

Intelligent varmepumpe til implementering i den private husstand



P1 PROJEKT
GRUPPE B221
INSTITUT FOR ENERGITEKNIK
AALBORG UNIVERSITET
DEN 15. DECEMBER 2008

Titel:

Intelligent varmepumpe til implementering i den private husstand

Synopsis:

Tema:

Virkelighed og modeller

Projektperiode:

P1, Efterårssemesteret 2008

Projektgruppe:

B221

Deltagere:

Christian Jeppesen

Claus Vad

Mathias Friis Junge

Rasmus Maarbjerg

Sonny Sune Mads C. T. Quillo

Vejledere:

Henrik Sørensen

Morten Boje Blarke

Oplagstal: 8

Sidetal: 72

Appendiksantal: 4

Bilagsantal: 5

Afsluttet den 15-12-2008

Det danske elnet har nået grænsen for hvor stor en mængde elektricitet, der kan leveres af vindmøller. For at øge fleksibiliteten må der foretage en gennemgribende ændring i hele det nuværende elsystems struktur. Denne rapport redegør for væsentlige områder af elsystemets nuværende sammensætning, den tekniske virkemåde af en varmepumpe og et casestudie af en specifik varmepumpeløsning til en privat husstand. Den udarbejdede løsningsmodel viser, at der privatøkonomisk kan være en besparelse ved at udskifte en ældre decentral varmekilde med en varmepumpe. Baseret på dette er der udarbejdet en vurdering af konsekvenserne ved at installere varmepumper med akkumuleringstank i et intelligent elsystem med differentierede elpriser. Denne viser, at varmepumpedriften ved implementering af et intelligent elsystem vil være dyrere for den private varmepumpeejer. Set fra en samfundsmæssig vinkel vil der dog være en stor gevinst, da ikke kun varmepumper kan udnytte det intelligente elsystems muligheder for at gøre elnettet langt mere fleksibelt.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med et P1 projekt på Aalborg Universitet, hvor temaet for projektet er virkelighed og modeller. Projektet er skrevet af studerende på Aalborg Universitet på 1. semester. Målgruppen er personer på tilsvarende akademiske niveau.

Kilder vil blive anvist løbende i rapporten vha. harvardmetoden, som henviser til kildelisten bagerst i rapporten. Efter litteraturlisten er de beregninger, som ligger til grund for rapporten, placeret i appendiks. Bagerst i rapporten er der vedlagt en CD, hvor appendiks, bilag og internetkilder er vedlagt. Figurer og tabeller er nummereret med to tal, hvor det første tal repræsenterer kapitelnummeret og det andet repræsenterer figurens placering i kapitlet. For eksempel „Figur 2.5.“

Christian Jeppesen

Claus Vad

Mathias Friis Junge

Rasmus Maarbjerg

Sonny Sune Mads C T Quillo

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	3
1.1	Motivation for projektet og initierende problem	3
1.1.1	Varmeinstallationer i Danmark	3
1.2	El-systemet i Danmark	4
1.2.1	Danske energistrømme	5
1.2.2	Opbygning af det danske elsystem	6
1.2.3	Prisdannelsen på elmarkedet	7
1.2.4	Vindmøller i Danmark	8
1.2.5	Forbrugsanalyse for Danmark	11
1.3	Sammenfatning	13
1.4	Problemformulering og -afgrænsning	14
Kapitel 2	Varmepumpen	15
2.1	Varmepumpens komponenter	15
2.1.1	Fordamperen	16
2.1.2	Kompressoren	16
2.1.3	Kondensatoren	17
2.1.4	Ekspansionsventilen	17
2.2	Varmepumpens kredsproces	17
2.2.1	Carnotprocessen	17
2.2.2	Isentrop	19
2.2.3	Isobar	19
2.2.4	Kredsproces	19
2.2.5	CO_2 som kølemiddel	20
2.3	Varmepumpeteknologier	21
2.3.1	Jord til vand	22
2.3.2	Luft til vand	22
2.3.3	Sol til vand	23
Kapitel 3	Implementering af varmepumpen i en privat husstand	25
3.1	Forbrugsanalyse for Skjernvej 184	25
3.2	Varmepumpesystemer	28
3.2.1	System 1	28
3.2.2	System 2	29
3.2.3	System 3	30
3.2.4	System 4	31
3.2.5	System 5	31

3.2.6	Udvælgelse	32
3.3	Driftsomkostninger ved fast elpris	33
3.4	Et intelligent varmepumpesystem	33
3.5	Konceptanalyse	35
Kapitel 4	Konceptvurdering	41
4.1	Forudsætninger for implementering	41
4.2	Konsekvens af implementering i samfundet	42
4.3	Aktøranalyse	43
Kapitel 5	Konklusion	45
Kapitel 6	Perspektivering	47
Litteratur		49
Appendiks- og bilagsoversigt		52
Appendiks A1		53
Appendiks A2		56
Appendiks A3		59
Appendiks B		61

"Det er regeringens vision, at Danmark på langt sigt helt skal frigøre sig fra fossile brændsler – kul, olie og naturgas. I stedet skal vi anvende vedvarende energi."

[Transport- og Energiministeriet, 2007]

Indledning 1

1.1 Motivation for projektet og initierende problem

Indenfor energiområdet i Danmark har regeringen, med energiplanen *Energi2000 fra 1990* og senest med *En visionær dansk energipolitik 2025*, satset på, at få indført så stor en mængde CO_2 neutral- og vedvarende energi som muligt. Der har derfor været stor interesse, bl.a. fra regeringens side, i at få opført mange vindmøller og på den måde få den danske energi gjort „grønnere“. Dansk energiproduktion er nu nået til et punkt i udviklingen, hvor der opstår nye problemer i forbindelse med at udbygge vindmøllekapaciteten. Når en stor del af landets energi kommer fra en så diskontinuerlig kilde som vinden, vil der opstå store udsving i udbuddet af elektricitet, et udsving som efterspørgslen langt fra altid kan matche. Dette sætter en naturlig grænse for, hvor mange vindmøller der kan sættes op med det danske elsystems nuværende indretning.

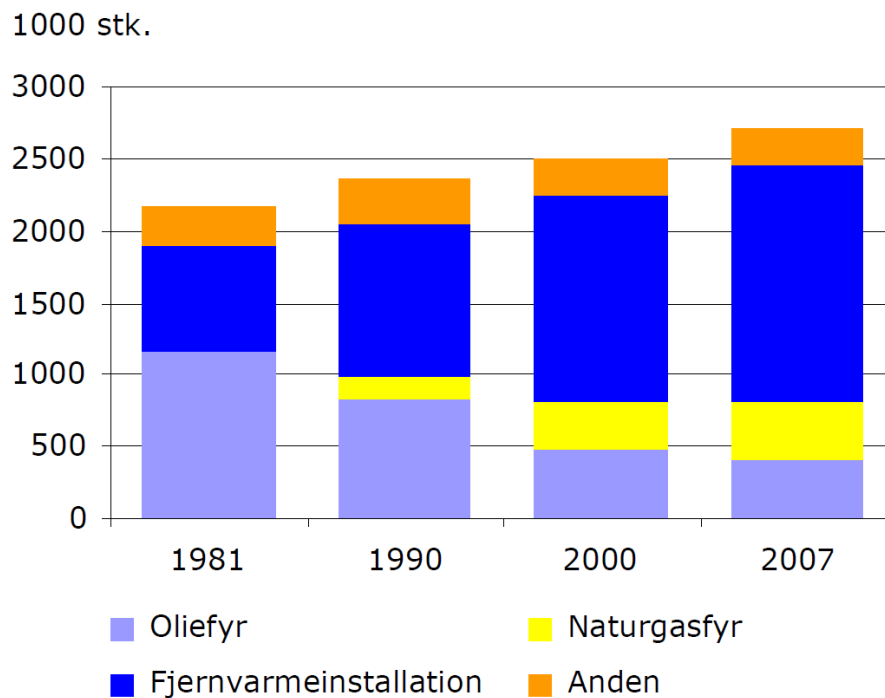
1.1.1 Varmeinstallationer i Danmark

Regeringen ønsker at iværksætte en kampagne, der skal fremme anvendelse af energieffektive varmepumper til erstatning af udtjente oliekedler.

[Transport- og Energiministeriet, 2007]

I 1980 stod oliefyr for over 50% af den energi, der blev brugt til boligopvarmning, selvom der på daværende tidspunkt var alternativer som fjernvarme og andre typer forbrændingsfyr. Siden da har fjernvarme udviklet sig til at være den primære form af boligopvarmning, primært på bekostning af oliefyrene. I dag er der ca. 2,7 millioner varmeinstallationer i Danmark, hvoraf 60,8% er fjernvarmeinstallationer, 15,2% er oliefyr, 14,7% er naturgasfyr og 9,3% er andre typer forbrændingsfyr samt elvarme. Figur 1.1 viser udviklingen af varmeinstallationer i danske hjem fra 1981 og til nu.

Varmeinstallationer i boliger



Figur 1.1. Udviklingen af opvarmningsinstallationer fra 1981 til 2007.[Energistyrelsen, 2008f, Side 33]

Trods fremgangen i fjernvarmeinstallationer ses det, at fossile brændsler stadig bruges til opvarmning i de individuelle husholdninger. Disse brændsler er ikke vedvarende og desuden er forbrugerne afhængige af priser og forsyningssikkerhed.

I Danmark dækker et fåtal af husholdninger sit varmeforbrug ved at benytte sig af en varmepumpe. Varmepumpen udnytter varmen fra den omkringliggende jord, luft eller vand til at opvarme huset. Den er elektrisk drevet og har en høj effektivitet, hvilket gør den .

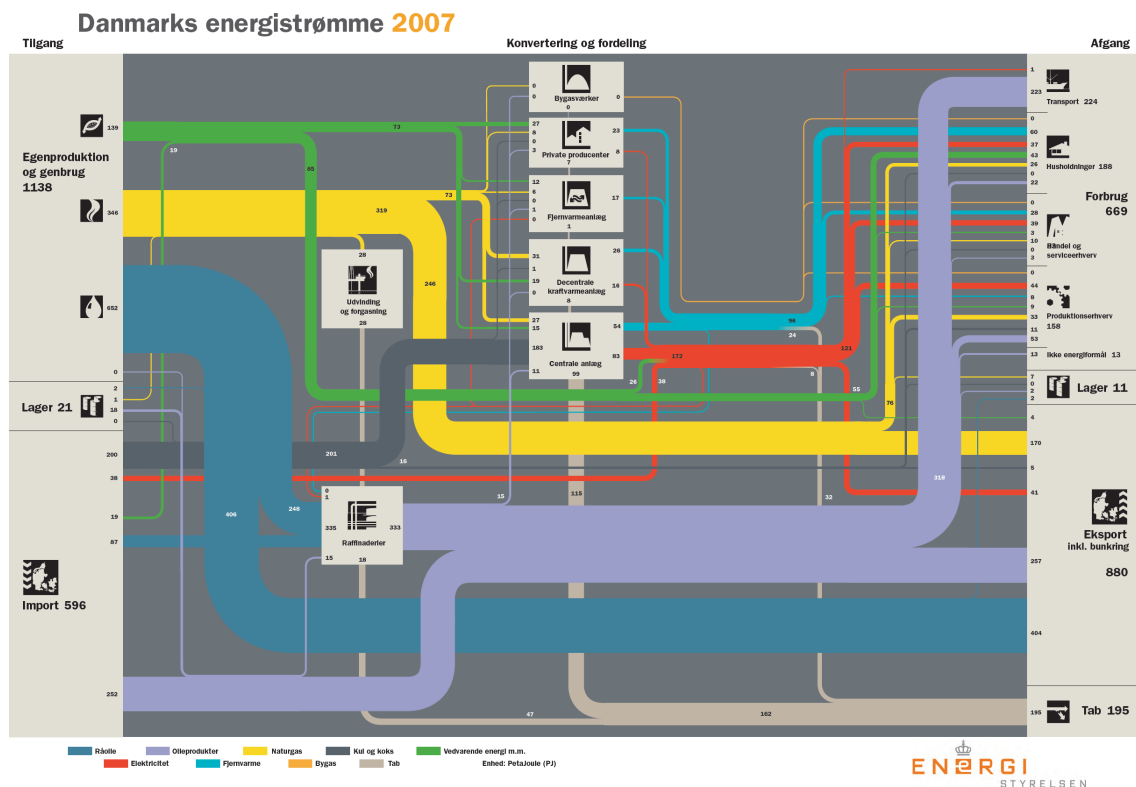
Om varmepumpen kan være løsning på de førnævnte, til tider problematiske store udsving i elproduktionen, er relevant at undersøge.

1.2 El-systemet i Danmark

I det følgende beskrives de overordnede energistrømninger i Danmark. Desuden undersøges kompositionen af det danske elnet. I den forbindelse er kraftvarmeværker interessante, da de står for den primære elektricitetsproduktion i landet. Vindmøller er også interessante da de repræsenterer den kilde til vedvarende energi, der bidrager med mest til det danske elnet i øjeblikket.

1.2.1 Danske energistrømme

Danmark har siden 1997 været selvforsynende med energi og eksporterer idag en del energi, primært som naturalier i form af råolie, raffineret olie og naturgas.[Energi og Olieorganisationerne, 2008] Den energi der går til den kollektive el- og varmeproduktion i Danmark kommer primært fra stenkul og naturgas, hvor stenkul fungerer som brændstof i de centrale kraftvarmeverker, der primært producerer elektricitet, og naturgas i de decentrale kraftvarmeverker, som primært producerer fjernvarme. Kullet importeres, da der ikke er nogen naturlig forekomst af det i Danmark. Danmark henter idag en større andel af elektriciteten fra anlæg, der udnytter vedvarende energi, primært i form af vindmøller og mindsker dermed afhængigheden af kulimport fra andre lande. Figur 1.2 giver et overblik over energistrømmene i Danmark, hvor ressourcer og import er på venstresiden, og forbrug samt eksport på højresiden. Figurens relevans i rapportens er, at få et overblik over mængden af olie der i øjeblikket går til husholdningerne.

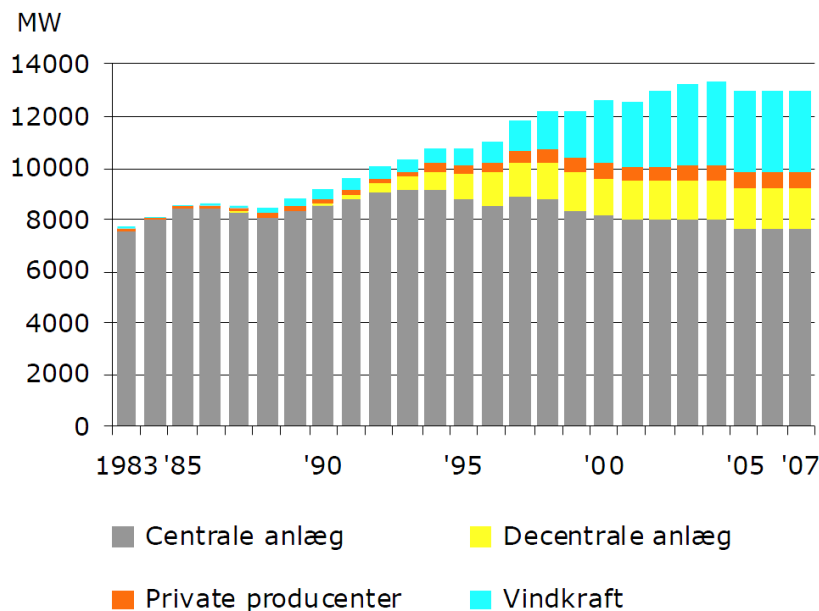


Figur 1.2. Figuren viser energistrømningerne i Danmark i 2007. På henholdsvis venstre og højre side ses import/udvinding og eksport/forbrug. Rapporten lægger fokus på at formindske de ca. 22 PJ olie, der gik til husholdningerne i 2007. [Energi styrelsen, 2008e]

1.2.2 Opbygning af det danske elsystem

Det danske elnet er ikke sammenhængende i hele Danmark, men opdelt i en vestlig og en østlig side ved storebælt. En elektrisk forbindelse mellem de to halvdele forventes etableret i 2010, men endnu er der ingen direkte elektrisk forbindelse, der tillader udveksling af el mellem de to sider. Strømmen til nettet bliver leveret af omkring 6.000 produktionsanlæg, som groft inddeles i 3 forskellige grupper. De centrale kraftvarmeværker, de decentrale kraftvarmeværker og vindmøller. Det skal dog indskydes at vindmøllerne udgør 5300 af de 6000 anlæg. Centrale anlæg er placeret ved de større byer, mens decentrale anlæg er placeret ved mellemstore og mindre byer. Vindmøllerne er placeret i mølleparker på havet og inde i landet, samt ved hustande som husstandsmøller rundt om i landet. Figur 1.3 viser fordelingen produktionsanlæggenes kapacitet.

Elkapacitet



Figur 1.3. Oversigt over elproduktionen fra 1983 til 2007 [Energistyrelsen, 2008f, Side 13]

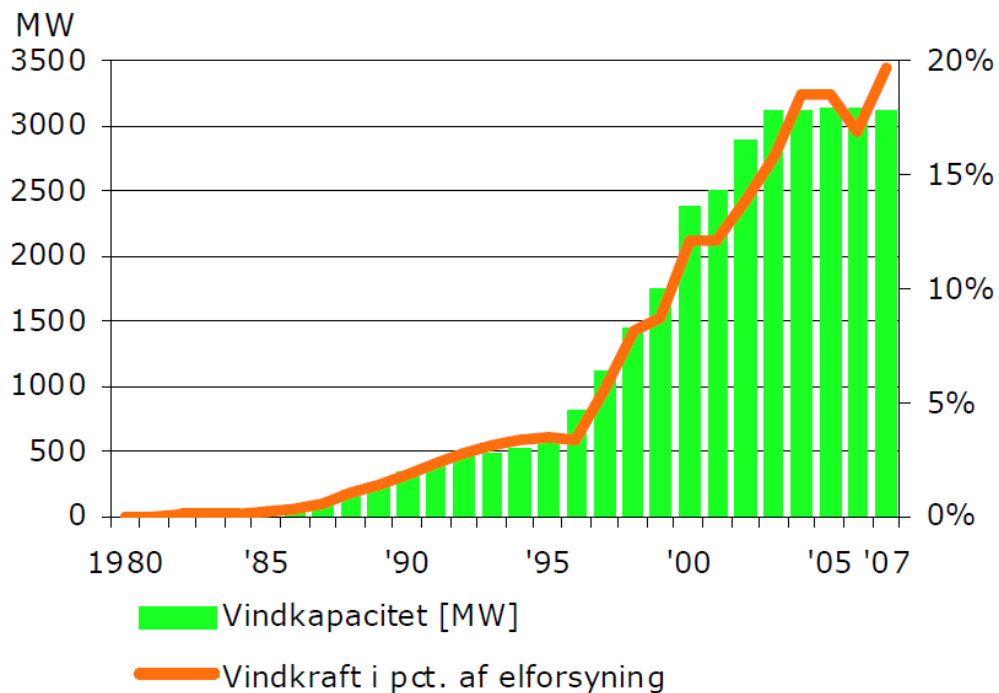
Den centrale produktion leveres fra i alt 16 store kraftvarmeværker, som hovedsagligt er baseret på fossile brændsler og kun i mindre omfang anvender biobrændsel. I 2007 havde de centrale kraftværker tilsammen en elproduktion på 89,5PJ, 54,1PJ som separat elproduktion. Dette svarer til ca. 66,8% af Danmarks samlede elproduktion i 2007. Den decentrale elproduktion leveres af ca. 660 værker der i højere grad anvender naturgas, biomasse og affald til at producere strøm og varme af. I 2007 producerede de decentrale anlæg 17PJ, svarende til 12,6% og vindmøllernes produktion i 2007 var 25PJ, svarende til 18,7% af produktionen. Det samlede nationale elforbrug var i 2007 124,3PJ.[Energistyrelsen, 2008c]

1.2.3 Prisdannelsen på elmarkedet

Når elproducenterne skal afsætte deres elektricitet foregår det på markedsvilkår. Salgsbud indsendes til de 2 elbørser; den nordiske Nord Pool og den tyske EEX. Disse modtager også købsbud fra forskellige el-aftagere. Der bliver dannet 24 individuelle markedspriser; en til hver time i det efterfølgende døgn. Disse individuelle priser kaldes spotprisen. Spotprisen varierer ofte meget og kan på tidspunkter komme tæt og endda ramme nul. Er der fx stort udbud af elektricitet i forhold til aftagere, bliver spotprisen i den pågældende time lav, og vice versa. Store producenter sørger typisk selv for at få afsat deres elektricitet på markedet, mens systemansvarlige virksomheder ofte køber elektricitet fra mindre producenter og hos Nord Pool. Almindelige danske forbrugere køber oftest el gennem et elhandelsselskab, der har en leveranceaftale med en producent, eller køber el på børserne. Liberaliseringen af elmarkedet i slutningen af 1990'erne medførte, at forbrugerne selv kan vælge elleverandør. Benyttes dette valg ikke, er man sikret elleverance fra det lokale elselskab.[Energistyrelsen, 2008a]

1.2.4 Vindmøller i Danmark

I 1887 lykkedes det at opstille en vindmølle, der kunne producere elektricitet og startskuddet til den moderne vindmølle var gået. Danmark er et af de lande, som har gjort størst indsats for at udbrede vindmøller i en verden, der primært henter sin energi fra fossile brændsler. Siden starten af 80'erne er opstillingen og udviklingen af vindmøller i Danmark gået hurtigt, og derfor kan Danmark i dag dække omkring 20% af sit elforbrug med vindmøllestrøm.

