

Arbejdsnotat

**Forøget fleksibilitet og effektivitet
i energiforsyningen ved anvendelse
af varmepumper i kraftvarmeværker**

PSO 7136

Morten Boje Blarke
Institut for samfundsudvikling og planlægning
Aalborg Universitet
December 2008 (Ændret 4. April 2009)

Indholdsfortegnelse

<i>Indholdsfortegnelse</i>	2
1. <i>Indledning</i>	3
2. <i>Sammenligning af vind-venlige kraftvarmeanlæg</i>	5
3. <i>Komparative resultater</i>	6
4. <i>Konklusion</i>	11
5. <i>Modelramme, formidling og fremadrettet anvendelse af forskningsresultater</i>	12

1. Indledning

Vestdanmarks nuværende 550 decentralle kraftvarmeanlæg (1700 MWe), og 4100 vindmøller (2500 MWe) kunne perfekt synkroniseret i princippet dække det vestdanske elbehov, der varierer fra 1250 MWe til 3700 MWe. Vindkraftproduktionens diskontinuerlige natur, og kraftvarmeproduktionens proces- eller varmebundne drift, nødvendiggør imidlertid i praksis en vis udveksling samt den fortsatte drift af 3400 MWe central kraftværkskapacitet.

Fig. 1 illustrerer hvordan denne sammensætning i dag giver det vest-danske energisystem en teoretisk reservemargin på 103 % ekskl. udveksling.

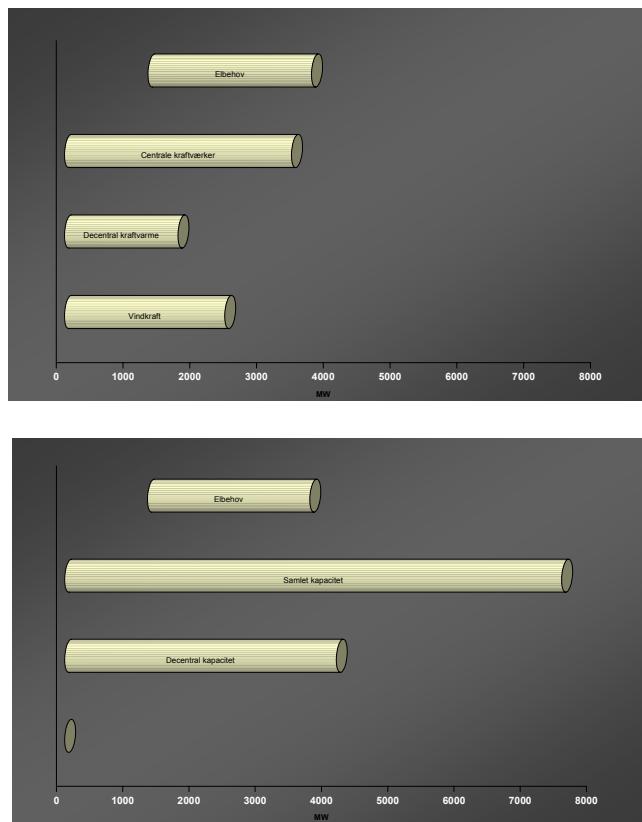


Fig. 1: Elbehov og central hhv. decentral elproduktionskapacitet i det vestdanske energisystem excl. udveksling.

Fig. 2 illustrerer at vindkraftens andel af den samlede elproduktion er steget fra 21 % i 2003 til 26 % i 2007 for det vestdanske område, mens den decentrale kraftvarmeproduktions andel er faldet fra 30 % til 23 %.

Den tvungne overgang til drift på spotmarkedet har reduceret den decentrale kraftvarmeproduktions produktionsandel, men samtidigt gjort den mere "vind-venlig". Fra 2005 til 2007 er de decentrale producenters samlede "vind-venligheds"-koefficient (relokeringskoefficienten) steget fra 0,50 til 0,57.

Relokeringskoefficienten udtrykker hvor godt den decentrale produktion er synkroniseret med netto-elbehovet, altså elbehovet minus vindkraft. En relokeringskoefficient på 1,0 er et teoretisk maksimum, der ville betyde, at den decentrale produktion ville være perfekt synkroniseret med vindkraft og elbehov, og at vindkraft og decentral produktion dermed i principippet ville kunne varetage elforsyningen helt uden udveksling og centrale kraftværker.

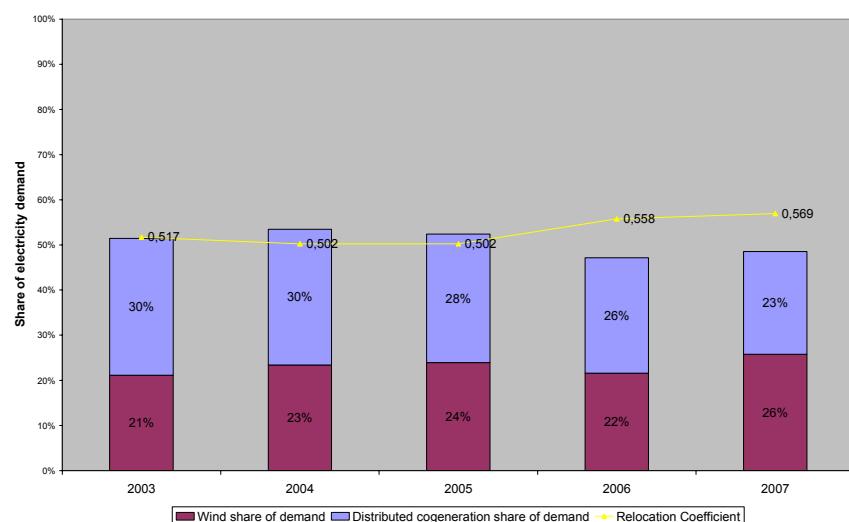


Fig. 2: Udviklingen i den decentrale elforsyningens andel af den samlede elforsyning, samt udviklingen i de decentrale kraftvarmes "vind-venlighed".

Planer for udbygning med 3400 MWe hav-baseret vind med tilslutning i det vest-danske vil dels øge "overkapaciteten", dels udfordre den varmebundne elproduktions vindvenlighed i de kommende år. Dette rejser en række væsentlige spørgsmål, hvoraf det centrale er:

Hvordan gøres energisystemet vindvenligt, dels således at risikoen for kritisk eloverløb minimeres, dels således at forsyningssikkerheden opretholdes?

Herunder falder vurderingen af hvilken af nedenstående integrationsstrategier der samfundsmæssigt set vil være den mest hensigtsmæssige:

- 1.** Investeringer henimod et *super-grid*, der gør det muligt at eksportere vindkraft til nabo-systemer.
- 2.** Investeringer i *indenlandske integration*, dvs. decentrale løsninger, der er vindvenlige, dvs. placerer elforbrug og anden elproduktion i overensstemmelse med vindkraftens tilgængelighed og elforbrugets nødvendighed.

De to ovennævnte modeller for integration af vindkraft vurderes at være inkompatible, da investeringer i den ene undergraver rentabiliteten for den anden.

PSO projektets innovationer og analyser spiller i væsentlig grad op ad denne strategiske udfordring.

2. Sammenligning af vind-venlige kraftvarmeanlæg

En signifikant konsekvens af PSO projektet har indtil videre været udviklingen af et anlægskoncept, hvor integration af kompressionsvarmepumpe på et decentralt kraftvarmeværk kombineres med integration af et "koldt varmelager", der muliggør drift af varmepumpe, uden samtidig drift af kraftvarmeanlæg.

Dette innovative anlægskoncept er undersøgt gennem videreudvikling af en model-ramme, der evaluerer de komparative design- og driftsmæssige, samt energisystemmæssige konsekvenser af avancerede koncepter for integration af varmepumper og elkedler i decentrale kraftvarmeanlæg i fjernvarmeproduktionen

Fig. 3 og tabellen herunder illustrerer og beskriver kort de undersøgte anlægskoncepter.

