

**LOKALE KRAFTVARMESYSTEMER  
MED  
VEDVARENDE ENERGI**

**Klaus Ihum**

**1987**

## Indhold

	Side
I. LANGSIGTET PLANLÆGNING	1
I.1 Markedsorienteret planlægning	2
I.2 Økologisk orienteret planlægning	3
I.3 Fra varmeplanlægning til energiplanlægning	4
II. DECENTRALISERING	11
II.1 Det lokale energisystem	12
II.2 Det decentraliserede el-system	16
II.3 El-kvalitetsproblemer	20
III. LOCUS-MODELLEN	23
III.1 Energiomsætningssystemet	24
III.2 Betegnelser, månedsværdier og effektvariationer	26
III.3 Tekniske parametre	29
III.4 Driftsparametre	31
III.5 Energikilder og brændselsforbrug	33
III.6 Produktionskrav	34
III.7 Beregning af energiomsætning i et lokalsystem	36
III.8 Dimensionering af energiomsætningssystemets komponenter	42
III.9 LOCUS-programmets beregningsgang	50

## I. LANGSIGTET PLANLÆGNING.

En økologisk orienteret tilgang til energiplanlægning fører til mere sammensatte teknologiske problemstillinger end den konventionelle, markedsorienterede tilgang.

I den markedsorienterede planlægnings tankegang opfattes energi som betegnelse for nogle vægrupper - elektricitet og varme - der forhandles af forskellige forsyningselskaber: el-selskaber, naturgasselskaber, olieselskaber, fjernvarmeselskaber. I alt væsentligt bliver udviklingens retningslinier derfor udstukket efter konventionelle, selskabsøkonomiske principper. Den statslige planlægningsopgave består først og fremmest i at regulere markedsfordelingen mellem forsyningselskaberne. Den markedsorienterede energiplanlægning er således baseret på konventionelle metoder til økonomisk planlægning.

I den økologiske beskrivelse af virkeligheden er energi et udtryk for de kræfter, der holder de naturlige og de menneskeskabte kredsløb igang. En økologisk orienteret energiplanlægning drejer sig derfor om, at organisere samfundets økosystem, sådan at de drivkræfter, som er til rådighed, udnyttes og regenereres i strukturer, der er egnede til at oppebære samfundets produktion uden at underminere grundlaget for økosystemets reproduktion.

At det i vore dage er nødvendigt at fremdrage de økologiske forhold skyldes, at vort nuværende samfunds økosystem er blevet indrettet, sådan at det ikke kan oppebære sig selv, men tværtimod i et stigende tempo undergraver sit eget eksistens grundlag. Den tekniske infrastruktur er blevet opbygget, sådan at systemet udelukkende fungerer i kraft af energi, der tilføres

udefra i form af ikke-fornyelige, fossile brændsler. Dets levetid er derfor begrænset, ikke kun fordi brændselsressourcerne slipper op, men også og især fordi afbrændingen af store brændselsmængder medfører irreversible, destruktive forandringer i atmosfæren og biosfæren.

Den konventionelle markedsorienterede planlægning går ud fra, at det er nødvendigt at fortsætte i de traditionelle spor, fordi det er politisk umuligt at gennemføre strukturelle forandringer, der kommer til at gå på tværs af de etablerede institutioner.

Den økologisk orienterede planlægning må derimod tage udgangspunkt i erkendelsen af, at det i længden er umuligt at opretholde det nuværende ressourceforbrug, og det derfor er nødvendigt, at politikerne bereder vejen for strukturelle forandringer, uanset om de går på tværs af de etablerede institutioners interesser.

Både den markedsorienterede og den økologisk orienterede energiplanlægning opererer med langsigtede målsætninger. Men målsætningens betydning i planlægningsprocessen er vidt forskellig i de to former for planlægning.

#### 1.1 Markedsorienteret energiplanlægning.

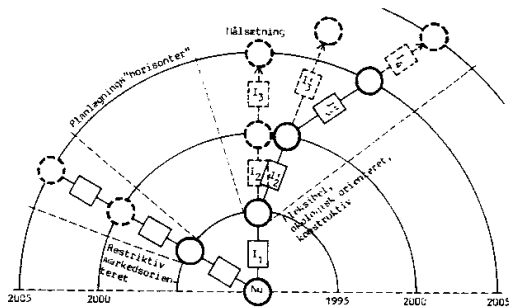
Den markedsorienterede planlægning er et redskab til at få megt over udviklingen ved at indskrænke råderummet for fremtidige beslutninger. Det er jo netop på den måde, det nødvendige afsætningsmarked for de store investeringer i naturgasforsyning og kraftvarmeforsyning kan sikres. Varmemarkedsplanlægning har således i det væsentlige drejet sig om at tilrettelægge nogle meget store, langsigtede investeringer i forsyningsanlæg, som skal etableres indenfor et kortere åremål, og at sikre disse investeringers rentabilitet ved at udbygge energisystemerne på en sådan måde, at afsætningen bliver bestemt af systemets tekniske indretning.

Ved at føre naturgasrør ud til de enkelte huse sikres et mangeårigt marked for naturgasselskaberne, fordi forbrugerne i praksis afskæres fra at købe brændsel fra andre leverandører eller at anvende andre opvarmningsteknikker. I de store kraftvarmeforsynede byer er forbrugerne også fast tilknyttede en bestemt forsynings teknik, der er baseret på stort høj-temperatur fjernvarmenet, der forhindrer, at andre kollektive forsynings teknikker kan vinde indpas i området. Endvidere afskæres forbrugerne i disse kraftvarmeområder fra at vælge at nedsætte deres varmebrug ved at efterisolere deres boliger. På grund af de store faste udgifter til forsynings systemet bliver forbrugerne opvarmningsudgifter nemlig langt fra proportionale med deres forbrug. I de områder, der ikke udlægges som naturgas- eller kraftvarmemarkeder, kan der etableres et stabilt el-marked ved at installere el-varme i nye huse. Det vil derefter være meget dyrt at indføre andre opvarmningsteknikker i disse huse.

Den markedsorienterede planlægning realiserer således sin konkrete målsætning i løbet af en relativt kort årrække og får derved afgørende indflydelse på den teknologiske udvikling på langt sigt, fordi realiseringen af de konkrete mål i sig selv indskrænker de praktiske handlingsmuligheder i fremtiden. Dette princip er anskueliggjort i figur I.1. Efterhånden som de markedsbestemte forsynings systemer udbygges bliver det stadigt vanskeligere og mere bekosteligt at løse de økologiske problemer, der skyldes det store ressourceforbrug, der skal til for at opretholde markederne.

#### 1.2 Økologisk orienteret energiplanlægning.

Den økologisk orienterede planlægning tager udgangspunkt i nødvendigheden af at formindske samfundets afhængighed af de ikke-fornyelige brændselsreserver ved at iværksætte en langsigtet omstrukturering af energisystemerne. Da de fremtidige muligheder for at integrere energiomsætnings systemerne med de øvrige produktionsprocesser i industri og landbrug ikke i detaljer kan



Figur 1.1 Den markedsorienterede planlægning er karakteriseret ved en relativt kortsigtet målsætning, der begrænser forandringsmulighederne i lang tid derefter. Den økologisk orienterede planlægning må i den nuværende situation tage sigte på et mål, der først kan nås efter en længere årrække. Målsætningen må revideres undervejs. Kasserne I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, ... repræsenterer investeringsprogrammer for realisering af delmål.

forudses, og de nye teknikker vil afstedkomme alternative løsninger, som ikke på forhånd kan indarbejdes i planerne, vil fleksibilitet være et ledende princip i den økologisk orienterede planlægning.

Fleksibilitetsprincippet indebærer, at tekniske løsninger, der kan danne grundlag for flere forskellige fremtidige udviklingsmuligheder skal prioriteres fremfor løsninger, der i praksis indskrænker råderummet for fremtidige revisioner af de i øjeblikket gældende, konkrete planer.

En planlægning, der er baseret på en decentralisering af energisystemet, sådan som beskrevet i det følgende kapitel II, kan tilrettelægges på en fleksibel måde, fordi opførelsen af de mange lokale energisystemer vil komme til at foregå over en længere årrække, og de enkelte lokalsystemer kan udbygges stapevis.

I byer og landsbyer udenfor de nuværende kraftvarmeforsynede områder kan der ved udlægning af nye lavtemperatur fjernvarmenet og omstilling af eksisterende fjernvarmesystemer til lavtemperaturdrift etableres kollektive opvarmningssystemer, der kan drives af mange forskellige energikilder og energiomsætningsystemer. Nye fjernvarmerør af plastmaterialer, der er konstruerede, sådan at varmetabet bliver mindre end i de nuværende rør, og som vil være betydeligt billigere end de hidtil anvendte stålrør, både hvad angår anlægs- og driftsudgifter, vil blive markedsførte i de kommende år. Efterhånden som disse lavtemperatur fjernvarmenet bliver udbredt, skabes der grundlag for en videre teknisk udvikling af mere effektive kraftvarmeværker, der forudsætter lave fjernvarmetemperaturer, og derfor ikke uden videre kan indpasses i de nuværende fjernvarmesystemer. Som forklaret i kapitel II, kan de lokale kraftvarmeværker endvidere konstrueres, sådan at de kan udnytte flere forskellige energikilder.

Den langsigtede planlægning af strukturelle ændringer af energisystemet skal ikke bestemme udviklingens konkrete forløb langt ud i fremtiden. Planlægningen skal forstås som en metode til at træffe målrettede beslutninger om hvilke anlægsinvesteringer, der skal iværksættes og gennemføres indenfor de nærmest kommende år, og at dokumentere grundlaget for disse beslutninger. Opstillingen af konkrete, langsigtede mål i form af bestemt fremtidig systemsammensætning tjener kun til at udstikke retningslinierne for de beslutninger, der skal træffes i den nærmeste fremtid. Efterhånden som nye tekniske muligheder og problemer, som vi ikke kan forudse idag, dukker op, skal den konkrete målsætning revideres.

Anskuet på denne måde kan en langsigtet, fleksibel planlægning opfattes som en metode til at styre den uforudsigelige udvikling efter et ledende princip eller en overordnet målsætning. Det ledende princip kommer til udtryk i de kriterier, der til enhver tid lægges til grund for konstruktionen af det fremtidige system, der i øjeblikket tegner den konkrete målsætning. Denne opfattelse er anskueliggjort i figur 1.1.

De beregnings- og simulationsmodeller, der beskrives i kapitlerne III og IV er udviklede med henblik på konstruktion og analyse af mulige, fremtidige energisystemer, der kan realiseres ved hjælp af de teknikker, som allerede nu er praktisk anvendelige, eller som kan forventes af blive det i de kommende år. Ved hjælp af disse modeller kan man gennemføre sammenlignende analyser af alternative, fremtidige systemsammensætninger og udvælge den løsning, der skal opstilles som den langsigtede målsætning. På den måde opnår man dels et overblik over de fremtidige muligheder, sådan som de tegner sig idag, dels nogle konkrete retningslinier for de beslutninger, der skal træffes i den kommende tid.

Denne konstruktive planlægningsteknik kan naturligvis anvendes uanset hvilke økonomiske, økologiske eller politiske kriterier, der lægges til grund for valg af målsætning. Den er imidlertid især relevant for en økologisk orienteret planlægning, der indebærer en omfattende langsigtet rekonstruktion af energisystemerne.

En energiplans konkrete indhold fremstilles i form af et investeringsprogram, der angiver rækkefølge og tidpunkter for de anlægsinvesteringer, der skal foretages for at opfylde målsætningen indenfor den givne planperiode. Investeringsprogrammet angiver de planlagte ændringer i systemets sammensætning i løbet af udviklingsperioden og dermed de løbende ændringer i udgifter til drift og vedligeholdelse.

For en given målsætning, dvs. en given systemsammensætning ved planperiodens afslutning, gælder det om at udlede det investeringsprogram, der giver det mest hensigtsmæssige udviklingsforløb med hensyn til økonomiske, tekniske, beskæftigelsesmæssige og miljømæssige planlægningskriterier.

### I.3 Fra varmeplanlægning til energiplanlægning.

Loven om varmforsyningsplanlægning af 1979 indebar en principiel adskillelse af varmeplanlægningen og el-planlægningen. Varmeplanlægningen udføres af kommuner og amter efter direktiver fra energiministeriet/energistyrelsen. Udbygningen af kraftværkerne og el-nettet planlægges af Elsam (Jylland, Fyn) og Elkraft (Sjælland med omliggende øer), under de begrænsninger energiministeren fastlægger i henhold til Lov om el-forsyning af 1976. Det var ganske vist et af varmforsyningslovens formål at sikre varmemarkederne for den planlagte udvidelse af samproduktionen af el og varme: den såkaldte kraftvarmforsyning af de større byer. Loven taler imidlertid ikke om samproduktion af el og varme, men kun om "anlæg til fremføring af opvarmet vand eller damp fra kraftvarmeværker, affaldsforbrændingsanlæg, industri-virksomheder, geometriske anlæg m.v."

Den planlægningsmæssige adskillelse af el- og varmeplanlægningen - som altså ikke betyder, at el- og varmeforsyningen alle steder er teknisk adskilt - er i høj grad bestemmende for udviklingen af energisystemerne. Først og fremmest af den rent tekniske grund, at det er el-nettet, der knytter energisystemerne i de forskellige byer og områder sammen. Det betyder, at el-planlægningen er national (skønt stadig opdelt på de to landsdele), medens varmeplanlægningen foregår på lokalt plan. Naturgasnettet udgør ganske vist også et nationalt forsyningssystem, men det er et brændselstransportssystem, der ikke på samme måde som det elektriske effekt-transmissionssystem sammenkobler forbrugere og effekt-leverandører. Der stilles derfor ikke de samme tekniske koordinationskrav til varmeplanlægningen som til el-planlægningen. De enkelte kommuner kan i princippet planlægge hver for sig, så længe de ikke inddrager lokale kraftvarmeværker i deres planer. Udenfor de områder, der allerede i den overordnede planlægning er blevet udlagt til naturgas- eller kraftvarmeområder, er koordination af kommunale planer først og fremmest sket i forbindelse med eventuelle muligheder for i fællesskab at etablere et tilstrækkeligt marked for fremføring af naturgas. I de fleste tilfælde har varmeforsyningsplanlægningen drejet sig om valg af brændsel til individuelle eller kollektive opvarmningsanlæg: naturgas, kul, olie, affald, halm, flis eller brænde. I nogle randområder omkring de allerede kraftvarmeforsynede byer, har man endvidere haft den mulighed at koble sig til kraftvarmenettet.

I flere tilfælde har el-forsyningsselskaberne bidraget til udarbejdelse af kommunale varmeplaner, med særligt henblik på at belyse mulighederne for el-varme. El-forsyningsselskaberne kan således trænge ind på varmemarkedet. Kommunerne kan derimod ikke i forbindelse med varmeplanlægningen gøre sig gældende på el-markedet. Et kraftvarmeværk betragtes nemlig som et el-værk, der også kan producere varme, ikke som et varmeværk, der også kan producere el. Det er derfor el-forsyningsselskaberne, der står for opførelse af kraftvarmeværker.

Markedsstrukturerne er væsentligt forskellige på el-siden og varmesiden. El-markedet er nationalt og atomiseret. Fjernvarme- og naturgasmerkederne udgøres derimod af lokalt afgrænsede forbrugergrupper. Den enkelte forbruger er en af de store el-værkers "atomere" kunder, samtidig med at han eller hun eventuelt er tilknyttet et lokalt varmeforsyningsselskab. Som el-forbruger er ens lokalitet af mindre betydning. Som varmeforbruger indgår man i et lokalt planlagt forsyningssystem.

Ligesom i alle andre industrialiserede lande er den centraliserede el-forsyningsstruktur, baseret på nogle få store kraftværker, der forsyner millioner af individuelle forbrugere, blevet så fast institutionaliseret at alternative strukturer næppe er blevet overvejede. En alternativ struktur kunne fremkomme ved, at forbrugerne i og omkring by- eller landsbyssamfund organiserer sig i lokale energiselskaber, der ejer de lokale el-net og driver eventuelle lokale el-producerende anlæg. Sådanne lokale energiselskaber ville kunne varetage såvel el- som varmeforsyningen i lokalområdet, og derved kunne udnytte de energiokonomiske fordele, der knytter sig til samproduktion af el og varme. De vil derved kunne udnytte lokale, vedvarende energikilder på en effektiv måde.

I en sådan alternativ struktur, vil de store kraftværkers el-marked ikke længere være atomiseret, men for en stor del bestå i de lokale energiselskabers effekt-efterspørgsel. I modsætning til effekt-efterspørgslen i den atomiserede markedsstruktur, der til enhver tid er summen af de enkelte forbrugeres øjeblikkelige effekt-forbrug, vil effekt-efterspørgslen fra lokale energiselskaber kunne varieres efter døgnfordelingskurver, der er tilpasset den mest hensigtsmæssige drift af de store værker. Som forklaret i det følgende kapitel kan denne lokale regulering af el-effektefterspørgslen opnås i kraft af de effekt-reguleringsmuligheder, der kan indbygges i de lokale kraftvarmesystemer.

F.eks. vil belastningen af de store kraftværker i nogen grad kunne udjævnes over døgnet, derved at nogle af de lokale energiselskaber producerer el i dagtimerne, hvor forbruget er størst, medens de i nattetimerne forøger el-efterspørgslen ved at igangsætte el-drevne varmepumper. En sådan effekt-regulering vil også kunne foretages under varierende el-effektydelser fra vindmøller, der indgår som energikilder i lokale energisystemer.

Uanset hvilke organisationsformer - lokale, kommunale eller regionale energiselskaber - der bringes i anvendelse, vil en energiplanlægning, der sigter mod en integration af el- og varmeforsyningen med henblik på en mere effektiv udnyttelse af de potentielle energikilder, kræve en koordinering af lokalområdenes energiplaner med hensyn til fordeling af brændselsressourcer, opførelse af vindmøller samt el-produktions- og effektreguleringskapacitet i lokale energisystemer. Denne koordinering vil mest hensigtsmæssigt kunne ske på amtskommunalt plan.

## II. DECENTRALISERING.

Der er rent tekniske grunde til at en økologisk orienteret planlægning af samfundets fremtidige energiomsetningsstrukturer, vil indebære en decentralisering af el-produktionen.

Først og fremmest opnår man en betydelig formindskelse af landets brændselsforbrug ved at indføre samproduktion af elektricitet og varme i alle byer og landsbyer og ikke kun i de store byer, der er udlagt som varmemarkeder for de nuværende kraftvarmeværker. Brændselsbesparelsen opnås i princippet ved, at de sædvanlige simple opvarmningsanlæg med fyr og kedler udskiftes med kraftvarmeværker, som udnytter brændslet mere effektivt. Hvis man i et byområde bruger naturgassen til at drive et lokalt motor-varmepumpe kraftværk, i stedet for at brænde den af i et sædvanligt fjernvarmeværk eller i individuelle gasfyr, vil man således med det samme gasforbrug ikke blot kunne levere den samme varmeydelse, men også kunne dække en betydelig del af byens el-forbrug. På samme måde opnår man en mere effektiv udnyttelse af de begrænsede biomasse-brændselsressourcer ved at bruge dem i lokale kraftvarmeværker.

Udbredelse af de energimæssige fordele ved samproduktion af elektricitet og varme til et større antal byer forudsætter imidlertid, at de lokale kraftvarmeværker konstrueres sådan, at de for en given varmeproduktion er i stand til at regulere el-produktionen, uden at effektiviteten går væsentligt ned. Et kraftvarmeværk, der opfylder dette reguleringskrav, vil imidlertid også på en effektiv måde kunne udnytte vindkraft som energikilde til såvel el- som varmeproduktion. Dvs. at en decentralisering af el-produktionen ved samproduktion af elektricitet og varme i lokale kraftvarmeværker indebærer en foreget reguleringskapacitet, som



muligger en effektiv udnyttelse af vindkraft i et større omfang end i det nuværende system.

Kort sagt, for at opnå en effektivitetsforbedring ved at fordele el-produktionen på et stort antal lokale kraftvarmeværker er det nødvendigt at indbygge en større reguleringskapacitet i systemet. Det medfører, at vindkraften i større omfang kan indgå som energikilde ved siden af først og fremmest naturgas, biogas og andre biomassebrændstoffer.

Når man også tager i betragtning, at biogasproduktionen på basis af gylle kan integreres i landbrugets næringsstofkredsløb på en sådan måde, at nitratforureningen formindskes og forbruget af kunstgødning reduceres, så begynder nogle af de strukturelle forbindelser, der kendetegner et effektivt økosystem, allerede at træde frem.

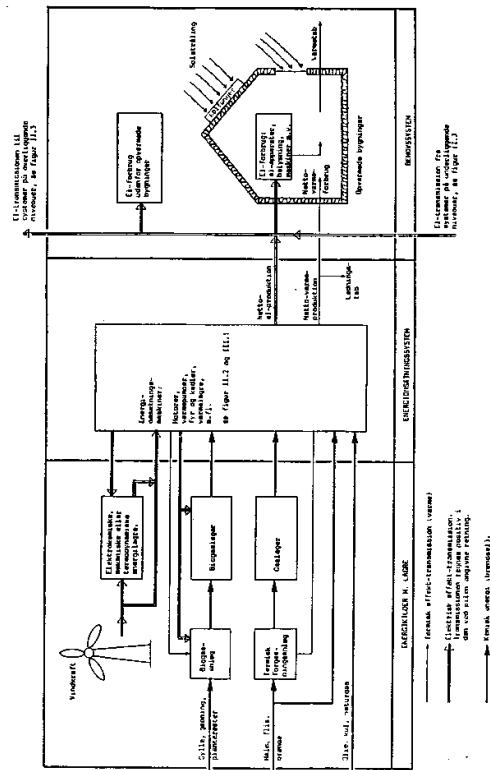
Effektivitet er en systemegenskab. Den foregede effektivitet af det system, der fremkommer ved at tage udgangspunkt i decentraliseringsprincippet, kan derfor ikke forklæres ved at gennemgå de enkelte komponenters egenskaber hver for sig. Forbedringerne opnås ved at sammensætte komponenterne i mere effektive strukturer.

### II.1 Det lokale energisystem.

Et decentraliseret energisystem består af lokale energisystemer, der er indbyrdes forbundne gennem el-nettet.

Det er hensigtsmæssigt at opdele et lokalt energisystem i tre delsystemer: energikilder, energiomsætningssystemet og behovssystemet, som vist ved figur II.1.

Energikilderne er de anlæg eller depoter, hvorfra der leveres drivkraft til energiomsætningssystemet. De her betragtede energikilder kan være kemiske eller elektriske. De kemiske energikilder omfatter fossile brændselslagre (kul, olie og naturgas)



Figur II.1 Generel model af et lokalt energisystem, svarende til LS-systemerne i figur II.3.

og biomassebrændsler. De elektriske energikilder kan være vindmøller, vandkraftværker eller solceller. I denne fremstilling tages dog kun vindmøller i betragtning som elektriske energikilder.

Energiomsætningssystemet udgøres af de maskiner og anlæg, der omsætter energikildernes ydelser til de el- og varmeeffekter, der skal leveres til behovssystemet. Det kan omfatte motorer, varmepumper og kedler med tilhørende varmelagre. Der kan også være tilsluttet solfangere og solabsorbere til varmtvandskredsløb og varmepumpereservoarer. I mange byer kan der opnås betydelige effektivitetsforbedringer ved at integrere industrielle produktionsprocesser i det lokale kraftvarmesystem. Disse muligheder må imidlertid undersøges for hver konkret produktionsvirksomhed for sig. De er derfor ikke medtaget i denne generelle beskrivelse.

Behovssystemet omfatter det samlede behovsbestemmende kompleks af bygninger, bygningsinstallationer, apparater og maskiner. Det er dette inventariums omfang og tekniske egenskaber, der sammen med beboernes adfærdsmønstre, komfortkrav og forbrugsvaner i arbejde og fritid bestemmer behovene for el- og varmeproduktion fra energiomsætningssystemet. Behovssystemets tekniske egenskaber vedrører især bygningernes varmeisolering og deres evne til at udnytte solstrålingen (bl.a. ved hjælp af solfangere), og el-apparaternes energimæssige effektivitet.

Ved netto-varmeforbruget i bygninger i en given periode (et år eller en måned) forstås varmeudvekslingen (målt i Wh eller Joule) fra radiatorer og varmevekslere til husrum og varmtvandsinstallationer. Netto-varmeforbruget er således lig bygningernes varmetab (incl. tab ved udledning af varmt vand til kloak) minus el-forbruget, kropsvarmebidragene og bidraget fra solstråling, der opfanges gennem vinduer og solfangere.

Ved energiomsætningssystemets netto-varmeproduktion i en given periode forstås varmeudvekslingen til fjernvarmenettet, dvs. bygningernes netto-varmeforbrug plus ledningstab i fjernvarmenettet.

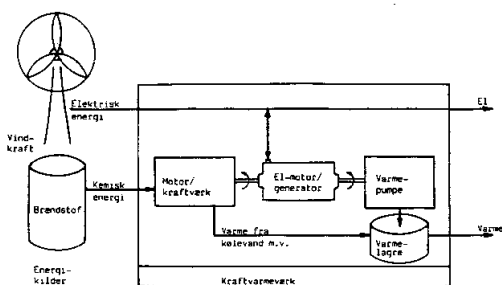
Energiomsætningssystemets brutto-varmeproduktion i en given periode beregnes som netto-varmeproduktion plus eventuelle varmeudvekslinger til opvarmning af biogasreaktorer, minus eventuelle varmebidrag fra termiske forgasningsanlæg.

Tilsvarende forstås ved energiomsætningssystemets netto-elproduktion i en given periode den el-produktion, der leveres til el-nettet, se figur II.1. Brutto-elproduktionen fremkommer ved at addere et eventuelt el-forbrug i energikildeanlæg og energilagre (f.eks. til omrørere og pumper i biogasanlæg og til gas-kompressor) til netto-elproduktionen.

Figur II.2 viser princippet i et vindkraft- og brændselsdrevet kraftvarmeværk med motor, el-motor/generator, varmepumpe og varmelager. Det ses af figuren, at effekterne fra energikilderne kan omsættes til såvel el- som varme-effekter til behovssystemet, og at varmelageret virker som en buffer, sådan at der kan være en vis tidsforskydning mellem effekterne fra energikilderne og el/varme-effekterne til behovssystemet.

Hvis energikilderne i et vist tidsrum er utilstrækkelige til at give den krævede brutto-varmeproduktion, bliver el-produktionen negativ, idet der i så fald skal tilføres el-effekt fra el-nettet til varmepumpen udover den effekt, der tilføres fra motor og vindkraft.

Det ses således, at vindmøller kan indgå som energikilder på linie med de kemiske energikilder. Når vinden blæser kan kraftvarmeværket drives af vindkraft og kemisk energi i forening eller, hvis den installerede vindmølleeffekt er stor nok, af vindkraften alene. I vindstille perioder må værket drives af kemisk energi alene.



Figur II.2 Vindkraften kan i mange tilfælde udnyttes mere effektivt, når den bruges til at drive kraftvarmeværker sammen med kemisk energi fra brændstoffer (naturgas, biogas, olie, kul), end når den udelukkende bruges til el-forsyning.

Så længe den øjeblikkelige vindkraft-effekt ikke overstiger summen af den effekt, der kan afgives til varmepumpen, og den effekt, der i øjeblikket ønskes produceret fra kraftvarmeværket, kan værket levere den ønskede el-effekt, uafhængigt af vindkraft-effektens variationer. I systemer med biogasanlæg gælder dette dog kun, hvis biogaslageret er stort nok til at udligne forskellen mellem den konstante gasproduktion og det varierende gasforbrug.

#### II.2 Det decentraliserede el-system.

I et decentraliseret system, hvor el-produktionen er fordelt på lokale energisystemer i landets byer og landsbyer, vil de maksimale effekter, som højspændingsnettets forskellige lednings-

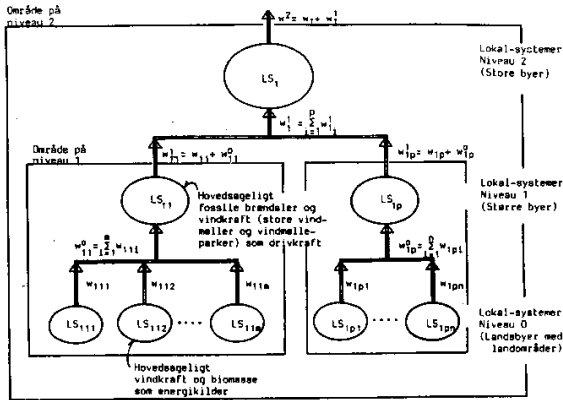
strækninger skal kunne transmittere, i almindelighed være mindre end i det nuværende, centraliserede el-system. Det skyldes, at el-produktionen i et lokalt energisystem, selvom den ikke dækker hele det lokale el-forbrug, normalt vil kunne reguleres, sådan at den maksimale, lokale produktionseffekt falder sammen med det maksimale, lokale effekt-forbrug. Derved formindskes den effekt, højspændingsnettet skal kunne transmittere til byen.

I de måneder, hvor der er et stort varmeforbrug, kan denne døgnregulering af effekt-transmissionen til et lokalt system med varmepumpe og varmelager ske ved, at varmepumpen fortrinsvis eller kun sættes igang i nattetimerne, hvor el-forbruget er lille. Derved frigøres hele motor-effekten og den eventuelle vindkraft-effekt til el-produktion i dagtimerne, hvor forbruget er stort.

Det kan endvidere vise sig hensigtsmæssigt at lade motorerne i nogle af de mindre, lokale energisystemer køre på lav belastning eller helt at standse dem i nattetimerne, sådan at el-effekten til varmepumperne, når el-forbruget iverigt er lavt, leveres fra de store damp turbine-kraftvarmeværker i storbylokaliteterne. På den måde kan man opnå en yderligere udjævning over døgnet af el-produktionen fra de store damp turbineværker. Endvidere kan man derved afhjælpe det såkaldte "overløbs-el" problem, som skyldes, at damp turbineværkeres el-produktionseffekt til enhver tid er mindst 25-30% af deres samtidige varme-effekt.

Ved at udnytte reguleringsmulighederne i de mindre, lokale energisystemer kan man således reducere spidsbelastningen af de store lokalsystemers damp turbine-kraftvarmeværker og udjævne deres el-produktion over døgnet. Dette reguleringsprincip indebærer en hierarkisk strukturering af el-effektreguleringen sådan som det i princippet er vist ved figur II.3.

Eksemplet figur II.4 viser, hvordan el-effektvariationskurverne kan fremkomme på de forskellige niveauer i hierarkiet.



Figur II.3 El-reguleringshierarki med 3 lokalsystem-niveauer og 2 område-niveauer.

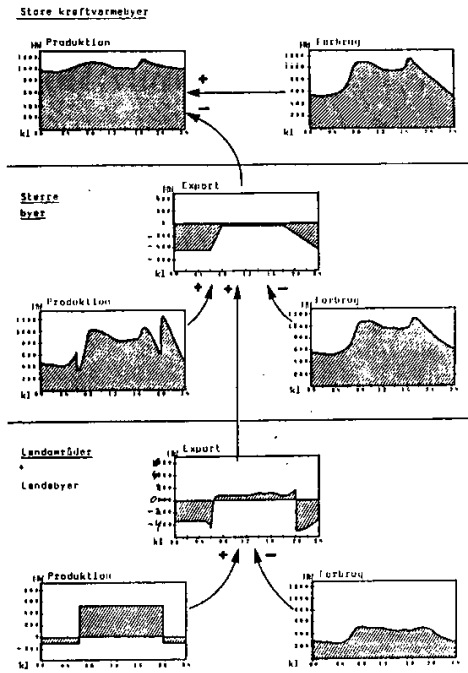
LS: Lokalt system (se figur II.1)

$w$ : Effekt fra lokalt system (=lokal produktion minus lokalt forbrug)

$w^i$ : Effekt fra område på niveau  $i$  (=produktion minus forbrug i område)

Effekterne kan være positive, nul eller negative.

Lokalsystemerne  $LS_{ij}$  på det laveste niveau (niveau 0) i effekt-reguleringshierarkiet vil typisk være små landsbysystemer. Disse systemer regulerer deres el-produktion, sådan at den så vidt muligt følger en foreskrevet døgnfordelingskurve. Døgnkurverne kan være forskellige på forskellige tider af året og måske også have et andet forløb på lørdage og helligdage end på hverdage. Kurverne fastlægges under hensyntagen til variationerne i det lokale el-forbrug, de lokale energikilder og samspillet med de øvrige systemer i området. Normalt vil man ved fastlæggelse af døgnkurverne tilstræbe en udjævning af produktionskurverne for de større anlæg på de højere niveauer i hierarkiet.



Figur II.4 Ved at regulere den lokale el-produktion på niveau 0 (landsbyer og landområder) efter en given døgnfordelingskurve, og derpå på niveau 1 (større byer) at regulere produktionen sådan, at eksporten til niveau 2 (store kraftvarmebyer) får en passende døgnfordeling, kan man opnå en udjævning over døgnnet af de store kraft- og kraftvarmeværkers el-produktion.

De underordnede lokalsystemer vil typisk være grupperede omkring større byer, sådan at der fremkommer et antal områder, hvert med et større, overordnet system  $L_{ij}$ . Afgrænsningerne af disse områder på niveau 1 vil normalt være bestemt af de lokale netstrukturer i 10 kV-nettet.

Summen af el-effekterne fra område nr.  $i$ 's underordnede systemer  $LS_{ij}$  registreres i det overordnede system  $L_{ij}$  som et udefrakommende effekt-bidrag (positivt eller negativt). El-produktionen i  $L_{ij}$  systemet reguleres nu sådan, at el-effekten fra området til det overordnede net, der forbinder niveau 1 områderne, såvidt muligt følger en foreskrevet døgnfordelingskurve. Det vil sige, at den tilstræbte el-produktionseffekt i  $LS_{ij}$  til enhver tid er lig det øjeblikkelige lokale effekt-forbrug plus den i øjeblikket ønskede eksport-effekt fra området minus effekten fra de underordnede systemer.

