomisk hensigtsmæssig måde afstedkommer den hurtigst mulige nedtrapning af brændselsforbruget. Målet er at eliminere forbruget af fossile brændsler ved at nedbringe brændselsforbruget til den mængde, som kan dækkes af de begrænsede biobrændselsmængder, der kan frembringes på en økologisk bæredygtig måde uden at forøge CO₂-koncentrationen i atmosfæren.

En rationel planlægning skal derfor baseres på viden om de formindskelser af brændselsforbruget, der kan opnås ved investeringer på de forskellige indsatsområder. Herunder hvilke investeringer og tekniske ændringer af energisystemet, der er kontra-produktive, enten fordi de medfører et forøget brændselsforbrug, eller fordi de opnåede brændselsbesparelser ikke står mål med de økonomiske omkostninger.

Denne udredning bidrager til fremstillingen af dette nødvendige vidensgrundlag for en rationel planlægning, idet den beskriver de forhold, der bestemmer brændselsforbruget i energiforsyningssystemet og kvantificerer de formindskelser af brændselsforbruget, der kan opnås ved investeringer på de forskellige indsatsområder.

Hvis disse faktiske fysiske og tekniske realiteter ikke respekteres, men tilsidesættes til fordel for simplistiske energiforbrugs- og energiproduktions-opgørelser og regneregler, som ikke udgør et objektivt grundlag for faglige analyser, vil der blive foretaget bekostelige fejlinvesteringer, og målsætningerne vil ikke blive opfyldt indenfor det korte åremål, der er til rådighed til nedbringelse af brændselsforbruget, før det tvinges ned af høje brændselspriser, med uberegnelige økonomiske omkostninger til følge.

Ombygningen af energisystemet er det største ingeniørmæssige projekt nogensinde. Investeringerne vil andrage mange hundrede milliarder kroner i energikilder, i energiomsætnings- og transmissionsanlæg og på forbrugssiden. En professionel projektering er således af afgørende samfundsøkonomisk betydning, og der skal afsættes økonomiske midler dertil af en størrelse, som står i et rimeligt forhold til projektets omfang.

Gennemført på en måde, der er teknisk og økonomisk formålstjenlig og hensigtsmæssig, vil projektet give store samfundsøkonomiske gevinster - eller rettere: være en betingelse for opretholdelse af en bæredygtig samfundsøkonomi. Forudsætningen for indhentning af disse gevinster er konstruktionen af et formålstjenligt finansielt system, der med de rette afgifter, tilskud og lånemuligheder beforder de investeringer, der indgår i den strategiske plan for den tekniske udvikling af et økologisk og økonomisk bæredygtigt energisystem. Denne finansielle problemstilling behandles ikke i denne tekniske udredning.

Indhold

Forord.....	1
1. Indledning.....	2
2. Det nye energisystem.	3
3. Udnyttelse af elektrisk kraft i kraftvarmeværker.	6
4. Årstidsvariationer.	9
5. Teknisk opnåelige formindskelser af brændselsforbruget.	10
6. Generelle tekniske retningslinier for strategisk energiplanlægning.	15
7. Udnyttelse af geotermisk varme.	17
8. Solvarme.....	17
9. Solceller.	18
10. Biogas.....	22
11. Smart grid.....	22
12. Forsyningssystemets effektivitet.....	24
13. Styring og regulering af forsyningssystemet - formålstjenlighed eller markedsstyring.....	29
14. El-lagring og/eller ombygning af kraftvarmesystemet	31

Bilag 1: Beregning af effektfaktorer for varmepumper med geotermisk varme.

Bilag 2: Udledning af brændselsforbrugs-reduktionsfaktoren (r-faktoren).

Bilag 3: Det teknologiske råderum

Forord

Energisystemet er et fysisk system, hvis tekniske sammensætning kan beskrives og modelleres i form af computer-modeller, der gør det muligt af foretage konsistente beregninger af de formindskelser af brændselsforbruget og CO₂-udslippet, der kan opnås ved at investere i energitekniske forbedringer i forbrugssystemet, forøget udnyttelse af vedvarende energikilder af forskellig art og i den ombygning af forsyningssystemerne, der er nødvendig for at kunne udnytte en stor, stadigt skiftende el-produktion i vindmøller, eventuelt suppleret med el fra solceller.

Et nyt energisystem, der kan holde samfundet i gang uden et stort forbrug af fossile brændsler, er et mere komplekst system end det nuværende fossile energisystem. Det skal fungere under meget forskellige produktions- og forbrugsforhold sommer og vinter, og dets forsyningsanlæg skal time for time kunne regulere deres produktion i takt med skiftende forbrug og skiftende el-produktion i vindmøller og eventuelt solceller.

Konstruktørerne af det nye energisystem skal have kendskab til de tekniske principper og metoder for konstruktion af sådanne systemer, men de har er intet konkret erfaringsgrundlag at bygge på. Kun med computer-modeller, der er lige så komplekse som det system, de modellerer, kan de beregne de formindskelser af brændselsforbruget, der kan opnås ved at gennemføre forskellige, alternative investeringsprogrammer.

Mange samspil mellem systemets forskellige dele gør sig gældende i form af ikke-linære relationer. Derfor kan beregningsresultaterne ikke fremstilles i form af simple søjlediagrammer. Men af den komplekse analyse udspringer nogle generelle, konkrete retningslinier for prioriteringen af de investeringer, der indgår i formålstjenlige strategier.

De tekniske retningslinier skal sikre, at kommunernes planlægning afstedkommer konstruktionen af et sammenhængende, velfungerende nyt nationalt energisystem. Uden sådanne retningslinier er overdragelsen af den strategiske energiplanlægning til kommunerne et fuld-skala eksperiment med et uvist, men måleligt udfald: Forbruget af fossile brændsler og CO₂-udslippet er målelige fysiske størrelser. Målingerne i 2020 vil vise, hvorvidt eksperimentet er lykkedes.

Der er mange uberegnelige politiske, økonomiske og sociale faktorer, som gør det umuligt at forudsige, om en teknisk og økonomisk rationel rekonstruktion af energisystemet kan gennemføres. Om det kan lykkes vil vise sig i de kommende år. Men det er forudsigeligt, at det ikke vil lykkes, hvis de beregnelige fysiske og tekniske relationer, der er rammebetingelserne for det mulige og grundlaget for vurderingen af det formålstjenlige, ikke beregnes og respekteres som planlægningens faktuelle vilkår. Ligeså forudsigeligt er det, at projektet vil mislykkes, hvis ikke de økonomiske incitamenter - komplekset af afgifter og tilskud - og lovgivningen i det hele taget fremmer formålstjenlige investeringer.

1. Indledning

Energistyrelsen indleder sin præsentation af styrelsens vejledning til kommunerne om 'strategisk energiplanlægning' (april 2012, www.ens.dk) med sætningen:

“Formålet med kommunal strategisk energiplanlægning er at fremme en omstilling til et mere fleksibelt energisystem med mindre energiforbrug og mere vedvarende energi.”

Det er en forveksling af mål og midler.

Formålet er at afstedkomme den hurtigst mulige nedtrapning af brændselsforbruget, sådan at forbruget hurtigst muligt formindskes så meget, at det resterende forbrug kan dækkes af de begrænsede biobrændselsmængder, der kan fremstilles på en økologisk bæredygtig måde uden at forøge CO₂-koncentrationen i atmosfæren. Det vil sige, at forbruget af fossile brændsler elimineres.

Med hensyn til CO₂-udslippet skal det til enhver tid resterende forbrug af fossile brændsler fortrinsvist dækkes af naturgas, som giver det mindste CO₂-udslip per forbrændt energienhed.

Denne præcisering af formålet er i udgangspunktet af central betydning for tilrettelæggelsen af en teknisk og økonomisk formålstjenlig strategisk energiplanlægning - nationalt og i de enkelte kommuner.

Med dette formål for øje skal en rationel strategisk planlægning bygge på viden om, hvor store brændselsbesparelser, der vil kunne opnås ved at foretage investeringer på de forskellige indsatsområder: Forøget el-produktionen i vindmøller og solceller, i el-besparelser og varmebesparelser, i ombygning af energiforsyningssystemet og i anlæg til udnyttelse af geotermisk varme.

I denne udredning værdisættes disse brændselsbesparelser på grundlag af beregninger af energiomsætningen i forsyningssystemet for forskellige værdier af de bestemmende variabler: el-forbrug, varmekonsum, el fra vindmøller og solceller, ændringer af forsyningssystemet og udnyttelse af geotermisk varme.

Som vist i beregningseksemplerne i afsnit 5 kan de beregnede besparelsesværdier bruges til at vurdere de brændselsbesparelser, der kan opnås ved investeringer på de forskellige indsatsområder.

Af analysen følger en række generelle, fysisk og teknisk bestemte retningslinier for en formålstjenlig strategisk energiplanlægning, der giver de størst mulige brændselsbesparelser per investeret krone.

Efter de praktisk orienterede tekniske analyser i afsnittene 2 - 11 sammenfattes i afsnit 12: *Forsyningssystemets effektivitet* de generelle termodynamiske principper, der ligger til grund for disse analyser: Større 'energieffektivitet' er en erklæret energipolitisk målsætning, men ligesom mange andre ord i den energipolitiske italesættelse af mål og midler bruges ordet 'effektivitet' i en ikke præcist defineret betydning. En operationel definition af effektiviteten af forsyningssystemets termodynamiske maskiner (se figur 1 nedenfor) forudsætter en rationel opfattelse af energiressourcer i modsætning til den opfattelse, der ligger til grund for de gængse kalorimetriske energibogholderi-opgørelser. Dette er væsentligt, fordi konstruktionen af et effektivt forsyningssystem, der kan udnytte store mængder vindkraft, er afgørende for nedtrapningen af brændselsforbruget.

2. Det nye energisystem

De fossile brændsler er kemisk stabile ved atmosfære-temperaturer og har stor energitæthed (Joule per kg eller kubikmeter). Derfor kan de let transporteres og lagres og udnyttes hvor og hvornår, der er brug for deres kemiske potentialer (i forhold til atmosfærens ilt). Det er disse enestående egenskaber, der gjorde det muligt at opdele industrisamfundenes energisystemer i sektorer, der har fungeret uafhængigt af hinanden: en el-sektor, en varmesektor, en industrisektor og en transportsektor. Alle de energistatistikker, der ligger til grund for den energipolitiske diskussion og planlægning, er stadig baseret på denne sektoropdeling¹.

I dette fossile energisystem er det teknisk nemt at styre og regulere el- og varmeproduktion i kraft- og kraftvarmeværker, industrier og individuelle opvarmningsanlæg i takt med forbrugene. Kullene ligger i bunker, olien i olietanke og naturgassen i gasnettet og gaslagrene, klar til at blive indfyret i takt med el- og varmeforbruget. Biler, busser, lastbiler, landbrugsmaskiner, fly og skibe har hver deres olietanke. Således er den nuværende samfundsøkonomi i alle henseender baseret på billige fossile brændsler, der let kan transporteres og lagres i ubegrænsede mængder.

Opgaven er nu at konstruere et energisystem, der kan holde samfundet i gang uden fossile brændsler. Biomassebrændsler - halm, træ, biogas - kan ikke frembringes i så store mængder, at de tilnærmelsesvist kan erstatte de fossile brændsler på det nuværende forbrugsniveau, og der er grænser for, hvor meget el-forbruget, varmeforbruget og transportforbruget kan formindskes i et samfund som vores. Elektrisk kraft fra vindmøller - eventuelt suppleret med solceller - bliver derfor den energikilde, der skal yde det største bidrag til driften af det nye energisystem.

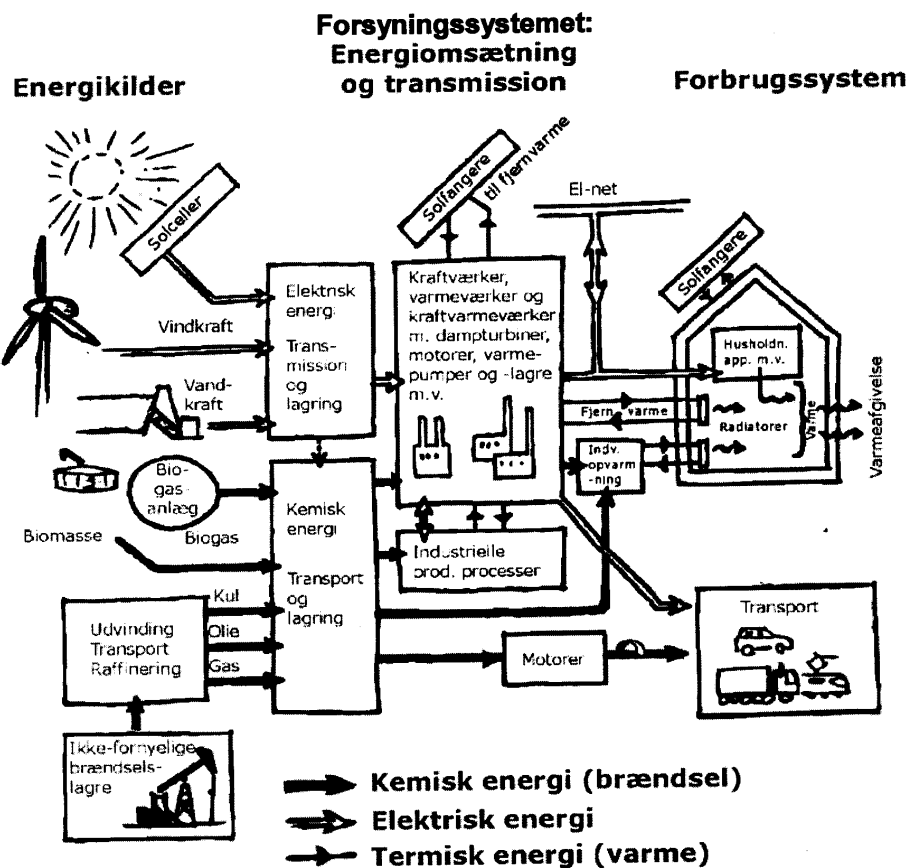
Elektrisk kraft er noget helt andet end brændsler. El-generatorerne i kraftværker og vindmøller opretholder en konstant elektrisk spændingsforskel mellem el-nettets faseledninger og jorden, som på utallige forbrugssteder udnyttes i elektriske apparater og maskiner. El-nettet tjener således til transmission af elektrisk kraft til forbrugsstederne. Elektricitet er ikke et stof, der kan lagres, men elektrisk kraft kan omsættes til energiformer, der kan lagres til senere brug: til kemisk energi (til brint i elektrolyseanlæg), til elektrokemisk energi i batterier, til gravitationsenergi (i vandkraftværkers reservoirer) eller komprimeret luft i store trykluftlagre. Når man taler om 'el-lagring', er det omsætning af elektrisk kraft til disse forskellige energiformer, der er tale om.

Det nye energisystem med vindkraft som primær energikilde og begrænsede brændselsressourcer til el- og varmeproduktion i kraftvarmeværker skal derfor have helt andre egenskaber end det nuværende fossile energisystem. Det skal kunne opretholde spændingen i el-nettet og temperaturerne i fjernvarmenettene i perioder med svag vind og på andre tidspunkter kunne udnytte overskydende el-produktion i vindmøller og kraftvarmeværker til frembringelse af drivkraft til transportmidler.

¹ Kraftvarmeværkerne giver dog et statistisk problem, fordi de tilhører både el-forsyningssektoren og varmeforsyningssektoren, og det fysiske grundlag for beregning af fordelingen af deres brændselsforbrug og CO₂-udslip på henholdsvis deres el-produktion og varmeproduktion falder udenfor det statistiske kalorie-bogholderis regneregler.

Med den tekniske analyse for øje er det hensigtsmæssigt at betragte det nye energisystem som et system, der omfatter de i figur 1 viste tre delsystemer.

Brændselsforbruget er den kemiske energi, der i form af brændsler tilføres forsyningsystemet fra energikilderne. Det er på den ene side bestemt af el-produktionen i vindmøller og solceller, på den anden side af el-forbruget og varmekonsumet i forbrugssystemet og - i midten - af effektiviteten (den termodynamiske effektivitet, se afsnit 12) af det komplekse af forskellige anlæg, hvori kemisk energi (brændsler) og elektrisk kraft fra energikilderne omsættes til den elektriske kraft og varme, der tilføres forbrugssystemet². Endvidere kan omsætning af elektrisk kraft til kemisk energi (brændstof) til transportmidler bidrage til formindskelse af brændselsforbruget.



Figur 1. Energisystemets tre delsystemer.

Hvor ikke andet er nævnt betyder 'el-forbrug' i det følgende den elektriske kraft, der tilføres forbrugssystemet fra forsyningsystemet plus el-forbruget i individuelle varmepumper (som i denne tekniske opdeling af energisystemet retteligt tilhører forsyningsystemet). 'El-forbruget' omfatter således også el-forbruget i transportmidler.

'El-overskud' er differensen mellem (1) el-produktionen i vindmøller og solceller plus den elektriske kraft fra kraftvarmeværker til el-nettet og (2) el-forbruget.

² Kollektive solfangere tilkoblet lokale fjernvarmenet kan formindske varmeproduktionen i lokale fjernvarmeværker og under nogle omstændigheder i kraftvarmeværker (se afsnit 8). Individuelle solfangere formindsker varmekonsumet i forbrugssystemet.

I de følgende analyser er de bestemmende variabler således:

- Den samlede nationale el-produktion i vindmøller og solceller.
- Det samlede nationale el-forbrug i forbrugssystemet (se figur 1, figurtekst).
- Varmeforbruget i forbrugssystemet, opdelt på (1) varme fra kraftvarmeværker (KV-varmeforbrug) og (2) varme fra fjernvarmeværker og individuelle opvarmningsanlæg, som ikke er koblet til el-forsynings- og el-omsætningssystemet.
- Forsyningsanlæggenes sammensætning og tekniske parametre, som bestemmer forsyningssystemets effektivitet (se afsnit 12).

De i figur 1 viste tekniske afgrænsninger af de tre delsystemer er ikke sammenfaldende med de afgrænsninger, der fremtræder, når energisystemet beskrives med dets institutionelle og økonomiske relationer, ejerskaber og geografi for øje. I en sådan social beskrivelse af energisystemet vil f.eks. individuelle opvarmningsanlæg og solceller på bygninger indgå under bolig- og virksomhedsejernes ejerskaber; transportforbruget vil være opdelt på individuelle og kollektive transportmidler; og de forskellige energikilder vil indgå under forskellige ejerforhold.

Opgaven for en målrettet strategisk energiplanlægning er således:

- 1) Udfra den tekniske beskrivelse af energisystemet at analysere de tekniske muligheder for at formindske brændselsforbruget og på grundlag af denne analyse at tilrettelægge formålstjenlige investeringsprogrammer.
- 2) Med et sociale system for øje at fremme implementeringen af disse investeringsprogrammer ved at konstruere et kompleks af målrettede økonomiske incitamentter og finansielle ordninger (virkemidler).

Brændselsbesparelser i forsyningssystemet

Der kan opnås store brændselsbesparelser ved omlægning af varmeforsyning fra opvarmningsanlæg med ringe energi-effektivitet (individuelle kedler, fjernvarmekedler, el-varme) til kraftvarme-forsyningsanlæg, der udnytter kølevarmen fra kraftmaskiner, og som er udstyret med varmepumper, der omsætter elektrisk kraft til varme ved en tilstrækkeligt høj temperatur (se afsnit 3). Disse omlægninger af bygningers varmeforsyning beskrives i det følgende som konverteringer af bygninger fra 'kedelsektoren' og 'el-opvarmningssektoren' til 'kraftvarmesystemet':

Kedelsektoren er den del af forsyningssystemet, der omfatter kedler til varmeforsyning (fjernvarmeværker og individuelle kedler), og den del af forbrugssystemet, der omfatter de bygninger, der opvarmes fra kedlerne via fjernvarme- eller centralvarmekredsløb.

El-opvarmningssektoren er den del af forbrugssystemet, der omfatter bygninger, der opvarmes med el-radiatorer eller varmepumper.