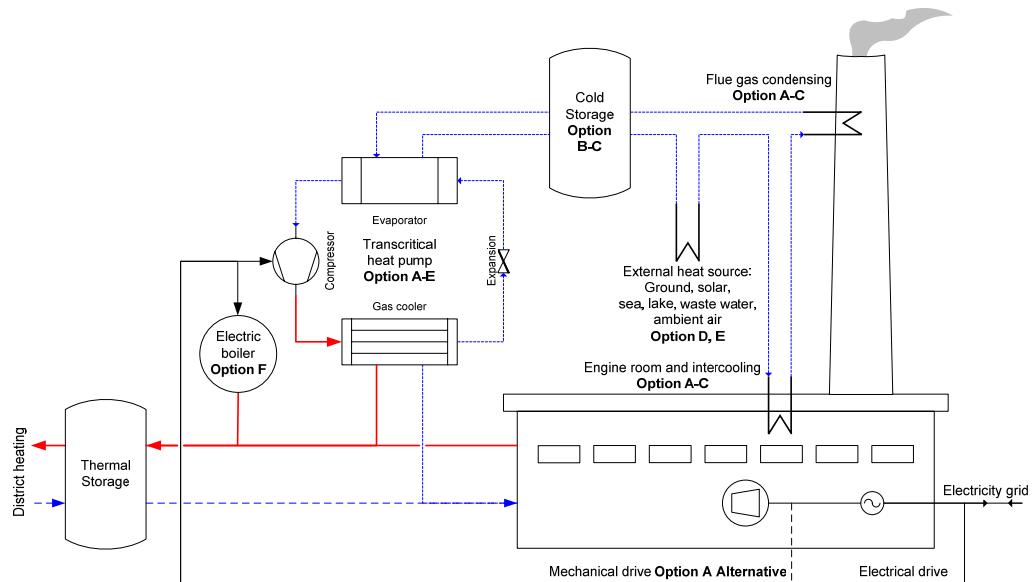


Fig. 3: Anlægskoncepter for integration af elkedel og kompressionsvarmepumper.

Undersøgte anlægskoncepter						
Reference	A	B	C	D	E	F
CHP	CHP-HP	CHP-HP-CS	CHP-HP-CS	CHP-HP-GS (lille)	CHP-HP-GS (fuld)	CHP-EB (fuld)
Samtidig drift tilladt		Samtidig drift ikke tilladt				

CHP: Kraftvarmeanlæg, HP: Varmepumpe, CS: Koldt varmela-ger, GS: Jordvarmeanlæg, EB: Elkedel.

Note: For Option D (jordvarmeanlæg) integreres en varmepumpe med samme varmeproduktionskapacitet som varmepumpen i Option C, altså en mindre varmepumpe, i Option C begrænset af røggasvarme. I Option E (jordvarmeanlæg) integreres en varmepumpe med fuld varmeproduktions- kapacitet, svarende til kraftvarmeenhedens varmeproduktionskapacitet.

3. Komparative resultater

De væsentligste forskningsresultater med hensyn til energi-, miljø, og samfundsøkonomiske konsekvenser i et energisystem-perspektiv giver anledning til at konkludere:

1. Integration af kompressionsvarmepumpe med henblik på udnyttelse af restvarme fra røggas øger anlæggets samlede brændselsudnyttelse. I et case-studie øges anlæggets totalvirkningsgrad fra 92,0 % til maximalt 97,2 % ved tilladt samtidig drift af kraftvarmeenhed og varmepumpe. Når samtidig drift af kraftvarmeenhed og varmepumpe ikke tillades – forskudt drift muliggjort ved anvendelse af koldt varmelager - begrænser det i væsentlig grad muligheden for fuldstændig udnyttelse af røggassens restvarme, og totalvirkningsgraden lander på 93,5 %.
2. Fig. 4 illustrerer at integration af varmepumpe eller elkedel i alle tilfælde øger anlæggets vindvenlighed. Mest vindvenlig er Option E, der integrerer en varmepumpe med samme varmeproduktionskapacitet som kraftvarmeenheden, hvor vindvenlighedskoefficienten stiger fra referencens 0,506 til 0,584. Sammenholdes Option A og B med Option C fremgår det dels at tilladelse af samtidig drift i praksis sikrer et relativt mere vindvenligt anlæg, til trods for at anlæggets kraftvarmeproduktion reduceres i højere grad end når samtidig drift ikke tillades, dels at tilføjelse af et koldt varmelager (fra Option A til B), og derved muligheden for forskudt drift, øger anlæggets vindvenlighed. CHP-HP-CS konceptet (Option B) er mere vindvenligt end elkedel-konceptet (Option F).

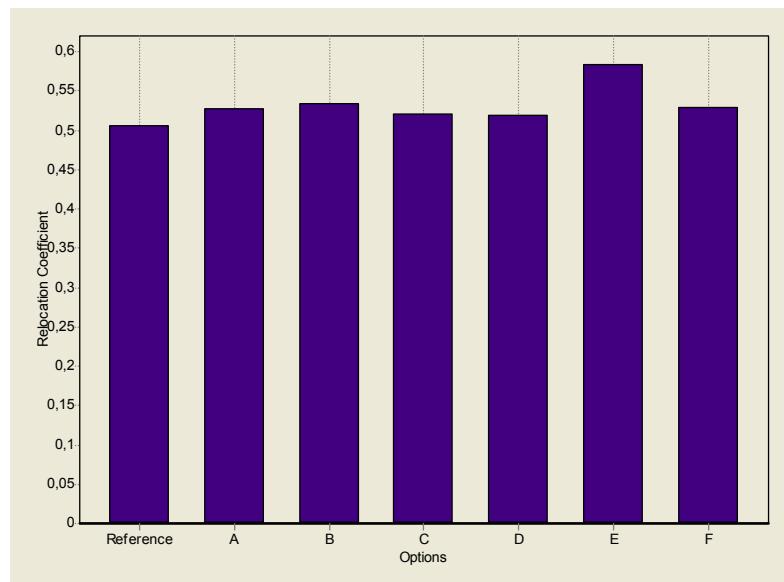


Fig. 4: Wind-venligheds-koefficienten for de undersøgte koncepter.

3. Integration af en kompressionsvarmepumpe med røggaskøling reducerer kraftvarmeenhedens netto-levering af elektricitet til el-nettet. I dette case-studie, der baserer sig på en optimeret samfundsøkonomisk driftsstrategi, reduceres antallet af netto-fuldlasttimer på anlægget fra 5877 timer til 5073 timer ved samtidig drift af kraftvarmeenhed og varmepumpe. Til trods for et reduceret brændselsforbrug på værket, resulterer samtidig drift i en systemmæssigt forøget årlig CO₂ emission for anlægget på 25%, da kraftvarmeenhedens reducerede elproduktion i vidt omfang erstattes af marginal kul- og gaskondens. Ved forskudt drift reduceres antallet af fuldlasttimer til 5525 timer, og selv om anlægget ved forskudt drift bedre er i stand til producere CO₂-fri varme i perioder med meget lave elpriser, hvor overvejende vindkraft vil repræsentere marginal elproduktion, øges CO₂ emissionerne samlet set med 13%. Det er først, når røggassens begrænsninger som lav-temperatur varmekilde helt ophæves (Option D), f.eks. med jordvarmeoptag, at anlægget er i stand til fuldt ud at udnytte perioder med lave spotpriser, hvorved anlæggets tekniske CO₂ emissioner i et system-perspektiv reduceres med 9 %.¹

Dette resultat er illustreret i Fig. 5.