I lokalsystemet  $LS_1$  på niveau 2 sker reguleringen på samme måde, idet de underordnede systemer her udgøres af områderne på niveau 1. Hierarkiet kan således udbygges til flere niveauer.

I den decentraliserede struktur vil der stadig befinde sig nogle store "centrale" kraftværker øverst i hierarkiet. Disse værkers "kunder" vil imidlertid ikke, sådan som i det nuværende system, være af et stort antal individuelle forbrugere, men et antal lokale energiselskaber, der er i stand til at regulere deres effekt-efterspørgsel efter passende døgnkurver.

### II.3 El-kvalitetsproblemer.

Fastholdelse af spænding og frekvens hos alle forbrugere i et decentraliseret el-forsyningsystem med mange lokale værker, der delvist drives af vindkraft, rejser andre reguleringstekniske problemer end i det centraliserede system med nogle få store værker. Specielt skal det lokale reguleringsproblem, der opstår på grund af hurtige variationer af vindturbin-akseffekter, løses på en hensigtsmæssig måde. Løsningen kan være at installere korttidsenergilagre i tilknytning til vindkraftværkerne eller at

indregulere effekterne fra lokale kraftværker ved hjælp af motorer, hvis effekt kan reguleres hurtigt op og ned, se figur II.2.

Disse elektrotekniske og reguleringstekniske problemer vedrørende hurtige effekt-variationer behandles ikke i nærværende analyse.

### III. LOCUS-MODELLEN.

Planlægning af et decentraliseret energisystem, bestående af lokale energisystemer i flere byer indenfor et givet område, indebærer en koordinering af udbygningsplanerne for de enkelte lokalsystemer med henblik på en hensigtsmæssig udnyttelse af områdets energiressourcer. De enkelte lokalsystemer (jfr. figur II.1) skal på de forskellige årstider kunne udnytte deres energikilder sådan, at de dækker de lokale varmebehov samtidig med, at de bidrager til el-produktionen og el-effektreguleringen (jfr. figur II.2, II.3 og II.4).

For at finde frem til den fordeling af områdets energiressourcer og til de lokale anlægskonfigurationer, der kan forventes at give den bedste afbalancering af de økonomiske og de økologiske hensyn, skal man for flere alternative systemløsninger kunne beregne såvel den forventede årlige energiomsætning som de anlægsinvesteringer, der vil være nødvendige for at realisere systemet. Resultaterne af disse beregninger skal kunne danne grundlag for udarbejdelse af investeringsprogrammer med tilhørende samfundsøkonomiske og driftsøkonomiske analyser. I det følgende fremstilles en generel energisystem-model med et tilhørende edb-program, der er udviklet med dette formål for øje. Modellen har fået navnet LOCUS, for Local Cogeneration Utility System.

LOCUS-programmet beregner energiomsætningen i henholdsvis de enkelte lokalsystemer og i det samlede energisystem, bestående af flere lokalsystemer indenfor et givet område, under givne forudsætninger om ressourcefordeling, el- og varmeproduktion m.v. LOCUS-programmet kan endvidere beregne de komponentstørrelser (effekter, kapaciteter), der vil være nødvendige i de enkelte lokale energiomsætningssystemer for at opfylde de givne effektreguleringskrav.

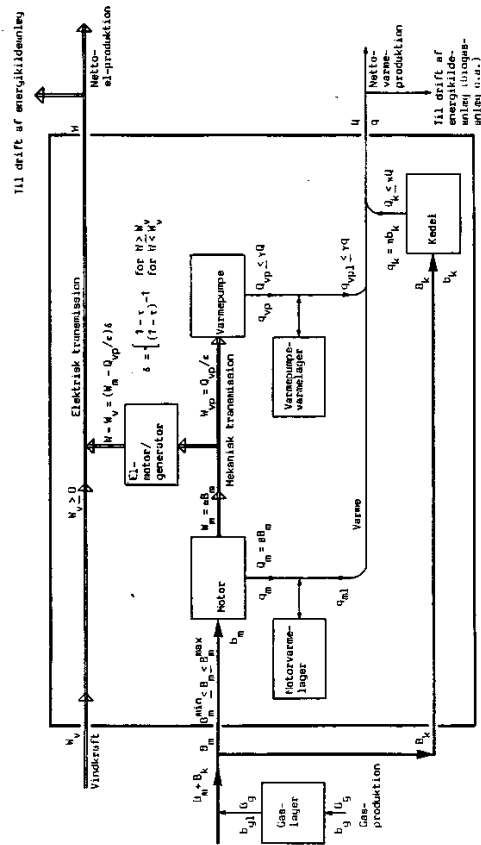
### III.1.1 Energiomsætningsystemet.

Energiomsætningsystemet i et LOCUS-system består af én eller flere af følgende komponenter:

- en brændselsfyret kedel. Den kan eventuelt repræsentere et antal fjernvarmekedler eller, specielt, individuelle kedler i de enkelte bygninger.
- en motor, dvs. en maskine, der omsætter kemisk energi i form af brændsel til mekanisk og termisk effekt (varme). Motorens mekaniske aksel-effekt kan enten overføres direkte til en varmepumpes kompressor eller omsættes til elektrisk effekt ved hjælp af en el-motor/generator. Der kan til motoren være knyttet et termisk lager (varmelager).
- en varmepumpe, dvs. en maskine, der omsætter mekanisk effekt (til kompressor-akslen) til termisk effekt ved en temperatur, der er højere end omgivelsernes temperatur eller reservoir-temperaturen. Aksel-effekten kan leveres direkte fra en motor eller fra el-nettet via en el-motor/generator. Der vil normalt være knyttet et termisk lager til varmepumpen.

Figur III.1 viser energiomsætningen i et LOCUS-system, der omfatter alle tre komponenttyper samt en el-motor/generator og varmelagre til henholdsvis motor og varmepumpe. (Den tekniske sammen sætning af kredsløbene i et sådant system er vist ved fig. IV.1).

Det skal bemærkes, at energiomsætningsystemets motor kan være af mange forskellige typer: støpelmotor, gasturbine, dampturbine, Sterling-motor eller kombinationer af sådanne maskiner. Der kan f.eks. også i en "motor" indgå en absorptionsvarmepumpe, der drives af udstøds-gassen fra en støpelmotor eller gasturbine. I så fald kan summen af motorens el-effekt og varme-effekt blive større end den indfyrede brændsels-effekt ( $\alpha + \beta > 1$ , se afsnit III.3).



Figur III.1 LOCUS-modellens energiomsætningsystem. Store bogstaver betegner energiomsætning over en given periode (kWh). Små bogstaver betegner effekt-værdier (kW) på et givet tidspunkt. Græske bogstaver betegner tekniske parametre ( $\alpha, \beta, \gamma, \epsilon, \eta$ ) og driftsparametre ( $\gamma, \epsilon$ ). El-produktionen  $W$  kan være positiv, nul eller negativ.

LOCUS-modellen omfatter også det specielle tilfælde, hvor energiomsetningssystemet er "tomt", d.v.s hverken indeholder kedel, motor eller varmepumpe. Et sådant system kan repræsentere en vindmølle eller vindmøllepark, der ikke er knyttet til et bestemt behovssystem. Et lokalt energisystem kan således specielt udgøres af en vindmølle eller vindmøllepark alene.

### III.2 Betegnelser, månedsværdier og effektvariationer.

I denne fremstilling betegnes energiværdier (målt i kWh) med store bogstaver og effektverdier (målt i kW) med små bogstaver:

$$\text{Varme : } Q = \int_{t_0}^{t_1} q(t) dt$$

$$\text{Arbejde : } W = \int_{t_0}^{t_1} w(t) dt,$$

hvor  $q$  er termisk effekt (varme) og  $w$  er elektrisk eller mekanisk effekt.

I energiomsetningsberegningerne er tidsrummet fra  $t_0$  til  $t_1$  en af årets måneder. I inddata til edb-programmet og i programmets uddata angives de forskellige månedlige energiværdier ved de tilsvarende gennemsnitlige effektverdier for hver måned.

Energisøtningssystemets tekniske parametre og driftsparametre (se figur III.1 og afsnit III.3-4) betegnes med græske bogstaver.

En række størrelser varierer med årstiden. Det gælder de månedlige energiværdier for varme-forbrug, el-forbrug, biomasse-brændselsproduktion m.fl. samt middelvindstyrken, nogle af energisøtningssystemets tekniske parametre og driftsparametrene (se afsnit III.3-4). Lad  $X$  betegne én af disse størrelser. Månedsværdien  $X_m$  af denne størrelse i måned nr.  $m$  beregnes i LOCUS-modellen som

$$X_m = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \cdot f_x(m), \quad (\text{III.2.1})$$

$$0 \leq f_x(m) \leq 1, \quad m = 1, 2, \dots, 12$$

$$X_{\min} = (12 \cdot X_{\text{gns}} - X_{\max} \sum_{m=1}^{12} f_x(m)) / (12 - \sum_{m=1}^{12} f_x(m))$$

-26-

hvor  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  og  $X_{\text{gns}}$  er henholdsvis den mindste, den største og den gennemsnitlige månedsværdi af  $X$ , og  $f_x$  er en tabel-funktion af måneden. I den inddata-tekst, der definerer de betragtede energisystemer overfor LOCUS-programmet, se appendiks, indføres kun  $X_{\max}$  og  $X_{\text{gns}}$  for de årstidsafhængige størrelser. Tabel-funktionerne  $f_x$ , der udtrykker årstidsvariationen af  $X$  indenfor intervallet fra  $X_{\min}$  til  $X_{\max}$ , indføres i en særskilt inddata-fil. Derved opnås en betydelig forenkling af inddata-teksten, idet samme tabel-funktion ofte vil kunne anvendes for alle de lokalsystemer, der indgår i en område-model, og fordi man for en given månedsværdi  $f_x$  let kan ændre månedsværdierne, blot ved at ændre  $X_{\text{gns}}$  og/eller  $X_{\max}$ .

De nødvendige komponentstørrelser i et energisøtningssystem er bestemt af månedsværdierne af energiværdierne på henholdsvis input- og output-siden, månedsværdierne af de tekniske parametre og driftsparametrene (se afsnit III.3-4) og af effektvariationerne på input- og output-siden.

Ved en effektvariation forstås en dimensionsløs, periodisk funktion af tiden. Den øjeblikkelige effekt  $e(t)$  til tiden  $t$  over en given "kobling" i systemet bestemmes som den gennemsnitlige effekt  $\bar{e}_m$  i den pågældende måned (månedsværdien) multipliceret med effektvariationens værdi  $\varphi_e(t)$ :

$$e(t) = \bar{e}_m \cdot \varphi_e(t), \quad 0 \leq t \leq t_m \quad (t_m = 30 \text{ dage}) \quad (\text{III.2.2})$$

Brugeren af LOCUS-programmet kan specificere effekt- og vindstyrkevariationer som periodiske tabel-funktioner. Ofte vil det være mest overskueligt at specificere variationerne som periodiske funktioner med størsteværdien 1 eller 100, sådan at de relative afvigelser fra størsteværdien på forskellige tidspunkter umiddelbart kan aflæses (se eksempler i appendiks). Under alle omstændigheder beregner programmet effektvariationerne ud fra de af brugeren specificerede tabel-funktioner  $\varphi$ :

-27-



Lad  $\bar{\Phi}$  betegne middelværdien af den specificerede tabelfunktion  $\Phi$  over dennes periode. Hvis  $\bar{e}_m \neq 0$  og  $\bar{\Phi} \neq 0$  beregnes effektvariationen  $\varphi_e(t)$  som

$$\varphi_e(t) = \frac{\Phi(t)}{|\bar{\Phi}|} + (1 - \frac{\bar{\Phi} \cdot \bar{e}_m}{|\bar{\Phi}| |\bar{e}_m|}) \frac{\bar{e}_m}{|\bar{e}_m|} \quad (\text{III.2.3})$$

sådan at middelværdien af  $\varphi_e$  har samme fortegn som  $\bar{e}_m$ .

