



Vind med en intelligent varmepumpe

Dimensionering, varmetabsanalyse og CO₂-reduktionsberegning for individuelle kompressionsvarmepumper med varmelager med henblik på integration af vindkraft

Retning: Energi
Gruppe: B221
Dato: 15.12.09

INS Basisår

Strandvejen 12-14

9000 Aalborg

Telefon 99 40 97 30

Fax 99 40 97 25

<http://www.tnb.aau.dk>**Synopsis:**

Denne rapport omhandler dimensionering, varmetabsanalyse og CO_2 -reduktionsberegning for individuelle kompressionsvarmepumper med varmelager. Med henblik på integration af vindkraft vil rapporten lægge vægt på den miljømæssige CO_2 besparelse. Ønsket om at implementere varmepumper i energisystemet bunder i 2 ting: Nedbringelse af Danmarks CO_2 emission og løsning til den øgede mængde kritiske eloverløb, der er opstået pga. den stigende mængde vindkraft. Hvis ikke strømmen føres væk fra Danmarks elnet, vil der ske en overophedning og i værste fald vil forsyningskablerne smelte og skilles. Løsningsrummet undersøges og der opstilles en model, hvor man udskifter elvarmeanlæg, naturgasfyr og oliefyr med varmepumper med lager. Varmepumpen bliver i modellen styret af en intelligent elmåler, der sørger for at varme lageret op, når elprisen er lav. Undervejs er der lavet forsøg med varmetab for en kasse, hvor dataene er blevet opsamlet i LabView. Modellerne for lageret og besparelse af CO_2 er designet i henholdsvis Matlab og Excel. Hvis de ca. 800.000 husstande, som opvarmes med elvarme, naturgas og oliefyr, udskifter til en varmepumpe styret af en intelligent elmåler, der sørger for at minimum 50% af energien kommer fra vindkraft, vil der kunne spares 4% af Danmarks samlede CO_2 emission pr. år.

Titel:

Vind med en intelligent varmepumpe.

Tema:

Modeller og Virkelighed

Projektperiode:

P1, Efterårssemesteret 2009

Projektgruppe:

B221

Deltagere:

Anette Thomas Petersen
Mark Myung Dyrvig
Jacob Gert Kristensen
Anders Vendelbo Tomra
Katrine Arnoldsen Juhl
Jon Rasmussen

Vejledere:

Henrik Sørensen
Morten Boje Blarke

Oplagstal: 9

Sidetal: 80

Bilagsantal: 3 + vedlagt cd

Afsluttet den: 15.12.2009

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Enheder

Symboler	Forklaring	Enhed
k	Varmekonduktivitet for kasse/hus	$[\frac{W}{m*K}]$
A	Overfladeareal af kasse/hus	$[m^2]$
t_{slut}	Sluttid	$[s]$
T_{start}	Start temperatur	$[^{\circ}C]$
T_{slut}	Slut temperatur	$[^{\circ}C]$
T_C	Omgivelsernes temperatur	$[^{\circ}C]$
m	Masse	$[kg]$
c	Specifik varmekapacitet for væske	$[\frac{J}{kg*K}]$
l	Tykkelse af beholderens væg	$[m]$
$Q_{tab(ii-1)}$	Den tabte energi til tiden ii-1	$[J]$
$Q_{tab(ii)}$	Den tabte energi til tiden ii	$[J]$
Q_h	Tilført energi	$[J]$
Q_c	Flyttet energi	$[J]$
W	Arbejde	$[W]$
η	Virkningsgrad	
p	Tryk	$[Bar]$
V	Volumen	$[m^3]$ og $[L]$
R	Gaskonstant	$[\frac{J}{Kg*K}]$
dt	Måling pr. sekund	
T_c	Lavest temperatur	$[^{\circ}C]$
T_h	Højeste temperatur	$[^{\circ}C]$
Symbol	Navn	Værdi
kWh	Kilowatt timer	$[10^3]$
MWh	Megawatt timer	$[10^6]$
GWh	Gigawatt timer	$[10^9]$
TWh	Terawatt timer	$[10^{12}]$

Forord

Denne rapport er udarbejdet på 1. semester på Energiuddannelsen ved Aalborg Universitet. *Modeller og virkelighed* er det overordnede tema for projektet.

Forudsætningerne for at læse rapporten er et vist kendskab til programmerne LabView, Matlab og Excel.

Der rettes stor tak til hovedvejleder Henrik Sørensen og bivejleder Morten Boje Blarke, for inspirerende vejledning og konstruktiv kritik. Endvidere rettes en stor tak til Martin Brorsen for råd og vejledning ved programmering i Matlab.

Initierende problem: Hvordan kan energisystemet indrettes mere teknisk og miljømæssigt for at undgå overløb ved mere produktion af vedvarende energi?

Læsevejledning I rapporten vil der være små afsnit med *skråt*, som er indledninger og konklusioner til kapitlerne. Der vil igennem rapporten fremtræde kildehenvisninger, og disse vil være samlet i en kildeliste bagerst i rapporten. Der er i rapporten anvendt kildehenvisning efter Harvardmetoden, så i teksten refereres en kilde med [Efternavn, År]. Denne henvisning fører til kildelisten, hvor bøger er angivet med forfatter, titel, udgave og forlag, mens internetsider er angivet med forfatter, titel og dato. På den vedlagte CD er der screenshots af alle de brugte hjemmesider, kilderapporter, de konstruerede programmer og en pdf-fil af rapporten.

Figurer og tabeller er nummereret i henhold til kapitel, dvs. den første figur i kapitel 7 har nummer 7.1, den anden, nummer 7.2 osv. Forklarende tekst til figurer og tabeller findes under de givne figurer og tabeller.

Anette Thomas Petersen

Mark Myung Dyrvig

Jacob Gert Kristensen

Anders Vendelbo Tomra

Katrine Arnoldsen Juhl

Jon Rasmussen

Indholdsfortegnelse

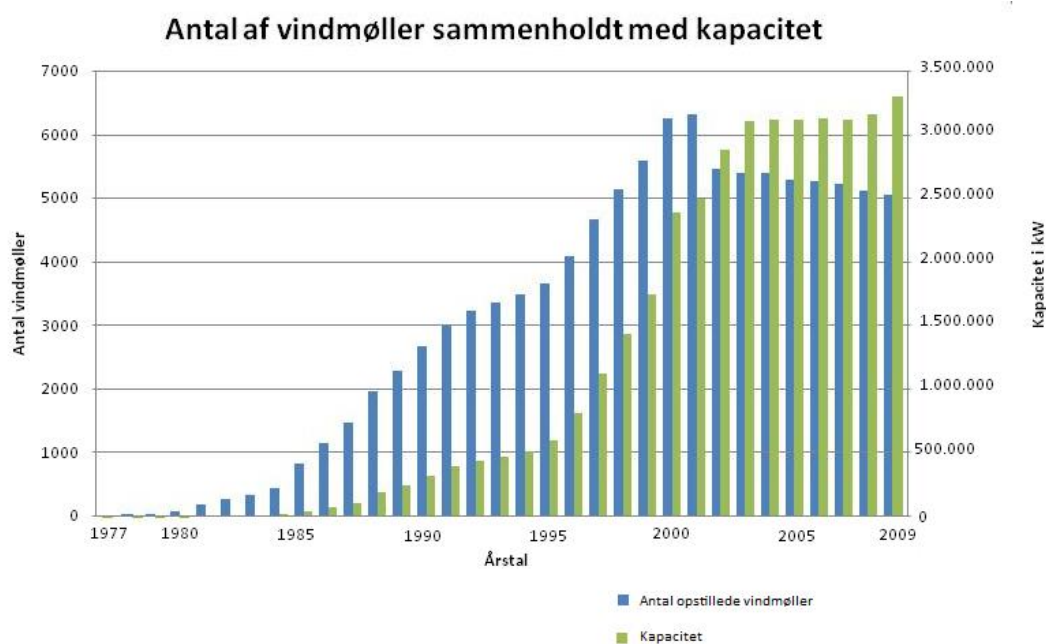
Kapitel 1	Fra vindmølle til forbruger	1
1.1	Udviklingen af vindkraft i Danmark	3
1.2	Eloverløb - et kritisk problem?	5
1.3	Fremtidens eloverløb	7
1.4	Handel med el	9
1.5	Vindens indflydelse på elspotprisen	10
Kapitel 2	Løsningsrum og problemformulering	14
2.1	Problemformulering	17
2.2	Fremgangsmåde	17
Kapitel 3	Varmepumpens muligheder i Danmark	18
3.1	Den intelligente elmåler	20
3.2	Sådan fungerer en varmepumpe	22
3.3	Typer af varmepumper	22
3.4	Teknisk gennemgang af varmepumpen	23
3.5	Varmepumpens energi	27
3.6	Varmepumpers kørsel	29
3.7	Eloverløb og varmepumpen	32
Kapitel 4	Miljømæssige aspekter ved vores løsning	34
4.1	Scenarieanalyse	37
Kapitel 5	Forsøg og virkelighed	42
5.1	Forsøgsopstillingen og beregninger	42
5.2	Forskellige lagerkapaciteter og varmepumpestørrelser	47
Kapitel 6	Model og analyse af varmelag	48
6.1	Dimensionering af lager	49
6.2	Lagdelingens betydning	50
Kapitel 7	Konklusion	55
	Litteratur	56
	Bilag A Vindkraft og husstande	
	Bilag B Målingsdata	

Bilag C Kildekode til Matlab program og Excel program

Fra vindmølle til forbruger

1

I år 1973 og år 1979 blev Danmark berørt af oliekriserne. Det medførte et øget behov for at Danmarks energi ikke skulle være afhængig af olien. I dag i år 2009 står Danmark dog over for et helt andet problem. Efterhånden som Danmark udbygger vindkraften stiger behovet for fleksibilitet på elnettet. Det sker, at vindkraftproduktionen bliver så stor, at Danmark ender med at forære strømmen væk (sælge til under produktionspris) eller bliver nødt til at lukke nogle af kraftværkerne ned. Salget af vindkraft og omkostningerne for forbrugeren behandles sidst i kapitlet.



Figur 1.1. Det ses, at der er sket en udvikling i antallet af vindmøller siden år 1977, hvor der var 2, til i dag, hvor Danmark har 5.057 pr. 29. oktober 2009. Samtidig er kapaciteten for vindmøllerne steget fra 52kW til 3.302.990kW pr. 29. oktober 2009 [Energistyrelsen, 2009a].

Danmarks vindmølleeventyr blev en realitet af flere grunde. Især Gedsermøllen, satsningen efter oliekriserne på kulkraft i stedet for atomkraft og modspillet til regeringens energiplaner har været medvirkende til at skabe grundlaget for vindmøllernes fremgang. I dag er en af de største vindmølleproducenter i verden danske Vestas. Rent geografisk er Danmark et godt sted at placere vindmøller, da det er et forholdsvist fladt land med meget kyststrækning i forhold til landets størrelse.

Det fremgår af figur 1.1, at antallet af vindmøller er faldet i perioden år 2001 til år 2009, hvor antallet er mindsket fra 6305 til 5057. Den teknologiske udvikling har tilladt at mindske antallet af vindmøller da antallet af MW pr. vindmølle er højere end tidligere. Større navhøjder samt flere vindmøller til havs, er de faktorer, som har sikret, at kapaciteten er steget, samtidig med antallet er blevet lavere. Dette har givet en øget produktion af vindkraft, som er vist på figur 1.1

Placeringen af vindmøller

Mange faktorer spiller ind, når fremtidens vindmøller skal placeres. I stedet for at placere dem på land, hvor størstedelen af Danmarks vindmøller står i dag, bliver de istedet placeret ude på havet i store vindmølleparker. De ting, der taler for og imod havbaserede vindmøller er:

- + *Ingen naboer:* Vindmøller er støjende, og det er svært at finde nogen på land, der vil være naboer til dem.
- + *Vinden:* De havbaserede vindmøller drager nytte af, at der er mere vind på havet end på land. Desuden er der mere jævn vind, hvilket gør vindmøllerne mere stabile, og de bliver derfor belastet i en mindre grad end på land.
- + *Udbyttet:* Energiproduktionen er 50% større for en vindmølle placeret på havet i forhold til en tilsvarende mølle på land [Danmarks Vindmølleforening, 2009a].
- ÷ *Omkostningerne ved opførslen:* Der er større omkostninger ved opsættelsen af havvindmøllerne. Hele fundamentet skal kunne holde til bølgerne, og der skal føres kabler ind til fastlandet. Ved at samle vindmøllerne i store parker kan nogle af udgifterne formindskes. Det er økonomisk set lige meget, om man skal have et skib til at lægge et kabel ud, der har en stor diameter eller en lille diameter.
- ÷ *Service:* Det er dyrere at lave service på havvindmøllerne i forhold til på land, ganske enkelt fordi de ligger ude på havet.

Alt i alt er der større udbytte ved havvindmøllerne, men det er ofte mere rentabelt at opstille møllerne på land. Så afhængigt af om kapacitet eller pris bliver prioritetet højest, bliver møllerne opsat forskellige steder. Der er efterhånden sat en del store havbaserede vindmølleparker op pga. det store energiudbytte, som de giver. Her kan nævnes Horns Rev II, der er den seneste.

Det fremgår af tabel 1.1, at der er 9 havbaserede vindmølleparker i Danmark i år 2009, som i alt har en samlet kapacitet på 631MW. Der er yderligere planlagte parker under konstruktion, f.eks. Rødsand II, som vil have en effekt på 207 MW. Den ventes efter planen at stå klar i år 2011. De planlagte havparker er beskrevet i tabel 1.2.

Sted	Kapacitet i MW	Ejer
Vindeby (1991)	5	Dong Energy
Tunø Knob (1995)	5	Dong Energy
Middelgrunden (2000)	40	Middelgrundens vindmøllelaug og Dong Energy
Horns Rev I (2002)	160	Dong Energy og Vattenfall
Rønland (2003)	17	Lokalt vindmøllelaug
Nysted (2003)	165	Dong Energy og E.on
Samsø (2003)	23	Samsøkommune, private, et lokalt laug og et laug med andelshavere
Frederikshavn (2003)	7	Dong Energy, Aalborg universitet m.fl.
Horns Rev II (2009)	209	Dong Energy
Samlet	631	

Tabel 1.1. Havbaseret vindmølleparker i Danmark pr. 29. oktober 2009 [Energistyrelsen, 2009a].

Det fremgår af tabel 1.2, at Danmark har planer om at udvide med 638MW havbaseret vindkraft, hvilket er en fordobling på havet. Den samlede kapacitet af den havbaserede vindkraft vil i år 2012 være 1270MW. Danmark har i fremtiden ambitioner om at nedbringe antallet af vindmøller markant, samtidigt med at man opstiller nye møller, som er langt mere effektive [Transport- og Energiministeriet, juni 2005].

Sted	Kapacitet i MW
Avedøre holme (2009/10)	10 til 13
Sprogø (2009)	21
Rødsand II (2010)	207
Anholt (2012)	400
I alt	641

Tabel 1.2. Planlagte opførelser af havbaseret vindmølleparker [Energistyrelsen, 2009a].

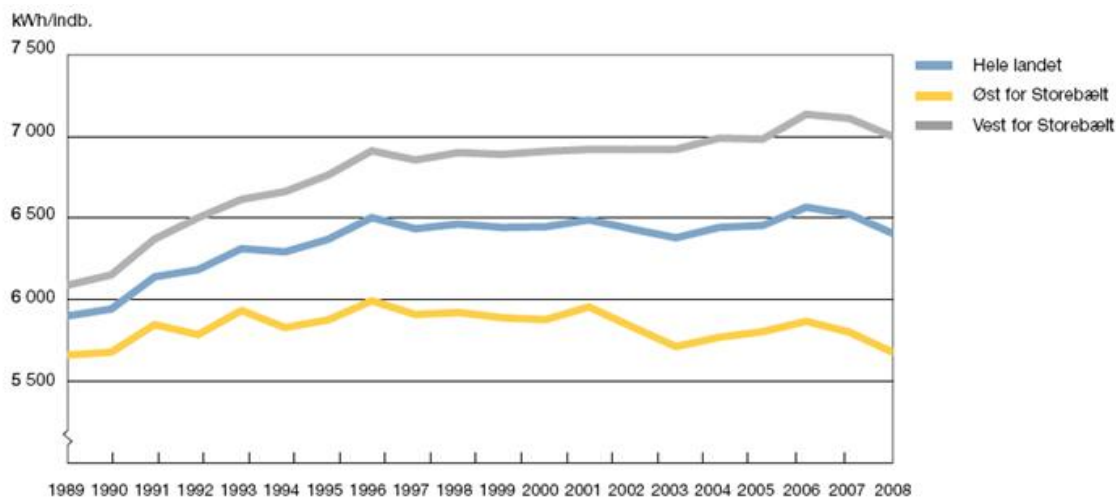
Opsummeret er der sket en teknologisk udvikling, hvor man gennem de sidste 4 årtier har opført flere og flere vindmøller, tendensen er nu vendt således at man opfører langt færre vindmøller, men dem, der kommer op, er mere effektive, så kapaciteten bliver højere.

1.1 Udviklingen af vindkraft i Danmark

Man kunne spørge sig selv: Hvorfor satser Danmark på vindkraft? Udover de førnævnte fordele ved Danmarks geografi og at Vestas er et dansk selskab, så er der flere grunde til, at Danmark skal have dækket mere af elektriciteten fra vind. Danmark har en ambition om at nedbringe forbruget af fossile brændstoffer, da de fører til udledningen af drivhusgasser, som har en indflydelse på den globale opvarmning. Især CO_2 er en af de problematiske gasarter, der er restprodukt ved afbrænding af fossile brændsler. I stedet for de fossile

brændstoffer vil man erstatte dem med vedvarende energikilder, hvor vindkraft er en af dem [Transport- og Energiministeriet, juni 2005]. Der er kun en begrænset mængde af de fossile brændstoffer, og det medfører, at de i fremtiden vil blive en mangelvare med prisstigninger til følge, hvis forbruget fortsætter som hidtil.

Det fremgår af figur 1.2, at forbruget pr. indbygger er steget fra 5900kWh i år 1989 til 6400kWh i år 2008. Man må forvente, at behovet vil blive ved med at stige i takt med, at danskernes hverdag bliver mere og mere automatiseret af elektroniske apparater.



Figur 1.2. Udvikling af el-forbrug fra år 1989 til år 2008. Det er et gennemsnit pr. indbygger i hele landet, derfor ligger kurven for hele landet samlet set i midten af Vest- og Østdanmark [Dansk Energi, 2009b].

Danmarks officielle målsætning

I rapporten "Energistrategi 2025- Perspektiver frem mod 2025 og Oplæg til handlingsplan for den fremtidige el-infrastruktur" udgivet af Transport- og Energiministeriet [juni 2005] står der på side 8 under "Regeringens energistrategi – kort fortalt:"

„.... stiger andelen af vedvarende energi i el-forsyningen til over 36% i 2025. Vindkraft vil udgøre en stor del af stigningen.“

Det kan derfor antages, at op mod 36% af Danmarks elforsyning vil være dækket af vindkraft i år 2025.

Fremtids scenarie fra Dansk Vindmølleforening

Danmarks Vindmølleforening har lavet en prognose for vindmøllernes udvikling i Danmark. De mener, at de fleste af de nuværende vindmøller vil være udskiftet inden år 2025. Dette vil gradvist ske med færre, men mere effektive møller både på land og på vand. Her tænkes især på havvindmøller, som giver en større energiydelse. Havvindmøller har også færre samfunds- og miljøpåvirkninger end landvindmøller.

Dansk Vindmølleforening forventer, at næste generation af vindmøller kan have en kapacitet, der er stor nok til at dække 50% af Danmarks forventede el-forbrug i år 2025. Dansk Vindmølleforening vurderer, at Danmarks energiforbrug stiger til 37.754GWh [Danmarks Vindmølleforening, 2009b]. Dansk Vindmølleforening forudsætter,

at møllestørrelserne på land bliver hhv. 1MW, 1,5MW og 2,5MW. Landvindmøllernes størrelse bliver begrænset af lokalplanerne i de enkelte kommuner, og det vurderes derfor, at på trods af den teknologiske udvikling, så vil det kun være på få udvalgte områder, at større landvindmøller vil blive opsat. Størrelsen på havvindmøllerne er blevet vurderet til 4 og 6 MWh, for hhv. møller opsat i Vest- og ØstDanmark [Danmarks Vindmølleforening, 2009b].

Som det fremgår af figur 1.3, så stiger det samlede el-forbrug til 37.754GWh. Man kan se på figur 1.3 at antallet af landvindmøller falder markant fra 4667 i år 2010 til 1230 i år 2025, hvorimod antallet af havvindmøller stiger fra 314 i år 2010 til 513 i år 2025. Altså et samlet antal af vindmøller på 1743, hvilket er lavere end de nuværende 5200. De opstillede vindmøller vil i år 2025 producere 18.821 GWh, hvilket svarer til at de dækker 50% af det forventede samlede el-forbrug [Danmarks Vindmølleforening, 2009b].

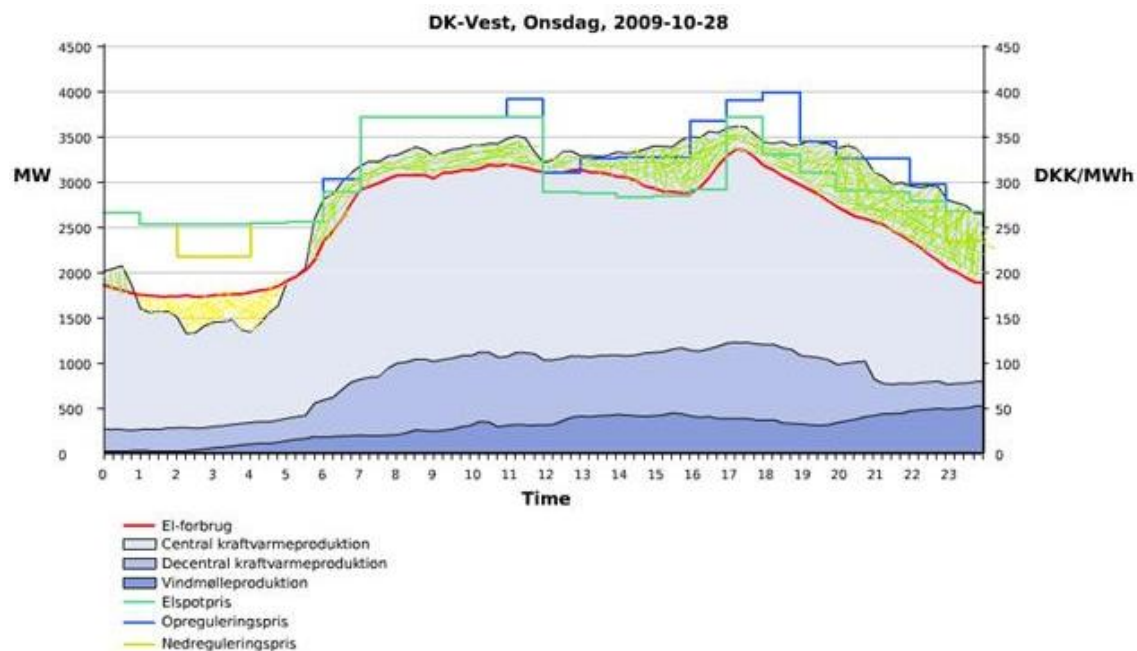
Årstal	Vindmøller på land	Vindmøller på havet	Antal i alt	MW i alt	GWh vindkraft	Elforbrug	vindkrafts dækning af forbrug
2010	4430	314	4744	3931	10 481	35 033	29,90 %
2011	4214	303	4517	3973	10 635	35 208	30,20 %
2012	4093	353	4446	4333	12 224	35 384	34,50 %
2013	4027	304	4331	4702	13 737	35 561	38,60 %
2014	3944	403	4347	4749	13 918	35 739	38,90 %
2015	3843	443	4286	5070	15 399	35 917	42,90 %
2016	3471	443	3914	4954	15 216	36 097	42,20 %
2017	2961	443	3404	4744	14 817	36 278	40,80 %
2018	2529	508	3037	4917	16 082	36 459	44,10 %
2019	2126	508	2634	4699	14 688	36 641	42,80 %
2020	1446	553	1999	4548	16 391	36 824	44,50 %
2021	1365	553	1918	4537	16 477	37 009	44,50 %
2022	1124	547	1671	4531	17 131	37 194	46,10 %
2023	1143	446	1589	4386	16 547	37 380	44,30 %
2024	1182	513	1695	4882	18 568	37 566	49,40 %
2025	1230	513	1743	4982	18 871	37 754	50,00 %

Figur 1.3. Danmarks vindmølleforening plan for realiseringen af ambitionen om 50% vindkraft i 2025 [Danmarks Vindmølleforening, 2009b].

Af hensyn til miljøet og den forventede begrænset rådighed af fossile brændsler vil Danmark satse på mere vedvarende energi. Det ventes, at danskerne kommer til at forbruge mere strøm i fremtiden, og at vindmøllerne vil producere op mod 36% af Danmarks energi i år 2025 ifølge den officielle målsætning for Danmark.

1.2 Eloverløb - et kritisk problem?

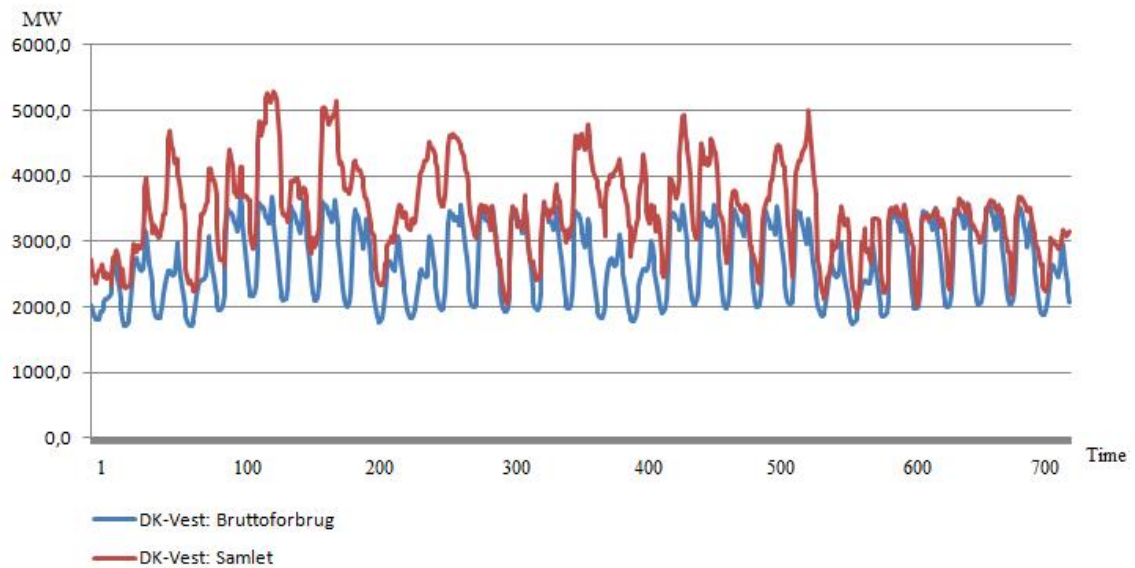
Det ventes, at vindmøller skal stå for en større andel af energiproduktionen, selvom de er en diskontinuert energikilde. Vindkraft giver et svingende udbytte, da det ikke blæser lige meget døgnet rundt. Et svingende udbytte kan udnyttes gennem import og eksport med nabolandene (se kapitel 1.3 Fremtidens eloverløb og kapitel 1.4 Handel med el).



Figur 1.4. Eludbud, pris og elforbrug den 28. oktober 2009 [EMD International A/S, 2009].

Dette svingende udbytte er illustreret i figur 1.4, hvor den røde graf beskriver el-forbruget over døgnet 28. oktober 2009. Det mørkeblå område illustrerer vindkraften og de lyseblå områder illustrerer hhv. decentrale og centrale kraftværker. Det fremgår, at forbruget ikke har korrelation med den samlede mængde produceret el. Vindkraften kan ikke forudsiges præcist, og derfor opstår der usikkerhed om, hvor meget elektricitet der skal produceres af kraftværkerne. Dette giver flere tilfælde, hvor udbuddet af el er højere end forbruget (illustreret med grøn) og tilfælde, hvor forbruget er højere end udbuddet af el (illustreret med gul skravering). Eloverløb opstår de dage, hvor det blæser meget (det grønne område er stort), men hvor forbruget er normalt. På figur 1.4 udgør vindkraftproduktionen ikke en stor del af den samlede energiproduktion.

Hvis man i stedet for at se på et døgn, ser på en hel måned, kan man på figur 1.5 se forskellen på det producerede el og elforbruget pr. time over januar måned i år 2009. Med udregninger i Excel bliver korrelationsværdien 0,67, og det er denne korrelation, man har ønske om at forhøje, og i den ideelle verden få lig 1. Dvs. at udbud og efterspørgsel følger hinanden. Det vil være økonomisk rentabelt at løse dette problem, da man bedre kan udnytte al den strøm, der bliver produceret.

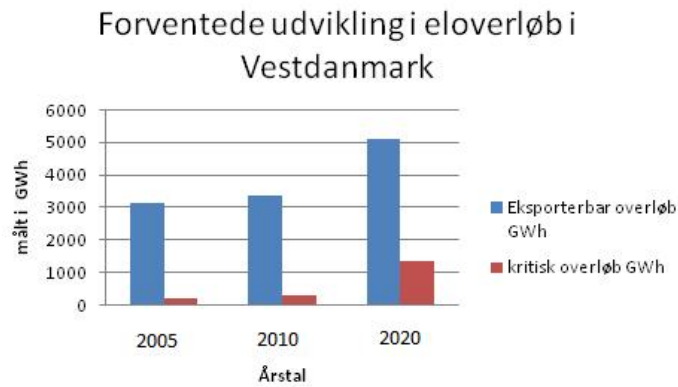


Figur 1.5. Punktserie over samlet el-produktion og el-nettoforbrug i Vestdanmark i januar år 2009 [Energinet.dk, november 2009].

Definition: Der er tale om eloverløb, når udbuddet af el er større end forbruget. Hvorvidt det er kritisk eller noget man kan løse er beskrevet i det følgende. Ligeledes vil det være interessant at undersøge, hvad man kan gøre for at få forbruget til at følge udbudet eller omvendt.

1.3 Fremtidens eloverløb

I år 2009 kan det ses, at der opstår større ulighed mellem elforbruget og den tilgængelige elektricitet fra vindmøllerne. Efterhånden, som Danmark øger sin afhængighed af vindkraft, vil denne ulighed stige. Ved overproduktion af vindkraft eksporteres det overskydende el til udlandet. Ligeledes importeres der fra udlandet, når der er en underproduktion af vindmøllestrøm, hvilket forekommer, når det ikke blæser tilstrækkeligt. Danmark eksporterer ofte strømmen, når nabolandene har brug for den og de betaler for at få den. Dette giver penge i statskassen. Økonomisk set opstår der et dilemma, fordi det sker, at nabolandene får strømmen gratis, hvis nabolandenes behov ikke er stort. Prisen bliver derfor presset helt i bund [Arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsen, 2001].

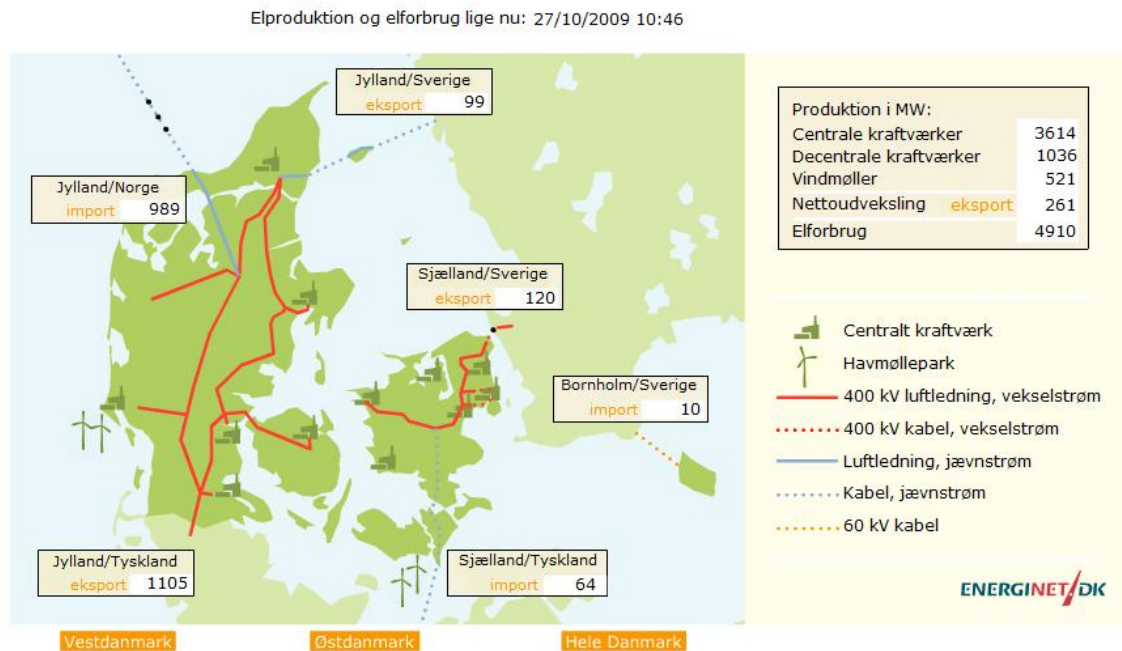


Figur 1.6. Udviklingen i el-overløb. Grafisk repræsenteret [Energistyrelsen, 2009a].

Som beskrevet er det muligt at eksportere den overskydende strøm ved eloverløb i langt de fleste tilfælde i dag. Der findes også tilfælde, hvor eloverløbet bliver så stort, at det ikke er teknisk muligt at eksportere det hele, og dette kaldes for kritiske eloverløb. Hvis dette forekommer, bryder elsystemet sammen. Energinet.dk er i disse situationer nødt til at reducere produktionen ved at stoppe et kraftværk eller stoppe en hel vindmøllepark. [Arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsen, 2001]. Det ses på figur 1.6, at den stigende udvidelse af el fra vindmøller, vil medføre både et større eksporterbar overløb samtidig med, at der bliver flere kritiske eloverløb. Udviklingen af vindkraften kan medføre, at elspotprisen oftere går i nul, når der bliver mere eksporterbar strøm. At mængden af kritiske overløb stiger, vil medføre, at Danmark i perioder ikke kan eksportere sig ud af problemet [Arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsen, 2001].

Hvis Danmark fortsætter med at udbygge vindmøllernes andel af elproduktionen, vil der i fremtiden opstå flere eloverløb, hvor nogle af dem vil være kritiske. Det kan blive et omfattende problem, og det er derfor vigtigt, at Danmark allerede inden vindmøllernes andel er fuldt udbygget til op mod 36%, har svaret på, hvad Danmark vil gøre med den ekstra energi, der opstår ved eloverløbene.

1.4 Handel med el



Figur 1.7. Danmarks import og eksport af strøm til og fra vores nabolande [Energinet.dk, 2009].

Eksporten af el til udlandet sker ikke kun, når det danske elnet er tæt på et kritisk eloverløb. Det sker hver eneste dag, at man regulerer belastningen på elnettet ved at sælge og købe el. I Danmark stræber man ikke kun efter at producere strøm nok til at dække Danmarks behov, hvis det er gunstigt at producere mere, gør producenterne det, hvorefter de sælger strømmen til vores nabolande. Det omvendte er også tilfældet, hvor Danmark køber strøm fra nabolandene, hvis det er mere gunstigt at importere end selv at øge produktionen. Denne regulering sker døgnet rundt, og man arbejder for at optimere energinudbudet til at passe med behovet i Danmark. På figur 1.7 kan man se et øjebliksbillede af denne produktion og hvordan man har reguleret forskelligt i Øst- og Vestdanmark i forhold til, om man importerer eller eksporterer. Prisen på el-markedet bliver fastsat hver dag kl. 13.00. Det udmeldes, hvordan priserne vil komme til se ud time for time det næste døgn. Inden da har alle aktørerne (udbydere og køberne) på markedet indsendt deres tilbud for det næste døgn til Nord Pool. Markedsprisen bliver her dannet også kaldet spotprisen. Nord Pool er børsen for elektricitet i Danmark, Norge, Sverige og Finland, og de har to slags markeder, man kan handle hos. Den ene er spotmarkedet, hvor man afgiver ordrer og tilbud dagen inden, de er gældende. Den anden er Elbas, hvor man afgiver ordrer senest en time inden, de skal være gældende. Derudover er der også regulerkraftmarkedet, som Energinet.dk sætter i udbud en gang om måneden, hvor lavestbydende får lov til at stå klar til at øge produktionen eller sænke produktionen ca. 1 minut inden det skal være gældende, hvis det er nødvendigt. Hvis vindkraftberegningerne slår fejl, og Danmark derfor sætter regulerkraftsmarkedsbyderen til at opjustere for at dække behovet.

Der handles med el døgnet rundt. For den enkelte forbruger er elspotprisen interessant.

Børsen for elektricitet i Danmark, Norge, Sverige og Finland kaldes Nord Pool og elspotpriserne bliver fastsat hver dag kl. 13.00, for det følgende døgn. Det er ikke kun på elspotmarkedet som handles, Reguleringsmarkedet handles helt ned til et minut for strømmen skal anvendes.

Sådan fungerer spotmarkedet Priserne på spotmarkedet bliver fastlagt dagen inden, de er gældende. Alle udbydere og køberne af strøm afgiver deres bud for de næste 24 timer på timeniveau. Prisniveauet bliver fundet i en balance mellem udbud og efterspørgsel. Elspotprisen er den laveste pris hvorved, det er muligt at opfylde alle købstilbudene. Den pris bliver den gældende for alle, selvom nogen har budt lavere på en del af opgaven. Når alle udbydere får den samme pris vil det være klogest for nogle af udbydere at underbyde, fordi de så er garanteret at få solgt deres strøm. Det gælder f.eks. vindmøllejerne, hvor det er besværligt at lukke vindmøllerne ned, i forhold til at få den gængse pris på spotmarkedet. