

## **ANALYSE**

# **De "ustyrlige" varmepumper: Vind-venlige varmepumper giver markante og omkostningseffektive tekniske CO<sub>2</sub>-reduktioner ved skift fra oliefyring**



Institut for Samfundsudvikling og Planlægning  
Morten Boje Blarke  
2010-09-25



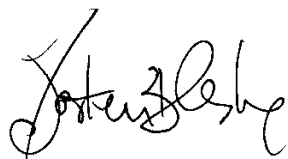
# Indholdsfortegnelse

<b>INDHOLDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>3</b>
<b>FORORD</b> .....	<b>4</b>
<b>SAMMENFATNING</b> .....	<b>5</b>
<b>1. BAGGRUND</b> .....	<b>7</b>
<b>2. MARGINALE TEKNISKE CO2 EMISSIONER I ELSYSTEMET I PERIODEN FRA 2010-2029</b>	
<b>3. ØVRIG METODE OG FORUDSÆTNINGER</b> .....	<b>10</b>
<b>4. RESULTATER</b> .....	<b>13</b>
4.1    TEKNISKE CO2 EMISSIONER .....	13
4.2    VIND-VENLIGHED .....	14
4.3    SAMFUNDSØKONOMI .....	15
4.4    PRIVATØKONOMI.....	16
4.5    STATSFINANSER .....	16
4.6    SCENARIEANALYSE .....	17
<b>5. REFERENCER</b> .....	<b>19</b>

## Forord

Aalborg Universitet har gennemført en analyse, der forsøger at belyse de energi- og miljømæssige, privat- og samfundsøkonomiske, samt statsfinansielle konsekvenser ved at skifte fra individuel oliefyring til eldrevne varmepumper med og uden varmelager.

Med venlig hilsen



Morten Boje Blarke  
Adjunkt, Civilingeniør, Ph.D.  
Institut for Samfundsudvikling og Planlægning  
Fibigerstræde 13, DK-9220 Aalborg  
Tlf.: +45 9940 7213  
<http://people.plan.aau.dk/~blarke>

## Sammenfatning

Der er gennemført en præcist modeleret og realistisk vurdering af de økonomiske og miljømæssige konsekvenser ved at erstatte individuel oliefyring med eldrevne varmepumper med og uden varmelager. Modelberegningerne viser:

1. 16 % af årets timer i 2010 er teknisk CO<sub>2</sub>-neutrale, stigende til 26 % i 2013 og 2014, hvilket falder sammen med indvielsen af offshore vindmølleparken ved Anholdt, men falder tilbage til 12 % i 2022. Der er i planperioden mellem 1044 timer (i 2022) og 2276 timer (i 2014) der er teknisk CO<sub>2</sub> neutrale.
2. Selv med en varmepumpeløsning uden varmelager opnås en teknisk CO<sub>2</sub> reduktion på 42 %, mens der med integration af varmelager opnås en CO<sub>2</sub> reduktion på op til 50 %. Varmelagret betyder, at det i højere grad er muligt at udnytte perioder med lave elpriser, hvilket overvejende korresponderer med en lavere CO<sub>2</sub> udledning per kWh el. Dette resultat er markant forskelligt fra tidligere refererede vurderinger.
3. En varmepumpeløsning med varmelager er markant mere vindvenlig end en varmepumpeløsning uden varmelager. For en standardbolig vil der være en markant forbedring i vindvenlighed ved anvendelse af et varmelager på 500 L frem for 250 L, mens der ikke vil være markante fordele ved et varmelager større end 500 L. Vindvenligheds-koefficienten er i planperioden mellem 0,12 og 0,13 for en varmepumpe med 500 L varmelager, mens den er negativ mellem -0,08 og -0,09 for en varmepumpe uden varmelager.
4. Der opnås en årlig samfundsøkonomisk besparelse på mellem 5,500 og 5,750 DKK i nutidskroner ved at udskifte oliefyret med en eldrevne varmepumpe, svarende til en omkostningsreduktion på over 40 %, størst ved anvendelse af varmelager. Ved skift af 50,000 oliefyrs-installationer til en eldrevne varmepumpe med 500 L varmelager opnås en samlet årlig besparelse på 285 mio. DKK, svarende til en besparelse på 3,3 mia. DKK over planperioden.
5. Der opnås en årlig privatøkonomisk besparelse på mellem 3,600 og 3,850 DKK i nutidskroner ved at udskifte oliefyret med en eldrevne varmepumpe, svarende til en omkostningsreduktion på over 20 %, størst ved anvendelse af varmelager.
6. Der opstår et årligt statsfinanzielt netto-provenutab på omkring 3,000 DKK i nutidskroner ved at udskifte oliefyret med en eldrevne varmepumpe som følge af manglende indtægter fra mineralolieafgift, CO<sub>2</sub> afgift, svovlafgift, skrotningstilskud, og moms. Ved skift af 50,000 oliefyrs-installationer til en eldrevne varmepumpe med 500 L varmelager svarer dette til et samlet årligt provenutab på 150 mio. DKK, eller 1,7 mia. DK over planperioden.
7. 50,000 vindvenlige varmepumper vil kræve en ekstra effekt på 107 MW, hvilket er 70 % lavere end Energinet.dk's vurdering.



## 1. Baggrund

I løbet af 2010 har en række vurderinger skabt tvivl om, hvorvidt der er et økonomisk og miljømæssigt potentiale ved at skifte oliefyret ud med en eldreven varmepumpe.

I juni 2010 annoncerede Dansk Fjernvarme, at man havde udviklet et værktøj, der viser hvor meget CO<sub>2</sub>-udledning, der er ved at varme en bolig op. Beregningsmodellen er udarbejdet ud fra en antagelse om at et øget elforbrug foranlediger en øget udledning på 0,862 kg CO<sub>2</sub> per kWh med reference til Energistyrelsens forudsætningskatalog fra april 2010 (1). Dansk Fjernvarme konkluderer, at det fortrænger blot 0,1 tons CO<sub>2</sub> årligt at opvarme en standardbolig (18,000 kWh/år) med en varmepumpe sammenlignet med oliefyring, altså en reduktion på blot 1,7 % sammenlignet med oliefyring, der udleder 5,6 tons CO<sub>2</sub> per år (2)(3).

Dansk Energi og Energistyrelsen har efterfølgende sat spørgsmålstegn ved en sådan marginalbetragtning og argumenteret for at anvende en gennemsnitsbetragtning, for som det siges: ”Det vil i praksis være alt for kompliceret at beregne den præcise påvirkning af et ekstra elforbrug, der jo har konsekvenser helt ud i det samlede europæiske el- og CO<sub>2</sub>-kvotesystem. Vi vurderer, at CO<sub>2</sub>-udslippet fra gennemsnitsstrømmen giver et udmærket billede af den miljøpåvirkning, som varmepumpen giver.”

Hans Henrik Lindboe fra EA Energianalyse støtter dog metoden med at fokusere på marginal elproduktion og tilføjer, at EAs modelberegninger af elmarkedet viser, at den nordeuropæiske marginal-el består af cirka 80 % kul og 20 % naturgas i disse år.

Til diskussionen hører den betragtning, at forandringer i elforbruget per definition faktisk må siges at være CO<sub>2</sub> neutrale, da elproducenterne opererer indenfor det europæiske CO<sub>2</sub>-kvotesystem. Når det således lykkes at reducere det fossile brændselsforbrug i en sektor uden for kvote-systemet, hvortil individuel olieopvarmning hører, og lægge denne efterspørgsel ind under kvotesystemet, så kan forbruget principielt siges at være CO<sub>2</sub> neutralt. Eldrevne varmepumper og andet tilsvarende påtænkt elforbrug/besparelser er altså per definition CO<sub>2</sub>-neutrale.

Nedenstående analyse tager udgangspunkt i en væsentligt mere præcist modeleret marginalbetragtning end både Energistyrelsen og EA Energianalyse lægger op til. Det er analysens hypotese, at denne metode er udtryk for en realistisk vurdering af de økonomiske og miljømæssige konsekvenser ved at erstatte individuel oliefyring med eldrevene varmepumper. Analysen opererer med begrebet ”tekniske CO<sub>2</sub> emissioner” for at imødekomme præmissen om CO<sub>2</sub>-kvotesystemet. En reduktion i de tekniske CO<sub>2</sub> emissioner vil f.eks. kunne anvendes til at skrotte CO<sub>2</sub> kvoter.

## 2. Marginale tekniske CO<sub>2</sub> emissioner i elsystemet i perioden fra 2010-2029

Aalborg Universitet opererer i forbindelse med beregninger i den teknisk-økonomiske projektdesign- og vurderingsmodel COMPOSE (4) metodisk ud fra en antagelse om at spotmarkedsprisen i en given time afspejler hvilken marginal omkostning, markedet

understøtter. Det antages, at elproducenternes kortsigtede variable produktionsomkostninger repræsenterer den nedre grænseværdi for deres bud i spotmarkedet. Den dyreste af elproducenterne, der ved en given spotmarkedspris kan få dækket sine kortsigtede variable produktionsomkostninger, antages at være marginal elproducent. Metoden ser bort fra reguleringsmarkedet. Modellen kan siges at være en forenklet marginalomkostningsmodel for elsystemet.

Metodisk kan man diskutere om man bør anvende de kortsigtede marginalomkostninger eller de langsigtede marginalomkostninger som tærskelværdi. Det afgørende argument for at anvende de kortsigtede marginalomkostninger som tærskelværdi er, at det for de konkrete centrale elproducenter typisk gælder, at deres anlægsinvesteringer allerede er afskrevne. Mange producenter byder således reelt ind på spotmarkedet med de kortsigtede variable produktionsomkostninger som nedre smertegrænse, hvilket der også kan være langsigtede økonomiske grunde til at gøre, f.eks. producentens forventninger til de langsigtede konkurrencevilkår.

Det antages, at vindkraft repræsenterer elproduktionens nedre tærskel. Det vil sige, at når elprisen er lavere end den billigste af de kandiderende marginale elproduktionsteknologier, hvilket i planperioden i praksis er kulfyret elkondens, så antages vindkraft at være den marginale elproduktionsteknologi.

Man kan populært sige, at hvis spotmarkedsprisen altid ligger under de kortsigtede marginale produktionsomkostninger for kulfyret elkondens, så vil elsystemet både på kort og langt sigt alene understøtte vindkraft eller anden ikke-fossil elproduktion, f.eks. vandkraft og kernekraft.

COMPOSE's marginalomkostningsmodel opererer i denne konkrete analyse på basis af:

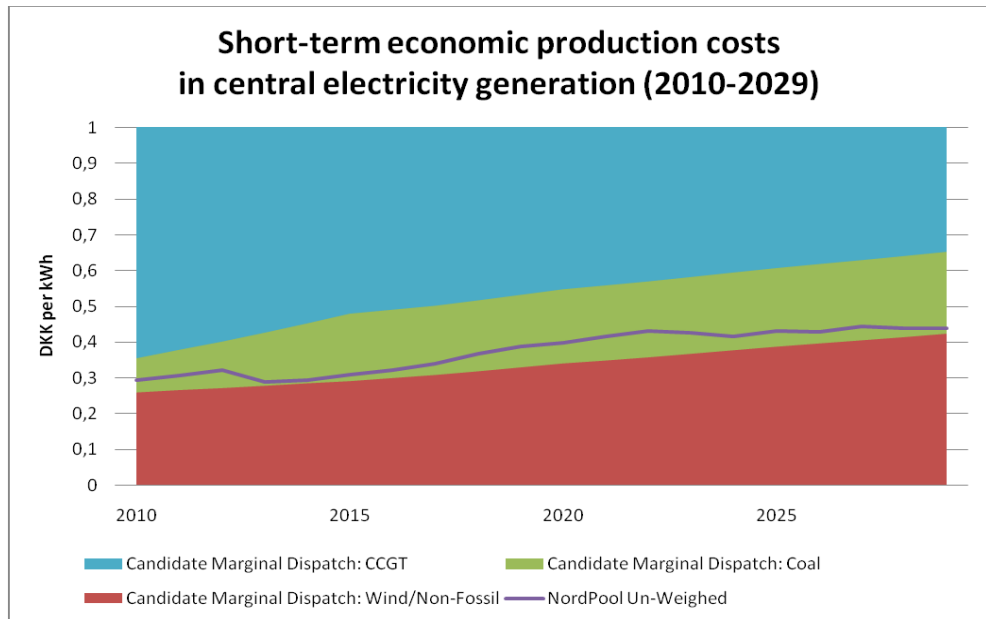
- Energistyrelsens fremskrivninger for fossile brændselspriser, Nordpools uvægtede spotmarkedspriser, samt CO<sub>2</sub> priser (1)
- Variable D&V omkostninger for de forskellige anlægstyper jf. teknologikataloget fra 2005 (5)
- Historisk 2009-profil for den vestdanske spotmarkedspris udsving time for time (6)