Kraftvarmesystemet er den del af forsyningssystemet, der omfatter kraftvarmeværkerne (centrale, decentrale og små enheder i bygninger eller klynger af nabo-bygninger), og den del af forbrugssystemet, der omfatter de bygninger, hvori kølevandet fra kraftvarmeværkernes kraftmaskiner udnyttes til opvarmning via fjernvarme- eller centralvarmekredsløb.

Kedelsektoren

Brændselsforbruget i kedelsektorens bygninger og fjernvarmeværker er uafhængigt af el-produktion og el-forbrug. Indenfor kedelsektoren kan man derfor umiddelbart beregne de brændselsbesparelser, der opnås ved at efterisolere bygninger og installere solfangere på hustagene eller tilkøbet fjernvarmeværkerne.

I kraftvarmesystemet udnyttes brændslerne meget mere effektivt end i kedelsektoren (se afsnit 12). Derfor opnås der betydelige brændselsbesparelser ved at overføre (konvertere) bygninger fra kedelsektoren til kraftvarmesystemet, dvs. ved at erstatte individuelle kedler med fjernvarme fra kraftvarmeværker, at udskifte fjernvarmeværker med kraftvarmeværker eller at erstatte naturgasfyr med mini-kraftvarmeværker (se afsnit 5, tabel 1).

De brændselsbesparelser, der opnås ved at erstatte kedler med varmepumper, dvs. ved at konvertere bygninger fra kedelsektoren til el-opvarmningssektorens varmepumpe-bygninger, afhænger af forbrugs- og produktionsfaktorerne i energisystemet som helhed (se afsnit 5, tabel 1).

El-opvarmningssektoren

For el-opvarmningssektorens bygninger kan man umiddelbart beregne de el-besparelser, der opnås ved at efterisolere og installere solfangere på hustagene. De derved opnåede brændselsbesparelser afhænger imidlertid af produktions- og forbrugsforholdene i det samlede energisystem.

El-forbruget i el-radiatorer (og el-patroner i varmtvandstanke) indgår i el-forbruget (se figur 1). Som vist i afsnit 5, tabel 1, medgår der således omkring 2 GJ brændsel til at frembringe 1 GJ el-varme. Konvertering af el-varme til varmepumper - hvorved el-forbruget formindskes til ca. 1/3 - eller til varmforsyning fra kraftvarmeværker giver således større brændselsbesparelser end nogen af de øvrige konverteringsmuligheder.

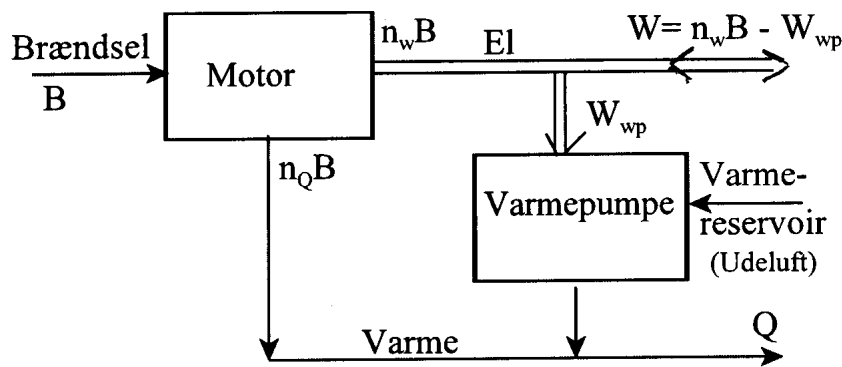
Kraftvarmesystemet

Kraftvarmesystemets store, mindre og små kraftmaskiner tjener både til elforsyning via det nationale el-net og til varmforsyning af de bygninger, der er tilsluttet de enkelte kraftvarmeværkers kølekredsløb og varmepumper (se afsnit 3).

Brændselsforbruget i kraftvarmeværkerne er således time for time bestemt af det øjeblikkelige el-forbrug (i det samlede nationale energisystem), el-produktionen i vindmøller og solceller, varmforsyningen i kraftvarmesystemets bygninger og varmelager-beholdningerne i kraftvarmeværkernes varmelagertanke.

3. Udnyttelse af elektrisk kraft i kraftvarmeværker

Det er en forudsætning for en effektiv udnyttelse af en stor mængde vindkraft i det danske energisystem, at elektrisk kraft kan udnyttes i varmepumper (eller el-patroner) i kraftvarmeværkerne (se figur 2). På tidspunkter, hvor vindmøllernes el-produktion sammen med kraftvarmeværkernes varmebundne el-produktion overstiger el-forbruget, kan den overskydende elektriske kraft helt eller delvist udnyttes til varmeproduktion i kraftvarmeværkernes varmepumper. Derved formindskes brændselsforbruget i kraftvarmeværkerne.



Figur 2. Kraftvarmeværk med motor og varmepumpe. (LOCUS-anlæg³).
 'Motor' står her for en kraftmaskine (en stempelmotor, gasturbine, Stirling-motor eller et damp-turbineanlæg) med tilhørende el-generator, eller en brændselscelle.
 Når vindkraften plus den af varmebehovet bestemte el-produktion i motoren overstiger el-forbruget, igangsættes varmepumpen. Derved nedbringes el-overskuddet, dels fordi elektrisk kraft udnyttes i varmepumpen, dels fordi el-produktionen i motoren formindskes.

Der er i denne analyse regnet med en gennemsnitlig el-nyttgevirkning på $n_w = 0,40$ og en gennemsnitlig varmenyttgevirkning på $n_Q = 0,50$ for kraftvarmesystemets motorer. Der er regnet med, at varmepumperne med udeluften som varmereservoir har en gennemsnitlig effektfaktor på $e = 3,50$. Effektfaktoren e varierer over året, idet den vokser med stigende udetemperatur og faldende fremløbstemperatur i fjernvarmekredsløbene (for mini-kraftvarmeværker: centralvarmekredsløbene).

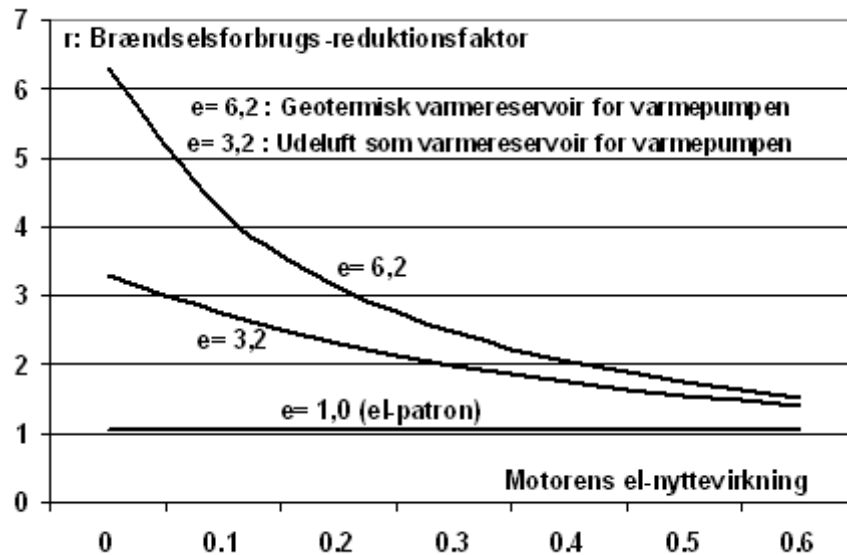
Hvis der i stedet for varmepumper indsættes el-patroner (svarende til varmepumper med en effektfaktor på 1,0), bliver brændselsforbruget større (se afsnit 5, tabel 1, og bilag 3).

I LOCUS-anlæg med små eller mindre gasmotorer - som de nuværende decentrale kraftvarmeværker - eller med brændselsceller kan motorerne hurtigt standses og genopstartes i takt med skiftende el-forbrug og varierende vindkraft. Anlæg med store damp-turbine-kraftmaskiner har længere standsnings- og genopstart-tider og kan derfor ikke indgå i den hurtige effekt-regulering. Det er derfor i de følgende analyser antaget, at kun 60% af el-produktionen sker i LOCUS-anlæg, hvis el-produktion løbende kan reguleres kontinuert over intervallet fra 0 til maksimal produktion. Det betyder ikke, at el-produktionen i hvert enkelt af disse anlæg kan reguleres kontinuert over hele intervallet. I et system med flere hundrede sådanne LOCUS-anlæg kan den samlede produktion imidlertid reguleres kontinuert ved at starte og standse et større eller mindre antal anlæg.

Hvis en større del af el-produktionen i kraftvarmeværkerne i fremtiden overgår til små og mindre LOCUS-anlæg med korte standsnings- og opstarttider, formindskes både brændselsforbruget og størrelsen af de varierende el-effekter, der skal håndteres i systemet (se afsnit 14).

³ Betegnelsen LOCUS: Local Cogeneration Utility System blev indført i 1980'erne, hvor der blev opført nogle demonstrationsanlæg. For en nøjere beskrivelse se Klaus Illum: *LOCUS Systems and Plants*, artikel i IEA's teknologikatalog *District Heating Catalogue of Advanced Heat Production Technologies*, International Energy Agency, 1988. www.klausillum.dk.

Den formindskelse af et LOCUS-anlægs brændselsforbrug, der for en given varmereproduktion fra anlægget opnås ved at formindske anlæggets el-produktion til el-nettet, afhænger af såvel motorens el- og varme-virkningsgrader som varmepumpens effektfaktor. Den almindeligt gældende relation, angivet som brændselsreduktions-faktoren r , er vist i figur 3.



Figur 3. Brændselsforbrugs-reduktionsfaktoren r for et LOCUS-anlæg er bestemt af motorens el-nyttevirkning n_w og varmepumpens effektfaktor e , idet det her antages, at summen af motorens el-nyttevirkning og varmenyttevirkning $n_w + n_q = 0,95$.

For en given varmereproduktion fra anlægget (fra motorkøling og fra varmepumpen), betyder f.eks. $r = 2$, at motorens brændselsforbrug formindskes med 2 kW, når anlæggets el-produktion til el-nettet formindskes med 1 kW.

For små værdier af motorens el-nyttevirkning giver en større e -værdi en betydeligt større r -værdi. Når motorens el-nyttevirkning er større end 0,35 giver en større e -værdi kun en lidt større r -værdi. Ved at udnytte geotermisk varme med en temperatur på 65 - 70 grader som varmereservoir for varmepumpen opnås en effektfaktor $e = \text{ca. } 6,2$, mod $e = \text{ca. } 3,2$ (i vintermånederne, se bilag 1), når varmepumpen har udeluften som varmereservoir. r -faktoren forøges imidlertid kun fra 1,75 til 2,05.

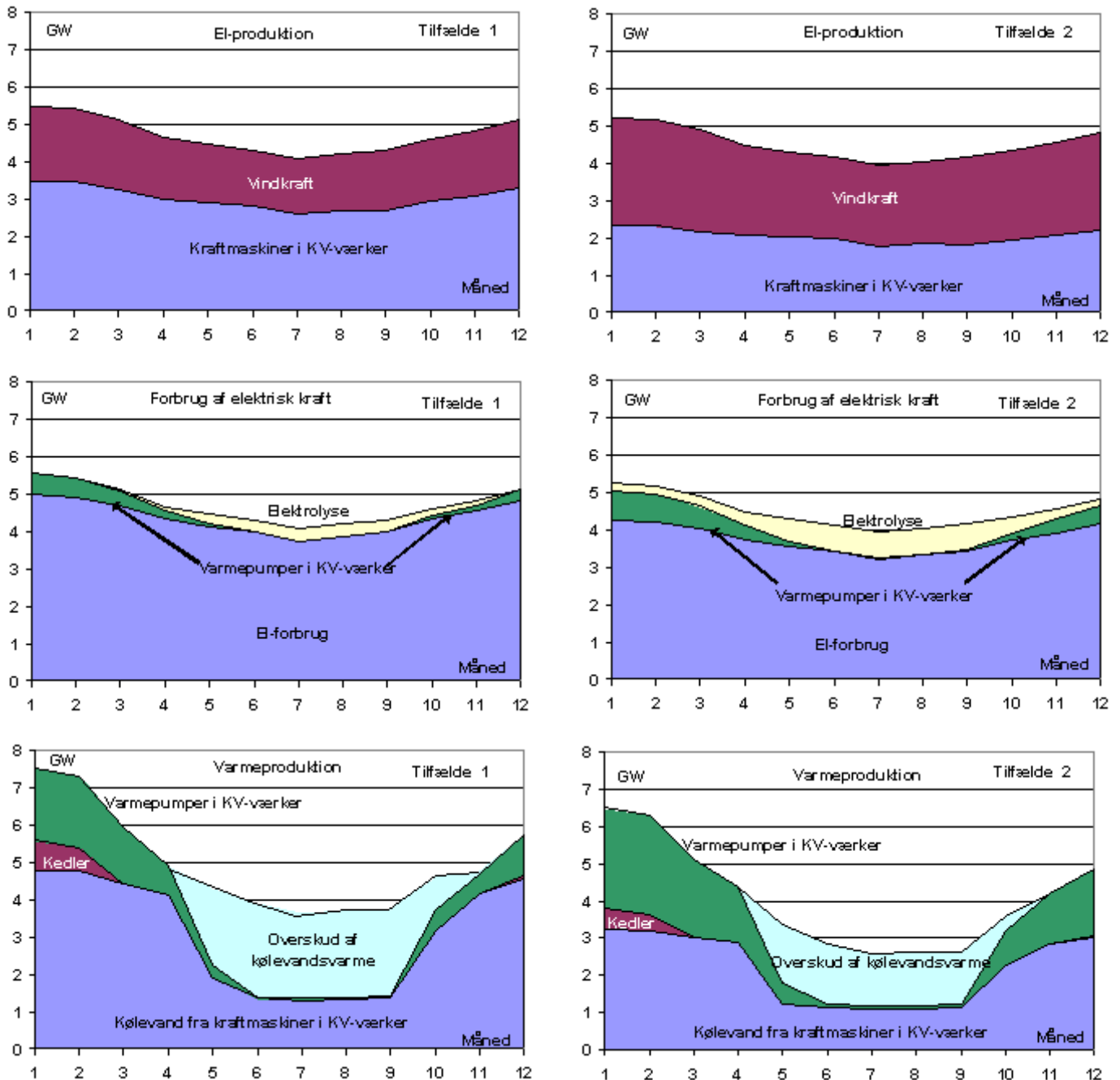
Med el-patron i stedet for en varmepumpe er $r = 1,1$ uafhængigt af motorens el-nyttevirkning.

Udledningen af r -faktoren er vist i bilag 2.

De største r -faktorer, dvs. de største brændselsbesparelser, opnås i fjernvarmeværker (el-nyttevirkning = 0) med varmepumper, hvor varmereproduktion i kedlerne suppleres med eller erstattes af varme fra varmepumperne. Det er et eksempel på den almindelige regel, at indskydelse af termodynamisk mere effektive komponenter giver de største brændselsbesparelser i et termodynamisk ineffektivt system. Med geotermisk varme opnås således betydelige brændselsbesparelser i et termodynamisk ineffektivt fjernvarmesystem med fjernvarmekedler, hvor brændselsforbruget er unødigt stort. Men det årlige brændselsforbrug i det danske energisystem bliver større end med fjernvarmeforsyning fra et LOCUS-anlæg uden geotermisk varme (se afsnit 7 og 12).

4. Årstidsvariationer

Det er ikke kun de årlige energiforbrugs- og produktionsstørrelser, der bestemmer det årlige brændselsforbrug. Som vist i figur 4 har de forskellige driftsforhold i årets forskellige måneder afgørende betydning for det årlige brændselsforbrug.



Figur 4. To eksempler på årstidsvariationer. I tilfælde 2 er der mere vindkraft end i tilfælde 1, og el-forbruget og varmekonsumet er mindre. I begge tilfælde er der overskud af kølevandsvarme i sommerhalvåret. Derfor opnås der ingen brændselsbesparelser ved at investere i yderligere varmeproduktion i solfangere på bygninger i kraftvarmesystemet eller i kollektive solfangeranlæg tilkøbt kraftvarmeverkernes fjernvarmenet (se afsnit 8).

5. Teknisk opnåelige formindskelser af brændselsforbruget

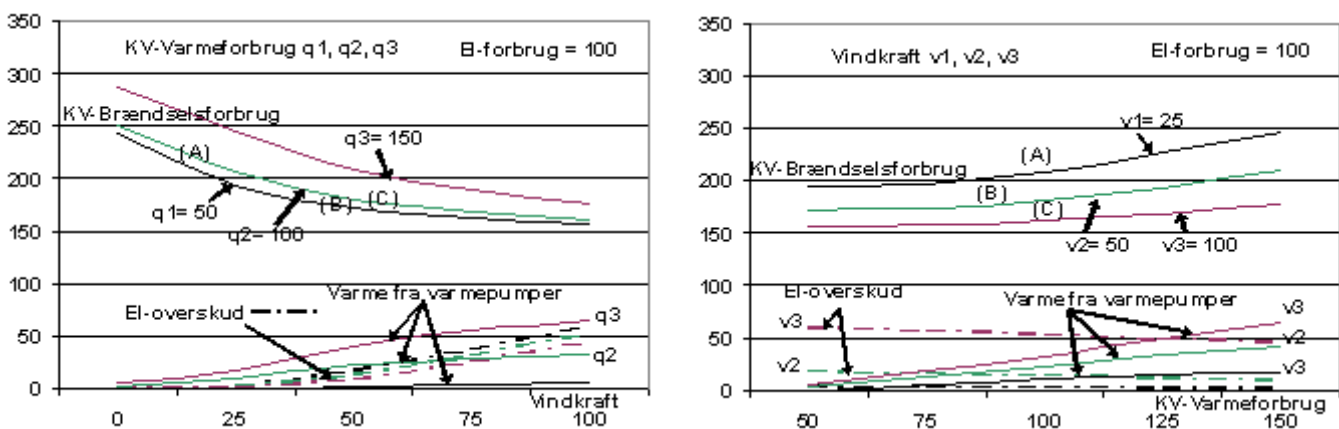
Uden viden om hvilke formindskelser af brændselsforbruget, der kan opnås ved investeringer på de forskellige indsatsområder, og de samspil mellem forskellige ændringer af energisystemet, der gør sig gældende, kan man ikke udstikke retningslinierne for en teknisk og økonomisk rationel, målrettet strategisk energiplanlægning. Og uden at vide hvilke resultater, der kan forventes ved at følge en bestemt investeringsstrategi, kan man ikke løbende registrere, hvorvidt forventningerne bliver opfyldt.

Der er her tale om at indhente viden om de faktiske fysiske og tekniske forhold, der er bestemmende for brændselsforbruget i et nyt energisystem, ikke om simplificerede kalorimetrisk energibogholderi-opgørelser af brutto- og nettoenergiforbrug og VE-procenter deraf.

I dette afsnit vises resultaterne af en analyse af brændselsforbruget i kraftvarmesystemet som funktion af el-forbruget, varmemeforbruget og el-produktionen i vindmøller. Endvidere værdisættes de brændselsbesparelser, der kan opnås ved konvertering af bygninger fra kedelsektoren til kraftvarmesystemet (jfr. afsnit 2), ligesom de besparelser, der i kedel- og el-opvarmningssektoren kan opnås ved konvertering til mere energieffektive individuelle opvarmningsteknikker. (Om effektivitet af forskellige el- og varmforsyningsteknikker, se afsnit 12).

Brændselsforbrug i kraftvarmesystemet

Forminskelse af brændselsforbruget i kraftvarmesystemet ved udnyttelse af vindkraft forudsætter, at kraftvarmeværkerne konstrueres som LOCUS-anlæg, jfr. afsnit 3. Beregningsforudsætningerne for de i det følgende viste beregningsresultater er således de i afsnit 3 angivne.



Figur 5. Det årlige brændselsforbrug i kraftvarmesystemet med LOCUS-anlæg.