¹ Med "tekniske" CO₂ emissioner hentydes til det forhold, at CO₂ kvotesystemet er internaliseret i de samfundsøkonomiske spotmarkedsomkostninger og ikke burde få indflydelse på CO₂ udledningen. En "teknisk" CO₂ besparelse kunne imidlertid f.eks. anvendes til skrotning af kvoter.

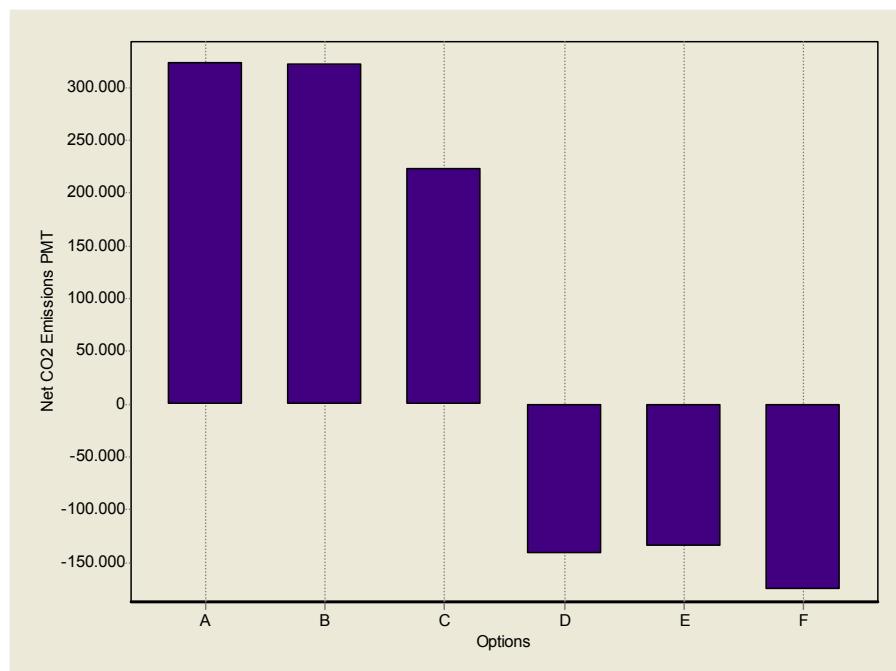


Fig. 5: "Tekniske" CO2 emissioner i et system-perspektiv.
Positive værdier er en forøgelse i forhold til referencen,
mens negative værdier er en reduktion i forhold til
referencen.

4. Fig. 6 illustrerer at alle de undersøgte koncepter resulterer i en højere samfundsøkonomisk varmeproduktionsomkostning sammenlignet med kraftvarmeanlæggets nuværende drift. For Option E øges den samfundsøkonomiske varmeproduktionsomkostning med hele 82 % i forhold til referencen, mens forøgelsen er begrænset til mellem 2% og 8% for de øvrige løsninger. Den nederste figur i Fig. 6 viser den samfundsøkonomiske omkostningseffektivitet ved opnåelse af øget vindvenlighed. Heraf fremgår, at Option B (CHP-HP-CS med samtidig drift) og Option D (CHP-HP-GS, altså jordvarmeanlæg med en tilsvarende varmepumpe) konkurrerer om at være den samfundsøkonomisk mest omkostningseffektive måde at øge vindvenligheden i den decentrale kraftvarmeproduktion.

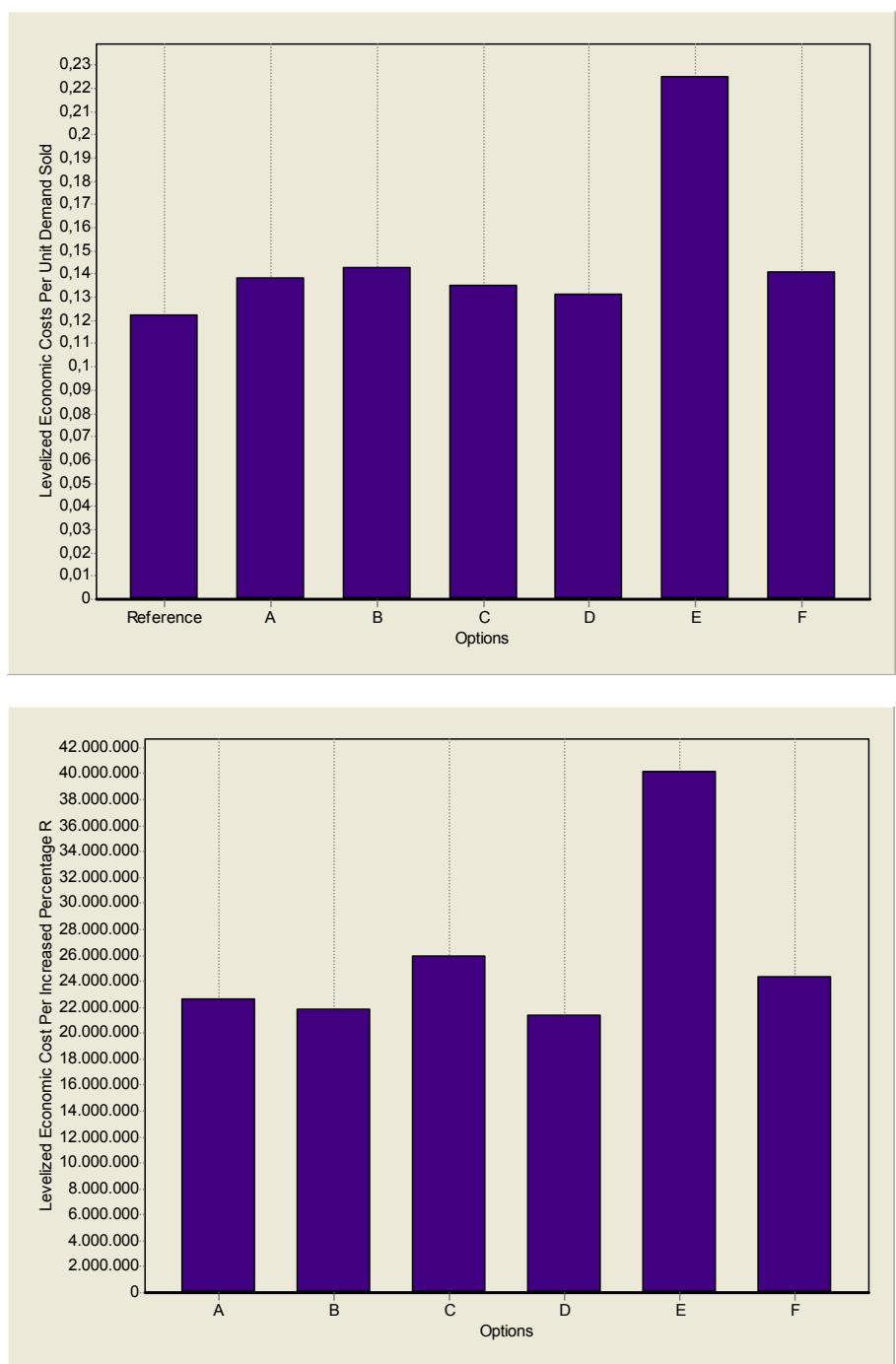


Fig. 6: Øverst: Annueret samfundsøkonomisk varmeproduktionsomkostning (DKK/kWh-varme). Nederst: Samfundsøkonomisk omkostningseffektivitet ved opnåelse af øget vindvenlighed (DKK/Rc-år).

4. Konklusion

Der er et væsentligt potentiale for at øge energisystemets vind-venlighed ved at integrere effektive transkritiske varme-pumper i den decentrale kraftvarmeforsyning og energipolitikken er ivrig efter at høste dette potentiale for "indenlandske integration" af diskontinuerlig vindkraft.

Analyserne underbygger den teoretiske mulighed for at en forøgelse af vindvenligheden i den decentrale forsyningsstruktur vil kunne fortrænge planlagte investeringer i net-infrastruktur, fremtidssikre den decentrale kraftvarme, og i stigende grad fortrænge central kraftproduktion, men det er uafklaret i hvilket omfang dette ville ske.

Dette afhænger især af hvilken overordnet strategi, der lægges til grund for integration af fremtidens vindkraft.

Energinet.dk synes indstillet på at satse et to-cifret milliard beløb på en "open access" strategi hen i mod etablering af et super-grid, der skal fordele diskontinuerlig vindkraft på tværs af de eksisterende elsystemer. Planlagte investeringer inkluderer:

- Storebælt I (600 MW / DKK 1,3 mia.) klar i 2010
- Storebælt II på vej (600 MW / DKK 1,2 mia.)
- Skagerrak IV på vej (600 MW / DKK 2 mia.)
- Tysklands-udvidelse på vej (2500 MW / DKK 3 mia.)
- Nye planer for en forbindelse til Holland (COBRA)
- Dertil vil manglen på nye indenlandske transmissionsledninger til at føre vindkraft ud af landet koste elforbrugerne 4,4 øre per kWh i 2025 ifølge elinfrastrukturkommissionen, april 2008

Der er gode argumenter for at mene, at en "indenlandske strategi for integration af vindkraft" vil være samfundsmæssigt mere hensigtsmæssig end en "open access" strategi, og at elforbrugerne skal kompensere fjernvarmeforbrugerne for

meromkostningerne, da elforbrugerne i forvejen netop forventes at finansiere den i Energinet.dk dominerende "open access" strategi for integration af vindkraft jvf. ovenstående investeringsplan.

Lov 1417 (elpatronloven) stimulerer til en forøgelse af den indenlandske vindvenlighed - og beskytter samtidigt kraftvarme-princippet – men yder ikke i tilstrækkelig grad en sådan kompensation. Det foreslås i denne forbindelse at et bedre og forskningsbaseret velafbalanceret instrument ville være at give decentrale kraftvarmeproducenter fuld fritagelse for elafgift for elektricitet anvendt i varmeproduktionen for op til 10 % af værkets egenproduktion af el (beskytter fortsat kraftvarmen, men baner vej for enkel og effektiv integration af varmepumper, og tager udgangspunkt i det elforbrug, der kan sikre røggasudnyttelsen, og samtidig med plads til at eksperimentere med supplerende eksternt varmeoptag).

Men indtil evt. nye virkemidler kommer på banen ligger noglen til løsningen i, at decentrale operatører forstår, at deres fremtidige eksistens er i fare om ikke de forstår at øge deres produktions vind-venlighed. Og for operatørerne selv at gennemføre en koordineret aktion for autonomt gennem eksperimentelle koncepter af den foreslæde natur at håndtere denne udfordring.

5. **Modelramme, formidling og fremadrettet anvendelse af forskningsresultater**

Der er i forbindelse med disse analyser udviklet en ny modelramme, der kombinerer detaljeret design og driftsoptimering i EnergyPRO med energisystemanalyser i COMPOSE, der bl.a. gør brug af dataudtræk fra EnergyPRO, Energinet.dk, RAMSES, og EnergyPLAN.

EnergyPRO, COMPOSE, og modelramme som sådan, er etableret med henblik på at blive brugt af operatører i den decentrale produktion som undersøger omkostningseffektive løsninger for vindvenlig drift. PSO-projektets deltagerne har løbende leveret træning i anvendelse af modelramme og analysemetoder i forbindelse med kurser arrangeret i regi af Dansk Fjernvarme.

COMPOSE er tilgængelig for download på hjemmesiden
[EnergyInteractive.NET](#).

Forudsætnings- og metodegrundlag er beskrevet i Ph.d.-afhandlingen "[The missing link in sustainable energy: Techno-economic consequences of large-scale heat pumps in distributed generation in favour of a domestic integration strategy for sustainable energy.](#)"