Skønt metoden og modellen kan håndtere et ubegrænset antal marginale elproducenter, antages der i denne analyse at være to marginale elproducenter, nemlig kulfyret kondenskraft (med Nordjyllandsværket som tilnærmet datareference) og gasfyret combined-cycle kondens (med Avedøreværket som tilnærmet datareference).

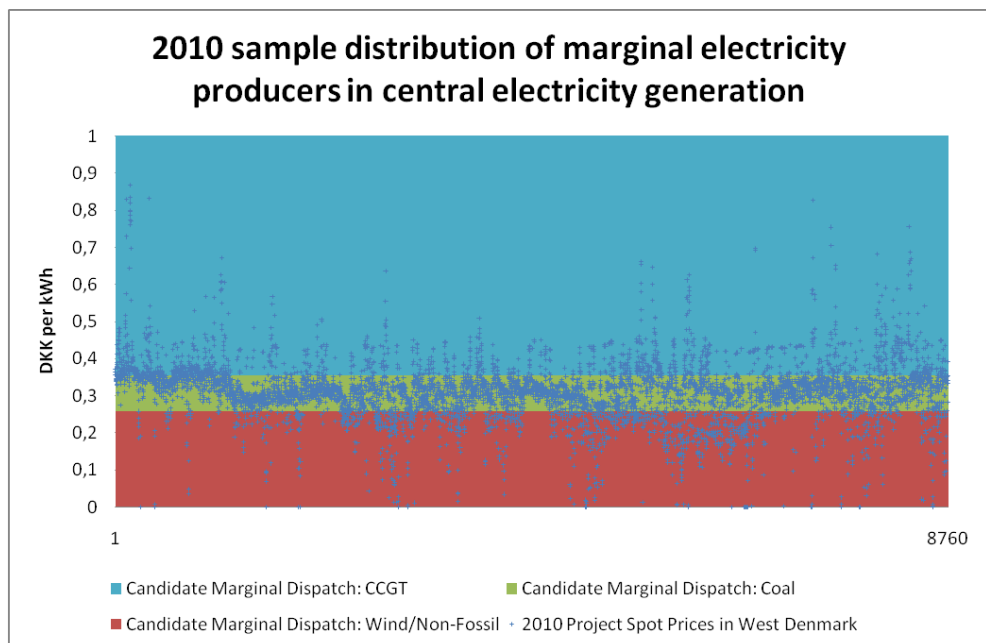
Figur 1 illustrerer modellens beregning af udviklingen i de kortsigtede marginalomkostninger. Når spotmarkedsprisen er i det røde område er det marginale elforbrug at være ikke-fossilt og CO<sub>2</sub> neutralt, i det grønne område er det marginale elforbrug kulfyret kondenskraft og i det blå område er det marginale elforbrug baseret på gasfyret kondenskraft.

Figur 2 viser hvordan spotmarkedspriserne i 2010 fordeler sig mellem de marginale produktionsteknologier.



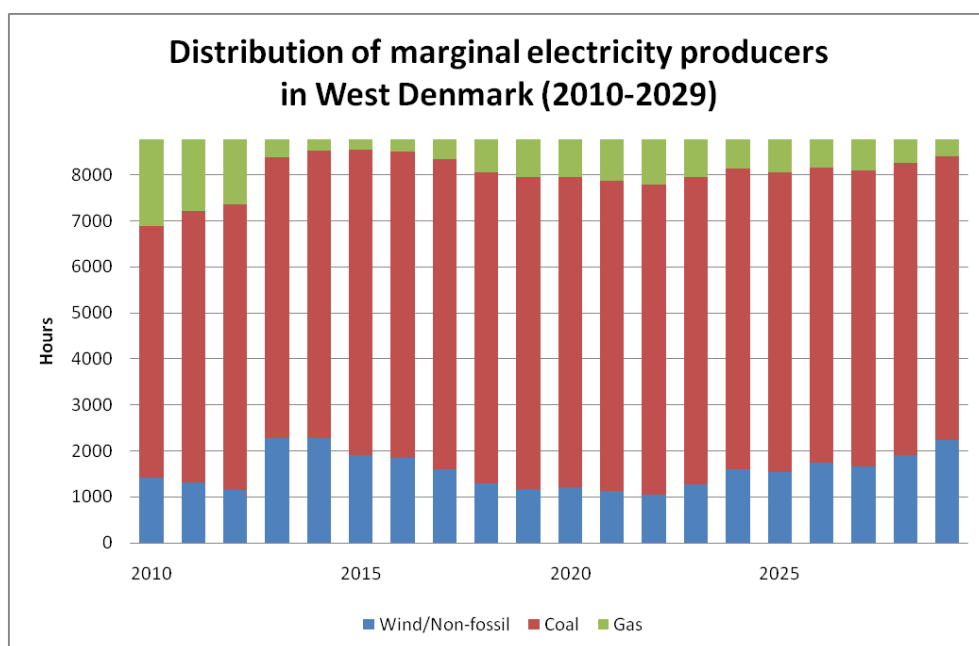


**Figur 1: Modelberegning af udviklingen i de kortsigtede marginale produktionsomkostninger.**



**Figur 2: Eksempel på fordelingen i 2010. Timer over 1 DKK per kWh og under 0 DKK per kWh er skåret fra i illustrationen.**

Fordelingsprincippet illustreret i Figur 2 gør sig gældende for hvert år i planperioden. Figur 3 illustrerer den resulterende udvikling i fordelingen af årets produktionstimer på disse marginale elproducenter. Det fremgår, at 16 % af årets timer i 2010 er teknisk CO<sub>2</sub>-neutrale, stigende til 26 % i 2013 og 2014, hvilket falder sammen med indvielsen af offshore vindmølleparken ved Anholdt, falder tilbage til 12 % i 2022. Modelberegningen viser, at der i planperioden mellem 1044 timer (i 2022) og 2276 timer (i 2014) opnås teknisk CO<sub>2</sub> neutral elanvendelse.