(1) til venstre: som funktion af vindkraften for 3 forskellige værdier af KV-varmeforbruget $q_1=50$, $q_2=100$ og $q_3=150$.

(2) til højre: som funktion af KV-varmeforbruget for 3 forskellige værdier af vindkraften $v_1=25$, $v_2=50$ og $v_3=100$.

Endvidere vises varmeproduktionen i varmepumper samt det el-overskud, der er til rådighed for fremstilling af brændsler til transportmidler (de stiplede linier).

Punkterne markeret med (A), (B) og (C) svarer til de 3 tilfælde A, B og C i tabel 1 nedenfor.

Det skal bemærkes, at det i beregningerne er forudsat, at varmepumperne skal have en rimelig benyttelsestid, hvilket begrænser varmeproduktionen i varmepumperne og forøger el-overskuddet.

Figur 5 viser brændselsforbruget i kraftvarmesystemet som funktion af den årlige el-produktion i vindmøller (vindkraft) og det årlige varmekonsum, som dækkes af kraftvarmeværkerne (KV-varmekonsum = KV-værkernes varmekonsum). Brændselsforbrug-graferne afbilder de i bilag 3 viste tabeller.

El-forbruget (defineret som angivet i figurteksten, figur 1) er en determinerende faktor for brændselsforbruget. Værdierne i figur 5 og de i de følgende afsnit viste figurer er derfor angivet i procent af el-forbruget (El-forbrug = 100). Det betyder, at hvis el-forbruget formindskes/forøges forskydes kurverne mod venstre/højre, men de bevarer deres form. Kurverne viser således strukturelle relationer, der er uafhængige af energisystemets kvantitative størrelser.

Af de i figur 5 viste ikke-lineære relationer fremgår det, at forholdene ændres, efterhånden som ombygningen til det nye energisystem skrider frem. Vindkraftens indflydelse på KV-brændselsforbruget aftager med voksende vindkraft, medens KV-varmekonsumets indflydelse stiger med voksende KV-varmekonsum. Dvs. at den brændselsbesparelse, der opnås ved at investere i flere vindmøller, bliver mindre efterhånden som vindkraft-udbygningen skrider frem, og at de brændselsbesparelser, der opnås ved at investere i efterisolering af kraftvarmesystemets bygninger, bliver mindre efterhånden som flere bygninger bliver efterisolerede. De CO₂-reduktioner, der opnås ved investeringer på de forskellige indsatsområder, ændres derfor også i tidens løb. Den formindskelse af det årlige CO₂-udslip, der opnås i 2012, vil være større end formindskelsen i 2022, medmindre el-forbruget stiger frem til 2022.

Det samlede brændselsforbrug til el-, varme og transport

Det samlede brændselsforbrug i det danske energisystem (bortset fra forbruget i industrielle procesanlæg) udgøres af:

- forbruget i kedelsektoren (jfr. afsnit 2: Energisystemet),
- forbruget i kraftvarmesystemet og
- forbruget i transportmidler.

Som vist i tabel 1 (Kedel til KV) nedenfor kan der opnås store brændselsbesparelser ved konvertering af bygninger fra kedelsektorens ineffektive opvarmningsanlæg til kraftvarmesystemet, hvori brændslerne udnyttes mere effektivt (se afsnit 12) - dvs. ved skift fra individuelle kedler til varme fra LOCUS-anlæg. Brændselsbesparelsen andrager mere end 0,6 kWh for hver kWh varmekonsum, der konverteres fra kedelsektoren til kraftvarmesystemet. Ved konvertering fra el-varme til kraftvarme bliver brændselsbesparelsen 2 - 3 gange så stor.

Det i figur 5 viste årlige el-overskud er en funktion af el-produktionen i vindmøller (vindkraft), el- forbruget og KV-varmekonsumet. Når el-overskuddet bruges til fremstilling af brændsler til transportmidler (på basis af brint produceret i elektrolyseanlæg) formindskes brændselsforbruget til transport, idet forbruget af disse brændsler ikke udgør et ressourceforbrug, men en udnyttelse af el-overskuddet ved omsætning til kemisk energi. I de i tabel 1 viste eksempler er den mulige produktion af transportbrændsler vist i de tre tilfælde A, B og C.

	El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brænd- forbr.	Trans- port brænd- sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ialt i DK ved Forøgelse af			Konvertering		
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Kedel til KV	El- til KV	Kedel til VP	
Varmepumper i LOCUS-anlæg:												
A:	130	20	120	279	0	1	2.28	-1.86	0.47	-0.64	-1.81	-0.42
B:	140	60	120	250	7	1	2.15	-1.31	0.35	-0.77	-1.81	-0.46
C:	140	80	140	241	13	1	1.80	-0.93	0.43	-0.68	-1.36	-0.57
El-patroner i LOCUS-anlæg:												
A:	130	20	120	284	0	1	2.28	-1.86	0.60	-0.51	-1.68	-0.42
B:	140	60	120	259	6	1	2.15	-1.31	0.60	-0.51	-1.56	-0.46
C:	140	80	140	253	10	1	1.80	-0.93	0.75	-0.36	-1.05	-0.57

Tabel 1. Denne tabel viser eksempler på nøgletallene for vurderinger af de brændselsbesparelser, der kan opnås ved el-besparelser, forøgelse af el-produktionen i vindmøller og varmebesparelser i kraftvarmesystemet samt ved konverteringer af bygninger fra henholdsvis kedelsektoren og el-opvarmningssektoren til kraftvarmesystemet. Tabellen er et udpluk af de i bilag 3 viste tabeller.

KV står for kraftvarmesystemet. KV-brændselsforbruget er således brændselsforbruget i kraftvarmeværker, og KV-varmeforbruget er det varmeforbrug, der dækkes af kraftvarmeværker (= kraftvarmeværkernes varmeproduktion).

Transport-brændselsproduktionen er den produktion af brændsler (brint og/eller flydende syntetiske brændsler), der opnås ved at udnytte det til rådighed værende el-overskud i elektrolyseanlæg (der er regnet med et energitab i omsætningsprocesserne på 40%).

I de tre tilfælde A, B og C, som adskiller sig ved forskellige værdier af el-forbruget, vindkraften og KV-varmeforbruget, er tallene vist for henholdsvis et system med varmepumper og et system med el-patroner.

Som reference for de følgende forklaringer gentages den øverste del af tabellen øverst på de følgende sider.

De i tabel 1 viste energiværdier af de uafhængige variabler: el-forbrug, vindkraft, KV-varmeforbrug og de deraf afledte værdier af KV-brændselsforbrug, transportbrændsel-produktion og el-import, er de over året opsummerede værdier. Enheden er ligegyldig (det er forholdene mellem de uafhængige variabler, der er bestemmende), men hvis man antager enheden PJ, svarer tallene i tilfælde A nogenlunde til den nuværende situation i det danske energisystem.

De beregnede faktorer, der angiver de marginale ændringer af brændselsforbruget⁴ ved marginale ændringer af henholdsvis el-forbruget, vindkraften og KV-varmeforbruget, har følgende betydning:

Varmepumper i kraftvarmesystemet, tilfælde A:

- *El-forbrugs-faktoren 2,28* betyder, at en forøgelse af det årlige el-forbrug på 1 MWh medfører en forøgelse af det årlige brændselsforbrug på 2,28 MWh.

⁴ Brændselsforbruget er defineret som den brændselsmængde, der tilføres forsyningssystemet fra energikilderne, jfr. figur 1, afsnit 2. Omsætning af elektrisk kraft til kemisk energi i form af brændstoffer til transportmidler medfører således en formindskelse af brændselsforbruget, idet forbruget af olie eller naturgas i transportmidler formindskes.

El-forbrug	Vindkraft	KV-varme forbr.	KV-brændselsforbr.	Transportbrændsel prod.	El-import	Ændring af brændselsforbrug ialt i DK ved Forøgelse af			Konvertering		
						El-forbr.	Vindkraft	KV-varme forbr.	Kedel til KV	El-til KV	Kedel til VP
Varmepumper i LOCUS-anlæg:											
A: 130	20	120	279	0	1	2.28	-1.86	0.47	-0.64	-1.81	-0.42
B: 140	60	120	250	7	1	2.15	-1.31	0.35	-0.77	-1.81	-0.46
C: 140	80	140	241	13	1	1.80	-0.93	0.43	-0.68	-1.36	-0.57

- *Vindkraft-faktoren -1,86* betyder, at en forøgelse af den årlige el-produktion i vindmøller på 1 MWh medfører en formindskelse af det årlige brændselsforbrug på 1,86 MWh.
- *KV-varmeforbrugsfaktoren 0,47* betyder, at en forøgelse af det årlige varmeforbrug i kraftvarmesystemet på 1 MWh medfører en forøgelse af det årlige brændselsforbrug på 0,47 MWh.

For el- og varmeforbrug kan faktorerne omvendt læses som besparelsesfaktorer. F.eks.: en el-forbrugs-faktor på 2,28 betyder, at en formindskelse af el-forbruget på 1 MWh medfører en formindskelse af brændselsforbruget på 2,28 MWh.

Antag nu at tilfælde A repræsenterer den nuværende situation (2012) og at tilfælde C repræsenterer situationen i 2022.

Med varmepumper i kraftvarmesystemet medfører vindkraft-forøgelsen fra 20 til 80 PJ over perioden 2012 til 2022 en formindskelse af KV-brændselsforbruget på $279 - 241 = 38$ PJ og en forøgelse af transportbrændsel-produktionen på 13 PJ samtidigt med, at el-forbruget stiger med 10 PJ, og KV-varmeforbruget stiger med 20 PJ.⁵

Disse ændringer af produktions/forbrugs forholdene i kraftvarmesystemet medfører ændringer af brændselsforbrugs-faktorerne til højre i tabellen:

- En el-besparelse på 1 MWh medfører i 2012 en brændselsbesparelse på 2,28 MWh. I 2022 er besparelsen formindsket til 1,80 MWh.
- En vindmølle med en årlig el-produktion på 9 MWh giver i 2012 en brændselsbesparelse på $9 \cdot 1,86 = 16,7$ MWh. I 2022 er besparelsen formindsket til $9 \cdot 0,93$ MWh = 8,4 MWh.
- En forøgelse af KV-varmeforbruget på 1 MWh medfører i 2012 et forøget brændselsforbrug på 0,47 MWh. I 2022 er brændselsforbrugsforøgelsen 0,43 MWh.

Med de samme ændringer af el-forbruget, vindkraften og KV-varmeforbruget fås i et kraftvarmesystem med el-patroner en formindskelse af brændselsforbruget på $284 - 253 + 10 = 41$ PJ over perioden 2012 -2022 - mod $38 + 13 = 51$ PJ i et system med varmepumper.

Endvidere medfører forøgelser af KV-varmeforbruget større forøgelser af KV-brændselsforbruget i systemet med el-patroner end i systemet med varmepumper. Især til sidst i perioden, hvor en forøgelse af KV-varmeforbruget på 1 MWh giver forøgelse af brændselsforbruget på 0,75 MWh mod 0,43 MWh i systemet med varmepumper.

⁵ Kalorimetrisk energiregnskab:

Input-forøgelse (vindkraft og brændsel) = $60 - 38 = 22$ PJ.

Output-forøgelse: (el, KV-varme og transp. brændsel) = $10 + 20 + 13 = 43$ PJ

El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brænd- sels- forbr.	Trans- port sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ialt i DK ved						
						Forøgelse af			Konvertering			
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Kedel til KV	El- til KV	Kedel til VP	
Varmepumper i LOCUS-anlæg:												
A:	130	20	120	279	0	1	2.28	-1.86	0.47	-0.64	-1.81	-0.42
B:	140	60	120	250	7	1	2.15	-1.31	0.35	-0.77	-1.81	-0.46
C:	140	80	140	241	13	1	1.80	-0.93	0.43	-0.68	-1.36	-0.57

Konverterings-faktorerne til højre i tabel 1 har følgende betydning:

Varmepumper i kraftvarmesystemet, tilfælde A:

- Konvertering fra kedel til kraftvarme:* Faktoren -0,64 betyder, at når f.eks. et hus med olie- eller naturgaskedel og et årligt varmeforbrug på 15 MWh, beliggende i et fjernvarmeområde, konverteres til fjernvarme fra et kraftvarmeværk opnås en brændselsbesparelse på $15 \cdot 0,64 = 9,6$ MWh. Tallet fremkommer som differensen mellem den sparede olie eller naturgas = $15/0,90 = 16,7$ MWh (nyttevirkning 0,90) og forøgelsen af KV-brændselsforbruget = $15 \text{ MWh} \cdot 0,47 = 7,1$ MWh. Ved konvertering til kraftvarme fra et mini-kraftvarmeværk bliver besparelsesfaktoren lidt mindre, hvis værkets el-nyttevirkning er mindre 0,40 (den gennemsnitlige el-nyttevirkning, der her er regnet med for kraftmaskiner i kraftvarmeværker, jfr. afsnit 3). Ved konvertering af et fjernvarmeværk til kraftvarme fås den samme relative besparelse på 0,64 som ved konvertering af individuelle olie- og naturgaskedler beliggende i fjernvarmeområder.⁶
- Konvertering fra el-varme til kraftvarme:* Faktoren -1,81 betyder, at når et hus med el-varme og et årligt varmeforbrug på f.eks. 10 MWh, beliggende i et fjernvarmeområde, konverteres til kraftvarme, opnås en brændselsbesparelse på $10 \text{ MWh} \cdot 1,81 = 18,1$ MWh. Tallet fremkommer som differensen mellem KV-brændselsbesparelsen ved en el-besparelse på 10 MWh og forøgelsen af KV-brændselsforbruget ved en forøgelse af KV-varmeforbruget på 10 MWh = $10 \text{ MWh} \cdot (2,28 - 0,47) = 18,1$ MWh.
- Konvertering fra kedel til varmepumpe:* Faktoren -0,47 betyder, at når en olie- eller naturgaskedel udskiftes med en varmepumpe (med en gennemsnitlig effektfaktor på 3,3) opnås en brændselsbesparelse i det samlede energisystem på 47% af husets årlige varmeforbrug.

Når det igen antages, at tilfælde A svarer til den nuværende situation (2012), og tilfælde C svarer til situationen i 2022, ses det af tabel 1, at disse konverterings-faktorer ændres i tidens løb. Det er en simpel følge af, at disse faktorer er direkte afledt af brændselsbesparelsesfaktorerne for el-forbrug og KV-varmeforbrug.

Med el-patroner i stedet for varmepumper i kraftvarmeværkerne bliver brændselsbesparelserne ved konvertering fra kedler til kraftvarme mindre, fordi der konverteres til et mindre effektivt kraftvarmesystem.

⁶ Der regnes her med en gennemsnitlig nyttevirkning på 0,9 for olie- og naturgaskedler og for kedler i fjernvarmeværker.

6. Generelle tekniske retningslinier for strategisk energiplanlægning

Nedbringelse af brændselsforbruget ved en effektiv udnyttelse af den forøgede vindkraft, der frembringes ved store investeringer i havvindmølleparker, kystnære vindmølleparker og store vindmøller i landskabet, indebærer, at kraftvarmeværkerne udstyres med varmepumper, sådan at de kan udnytte overskydende elektrisk kraft til at formindske deres brændselsforbrug. Hvis kraftvarmeværkerne i stedet for varmepumper udstyres med el-patroner, bliver brændselsbesparelsen mindre, se afsnit 3, figur 3, og afsnit 5, tabel 1.

Når den årlige el-produktion i vindmøller er nået op på omkring 50% af det årlige el-forbrug, bliver de KV-brændselsbesparelser, der opnås ved en yderligere forøgelse af vindkraften, stadig mindre, mens forøgelsen af KV-brændselsforbruget ved forøget KV-varmeforbrug aftager med voksende vindkraft, se afsnit 5, figur 5 og tabel 1.

Det betyder, at når vindkraften er nået på omkring 50% procent af el-forbruget, skal brændselsbesparelserne⁷ ved en yderligere vindkraftudbygning især opnås ved at konvertere bygninger fra kedel- og el-opvarmningssektoren til kraftvarmesystemet. Derved opnås store brændselsbesparelser ved nedlukning af individuelle kedler, fjernvarmekedler og el-varme mod en relativt lille forøgelse af KV-varmeforbruget, se tabel 1.

Yderligere brændselsbesparelser kan opnås ved at udskifte de store damp turbine-kraftvarmeværker med et stort antal små og mindre LOCUS-anlæg, hvis el-produktion til el-nettet hurtigt kan reguleres, se afsnit 14.

Heraf følger en række generelle retningslinier for den strategiske planlægning af den tekniske udvikling af et energisystem med stadig mere elektrisk kraft fra vindmøller med det formål at nedbringe brændselsforbruget på en teknisk og økonomisk hensigtsmæssig måde:

- 1) Kraftvarmeværkerne skal i størst muligt omfang ombygges til LOCUS-anlæg.
- 2) Fjernvarmeværker skal udskiftes med LOCUS-anlæg. Brændselsbesparelse 60 - 70 procent af fjernvarmeværkernes brændselsforbrug for LOCUS-anlæg med varmepumper, 40 -50 procent for LOCUS-anlæg med el-patroner, se tabel 1.
- 3) Individuelle oliefyr i fjernvarmeområder skal udskiftes med fjernvarme fra LOCUS-anlæg. Brændselsbesparelsen er den samme (60-70/40-50 procent) som ved udskiftning af fjernvarmeværker med LOCUS-anlæg.
- 4) Individuelle naturgasfyr kan med fordel udskiftes med mini-LOCUS-anlæg med varmepumper (i de enkelte bygninger eller i klynger af nabo-bygninger). Brændselsbesparelsen bliver 50 - 60 procent af fyrenes naturgasforbrug - lidt mindre end for større LOCUS-anlæg, fordi mini-anlæggenes el-nyttelvirkning er mindre. Dog kan der opnås en yderligere

⁷ Her og i de følgende punkter i dette afsnit betyder 'brændselsbesparelse' eller 'formindskelse af brændselsforbruget' den besparelse/formindskelse, der opnås i det samlede danske energisystem.

brændselsbesparelse, fordi de små LOCUS-anlægs el-produktion til el-nettet løbende kan reguleres, se afsnit 14.

Hvis et naturgasnet udskiftes med et fjernvarmenet, så bygningerne overgår fra naturgasforsyning til fjernvarmeforsyning fra et LOCUS-anlæg, bliver brændselsbesparelsen også lidt mindre (50 - 60 procent) end ved udskiftning af oliefyr i fjernvarmeområder med fjernvarme. Det skyldes ledningstabet i det nye fjernvarmenet.

- 5) I fjernvarmeområder skal bygninger med el-varme overgå til fjernvarmevarme fra LOCUS-anlæg. For LOCUS-anlæg med varmepumper andrager brændselsbesparelsen 140 - 180 procent af el-forbruget i bygningernes el-radiatorer og varmtvandstanke. For LOCUS-anlæg med el-patroner 100 - 160 procent.
- 6) Udenfor fjernvarme- og naturgasområder skal opvarmning med individuelle kedler erstattes med opvarmning med varmepumper. Brændselsbesparelse 40 - 55 procent af brændselsforbruget i de individuelle kedler.

Det følger umiddelbart af pkt. 2), at

- 7) En hel eller delvis omlægning af fjernvarmeforsyningen fra kraftvarmeværker til forsyning fra fjernvarmekedler medfører et forøget brændselsforbrug. Dette gælder også, hvis fjernvarmeforsyningen omlægges til forsyning fra fjernvarmeværker, der udnytter geotermisk varme, eller hvor varmeproduktionen suppleres med varme fra solfangeranlæg, se afsnit 7 og 8.

Investeringer på indsatsområderne 1) - 6), som forøger energiforsyningssystemets effektivitet, vil i de fleste tilfælde give større brændselsbesparelser per investeret krone end investeringer i energimæssige bygningsforbedringer (efterisolering m.m.), som formindsker varmeforbruget. Derfor skal udbygning af varmeforsyning fra LOCUS-anlæg have høj prioritet i den strategiske planlægning.