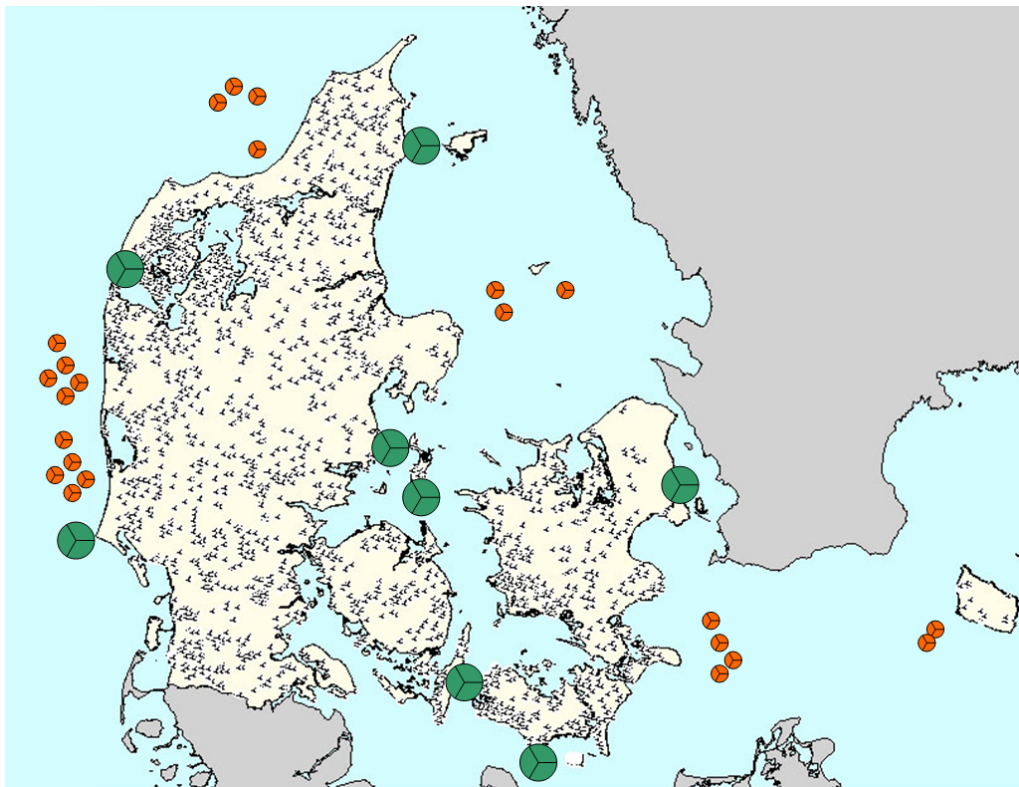


Figur 1.4. Figuren illustrerer udbygningen af vindmøllekapaciteten i Danmark, der har været stærkt stigende siden 1985. Ydermere ses andelen af vindmøllestrøm som en rød kurve der passer sammen med kapacitetsudbygningen. Afvigelserne skyldes primært vindforholdene i de enkelte år. [Energistyrelsen, 2008f, Side 9]

Vindmøllens succes i Danmark er ikke tilfældig. Siden mølleopsætningens start har lovmæssige forhold gjort det attraktivt at opsætte vindmøller, idet mølleejeren udover en grundbetaling pr. kWh også kunne høste et pristillæg for strøm produceret af vindmøller. Grundlaget for dette pristillæg ligger i refusion af miljøafgifter, idet vindmøllestrømmen ikke belaster miljøet nævneværdigt. I 1991 blev pristillægget ændret på grund af en kraftigt voksende miljøafgift, og i stedet blev vindmøllestrømmen afregnet med et fast tillæg på 10 øre/kWh som en kompensation for CO_2 -tillægget. Samtidig modtog mølleejeren også et tillæg, der skulle dække produktions- og etableringsudgifter, på 17 øre/kWh. I dag er afregningen af vindmøllestrøm ganske anderledes. Der ydes et fast tillæg på 25 øre/kWh ved de første 22.000 fuldlasttimer. Vindmøller opsat i perioden 1. januar 2005 til 31.

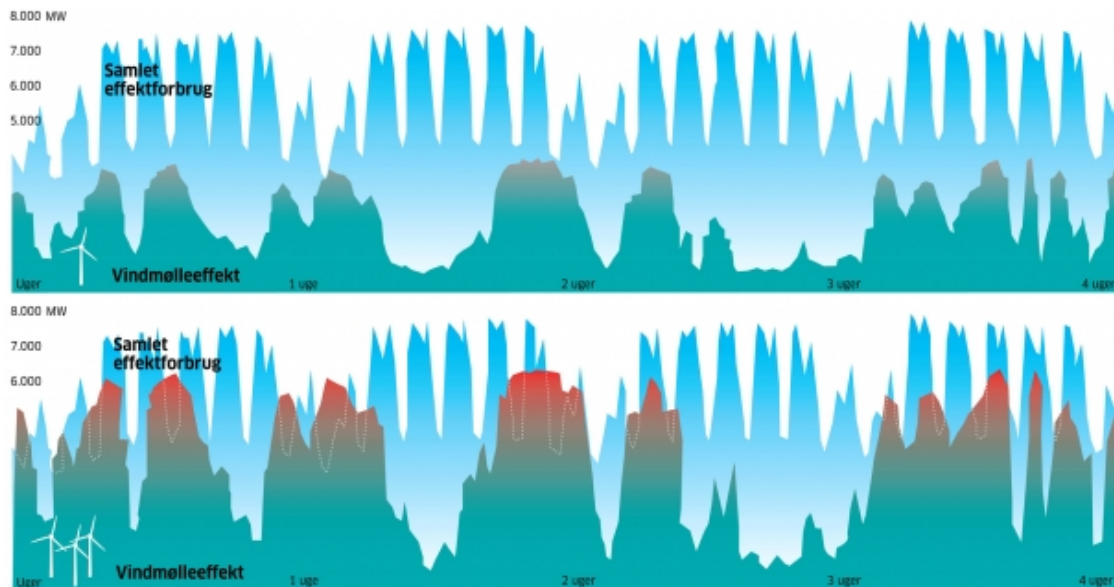
december 2009 bliver med et skrotningsbevis tildelt et tillæg på 8 øre/kWh. Yderligere tildeles alle vindmøller en godtgørelse på 2,3 øre/kWh til balanceringsomkostninger ved salg på elmarkedet. [Vindmølleforening, 2008]

De seneste år er udbygningen af vindkapaciteten stagneret og opstilling af nye vindmøller er forbundet med flere problemer. Det er ikke nok blot at finde et vindrigt område, men der skal også tages hensyn til lokalplaner og naboer. Vindmøller er ikke blot en gene af æstetiske grunde, men også med hensyn til støj og derfor virker det logisk at placere møllerne på havet, hvor støjen ikke er til gene og vindenergien som oftest er højere end på land. Derfor er der i Danmark opført 8 havvindmølleparker med en samlet kapacitet på 423 MW eller hvad der svarer til godt 14% af Danmarks totale vindmøllekapacitet. To nye havvindmølleparker er på vej ved Horns rev og Rødsand. De forventes at stå færdige i hhv. 2009 og 2010. Med disse to havvindmølleparker, der hver har en kapacitet på omkring 200 MW, bliver den samlede havvindmølleproduktion næsten fordoblet. [Energistyrelsen, 2008f, Side 13]



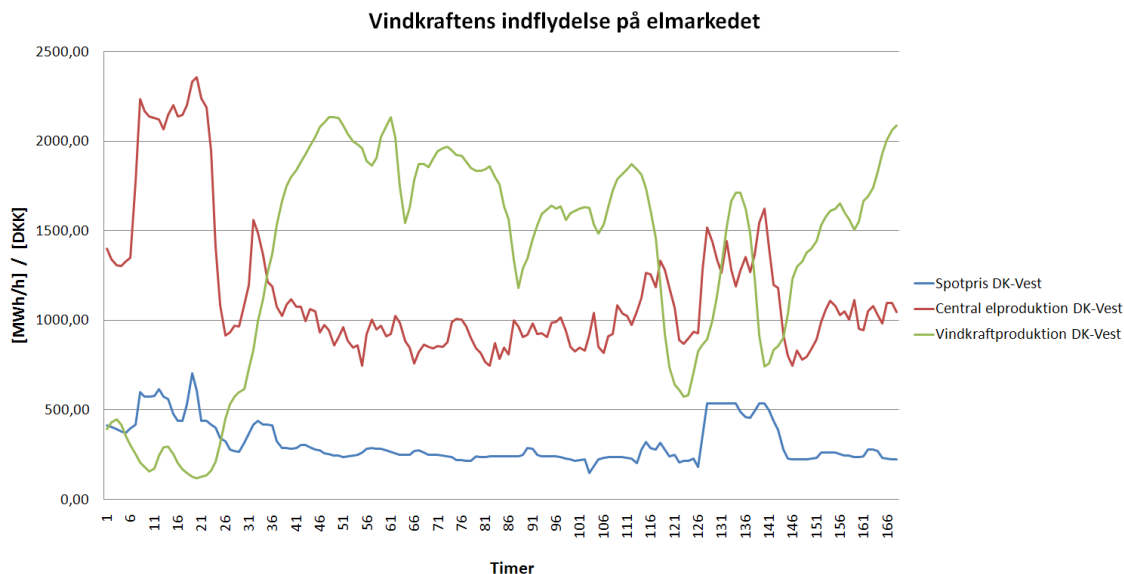
Figur 1.5. Placeringer af havvindmølleparker i Danmark. [Bivejleder, 2008]

I løbet af de sidste 14 år er vindmøllernes samlede kapacitet næsten femdoblet. I dag har de godt 5.400 møller sammenlagt en kapacitet på 3124 MW eller hvad der svarer til ca. 24 % af Danmarks samlede elkapacitet. [Energistyrelsen, 2008d]. I følge Energistrategi 2025 [Wittrup, 2008b] skal Danmarks vindkapacitet udbygges med 3500MW til år 2025, og denne fordobling vil kræve et langt mere fleksibelt forbrug, end der er i Danmark i dag.



Figur 1.6. Figuren illustrerer det nuværende og fremtidige forhold mellem elforbrug og vindkraft. Øverste billede viser tilstanden i dag, mens nederste billede viser tilstanden i 2025, hvis der opføres flere vindmøller, men fleksibiliteten af forbruget ikke ændres.[Wittrup, 2008b]

Denne store forøgelse af vindmøller vil resultere i hyppigere situationer med eloverløb, hvor Danmark vil blive tvunget til at eksportere, indimellem gratis, elektricitet til Tyskland, Norge eller Sverige. På figur 1.6 ses det som de steder, hvor vindmølleeffekten overstiger forbruget. Realiseringen af energistrategi 2025 vil altså kræve et system, som er i stand til at håndtere den elektricitet, som til tider vil blive til overs, uafhængigt af tidspunktet på dagen.

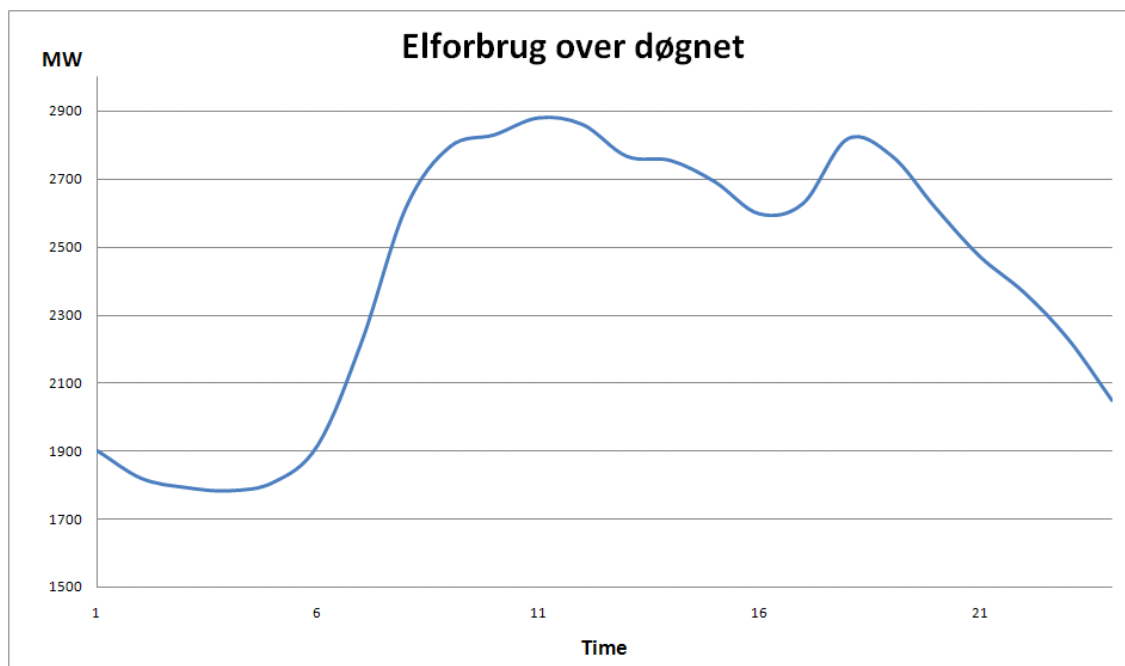


Figur 1.7. Sammenhængen mellem vindproduktion, central elproduktion og el-spotpris i DK-vest over en uge i februar 2008. Det ses, at når vindkraftproduktionen går op, falder spotprisen. [Bilag 2(Udsnit over markedspriser) - Energinet.dk]

Der er, statistisk set, en direkte sammenhæng mellem vindkraftproduktionen og spotprisen på elmarkedet. Hvis vindmøllerne producerer meget elektricitet er spotprisen generelt set lav og omvendt som det ses på figur 1.7. Den diskontinuerlige vindproduktion gør, at de centrale kraftvarmeværker må tilpasse produktionen af el, så den samlede produktion svarer til det øjeblikkelige forbrug.

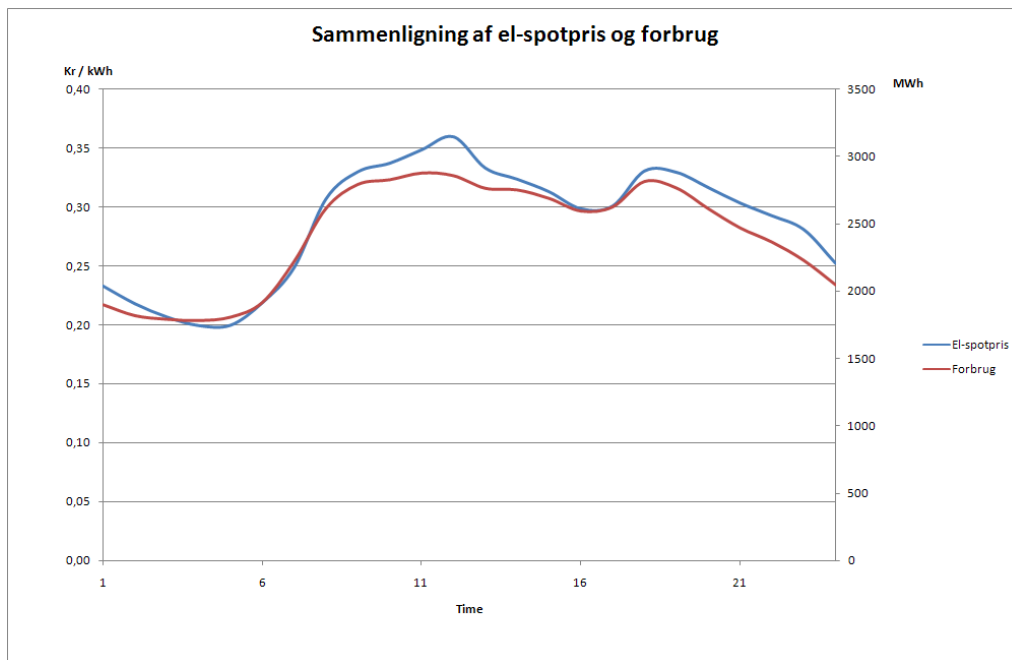
1.2.5 Forbrugsanalyse for Danmark

Det samlede danske elforbrug blev i 2007 opgjort til 124 PJ, hvilket var ca. 1 PJ mindre end året før, og brød dermed den stigende tendens, der har præget det danske elforbrug de seneste knap 30 år Energistyrelsen [2008f]. Elforbruget i Danmark er naturligt nok ikke konstant døgnet rundt. Selvom mange af produktionsanlæggene kører døgndrift i den energitunge industri, er de personbetjente elektriske apparater, som bruges i dagtimer, med til at skabe et øget elforbrug fra morgen til aften. Timerne med størst forbrug ligger lige før middag og omkring klokken 18. Minimumsforbruget ligger i gennemsnit klokken 4 om natten og heraf opleves det, at elforbruget, gennemsnitligt over et år, falder med 38% om natten i forhold til maksimal forbruget om dagen. Dette er illustreret på Figur 1.8



Figur 1.8. Svingninger i forbruget af elektricitet over et døgn.

Som alt andet der handles på et marked, bliver elprisen bestemt af to parametre; udbuddet og efterspørgslen. En højere efterspørgsel bevirker som sagt en højere pris, mens et stort udbud presser prisen ned. Da elektricitet generelt ikke lagres i større mængder, må der til enhver tid sørges for at udbud og efterspørgsel harmonerer, og derfor reguleres en af de to parametre. Da Energinet.dk er ansvarlig for elsystemets forsyningssikkerhed, må det være efterspørgslen der dikterer udbuddet og ikke omvendt. I dagens Danmark er det forholdsvis let at regulere produktionen af strøm, idet der er stor strømkapacitet hos de centrale kraftværker. En øget efterspørgsel på el, betyder blot at kraftværkerne må skrue op for kedlerne og dermed indfri den øgede efterspørgsel. I så fald kunne det være nærliggende at tro, at en øget efterspørgsel på el ikke ville have nogen indflydelse på elprisen, men mange gange vil det være nødvendigt at starte mindre effektive, eller andre former for kraftværker op for at imødekomme efterspørgslen. Disse kraftværker kan ikke producere el til samme pris, som de effektive kulkraftværker og derfor vil en øget efterspørgsel i reglen bevirke en øget el-spotpris. Den generelle sammenhæng mellem el-spotprisen og forbruget for de seneste 6 år kan ses på Figur 1.9



Figur 1.9. Figuren viser en gennemsnitlig døgnkurve for forbruget og el-spotprisen på basis af data fra de seneste 6 år.

Sammenhængen mellem forbruget og prisen er ikke til at tage fejl af. Det lave elforbrug om natten resulterer i, at el-spotprisen som regel vil finde sit minimum her.