Figur 3: Modelberegning af udvikling i distributionen af produktionstimer på marginale elproducenter.

### 3. Øvrig metode og forudsætninger

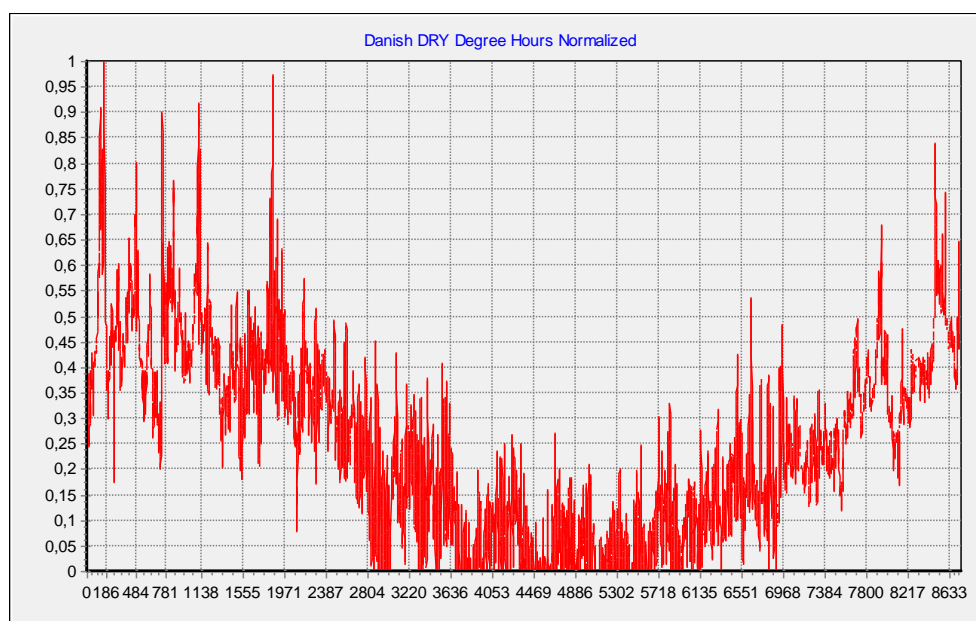
Der gennemføres en teknisk-økonomisk projektvurdering hvor referenceanlægget, fortsat drift af oliefyr, sammenlignes med en eldreven luft-vand kompressionsvarme med varmelager.

Analysen er gennemført ved brug af projektvurderingsværktøjet COMPOSE, der som udgangspunkt foretager en privatøkonomisk time-for-time optimering af anlæggets drift for hvert af årets døgn for hvert år i planperioden. At driftsoptimering begrænses til et døgn skyldes, at det antages, at varmelagret kan opereres uden varmetab indenfor et døgn.

Planperioden er 20 år. Alle år svarer tidsmæssigt og klimamæssigt til Danish Reference Year (DRY). Den samfundsøkonomiske diskonteringsrente er 6 %, mens den privatøkonomiske diskonteringsrente er 15 %. Alle beløb er i faste 2010 priser.

Udgangspunktet for analysen er varmebehovet i en dansk referencebolig med et samlet årligt nettovarmebehov på 18,000 MWh varme per år, hvor rumvarmebehovet er 14,000 MWh årligt, mens behovet for varmt brugsvand er 4,000 MWh.

Rumvarmebehovet er fordelt på grundlag af en kombination af graddage og timeværdier for udetemperaturen for Danish Reference Year (Figur 4), mens brugsvandsbehovet antages fordelt konstant på døgnets timer<sup>1</sup>.