Prioritering af investeringer, som forøger forsyningssystemets effektivitet, fremfor investeringer, som nedbringer varmeforbruget betyder, at de brændselsbesparelser, der efterfølgende opnås ved at nedbringe varmeforbruget bliver mindre. (Brændselsbesparelsen ved en varmebesparelse på 1 MWh bliver 0,4 - 0,5 MWh, når huset opvarmes med fjernvarme fra et LOCUS-anlæg med varmepumpe, mod 1,1 MWh, når huset opvarmes med en individuel kedel.) Det betyder, at store investeringer i varmebesparelser først bliver økonomisk fordelagtige, efterhånden som brændselspriserne stiger.

Som det fremgår af tabel 1 er det imidlertid el-forbruget, der har størst indvirkning på brændselsforbruget. Derfor er den vigtigste, generelle regel for den strategiske planlægning, at

- 8) El-besparelser skal have højeste prioritet.

7. Udnyttelse af geotermisk varme

I et energisystem, hvor el- og varmforsyningen er baseret på en (termodynamisk) effektiv udnyttelse af brændsels- og vindkraft-ressourcerne i LOCUS-anlæg, kan der kun opnås ubetydelige brændselsbesparelser ved at udnytte geotermisk varme i stedet for udeluften som varmereservoirer for varmepumper. Dette fremgår af afsnit 3, figur 3 og bilag 1.

Dertil kommer, at i et energisystem, hvor fjernvarmforsyningen baseres på LOCUS-anlæg - hvilket som sagt er en forudsætning for at opnå de i afsnit 6 viste brændselsbesparelser - er varmepumperne ikke i drift i sommerhalvåret, hvor der overskud af kølevandsvarme fra LOCUS-anlæggenes kraftmaskiner, se afsnit 4, figur 4, og afsnit 9, figur 6. Derfor vil de geotermiske anlæg kun være i drift i vinterhalvåret.

For at opnå betydelige brændselsbesparelser ved at investere i udnyttelse af geotermisk varme skal man derfor basere fjernvarmforsyningen på (termodynamisk) ineffektive varmegærker - eventuelt ved at standse el-produktionen i eksisterende kraftvarmegærker. Men på den måde bliver resultatet et større brændselsforbrug i det danske energisystem.

8. Solvarme

Individuelle solfangere tjener til at formindske behovet for varme fra forsyningssystemet til forbrugssystemet (herunder varmebehovet fra individuelle kedler, se afsnit 2, figur 1). Derved formindskes brændselsforbruget til opvarmning og (især) til varmtvands-forsyning af bygninger udenfor kraftvarmesystemet (jfr. afsnit 2).

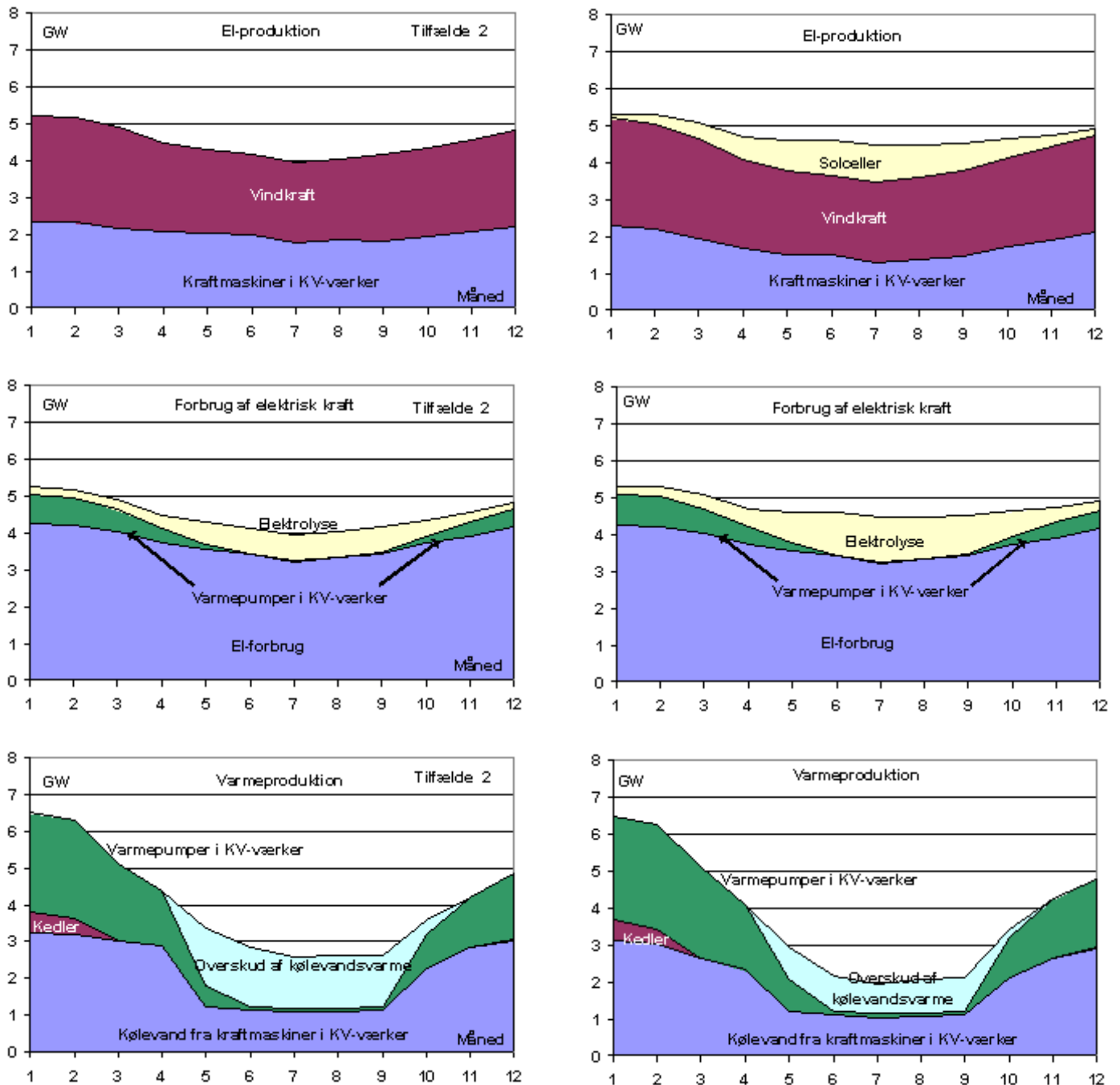
For de bygninger, der tilhører kraftvarmesystemet, opnås ingen betydelige brændselsbesparelser ved at investere i solfangere. Det skyldes, at størstedelen af varmeproduktionen i solfangere sker i sommerhalvåret, hvor der er overskud af kølevandsvarme fra kraftvarmegærkerne, se afsnit 4, figur 3. Ved at investere i solfangere opnår man kun at forøge kølevandsoverskuddet.

Det samme gælder for investeringer i store solfangeranlæg tilkoblet kraftvarmegærkers fjernvarmenet: Man opnår kun at forøge kølevandsoverskuddet. For at opnå betydelige brændselsbesparelser ved disse investeringer må man derfor - ligesom for investeringer i geotermiske anlæg - sørge for, at solfangeranlæggene indgår i et (termodynamisk) ineffektivt energisystem. Det kan man gøre ved at nedlægge eller kraftigt reducere el-produktionen i kraftvarmegærkerne og erstatte kølevarmen fra værkernes motorer med varme fra fjernvarmekedler. Ligesom for investeringer i geotermiske anlæg bliver resultatet et større brændselsforbrug i det danske energisystem.

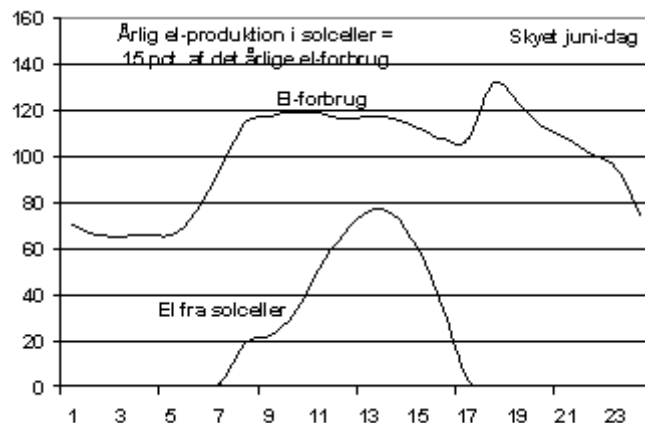
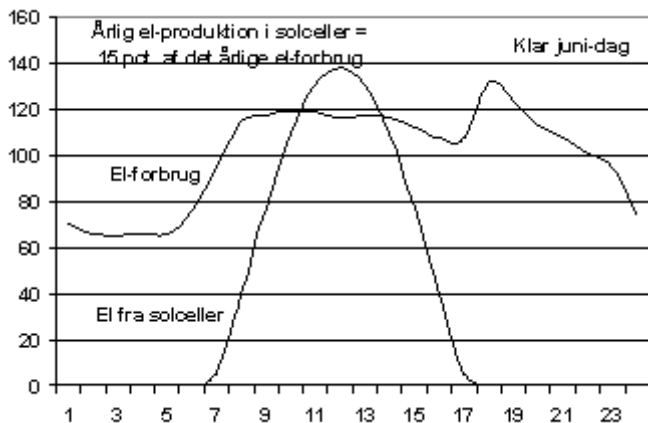
Ved at investere i sæsonvarmelagre, sådan at den solvarme, der fremkommer i sommerhalvåret, kan udnyttes i vinterhalvåret, kan der opnås brændselsbesparelser. Men hvis investeringer i sæsonvarmelagre giver så store brændselsbesparelser, at de er økonomisk hensigtsmæssige, skal lagrene først og fremmest bruges til lagring af overskuds-kølevarmen fra kraftvarmegærkernes motorer. Hvis man med solfangere yderligere forøger overskuds-varmeproduktionen i sommerhalvåret, skal der investeres i meget store sæsonlagre, hvis overskudsvarmen skal udnyttes i vinterhalvåret.

9. Solceller

El-produktionen i solceller er langt større i sommermånederne end i vintermånederne og er koncentreret på få af døgnets timer, se figur 6 og 7.



Figur 6. Graferne til venstre (Tilfælde 2) er de samme som i figur 4, afsnit 4. Graferne til højre viser de ændringer, der sker, når der til vindkraften tilføjes en el-produktion i solceller, som på årsbasis er lig 15 % af el-forbruget - forudsat at det teknisk og uden uforholdsmæssigt store økonomiske omkostninger kan lade sig gøre at udnytte størstedelen af denne forøgelse af el-produktion til at opnå brændselsbesparelser i det danske energisystem. De tekniske problemer og de forøgede økonomiske omkostninger skyldes, at udnyttelse af store, hurtigt varierende effekter fra solceller (se figur 7) stiller meget store krav til effekt-reguleringen i el-systemet.



Figur 7. Eksempler på fordelingen af el-produktionen i solceller over døgnet. Med en årlig el-produktion i solceller = 15% af det årlige el-forbrug vil el-effekten fra solceller i sommermånederne hyppigt, men kortvarigt overstige el-forbruget. (Sydvendte solfangere, hældning 45 grader.)

Solcelleanlæg kan i nogle henseender være at foretrække fremfor vindmøller. Store solcelleanlæg kan opstilles i forladte grusgrave og andre steder, hvor de ikke forstyrrer landskabsbilledet, og solceller er støjfri. Dyrere er det at anbringe solceller på tage og facader, hvor de også kan skæmme bybillederne.

Forudsat at prisen på solceller i de kommende år falder så meget, at det er samfundsøkonomisk forsvarligt at investere i solcelleanlæg i stedet for at investere i en yderligere vindkraftudbygning, kan el-produktion i store solcelleanlæg således blive et relevant supplement til el-produktion i vindmøller.

Derfor og fordi der i kraft af en ekstraordinær høj afregningspris for solcellestrøm fra små solcelleanlæg til el-nettet⁸ er opstået et hurtigt voksende solcelle-marked, er der grund til at analysere de energitekniske forhold omkring en betydelig el-produktion i solceller med henblik på vurderinger af de samlede økonomiske omkostninger, der vil knytte sig til produktionen.

Det ses af figur 6, at el-produktionen i solceller kan give betydelige brændselsbesparelser, dels ved mindre el-produktion i kraftvarmeværker, dels ved udnyttelse af det større el-overskud til brintproduktion. Disse brændselsbesparelser kan imidlertid kun opnås, hvis kraftvarmeværkerne meget hurtigt kan formindske deres el-produktion, når el-effekten fra solceller stiger i formiddagstimerne, og derefter ligeså hurtigt kan forøge deres produktion, når solcelle-effekten falder i eftermiddagstimerne.

Realisering af brændselsbesparelses-potentialet ved el-produktion i solceller stiller således yderligere krav til el-effektreguleringsevnen i et energisystem med meget vindkraft. Og da størstedelen af el-produktionen i solceller sker i sommermånederne, hvor der ikke er behov for varmeproduktion i varmepumper, kan

⁸ Ejere af mindre solcelleanlæg får i dag (2012) ca. 2 kr/kWh for den strøm, de leverer til nettet, idet den leverede strøm fradrages fuldtud på deres el-regning. Vindmølleejere får 0,35-0,40 kr/kWh. Solceller er således kraftigt subsidieret med et tilskud, der betales af alle el-forbrugerne. Først når solcelleprisen er yderligere reduceret med en faktor 4 - 5, bliver solceller rentable uden denne subsidiering.

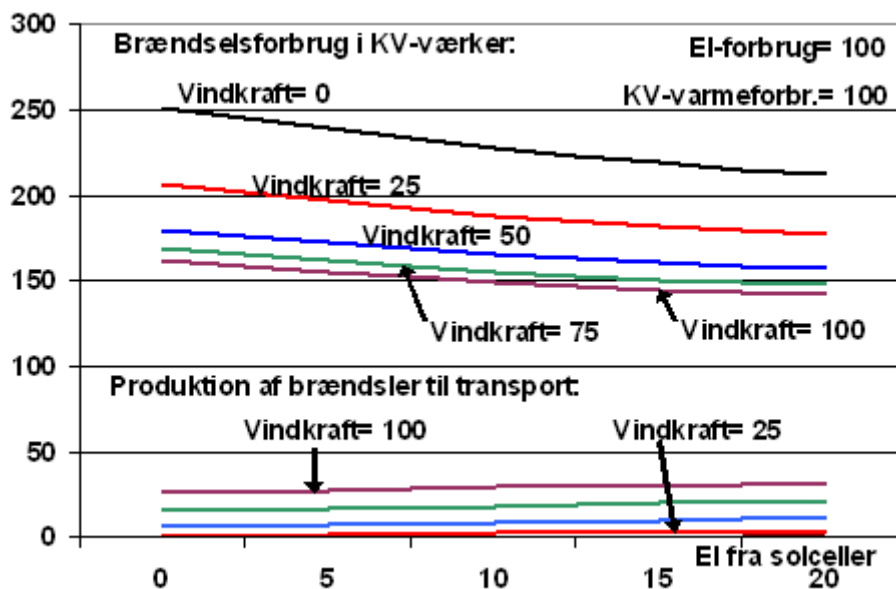
det yderligere el-overskud, el-produktionen i solceller medfører, kun udnyttes i elektrolyseanlæg.

De nedenstående grafer figur 8 - 10 belyser, hvordan el-produktion i solceller påvirker brændselsforbrug og el-effekter i det tilfælde, hvor det årlige KV-varmeforbrug er lig det årlige el-forbrug.

Det er i beregningerne antaget, at 60% af el-produktionen i kraftvarmeværker (måned for måned) sker med kraftmaskiner, der hurtigt kan op- og nedregulere deres effekter (jfr. de i afsnit 3 angivne beregningsforudsætninger). Hvis en større del af el-produktionen sker med sådanne hurtigt regulerbare maskiner, opnås større brændselsbesparelser og mindre el-effekter, se afsnit 14.

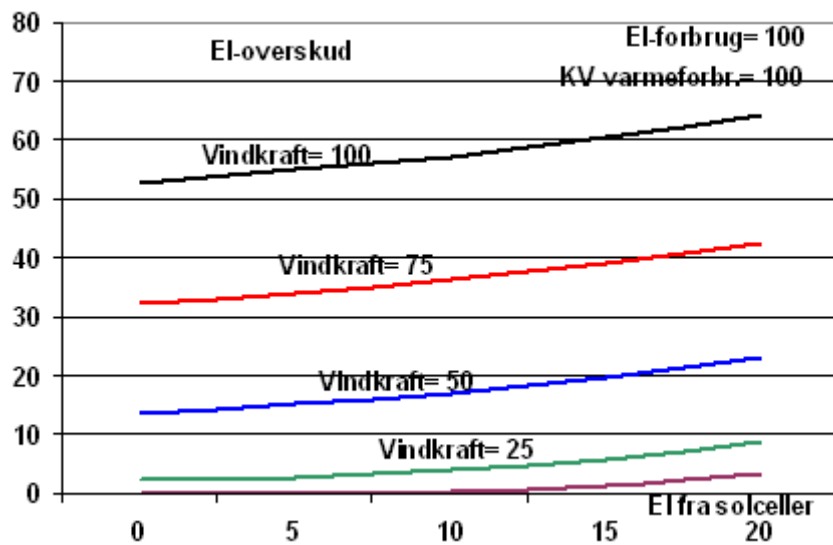
Energitalet ved omsætning af elektrisk kraft til brændsler til transportmidler er sat til 40% af den elektriske kraft, der tilføres elektrolyseanlæggene.

Der er i beregningerne af elektrolyseanlæggenes kapaciteter og benyttelsestider regnet med, at anlæggene skal kunne udnytte 85% af det årlige el-overskud. Dvs. at anlæggene dimensioneres til at kunne udnytte en maksimal effekt, der er noget mindre end den maksimale el-overskudseffekt.