1.3 Sammenfatning

Teknologisk er der ingen hindring i at opsætte flere vindmøller og derved basere en endnu større del af Danmarks energiproduktion på vedvarende energi. Problemet er at få forbruget til at matche produktionen. Flere vindmøller betyder, at en større del af elproduktionen foregår diskontinuerligt, hvorfor et mere fleksibelt elnet vil være nødvendigt. Såfremt et individuelt elbaseret varmesystem med differentieret drift, vil kunne tilpasses således, at der er bedre sammenspil mellem elproduktionen fra vindmøller og varmesystemsdriften, vil det udover at give et mere fleksibelt forbrug af den vedvarende energi også resultere i en lavere el-pris. Forudsat at det er muligt at konstruere et individuelt el-baseret varmelager og -system vil en differentieret drift være mulig, og det vil være lettere at integrere vindmøller i elsystemet. Det vil derfor være interessant at undersøge om udsvingene i el-spotprisen er store nok til, at der er en gevinst at hente for den private forbruger og for samfundet i at etablere sådan et system i hustande, der ellers benytter forbrændingsfyr.

1.4 Problemformulering og -afgrænsning

- Er det privatøkonomisk rentabelt at udskifte et konventionelt opvarmningssystem med en varmepumpe?
- Vil en differentieret elpris og et intelligent elsystem skabe et grundlag for besparelser hos den private forbruger og dermed udgøre et bedre fundament for den planlagte udbygelse af vindkapaciteten?

Der tages udgangspunkt i en implementering af varmepumpeanlæg som erstatning for et konventionelt opvarmningssystem; helt specifikt et kombifyr på en lille landejendom i nærheden af Holstebro. Varmebehovet vil blive beregnet ud fra ejendommens nuværende koksforbrug, og der tages derfor ikke højde for u-værdi, areal, vinduer osv. Der opstilles 5 systemer, hvis anvendelighed hver især vurderes i forhold til det fundne forbrug. Dernæst laves en økonomisk vurdering af et udvalgt varmepumpesystem med den faste el-pris som husstanden i øjeblikket betaler.

Herudover opbygges der, gennem et afsæt i en analyse af de foregående års el-priser, en model, som beskriver udgifterne i forbindelse med implementering af varmepumpen i et individuelt system, hvor el-priserne er differentierede. Der udarbejdes en generel model, hvor størrelsen på varmepumpe og akkumuleringstank, prisen på disse og udgifterne til el, fremkommer som resultat af et vilkårligt valgt forbrug. Modellen vil tage sit udgangspunkt i forbruget hos den udvalgte husholdning.

Mulighederne i at differentiere driften af et varmepumpesystem og dermed udnytte de svingende el-spotpriser kommenteres, og konceptet med varmepumpen i individuelle husholdninger vil, med afsæt i modellen og en analyse af denne, blive vurderet mht. mulighederne i og for implementeringen af det intelligente system på samfundsbasis.

Der tages i denne rapport kun udgangspunkt i energinettet i DK-vest.

Varmepumpen 2

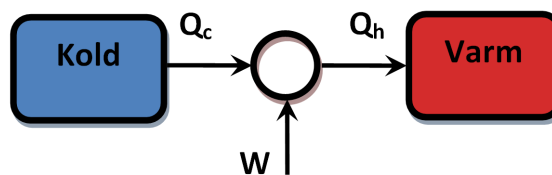
2.1 Varmepumpens komponenter

Princippet bag varmepumpen er, at varmeenergien flyttes fra et koldt område til et varmt. Dette princip strider dog mod termodynamikkens 2. hovedsætning, som Rudolf Clausius udtrykte den:

„Det er umuligt at konstruere en maskine der udfører en cyklus, hvis eneste vedvarende virkning er at overføre varmeenergi fra et objekt til et andet objekt ved en højere temperatur uden et input i form af arbejde.“

[John W. Jewett og Serway, 2008, Side 615]

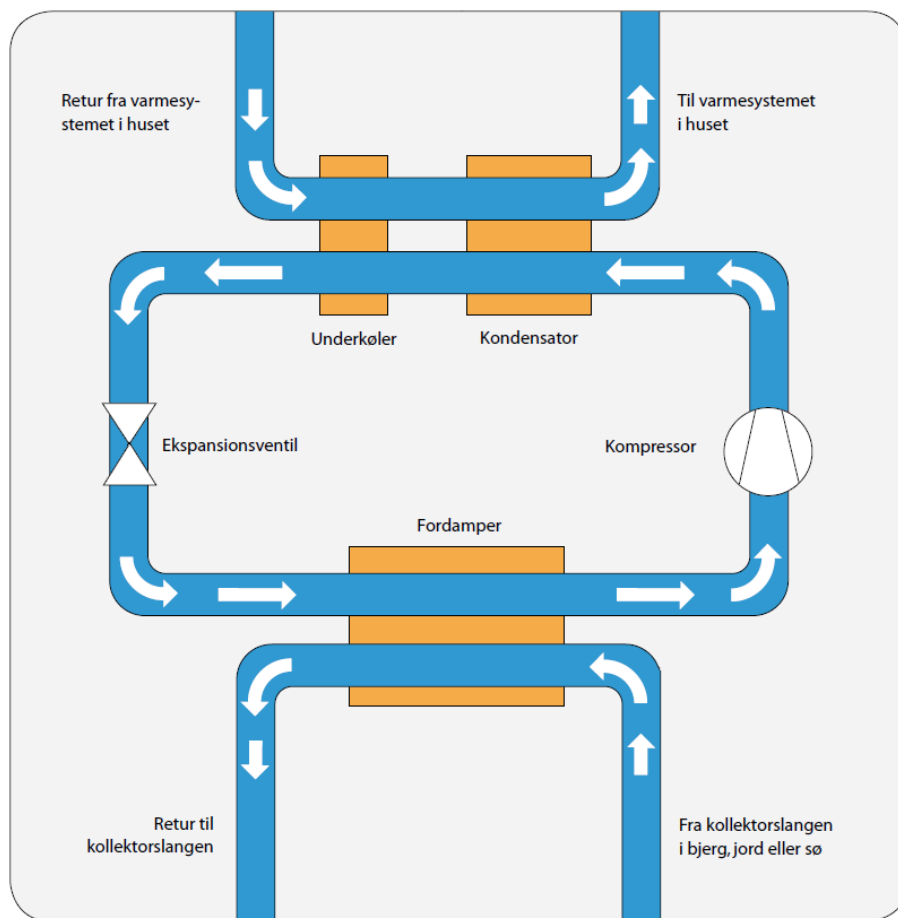
Men ved at tilføre arbejde ved hjælp af en kompressor, er det muligt at transportere varmeenergi fra et koldt område til et område med højere temperatur:



Figur 2.1. Viser hvordan det tilførte arbejde flytter energi fra et koldt område

- W er det tilførte arbejde udefra.
- Q_c er varmeenergi, der bliver flyttet fra det kolde område.
- Q_h er varmeenergi, der tilføres det varme område.

Som det kan ses på figur 2.2 er der fire stadier i en varmepumpes kredsløb: Fordamperen, ekspansionsventilen, kondensatoren og kompressoren. Alle stadier er koblet sammen i en lukket cirkel, hvor et kølemiddel cirkulerer.



Figur 2.2. Varmepumpens kredsløb. [Danfoss, 2008]

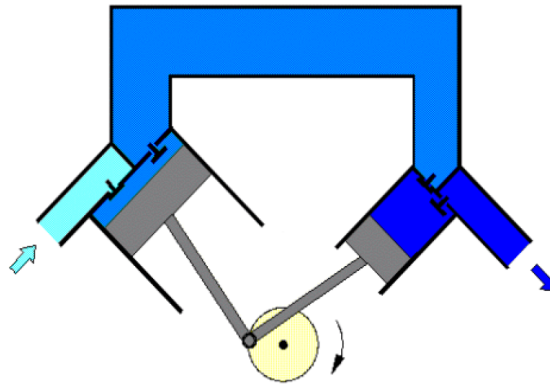
2.1.1 Fordamperen

I fordamperen tilføres varmeenergien fra omgivelserne, som varmeveksles med kølemidlet, der har en lavere temperatur end omgivelserne. Ved indløbet til fordamperen har kølemidlet en lav temperatur, men efterhånden som energien fra omgivelserne bliver tilført kølemidlet, fordamper dette til en gas, som herefter føres videre til kompressoren.

2.1.2 Kompressoren

Kompressorens opgave er at komprimere kølemidlet på lavtrykssiden, efter dets overgang fra væske til gas i fordamperen. Når kølemidlet kommer ind i kompressoren ved en forholdsvis lav temperatur og tryk, komprimeres gassen trin for trin og kommer derefter ud med et højere tryk og temperatur på højtrykssiden. For at kompressoren kan udføre dette arbejde, tilføres den mekaniske energi ved hjælp af fx en elmotor [Åge Birckjær Lauritsen,

2007, Side 125]. Figur 2.3 illustrerer hvordan gassen først suges ind i kompressoren og derefter komprimeres.



Figur 2.3. Opbygningen af en 2 trins stempel-kompressor.[EMU, 2008, side 78]

2.1.3 Kondensatoren

I kondensatoren afgiver kølemidlet sin varmeenergi til vandet, der senere skal opvarme huset. Dette er muligt, fordi der er en temperaturforskel mellem vandet i varmesystemet og kølemidlet i varmepumpen, som vil lave en varmeveksling. Denne gang er det dog vandet, der opsamler varmeenergien fra kølevæsken.

2.1.4 Ekspansionsventilen

Efter kondensatoren føres kølevæsken igennem ekspansionsventilen, som mindsker trykket og temperaturen i kølevæsken. Den er derfor med til at adskille høj- og lavtrykssiderne fra hinanden, men sikrer også at temperaturen i kølemidlet bliver lav nok til, at den kan fortættes igen, så det igen er muligt at opsamle varmeenergi i fordampere.

2.2 Varmepumpens kredsproces

2.2.1 Carnotprocessen

Den franske ingeniør Sadi Carnot fra 1824, beskrev en maskine, siden kendt som Carnotmaskinen, der fungerede ved at gennemløbe en idealiseret reversibel kredsproces. Den reversible egenskab betyder, at der ikke går energi tabt på noget tidspunkt i cyklussen. Ideelt set ville den tilførte mængde mekanisk arbejde og den flyttede varmeenergi udgøre den tilførte varmeenergi:

$$Q_h = Q_c + W \quad (2.1)$$

Dette kan ikke lade sig gøre, som det fremgår af Kelvin-Plancks formulering af termodynamikkens 2. hovedsætning:

„Det er umuligt at konstruere en varmemotor, der ved en cyklus ikke udfører andet end at omsætte en mængde varmeenergi til den tilsvarende mængde mekanisk arbejde.“

[John W. Jewett og Serway, 2008, Side 614]

Dette fører til at, hvis den højst mulige teoretiske virkningsgrad af en carnotmaskine udregnes, så vil alle andre reelle maskiner, der virker på samme måde have en ringere virkningsgrad, da der altid vil være et energitab i bl.a. kompressoren, som vil påvirke varmepumpens ydelse. Alt efter hvordan man ønsker at anvende sin varmepumpe, er der to forskellige typer af virkningsgrader. Den første benyttes, når temperaturforskellen imellem to energireservoirs udnyttes til at få udført et arbejde. Denne virkningsgrad kan findes med formelen [John W. Jewett og Serway, 2008, Side 618-620]:

$$\eta = \frac{W_{eng}}{|Q_h|} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad (2.2)$$

Denne type virkningsgrad er for en carnot maskine:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (2.3)$$

Den anden type kaldes COP, der står for „Coefficient of Performance“. Dette begreb er blevet indført i forbindelse med den anden anvendelsesmulighed af varmepumpen, hvor arbejde omdannes til flyttetning af termisk energi. COP er blevet indført da, denne type af virkningsgrad kan overstige 100%. Det er altså muligt at flytte en større mængde termisk energi, end hvad der skal bruges af mekanisk energi hertil. For at finde COP-værdien for en carnot-varmepumpe, der kører med henblik på at flytte energi fra et koldt reservoir til et varmere, kan nedenstående formel benyttes. [Ochsner, 2008, side 12]

$$COP_C = \frac{|Q_h|}{W} \quad (2.4)$$

De forskellige komponenter i et varmepumpesystem udfører forskellige termiske processer, som samlet set bliver til en kredsløbsproces. Igennem disse processer skifter kølemidlet fase imellem væske og gas i en uendelig løkke. Hvis de termiske processer i en varmepumpe simplificeres lidt, er der tale om to forskellige: den isentropiske og den isobare proces.

2.2.2 Isentrop

En isentropisk proces afgiver ikke varme til sine omgivelser, uanset hvilken vej processen løber, som at betyder det er en reversibel proces. Denne proces foregår i varmepumpens kompressor og ekspansionsventil, hvor der netop sker en ændring i temperatur, volumen og tryk.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1^k}{V_2^k} = \frac{T_2 V_1}{V_2 T_1} \quad (2.5)$$

Ekspansionsventilens proces vist i et $\text{Log}(p),h$ diagram fremkommer som en lodret streg, mens kompressorprocessen viser en lille hældning, hvilket skyldes det arbejde som kompressoren tilføjer processen. De to processer er vist i et $\text{Log}(p),h$ diagram som ses på figur 2.4 [Åge Birckjær Lauritsen, 2007, Side 46 og 147]

2.2.3 Isobar

Trykket i en isobar proces er konstant, hvilket betyder, at temperaturen vil ændre sig ligesom i kondensatoren og fordamperen, hvor kølemidlet afgiver eller optager energi fra omgivelserne.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.6)$$

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (2.7)$$

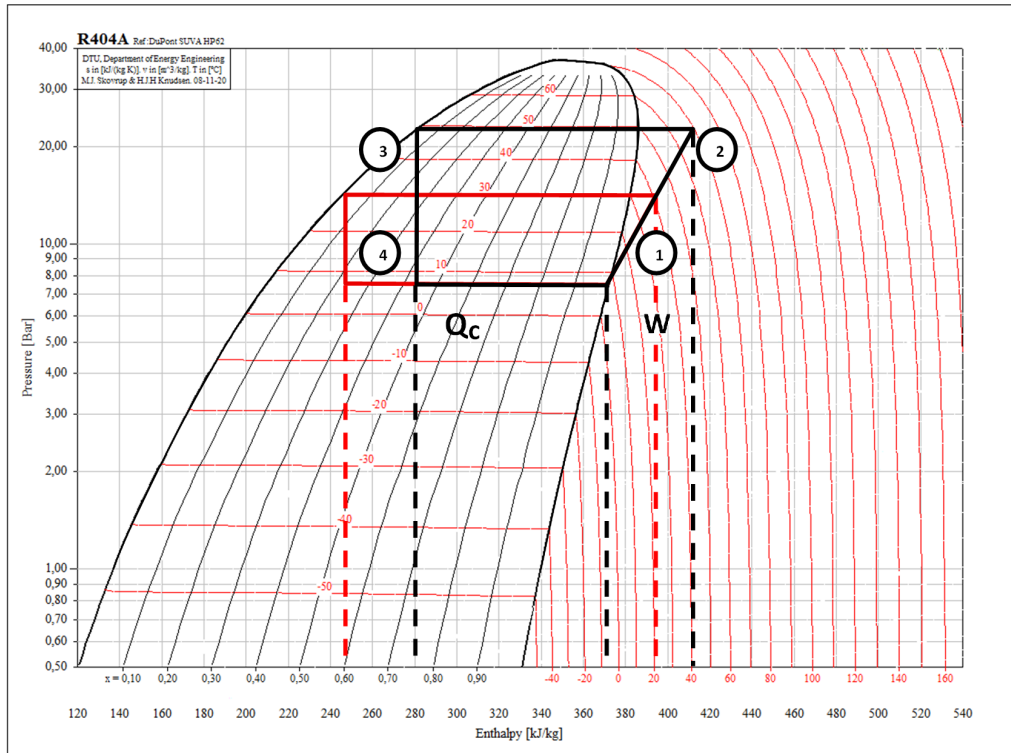
Kondensatoren og fordamperens processer afbilledet i et $\text{Log}(p),h$ diagram er to vandrette streger på hvert sit temperaturniveau, som illustreres på figur 2.4. [Åge Birckjær Lauritsen, 2007, Side 43]

2.2.4 Kredsproces

Hvis de fire processer for de enkelte komponenter tegnes ind i et diagram, fås en kredsproces, illustreret på Figur 2.4.

- 4-1. Fordamperen opsamler energi udefra, som får kølemidlet til at fordampe til en gas (tilført energi = Q_c).
- 1-2. Kompressoren tilføjer arbejde til gassen, hvilket giver en stigning i tryk og temperatur (tilført arbejde = W).
- 2-3. Kondensatoren udvinder energien fra den overophedede gas og gør at den fortættes.

- 3-4. Ekspansionsventilen sænker trykket og temperaturen på kølemidlet så det igen bliver muligt at fordampe.



Figur 2.4. Log(p),h diagram for kølemiddel R404a med et eksempel på en kredsproces.[Institut for Mekanik og Konstruktion, 2008]

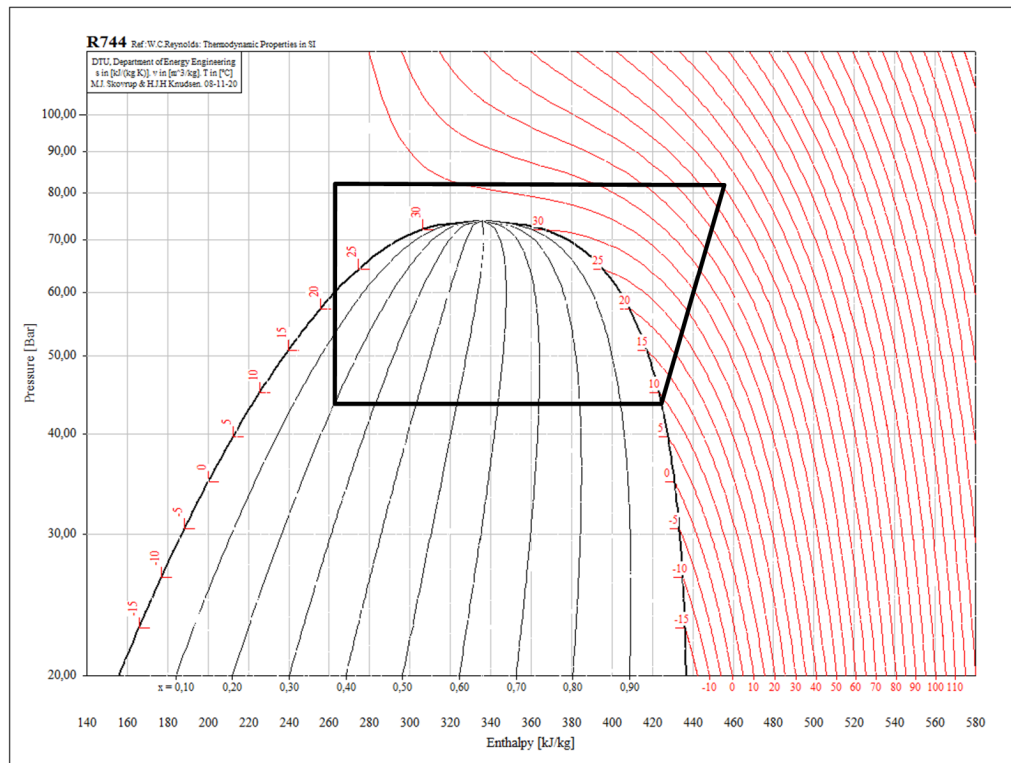
Figur 2.4 skal illustrere, at det ikke er lige meget hvilke temperaturområder en varmepumpe opererer i og hvilket kølemiddel der bruges. På figuren er der skitseret to forskellige kredsprocesser, som har samme temperatur i fordamperen, men kondenseres ved henholdsvis 30°C og 50°C . Det ses, at entalpien afgivet i kondensatoren for den røde kredsproces bliver større, hvilket betyder en teoretisk højere COP for varmepumpen jf. 2.4.

2.2.5 CO_2 som kølemiddel

Almindelige varmepumper kører i dag på HFC kølemiddel. Disse kølemidler er ikke naturlige og hvis de slipper ud i atmosfæren vil de virke som drivhusgasser, 3922 gange kraftigere end CO_2 . Der forskes i at erstatte flere af disse kølemidler med naturlige stoffer som fx CO_2 . [HFC-fri, 2008]

En effektiv køleproces med CO_2 foregår ved højt tryk, hvilket stiller store krav til det mekaniske udstyr i en varmepumpe, men det giver også mange fordele, idet den vil kunne

køre overkritisk. Når en varmepumpe kører overkritisk betyder det, at faseskiftet mellem gas og væske sker øjeblikkeligt i kondensatoren.



Figur 2.5. Log(p),h diagram for CO₂ med et eksempel på en kredsproces.[Institut for Mekanik og Konstruktion, 2008]

2.3 Varmepumpeteknologier

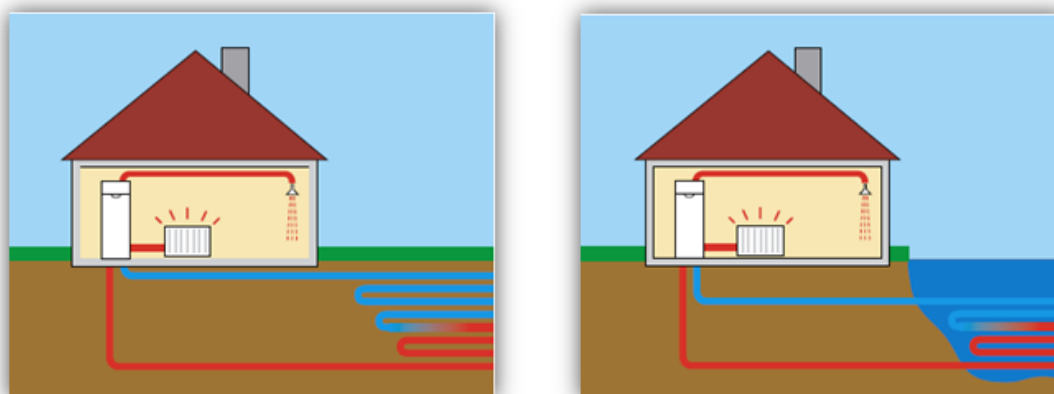
Der er flere måder at udvinde varmeenergi fra naturen med en varmepumpe på. Forskellen på de mange typer er, hvor varmen hentes fra. Det er muligt at udnytte varmeenergi fra luften, jorden og vandet. Fordele og ulemper ved at udnytte varmeenergi fra de tre elementer beskrives nærmere i det følgende.

Luft til luft vil ikke blive beskrevet i dette afsnit, fordi denne type bruges til direkte rumopvarmning og derfor ikke kan erstatte et oliefyr, som normalt også bruges til opvarmning af brugsvand.

2.3.1 Jord til vand

Jord til vand varmepumper udnytter varme fra jorden ved at sende en brine igennem et plastrør, som er gravet 0,8-1,5m ned i jorden. Brinen består af vand tilsat et frosthindrende middel. I en meters dybde har jorden en næsten konstant temperatur og dette giver systemet en konstant COP. [Ochsner, 2008, side 46]

Vand til vand deler mange af sine fordele og ulemper med jord til vand, men på et par punkter skiller den sig ud. Den er billigere at installere, da det ikke er nødvendigt at grave for at lægge rør ned, men alsidigheden af vand til vand varmepumpen er begrænset, idet de færreste bor nær ved en sø. Vand til vand kan være meget kritisk at bruge, især om vinteren fordi vandet omkring brinerørerne kan fryse til og i værste fald fryse hele søen. Dette vil ikke kun nedsætte COP-værdien, men også have miljømæssige konsekvenser for dyrelivet i søen.



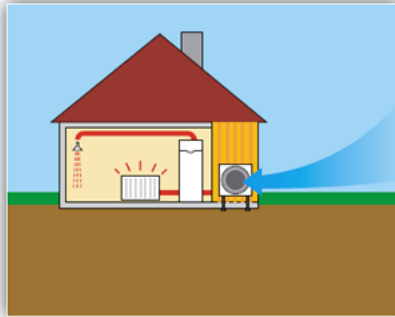
Figur 2.6. Viser en tegning af jord til vand og vand til vand systemet. [Danfoss, 2008]

2.3.2 Luft til vand

I et luft til vand system hentes varmeenergien fra luften udenfor. Luft til vand er en lille og billig løsning i forhold til jordvarme, fordi den ikke kræver nedgravning af rør. Denne type varmepumpe er derfor meget brugbar, hvor der ikke er en stor have til rådighed. En anden fordel ved luft til vand er, at det ikke er nødvendigt at søge om tilladelse til at sætte et anlæg op, selvom visse varmepumper af denne type kan generere en lavfrekvent støj, der kan være til gene for andre. [Energistyrelsen, 2008g]

Et af problemerne med luft til vand varmepumperne er, at udendørs temperaturen svinger meget i løbet af et helt år. Jo større forskellen er mellem udetemperaturen og den ønskede udgangstemperatur, desto lavere COP vil varmepumpen have jf. figur 2.4. Disse forholdsvis store temperaturudsving og luftens dårlige varmelederegenskaber taget i betragtning,

giver systemet en lavere COP i forhold til et jord til vand anlæg. Herudover kan den u-dendørs del af systemet i kolde og fugtige perioder rime til ligesom en fryser, hvilket kan forringe COP'en.[Ochsner, 2008]

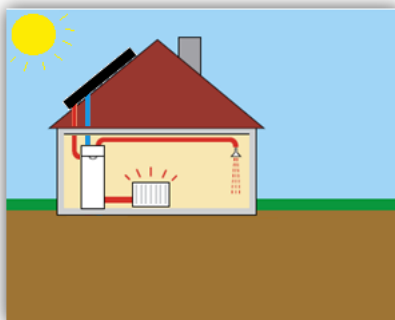


Figur 2.7. Viser en tegning af luft til vand systemet.[Danfoss, 2008]

2.3.3 Sol til vand

Ved at benytte en solfanger som en forvarmer kan der opnås en væsentlig højre performance i forhold til tidligere nævnte typer. Det skyldes, at temperaturen i solfangeren hvor varmen hentes fra, ligger nærmere den temperatur, der ønskes på brugsvandssiden. COP'en afhænger af forskellen mellem input og output temperaturen. Se evt. afsnit 2.2 med beskrivelsen af kredsprocessen.

Fordelene ved at kombinere en solfanger med en varmepumpe er, at den kan have en høj COP når solen skinner, men desværre bliver den også meget lav om vinteren og om natten.



Figur 2.8. Viser en tegning af sol til vand systemet.[Danfoss, 2008]

Implementering af varmepumpen i en privat husstand 3

3.1 Forbrugsanalyse for Skjernvej 184

Et lille landbrug i Holstebro overvejer at skifte fra forbrændingsfyr til en varmepumpe. De bruger fyret til at opvarme hele huset, inkl. en brugsvandsbeholder på 110 liter. Huset beboes af et ægtepar i 50'erne.

Huset er et to-plans hus fra 1924 med et grundareal på $120m^2$ og et beboelsesareal på $180m^2$. I stueetagen er der 2,5m til loftet, mens der på 1. sal er 3m op til kip. Huset er bygget i 1924, men der er efterfølgende lavet udskiftninger af alle vinduer med to-lags termovinduer, gulvvarme i køkken og badeværelse. Der ligger 150mm rockwool isolering under taget, og væggene er isoleret på indersiden, bortset fra stuen, som ikke er isoleret. Der er altså tale om et gammelt hus, som har været igennem nogle moderniseringer, men dog langt fra er isoleret optimalt.

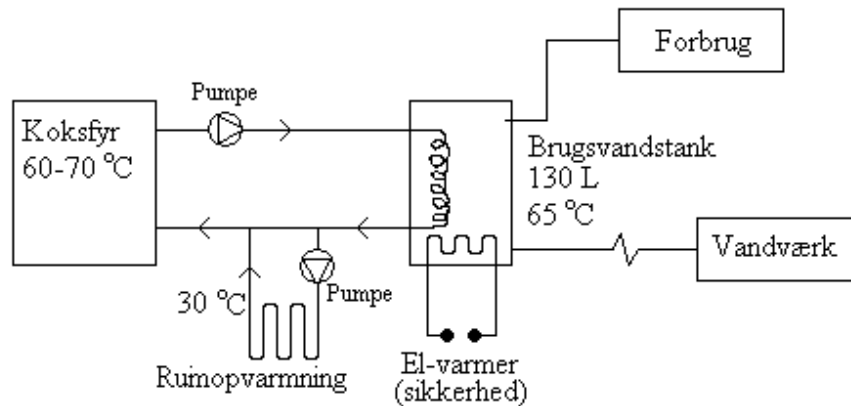
Fyret er et 20 år gammelt kombifyr (olie og koks) med en anslået virkningsgrad på 65% [Smed, 2008], og hvor brændslet består af 5 ton koks om året.

Systemet er lavet således, at koksen forbrændes og varmen overføres til en tank inde i fyret, hvor vandet i tanken opvarmes til $70\text{ }^{\circ}C$. Ved fyret sidder en pumpe med en effekt på 67W, som sørger for at pumpe vandet ud til en brugsvandsbeholder, hvor vandet opvarmes til $60\text{--}65\text{ }^{\circ}C$. Herfra bliver vandet, hvis opvarmning behøves, pumpet rundt i gulvvarme og radiatorer af en anden pumpe på 31W. Rørene i gulvet er udstyret med en shunt, hvilket gør, at der ikke bliver lukket nyt vand ind i systemet, før vandtemperaturen i rørene er faldet til under $30\text{ }^{\circ}C$. Vandet som er under $30\text{ }^{\circ}C$ bliver da lukket ud, og ført tilbage til fyret, for igen at blive opvarmet. Pumperne kører uafbrudt.

Systemet fungerer på nuværende tidspunkt som på figur 3.1 på den følgende side.

Beboerne i huset tager et bad hver dag af ca. 4 minutters varighed; vandforbruget er $12\frac{l}{min}$. Herudover bruger de ca. 10 liter hver til ekstra opvask, hygiejne m.v. Vandet skal være $40\text{ }^{\circ}C$, og skal derfor dels komme fra brugsvandstanken ($65\text{ }^{\circ}C$), og dels direkte fra vandværket ($8\text{ }^{\circ}C$).

Hustanden er tilknyttet NOE Energi A/S, og betaler 186,41 øre/kWh. [NOE-net, 2008]



Figur 3.1. Skematisk model af varmesystemet for Skjernvej 184

Herunder ses nøgletallene og de endelige udregninger for hustandens varmeforbrug. De mere detaljerede og grundlæggende beregninger kan findes i appendiks A1.

Husstandens totale varmebehov på årsbasis beregnes ud fra virkningsgraden på fyret og brændværdien på den mængde koks, der forbrændes i fyret.

$$\begin{aligned}
 Q_{total} &= Q_{koksforbrug} \cdot \eta_{fyr} \\
 &= 145000 \frac{MJ}{\text{år}} \cdot 65\% \\
 &= 94.250 \frac{MJ}{\text{år}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Husstandens nuværende udgift til varme kan nu beregnes. Denne beregnes ud fra den el der bruges til cirkulationspumper, samt udgiften til koks. Husstanden importerer koks fra Tyskland, og kommer på den måde uden om afgiftssystemet, hvorved deres udgift til koks er 2800 kr pr. ton.

$$\begin{aligned}
 Udgifter_{total} &= Udgift_{koks} + Udgift_{pumper} \\
 &= 14000 \text{ kr} + 1601 \text{ kr} \\
 &= 15.601 \text{ kr}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Regner man i stedet med danske priser, som er 4000 kr pr. ton, [Bilag 5, 2008] bliver den totale varmeudgift for familien i stedet 21601 kr.

Dernæst udregnes hvor stor en del af Q_{total} der på årsbasis bruges til rumopvarmning og til brugsvandsopvarmning. Dette gøres ved at beregne hvor meget energi, der bruges på brugsvandsopvarmning, hvorefter den resterende energi i forhold til Q_{total} er energi der bruges til rumopvarmning.

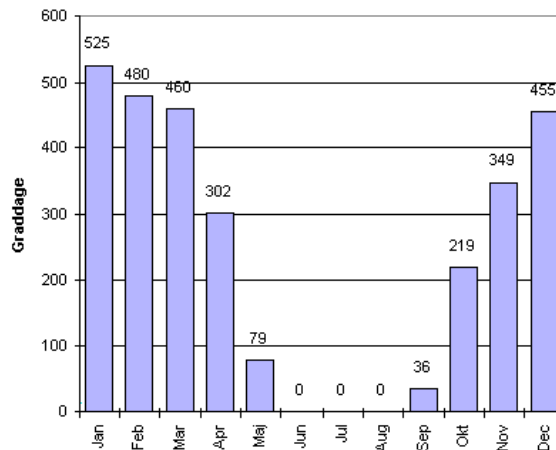
Varmtvandsforbruget estimeres ved at hver af de 2 beboere af husstanden tager et bad af 4 minutter og derudover bruger 10 liter til diverse husholdning og hygiejne brugsmål, pr.

dag. Brusehovedet leverer 12 liter/min [Miljøstyrelsen, 2008]. Dette betyder at der i husstanden er et dagligt forbrug på 116 liter. Det er dog ikke 116 liter fra varmtvandstanken, da vandet i varmtvandstanken er 65 °C. Til at beregne hvor meget vand fra brugsvandstanken som skal bruges, benyttes kalorimeterligningen. Som det ses på Appendiks A1, beregnes mængden af vand fra brugsvandstanken til 65,1 liter pr. dag, eller 15,5 MJ pr. dag. Ud fra dette kan energien der bruges til rumopvarmning beregnes.

$$\begin{aligned} Q_{opvarm} &= Q_{total} - Q_{brugs} \\ &= 94250 \frac{MJ}{\text{år}} - 5667 \frac{MJ}{\text{år}} \\ &= 88.583 \frac{MJ}{\text{år}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Vi har nu et varmeforbrug og varmtvandsforbrug for hele året til at dimensionere det varmepumpe-system, der skal erstatte koksfyret.

Det er dog interessant i denne sammenhæng, at vide hvornår denne varmeenergi bruges hen over året, da der ikke er den samme daglige gennemsnitstemperatur i løbet af året. Til at bestemme varmeforbruget i løbet af året indføres begrebet graddage. Graddage giver udtryk for, hvor koldt det har været i en given periode. Jo koldere det har været i perioden, jo større er graddageantallet. En graddag beregnes ud fra en indendørs temperatur på 17°C i forhold til middel udendørs temperaturen i perioden. Et døgn med en middeltemperatur på 16 °C udgør altså én graddag. På et normalt år er antallet af graddage 2905 [EVU, 2008] som fordeler sig ud på månederne som det ses på Figur 3.2. Her bemærkes det, at antallet af graddage i sommermånederne er 0 og at efterårsmånederne er varmere end forårsmånederne. Det bemærkes, at januar er den koldeste måned med 525 graddage i normalåret.



Figur 3.2. Fordeling af graddage i normalåret. [EVU, 2008]

Energi mængden der skal bruges til at opvarme husstanden i en given måned, kan derfor beregnes ud fra det totale varmeforbrug delt med antallet af graddage, ganget med antallet af graddage i den måned, hvor man ønsker at finde varmeforbruget. Det vil dermed sige, at da der tages udgangspunkt i normalåret, regnes der med, at det ikke er nødvendigt at bruge noget energi til rumopvarmning i sommerperioden, da antallet af graddage i

sommerperioden er 0 i normalåret. Energien pr. graddag beregnes som:

$$\begin{aligned} Q_{pr.gd} &= \frac{Q_{opvarmning}}{n_{gd} \text{ år}} \\ &= \frac{88.583 MJ}{2905 gd} \\ &= 30493 \frac{kJ}{gd} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Varmepumpesystemet skal dimensioneres, så det kan opvarme husstanden i den koldeste måned, og varmemeforbruget er dermed 525 gange varmemeforbruget pr. graddag, som blev udregnet i 3.4.

$$\begin{aligned} Q_{januar} &= n_{gdjanuar} \cdot Q_{pr.gd} \\ &= 525 gd \cdot 30483 \frac{kJ}{gd} \\ &= 16009 MJ \end{aligned} \quad (3.5)$$

Varmepumpesystemet skal altså kunne levere 16009 MJ i januar. De resterende måneders varmebehov er vist i Appendiks A1. Skjernvej 184 egner sig godt til at få installeret en varmepumpe, da det nuværende forbrændingsfyr har en dårlig nyttevirkning, og husstanden i forvejen har installeret gulvvarme i underetagen.

3.2 Varmepumpesystemer

Når et traditionelt forbrændingsfyr skal erstattes af et varmepumpesystem, er der flere forskellige opsætninger, som kan anvendes. I dette afsnit ses der nærmere på nogle af de opsætninger, der kan benyttes på Skjernvej 184.

Nogle varmepumpesystemer kræver specielle forhold til at udvinde den temperaturforskel, som varmepumpen udnytter i sin varmeproduktion. Dette kunne fx være et areal til nedgravning af rør eller en nærliggende sø. Da der ikke forefindes en sø i nærheden af Skjernvej 184, betyder det, at vand til vand varmepumpesystemer er udelukket. Derfor fravælges disse løsninger, og der vil derfor ikke blive arbejdet videre med disse.

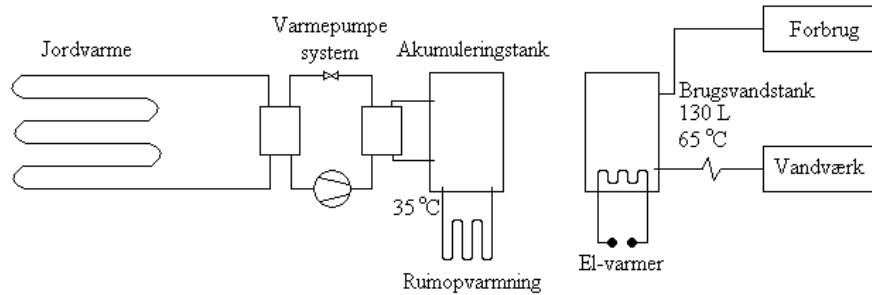
Skjernvej 184 har et passende areal til udnyttelse af jordvarme, og det er derfor oplagt at se på forskellige variationer af denne.

3.2.1 System 1

Det første varmepumpesystem er det mest anvendte i forbindelse med husstandsopvarmning, hvor man udnytter jordvarmen til at varme vand op til $35^{\circ}C$, som bruges til rumopvarmning. Herudover bruges et normalt el-varmelegeme til at opvarme brugsvandet i en brugsvandstank til $65^{\circ}C$. En skematisk model af dette system ses på Figur 3.3.

Fordelen ved dette varmepumpssystem er, at der i forvejen findes mange varmepumper, som er beregnet til dette formål, og at det er forholdsvis simpelt at sætte op. Ulempen er

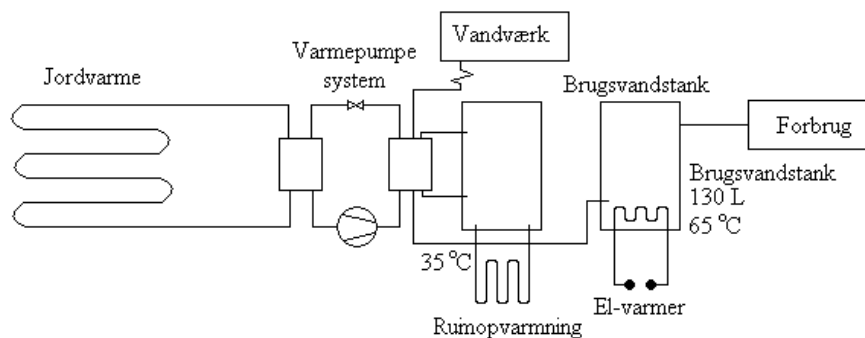
dog at el-varmelegemet har en virkningsgrad på lidt under 100%, og at man derfor ikke udnytter varmepumpens høje COP til opvarmning af brugsvandet.