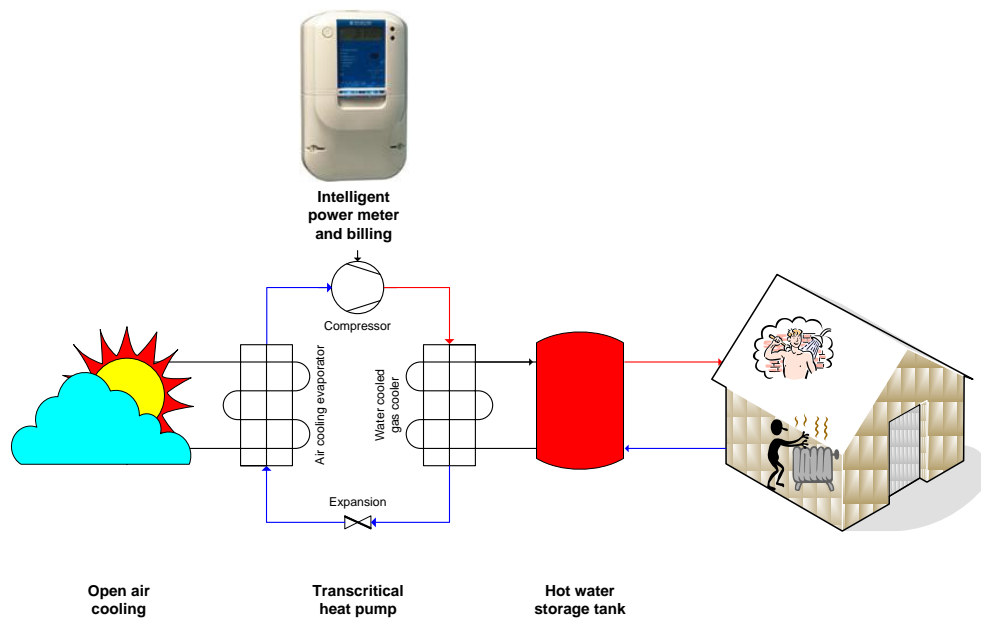


**Figur 4: Rumvarmebehovets fordeling for DRY. Normaliseret således at 1 repræsenterer årets højeste værdi.**

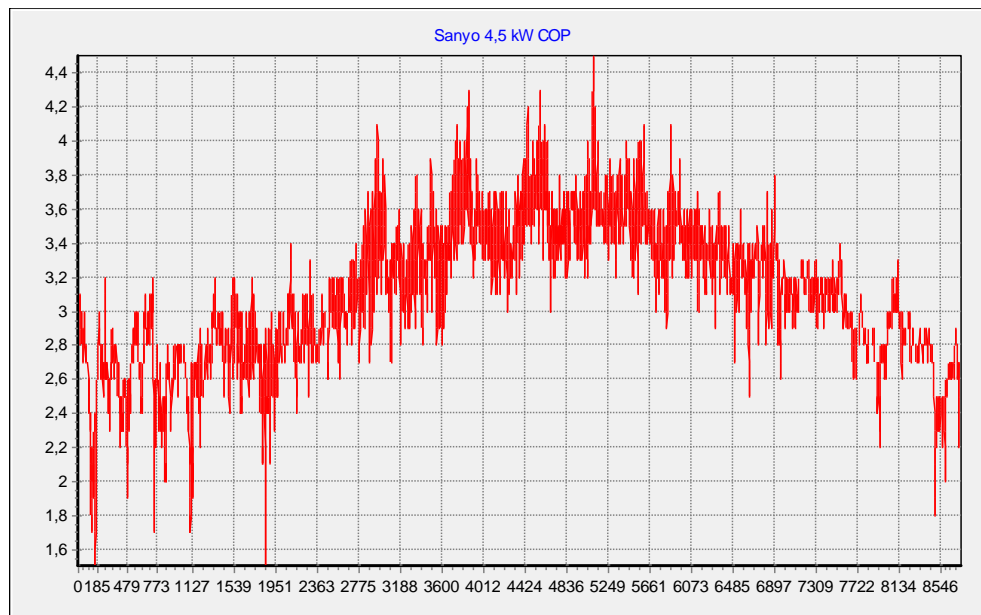
Varmepumpeanlægget består af en transkritisk 4,5 kW luft-til-vand varmepumpe med en 6 kW elpatron og et varmelager varierende fra 0 L til 1000 L (Figur 5). I modellen indgår en beregning af varmepumpens COP time for time, da denne er afhængig af udetemperaturen (Figur 6).

---

<sup>1</sup> I praksis er brugsvandsbehovet ikke konstant fordelt, men typisk markant højere i perioden fra kl. 6-9, samt i perioden fra kl. 15-19.



**Figur 5: Principskitse for varmepumpeanlægget. Elpatron i lagertank.**



**Figur 6: Varmepumpens COP time for time i DRY.**

Gasolieprisen for husholdninger i 2010 er sammensat af en samfundsøkonomisk omkostning inkl. transport og håndtering på 4,69 DKK per liter, samt en samfundsøkonomisk omkostning på 105 DKK per ton CO<sub>2</sub>. Disse omkostninger fremskrives i planperioden jf. Energistyrelsens prisfremskrivninger for hhv. gasolie og CO<sub>2</sub><sup>2</sup>. Dertil kommer i forhold til de privatøkonomiske omkostninger og statsfinansielle indtægter gældende mineralolieafgift, CO<sub>2</sub> afgift, samt svovlafgift.

Elprisen for husholdninger i 2010 er sammensat af en samfundsøkonomisk produktionsomkostning på 0,301 DKK per kWh, samt en samfundsøkonomisk transmissions- og distributionsomkostning (T&D) på 0,24 DKK per kWh. Produktionsomkostningen fremskrives i planperioden jf. Energistyrelsens prisfremskrivninger for det uvægtede Nordpool spotmarked, mens T&D omkostningen antages konstant. Dertil kommer i forhold til de privatøkonomiske omkostninger og statsfinansielle indtægter, med betydning for den faktiske driftsoptimering af varmepumpen, gældende elafgift, CO<sub>2</sub> afgift, samt distributionsafgift.

Den pågældende varmepumpe antages at kunne anskaffes og installeres for DKK 64,000 plus moms. Varmelagret antages at kunne anskaffes og installeres for DKK 3,000 plus moms uanset størrelse op til 1000 L. Der opnås et statstilskud på DKK 12,000 plus moms efter gældende skrotningsordning for oliefyr.

#### **Væsentlige forbehold**

Det antages, at der *ikke* er meromkostninger for husholdningen forbundet med at købe el på spotmarkedet, ligesom der *ikke* medregnes omkostninger for etablering af intelligent elmåler.

Det vurderes samtidig, at der på markedet for varmepumper aktuelt *ikke* eksisterer løsninger, der umiddelbart kan etableres med anvendelse af den simulerede optimerede driftsstrategi, om end teknologien rent videnskabeligt er velunderstøttet.