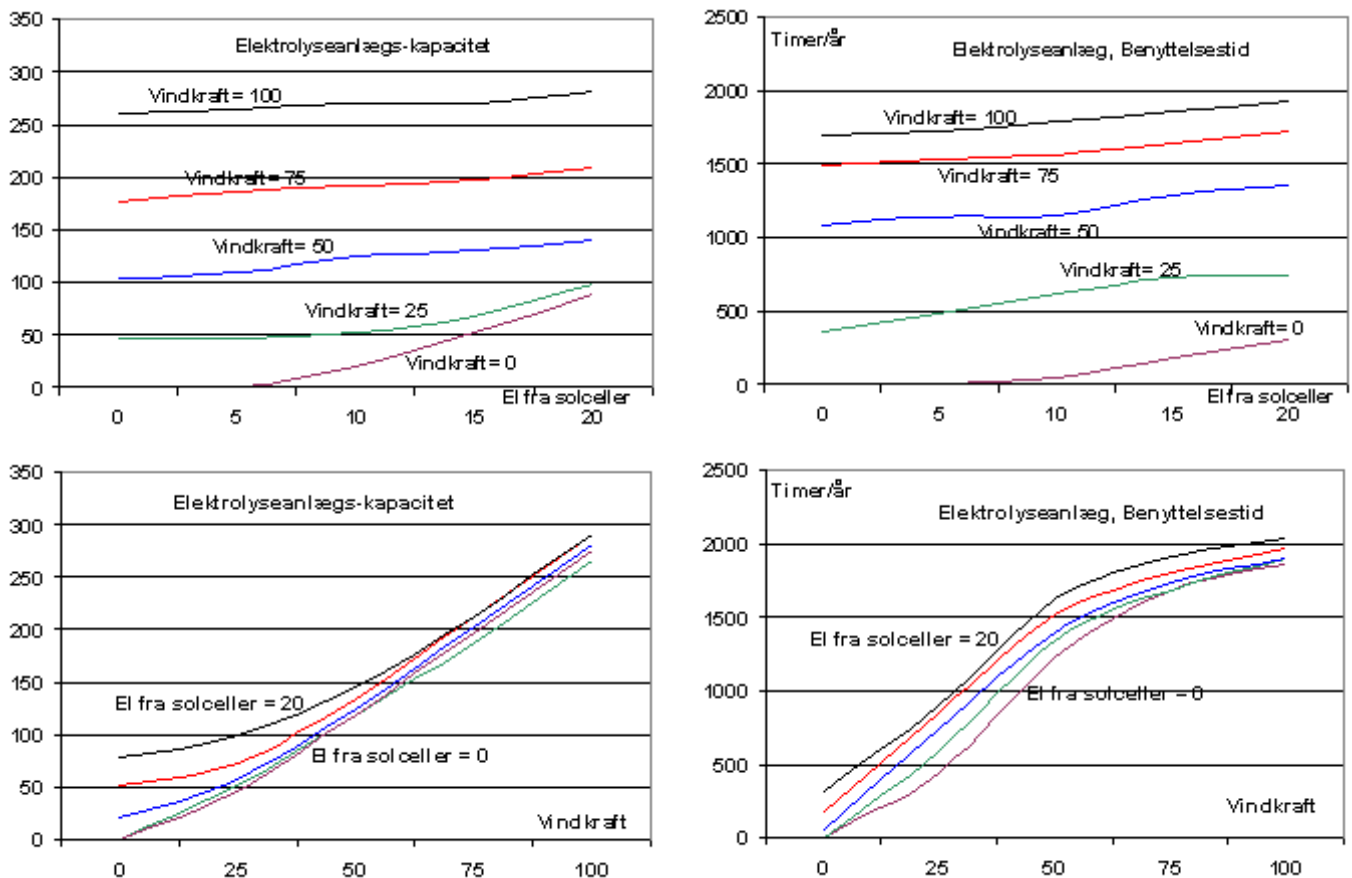


Figur 8. Den formindskelse af brændselsforbruget i KV-værker, der opnås ved en marginal forøgelse af el-produktionen i solceller, aftager med voksende vindkraft, medens produktionen af brændsler til transportmidler kun påvirkes svagt af en forøgelse af el-produktionen i solceller. Det skyldes dels den ovenfor angivne begrænsning af den hurtige effekt-reguleringsevne i kraftvarmeværkerne, dels den angivne begrænsning af elektrolyseanlæggenes kapacitet (85% begrænsningen). Disse begrænsninger betyder, at de i sommermånederne hyppige, men kortvarige store effekter fra solcellerne ikke udnyttes til at nedbringe brændselsforbruget i kraftvarmeværkerne og forøge produktionen af brændsler til transportmidler.

Figur 9 viser et forstørret billede af det el-overskud, der bliver til rådighed for produktion af transportbrændsler. Ved at multiplicere tallene i figur 9 med 0,6 (omsætningstab 40%) fremkommer de i denne figur viste værdier af transportbrændselsproduktionen.



Figur 9. Når den årlige el-produktion i vindmøller er større end 25% af det årlige el-forbrug, medfører en forøgelse af den årlige el-produktion i solceller en omtrent halvt så stor forøgelse af det årlige el-overskud, der er til rådighed for produktion af brændsler til transportmidler.



Figur 10. De viste elektrolyseanlægs-kapaciteter er i procent af den gennemsnitlige el-forbrugseffekt i januar. Kapaciteter og benyttelsestider er beregnet på grundlag af den overfor angivne dimensioneringsregel. Benyttelsestiderne af de installerede anlægskapaciteter vil naturligvis variere fra år til år afhængigt af vejrforholdene.

Det fremgår af figur 10, at når den årlige el-produktion i vindmøller er større end 50% af det årlige el-forbrug, medfører en forøget el-produktion i solceller ikke stærkt stigende omkostninger til elektrolyseanlægs-investeringer, når disse dimensioneres til at kunne udnytte 85% af el-overskuddet. Endvidere stiger benyttelsestiderne svagt, når el-produktionen i solceller forøges.

Når den årlige el-produktion i vindmøller er større end 50% af det årlige el-forbrug ligger benyttelsestiderne for elektrolyseanlæggene i intervallet 1.000 - 2.000 timer/år. Benyttelsestiden for den samlede motorkapacitet i den danske bilpark - omkring 125.000 MW - som elektrolyseanlæggene skal levere brændstof til, er (heldigvis) betydeligt mindre: 300 - 400 timer/år i gennemsnit.

Disse beregningseksempler (gældende for en situation, hvor kraftvarmeværkernes årlige varmeproduktion er lig det årlige el-forbrug) indikerer, at med meget vindkraft vil omkostningerne ved at udnytte det yderligere el-overskud, der fremkommer, når vindkraften suppleres med el fra solceller, ikke være prohibitive for investeringer i solceller. Det er imidlertid en forudsætning, at kraftvarmeværkerne er LOCUS-anlæg, og at mindst 60% af dem har kraftmaskiner, der hurtigt kan standses og genopstartes. Hvis denne procentdel forøges opnås større brændselsbesparelser, se afsnit 14.

Hvis solcelle-prisen falder til 1/4 af den nuværende (2012), kan det således blive samfundsøkonomisk acceptabelt at supplere el-produktionen i vindmøller med el fra solcelleanlæg.

10. Biogas

Der er brug for al den biogas, der kan produceres i Danmark på en økologisk bæredygtig måde, til drift af små kraftvarmeværker (LOCUS-anlæg) beliggende ved eller i nærheden af biogasanlæggene og i nærheden af små og mindre byer, hvor kølevarmen fra motorerne kan udnyttes til fjernvarme.

Da den størst mulige udbredelse af sådanne kraftvarmeværker med korte opstart- og standsningstider er den afgørende forudsætning for at indhente de opnåelige brændselsbesparelser ved vindkraftudbygningen, skal biogassen bruges til drift af sådanne kraftvarmeværker.

Derfor er det ikke formålstjenligt at investere i anlæg til raffinering af biogas og indføde den raffinerede gas i naturgasnettet.

11. Smart grid

'Smart grid' er den nye betegnelse for et el-system, hvori el-forbruget løbende søges tilpasset den med vindkraften varierende el-produktion. Udviklingen af 'smart grid' har skabt grundlag for en ny elektronisk industri, der producerer fjernstyret elektronik til el-apparater og el-motorer (i køleskabe, fryser, vaskemaskiner, varmepumper m.fl.). Princippet er, at apparaterne og motorerne standses, når el-prisen er høj (hvilket antages at betyde, at der ikke er el-overskud i systemet), og startes, når el-prisen er lav (el-overskud i systemet).

Der er imidlertid snævre grænser for den effektregulering, der kan opnås på den måde. Det følger af, at energibalance-regnskabet over et vist tidsrum - en uge eller en måned - skal gå op:

$$B + W_{\text{vind}} = W_{\text{forbrug}} + Q_{\text{forbrug}} + W_{\text{overskud}} + Q_{\text{køl}}$$

hvor B er brændselsforbruget i kraftmaskiner og kedler, W_{vind} er el-produktionen i vindmøller, W_{forbrug} er el-forbruget, Q_{forbrug} er fjernvarmeforbruget, W_{overskud} er det el-overskud, der er til rådighed for brint-produktion, og $Q_{\text{køl}}$ er den overskydende varme fra kraftmaskinernes kølekredsløb.

Da W_{vind} , W_{forbrug} og Q_{forbrug} er givne størrelser over den betragtede periode, kan B kun ændres ved at ændre W_{overskud} og/eller $Q_{\text{køl}}$. I vintermånederne er $Q_{\text{køl}} = 0$, så der kun er tale om at formindske brændselsforbruget B ved at formindske W_{overskud} og dermed brintproduktionen.

Den formindskelse af el-forbruget, der i døgn med ringe vindkraft sker med smart grid i forbrugssystemet, vil efter kort tid (ét eller højst to døgn) blive afløst af et forøget el-forbrug, uanset om der på det tidspunkt er mere vindkraft eller ikke. Derfor kan det ikke påvises, at smart grid i forbrugssystemet giver brændselsbesparelser, og heller ikke at der opnås kapacitetsbesparelser i forsyningssystemet.

Under alle omstændigheder kan smart grid i forbrugssystemet kun give et meget beskedent - om noget - bidrag til en effektiv udnyttelse af den forøgede vindkraft, der vil tilgå energisystemet i de kommende år. De el-effekter, der kan udnyttes i varmepumper i kraftvarmeverker (LOCUS-anlæg) og elektrolyseanlæg er af en helt anden størrelsesorden (jfr. afsnit 9), og udnyttelse af elektrisk kraft i disse anlæg giver betydelige bidrag til formindskelsen af brændselsforbruget.

De dominerende elementer i et smart grid el-system bliver derfor LOCUS-anlæg og elektrolyseanlæg.

12. Forsyningssystemets effektivitet

De i praksis foreliggende muligheder for at formindske brændselsforbruget ved at forøge forsyningssystemets effektivitet er - uden en eksplicit definition af 'effektivitet' - beskrevet i de foregående afsnit. Den følgende definition og diskussion af 'effektivitet' tjener til at give en sammenfattende forklaring af de mange beregningsresultater.

Alle energiomsætnings-enheder og -anlæg (termodynamiske maskiner) er konstrueret til at udnytte termodynamiske potentialer til nyttige formål.

Potentialerne er:

- *Temperaturforskelle* (termiske potentialer). F.eks. mellem temperaturen i brændkammeret omkring en dampmaskines kedelrør og temperaturen i fjernvarmekredsløbet eller i fjorden, der køler kondensatoren.
- *Elektriske spændingsforskelle* mellem el-nettets ledninger og mellem ledningerne og jorden eller mellem polerne på et batteri (elektriske potentialer).
- Kinetisk energi i *hastighedsforskelle* mellem vinden og jordoverfladen, som driver vindmøllerne (kinetiske potentialer).
- *Trykforskelle*. F.eks. mellem en kompressors tryktank og atmosfæren (spatiale potentialer).
- *Højdeforskelle* (gravitationspotentialer). Udnyttes i vandkraftværker.
- *Kemisk uligevægt* (kemiske potentialer). F.eks. kan den kemiske uligevægt mellem en beholder med olie og atmosfærens ilt udløses ved at opvarme olien til brændpunktet.
- *Elektrokemisk uligevægt* i batterier af forskellig slags.

Dertil kommer elektrisk kraft fra det elektriske potentiale, der frembringes i solceller.

De nyttige formål er:

- at opretholde temperaturforskelle mellem indendørs opholdssteder og udeluften (opvarmning eller køling) og mellem køleskabe/kølerums og fryseres/fryserums indre og deres omgivelser.
- at frembringe elektrisk kraft til belysning og drift af elektriske apparater og maskiner.
- at frembringe elektrisk og mekanisk kraft til fremdrift af transportmidler, landbrugsmaskiner, entreprenørmaskiner, m.fl.
- at drive industrielle procesanlæg af forskellig art.

Termiske maskiner er

- termiske kraftmaskiner, der udnytter et termisk potentiale til at frembringe en mekanisk arbejdsydelse, der i en el-generator kan omsættes til et elektrisk potentiale (damp turbine kraftværker, gasturbiner, stempelmotorer, Sterlingmotorer),
- kompressions-varmepumper, der (omvendt) omsætter en mekanisk arbejdsydelse til et termisk potentiale, og
- absorptions-varmepumper, der omsætter et termisk potentiale ved en højere temperatur til et termisk potentiale ved en lavere temperatur.

De termiske potentialer, der driver termiske kraftmaskiner og absorptions-varmepumper, frembringes ved forbrænding, hvorved brændslets kemiske potentialer

omsættes til et termisk potentiale ved en høj temperatur.⁹

Brændselsceller tilhører ikke klassen af termiske maskiner. De omsætter et kemisk potentiale direkte til et elektrisk potentiale.

Den termodynamiske værdi - exergi-værdien - af et termodynamisk potentiale beregnes som den potentielle arbejdsydelse (det elektriske potentiale eller det mekaniske arbejde), der kan opnås ved at udnytte potentialet i en (ikke i praksis realiserbar) tabsfri proces. Et termodynamisk ressourceforbrug er exergi-værdien af den ressource (f.eks. et kemisk, et termisk eller et elektrisk potentiale), der forbruges i en termodynamisk maskine (eller en brændselscelle).

Effektivitet - her termodynamisk effektivitet - defineres som forholdet mellem

(1) r , som er den nedre grænse for det ressourceforbrug (det absolut mindste forbrug, målt som exergi-værdien), der nødvendigvis medgår til at løse en bestemt opgave (opfylde et givet formål), og

(2) R , som er det aktuelle ressourceforbrug, der medgår ved anvendelse af en bestemt teknik til at løse opgaven (opfylde formålet):

Effektivitet = r/R .

Differensen $R - r$ er det termodynamiske tab, der sker i den energiomsætningsenhed, der tjener til at løse opgaven (opfylde formålet).

Effektivitetsskalaen går fra 0% til 100%, men en effektivitet på 100% er uopnåelig, fordi der sker tab i alle termodynamiske processer.

Effektivitet er således en egenskab ved en termisk maskine (eller en brændselscelle). At forøge effektiviteten er ensbetydende med at formindske de termodynamiske tab og dermed brændselsforbruget i den termiske maskine. Tabel 2 viser nogle eksempler på forskellige termodynamiske maskiners effektivitet.

Den potentielle arbejdsydelse - exergi-værdien - fra en termisk maskine, der virker i kraft af temperaturforskellen mellem et høj-temperatur varmereservoir med den absolutte temperatur T (f.eks. et brændkammer) og et lav-temperatur reservoir med den absolutte temperatur T_0 (f.eks. udeluften eller havvand) er givet ved Carnot-faktoren:

$$C_f = 1 - T_0/T, \quad T = 273,15 + t \text{ Kelvin, } t \text{ grader C), se figur 11 og 12.}$$

De største tab i termodynamiske maskiner sker i forbrændingskammerne, fordi det termiske potentiale i en flammetemperatur på omkring 2.000 grader kun delvist kan udnyttes. Derfor opnås en høj effektivitet i de såkaldte combined-cycle kraftværker, hvor en gasturbine med en røggas-temperatur på 700-900 grader efter forbrændingskammeret, kombineres med et damp turbineanlæg, hvor damp temperaturen højst er ca. 550 grader. Med den høje temperatur i gasturbinen udnyttes en større del af det termodynamiske potentiale i flammen, se figur 11.

Blandt de øvrige tab, tegner tabene ved varmevekselvirkning over store temperaturdifferenser sig for langt den største del.

⁹ I sol-kraftværker i kedler, der opvarmes ved koncentration af solstrålingen fra et stort antal reflektorer. I atom-kraftværker i fissions-reaktorerne.

Opgave	Anlæg (teknik)	Effektivitet
Opretholdelse af en indetemperatur på 20 grader ved en udetemperatur på 0 grader og forskellige fremløbs/returtemperaturer i centralvarmekredsløbene	El-radiatorer	ca. 3%
	El-varmepumpe 60/30 grader (Udeluft/vand) 35/25 grader	ca. 11% ca. 16%
	Oliefyr	ca. 6%
	Naturgasfyr	ca. 7%
	Gasmotor+varmepumpe 60/30 gr. 35/25 gr.	ca. 14% ca. 18%
	Højtemperatur-brændselscelle + varmepumpe 60/30 grader 35/25 grader	ca. 18% ca. 25%
El-produktion	Moderne dampturbinekraftværk	ca. 47%
	Højtemperatur-brændselscelle	ca. 65%
El-produktion og opretholdelse af 20 grader indetemperatur i huse med fjernvarme. 40 MJ el/55 MJ varme fra værket. Fjernvarmefremløbstemp. 70 grader - returtemp. 30 grader Udetemperatur 0 grader.	Dampturbine	ca. 45%
	Gasmotor	ca. 43%
	Højtemperatur-brændselscelle + varmepumpe	ca. 63%

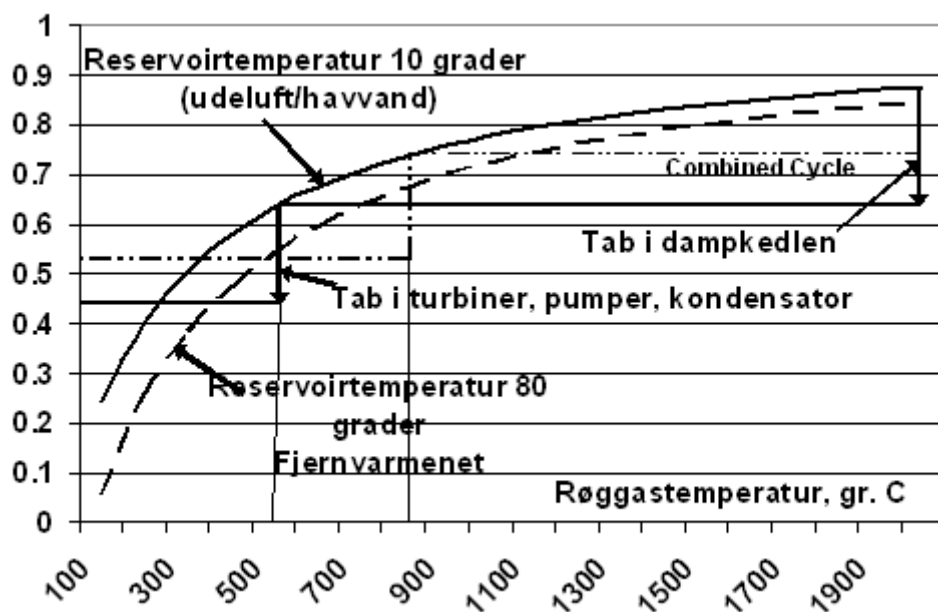
Tabel 2. Effektiviteter af brændselsdrevne lavtemperatur-opvarmningsanlæg, el-produktionsanlæg og el-produktionsanlæg, hvor kølevarmen udnyttes til rumopvarmning (fjernvarme). Der er regnet med et tab på 20% i fjernvarmerør.

Effektivitetsforskellene mellem de forskellige teknikker angiver forskellene i det ressourceforbrug (brændselsforbrug), der medgår til at løse den pågældende opgave.

For el-radiatorer og el-varmepumper gælder tallene på tidspunkter, hvor deres el-forbrug medfører en forøget el-produktion i brændselsfyrede kraftværker, dvs. hvor ikke hele el-forbruget dækkes af vindmøller og solceller.

Når opgaven: at opretholde rumtemperaturen løses med oliefyr eller naturgasfyr, er radiatortemperaturen ligegyldig. Her sker langt den største del af tabet i brændkamrene og ved varmeveksling over den meget store temperaturforskel mellem brændkammeret og varmtvandskredsløbet. Med varmepumper i opvarmningsanlæggene gælder det derimod om at holde radiatortemperaturen så lav som muligt, så det termiske potentiale, varmepumpen skal oparbejde, bliver så lille som muligt.

El-produktionsopgaven kan klares med meget mindre tab - dvs. større effektivitet - end rumvarmeopgaven og den kombinerede el+rumsvarmeopgave kan klares med omtrent samme effektivitet som el-produktionsopgaven. Det betyder, at rumvarmen opnås med et meget lille ekstra brændselsforbrug i forhold til el-produktionsopgaven.



Figur 11. Damp turbine- og Combined Cycle- kraftværk. Kurverne viser Carnot-faktoren $C_f = 1 - T_0/T$ som funktion af temperaturen T (Kelvin) i høj-temperatur varmereservoiret (røggas fra et brændkammer) for to værdier af temperaturen i lav-temperatur reservoiret: $T_0 = 273,15 + 10$ K (den fuldt optrukne kurve) og $T_0 = 273,15 + 80$ K (den stiplede kurve), svarende til henholdsvis udeluft/havvand og fremløbstemperaturen i et fjernvarmenet.