Figur 3.3. Skematisk model af varmepumpesystem 1

3.2.2 System 2

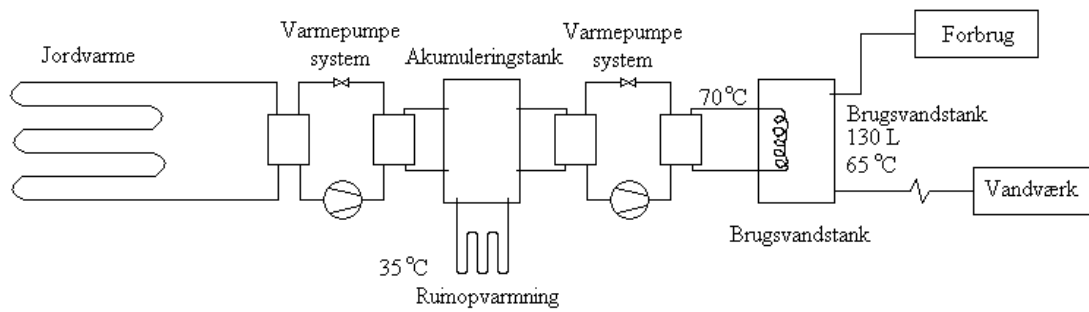
Et andet muligt varmepumpesystem bygger videre på den ovenstående model, og udnytter dens fordele. En skematisk model af varmepumpesystemet ses på 3.4, hvor varmepumpen også anvendes til at opvarme brugsvandets indgangstemperatur i brugsvandstanken til 35°C . Herefter benyttes en el-kedel til at tilføre brugsvandet den sidste varme op til 65°C . Dette har den fordel, at man ligeledes får en høje nyttevirkning på første del af opvarmningen af brugsvandet, i forhold til det første varmepumpesystem.



Figur 3.4. Skematisk model af varmepumpesystem 2

3.2.3 System 3

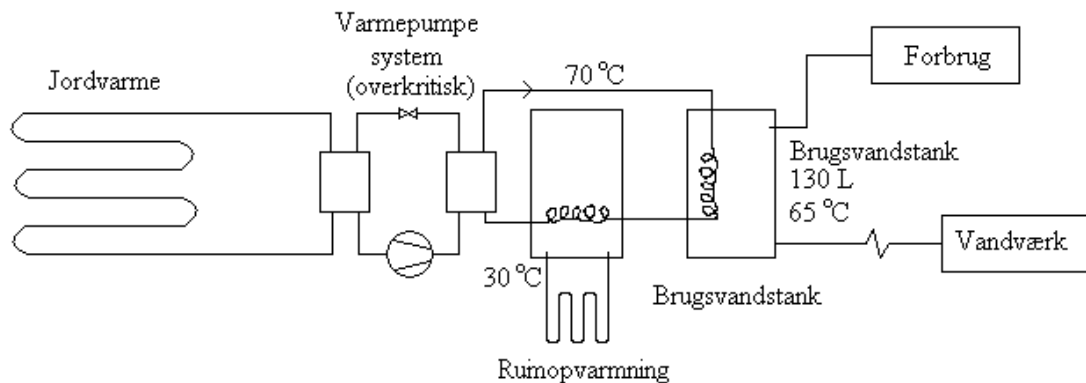
Et tredje forslag til hvordan varmepumpesystemet kunne opbygges, er som en 2-trins varmepumpe, som fungerer ved, at den første varmepumpe varmer en mellemtank op til 35°C , som skal fungere som lager for varmt vand til opvarmning af husstanden. Dernæst skal der sidde en varmepumpe, som er konfigureret til at udnytte det 35°C varme vand til at opvarme vandet i en brugsvandstank til 70°C . Dette varmepumpesystem ses på Figur 3.5.



Figur 3.5. Skematisk model af varmepumpesystem 3

3.2.4 System 4

En fjerde metode til at erstatte et forbrændingsfyr med et varmepumpesystem, er at erstatte forbrændingsfyret med en overkritisk varmepumpe, som fx bruger CO_2 som kølemiddel. Denne type varmepumpe kan varme vandet op til $70^\circ C$. En skematisk af systemet model ses på Figur 3.6. Dette system har den fordel, at den alene kan opvarme både husstanden og brugsvandet, med høj COP. Ulempen ved denne opstilling er dog, at varmepumper der opererer i det overkritiske område er svære at kontrollere, og at de i øvrigt har en meget høj etableringspris.

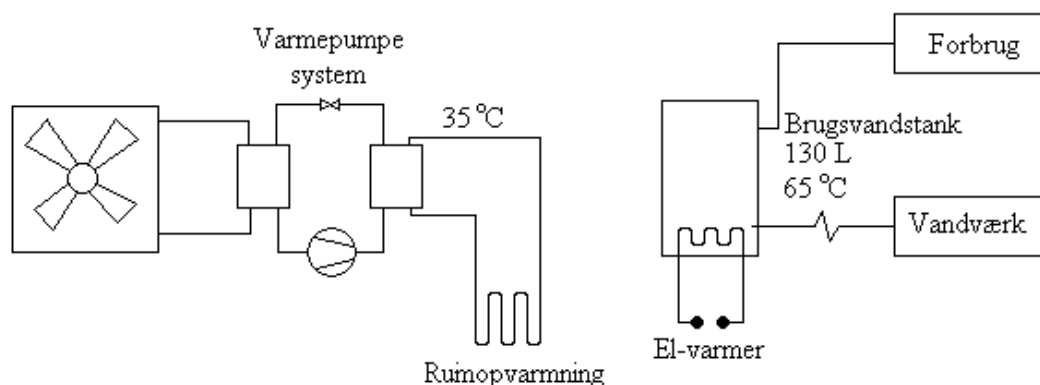


Figur 3.6. Skematisk model af varmepumpesystem 4

3.2.5 System 5

Et sidste eksempel er et system, hvor jordvarmen erstattes med luftvarme, et eksempel på dette ses på Figur 3.7. Dvs. i stedet for et såkaldt jord til vand system, bruges et luft til vand system. Denne kan principielt kobles på samme måde som de 3 første løsningsmuligheder, men har dog den ulempe, at systemet er mere årstidsbetonet, da temperaturen i luften er mere svingende, end den er i jorden. Dette betyder, at COP'en derfor er mere svingende, og at den over året vil være lavere end ved et tilsvarende system med jordvarme, specielt om vinteren.

System 5 har en betydelig lavere etableringspris, da der ikke skal nedgraves slanger til jordvarme, men blot monteres et ventilations system på ydersiden af huset. Det betyder ligeledes, at man ikke er afhængig af et stort areal til nedgravning af rør.



Figur 3.7. Skematisk model af varmepumpesystem 5

3.2.6 Udvalgelse

System 1 fravælges, da den høje COP ikke udnyttes til at opvarme brugsvandet, og system 4 fravælges pga. varmepumpens høje etableringspris, samt at dette system er svært at kontrollere. Dvs. at der arbejdes videre med systemerne 2, 3 og 5, hvor beregningerne hertil er foretaget på Appendiks A2.

Som det kan ses på Appendiks A2 skal varmepumpen i varmepumpesystem 2 dimensioneres til at kunne yde 6,2 kW kontinuerligt over døgnet, og det varmelegeme, der er placeret i varmtvandsbeholderen skal yde en effekt på $2,3 \frac{kWh}{dag}$, eller 94,6 W ved kontinuerlig drift hen over døgnet. Som det ligeledes kan ses på Appendiks A2, skal varmepumpen i varmepumpesystem 3 kunne yde 6,1 kW ved kontinuerlig drift hen over døgnet, varmepumpen, der skal varme vandet i brugsvandstanken op, skal kunne yde $4,3 \frac{kWh}{dag}$, eller 180 W.

Det ses tydeligt, at energien der går til opvarmning af brugsvandet er minimal i forhold til energien, der forbruges til opvarmning af husstanden. Dermed ses, at varmepumpe 2 i varmepumpesystem 3 skal være meget lille i forhold til den varmepumpe, der skal bruges til rumopvarmning. Det vil derfor være en stor ekstraudgift at installere 2 varmepumper i forhold til besparelsen på elforbruget. Dernæst ses at varmelegemet i varmepumpesystem 2 skal levere den mindste energi, da brugsvandet bliver forvarmet i varmepumpen. Da varmepumpeopstilling 5 er en luft til vand varmepumpe, er COP'en afhængig af lufttemperaturen.

På et senere tidspunkt i rapporten, bliver det undersøgt hvorvidt det kan betale sig, at have en varmepumpe installeret, der kan yde en større effekt. Dette sættes i forbindelse med et varmelager og et intelligent elsystem, med fleksible elpriser, ud fra varmepumpesystem 2. Det vil derfor sige, at den varmepumpe der skal installeres på Skjernvej 184, skal kunne levere 6,2 kW ved kontinuerlig drift, eller 147,8 kWh ved én times drift som beregnet i

udregning 3.6.

$$\begin{aligned} Q_{maxjanuar} &= \frac{25353kWh}{2905GD} \cdot \frac{525GD}{31dage/mned} \\ &= 147,8kWh \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Driftsomkostninger ved fast elpris

Omkostningerne ved drift af en varmepumpe ved en konstant elpris på 1,86 kr/kWh [NOE-net, 2008] ønskes undersøgt. På bilag 1 ses en lille markedsundersøgelse over hvad, der findes på markedet af varmepumper. På bilag 1 er der et eksempel på en varmepumpe; en Fighter 1140 8kW varmepumpe fra Vølund, som yder en varmeeffekt på 7,5 kW ved en COP på 3,5. Antallet af driftstimer i løbet af et år udregnes på Appendiks A3 til $\tau_{P2-total} = 3380 \text{ h}$. Ligeledes udregnes den elektriske effekt som bliver afsat i varmepumpen i løbet af et år, til at være 7244 kWh. Til dette skal medregnes den energi, som varmelegemet tilfører brugsvandet det sidste stykke op til de 65 °C, nemlig 829 kWh (Appendiks A2). Den totale omkostning ved at drive varmepumpen ved en fast elpris bliver derfor:

$$\begin{aligned} Udgift_{VP} &= 7244 \frac{kWh}{\text{år}} \cdot 1,86 \frac{kr}{kWh} + 829 \frac{kWh}{\text{år}} \cdot 1,86 \frac{kr}{kWh} \\ &= 15015 \text{ kr} \end{aligned} \quad (3.7)$$

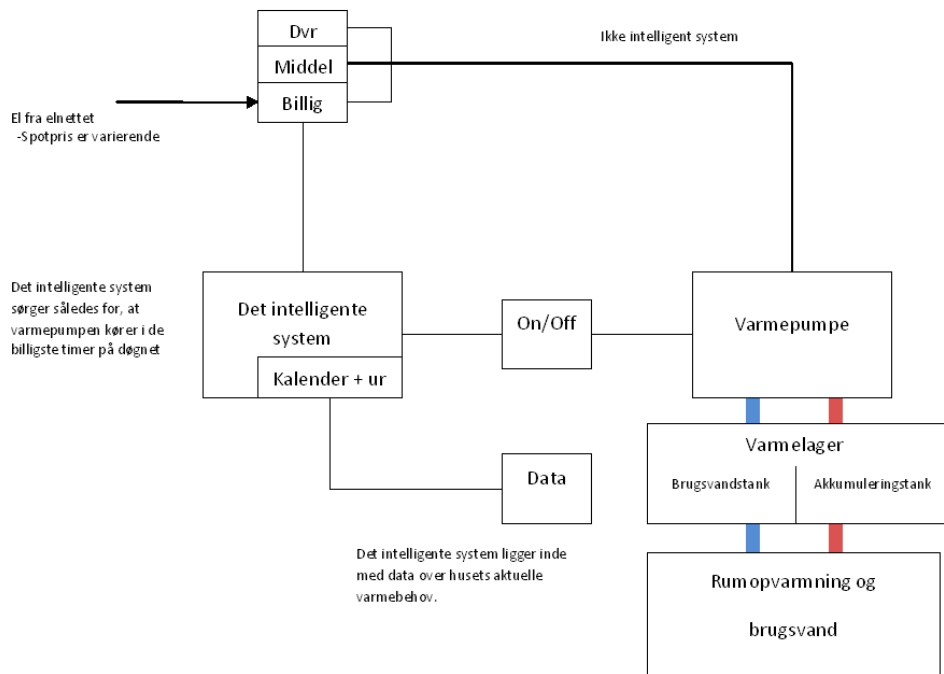
Som tidligere nævnt i rapporten er husstandens varmeudgift på nuværende tidspunkt 15601 kr, hvilket vil give en besparelse på 586 kr pr. år ved at installere varmepumpesystem 2, med en Fighter 1140 8 kW varmepumpe. Denne besparelse er regnet ud fra at husstanden bruger 2800 kr pr. ton koks, som er prisen på koks fra Tyskland. Hvis der i stedet regnes med de danske priser på koks, som er 4000 kr pr. ton. [bilag 5] bliver besparelsen på 6586 kr pr. år.

3.4 Et intelligent varmepumpesystem

Der er nu set på mulighederne for at etablere en varmepumpe på Skjernvej 184, som skal køre kontinuerligt. Men ved at bruge en varmepumpe der kører kontinuert, er det ikke muligt, at kunne udnytte de svingninger, der er i spotprisen på el. En simpel måde at udnytte det på, er ved at lade drifttiden for varmepumpen ligge i de perioder, hvor elektriciteten generelt er billig. Med en indbygget timerfunktion kan varmepumpen køre i bestemte tidsintervaller og dermed opnå en billigere drift i det lange løb end tilfældig drift ville.

Bedre ville det være, hvis man introducerede et intelligent elsystem. Systemet skal opbygges således, at elmåleren selv sørger for at aflæse el-spotprisen, hvorefter den sætter varmepumpen i gang i de billigste timer i hvert døgn. Med en differentieret elpris vil forbrugeren kunne betale den minimale eludgift til varmepumpen hvert eneste døgn. Dette forudsætter, at elmåleren kender til spotprisen for de kommende 24. timer. Ydermere skal forbruget det følgende døgn for husstanden være nogenlunde kendt.

Fælles for ovenstående systemer er, at de begge ikke vil køre kontinuert. En opvarmning opdelt i etaper betyder, at varmepumpen må yde en højere effekt, og da opvarmningen af huset skal foregå kontinuert over døgnet, må der forlanges, at varmen skal kunne lagres til senere brug. Den nemmeste måde at oplagre varme, er at benytte sig af en akkumuleringsvandtank. Størrelsen på denne tank afhænger af varmepumpens driftstid, hvor en længere driftstid betyder et mindre varmelagerbehov. For at kunne vurdere om opvarmningskonceptet er økonomisk rentabelt, kræves en analyse af etableringsomkostninger sammenholdt med de besparelser det differentierede elforbrug medfører. En illustration af det intelligente system kan ses på Figur 3.8



Figur 3.8. Skematisk diagram over det intelligente system. På baggrund af data om husets forventede dagsforbrug, indstiller systemet selv driftstiden og placerer denne i de billigste timer.

3.5 Konceptanalyse

I analysen regnes der med elpriser uden afgifter, dvs. rene el-spotpriser. Dette tillades, fordi det ønskes undersøgt, om der er besparelse i at lade varmepumpen køre i fx 3 timer i stedet for kontinuert igennem døgnet. Den eventuelle besparelse vil da være den samme, med eller uden afgifter, fordi varmemeforbruget forbliver det samme. Heraf:

elpris uden afgifter:

$$pris_{forbrug} = spotpris \cdot forbrug \quad (3.8)$$

elpris med afgifter:

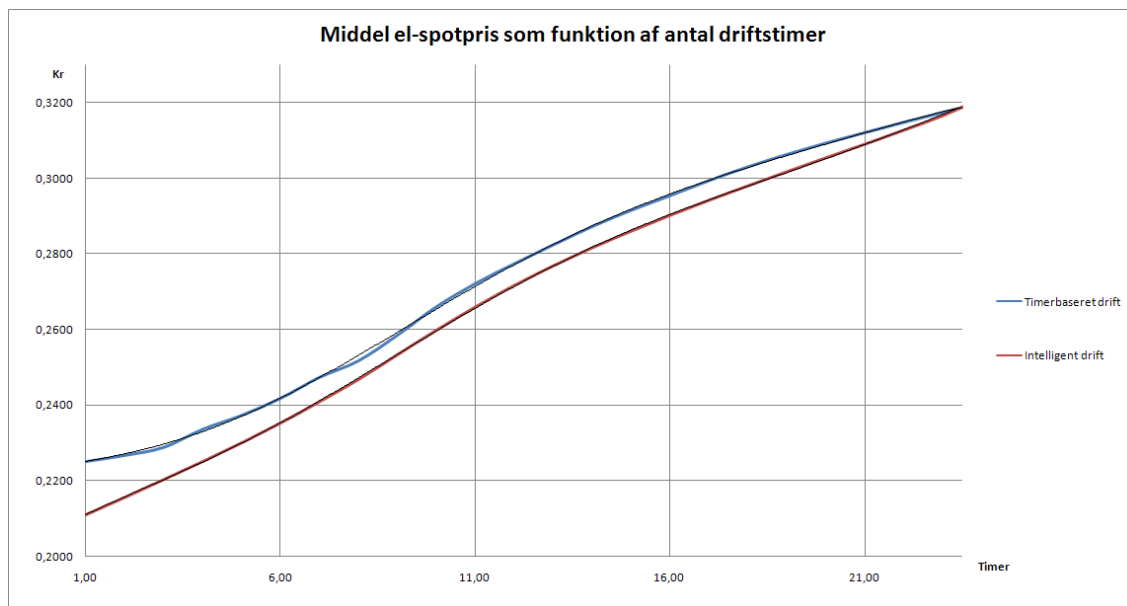
$$\begin{aligned} pris_{forbrug} &= (afgift + spotpris) \cdot forbrug \Leftrightarrow \\ pris_{forbrug} &= spotpris \cdot forbrug + afgift \cdot forbrug \end{aligned} \quad (3.9)$$

Det bemærkes at de to forskrifter for elprisen som en funktion driftstiden begge er lineære, med samme hældning, dog parallelforskydes forbruget med afgift op ad y-aksen.

Ved en differentieret varmepumpedrift vil det være naturligt at lægge driften i de timer hvor elprisen er billigst. For at få den billigste elregning, vil det kræve en varmepumpe der kun kører i de billigste timer i døgnet. Jo længere tid varmepumpen kører i døgnet, desto højere bliver gennemsnitsprisen pr. kWh. Prisen som en funktion af driftstiden ses på Figur 3.9, hvor x-aksen starter ved 1 time, fordi el-spotprisen bliver fastsat på time-basis, og der derfor ikke ville være mening i, at differentiere varmepumpedriften yderligere.

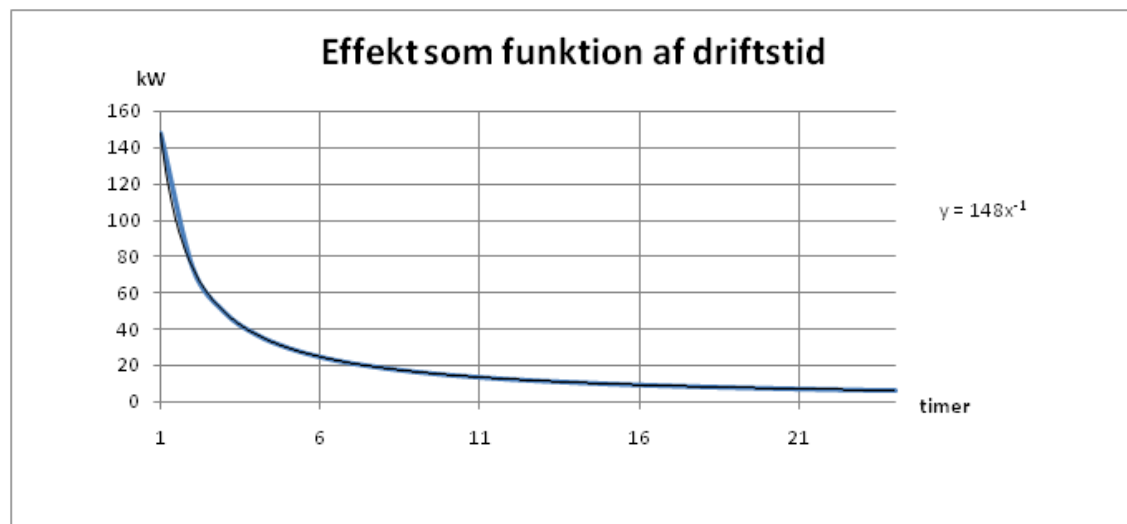
Den blå graf er lavet ud fra Figur 1.9, og tager ved time 1 den billigste time på døgnet, mens time 2 angiver gennemsnitsprisen af den billigste og den næstbilligste time. Ved 24 timer fås altså dagens gennemsnitlige el-spotpris. Gennemsnitspriserne er over hele året, undtaget sommerkvartalet, som udelades jf. Figur 3.2. I det tidligere valgte pumpesystem (afsnit 3.2.6 på side 32), bemærkes det dog at varmepumpen også skal levere noget varme til brugsvandet om sommeren, men denne varmemængde er så lille at, den ikke bør have indflydelse på den gennemsnitlige elpris hen over året.

Den røde graf er lavet således at værdien ved 1 times drift repræsenterer middelpriisen på den billigste time i hvert døgn i 2006, uanset hvor denne time ligger på de forskellige dage. Værdien ved time 2 giver således gennemsnittet af de 2 billigste timer i hvert eneste døgn, uanset tidsmæssig placering på dagen.



Figur 3.9. Her ses det hvordan middelspotprisen stiger med antallet af driftstimer for varmepumpen. Datasættene for graferne kan ses i Bilag 2

De indlagte tendenslinier er 6.-gradspolynomier, der har tiden som variabel. Altså er middelspotprisen en funktion af driftstiden. Det ønskes nu at få en funktion af effekten, hvilket gøres ved at udtrykke driftstiden ved effekten. Sammenhængen mellem disse er afbilledet herunder.



Figur 3.10. At varmepumpen skal kunne levere et givent varmeforbrug på en kortere driftstid ender ud i en større effekt. Her tages udgangspunkt i Skjernvej 184.

Der fås altså en aftagende potensfunktion i intervallet fra 1 til 24 timer.

$$\tau = \frac{Q_{max}}{P_{VP}} \quad (3.10)$$

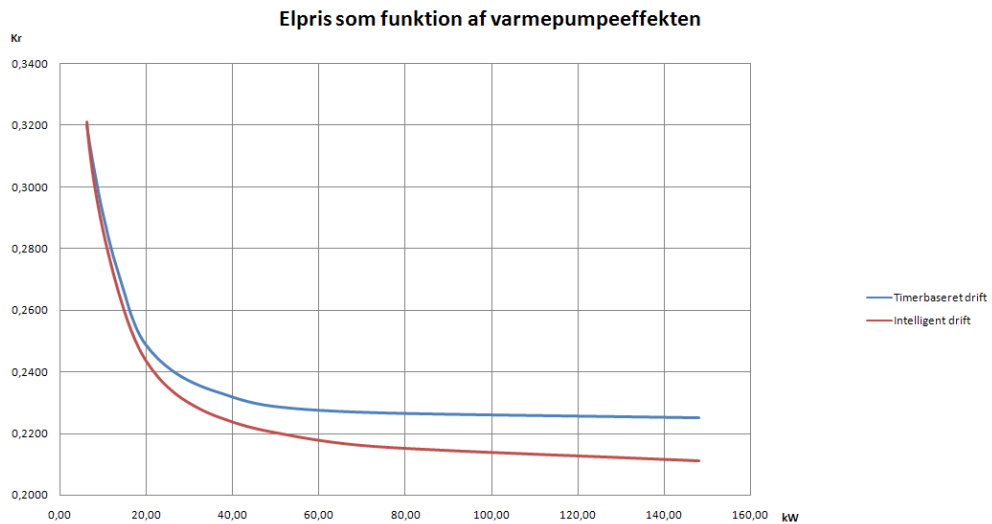
Ved indsættelse af τ i det approksimerede 6. gradspolynomium for timerbaseret drift, fremkommer tilhørende pris som funktion af effekten med forskriften:

$$\begin{aligned} Pris_{EL}(P) = & -5,6911 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^6 + 4,3384 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^5 \\ & -1,1845 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^4 + 1,2641 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^3 \\ & -2,3681 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^2 + 2,0307 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right) \\ & +0,223 \end{aligned} \quad (3.11)$$

På tilsvarende vis kan en funktion for intelligent drift bestemmes, ved at benytte 6. gradspolynomiumet for intelligent drift:

$$\begin{aligned} Pris_{EL-intel}(P) = & -6,0956 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^6 + 4,8366 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^5 \\ & -1,4063 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^4 + 1,774 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^3 \\ & -8,8704 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right)^2 + 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P_{max}}{P}\right) \\ & +0,205 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Forskrifterne for udregning ?? og udregning 3.12 er illustreret på Figur 3.11:



Figur 3.11. Det ses at besparelsen ved det intelligente system er større, når driftstiden forkortes. Regnes der på et hus med et højere varmeforbrug, vil det blot medføre en forskydning hen ad x-aksen.

Som det ses ender de to systemer i samme elpris, når en kontinuert kørende pumpe indsættes, mens en besparelse findes lige så snart effekten øges.

Varmepumpens etableringspris stiger i takt med at effekten øges pga. flere meter jordslange, større kompressor osv. På Bilag 1 ses data om varmepumpepriserne, som stiger med størrelsen. Punkterne ligger tilnærmelsesvist på en ret linie, og sammenhængen mellem varmepumpeeffekt og anskaffelsespris kan med tilnærmelse udtrykkes ved:

$$Pris_{VP}(P) = 2317,4 \cdot \frac{kr.}{kW} \cdot P + 18203kr \quad (3.13)$$

Med til konceptet hører en akkumuleringstank, hvilken der også skal investeres i, ved etableringen af jordvarme. Disse priser stiger med volumet, som derfor først ønskes givet som funktion af effekten:

$$V(P) = \frac{\left(\frac{24hr - Q_{max}}{24h} \cdot Q_{max}\right)}{5K \cdot 1,161 \cdot 10^{-3} \frac{kWh}{l \cdot K}} \quad (3.14)$$

Bilag 3 viser indsamlede data om akkumuleringstanke. Det ses at sammenhængen mellem volumenet og pris er nogenlunde lineær, hvorfor en tendenslinie med følgende forskrift er indtegnet.

$$Pris_{akku}(P) = V(P) \cdot 2,3748 \cdot \frac{kr}{l} + 5474kr \quad (3.15)$$

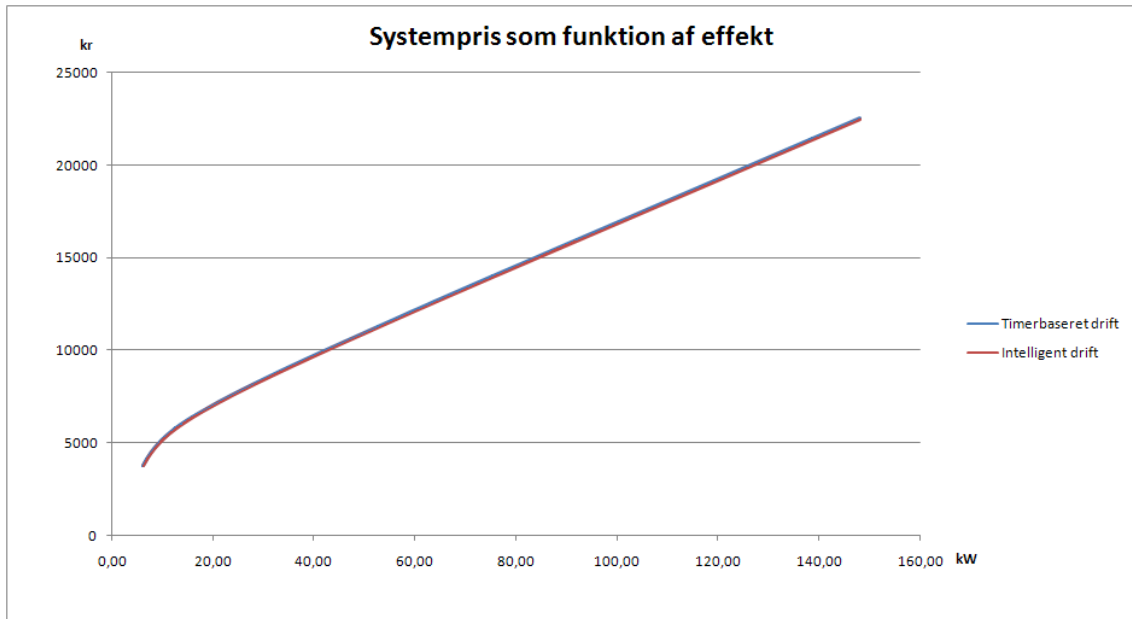
Af det foregående ønskes en funktion og graf for de samlede udgifter til varmepumpens etablering, varmetankens etablering og el-forbrug. Derfor modificeres 3.15 og 3.13, således at prisen nu er fordelt ud over en 20-årig levetid.

Varmepumpernes COP er fastsat til at være 3,0 ved et varmekredsløb på 0/50 [Vejledere, 2008]. Det ønskede varmekredsløb er dog 8/35, og det giver vha. EES en COP på 4,3, hvor kompressoreffektiviteten er sat til 65%. Tabellerne fra kredsprocessen i EES er vedlagt i bilag 4.

Med udgangspunkt i forbruget på Skjernvej 184 laves en graf over de samlede udgifter som funktion af effekten. Ud fra det givne forbrug er den størst mulige effekt 147,8 kWh, jf. udregning 3.6. Forskriften for denne funktion bliver summen af (3.15), (3.13) og (3.12) og for det intelligente system summen af (3.15), (3.13) og (3.11). På funktionerne for elprisen ganges det årlige forbrug i kWh og divideres med COP'en på 4,3. Heraf:

$$Pris_{total-timer}(P) = \frac{Pris_{akku}(P)}{20\text{år}} + \frac{Pris_{VP}(P)}{20\text{år}} + \frac{Pris_{EL-timer}(P)}{kWh} \cdot \frac{Q_{forbrug}}{4,3} \quad (3.16)$$

$$Pris_{total-intel}(P) = \frac{Pris_{akku}(P)}{20\text{år}} + \frac{Pris_{VP}(P)}{20\text{år}} + \frac{Pris_{EL-intel}(P)}{kWh} \cdot \frac{Q_{forbrug}}{4,3}$$



Figur 3.12. Prisen pr. år inkl. elforbrug og etablering af varmepumpe og akkumuleringskøle. Grafen viser prisen for Skjernvej 184's årlige varmeforbrug på 25535 kWh.

Det ses, at den billigste måde at drive varmepumpen på er ved den kontinuerte drift og altså uden et varmelager. De to grafer på Figur 3.11 følger hinanden, og ligger meget tæt, dog er det intelligente system billigere end det timerbaserede.

Bemærk at grafen ikke kan kobles direkte til virkeligheden, da der i realiteten er afgifter på el, hvilket vil sende den årlige udgift væsentligt i vejret. Besparelsen ved den intelligente drift i forhold til den timerbaserede forbliver dog den samme jf. redegørelse (3.9) og dermed lægges den samlede afgift oveni den konstruerede funktion. De pålagte elafgifter for Skjernvej 184 ligger på 154,41 øre pr. kWh [NOE-net, 2008], hvilket med det givne forbrug vil resultere i en øget årlig udgift på 9104 kr. Henvist til figur 3.11 skal graferne altså forskydes 9104 kroner op af y-aksen. Generelt ses det, at der ikke er nogen betydelig besparelse ved at have en varmepumpe til at køre intelligent frem for timerbaseret. Driften af den varmepumpe, der kører efter det intelligente system er billigere, og den største besparelse er på 83 kr. om året ved 1 driftstime i døgnet jf. Bilag 2 (middelspotpris 2006), hvor etableringsprisen for et varmepumpesystem der kan yde den tilstrækkelig effekt i øvrigt vil koste knap 425.000 kr jf. appendiks A3.

Kommentarer til modellen

Tendenslinierne som er tegnet over priser på varmepumper og akkumuleringsstanke, afviger fra virkeligheden i den forstand at de er lavet gennem priser og produkter, som er opgivet af forskellige producenter. Det betyder at der er forskel på pris og kvalitet, hvilket tegner et lidt uklart billede af den egentlige forskrift for prisudviklingen i forhold til effekten.

Den mindst mulige varmepumpe har principielt ikke brug for en akkumuleringsstank, hvilket betyder, at den samlede etableringspris (se App. B) for en kontinuert drift skal fratrækkes startprisen for akkumuleringsstanken, nemlig 5474kr. Dette betyder imidlertid, at den kontinuerte vil blive billigere på årsbasis.

Varmepumpeproducenterne angiver enten COP'en på systembasis, eller på komponentbasis, hvor de som gør det på komponentbasis naturligvis får en højere COP. Herudover er COP'erne også angivet for forskellige varmekredsløb. Grundet bedre sammenligningsgrundlag blev varmepumpernes COP defineret til en værdi på 3, ved et varmekredsløb på 0/50. Efter tilpassning til det ønskede varmekredsløb på 8/35 antog varmepumperne en COP-værdi på 4,3. Dette har betydning for afgørelsen af el-forbruget og dermed hvor meget el-spotprisen skal svinge, for at det er rentabelt at investere i en varmepumpe og et varmelager. En højere COP medfører et mindre forbrug af elektricitet, hvorfor el-spotprisen skal variere mere, før etableringsudgifterne kan dækkes.

Konceptvurdering 4

4.1 Forudsætninger for implementering

Analysen af den opstillede model i de to forskellige systemer kræver efterfølgende en vurdering af mulighederne for, at erstatte de nuværende individuelle opvarmningsenheder i Danmark med et intelligent varmepumpesystem. Forskellige perspektiver åbnes hermed. Det står klart, at det miljømæssigt og energimæssigt er en god ide, men det er dog ikke sikkert, at den private forbruger, samfundet og staten deler samme synspunkt. De tre hovedaktørers individuelle meninger er meget aktuelle, idet de vil udgøre grundlaget for implementeringen af de opstillede modeller.

Det intelligente varmepumpesystem tiltaler forbrugeren på to punkter: den lavere elpris, som opnåes i kraft af differentieret forbrug, og følelsen af at være en del af et system baseret på vedvarende energi. Den private forbruger har dog ofte økonomiske besparelser for øje, og hvis det er muligt at spare nogle tusinde om året, vil det være attraktivt for de fleste. Det samme gør sig gældende, når der skal investeres i en ny opvarmningsenhed til boligen. Dette betyder samtidig at forbrugeren ikke vil investere i noget, som ikke kan betale sig rent økonomisk. Og det kan varmepumpen i det intelligente system ikke, i kraft af at investeringen i lager og større pumpe er alt for stor i forhold til den besparelse som opnås på spotprisen. Hvis ikke varmepumpeejeren modtager en form for tilskud eller godtgørelse vil det være økonomisk meningsløst for denne at lave en sådan investering. Med interessen for at integrere flere vindmøller i det danske elsystem, er det fra et samfundsmæssigt synspunkt en god idé, at installere intelligente varmepumpesystemer, hvis forbrug kan tilpasses vindmølleaktiviteten. Indførelse af det intelligente koncept vil medføre mindre afhængighed af fossile brændsler til drift af de private forbrændingsfyr. Ydermere vil flere vindmøller betyde et grønnere renommé i den globale klimadebat. Regeringens udmelding om, at Danmark på lang sigt skal være uafhængig af fossile brændsler og i stedet anvende vedvarende energi, kræver flere tiltag for at blive gennemført. Da det er af samfundsmæssig interesse at implementere flere vindmøller, må det være regeringens opgave, at gøre det attraktivt for forbrugeren at differentiere sit elforbrug. At yde et tilskud til etableringomkostninger for forbrugere der ønsker at installere intelligente systemer kan få de, som ikke har mulighed for at installere intelligente varmepumpesystemer, fx fjernvarmeforbrugere, til at føle sig forfordelt. Det vil være mere nærliggende, at forestille sig en

ordning hvor elafgifterne hang sammen med elproduktionen fra vindmøller. Med differentierede elafgifter vil elbesparelsen i intelligente systemer formentlig være større, end den er i dag, og kunne dermed være mere attraktivt at investere i.

4.2 Konsekvens af implementering i samfundet

Uden et intelligent system vil effekten af implementeringen af mange varmepumper kunne ses på det danske el-forbrug og -system. Der bliver en større efterspørgsel på elektricitet døgnet igennem. Ved kontinuert drift vil det forårsage en forskydning af el-behovet til et højere leje. Denne samfundsmæssige "udgift" skal naturligvis ses i sammenhæng med den besparelse, som fremkommer i de private husstandes kul-, koks- og olieforbrug.

Med differentierede el-priser ser det anderledes ud. En mangfoldiggørelse af den timerbaserede model vil øge efterspørgslen på el på visse tidspunkter af døgnet, nemlig der hvor den i gennemsnit er billigst (om natten). Dette vil resultere i, at ændringerne af energibehovet hen over døgnet bliver relativt mindre, og gøre elforbruget mere stabilt, men det vil ikke skabe markant større fleksibilitet på elmarkedet. Derimod vil en indførelse af disse resultere i en højere elpris om natten, efterhånden som flere og flere husholdninger tilslutter sig det natlige forbrug. I hvert fald hvis det jf. figur 1.9 på side 13 antages, at pris og forbrug fortsat vil følge hinanden.

Hvis der derimod installeres en varmepumpe med en akkumuleringstank og et intelligent elmålersystem, bliver det muligt, at få varmepumpen til at køre når elprisen er lav, uanset tidspunkt på døgnet. Den lave pris vil hænge sammen med den øjeblikkelige produktion fra landets vindmøller. Hvis der ikke er et varmebehov i husstanden på det pågældende tidspunkt, har varmepumpen mulighed for at lagre energien i en tank, hvorfra der kan hentes energi når elprisen er høj. Med denne løsning fås meget mere fleksibelt elsystem, der i langt højere grad vil være kombateribelt med vindmøllernes svingende produktion og dermed forhindre eloverløb. Den tidligere nævnte større efterspørgsel på el vil i høj grad kunne leveres af vindmøller.

Konceptet giver altså, udover et mere fleksibelt elsystem, også mulighed for at basere en større del af landets energiproduktion på vedvarende energi, hvilket ikke er muligt med elsystemets nuværende fleksibilitet og opbygning. Det vil derudover også hjælpe til i en løsning på den forudsatte samfundsmæssige problemstilling som figur 1.6 på side 10 illustrerer. Hertil kommer det at forbrugeren ikke længere vil være afhængig af de svingende oliepriser, men derimod modtage billig strøm fra vedvarende energikilder.

Et intelligent system vil ikke kun være aktuelt for varmepumper, men mange andre elektriske apparater vil også kunne udnytte dette princip. Det kunne fx være vaskemaskiner, opvaskemaskiner og tørretumblere, som ikke nødvendigvis behøver at køre et bestemt

tidspunkt på døgnet. Med flere spillere på banen betyder det, at varmepumpen i det individuelle system kun er mindre del i en helhed, som skal ses i et meget større perspektiv.

4.3 Aktøranalyse

Som tidligere nævnt, spiller forskellige faktorer ind i forbindelse med implementeringen af intelligente varmepumper i den private husstand, og det er derfor interessant at se på hvilke aktører, der har medindflydelse på disse. Herunder ses der derfor nærmere på kunden, politikerne, miljøorganisationer, netselskaberne og vindmøllejerne. Disse aktører kan både have en negativ og positiv påvirkning på mulighederne for konceptet.

Netselskaberne har en positiv indstilling til projektet, da de gennem indførslen af intelligente elmålere opnår administrative fordele i forbindelse med aflæsningen af elmålere. Dette er der et eksempel på hos Energi Syd, hvor elselskabet på nuværende tidspunkt er ved at installere intelligente elmålere hos sine kunder. Ifølge Energi Syd's beregninger, vil besparelserne i forbindelse med den automatiske aflæsning, udgøre en tilbagebetalingstid for de intelligente elmålere på 15 år. Det betyder, at de betragter det som en god investering, og derfor har valgt at dem gratis hos kunderne. [Wittrup, 2008a] Dette gælder dog ikke alle husstande, da fx Dong Energy har meldt ud, at de ikke vil tilbyde sine kunder gratis installation af intelligente elmålere. [Wittrup, 2008b]

Politikerne er derimod negative overfor forslaget, da de ikke mener, at besparelsen hos forbrugeren er stor nok til, at tilbagebetalingstiden for elmåleren er acceptabel. [Wittrup, 2008b] Dette på trods af initiativet som Energi Syd udviser. Denne negative indstilling kan gøre, at det vil tage længere tid, før elpriserne bliver differentieret for den private forbruger, da integreringen af intelligente elmålere i det danske el-net kræver en lovgivning om ensartethed som politikerne i sidste ende skal vedtage.

Vindmøllejerne er positive, da en indførsel af intelligente elmålere vil betyde, at elektriciteten, som vindmøllerne producerer, vil blive efterspurgt, da spotprismarkedet på nuværende tidspunkt giver en lav el-pris, når vinden blæser meget. Dette betyder, at i der højere grad vil være grundlag for at udnytte den planlagte udvidelse af vindkapaciteten. I forbindelse med integrering af intelligente elmålere og varmepumper er miljøorganisationer positivt stillet, da de ser det øgende forbrug af vindmølleenergi som en fordel for miljøet. Denne interesse kan give udslag i form af positiv information til befolkningen eller investering i projekter vedrørende intelligente elmålere og varmepumper.

Kunden er også en meget vigtig aktør i dette spil, da han som forbruger af elektricitet skal tage stilling til investeringen af intelligente elmålere, hvis elselskaberne ikke installerer dem gratis i hans område. Derudover vil det give forbrugeren mulighed for at købe andre intelligente produkter, som også kan spille sammen med vindmøllerne, og dermed give ham en økonomisk gevinst.

Konklusion 5

Analysen af varmekonsumet på Skjernvej 184 gjorde at opstilling 2 blev valgt. Beregninger på dette system gav en besparelse på ca. 650 kr. om året. Årsagen til at besparelsen ikke var større, skal findes i husejerens lave udgift til koks. Ved en normal kokspris på 4000 kr. pr. ton, ville besparelsen være på 6650 kr. om året, altså formindske udgifterne til varme med 38%, hvilket må siges at være pænt. Der skal her gøres opmærksom på, at besparelserne kun er gældende for en kontinuert varmepumpe drift og fast el-pris.

Analysen af el-spotprisen hen over døgnet viste, at el-spotprisen generelt rammer det laveste niveau i nattetimerne. En simpel måde at udnytte denne tendens på, ville være at lade varmepumpen køre i nattetimerne og akkumulere varme til at dække dagskonsumet. Dette gav en besparelse på udgifterne til el.

Det intelligente system udmærker sig ved, at udnytte den aktuelle spotpris på el og vil dermed altid have de mindste udgifter til elektricitet. El-spotprisens afvigelse fra den gennemsnitlige tendens er imidlertid så lille, at den maksimale årlige besparelse, ved intelligent frem for timerbaseret drift, maksimalt beløber sig til 83 kr, vel og mærket forudsat en investering på knap 425.000 kr.

Fælles for de to ovenstående metoder er, at de begge udnytter svingningerne i el-spotprisen ved at forkerte og etapeopdele driften. Med en højere varmepumpeydelse og et varmelager kan det lade sig gøre at dække et kontinuert behov med en differentieret drift. Undersøgelsen af varmepumpeprisernes udvikling, som funktion af effekten, kan tilnærmelsesvis beskrives ved en lineær sammenhæng og tilsvarende for akkumuleringsstanken. Merudgiften til etablering af større varmepumpe og -lager er dog af en sådan størrelse, at besparelserne på eludgiften langt fra står mål hertil. Derfor vil en indførelse af konceptet imidlertid kræve et slags tiltag fra staten, idet en investering i større varmepumpe og -lager, er økonomisk formålsløs for den private forbruger.

Der er et stort potentiale i den intelligente model som en del af en løsning til problematikken i forøgelsen af vindmøllekapaciteten. Det er der i kraft af muligheden for at aftage den diskontinuerlige strøm af elektricitet fra vindmøllerne. Fundamentet for den planlagte udbygelse synes herudover forstærket, idet flere vindmøller vil give mere fluktuerende el-priser og flere gratis kilo-watt-timer, hvilket vil resultere i en større besparelse hos forbrugeren.

Perspektivering 6

I gennem rapporten er der holdt fokus på hvilken indflydelse og konsekvens det har at differentiere elforbruget med varmepumper. Denne løsning er relativt langsigtet, da den kræver store investeringer fra forbrugernes side, men også fra elproducenternes. En alternativ og midlertidig differentiering af elforbruget kan dog opnås uden større problemer. Det kan fx gøres ved at installere en timer på sine hvidevarer, så de automatisk udfører deres opgaver om natten. Dette vil kunne hæve niveauet for det natlige middelstrømforbrug, og da det oftest er om natten, når forbruget af elektricitet er minimalt, at der kan forekomme eloverløb, vil det kunne forbedre fleksibiliteten en smule på elnettet. Dette vil dog være på bekostning af fleksibiliteten i dagligdagen for forbrugeren, idet driften af de elektriske apparater vil være tilpasset elsystemet frem for forbrugers behov. Inddragelse af denne frihed kan måske have en afskrækkende virkning, hvorfor udbredelsen af det intelligente system vil være begrænset til udvalgte apparater.

Indførelsen af flere vindmøller betyder mere svingende produktion, hvilket formentlig skal tilpasses med intelligente systemers evne til at tilpasse forbruget med den øjeblikkelige produktion af el. Hvis konceptet egenskaber ikke svarer til udbyggelsen af vindkapaciteten, vil risikoen for eloverløb stadig være at finde, hvis det blæser meget over en periode. Hertil hører, at en vurdering af muligheden for at akkumuleringsstankene kan indeholde flere dages forbrug, ikke ville være irrelevant. Hvis det fx blæser meget i en periode i januar, vil det være optimalt, hvis akkumuleringsstanken kan opsamle varme til mere end en dag. Men vil en sådan tank være urealistisk stor, og er den nødvendig for at sikre Danmark mod el-overløb?

Modellen kan være misvisende, idet den er lavet ud fra en gennemsnitsdag i januar. En pumpe dimensioneret til dette forbrug vil naturligvis ikke skulle køre lige så længe, i fx maj måned, og dermed kan forbrugeren måske få en langt billigere el, end den gennemsnitlige pris som modellen anslår.

I forbindelse med en eventuel indførelse af det intelligente system vil det være naturligt at sætte fokus på at oplyse befolkningen om mulighederne i konceptet. På energistyrelsens hjemmeside er der netop fokus på at oplyse og sikre forbrugeren mod eventuelle fejlinvesteringer i varmepumper. På hjemmesiden står der:

"På grundlag af en politisk beslutning om at stille 30 mio. kr. til rådighed over to år har Energistyrelsen nu fået mulighed for at give forbrugerne et bedre overblik over markedets produkter. Civilingeniør Mikkil Sørensen fra Energistyrelsen oplyser, at der i det næste års tid gennemføres en række initiativer, der vil gøre det lettere for forbrugerne at finde ud af, om en varmepumpe er noget for dem og i givet fald vælge det mest hensigtsmæssige varmepumpeanlæg."

[Energistyrelsen, 2008b]

I forbindelse med dette og det intelligente system, er det interessant at analysere el-spotprisen fluktuationer. Hvor meget skal el-prisen svinge, for at en for at den private forbruger opnår en reel besparelse ved at investere i en større varmepumpe med tilhørende lager? Hertil kommer det at vurdere og forudsige hvor meget spotprisen angiveligt vil flukturere, hvis der regnes med dobbelt så stor vindkapacitet i det danske el-net. Disse analyser vil være vigtige i forbindelse med at oplyse den danske befolkning om køb af varmepumper.

Litteratur

- Bivejleder, 2008.** Bivejleder. *Vejlederkommentar d. 11/12.* Bivejleder for projektgruppe EGI1B211 2008, 2008.
- Danfoss, 2008.** Danfoss. *Den store varmepumpe bog.* URL: http://heatpump.dk/Danfoss-Den_store_varmepumpebog.pdf, 2008.
- EMU, 2008.** EMU. *Grundlæggende pneumatik.* URL: http://materialeplatform.emu.dk/materialer/public_downloadfile.do?mat=1136861&id=1136854, 2008.
- Energi og Olieorganisationerne, 2008.** Energi og Olieorganisationerne. *Historien.* URL: <http://www.oliebranchen.dk/Publikationer/Olieeventyret%20i%20Nords%C3%B8en/Historien.aspx>, 2008. Downloadet: 10-12-2008.
- Energistyrelsen, 2008a.** Energistyrelsen. *Liberalisering af elmarkedet.* URL: <http://www.ens.dk/sw14994.asp>, 2008. Downloadet: 11-12-2008.
- Energistyrelsen, 2008b.** Energistyrelsen. *Sikkerhed for forbrugerne.* URL: <http://www.ens.dk/sw76678.asp>, 2008.
- Energistyrelsen, 2008c.** Energistyrelsen. *Elproduktion.* URL: <http://www.ens.dk/sw15102.asp>, 2008.
- Energistyrelsen, 2008d.** Energistyrelsen. *El, Varme og Naturgas.* URL: <http://www.ens.dk/sw13663.asp>, 2008. Downloadet: 19-11-2008.
- Energistyrelsen, 2008e.** Energistyrelsen. *Danmarks energistrømme 2007.* URL: http://energistyrelsen.dk/graphics/Energi_i_tal_og_kort/statistik/aarsstatistik/Statistik%202007/Flow2007-DK.pdf, 2008. Downloadet: 11-12-2008.
- Energistyrelsen, 2008f.** Energistyrelsen. *Energistatistik 2007.* URL: http://energistyrelsen.dk/graphics/Energi_i_tal_og_kort/statistik/aarsstatistik/Statistik%202007/Energistatistik%202007_Web.pdf, 2008. Downloadet: 3-12-2008.
- Energistyrelsen, 2008g.** Energistyrelsen. *Myter og facts om varmepumper.* URL: <http://www.ens.dk/sw76679.asp>, 2008. Downloadet: 11-12-2008.
- EVU, 2008.** EVU. *Graddage i normalåret ,El- og Vvs-branchens Uddannelsessekretariat.* URL: <http://www.vvsu.dk/elearning/gd01-04.htm>, 2008. Downloadet: 4-12-2008.

- Birckjær Lauritsen, Søren Gundtoft, 2007.** Åge Bredahl Eriksen Åge Birckjær Lauritsen, Søren Gundtoft. *Termodynamik : teoretisk grundlag, praktisk anvendelse*. ISBN: 9788757126136. Nyt Teknisk Forlag, 2007.
- HFC-fri, 2008.** HFC-fri. *Kølemidlernes hoveddata*. URL: <http://www.hfc-fri.dk/19550>, 2008. Downloadet: 12-12-2008.
- Mekanik og Konstruktion, 2008.** Energi Institut for Mekanik og Konstruktion. *Refrigeration Utilities*. <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/Index.html>, 2008.
- John W. Jewett og Serway, 2008.** Jr. John W. Jewett og Raymond A. Serway. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 7. ed.* ISBN: 0-495-11240-2. Thomson Learning, Inc., 2008.
- Miljøstyrelsen, 2008.** Miljøstyrelsen. *Gørnt Ansvar*. URL: <http://www.grøntansvar.dk/Default.aspx?ID=88>, 2008. Downloadet: 3-12-2008.
- NOE-net, 2008.** NOE-net. *El pris hos NOE net A/S*. URL: www.noe.dk/227/tarifblad_2._kvartal_2008/side.aspx, 2008. Downloadet: 3-12-2008.
- Ochsner, 2008.** Karl Ochsner. *Geothermal Heat pumps: a guide for planning and installing*. ISBN: 978-1-84407-406-8. Earthscan, 2008.
- Smed, 2008.** Henry Smed. *Virkningsgrad på koksfyret*. Telefonsamtale med VVS installatøren der har installeret det nuværende koksfyre på Skjernvej 184, 2008.
- Transport- og Energiministeriet, 2007.** Transport- og Energiministeriet. *En visionær dansk energipolitik 2025*, 2007.
- Vejledere, 2008.** Vejledere. *Vejledermøde d. 02/12*. Efterårssemesteret, 2008.
- Vindmølleforening, 2008.** Dansk Vindmølleforening. *Afregningsregler for vindmøller*. URL: <http://www.dkvind.dk/fakta/pdf/05.pdf>, 2008. Downloadet: 19-11-2008.
- Wittrup, 2008a.** Sanne Wittrup. *Syd Energi melder klar til fremtidens elsystem*. Ingeniøren, 2008.
- Wittrup, 2008b.** Sanne Wittrup. *Politikere afviser at udbrede intelligente elmålere*. Ingeniøren, 14.11, 2008.

Appendiks- og bilagsoversigt

Appendiks A1	MathCAD varmeberegninger.
Appendiks A2	MathCAD varmepumpesystemer effektforbrug beregninger.
Appendiks A3	MathCAD drifts omkostninger ved fast elpris beregninger.
Appendiks B	MathCAD effektberegninger for varmepumpesystemer.
Bilag 1	Exceldokument med varmepumpepriser.
Bilag 2	Exceldokument med markedsddata.
Bilag 3	Exceldokument med priser på akkumuleringstanke.
Bilag 4	EES tabel med varmepumpesimuleringer.
Bilag 5	Email korrespondance med Randers Energi, forhandler af koks.

Alle Appendiks og bilag er vedlagt på en CD baggerst i rapporten.

Appendiks A1

Opvarmningsenergiforbrug på Skjernvej 184

Først defineres nogle enheder:

$$\text{kJ} := 1000\text{J} \quad \text{MJ} := 1000\text{kJ} \quad \text{kWh} := 3600\text{kJ} \quad \text{mdr} := 30.5\text{day} \quad \text{år} := \text{yr}$$

Det undersøges hvor stort forbruget er til opvarmning.

Fakta om fyret evne og kapacitet:

$$\eta_{\text{fy}} := 65\% \quad m_{\text{koks}} := 5000 \frac{\text{kg}}{\text{år}} \quad H_{\text{n_koks}} := 29 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{forbrug}} := m_{\text{koks}} \cdot H_{\text{n_koks}} \quad Q_{\text{forbrug}} = 145000 \frac{\text{MJ}}{\text{år}}$$

$$Q_{\text{total}} := Q_{\text{forbrug}} \cdot \eta_{\text{fy}}$$

$$Q_{\text{total}} = 94250 \frac{\text{MJ}}{\text{år}} \quad (1)$$

Herudover bruges el til pumperne. P_1 er pumpen ved fyret, og P_2 er pumpen ved gulvvarmen. Det årlige energiforbrug og hertil beregnes. Herefter findes prisen for pumpernes drift.

$$P_1 := 67\text{W} \quad P_2 := 31\text{W}$$

$$E_{\text{pumper}} := P_1 + P_2$$

$$E_{\text{pumper}} = 859 \frac{\text{kWh}}{\text{år}}$$

$$\text{pris}_{\text{kWh}} := \frac{186.41}{\text{kWh}} \text{ øre}$$

$$\text{udgift}_{\text{pumper}} := \frac{E_{\text{pumper}} \cdot \text{pris}_{\text{kWh}}}{100}$$

$$\text{udgift}_{\text{pumper}} = 1601 \frac{\text{kr}}{\text{år}}$$

Der betales 2800 kroner pr. ton for koks. De samlede udgifter til koks findes:

$$\text{pris}_{\text{koks}} := \frac{2800}{\text{ton}} \text{ kr}$$

$$\text{udgift}_{\text{koks}} := \text{pris}_{\text{koks}} \cdot 5\text{ton}$$

$$\text{udgift}_{\text{koks}} = 14000 \frac{\text{kr}}{\text{år}}$$

De samlede udgifter for at holde huset opvarmet:

$$\text{Udgifter} = \text{udgift}_{\text{koks}} + \text{udgift}_{\text{pumper}}$$

$$\text{Udgifter} = 15601 \frac{\text{kr}}{\text{år}} \quad (2)$$

Beregninger af varmtvandsforbrug

Når der i følgende udregninger skrives K, skal tallet antages som værende grader Celcius, og må **ikke** forveksles med den absolutte temperatur.

t bruges om temperaturer og T bruges om tid.

En graddag har enheden K·dag, heraf: $GD := K \cdot \text{day}$ $c_{\text{vand}} := 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{L}}$

Fakta vandtemperaturen på vandet fra vandværket, i badet og i brugsvandstanken:

$$t_{\text{bad}} := 40\text{K} \quad t_{\text{brugs}} := 65\text{K} \quad t_{\text{værk}} := 8\text{K}$$

$$T_{\text{bad}} := 4\text{min} \quad \text{bruser} := 12 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Det antages at de 2 personer i huset udover badevand hver bruger 10L vand til div. opvask og hygiejne.

$$V_{\text{vand}} := 2 \cdot T_{\text{bad}} \cdot \text{bruser} \frac{1}{\text{day}} + 2 \cdot 10 \frac{\text{L}}{\text{day}} \quad V_{\text{vand}} = 116 \frac{\text{L}}{\text{day}}$$

Badevandet er en blanding af 65 grader varmt vand og 10 grader varmt vand som skal blive til 40 grader varmt badevand. En kalorimeterligning opstilles:

$$Q_{\text{kold}} = -Q_{\text{varm}}$$

Given

$$c_{\text{vand}} \cdot V_1 \cdot (t_{\text{bad}} - t_{\text{værk}}) = -c_{\text{vand}} \cdot V_2 \cdot (t_{\text{brugs}} - t_{\text{bad}})$$

$$V_1 + V_2 = 116\text{L}$$

$$c_{\text{vand}} \cdot V_1 \cdot (t_{\text{bad}} - t_{\text{værk}}) = -c_{\text{vand}} \cdot (116\text{L} - V_1) \cdot (t_{\text{bad}} - t_{\text{brugs}}) \text{ solve, } V_1 \rightarrow 50.87719298245614035\text{L}$$

$$V_{65\text{gr}} := c_{\text{vand}} \cdot (116\text{L} - V_2) \cdot (t_{\text{bad}} - t_{\text{værk}}) = -c_{\text{vand}} \cdot V_2 \cdot (t_{\text{bad}} - t_{\text{brugs}}) \text{ solve, } V_2 \rightarrow 65.12280701754385964\text{L}$$

$$V_{\text{brugs}} := \frac{V_{65\text{gr}}}{\text{day}} \quad V_{\text{brugs}} = 65.1 \frac{\text{L}}{\text{day}} \quad (3)$$

Vandet i brugstanken skal varmes op fra 10 grader til 65 grader. Med mængden af vand som skal opvarmes kan vi beregne den tilførte energi.

$$\Delta t_{\text{brugs}} := 65\text{K} - 8\text{K}$$

$$Q_{\text{brugs}} := V_{\text{brugs}} \cdot \Delta t_{\text{brugs}} \cdot c_{\text{vand}} \quad Q_{\text{brugs}} = 15.5 \frac{\text{MJ}}{\text{day}} \quad (4)$$

Varmpumpen mellem den store tank og brugsvandstanken skal altså overføre

$$Q_{\text{brugs}} = 16 \frac{\text{MJ}}{\text{day}} \text{ til brugstanken om dagen.}$$

Varme som bliver brugt på opvarmning om året (Q_{total} har vi **(1)** og Q_{brugs} har vi fra **(4)**)

$$Q_{\text{opvarm}} := Q_{\text{total}} - Q_{\text{brugs}} \quad Q_{\text{opvarm}} = 88583 \frac{\text{MJ}}{\text{år}} \quad (5)$$

Normalårets graddage

Selvsagt er varmemeforbruget ikke det samme i alle året måneder. Vi differentierer forbruget ved hjælp af antallet af graddage i hver måned. De ses i tabellen herunder.

Herunder er antallet n af graddage pr. måned i normalåret.

[Kilde: <http://www.vvsu.dk/elearning/gd01-04.htm>]

Til højre er det gennemsnitlige antal af graddage pr. måned i de sidste 9 år.

$$n_{GD} := \begin{pmatrix} 525 \\ 480 \\ 460 \\ 302 \\ 79 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 36 \\ 219 \\ 349 \\ 455 \end{pmatrix} \cdot GE$$

Antallet af graddage i normalåret:

$$n_{GD_år} := \sum n_{GE} \quad n_{GD_år} = 2905 GE$$

Da bliver energiforbruget til opvarmning pr. graddag fundet ved:

$$Q_{pr_gd} := \frac{Q_{opvarm}}{n_{GD_år}} \cdot \text{år}$$

$$Q_{pr_gd} = 3.0493 \times 10^4 \cdot \frac{kJ}{GD}$$

Energiforbruget til opvarmning pr. graddag ganges på antallet af graddage i den enkelte måned. Opvarmningsforbruget pr. måned, graddagende taget i betragtning bliver da:

$$Q_{mdr} := n_{GD} Q_{pr_gd}$$

	0
0	16009
1	14637
2	14027
3	9209
4	2409
5	0
6	0
7	0
8	1098
9	6678
10	10642
11	13874

$Q_{mdr} = \dots \cdot MJ$

Appendiks A2

Varmepumpeopstilling 5

Luft til vand varmpumpen står alene for opvarmning af huset, mens en elkedel sørger for opvarmning af brugsvandet.

Først findes den effekt som varmpumpen skal yde, hvis den kører kontinuert på en gennemsnitsdag i hver måned. Til højre er effekten angivet som energi pr. dag.

$P_{\text{pumpe1}} := \frac{Q_{\text{mdr}}}{30.5 \text{ day}}$		0	
	0	6.1	
	1	5.6	
	2	5.3	
	3	3.5	
	4	0.9	
	5	0	
	6	0	
	7	0	
	8	0.4	
	9	2.5	
	10	4	
	11	5.3	

$$P_{\text{pumpe1}} = \text{ · kW}$$

$P_{\text{pumpe1}} =$		0	
	0	146	
	1	133	
	2	128	
	3	84	
	4	22	
	5	0	
	6	0	
	7	0	
	8	10	
	9	61	
	10	97	
	11	126	

$$\text{ · } \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Det ses at varmpumpen skal yde min. $P_{\text{pumpe1}0} = 146 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$ for at klare maksimumsbehovet for en dag i januar måned.

Bemærk at varmpumpen står stille i sommermånederne juni, juli og august.

Elkedlen skal i brugsvandstanken opvarme brugsvand hver dag.

$$\text{kedel}_1 := Q_{\text{brugs}} \quad \text{heraf} \quad \text{kedel}_1 = 180 \text{ W} \quad \text{dvs} \quad \text{kedel}_1 = 4.31 \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Opstilling 2

I denne opstilling skal varmpumpen udover at levere varme til opvarmning, også levere noget af den varme som skal bruges i brugsvandstanken. Dvs. at vandværkets vand først løber igennem varmpumpen (for at blive opvarmet til 35 grader) før den kommer over i brugsvandstanken, hvor en el-kedel så sørger for at lade vandtemperaturen stige de sidste 30 grader op til 65 grader.

Energimængden som skal tilføres vandværkets vand for at det bliver 35 grader varmt findes:

$$\Delta t := 35 \text{ K} - 8 \text{ K} \quad \Delta t = 27 \text{ K}$$

$$Q_{\text{vand}} := c_{\text{vand}} \cdot \Delta t \cdot V_{\text{brugs}} \quad Q_{\text{vand}} = 2.04 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Dermed skal varmepumpen levere $Q_{\text{vand}} = 7.3 \frac{\text{MJ}}{\text{day}}$ mere i forhold til opstilling 1.

$$P_{\text{pumpe2}} := Q_{\text{vand}} + P_{\text{pumpe1}_0}$$

$$P_{\text{pumpe2}} = 147.8 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Hen over året skal pumpe2 altså yde:

$$P_{\text{pumpe2}} := Q_{\text{vand}} + P_{\text{pumpe1}}$$

	0	
0	6.2	
1	5.6	
2	5.4	
3	3.6	
4	1	
5	0.1	
6	0.1	
7	0.1	
8	0.5	
9	2.6	
10	4.1	
11	5.4	

$$P_{\text{pumpe2}} = \cdot \text{kW}$$

	0	
0	148	
1	135	
2	130	
3	86	
4	24	
5	2	
6	2	
7	2	
8	12	
9	63	
10	99	
11	128	

$$P_{\text{pumpe2}} = \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Det bemærkes at varmepumpen i dette tilfælde også skal køre i juni, juli og august, selvom der er 0 graddage. Det er fordi forbruget af brugsvand anses som værende konstant hele året.

El kedelen skal i dette tilfælde køre kontinuert med en effekt på:

$$\text{kedel2} := Q_{\text{brugs}} - Q_{\text{vand}}$$

$$\text{kedel2} = 94.5 \text{ W}$$

$$\text{kedel2} = 2.27 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

Opstilling 3

Der indgår 2 varmepumper i dette system. Den ene leverer varme til en tank til rumopvarmningen. En anden varmepumpe opsamler så varme fra denne tank, således at den leverer den sidste varme til vandet, som er i brugstanken.

Den varmepumpe som skal opvarme opvarmningssvandet kalder vi for pumpe3.1, og den til brugsvandet kalder vi for pumpe3.2.

pumpe3.1 og pumpe3.2 skal kunne levere følgende mængde varme over en day.

$$P_{\text{pumpe3.1}} := \frac{Q_{\text{mdr}_0}}{30.5 \text{ day}} = 145.8 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

$$P_{\text{pumpe3.1}} := \frac{Q_{\text{mdr}_0}}{30.5 \text{ day}} = 6.1 \text{ kW}$$

$$P_{\text{pumpe3.2}} := Q_{\text{brugs}} = 4.31 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$

$$P_{\text{pumpe3.2}} := Q_{\text{brugs}} = 180 \text{ W}$$

Sammenfatning af resultaterne

Herunder ses den påkrævede energimængde til henholdsvis hus- og brugsvandsopvarmning.

Opstilling 5

$$P_{\text{pumpe1}_0} = 145.8 \frac{\text{kWh}}{\text{day}} \quad P_{\text{pumpe1}_0} = 6.1 \cdot \text{kW} \quad \text{og} \quad \text{kedel}_1 = 4.3 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$
$$\text{kedel}_1 = 179.585 \text{W}$$

Opstilling 2

$$P_{\text{pumpe2}_0} = 147.8 \frac{\text{kWh}}{\text{day}} \quad P_{\text{pumpe2}_0} = 6.2 \cdot \text{kW} \quad \text{og} \quad \text{kedel2} = 2.268 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$
$$\text{kedel2} = 94.519 \text{W}$$

Opstilling 3

$$P_{\text{pumpe3.1}} = 145.8 \frac{\text{kWh}}{\text{day}} \quad P_{\text{pumpe3.1}} = 6.1 \cdot \text{kW} \quad \text{og} \quad P_{\text{pumpe3.2}} = 4.3 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$$
$$P_{\text{pumpe3.2}} = 179.585 \text{W}$$

Appendiks A3

Økonomien

Vi fandt tidligere prisen for at opvarme huset vha. koksfyret, nemlig **15601 kr pr. år**.

Vi vil nu undersøge hvad prisen er for at få den samme mængde varme ud af en udvalgt varmepumpe, som er opstillet som i opstilling 2.

I denne udregning er der en fast elpris på 1,86 kr/kWh, og en forudprogrammeret varmepumpe, som ved hvor meget varme den skal levere i de forskellige måneder. Varmepumpen yder, når den er tændt, den maksimale effekt.

Varmepumpen udvælges, så dens effekt passer til, at den på en dag i januar skal køre kontinuert.

En varmepumpe som passer til dette kunne være Fighter 1140 8 kW 's, som yder 7,5kW med en COP på 3,5.

$$P_{\text{fighter}} := 7.5\text{kW} \quad \text{COP}_{\text{fighter}} := 3.5 \frac{\text{W}}{\text{W}}$$

	0	
0	148	
1	135	
2	130	
3	86	
4	24	
5	2	$\cdot \frac{\text{kWh}}{\text{day}}$
6	2	
7	2	
8	12	
9	63	
10	99	
11	128	

Antallet af timer som varmepumpen skal køre i døgnet i de enkelte måneder:

$$\tau_{P2} := \frac{P_{\text{pumpe2}}}{P_{\text{fighter}}}$$

	0
0	19.7
1	18
2	17.3
3	11.5
4	3.2
5	0.3
6	0.3
7	0.3
8	1.6
9	8.4
10	13.2
11	17.1

$$\tau_{P2} = \text{hr/day}$$

$$\tau_{P2_total} := \sum \tau_{P2} \cdot \text{mdr} = 3380 \text{ hr}$$

Med COP'en finder vi det totale input til varmepumpen:

$$\tau_{P2_total} \cdot \frac{P_{\text{fighter}}}{\text{COP}_{\text{fighter}}} = 7244 \text{ kWh}$$

Prisen for at have varmepumpen til at køre i et år bliver da:

$$7244 \frac{\text{kWh}}{\text{år}} \cdot 1.86 \frac{\text{kr}}{\text{kWh}} = 13473 \frac{\text{kr}}{\text{år}}$$

Oven i dette lægger vi prisen for at have en elkedel til at varme brugsvandet op.

$$\text{kedel2} = 829 \frac{\text{kWh}}{\text{år}}$$

$$\text{udgift}_{VP} = 829 \frac{\text{kWh}}{\text{yr}} \cdot 1.86 \frac{\text{kr}}{\text{kWh}} + 13473 \frac{\text{kr}}{\text{yr}} = 15015$$

Dvs. at besparelsen ved varmepumpesystem 2 i forhold til koksfyret er

$$\text{Besparelse}_{\text{billig}} := 15601 - 15015 = 586$$

$$\text{Besparelse}_{\text{dyr}} := 21601 - 15015 = 6586$$

Appendiks B

Opstilling af generel model

Ud fra de indsamlede oplysninger om priser på akkumuleringsstanke, varmepumper og el-priser er det muligt at opstille en generel funktionsforskrift for den samlede udgift til varmepumpen i løbet af et år. Alle udgifter er afhængige af størrelsen på varmepumpen, som igen er afhængig af varmebehovet.

Graddagene i hver måned på normalåret fortæller om forbrugsforholdet mellem månederne. Dvs. hvor meget varme er der behov for i februar kontra maj.

Den koldeste måned i normalåret er januar, som det også ses herunder. Det maksimale forbrug på en dag, dvs. varmepumpens effekt, hvis den kun skal køre i 1 time pr. dag, kan findes ved indtastning af årsforbruget:

$n_{GD} := \begin{pmatrix} 525 \\ 480 \\ 460 \\ 302 \\ 79 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 36 \\ 219 \\ 349 \\ 455 \end{pmatrix}$	Antallet af graddage i normalåret:	
		$n_{GD_år} := \sum n_{GE}$
		$n_{GD_år} = 2905$
		forbruget indtastes her:
		$Q_{forbrug} := 25353 \text{ kWh}$

maksimalt forbrug pr. dag: $Q_{max} := \frac{Q_{forbrug}}{2905} \cdot \frac{525}{31}$ $Q_{max} = 147.8 \text{ kWh}$

Den største og mindste varmepumpeeffekt som dækker varmebehovet:

$P_{max} := \frac{Q_{max}}{hr}$	$P_{max} = 147.8 \text{ kW}$	her indtastes en evt. varmepumpestørrelse:
$P_{min} := \frac{Q_{max}}{24hr}$	$P_{min} = 6.16 \text{ kW}$	
		$P_{VP} := 23 \text{ kW}$

Størrelsen af akkumuleringstanken er en funktion af effekten på varmepumpen.

$$V(P) := \frac{\left(\frac{24\text{hr} - \frac{Q_{\max}}{P}}{24\text{hr}} \right) \cdot Q_{\max}}{5K \cdot 1.161 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{L} \cdot K}} \quad V(P_{VP}) = 18644 \text{ L}$$

Prisen på akkumuleringstanke er svingende, men som det ses på Bilag 3 er der tegnet en tendenslinie, som viser en lineær sammenhæng mellem pris og volumen.

$$\text{etableringspris}_{\text{akku}}(P) := V(P) \cdot 2.3748 \frac{1}{\text{L}} + 5474 \quad \text{etableringspris}_{\text{akku}}(P_{VP}) = 49749 \quad \text{kr}$$

Herunder er prisen delt ud på en levetid på 20 år:

$$\text{pris}_{\text{akku}}(P) := \frac{V(P) \cdot 2.3748 \frac{1}{\text{L}} + 5474}{20} \quad \text{pris}_{\text{akku}}(P_{VP}) = 2487 \quad \text{kr}$$

Også for varmepumperne gælder det at priserne er svingende (se Bilag 1), men også her ses der en lineær sammenhæng mellem pris og effekt, som er fastsat vha. en tendenslinie. Den giver at:

$$\text{etableringspris}_{VP}(P) := 2317.4 \frac{1}{\text{kW}} \cdot P + 18203 \quad \text{etableringspris}_{VP}(P_{VP}) = 71503 \quad \text{kr}$$

Herunder er prisen på varmepumpen delt ud på en levetid på 20 år.

$$\text{pris}_{VP}(P) := \frac{2317.4 \frac{1}{\text{kW}} \cdot P + 18203}{20} \quad \text{pris}_{VP}(P_{VP}) = 3575 \quad \text{kr}$$

Den sidste faktor på den samlede udgift til varmepumpen er el-spotprisen, som er en funktion af driftstiden, som er en funktion af effekten. Forholdet mellem driftstiden og effekten er givet ved en omvendt proportionalitet (se Bilag 2):

$$\tau := \frac{Q_{\max}}{P_{VP}}$$

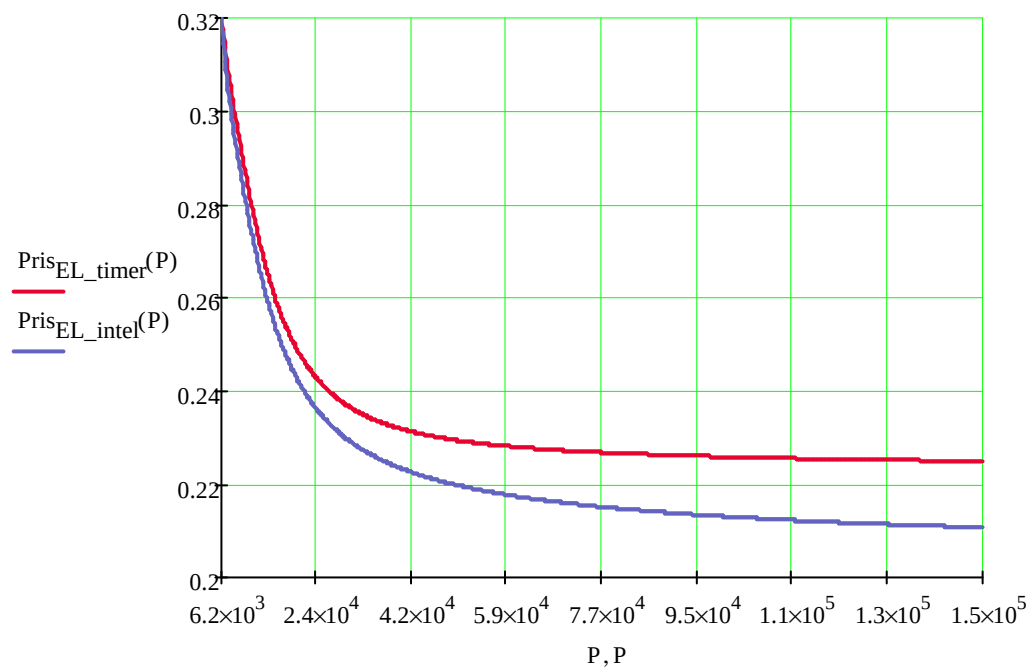
På Bilag 2 ses sammenhængen mellem gennemsnittet af spotprisen i driftstiden og varmepumpens effekt. Der ønskes en approksimation af et polynomium som løber gennem punkterne.

Bilag 2 viser de approksimerede polynomiumer - forskrifterne ses herunder.

$$\begin{aligned} \text{Pris}_{\text{EL_timer}}(P) := & -5.6911 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^6 + 4.3384 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^5 - 1.1845 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^4 \dots \\ & + 1.2641 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^3 - 2.3681 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^2 + 2.0307 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right) \dots \\ & + 0.223 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pris}_{\text{EL_intel}}(P) := & -6.0956 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^6 + 4.8366 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^5 - 1.4063 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^4 \dots \\ & + 1.774 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^3 - 8.8704 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right)^2 + 6.4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P}\right) \dots \\ & + 0.205 \end{aligned}$$

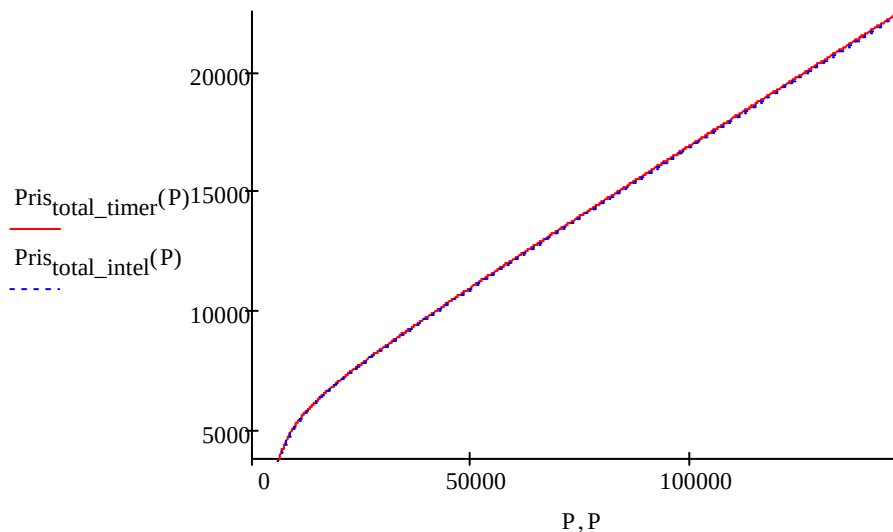
Elpris som funktion af varmepumpeeffekt



Den samlede pris for det forudsatte forbrug på $Q_{\text{forbrug}} = 2.535 \times 10^4 \cdot \text{kWh}$, inkl. akkumuleringstank, varmepumpe (med COP 4,3) og el-forbrug indsat i en samlet formel bliver da:

$$\text{Pris}_{\text{total_timer}}(P) := \text{pris}_{\text{akku}}(P) + \text{pris}_{\text{VP}}(P) + \frac{\text{Pris}_{\text{EL_timer}}(P)}{\text{kWh}} \cdot \frac{Q_{\text{forbrug}}}{4.3}$$

$$\text{Pris}_{\text{total_intel}}(P) := \text{pris}_{\text{akku}}(P) + \text{pris}_{\text{VP}}(P) + \frac{\text{Pris}_{\text{EL_intel}}(P)}{\text{kWh}} \cdot \frac{Q_{\text{forbrug}}}{4.3}$$



Det ses at det til enhver tid er billigst for den private forbruger at købe den mindst mulige varmepumpe.

Kurvens skæring med x-aksen repræsenterer den mindste varmepumpes effekt, nemlig $P_{\min} = 6.16 \text{ kW}$

Dennes y-værdi, er prisen pr. år for at have pumpen og akkumuleringstank installeret samt prisen på el. $\text{Pris}_{\text{total_timer}}(P_{\max}) = 22533 \text{ kr}$ og $\text{Pris}_{\text{total_intel}}(P_{\max}) = 22449$

De samlede startpriser for $P_{\max}$ og $P_{\min}$ er:

$$\text{Pris}_{\text{etab_min}} := \text{etableringspris}_{\text{akku}}(P_{\min}) + \text{etableringspris}_{\text{VP}}(P_{\min}) \quad \text{Pris}_{\text{etab_min}} = 37949 \text{ kr}$$

$$\text{Pris}_{\text{etab_max}} := \text{etableringspris}_{\text{akku}}(P_{\max}) + \text{etableringspris}_{\text{VP}}(P_{\max}) \quad \text{Pris}_{\text{etab_max}} = 424140 \text{ kr}$$