Hvis  $\bar{\Phi} = 0$  sættes  $\varphi_e(t) = \Phi(t) + \bar{e}_m$ .  
Hvis  $\bar{e}_m = 0$  sættes  $\varphi_e(t) = \Phi(t) - \bar{\Phi}$ .

For varme- og el-effekter fra energiomsetningssystemet vil effektvariationens periode normalt være et helt antal døgn, ofte ét døgn, hvis forholdene er ens alle ugens dage, eller 7 døgn, hvis der f.eks. er forskelle mellem hverdage og weekends.

Den øjeblikkelige effekt  $w_v(t)$  fra vindmøllerne i et lokalsystem beregnes som:

$$w_v(t) = w_v' \cdot K(v(t)), \quad v(t) = \bar{v}_m + \varphi_v(t) \quad (\text{III.2.4})$$

hvor

$w_v'$  er den installerede vindkræfteffekt (vindmøllernes samlede mærkeeffekt),  
 $K$  er vindmøllernes karakteristik, dvs. vindkræfteffekten i kW pr. kW mærkeeffekt som funktion af den øjeblikkelige vindstyrke  $v(t)$ ,  
 $\bar{v}_m$  er middelvindstyrken i den pågældende måned, og  
 $\varphi_v$  er vindstyrkevariationen, der defineres på samme måde som effektvariation.

### III.3. Tekniske parametre.

Energiomsetningssystemets tekniske parametre omfatter (se figur III.1):

i) Motorens nyttevirkningsstal  $a$  og  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \text{akseffekt: } w_m &= a \cdot b_m \\ \text{varmeeffekt: } q_m &= \beta \cdot b_m \end{aligned} \quad (\text{III.3.1})$$

hvor  $b_m$  er den indfyrede brændselseffekt. Hvis motoren er en dampturbine med varmeudtag eller en anden maskine, hvis  $a$ -værdi afhænger af den udtagne varmeeffekt, beregnes  $a$  og  $\beta$  i en given driftssituation som

$$\begin{aligned} a &= a_1 + a_0(1 - \mu) & 0 \leq \mu \leq 1 \\ \beta &= \beta_1 \cdot \mu \end{aligned} \quad (\text{III.3.2})$$

hvor  $\mu$  repræsenterer varmeudtagets relative effektværdi og  $a_0, a_1, \beta_1$  er givne tekniske parametre.

ii) El-motor/generatorens tabsfaktor  $\tau$ . Tabsfaktoren antages at have samme værdi, når komponenten virker som el-motor, som når den virker som generator.

iii) Varmepumpens effektfaktor  $\epsilon$ :

$$q_{vp} = \epsilon \cdot w_{vp} \quad (\text{III.3.3})$$

hvor  $q_{vp}$  er varmeeffekten fra varmepumpekondensatoren og  $w_{vp}$  er akseffekten til kompressoren.  $\epsilon$  kan antage forskellige månedsværdier.

iv) Kedlens nyttevirkningsstal  $n$ :

$$q_k = n \cdot b_k \quad (\text{III.3.4})$$

hvor  $q_k$  er kedlens varmeeffekt, og  $b_k$  er den indfyrede brændselseffekt.

v) Motorens mindste driftsbelastning  $\lambda_m$ : når motoren er igang ligger den indfyrede brændselseffekt  $b_m$  i intervallet:

$$\lambda_m \cdot b_m^{\max} \leq b_m \leq b_m^{\max}, \quad 0 \leq \lambda_m < 1 \quad (\text{III.3.5})$$

hvor  $b_m^{\max}$  er den maksimale værdi af den indfyrede brændselseffekt. Motorens belastning antages at kunne varieres kontinuert over intervallet fra  $\lambda_m$  til 1.

vi) Varmepumpens mindste driftsbelastning  $\lambda_{vp}$ : når varmepumpen er igang ligger aksel-effekten  $w_{vp}$  til kompressoren i intervallet

$$\lambda_{vp} \cdot w_{vp}^{\max} \leq w_{vp} \leq w_{vp}^{\max}, \quad 0 \leq \lambda_{vp} < 1 \quad (\text{III.3.6})$$

hvor  $w_{vp}^{\max}$  er den maksimale værdi af kompressoreffekten. Varmepumpens belastning antages at kunne varieres kontinuert over intervallet fra  $\lambda_{vp}$  til 1.

De nedre grænser for motor- og varmepumpe-belastningerne,  $\lambda_m$  og  $\lambda_{vp}$ , indgår i beregningen af henholdsvis den motorstørrelse (udtrykt ved  $w_m^{\max} = (\alpha_1 + \alpha_0) b_m^{\max}$ ) og den varmepumpestørrelse (udtrykt ved  $w_{vp}^{\max}$ ), der er nødvendig for at opfylde effektvariationskravene (se afsnit III.8).  $\lambda_m, w_m^{\max}$  og  $\lambda_{vp}, w_{vp}^{\max}$  indgår ikke i beregningen af energiomsætningen i de enkelte måneder.

Den ved figur III.1 givne model af energiomsætningsystemet med de under i)-vi) ovenfor beskrevne tekniske parametre er en simplificeret repræsentation af et virkeligt energiomsætningsystem. Simplifikationen består først og fremmest deri, at motorens nyttevirkningsstal  $\alpha$  og  $\beta$  antages at være uafhængige af motorbelastningen  $\lambda_m$ , samt at varmepumpens effektfaktor  $\epsilon$  antages at være konstant indenfor hver måned og uafhængig af varmepumpebelastningen  $\lambda_{vp}$ . Simplifikationen har ikke væsentlig betydning for beregningen af energiomsætningen, for så vidt  $\alpha, \beta$  og  $\epsilon$

tilskrives de rigtige gennemsnitsværdier for hver enkelt måned. Den har imidlertid indflydelse på beregningen af komponentstørrelser (se afsnit III.8), idet motor- og varmepumpebelastningerne i denne beregning varieres efter den øjeblikkelige vindkrafteffekt og de ønskede el- og varmeproduktionseffekter. Da beregningen imidlertid under alle omstændigheder må baseres på nominelle, statistisk begrundede effekt-varationer, og da de beregnede værdier af de nødvendige komponentstørrelser kun er vejledende for detailprojekteringen, er det imidlertid næppe berettiget at forfine modellen, sådan at nyttevirkningstallenes og effektfaktorernes variation med belastningerne inddrages i beregningerne. (I en PROMETHEUS-model, der opstilles med henblik på driftssimulation af et virkeligt system under givne styringsfunktioner (se kap. IV), kan motorens og varmepumpens relative effekter specificeres som funktioner af belastningerne).

#### III.4 Driftsparametre.

Driftsparametre har at gøre med forholdene mellem varmeyedelserne fra varmepumpe, motor og kedel. I perioder, hvor der produceres varme fra såvel varmepumpen som motoren og/eller kedlen, vil afgangstemperaturen fra varmepumpens kondensator normalt være lavere end den krævede fremløbstemperatur til fjernvarmenettet. Dvs. at varmepumpens andel af varmeproduktionen er begrænset. Hvis f.eks. den krævede fremløbstemperatur er 65°C, returtemperaturen er 30°C og afgangstemperaturen til varmepumpens kondensator er 50°C, kan varmepumpen højst yde 20/35 af varmeproduktionen i denne periode. Dette forhold repræsenteres i LOCUS-modellen ved parameteren  $\gamma$ :

$$Q_{vp} \leq \gamma Q, \quad \gamma = \frac{T_{vp} - T_r}{T_f - T_r} \quad (\text{III.4.1})$$

hvor

$Q$  er systemets varmeproduktion (kWh) i den betragtede periode (måned),

$Q_{vp}$  er varmepumpens varmeproduktion i samme periode,

$T_f$  og  $T_r$  er henholdsvis den gennemsnitlige fremløbstemperatur og den gennemsnitlige returtemperatur i perioden og  $T_{vp}$  er den gennemsnitlige afgangstemperatur fra varmepumpe-kondensatoren.

I LOCUS-modellen antages fremløbs- og returtemperaturen samt varmepumpens kondensatortemperatur at være konstant indenfor hver måned, sådan at  $\gamma$  kan variere fra måned til måned, men holdes konstant indenfor hver måned.

Idet det forudsættes, at der i varmelagrene opretholdes en laggrænse mellem det varmere vand foroven og det koldere vand for neden (se figur IV.1), kan temperaturen af vand fra varmepumpe-laget antages at være lig afgangstemperaturen  $T_{vp}$  fra kondensatoren. De øjeblikkelige varmeeffekter skal således til enhver tid tilfredsstille uligheden:

$$q_{vpl} \leq \gamma \cdot (q_{m1} + q_k) \quad (\text{III.4.2})$$

hvor  $q_{m1}$  og  $q_{vpl}$  er effekterne fra henholdsvis motor + motorlager og varmepumpe + varmepumpe-lager og  $q_k$  er kedeleffekten (se figur III.1).

I systemer med motor, varmepumpe og kedel vil kedlen normalt kun blive brugt i spidsbelastningssituationer. Dette udtrykkes i LOCUS-modellen ved faktoren  $x$ , der angiver kedlens (maksimale) andel af den samlede varmeproduktion i en given måned:

$$Q_k \leq xQ, \quad Q = Q_m + Q_{vp} + Q_k \quad (\text{III.4.3})$$

hvor  $Q_m$ ,  $Q_{vp}$  og  $Q_k$  er henholdsvis motorens, varmepumpens og kedlens varmeproduktion (kWh) i den betragtede måned.  $x$  kan antage forskellige månedsværdier.

### III.5 Energikilder og brændselsforbrug.

Energikilderne kan omfatte (se figur II.1):

- vindmøller,
- biogasanlæg (methan) og termiske forgasningsanlæg (kulilte), der indgår i det lokale system.
- Andre brændsler (naturgas, olie, kul, halm, flis m.fl.).

Vindkraft-ressourcerne specificeres ved angivelse af

- den installerede vindmølleeffekt (kW)
- vindmøllernes karakteristik, dvs. vindkrafteffekten pr. kW installeret effekt som funktion af vindstyrken.
- middelvindstyrken (m/sek) i hver måned.
- vindstyrkens variation i de forskellige måneder.

På grundlag af disse størrelser kan programmet til enhver tid beregne den øjeblikkelige vindkrafteffekt og således også vindkraftproduktionen  $W_v$  og den gennemsnitlige effekt  $\bar{w}_v$  i hver måned, jfr. afsnit III.2, (III.2.4).

De lokale gasressourcer specificeres ved angivelse af

- energiværdi af tilført biomasse (kW),
- gasproduktion,
- varmeforbrug til drift af anlæg (positivt for biogasanlæg, negativt for termiske forgasningsanlæg).
- el-forbrug til drift af anlæg.

Gasproduktionen angives relativt til tilført biomasseenergi, dvs. i kW pr. kW tilført biomasse. Gasproduktionen antages at være konstant (evt. nul) i hver måned. Varme- og el-forbruget antages at være proportionalt med gasproduktionen, med proportionalitetsfaktorer, der kan antage forskellige månedsværdier.