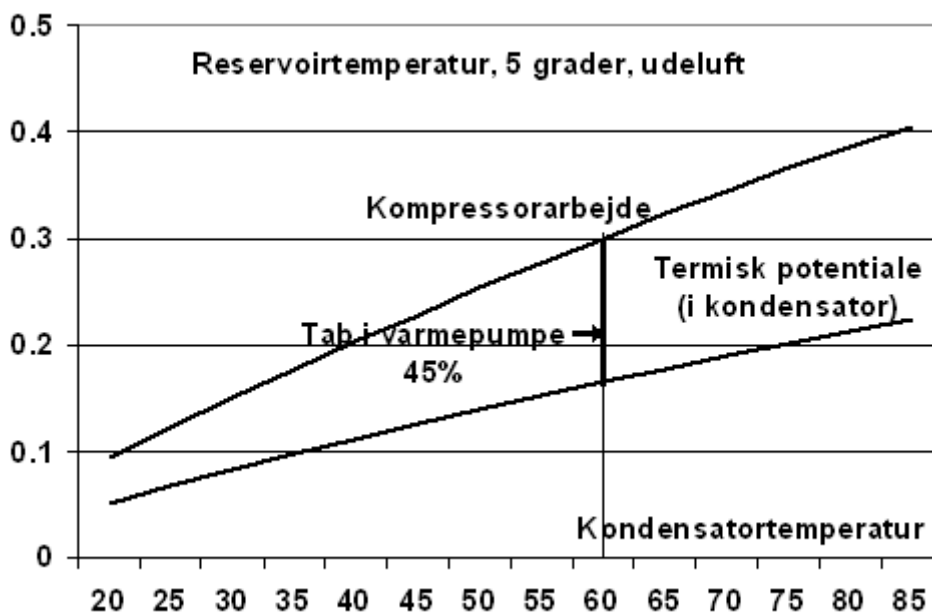
I damp turbine-kredsløbet er der et stort tab i kedlen, fordi det termiske potentiale i den høje flammtemperatur (ca. 2.000 gr. C) ikke kan udnyttes, men reduceres til potentialet ved ca. 550 gr. C omkring dampkedelrørene. Derefter sker der yderligere tab bl.a. i turbulente strømninger i turbiner og pumper og ved varmeveksling mellem damp og lav-temperatur reservoir i kondensatoren. Resultatet er en termodynamisk effektivitet på ca. 0,45. Anlæggets el-virkningsgrad bliver lidt mindre på grund af tab i el-generatoren.

I et combined cycle anlæg (de stiplede linier) bliver tabene mindre, fordi gasturbinen kan udnytte højere temperaturer (800-900 gr. C). Således kan der opnås en termodynamisk effektivitet på mere end 0,50.

Med et fjernvarmenet som lav-temperatur varmereservoir bliver temperaturforskellen $T - T_0$ og dermed det termiske potentiale i røggassen mindre. Derved formindskes arbejdsydelsen og dermed anlæggets el-virkningsgrad.

Den i tabel 2 viste meget lille termodynamiske effektivitet ved opretholdelse af en temperaturforskel mellem inde og ude på 20 grader med el-radiatorer skyldes, at der først sker et termodynamisk tab på ca. 55% i kraftværket (se figur 11), hvorpå det dér frembragte elektriske potentiale (exergi-værdi 1) reduceres til det meget lille termiske potentiale ved en temperaturforskel på 20 grader mellem inde og ude. (Effektiviteten er den samme som ved brug af elektrisk kraft til vandopvarmning ved at røre rundt i vandet med et elektrisk piskeris.)

I olie- og naturgasfyr udnyttes kun en meget lille del af det termiske potentiale i den hede røggas, så effektiviteten bliver lille. At der sker et stort tab fremgår af, at der med en anden teknik: en motordrevet varmepumpe, der udnytter kølevandet fra motoren, opnås en dobbelt så stor effektivitet (se tabel 2) og dermed et kun halvt så stort brændselsforbrug.



Figur 12. En varmepumpes effektivitet. I en varmepumpe frembringer kompressorarbejdet (det mekaniske arbejde, der fra en el-motor tilføres kompressoren) et termisk potentiale: en temperaturforskel mellem kondensatoren og varmereservoir, der kan være udeluften eller jorden i ca. 1 meters dybde (jordvarme). I en tabsfri varmepumpe ville kompressorarbejdet være lig det frembragte termodynamiske potentiale. På grund af de termodynamiske tab, der sker i kompressoren (turbulens), i trykreduktionsventilen mellem kompressoren og fordampere og i varmevekslere, bliver det virkelige kompressorarbejde større. Med en kondensatortemperatur på 60 grader og et tab på 45% bliver kompressorarbejdet 0,3 kWh for hver kWh varme, der afgives fra kondensatoren - svarende til en effektfaktor på $1/0,3 = 3.33$.

For en given reservoirtemperatur aftager effektfaktoren med stigende kondensatortemperatur, idet det termiske potentiale kompressoren skal frembringe vokser. Omvendt vokser effektfaktoren for en given kondensatortemperatur med stigende reservoirtemperatur, fordi det termiske potentiale i temperaturforskellen mellem kondensator og reservoir bliver mindre.

Effektiviteten af de termodynamiske maskiner, der indgår i forsyningssystemet (se figur 1), er bestemmende for brændselsforbruget. Effektiviteten er bestemt af de tab af termodynamiske potentialer, der sker i de termiske maskiner. En stor del af disse tab er tab af termiske potentialer, der består i temperaturforskelle. Det er således klart, at analyser af mulighederne for at formindske brændselsforbruget ved effektivitetsforbedringer i forsyningssystemet ikke kan baseres på kalorimetriske energibalancer-regnskaber¹⁰, hvori tabene registres som kalorimetriske tab.

For eksempel registrerer det kalorimetriske bogholderi tabet i et oliefyr som et skorstenstab på måske 15% og tillægger således oliefyret en nytte-virkning (der i

¹⁰ Alle Energistyrelsens energiregnskaber - opgørelser af energiforbrug og -produktion, vedvarende energi m.m. - er en form for bogholderi, hvori kalorie-værdierne (eller kWh eller Joule) af elektrisk kraft, varmt vand fra solfangere, brændværdier af olie, kul, halm osv. opsummeres, uanset at resultaterne af opsummeringerne er lige så irrelevante som den sum på 4 liter, der fremkommer ved at addere 1 liter vand, 1 liter benzin, 1 liter fløde og 1 liter akvavit.

almindelighed fortolkes som effektivitet) på 85%. Uanset at der med en mindre primitiv teknik end bålet i oliefyret kan leveres den samme opvarmningsydelse med et brændselsforbrug, der er mindre end halvdelen af oliefyrets, se tabel 2.

Tilsvarende registreres de kalorier, der ved en temperatur på 15-20 grader afgives til havvandet fra et damp turbine-kraftværks kondensator, som tabet i anlægget - uanset at vand ved 15-20 grader ikke har nogen som helst energimæssig værdi. (Hvis det havde var der ingen energiproblemer, for så kunne man i tankskibe sejle store vandmængder, der med en temperatur på 25 grader har større energiværdi, til Danmark fra de tropiske have.) Der sker ikke noget tab ved at udlede noget værdiløst. Tabene sker, som vist i figur 11, i kraftværkets energiomsætningsenheder.

Det kalorimetrisk bogholderis tabsopgørelser er således direkte vildledende for den tekniske analyse af muligheder for at nedbringe brændselsforbruget ved at formindske tabene i forsyningsystemet, dvs. forøge forsyningsystemets effektivitet. Det drejer sig ikke om kalorier, men om udnyttelse af termodynamiske potentialer til nyttige formål, jfr. indledningen til dette afsnit.

Så længe den strategiske energiplanlægning baseres på irrelevante kalorimetrisk bogholderier og ikke på effektivitets-analyser af de virkelige forhold i termodynamiske maskiner, vil planlægningen afstedkomme fejlinvesteringer med store, unødige samfundsøkonomiske omkostninger til følge.

13. Styring og regulering af forsyningsystemet - formålstjenlighed eller markedsstyring

Termodynamiske maskiner er konstruktioner, der styrer og regulerer termodynamiske processer med henblik på at udnytte termodynamiske potentialer til nyttige formål: el-forsyning, opvarmning, frembringelse af drivkraft i transportmidler, jfr. afsnit 12. I olie-, naturgas-, halm- og flisfyr i bygninger og fjernvarmeværker, der er de mest primitive maskiner, angår styring og regulering kun brændseltilførslen til bålene i brændkamrene. Med den mere raffinerede processtyring og -regulering i f.eks. en gasmotor med en tilkoblet varmepumpe opfyldes opvarmningsformålet med et brændselsforbrug, der er mindre end det halve af forbruget i et simpelt fyr, jfr. tabel 2. I bilmotorer opnås betydelige brændstofbesparelser ved hjælp af turboladere med intercoolere, der styrer tryk og temperatur i gasindtaget til cylindrene og ved elektronisk regulering af brændstofftilførsel og tændning. Også i store kraftværker formindskes brændselsforbruget ved en forbedret processtyring, jfr. figur 11.

Formålstjenligt optimal styring og regulering

Det samlede forsyningsystem udgør en stor termodynamisk maskine bestående af et stort antal energiomsætningsanlæg. Ligesom effektiviteten og dermed brændselsforbruget i systemets enkelte anlæg er bestemt af den styring og regulering, der sker i anlæggenes termodynamiske maskiner, er effektiviteten og dermed brændselsforbruget i det samlede forsyningsystem bestemt af den overordnede styring og regulering af driften af systemets enkelte anlæg.

Den overordnede styring og regulering af anlæggene i det samlede forsyningsystem består i beslutninger om, hvilke anlæg der på et givet tidspunkt skal

være i drift. Beslutningskriteriet er opfyldelse af forbrugssystemets behov med det mindst mulige brændselsforbrug. Den optimale formålstjenlige styring og regulering, sker således ved løbende at beslutte opstart og standsning af kraftmaskiner, varmepumper og elektrolyseanlæg på grundlag af beregninger af den optimale drift af systemet, sådan at de øjeblikkelige tilførsler af elektrisk kraft fra vindmøller og solceller udnyttes bedst muligt til at formindske det forbrug af fossile brændsler, der medgår til at opfylde forbrugssystemets øjeblikkelige el-behov og det øjeblikkelige behov for varmeproduktion i de enkelte kraftvarmeværker (bestemt af det lokale fjernvarmeforbrug og varmelagerbeholdningen).

De i afsnit 4, 5 og 9 fremlagte beregningsresultater er fremkommet ved driftssimuleringer, hvor der løbende sker en sådan optimal styring og regulering af det samlede forsyningssystem. (Simulering af en arbitrær, ikke optimal styring og regulering vil være en form for Monte Carlo-simulering med sandsynlighedsfordelinger som resultat).

Styring og regulering med el-markedets prissignaler

Det er stadig det fremherskende ideologiske princip, at markeds kræfterne skal bestemme både de investeringer, der indgår i den tekniske konstruktion af det fremtidige energisystem, og udnyttelsen af disse investeringer i den daglige drift af forsyningssystemet. Dette princip manifesterer sig i den markedsbestemte styring og regulering af forsyningssystemet.

Under el-markedets vilkår reguleres driften af forsyningssystemets kraftvarmeværker af el-prissignaler. En i øjeblikket høj el-pris er et signal til værkerne om at forøge deres el-produktion¹¹. En lav el-pris er et signal om formindsket el-produktion.

Det er klart, at der ikke på den måde opnås en regulering af el-produktion, som tilnærmelsesvist er optimal med hensyn til minimering af brændselsforbruget. For når den elektriske kraft fra vindmøller og solceller tiltager er det normalt kun nogle af de regulerbare værker, der skal formindske deres el-produktion, og omvendt skal kun nogle værker forøge deres produktion, når bidraget fra vindmøller og solceller aftager. Endvidere skal el-produktion fra biogas- og biomasse-fyrede værker prioriteres fremfor el-produktion i værker, der fyres med fossile brændsler, sådan at forbruget af fossile brændsler formindskes mest muligt.

Konflikten mellem markedsideologi og formålstjenlighed

Markedsstyringen er således i modstrid med princippet om, at såvel de strategiske beslutninger om de store anlægsinvesteringer som de driftsstrategier, der bestemmer den løbende udnyttelse af anlæggene, skal være teknisk og økonomisk formålstjenlige med hensyn til nedtrapning af brændselsforbruget.

Bag denne konflikt ligger to forskellige opfattelser af energisystemets

¹¹ El-produktion betyder her den elektriske effekt et kraftvarmeværk tilfører el-nettet. Produktionen kan være positiv eller negativ: positiv, når værket genererer elektrisk effekt til nettet, negativ, når værket optager elektrisk effekt fra nettet til drift af varmepumper eller til el-patroner, jfr. afsnit 3, LOCUS-anlæg.

samfundsøkonomiske funktion. På den ene side opfattelsen af energisystemet som en markedsplads, hvor el og varme er handelsvarer ligesom fødevarer, tøj og forskelligt isenkram. På den anden side opfattelsen af energisystemet som et kollektivt system, der ikke indgår i varemarkedet, men sammen med veje, uddannelsesinstitutioner og sygehuse udgør det kollektive grundlag for markedets virksomheder, eller rettere: det tekniske grundlag for samfundets funktioner i det hele taget.

Om den ene eller den anden af disse to indbyrdes modstridende opfattelser lægges til grund for den strategiske energiplanlægning er afgørende for, om det lykkes at nedtrappe brændselsforbruget så hurtigt, at de erklærede CO₂-målsætninger opfyldes og de værste samfundsøkonomiske konsekvenser af kraftigt stigende brændselspriser undgås.

14. El-lagring og/eller ombygning af kraftvarmesystemet

‘El-lagring’ i energisystemet betyder i almindelighed ikke lagring af elektriske potentialer i store kondensatorer. Der er tale om (delvist) reversibel omsætning af det elektriske spændingspotentiale til gravitations-potentialer (i vandkraft-reservoirer), kemiske potentialer (brint), elektrokemiske potentialer (i batterier), spatiale potentialer (trykluft) eller kinetiske potentialer (svinghjul).

Et energisystem med tilstrækkeligt store el-lagringskapaciteter ville kunne fungere med vindkraft og solceller som energikilder - uden noget brændselsforbrug.

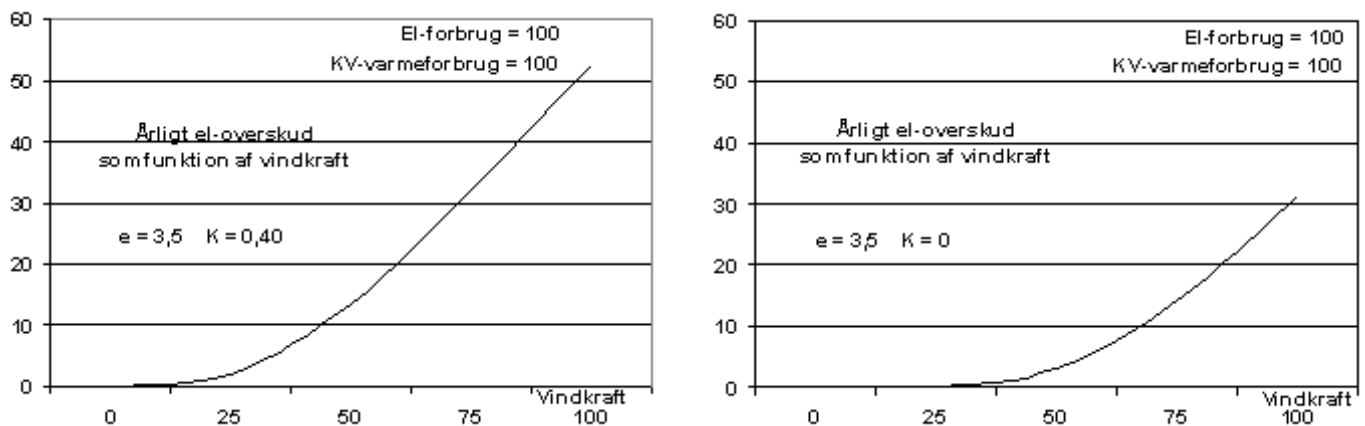
Biomassebrændsler kan erstatte el-lagring. Brændslerne frembringes i det årlige biologiske kredsløb, og de kan uden store omkostninger lagres indtil de skal bruges til frembringelse af elektrisk kraft. I et fremtidigt energisystem uden fossile brændsler er forbruget af biomassebrændsler derfor bestemt af de omkostninger, der er forbundet med el-lagring.

Brændselsforbruget i det danske kraftvarmesystem kan således formindskes ved at udnytte norske og svenske vandkraftværkers reservoirer til el-lagring. Spørgsmålet er i hvilket omfang udnyttelse af denne mulighed er at foretrække fremfor at forøge det danske kraftvarmesystems evne til at udnytte vindkraften og investere i elektrolyseanlæg til produktion af brint til transportbrændsler. Det er dels et spørgsmål om de nordiske og de alpine vandkraftværkers reguleringskapacitet i et europæisk energisystem med et voksende behov for el-lagring, dels et spørgsmål om de økonomiske omkostninger ved at forøge de nordiske el-nets transmissionskapacitet sammenlignet med omkostningerne ved at formindskes behovet for el-lagring i det danske energisystem.

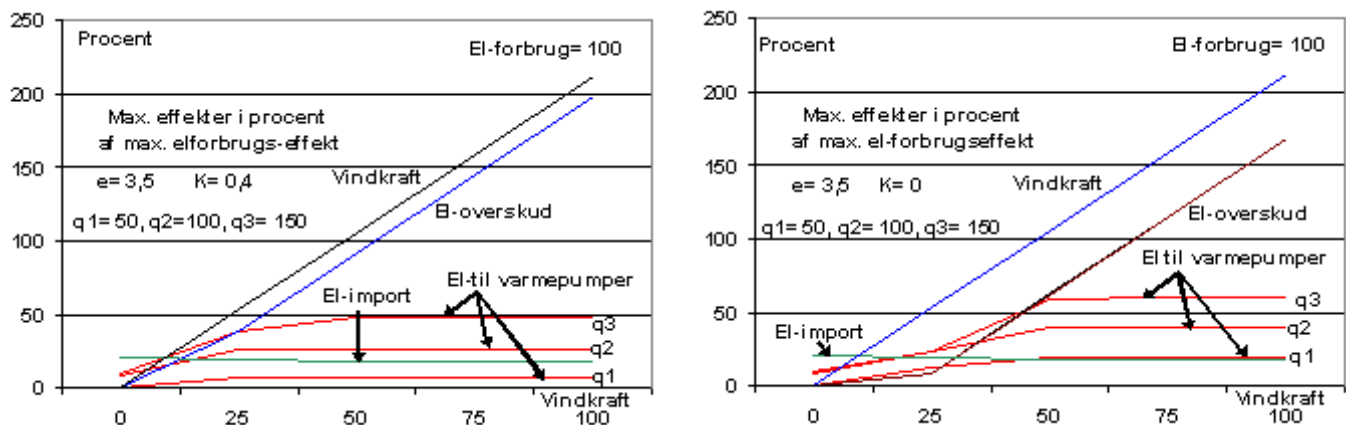
Som sagt i afsnit 3 om udnyttelse af elektrisk kraft i kraftvarmeværker, er det en beregningsforudsætning for de beregningsresultater, der er vist i de efterfølgende afsnit, at 40% af kraftvarmeværkernes samlede el-produktion i hver af årets måneder sker i store damp turbine-kraftvarmeværker, hvis el-produktion ikke ligesom el-produktionen i et stort antal små og mindre gasmotor-kraftvarmeværker hurtigt kan tilpasses de i takt med vindkraften og el-forbruget hurtigt varierende behov.

Som vist i figur 13 og 14 nedenfor medfører denne restriktion af kraftvarmesystemets reguleringssevne, at såvel det årlige el-overskud som de maksimale el-overskuds-effekter forøges. I det omfang udnyttelse af mulighederne for el-lagring i norske og svenske vandkraft-reservoirer er fordelagtig, kan både

behovet for lagerkapaciteter og behovet for transmissionskapaciteter i de nordiske el-net således formindskes ved at udskifte de store dampturbine-kraftvarmeværker i det danske kraftvarmesystem med mindre, hurtigt regulerbare anlæg.