## **4. Resultater**

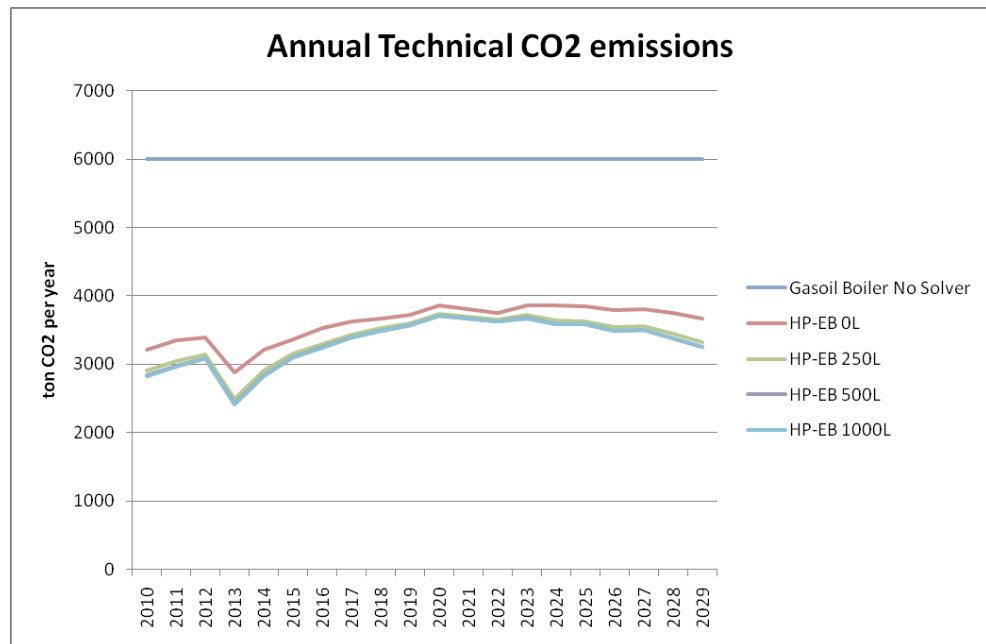
### **4.1 Tekniske CO<sub>2</sub> emissioner**

Modelberegningerne viser, at der selv med en varmepumpeløsning uden varmelager opnås en gennemsnitlig teknisk CO<sub>2</sub> reduktion i planperioden på 42 %, mens der med integration af varmelager opnås en CO<sub>2</sub> reduktion på op til 50 %. Varmelagret betyder, at det i højere grad er muligt at udnytte perioder med lave elpriser, hvilket overvejende korresponderer med en lavere CO<sub>2</sub> udledning per kWh el.

Figur 7 illustrer udviklingen i de årlige tekniske CO<sub>2</sub> emissioner.

---

<sup>2</sup> I princippet burde T&H omkostning antages konstant, og alene CIF prisen fremskrives, men det er mindre afgørende.



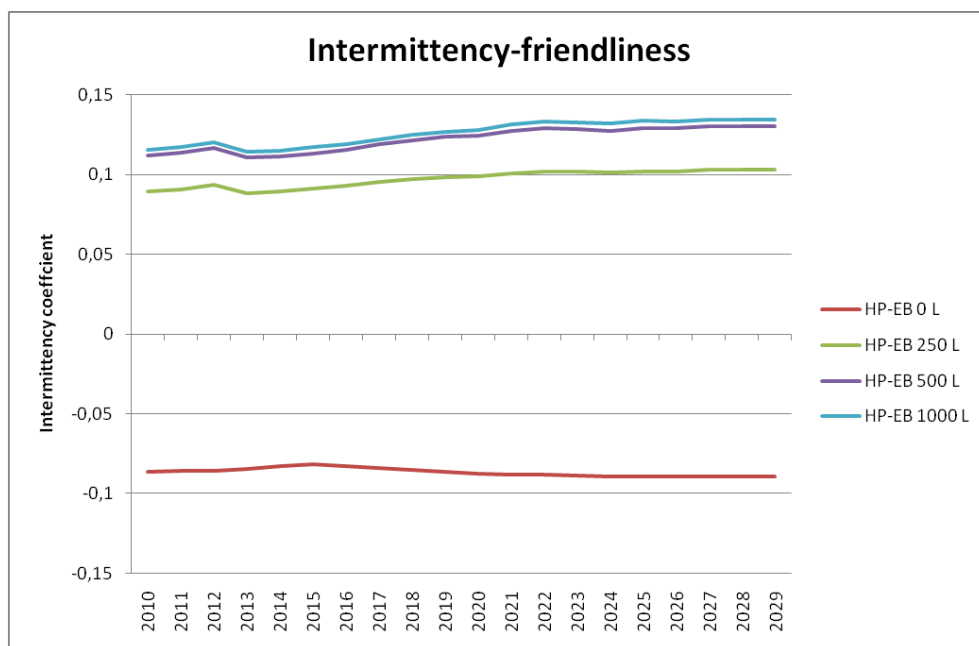
**Figur 7: Årlige tekniske CO2 emissioner.**

## 4.2 Vind-venlighed

Vindvenlighedskoefficienten udtrykker godheden af varmepumpens elforbrug i forhold til elsystemet nettobelastningsprofil (7). En anlægs vindvenlighed siger populært sagt noget om i hvilken grad anlægget understøtter integration af diskontinuerlig elproduktion. Et anlæg med en vindvenlighedskoefficient på 1,0 understøtter i sig selv 100 % vindkraft i elsystemet.

Modelberegningerne viser, at varmepumpeløsningerne med varmelager er markant mere vindvenlige end varmepumpeløsningen uden varmelager. Det fremgår også, at der for den konkrete løsning er en markant forbedring i vindvenlighed ved at anvende et varmelager på 500 L frem for 250 L, mens der ikke vil være nogen markant fordel ved at anvende varmelagre større end 500 L.

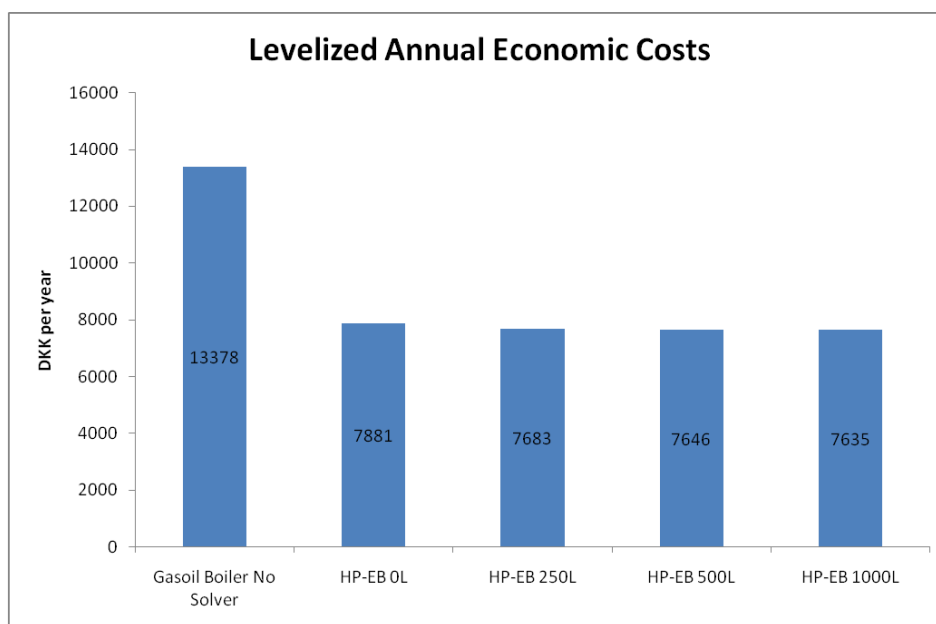
Figur 8 illustrerer den beregnede vind-venlighedskoefficient i planperioden. Referenceanlægget, oliefyring, indgår ikke, da vindvenlighedskoefficienten kun beregnes for elforbrugende og elproducerende anlæg.