Motorens brændselsforbrug (gas og/eller andet brændsel) vil i nogle tilfælde skulle være større end eller lig den lokale gasproduktion. I andre tilfælde kan der være tale om en øvre begrænsning af den brændselsmængde, der må bruges i motoren. I en LOCUS-model specificeres derfor for hver måned såvel en øvre som en nedre grænse for motorens brændselsforbrug  $B_m$  (kWh):

$$B_m^{\min} \leq B_m \leq B_m^{\max}, \quad 0 \leq B_m^{\min} \quad (III.5.1)$$

$$0 \leq B_m^{\max} \leq \infty$$

For lokal-systemer på niveau 0 gælder, at hvis den lokale gasproduktion i en given måned overstiger det brændselsforbrug i motor og kedel, der med de givne vindkraftressourcer medgår til at opfylde produktionskravene (se afsnit III.7) under overholdelse af (III.4.3) og (III.5.1), så henregnes den overskydende gasmængde som et dækningsbidrag til brændselsforbruget i områdets overordnede system (niveau 1, se figur II.3).

### III.6 Produktionskrav.

Det forudsættes, at et lokalt energiomsetningssystem i alle tilfælde skal opfylde bestemte varmeproduktionskrav (det kan specielt være nul). Endvidere kan der stilles krav om en el-produktion af en given størrelse.

I en LOCUS-model specificeres den krævede netto-varmeproduktion i en given måned ved

- netto-varmeforbruget i bygninger, udtrykt ved varmeeffektens gennemsnitværdi og effektvariation, målt an bygninger, jfr. (III.2.2), og
- tabseffekten i fjernvarmeledningsnettet. Tabseffekten antages at være konstant over året.

Den brutto-varmeeffekt  $q$  som energiomsetningssystemet skal levere på et givet tidspunkt beregnes således som

$$q = q_b + q_1 + q_g \quad (III.6.1)$$

hvor  $q_b$  er den øjeblikkelige netto-varmeeffekt an bygninger,  $q_1$  er ledningstabseffekten og  $q_g$  er effekten til gasproduktionsanlæg.  $q_g$  kan være positiv, nul eller negativ, jfr. afsnit III.5.

Hvad angår el-produktion skelnes mellem lokalsystemer på niveau 0 og de overordnede områdesystemer på niveau 1 eller 2, jfr. figur II.3 og afsnit II.2. For systemer på niveau 0 specificeres el-produktionen fra energiomsetningssystemet (dvs. vindmøllernes produktion plus motorens produktion minus varmepumpens forbrug). For de overordnede systemer specificeres derimod områdets netto-elproduktion, dvs. netto-eksporten fra området til systemet på næste, højere niveau, beregnet som den samlede el-produktion minus det samlede el-forbrug indenfor området.

I begge tilfælde angives den ønskede effekt-variation af produktionen/eksporten. Endvidere kan den ønskede produktions/eksportens størrelse i de forskellige måneder specificeres ved angivelse af de månedlige gennemsnitseffekter. Hvis produktionens/eksportens ønskede størrelse ikke specificeres, så antager LOCUS-programmet i første omgang en ønsket produktion/eksport på nul.

For lokalsystemer på niveau 0 beregner LOCUS-programmet, hvorvidt den ønskede el-produktion kan opfyldes med de givne vindkraftressourcer og den eventuelt specificerede øvre og/eller nedre begrænsning af motorens brændselsforbrug ( $B_m^{\min}$ ,  $B_m^{\max}$ , jfr. (III.5.1)), samtidig med at varmeproduktionskravet opfyldes. Hvis den ønskede el-produktion medfører et brændselsforbrug til motoren, der er mindre end  $B_m^{\min}$ /større end  $B_m^{\max}$ , så justerer programmet el-produktionskravet opad/nedad, så det kommer til at svare til et brændselsforbrug lig  $B_m^{\min}/B_m^{\max}$ , se afsnit III.7.

For at programmet derefter kan beregne el-produktionen i et områdes overordnede lokal-system, skal el-forbrugets månedsværdier og effektvariationer specificeres for samtlige lokalsystemer

i området, incl. forbruget i det overordnede system. Programmet beregner derudfra den gennemsnitlige effekt og effektvariationen af områdets samlede el-forbrug i hver måned, incl. el-forbrug til drift af eventuelle biogas- og termiske forgasningsanlæg, jfr. afsnit III.5. Endvidere beregnes den gennemsnitlige effekt og effektvariationen af den samlede el-produktion i de underordnede systemer indenfor området. Endelig beregnes gennemsnitseffekt og effektvariation for el-produktionen i det overordnede system, sådan at den resulterende netto-elekspport fra området antager den specificerede gennemsnitseffekt og variation. Den således bestemte el-produktion i områdets overordnede lokalsystem justeres eventuelt m.h.t. det resulterende brændselsforbrug til motoren, på samme måde som beskrevet ovenfor for lokalsystemer på niveau 0.

### III.7 Beregning af energiomsætning i et lokalsystem.

I dette afsnit refereres til et energiomsætningsystem som det ved figur III.1 viste. Det antages således i udgangspunktet, at systemet omfatter motor, el-motor/generator, varmepumpe og kedel. De månedlige energiomsætningsberegninger kan imidlertid vise, at én eller flere af disse komponenter ikke vil blive brugt og derfor kan udelades af det pågældende system.

Idet månedsværdierne af varmeproduktionen  $Q$ , jfr. (III.6.1), og vindkraftydelsen  $W_v$ , jfr. (III.2.4) antages at være givne, går energiomsætningsberegningen ud på at bestemme de samvarende værdier af el-produktion  $W$  og brændselsforbrug ( $B_m$  og  $B_k$ ) i hver måned, sådan at el-produktionens afvigelse fra den specificerede, ønskede el-produktion bliver mindst mulig under hensyntagen til de givne driftsparametre  $\gamma$  og  $x$  (jfr. (III.4.1), (III.4.3)) og den eventuelle øvre og/eller nedre grænse for motorens brændselsforbrug (III.5.1).

LOCUS-programmet beregner de samvarende månedsværdier af el-produktion og brændselsforbrug i henhold til de nedanfor opstillede relationer (III.7.1-10). I det følgende afsnit III.8 gennemgås den beregningsmetode, der er lagt til grund for program-

ets efterfølgende beregninger af de komponentstørrelser (motor, varmepumpe, kedel, varmelagre, gaslager), der vil være nødvendige for, at el- og varmeproduktionen kan følge de givne effektvariationer.

Om varmepumpen skal bruges i en given periode (her en måned) eller ikke afhænger af forholdet mellem el- og varmeproduktionen samt af kedlens bidrag til varmeproduktionen.

Antag først, at varmepumpen ikke skal bruges, dvs. at  $Q_{vp} = 0$ , og at motorens varmeeffekt kan reguleres, jfr. (III.3.2). Iflg. (III.4.3) og (III.5.1) gælder da

$$(a_1 + a_0(1-\mu)) \cdot B_m(1-\tau) = W - W_v \quad (III.7.1)$$

$$(1-x)Q \leq a_1 \cdot \mu \cdot B_m \leq Q \quad (III.7.2)$$

$$B_m^{\min} \leq B_m \leq B_m^{\max} \quad (III.7.3)$$

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (III.7.4)$$

af (III.7.1) og (III.7.2) fås

$$\frac{W - W_v + Q(1-\tau)a_0(1-x)/\beta_1}{(a_1 + a_0)(1-\tau)} \leq B_m \leq \frac{W - W_v + Q(1-\tau)a_0/\beta_1}{(a_1 + a_0)(1-\tau)} \quad (III.7.5)$$

og af (III.7.1) og (III.7.4) fås

$$\frac{W - W_v}{(a_1 + a_0)(1-\tau)} \leq B_m \leq \frac{W - W_v}{a_1(1-\tau)} \quad (III.7.6)$$

Antag nu, at varmepumpen skal bruges, dvs. at  $Q_{vp} > 0$ , jfr. figur III.1. Det gælder da, at

$$W = \int_0^t (W_m(t) - Q_{vp}(t)/\epsilon) \cdot \delta(t) dt + W_v$$

hvor

$$\delta(t) = \begin{cases} 1-\tau & \text{for } w_m(t) - q_{vp}(t)/\epsilon > 0 \\ (1-\tau)^{-1} & \text{for } w_m(t) - q_{vp}(t)/\epsilon \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III.7.7a})$$

idet  $\tau$  er det relative tab i el-motor/generatoren. I energiom-sætningsberegningen (men ikke i dimensioneringsberegningerne, af-snit III.8) antages for simpelheds skyld, at  $w_m(t) - q_{vp}(t)/\epsilon$  har samme fortegn måneden igennem. Derved fås

$$W = (W_m - Q_{vp}/\epsilon) \cdot \delta + W_v \quad (\text{III.7.8})$$

hvor

$$\delta = \begin{cases} 1-\tau & \text{for } W_m - Q_{vp}/\epsilon > 0 \\ (1-\tau)^{-1} & \text{for } W_m - Q_{vp}/\epsilon < 0 \end{cases} \quad (\text{III.7.7b})$$

Da  $u = 1$ , når varmepumpen er i brug, er  $a = a_1$  og  $\beta = \beta_1$ , jfr. (III.3.2). Indsættes  $W_m = a \cdot B_m$  i (III.7.8) fås

$$Q_{vp} = a \cdot \epsilon \cdot B_m - \epsilon^1 \cdot (W - W_v) \quad (\text{III.7.9})$$

hvor

$$\epsilon^1 = \epsilon/\lambda \quad (\text{III.7.10})$$

Endvidere gælder (jfr. (III.4.3)):

$$\begin{aligned} Q_{vp} &= Q - Q_m - Q_k \geq Q - \beta B_m - \kappa Q \\ &= (1-\kappa)Q - \beta B_m \end{aligned} \quad (\text{III.7.11})$$

Af (III.7.9) og (III.7.11) fås

$$B_m \geq \frac{\epsilon^1 \cdot (W - W_v) + (1-\kappa)Q}{a \cdot \epsilon + \beta} \quad (\text{III.7.12})$$

Af (III.4.1) og III.4.3) fås endvidere

$$\frac{(1-\kappa-\gamma)Q}{\beta} \leq B_m \quad (\text{III.7.13})$$

samt

$$Q_{vp} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} Q - \beta B_m \\ \gamma Q \end{array} \right\}$$

som sammen med (III.7.9) giver

$$B_m \leq \frac{\epsilon^1 (W - W_v) + Q}{a \cdot \epsilon + \beta} \quad (\text{III.7.14})$$

og

$$B_m \leq \frac{\epsilon^1 (W - W_v) + \gamma Q}{a \cdot \epsilon} \quad (\text{III.7.15})$$

Af (III.7.8) fås endvidere, da  $Q_{vp} > 0$ , at

$$W - W_v \leq W_m \cdot \delta = a \cdot B_m \cdot \delta$$

eller

$$B_m \geq \frac{W - W_v}{a \cdot \delta} \quad (\text{III.7.16})$$

Indføres de dimensionsløse størrelser

$$b_m = B_m/Q, \quad w = W/Q, \quad w_v = W_v/Q$$

kan (III.7.3), (III.7.5) og (III.7.6) sammenfattes i

$$\max \left\{ \begin{array}{l} b_m^{\min} \\ \frac{W - W_V + \delta \cdot a_0 (1-x) / \beta_1}{(a_1 + a_0) \cdot \delta} \end{array} \right\} \leq b_m \leq \min \left\{ \begin{array}{l} b_m^{\max} \\ \frac{W - W_V + \delta \cdot a_0 / \beta_1}{(a_1 + a_0) \cdot \delta} \\ \frac{W - W_V}{a_1 \cdot \delta} \end{array} \right\} \quad (\text{III.7.17})$$

gældende for  $Q_{VP} = 0$ .

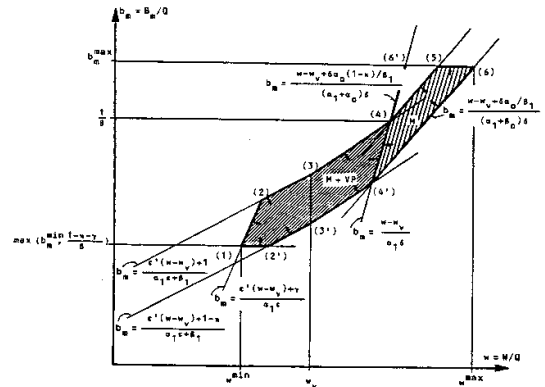
(III.8.12-17) kan sammenfattes i

$$\max \left\{ \begin{array}{l} b_m^{\min} \\ \frac{1-x-y}{\beta} \\ \frac{e' (W - W_V) + 1-x}{a \cdot c + \beta} \\ \frac{W - W_V}{a \cdot \delta} \end{array} \right\} \leq b_m \leq \min \left\{ \begin{array}{l} b_m^{\max} \\ \frac{1}{\beta} \\ \frac{e' (W - W_V) + 1}{a \cdot c + \beta} \\ \frac{e' (W - W_V) + \gamma}{a \cdot c} \end{array} \right\} \quad (\text{III.7.18})$$

gældende for  $Q_{VP} > 0$ ,  $a = a_1, \beta = \beta_1$

(III.7.17) og (III.7.18) udtrykker relationen mellem motorens brændselsforbrug  $B_m = b_m \cdot Q$  og systemets el-produktion  $W = w \cdot Q$  for en given varmeproduktion  $Q$  og en given vindkraftproduktion  $W_V = w_V \cdot Q$ . Relationen er vist grafisk ved figur III.2.

Hvis forholdet mellem motorens el-produktion og varmeproduktion ikke kan reguleres, dvs.  $a_0 = 0$  og  $\mu = 1$  i (III.3.2), så reduce-



Figur III.2 For en given varmeproduktion  $Q$  og en given vindkraftproduktion  $W_V$  kan de samvarende værdier af el-produktionen  $W$  og motorens brændselsforbrug  $B_m = (W, B_m) = (w \cdot Q, b_m \cdot Q)$  varieres indenfor det skraverede område. Når  $(w, b_m)$  ligger indenfor området  $M + VP$  bruges både motoren og varmepumpen. Indenfor området  $M$  bruges kun motoren. Hvis  $a_0 = 0$ , dvs. at forholdet mellem motorens el-produktion og varmeproduktion ikke kan reguleres, reduceres området  $M$  til linien (4')-(6'). Løngs afgrænsningen (2)-(3)-(4)-(5) er kedlens varmeproduktion  $Q_k = 0$ , medens  $Q_k = (1-x)Q$  løngs afgrænsningen (2')-(3')-(4')-(6). Bemærk, at afhængigt af  $b_m^{\min}$ ,  $b_m^{\max}$  og  $w_V$  kan  $w^{\min}$  og  $w^{\max}$  antage såvel negative som positive værdier. Kanterne (2)-(4) og (2')-(4') har et knæk i henholdsvis punkt (3) og (3'), fordi  $e' = e/\delta$  skifter værdi, jfr. (III.7.7b).

res det ved (III.7.17) givne område til

$$\{(w, b_m) \mid (b_m = \frac{w-w_v}{a_1 \delta}) \wedge (b_m^{\max} \leq b_m \leq b_m^{\min})\}$$

svarende til liniestykket (4')-(6'), figur III.2. For  $b_m > 1/\delta$ , svarende til liniestykket (4)-(6'), vil der da være et overskud af varme fra motoren, idet  $Q_m = \delta B_m > Q$ .

Lad nu  $W_{\text{spec}}$  betegne den i inddata til LOCUS-programmet specificerede ønskede el-produktion i den aktuelle måned. Programmet beregner da el-produktionen  $W$  således:

- hvis  $W_{\text{spec}} < W^{\min}$  så sættes  $W = W^{\min}$
- hvis  $W^{\min} \leq W_{\text{spec}} \leq W^{\max}$  så sættes  $W = W_{\text{spec}}$
- hvis  $W^{\max} \leq W_{\text{spec}}$  så sættes  $W = W^{\max}$

hvor  $W^{\min} = W^{\min} \cdot Q$ ,  $W^{\max} = W^{\max} \cdot Q$ . Hvis el-produktionen ikke er specificeret i inddata, sættes  $W_{\text{spec}} = Q$ .

Når  $w = W/Q$  således er bestemt beregner programmet den tilsvarende værdi af  $b_m$ , sådan at  $(w, b_m)$  ligger på kanten (1)-(2')-(3')-(4')-(4)-(6'), se figur III.2, svarende til at kedlens varmebidrag  $Q_k$  vælges så stort som muligt under begrænsningen  $Q_k \leq \kappa Q$ , jfr. (III.4.3). Hvis varmepumpen bruges i den pågældende måned beregnes dens bidrag til varmeproduktionen som  $Q_{vp} = Q - \delta_1 B_m - Q_k$ .

### III.8 Dimensionering af energiomætningsystemets komponenter.

De givne månedsværdier og effektvariationer af varmeproduktionen, el-produktionen og vindkraftproduktionen samt de eventuelt givne begrænsninger af motorens og kedlens brændselsforbrug, jfr. (III.5.1) og (III.4.3), udgør funktionskravene til energiomætningsystemet. (Hvis el-produktionens størrelse ikke er specificeret, beregnes den som vist ovenfor i slutningen af afsnit III.7).

I det følgende forklares i princippet, hvordan LOCUS-programmet beregner de komponentstørrelser, der er nødvendige for at systemet kan opfylde de givne funktionskrav under forudsætning af de givne tekniske parametre og driftparametre, jfr. afsnit III.3 og III.4. Komponentstørrelserne angives ved:

- motorens maksimale akseleffekt (kW)
- varmepumpekompresorens maksimale akseleffekt (kW)
- kedlens maksimale varmeeffekt (kW)
- motor-varmelagerets kapacitet (kWh)
- varmepumpe-brændselslagerets kapacitet (kWh).

For at forenkle den matematiske fremstilling af beregningsmetoden ses her bort fra effekttabet i el-motor/generator'en, dvs. det antages, at  $\tau = 0$ ,  $\delta = 1$  jfr. (III.7.7a). Endvidere antages det her, at motorens belastning ikke på noget tidspunkt er begrænset af den brændselsmængde, der i øjeblikket er til rådighed, selvom dette kan være tilfældet, hvis motoren udelukkende forsynes fra et lokalt gasproduktionsanlæg. LOCUS-programmet indregner imidlertid effekttabet i el-motor/generatoren og tager også hensyn til en eventuelt begrænset brændselsforsyning.

Lad  $w(t)$  og  $w_v(t)$  betegne henholdsvis den ønskede el-produktionseffekt og vindkrafteffekten som funktion af tiden i perioden fra tiden  $t_0$  til tiden  $t_1$ , se figur III.3(a), og lad  $q(t)$  betegne varmeproduktionseffekten se figur III.3(c). Antag at tidsrummet  $t_0$  til  $t_1$  er en af årets måneder, eller et kortere tidsrum (en eller to uger), der er valgt sådan, at gennemsnitseffekterne over dette tidsrum er lig gennemsnitseffekterne over måneden.

Lad  $w_m^{\max}$  og  $w_{vp}^{\max}$  betegne henholdsvis motorens og varmepumpekompresorens maksimale akseleffekt. De tilsvarende effekter ved mindste driftsbelastning er da henholdsvis  $w_m^{\min} = \lambda w_m^{\max}$  og  $w_{vp}^{\min} = \lambda_{vp} w_{vp}^{\max}$ , jfr. (III.3.5) og (III.3.6).



Idet det forudsættes, at den maksimale el-produktionseffekt  $\max \{w(t)\}$  skal kunne leveres i vindstille perioder vælges

$$w_m^{\max} \geq w^{\max} = \{w(t)\}$$

Den gennemsnitlige varmepumpe-varmefæffekt  $\bar{q}_{VP}$  er bestemt ved energiomsætningsberegningen, jfr. afsnit III.7. For at varmepumpen kan yde denne produktion skal

$$w_{VP}^{\max} \geq \bar{q}_{VP}/\varepsilon$$

Når el-produktionseffekten  $w(t)$  skal opfyldes, kan motoren til tiden  $t$  tilføre varmepumpekompresoren en akseffekt  $w_{VP}(t)$  indenfor intervallet

$$w_m^{\min} - (w(t) - w_v(t)) \leq w_{VP}(t) \leq w_m^{\max} - (w(t) - w_v(t)) \quad (i)$$

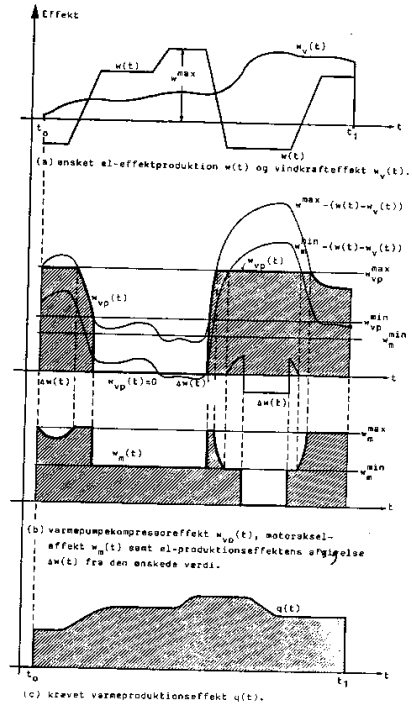
For at varmepumpen kan sættes igang, skal det endvidere gælde, at

$$w_{VP}^{\min} \leq w_{VP}(t) \leq w_{VP}^{\max} \quad (ii)$$

Den nødvendige og tilstrækkelige betingelse for at varmepumpen kan sættes igang til tiden  $t$ , er således, at intervallerne (i) og (ii) har en ikke tom fællesmængde.

Figur III.3(b) viser de af funktionerne  $w(t)$  og  $w_v(t)$ , figur III.3(a), afledte funktioner  $w_m^{\min} - (w(t) - w_v(t))$  og  $w_m^{\max} - (w(t) - w_v(t))$ . Endvidere er konstanterne  $w_{VP}^{\min}$ ,  $w_{VP}^{\max}$  og  $w_m^{\min}$  indtegnede. De skraverede områder viser de tidsintervaller, hvor varmepumpen kan sættes igang, og det samlede areal af disse områder er det samlede arbejde  $W_{VP}$ , der kan tilføres varmepumpen, når el-produktionseffekten samtidigt skal opfyldes.

For at udnytte varmepumpekapaciteten bedst muligt, skal kompresoren til enhver tid køre på den størst mulige effekt, dvs. at  $w_{VP}(t)$  skal følge den øvre afgrænsning af de skraverede områder, figur III.3(b).



Figur III.3 Bestemmelse af varmepumpens kompressoreffekt  $w_{VP}(t)$  og motorens akseffekt  $w_m(t)$  for en given ønsket el-effektproduktion  $w(t)$  og en given vindkrafteffekt  $w_v(t)$ .  $w_{VP}^{\max}$  og  $w_m^{\max}$  samt varmelagerkapaciteterne skal bestemmes sådan, at den krævede varmeproduktion  $q(t)$  opfyldes.  $\Delta w(t)$  er den resulterende el-effektproduktions afvigelse fra den ønskede værdi  $w(t)$ .

Motorens akseleffekt vælges til enhver tid sådan at den absolutte værdi af differensen  $\Delta w(t)$  mellem den resulterende og den ønskede el-produktionseffekt bliver mindst mulig:

$$\Delta w(t) = w_m(t) - (w(t) - w_v(t)) - w_{vp}(t)$$

minimaliseres under betingelsen ( $w_m^{\min} \leq w_m(t) \leq w_m^{\max}$ ) v ( $w_m(t) = 0$ ).

I figur III.3(b) er  $\Delta w(t)$  indtegnet. Figuren viser endvidere den tilsvarende motorakseleffekt  $w_m(t)$  som funktion af tiden.

Idet det, som det fremgår af figur III.3, antages at varmepumpen bruges i den betragtede periode er  $\alpha_0 = 0$  og  $\mu = 1$ , jfr. (III.3.2), så motorens varmeeffekt  $q_m(t) = \beta_1/\alpha_1 w_m(t)$ . Varmepumpens varmeeffekt er  $q_{vp}(t) = w_{vp}(t) \cdot c$ .

Den krævede varmeproduktion i den betragtede periode er

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} q(t) dt$$

Kedlens bidrag er

$$Q_k = \kappa Q$$

For varmeproduktionen  $q_m$  og  $q_{vp}$  fra motor og varmepumpe skal således gælde, at

$$\begin{aligned} Q_m + Q_{vp} &= \int_{t_0}^t q_m(t) dt + \int_{t_0}^t q_{vp}(t) dt \\ &= \beta_1/\alpha_1 \cdot \int_{t_0}^t w_m(t) dt + c \cdot \int_{t_0}^t w_{vp}(t) dt \geq (1-\kappa)Q \end{aligned} \quad (III.8.1)$$

Dimensioneringsproblemet for motor og varmepumpe kan nu formuleres på følgende måde:

For givne funktionskrav, udtrykt ved givne effekt-funktioner  $q(t)$ ,  $w(t)$  og  $w_v(t)$ , se figur III.3(a) og (c) og givne tekniske parametre og driftsparametre, jfr. afsnit III.3 og III.4: beregn den mindste værdi af  $w_m^{\max} (\geq w_m^{\max})$  og den dertil hørende mindste værdi af  $w_{vp}^{\max} (\geq \bar{q}_{vp}/c)$ , der kan tilfredsstille (III.8.1), når systemet styres sådan, at der til enhver tid sættes størst mulig effekt ind på varmepumpen, samtidigt med at  $\Delta w(t)$  minimaliseres.

I LOCUS-programmet er dette problem løst ved den nedenfor beskrevne iterations-algoritme A.

Den numeriske integration foretages efter den simple Euler-metode med tidsskridtet  $\Delta t$ , som vælges af brugeren. Bidragene fra motor/motorlager, varmepumpe/varmepumpelager og kedel til dækning af varmebehovet  $q(t) \cdot \Delta t$  i tiden fra  $t$  til  $t+\Delta t$ , samt ændringer i lågerbeholdninger i dette tidsrum, beregnes ved algoritmen B, se nedenfor.

Som vist ved figur III.3 vil energiomætningsystemet ikke under alle omstændigheder kunne regulere den producerede el-effekt sådan, at  $\Delta w(t)$  bliver nul. LOCUS-programmet udskriver derfor en statistik over  $\Delta w(t)$  i form af tabellerede fordelingsfunktioner for henholdsvis  $\Delta w^+(t)$  og  $\Delta w^-(t)$ :

$$\begin{aligned} \Delta w^+(t) &= \Delta w(t) \cdot s(t) \\ \Delta w^-(t) &= \Delta w(t) \cdot (1-s(t)) \end{aligned} \quad s(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } \Delta w(t) > 0 \\ 0 & \text{for } \Delta w(t) \leq 0 \end{cases} \quad (III.8.2)$$

Ved dimensionering af et områdes overordnede lokalsystem og ved beregning af dets  $\Delta w(t)$ -værdier tages hensyn til de tilhørende underordnede lokalsystemers  $\Delta w(t)$ -værdier, sådan som forklaret i det følgende afsnit III.9.

$\Delta Q_0 = -\infty$ ;  
 $w_m^{\max} = w_m^{\max}$ ; (se figur III.3(a))  
 $w_{vp}^{\max} = q_{vp}/\epsilon$ ;  
**gentag:**  
 beregn  $w_{vp}(t)$  og  $w_m(t)$ ,  $t_0 \leq t \leq t_1$ , sådan  
 som beskrevet ved figur III.3(c) og (d),  
 og beregn  $\int_{t_0}^{t_1} w_m(t) dt + \epsilon \int_{t_0}^{t_1} w_{vp}(t) dt - (1-\kappa)Q$   
 $\Delta Q_1 = \beta_1/\alpha_1$   
**Hvis**  $(\Delta Q_1 < 0)$  og  $(\Delta Q_1 < \Delta Q_0)$  (føregt underskud)  
**så**  $w_m^{\max} = w_m^{\max} + \Delta n$ ;  $w_{vp}^{\max} = q_{vp}/\epsilon$ ;  
 (motorstørrelse føreges, varmepumpe tilbage til  
 beg. værdi)  
**ellers**  
**hvis**  $(\Delta Q_1 < 0)$  (stadig underskud)  
**så**  $w_{vp}^{\max} = w_{vp}^{\max} + \Delta_{vp}$ ;  
 $\Delta Q_0 = \Delta Q_1$ ; ( $\Delta Q_0$  er den foregående underskudsværdi)  
**indtil**  $\Delta Q_1 \geq 0$ ;  
**Algoritme A:** iterativ beregning af mindsteværdi af  $w_m^{\max}$   
 og  $w_{vp}^{\max}$ .  
 $\Delta_m$  og  $\Delta_{vp}$  er trin størrelserne ved den trinvis føregelse  
 af henholdsvis  $w_m^{\max}$  og  $w_{vp}^{\max}$ .

(motorlager:  $L_m^{\max}$  = hidtil største beholdning (kWh)  
 $L_m$  = aktuel beholdning (kWh)  
 varmepumpe lager:  $L_{vp}^{\max}$  = hidtil største beholdning (kWh)  
 $L_{vp}$  = aktuel beholdning (kWh)  
 $q_{m1}$  : varmebidrag fra motor og/eller motorlager (kW)  
 $q_{vp1}$  : varmebidrag fra v.pumpe og/eller v.pumpe lager (kW)  
 $q_k$  : varmebidrag fra kedel)  
**Hvis**  $q_m(t) \cdot \Delta t + L_m \geq q(t) \cdot \Delta t$   
**så** ( $q(t)$  kan dækkes af motor/lager alene)  
 $q_{m1} = q(t)$ ;  $q_{vp} = 0$ ;  
**ellers** evt. supplerende bidrag fra varmepumpe/lager:  
 $q_{m1} = q_m(t) + L_m/\Delta t$ ;  
 $q_{vp1} = \min \begin{matrix} q(t) - q_{m1} \\ q(t) \cdot \gamma \\ q_{vp}(t) + L_{vp}/\Delta t \end{matrix}$   
 $q_k = q(t) - q_{m1} - q_{vp1}$ ; (bidrag fra kedel  $\geq 0$ )  
 $L_m = L_m + (q_m(t) - q_{m1}) \cdot \Delta t$ ;  
 $L_{vp} = L_{vp} + (q_{vp}(t) - q_{vp1}) \cdot \Delta t$ ;  
**Hvis**  $L_m > L_m^{\max}$  **så**  $L_m^{\max} = L_m$ ;  
**Hvis**  $L_{vp} > L_{vp}^{\max}$  **så**  $L_{vp}^{\max} = L_{vp}$ ;  
**Algoritme B:** beregning af varmebidrag til dækning af varmebehovet  $q(t)$   $\Delta t$  samt ajourføring af aktuelle og største varmelagerbeholdning over tidskridtet fra  $t$  til  $t + \Delta t$ .

### III.9 LOCUS-programmets beregningsgang.

I inddata til LOCUS-programmet (se appendiks) kan man for hvert system angive om dimensioneringsberegningerne ønskes udført og i så fald for hvilke måneder, beregningerne skal udføres.

Da dimensioneringsberegningerne er de mest tidskrævende bør man før disse sættes igang sikre sig, at det ved inddata-specificerede system samt de specificerede månedsvariationer og effektvariationer er i overensstemmelse med den ønskede fordeling af ressourceforbruget over året og de ønskede døgnvariationer af el-import/eksport mellem delsystemerne. Dette kan man gøre ved, i første omgang kun at lade programmet gennemføre energiomsætningsberegningerne med henblik på en eventuel justering af inddata og månedsvariationer og udfra de fremkomne resultater. I forlængelse af resultatudskrifterne for energiomsætningen kan man for forskellige måneder få udskrevet de resulterende effektvariationer for el-produktion fra områdernes overordnede systemer, d.e. de effektvariationer, der fremkommer som summen af områdets samlede el-forbrugsvariationer og den ønskede el-eksportvariation minus variationen af den samlede el-produktionseffekt fra områdets underordnede lokalsystemer, jfr. afsnit II.2 og III.6, idet det forudsættes, at de underordnede systemer er i stand til at indregulere deres el-effektproduktion i overensstemmelse med de specificerede effektvariationer. Ved at gennemgå disse effektvariations-udskrifter kan man vurdere, hvorvidt de specificerede variationer er hensigtsmæssige og eventuelt ændre dem.

Når man udfra resultaterne af energiomsætningsberegningerne med tilhørende resulterende variationer af el-produktionseffekterne for de overordnede systemer har sikret sig, at systemet er hensigtsmæssigt specificeret mht. den givne målsætning, kan dimensioneringsberegningerne iværksættes.

For hvert lokalsystem gennemfører programmet først dimensioneringsberegningerne for alle de angivne dimensioneringsmåneder, således at størrelsen af hver enkelt komponent (motor, varmepumpe, varmelagre, kedel, brændselslager) bestemmes som størsteværdien over de betragtede måneder af den beregnede komponentstørrelse. Når komponentstørrelserne således er bestemt, gentages for hver af de betragtede måneder beregningen af de øjeblikkelige værdier af lokalsystemets el-produktionseffekt  $w(t)+\Delta w(t)$ ,  $t=t_0+i \cdot \Delta t$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ , sådan som beskrevet ved figur III.3.

Indenfor hvert område opsummeres effekterne  $w(t)+\Delta w(t)$  for de underordnede lokalsystemer, d.e. de specificerede produktionseffekter  $w(t)$  plus de beregnede afvigelser  $\Delta w(t)$ , sådan at der fremkommer en tidsserie af deres samlede el-produktionseffekter med tidskridt  $\Delta t$ . Denne tidsserie repræsenterer de underordnede lokalsystemers el-produktion i forbindelse med dimensioneringen af områdets overordnede system.

Ved dimensioneringen af et områdes overordnede system tages således hensyn til de afvigelser fra de specificerede effektvariationer, som skyldes, at de tilhørende underordnede systemer ikke under alle omstændigheder er i stand til at opfylde de specificerede effektvariationskrav.