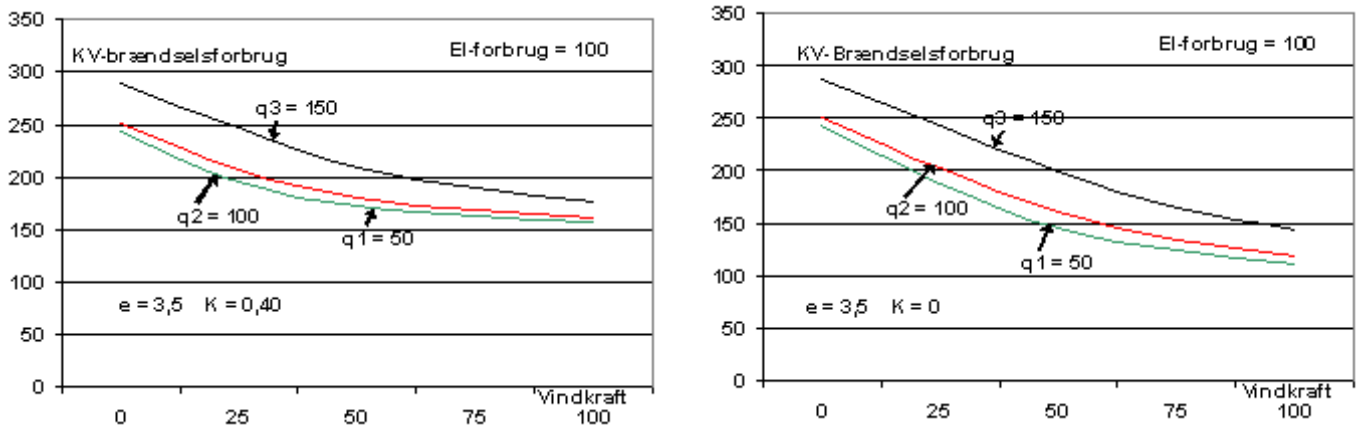


Figur 13. Et eksempel på de formindskelser af det årlige el-overskud, der kan opnås ved at flytte el-produktion i store dampturbine-kraftvarmeværker over på små og mindre kraftvarmeværker, hvis el-produktion til el-nettet hurtigt kan forøges og formindskes. Faktoren K angiver, hvor stor en del af el-produktionen, der i en given måned sker i store dampturbine-kraftvarmeværker: $K = 40\%$ i figuren til venstre, $K = 0\%$ i figuren til højre. Faktoren $e = 3,5$ er den gennemsnitlige effektfaktor for kraftvarmeværkernes varmepumper. Der er i dette eksempel ikke indregnet el-produktion i solceller. ‘Vindkraft’ er den årlige el-produktion i vindmøller i procent af det årlige el-forbrug.



Figur 14. Maksimale el-effekter svarende til det i figur 13 viste eksempel. El-effekterne til kraftvarmeværkernes varmepumper er vist for tre forskellige værdier af kraftvarmeværkernes årlige varmeproduktion: q_1 , q_2 og q_3 . Den maksimale el-overskudseffekt er uafhængig af varmeproduktionen, fordi den fremkommer ved kraftig vind i sommermånederne, hvor varmeproduktionen er så lille, at den ikke har nogen indflydelse på el-effekterne.

Det er i eksemplerne figur 14 antaget, at el-overskuddet bruges til fremstilling af brint i elektrolyseanlæg. Hvis overskuddet i stedet ‘lagres’ i norske og svenske vandkraft-reservoarer, vil den i figur 14 viste relativt lille maksimale el-importeffekt blive forøget, fordi den ‘lagrede’ elektriske kraft skal føres tilbage i perioder med svag vind.



Figur 15. Brændselsforbruget i kraftvarmesystemet som funktion af vindkraften og varmeproduktionen (q_1 , q_2 og q_3). På grund af det større el-overskud (se figur 12) i systemet til venstre, hvor 40% af el-produktionen i en given måned sker i store dampturbine-kraftvarmeværker ($K = 0,40$), bliver brændselsforbruget større end i systemet til højre, hvor hele el-produktionen sker i hurtigt regulerbare små og større LOCUS-anlæg ($K = 0$).

Af de i figur 13, 14 og 15 viste beregningsresultater fremgår det, at såvel det årlige el-overskud - og dermed brændselsforbruget i kraftvarmeværkerne - som de el-effekter, el-nettet skal kunne transmittere, kan formindskes ved at udskifte de store dampturbine-kraftvarmeværker med små og større værker (LOCUS-anlæg, se afsnit 3), hvis el-produktion til el-nettet hurtigt kan reguleres fra en positiv til en negativ værdi (el-effektøptag i varmepumper). Udskiftning af individuelle naturgasfyre med mini-LOCUS-anlæg, jfr. afsnit 6, pkt. 4), vil også i denne henseende være fordelagtig og bør indgå som et væsentligt element i den strategiske planlægning.

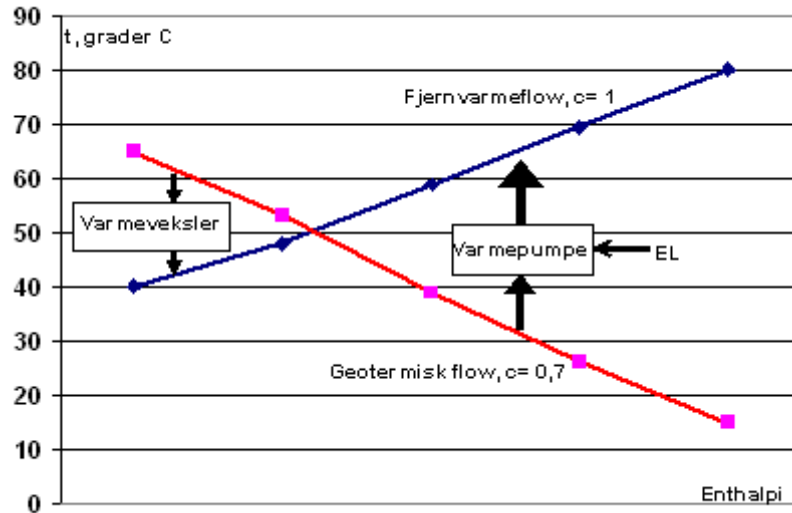
Endvidere fremgår det af figur 14, at varmepumperne i et kraftvarmesystem med små, hurtigt regulerbare LOCUS-anlæg giver et betydeligt bidrag til el-effektreguleringen, større jo større kraftvarmesystemets varmeproduktion er. Det vil sige, at kraftvarmesystemet udnytter en større del af el-produktionen i vindmøller, hvorved brændselsforbruget formindskes. Også af den grund skal tilslutning af så mange bygninger som muligt til kraftvarmesystemets varmforsyning have høj prioritet i den strategiske planlægning.

En ombygning af kraftvarmesystemet i takt med vindkraft-udbygningen, sådan at dets evne til hurtig regulering af kraftvarmeværkernes el-produktion forbedres ved at udskifte de store dampturbine-kraftvarmeværker med et stort antal små og større naturgas- og biogasfyrede LOCUS-anlæg, er således formålstjenlig, både med hensyn til nedbringelse af brændselsforbruget og med hensyn til formindskelse af de effekter, el-nettet skal kunne transmittere.

I et nyt energisystem, hvor mere end halvdelen af el-produktionen sker decentralt i tusinder af vindmøller, er det naturligt at indhente de fordele, der kan opnås ved også at decentralisere el- og varmeproduktionen i kraftvarmeværker.

De yderligere brændselsbesparelser, der kan opnås ved lagring af en del af det varierende el-overskud i norske og svenske vandkraft-reservoirer, skal afvejes mod de brændselsbesparelser, der opnås ved i stedet at udnytte overskuddet til brintproduktion i elektrolyseanlæg.

Beregning af effektfaktorer (e) for varmepumper med geotermisk varme sammenlignet med varmepumper med udeluft som varmereservoir.



Figur B1. Varmeveksling mellem geotermisk kredsløb og fjernvarmekredsløb. Der er regnet med en fler-trins varmepumpe: ét varmepumpekredsløb for hvert af de markerede trin.

tfr: Fjv. fremløbstemperatur
 tr : Fjv. returtemperatur
 tude: Udetemperatur
 wvp: El-forbrug i varmepumper, varmereservoir: geotermisk varme
 wvp0: El-forbrug i varmepumper, varmereservoir: udeluft
 fjv: Fjernvarme, enthalpi-forøgelse
 cgeo: Flow i geotermisk kredsløb
 cfjv: Flow i fjv. kredsløb

Maaned	tfr	tr	tude	wvp	wvp0	fjv	cgeo/cfjv
1	80.00	38.00	-0.10	6.78	13.58	42.00	0.70
2	79.38	38.62	-0.40	6.15	12.39	38.24	0.68
3	79.05	38.95	1.70	5.82	11.37	36.30	0.67
11	77.87	40.13	4.90	4.73	8.80	29.71	0.63
12	79.28	38.72	2.20	6.05	11.72	37.66	0.68
Ialt:				29.51	57.86	183.92	
				16.05	31.46	100.00	
		Gennemsnit	e=	6.2	3.2		

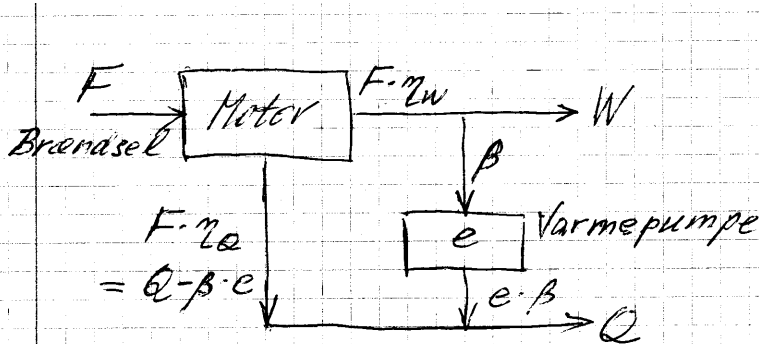
Maaned	tfr	tr	tude	wvp	wvp0	fjv	cgeo/cfjv
1	70.00	33.00	-0.10	4.67	10.72	37.00	0.65
2	69.38	33.62	-0.40	4.21	9.75	33.55	0.63
3	69.05	33.95	1.70	3.97	8.88	31.78	0.61
11	67.87	35.13	4.90	3.18	6.75	25.78	0.57
12	69.28	33.72	2.20	4.14	9.15	33.02	0.62
Ialt:				20.17	45.25	161.13	
				12.52	28.08	100.00	
		Gennemsnit	e=	8.0	3.6		

Tabel B1. Beregnede e-værdier (e= enthalpi-forøgelse af fjernvarmevandet/el-forbrug i varmepumpen) for henholdsvis varmepumper med geotermiske varmereservoirer og varmepumper med udeluft som varmereservoir og for forskellige fjernvarme-temperaturer. For geotermiske varmereservoirer sker enthalpi-forøgelsen af fjernvarmevandet dels i varmeveksleren dels i varmepumpe-kondensatorerne.

Udledning af den i afsnit 3, figur 3, viste brændselsforbrugs-reduktionsfaktor (r-faktoren).

W: el-produktion til el-nettet.

For fastholdt varmeproduktion Q fås:



$$(W + \beta) \frac{\eta_0}{\eta_w} + e \beta = Q$$

$$W = Q \frac{\eta_w}{\eta_0} - \beta \left(1 + e \frac{\eta_w}{\eta_0}\right) \quad k = 1 + e \frac{\eta_w}{\eta_0}$$

$$\beta = \left(Q \frac{\eta_w}{\eta_0} - W\right) \cdot \frac{1}{k}$$

$$\begin{aligned} F &= (W + \beta) \cdot \frac{1}{\eta_w} = \left[W + \left(Q \frac{\eta_w}{\eta_0} - W\right) \cdot \frac{1}{k} \right] \cdot \frac{1}{\eta_w} \\ &= \left(W \left(1 - \frac{1}{k}\right) + Q \frac{\eta_w}{\eta_0 \cdot k} \right) \cdot \frac{1}{\eta_w} \\ &= W \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot \frac{1}{\eta_w} + Q \cdot \frac{1}{\eta_0 \cdot k} \end{aligned}$$

$$F_0 - F = \frac{Q}{\eta_0} - F$$

$$= \frac{W_0}{\eta_w} - \left[W \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot \frac{1}{\eta_w} + W_0 \cdot \frac{1}{\eta_w \cdot k} \right]$$

$$= W_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot \frac{1}{\eta_w} - W \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot \frac{1}{\eta_w}$$

$$= (W_0 - W) \cdot \frac{1 - \frac{1}{k}}{\eta_w}$$

$$= (W_0 - W) \cdot r$$

$$r = \left(1 - \frac{1}{1 + e \frac{\eta_w}{\eta_0}}\right) \cdot \frac{1}{\eta_w}$$

Det teknologiske råderum

Tabellerne herunder angiver de numeriske værdier bag graferne i afsnit 5 og afsnit 14. De kan således betragtes som en numerisk kortlægning af det teknologiske råderum for energipolitiske strategier.

Der er fire tabeller, én for hvert af følgende tilfælde:

- 1) $K = 0,40$ $e = 3,5$
- 2) $K = 0,40$ $e = 1,0$
- 3) $K = 0$ $e = 3,5$
- 4) $K = 0$ $e = 1,0$

hvor

- K er den del af el-produktionen i kraftvarmeværker, der i en given måned sker i store dampturbine-kraftvarmeværker, der ikke ligesom små og mindre LOCUS-anlæg (jfr. afsnit 3) hurtigt kan standses og genopstartes. $K = 0$ betyder således en fuldstændig decentralisering af el- og varmeproduktionen i kraftvarmeværker, svarende til den decentrale el-produktion i vindmøller, som sker i flere tusinde el-generatorer anbragt højt oppe på vindmølletårnene.
- e er den gennemsnitlige effektfaktor for varmepumper i LOCUS-anlæg. Effektfaktorerne er beregnet for hver måned som funktion af udetemperaturen og fjernvarmetemperaturerne. $e = 1,0$ betyder, at der i stedet for varmepumper bruges el-patroner.

Øvrige beregningsforudsætninger er angivet i afsnit 3.

Selvom beregningsforudsætningerne ikke i detaljer afspejler alle de tekniske forhold i det danske energisystem og nogle af de viste beregningsresultater derfor kan afvige +/- 10% fra de virkelige værdier, afdækker tallene nogle reelle forhold af fundamental betydning for udformningen af teknisk og økonomisk formålstjenlige energipolitiske strategier for nedtrapning af brændselsforbruget.

Første linie i tabel 1) viser, at under de til venstre i tabellinien angivne forhold medfører en marginal forøgelse af el-forbruget på 1 MWh en forøgelse af brændselsforbruget (KV-brændselsforbruget minus transportbrændsel produktionen) på 2,3 MWh, at en marginal forøgelse af el-produktionen i vindmøller på 1 MWh medfører en formindskelse af brændselsforbruget på 2,0 MWh, og at en marginal forøgelse af KV-varmeforbruget medfører en forøgelse af brændselsforbruget på 0,08 MWh.

Disse tal, som angiver el-forbrugets, vindkraftens og KV-varmeforbrugets påvirkninger af brændselsforbruget, ændres ned igennem tabellen, når el-forbruget, el-produktionen i vindmøller og KV-varmeforbruget ændres. Ved el-forbrug = 140,

vindkraft = 80 og KV-varmeforbrug = 120 er de marginale ændringer af brændselsforbruget således: For el-forbrug 1,95 MWh/MWh, for vindkraft -0,91 MWh/MWh, for KV-varmeforbrug 0,32 MWh/MWh.

Det skal bemærkes, at el-forbrugets og vindkraftens marginale påvirkninger af brændselsforbruget er de samme i alle de fire tilfælde 1) - 4), medens KV-varmeforbrugets marginale påvirkninger af brændselsforbruget er forskellige i de fire tilfælde.

I alle tilfælde er KV-varmeforbrugets påvirkninger af brændselsforbruget meget mindre end el-forbrugets påvirkninger, og de aftager med voksende el-forbrug og med voksende el-produktion i vindmøller. Derfor giver konvertering fra individuelle kedler til varmforsyning fra kraftvarmeverker store brændselsbesparelser: Ved el-forbrug = 130, vindkraft = 80 og KV-varmeforbrug = 100 opnås i tilfælde 1) en brændselsbesparelse på 0,87 MWh ved konvertering af 1 MWh fra individuelle kedler til kraftvarme. Ved konvertering af el-varme til kraftvarme bliver brændselsbesparelsen 1,70 MWh/MWh.

Omstilling af varmforsyning fra individuelle kedler og el-varme med lav energieffektivitet (jfr. afsnit 12) til kraftvarme giver således meget større brændselsbesparelser, end der kan opnås ved efterisolering af bygningerne.

Den numeriske kortlægning i tabellerne 1) - 4) af det teknologiske råderum for investeringer med det formål at nedbringe brændselsforbruget kan således danne grundlag for udstikning af retningslinierne for en teknisk og økonomisk formålstjenlig strategisk planlægning.

Tabellerne demonstrerer tydeligt, at de gængse kalorimetrisk energibogholderi-opgørelser, hvori el, varme, vindkraft, solvarme m.m. tæller med samme vægt uafhængigt af energisystemets sammensætning og produktions- og forbrugsforhold er irrelevante og vildledende.

1) K= 0.40 e= 3.50

El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brend- sels- forbr.	Trans- port brend- sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ved					
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Konvertering		
						Forøgelse af					
						Kedel					
						til KV til KV til KV til VP					
130	20	80	266	0	1	2.30	-2.00	0.08	-1.03	-2.22	-0.41
130	20	100	269	0	1	2.29	-1.94	0.32	-0.79	-1.97	-0.42
130	20	120	279	0	1	2.28	-1.88	0.46	-0.65	-1.82	-0.42
130	20	140	292	0	1	1.72	-1.83	0.87	-0.24	-0.84	-0.59
130	40	80	242	3	1	2.11	-1.36	0.10	-1.01	-2.01	-0.47
130	40	100	245	3	1	2.12	-1.37	0.29	-0.82	-1.83	-0.47
130	40	120	254	3	1	2.12	-1.38	0.41	-0.70	-1.72	-0.47
130	40	140	266	3	1	1.64	-1.44	0.75	-0.36	-0.90	-0.61
130	60	80	219	9	1	2.10	-1.17	0.12	-0.99	-1.98	-0.47
130	60	100	222	8	1	2.11	-1.19	0.26	-0.85	-1.85	-0.47
130	60	120	230	7	1	2.12	-1.20	0.35	-0.76	-1.77	-0.47
130	60	140	241	6	1	1.75	-1.26	0.62	-0.49	-1.12	-0.58
130	80	80	207	17	1	1.94	-0.89	0.13	-0.99	-1.81	-0.52
130	80	100	210	15	1	1.94	-0.91	0.24	-0.87	-1.70	-0.52
130	80	120	217	14	1	1.95	-0.92	0.32	-0.80	-1.64	-0.52
130	80	140	227	13	1	1.64	-0.96	0.55	-0.56	-1.09	-0.61
140	20	80	287	0	1	2.31	-2.02	0.08	-1.03	-2.23	-0.41
140	20	100	290	0	1	2.30	-1.96	0.18	-0.93	-2.12	-0.41
140	20	120	298	0	1	2.29	-1.90	0.47	-0.64	-1.82	-0.42
140	20	140	307	0	1	2.00	-1.84	0.67	-0.44	-1.33	-0.50
140	40	80	263	3	1	2.11	-1.45	0.10	-1.01	-2.01	-0.47
140	40	100	266	3	1	2.11	-1.45	0.18	-0.93	-1.94	-0.47
140	40	120	273	3	1	2.12	-1.45	0.42	-0.70	-1.70	-0.47
140	40	140	282	2	1	1.87	-1.45	0.59	-0.52	-1.28	-0.54
140	60	80	240	8	1	2.12	-1.26	0.12	-0.99	-2.00	-0.47
140	60	100	243	7	1	2.13	-1.28	0.18	-0.93	-1.95	-0.47
140	60	120	250	7	1	2.13	-1.30	0.36	-0.75	-1.77	-0.46
140	60	140	258	6	1	1.94	-1.31	0.51	-0.60	-1.43	-0.52
140	80	80	225	16	1	1.93	-0.89	0.12	-0.99	-1.81	-0.53
140	80	100	228	14	1	1.94	-0.90	0.17	-0.94	-1.76	-0.52
140	80	120	234	13	1	1.95	-0.91	0.32	-0.79	-1.62	-0.52
140	80	140	241	12	1	1.78	-0.93	0.45	-0.67	-1.34	-0.57
150	40	80	285	3	1	2.11	-1.54	0.10	-1.01	-2.01	-0.47
150	40	100	287	2	1	2.11	-1.53	0.10	-1.01	-2.01	-0.47
150	40	120	292	2	1	2.12	-1.52	0.38	-0.73	-1.73	-0.47
150	40	140	301	2	1	2.12	-1.52	0.42	-0.69	-1.70	-0.47
150	60	80	261	8	1	2.12	-1.28	0.11	-1.00	-2.00	-0.47
150	60	100	264	7	1	2.12	-1.30	0.11	-1.00	-2.01	-0.47
150	60	120	269	7	1	2.13	-1.32	0.34	-0.77	-1.79	-0.47
150	60	140	277	6	1	2.14	-1.33	0.37	-0.74	-1.76	-0.46
150	80	80	243	14	1	1.93	-0.96	0.12	-0.99	-1.80	-0.53
150	80	100	246	13	1	1.93	-0.97	0.12	-0.99	-1.81	-0.52
150	80	120	250	12	1	1.94	-0.98	0.31	-0.81	-1.64	-0.52
150	80	140	258	11	1	1.95	-0.99	0.33	-0.78	-1.62	-0.52
160	40	80	306	2	1	2.17	-1.64	0.10	-1.02	-2.08	-0.45
160	40	100	309	2	1	2.17	-1.62	0.10	-1.02	-2.07	-0.45
160	40	120	311	2	1	2.17	-1.61	0.26	-0.85	-1.91	-0.45
160	40	140	320	2	1	2.17	-1.59	0.43	-0.68	-1.74	-0.45
160	60	80	283	8	1	2.11	-1.28	0.11	-1.00	-2.00	-0.47
160	60	100	286	7	1	2.12	-1.29	0.11	-1.00	-2.01	-0.47
160	60	120	288	6	1	2.12	-1.31	0.25	-0.86	-1.88	-0.47
160	60	140	297	6	1	2.13	-1.33	0.38	-0.73	-1.75	-0.47
160	80	80	261	13	1	1.99	-1.05	0.12	-0.99	-1.87	-0.51
160	80	100	264	12	1	2.00	-1.06	0.12	-0.99	-1.87	-0.51
160	80	120	266	11	1	2.00	-1.08	0.23	-0.88	-1.77	-0.50
160	80	140	274	10	1	2.01	-1.09	0.34	-0.77	-1.67	-0.50

2) $K= 0.40$ $e= 1.00$

El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brend- sels- forbr.	Trans- port brend- sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ved					
						Forøgelse af			Konvertering		
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Kedel til KV	El- til KV	Kedel til VP
130	20	80	269	0	1	2.30	-2.00	0.17	-0.94	-2.14	-0.41
130	20	100	274	0	1	2.29	-1.94	0.44	-0.67	-1.86	-0.42
130	20	120	284	0	1	2.28	-1.88	0.60	-0.51	-1.68	-0.42
130	20	140	298	0	1	1.72	-1.83	0.92	-0.19	-0.80	-0.59
130	40	80	245	3	1	2.11	-1.36	0.24	-0.87	-1.87	-0.47
130	40	100	250	3	1	2.12	-1.37	0.47	-0.64	-1.65	-0.47
130	40	120	261	2	1	2.12	-1.38	0.61	-0.50	-1.51	-0.47
130	40	140	275	2	1	1.64	-1.44	0.92	-0.19	-0.72	-0.61
130	60	80	224	8	1	2.10	-1.17	0.31	-0.80	-1.79	-0.47
130	60	100	229	6	1	2.11	-1.19	0.50	-0.61	-1.61	-0.47
130	60	120	240	6	1	2.12	-1.20	0.62	-0.49	-1.50	-0.47
130	60	140	253	5	1	1.75	-1.26	0.93	-0.18	-0.82	-0.58
130	80	80	212	15	1	1.94	-0.89	0.34	-0.78	-1.60	-0.52
130	80	100	217	13	1	1.94	-0.91	0.50	-0.61	-1.44	-0.52
130	80	120	227	11	1	1.95	-0.92	0.60	-0.51	-1.35	-0.52
130	80	140	239	10	1	1.64	-0.96	0.89	-0.22	-0.75	-0.61
140	20	80	290	0	2	2.31	-2.02	0.16	-0.95	-2.15	-0.41
140	20	100	294	0	2	2.30	-1.96	0.27	-0.84	-2.03	-0.41
140	20	120	303	0	2	2.29	-1.90	0.60	-0.51	-1.69	-0.42
140	20	140	313	0	2	2.00	-1.84	0.76	-0.35	-1.24	-0.50
140	40	80	265	3	1	2.11	-1.45	0.23	-0.88	-1.88	-0.47
140	40	100	270	3	1	2.11	-1.45	0.33	-0.79	-1.79	-0.47
140	40	120	279	2	1	2.12	-1.45	0.61	-0.50	-1.51	-0.47
140	40	140	290	2	1	1.87	-1.45	0.76	-0.35	-1.11	-0.54
140	60	80	244	8	1	2.12	-1.26	0.30	-0.81	-1.82	-0.47
140	60	100	249	6	1	2.13	-1.28	0.38	-0.73	-1.75	-0.47
140	60	120	258	6	1	2.13	-1.30	0.62	-0.50	-1.52	-0.46
140	60	140	269	5	1	1.94	-1.31	0.77	-0.34	-1.17	-0.52
140	80	80	230	14	1	1.93	-0.89	0.33	-0.78	-1.60	-0.53
140	80	100	235	12	1	1.94	-0.90	0.40	-0.71	-1.54	-0.52
140	80	120	243	11	1	1.95	-0.91	0.61	-0.50	-1.34	-0.52
140	80	140	253	10	1	1.78	-0.93	0.76	-0.36	-1.03	-0.57
150	40	80	286	3	1	2.11	-1.54	0.22	-0.89	-1.88	-0.47
150	40	100	291	2	1	2.11	-1.53	0.22	-0.89	-1.89	-0.47
150	40	120	298	2	1	2.12	-1.52	0.56	-0.55	-1.56	-0.47
150	40	140	308	2	1	2.12	-1.52	0.61	-0.50	-1.51	-0.47
150	60	80	265	7	1	2.12	-1.28	0.28	-0.83	-1.83	-0.47
150	60	100	270	6	1	2.12	-1.30	0.28	-0.83	-1.84	-0.47
150	60	120	277	6	1	2.13	-1.32	0.57	-0.54	-1.56	-0.47
150	60	140	287	5	1	2.14	-1.33	0.61	-0.50	-1.52	-0.46
150	80	80	247	13	1	1.93	-0.96	0.33	-0.78	-1.60	-0.53
150	80	100	252	12	1	1.93	-0.97	0.33	-0.78	-1.60	-0.52
150	80	120	259	10	1	1.94	-0.98	0.58	-0.53	-1.36	-0.52
150	80	140	269	9	1	1.95	-0.99	0.61	-0.50	-1.33	-0.52
160	40	80	307	2	1	2.17	-1.64	0.21	-0.90	-1.96	-0.45
160	40	100	311	2	1	2.17	-1.62	0.21	-0.90	-1.96	-0.45
160	40	120	316	2	1	2.17	-1.61	0.41	-0.70	-1.76	-0.45
160	40	140	326	2	1	2.17	-1.59	0.61	-0.50	-1.56	-0.45
160	60	80	285	7	1	2.11	-1.28	0.27	-0.84	-1.84	-0.47
160	60	100	290	6	1	2.12	-1.29	0.27	-0.84	-1.85	-0.47
160	60	120	295	5	1	2.12	-1.31	0.44	-0.67	-1.68	-0.47
160	60	140	306	5	1	2.13	-1.33	0.61	-0.50	-1.52	-0.47
160	80	80	265	13	1	1.99	-1.05	0.33	-0.78	-1.66	-0.51
160	80	100	270	11	1	2.00	-1.06	0.33	-0.78	-1.67	-0.51
160	80	120	275	9	1	2.00	-1.08	0.47	-0.64	-1.53	-0.50
160	80	140	285	9	1	2.01	-1.09	0.62	-0.49	-1.39	-0.50

3) K= 0.00 e= 3.50

El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brend- sels- forbr.	Trans- port brend- sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ved Forøgelse af Konvertering					
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Kedel til KV	El- til KV	Kedel til VP
130	20	80	267	0	1	2.30	-2.00	0.09	-1.02	-2.22	-0.41
130	20	100	271	0	1	2.29	-1.94	0.32	-0.79	-1.97	-0.42
130	20	120	281	0	1	2.28	-1.88	0.47	-0.65	-1.82	-0.42
130	20	140	295	0	1	1.72	-1.83	0.84	-0.27	-0.87	-0.59
130	40	80	238	2	1	2.11	-1.36	0.14	-0.97	-1.97	-0.47
130	40	100	243	2	1	2.12	-1.37	0.34	-0.77	-1.77	-0.47
130	40	120	252	2	1	2.12	-1.38	0.46	-0.65	-1.66	-0.47
130	40	140	266	1	1	1.64	-1.44	0.82	-0.29	-0.82	-0.61
130	60	80	210	5	1	2.10	-1.17	0.20	-0.91	-1.91	-0.47
130	60	100	215	5	1	2.11	-1.19	0.36	-0.75	-1.75	-0.47
130	60	120	225	4	1	2.12	-1.20	0.46	-0.65	-1.66	-0.47
130	60	140	238	4	1	1.75	-1.26	0.80	-0.31	-0.94	-0.58
130	80	80	196	12	1	1.94	-0.89	0.20	-0.91	-1.73	-0.52
130	80	100	200	11	1	1.94	-0.91	0.34	-0.77	-1.60	-0.52
130	80	120	209	10	1	1.95	-0.92	0.43	-0.68	-1.53	-0.52
130	80	140	221	9	1	1.64	-0.96	0.73	-0.38	-0.91	-0.61
140	20	80	289	0	1	2.31	-2.02	0.09	-1.03	-2.23	-0.41
140	20	100	292	0	1	2.30	-1.96	0.18	-0.93	-2.12	-0.41
140	20	120	300	0	1	2.29	-1.90	0.47	-0.65	-1.83	-0.42
140	20	140	310	0	1	2.00	-1.84	0.65	-0.46	-1.35	-0.50
140	40	80	260	2	1	2.11	-1.45	0.13	-0.98	-1.97	-0.47
140	40	100	263	2	1	2.11	-1.45	0.22	-0.89	-1.90	-0.47
140	40	120	272	1	1	2.12	-1.45	0.46	-0.65	-1.65	-0.47
140	40	140	281	1	1	1.87	-1.45	0.64	-0.47	-1.23	-0.54
140	60	80	232	5	1	2.12	-1.26	0.18	-0.93	-1.93	-0.47
140	60	100	236	4	1	2.13	-1.28	0.25	-0.86	-1.87	-0.47
140	60	120	244	4	1	2.13	-1.30	0.46	-0.65	-1.67	-0.46
140	60	140	254	4	1	1.94	-1.31	0.64	-0.48	-1.31	-0.52
140	80	80	213	11	1	1.93	-0.89	0.20	-0.91	-1.73	-0.53
140	80	100	217	10	1	1.94	-0.90	0.26	-0.85	-1.68	-0.52
140	80	120	225	9	1	1.95	-0.91	0.44	-0.67	-1.51	-0.52
140	80	140	234	8	1	1.78	-0.93	0.60	-0.51	-1.19	-0.57
150	40	80	281	1	1	2.11	-1.54	0.13	-0.98	-1.98	-0.47
150	40	100	285	1	1	2.11	-1.53	0.13	-0.98	-1.98	-0.47
150	40	120	291	1	1	2.12	-1.52	0.42	-0.69	-1.69	-0.47
150	40	140	300	1	1	2.12	-1.52	0.46	-0.65	-1.66	-0.47
150	60	80	253	5	1	2.12	-1.28	0.17	-0.94	-1.94	-0.47
150	60	100	257	4	1	2.12	-1.30	0.17	-0.94	-1.95	-0.47
150	60	120	263	4	1	2.13	-1.32	0.43	-0.68	-1.70	-0.47
150	60	140	273	4	1	2.14	-1.33	0.46	-0.65	-1.67	-0.46
150	80	80	230	10	1	1.93	-0.96	0.21	-0.91	-1.72	-0.53
150	80	100	235	9	1	1.93	-0.97	0.21	-0.91	-1.73	-0.52
150	80	120	241	8	1	1.94	-0.98	0.42	-0.69	-1.52	-0.52
150	80	140	250	7	1	1.95	-0.99	0.45	-0.66	-1.50	-0.52
160	40	80	303	1	1	2.17	-1.64	0.12	-0.99	-2.05	-0.45
160	40	100	306	1	1	2.17	-1.62	0.12	-0.99	-2.05	-0.45
160	40	120	310	1	1	2.17	-1.61	0.29	-0.82	-1.87	-0.45
160	40	140	320	1	1	2.17	-1.59	0.46	-0.65	-1.70	-0.45
160	60	80	274	5	1	2.11	-1.28	0.17	-0.95	-1.95	-0.47
160	60	100	278	4	1	2.12	-1.29	0.17	-0.95	-1.95	-0.47
160	60	120	282	4	1	2.12	-1.31	0.32	-0.80	-1.81	-0.47
160	60	140	292	3	1	2.13	-1.33	0.46	-0.65	-1.67	-0.47
160	80	80	247	9	1	1.99	-1.05	0.21	-0.90	-1.79	-0.51
160	80	100	252	8	1	2.00	-1.06	0.21	-0.90	-1.79	-0.51
160	80	120	256	7	1	2.00	-1.08	0.33	-0.78	-1.67	-0.50
160	80	140	266	6	1	2.01	-1.09	0.46	-0.65	-1.55	-0.50

4) K= 0.00 e= 1.00

El- for- brug	Vind- kraft	KV- varme forbr.	KV- brend- sels- forbr.	Trans- port brend- sel prod.	El- import	Ændring af brændselsforbrug ved					
						El- forbr.	Vind- kraft	KV- varme forbr.	Konvertering		
						Forøgelse af			Kedel	El-	Kedel
									til KV	til KV	til VP
130	20	80	272	1	2	2.30	-2.00	0.16	-0.95	-2.14	-0.41
130	20	100	277	1	2	2.29	-1.94	0.44	-0.67	-1.86	-0.42
130	20	120	285	1	2	2.28	-1.88	0.61	-0.51	-1.68	-0.42
130	20	140	298	0	2	1.72	-1.83	0.93	-0.18	-0.79	-0.59
130	40	80	242	3	1	2.11	-1.36	0.31	-0.80	-1.80	-0.47
130	40	100	248	2	1	2.12	-1.37	0.53	-0.58	-1.59	-0.47
130	40	120	257	2	1	2.12	-1.38	0.66	-0.45	-1.46	-0.47
130	40	140	270	2	1	1.64	-1.44	0.94	-0.17	-0.71	-0.61
130	60	80	218	7	1	2.10	-1.17	0.46	-0.65	-1.64	-0.47
130	60	100	225	6	1	2.11	-1.19	0.62	-0.49	-1.49	-0.47
130	60	120	234	5	1	2.12	-1.20	0.72	-0.39	-1.40	-0.47
130	60	140	246	5	1	1.75	-1.26	0.95	-0.16	-0.79	-0.58
130	80	80	204	13	1	1.94	-0.89	0.49	-0.62	-1.44	-0.52
130	80	100	210	12	1	1.94	-0.91	0.63	-0.48	-1.31	-0.52
130	80	120	219	11	1	1.95	-0.92	0.72	-0.39	-1.23	-0.52
130	80	140	230	10	1	1.64	-0.96	0.95	-0.16	-0.70	-0.61
140	20	80	295	1	2	2.31	-2.02	0.15	-0.96	-2.16	-0.41
140	20	100	298	1	2	2.30	-1.96	0.26	-0.85	-2.04	-0.41
140	20	120	305	1	2	2.29	-1.90	0.60	-0.51	-1.69	-0.42
140	20	140	314	1	2	2.00	-1.84	0.76	-0.35	-1.24	-0.50
140	40	80	263	2	1	2.11	-1.45	0.29	-0.82	-1.82	-0.47
140	40	100	268	2	1	2.11	-1.45	0.38	-0.73	-1.73	-0.47
140	40	120	276	2	1	2.12	-1.45	0.66	-0.46	-1.46	-0.47
140	40	140	285	2	1	1.87	-1.45	0.80	-0.31	-1.08	-0.54
140	60	80	238	6	1	2.12	-1.26	0.43	-0.68	-1.69	-0.47
140	60	100	244	6	1	2.13	-1.28	0.50	-0.61	-1.63	-0.47
140	60	120	253	5	1	2.13	-1.30	0.71	-0.40	-1.43	-0.46
140	60	140	262	5	1	1.94	-1.31	0.83	-0.28	-1.11	-0.52
140	80	80	221	12	1	1.93	-0.89	0.49	-0.62	-1.44	-0.53
140	80	100	228	11	1	1.94	-0.90	0.55	-0.56	-1.39	-0.52
140	80	120	236	10	1	1.95	-0.91	0.72	-0.39	-1.22	-0.52
140	80	140	244	9	1	1.78	-0.93	0.84	-0.27	-0.95	-0.57
150	40	80	284	2	1	2.11	-1.54	0.27	-0.84	-1.84	-0.47
150	40	100	289	2	1	2.11	-1.53	0.27	-0.84	-1.84	-0.47
150	40	120	295	2	1	2.12	-1.52	0.60	-0.51	-1.51	-0.47
150	40	140	304	1	1	2.12	-1.52	0.65	-0.46	-1.47	-0.47
150	60	80	259	6	1	2.12	-1.28	0.40	-0.71	-1.72	-0.47
150	60	100	265	6	1	2.12	-1.30	0.40	-0.71	-1.72	-0.47
150	60	120	272	5	1	2.13	-1.32	0.66	-0.45	-1.47	-0.47
150	60	140	281	5	1	2.14	-1.33	0.70	-0.41	-1.44	-0.46
150	80	80	239	11	1	1.93	-0.96	0.49	-0.62	-1.44	-0.53
150	80	100	245	10	1	1.93	-0.97	0.49	-0.62	-1.45	-0.52
150	80	120	252	9	1	1.94	-0.98	0.70	-0.41	-1.24	-0.52
150	80	140	261	9	1	1.95	-0.99	0.73	-0.38	-1.22	-0.52
160	40	80	304	2	1	2.17	-1.64	0.25	-0.86	-1.92	-0.45
160	40	100	309	1	1	2.17	-1.62	0.25	-0.86	-1.92	-0.45
160	40	120	315	1	1	2.17	-1.61	0.45	-0.66	-1.72	-0.45
160	40	140	323	1	1	2.17	-1.59	0.64	-0.47	-1.52	-0.45
160	60	80	280	6	1	2.11	-1.28	0.37	-0.74	-1.74	-0.47
160	60	100	285	5	1	2.12	-1.29	0.37	-0.74	-1.74	-0.47
160	60	120	291	5	1	2.12	-1.31	0.53	-0.58	-1.59	-0.47
160	60	140	300	5	1	2.13	-1.33	0.69	-0.42	-1.44	-0.47
160	80	80	256	10	1	1.99	-1.05	0.49	-0.62	-1.51	-0.51
160	80	100	262	9	1	2.00	-1.06	0.49	-0.62	-1.51	-0.51
160	80	120	269	9	1	2.00	-1.08	0.61	-0.50	-1.40	-0.50
160	80	140	278	8	1	2.01	-1.09	0.73	-0.38	-1.28	-0.50