Figur 8: Vind-venlighed (beregnet vindvenligheds-koefficient jf. (7)).

### 4.3 Samfundsøkonomi

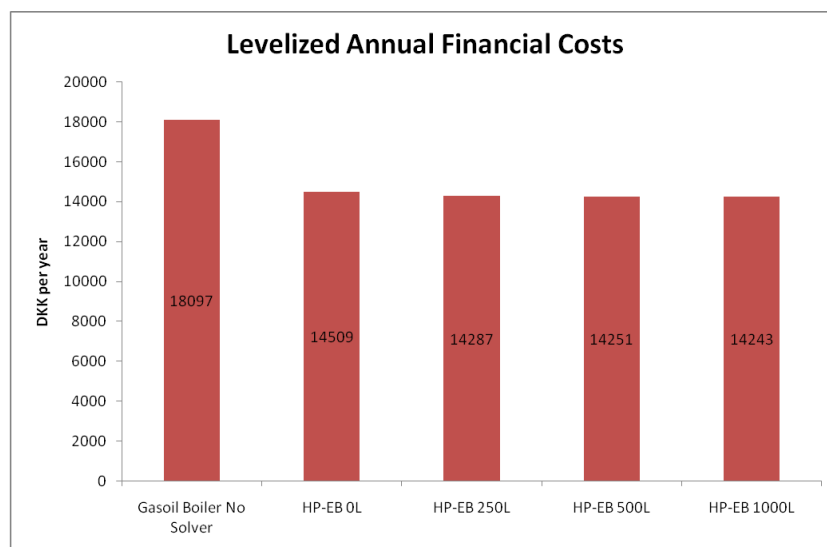
Modelberegningerne viser, at der opnås en årlig samfundsøkonomisk besparelse på mellem 5,500 og 5,750 DKK i nutidskroner ved at udskifte oliefyret med en eldrevne varmepumpe, svarende til en omkostningsreduktion på over 40 % (Figur 9). Besparelsen er størst ved anvendelse af varmelager.



Figur 9: Balancerede årlige samfundsøkonomiske omkostninger.

## 4.4 Privatøkonomi

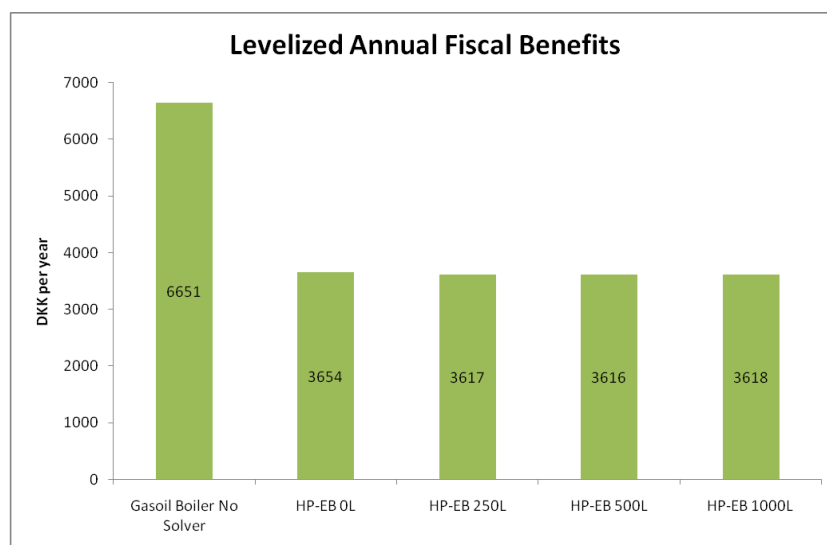
Modelberegningerne viser, at der opnås en privatøkonomisk besparelse på mellem 3,600 og 3,850 DKK i nutidskroner, svarende til en omkostningsreduktion på omkring 20 % (Figur 10). Besparelsen er størst ved anvendelse af varmelager.



Figur 10: Balancerede årlige privatøkonomiske omkostninger.

## 4.5 Statsfinanser

Modelberegningerne viser, at der opstår et årligt statsfinanzielt netto-provenutab på omkring 3,000 DKK i nutidskroner per installation (Figur 11) som følge af manglende indtægter fra mineralolieafgift, CO2 afgift, svovlafgift, skrotningstilskud, og moms.



Figur 11: Balancerede årlige statsfinansielle indtægter.



## 4.6 Scenarieanalyse

Der er afslutningsvist gennemført en vurdering af konsekvenserne ved udskiftning af 50,000 oliefyr med en vindvenlig eldreven varmepumpe med 500 L varmelager mht. samfundsøkonomi, statsfinanser, og kapacitetsbehovet i elproduktionen.

### *Samfundsøkonomiske konsekvenser*

Modelberegningerne viser, at der ved skift til en eldreven varmepumpe med 500 L varmelager opnås en årlig besparelse på 5,700 DKK per installation, svarende til en samlet årlig besparelse på 285 mio. DKK.

Set over planperioden beløber den samlede besparelse sig til 65,700 DKK per installation, svarende til en samlet besparelse på 3,3 mia. DKK.

### *Statsfinancielle konsekvenser*

Modelberegningerne viser, at skift til en eldreven varmepumpe med 500 L varmelager medfører et provenutab på 3,000 DKK per år, svarende til et samlet årligt provenutab på 150 mio. DKK.

Set over planperioden beløber det samlede provenutab sig til 34,800 DKK per installation, svarende til et samlet provenutab på 1,7 mia. DKK.

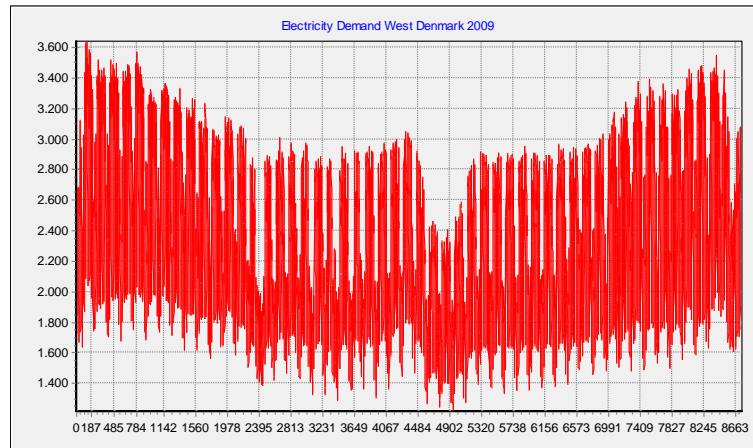
### *Effektbehov*

I artiklen ”Et væld af ’ustyrige’ varmepumper stiller krav om flere kraftværker” citeres Energinet.dk for at sige at ”Vi har tidligere beregnet, at omkring 50.000 nye varmepumper uden styring vil kræve en ekstra kraftværksblok på 350 MW, fordi varmepumperne kører i spidsbelastnings-perioderne” (8).

Det kan diskuteres om den nuværende teoretiske reservemargin på over 100 % bør foranledige etablering af ny elproduktionskapacitet på kort sigt, endsige på mellemlangt sigt. Man kan muligvis argumentere for, at 50,000 eldrevene varmepumper ikke vil kræve ny kraftværkskapacitet.

Men går man ind på Energinet.dk’s præmis, giver denne analyse under alle omstændigheder et andet resultat.

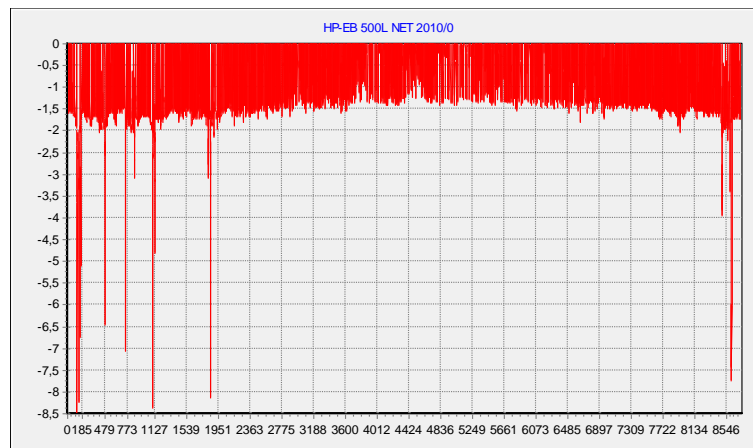
Figur 12 illustrerer nettoelforbruget i Vestdanmark time for time i 2009. Heraf fremgår, at årets højeste elforbrug indtraf den 6. januar mellem kl. 17 og kl. 18, hvor elforbruget var 3686 MWh/h.



**Figur 12: Nettoelforbrug i Vestdanmark i 2010.**

Figur 13 illustrerer det simulerede elforbrug time for time i 2010 for en varmepumpe med 500 L varmelager. Negative værdier er ensbetydende med forbrug. Årsagen til at forbruget i perioder når 8,5 kW skyldes, at det er muligt for varmepumpen og elpatronen at være i drift samtidig, når det ellers er omkostningseffektivt. Den 6. januar 2009 forbruger varmepumpen mellem 8,25 og 8,5 kWh/h i perioden fra kl. 3 til kl. 5, mens den i 5 timer på hver side af kl. 17 forbruger mellem 2,14 og 2,36 kWh/h. Varmepumpens markeds-intelligens afspejler sig altså netop på den måde, at varmepumpen producerer til lager i timerne op til dagens dyreste elpriser, hvilket korresponderer med dagens, og i dette tilfælde årets, højeste efterspørgsel. Konsekvensen er, at varmepumpen mellem kl. 17 og 18 'kun' forbruger 2,14 kWh/h.

Resultatet viser, at 50,000 vindvenlige varmepumper vil kræve en ekstra effekt på 107 MW, hvilket er 70 % lavere end Energinet.dk's vurdering.



**Figur 13: Varmepumpeanlæggets udveksling med elsystemet i 2010. Negative værdier er ensbetydende med forbrug. Årsagen til at forbruget periodisk er helt op til 8,5 kW skyldes, at varmepumpen og elpatronen vil være i drift samtidig, når det er omkostningseffektivt.**

## 5. Referencer

- (1) Danish Energy Authority. Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet. 2010.
- (2) Bredsdorff M.  
Nye beregninger: Varmepumper sviner lige så meget CO2 som oliefyr. Ing.dk 2010.
- (3) Dansk Fjernvarme.  
Beregning af miljøeffekt. 2010.
- (4) Blarke MB. COMPOSE. 2010.
- (5) Danish Energy Authority, Elkraft, Elsam. Technology Data for Electricity and Heat Generating Plants. 2005.
- (6) Energinet.dk. Markedsdata. 2010.
- (7) Blarke MB, Lund H. The effectiveness of storage and relocation options in renewable energy systems. Renewable Energy 2008 7;33(7):1499-1507.
- (8) Wittrup S.  
Et væld af "ustyrlige" varmepumper stiller krav om flere kraftværker. Ing.dk 2010.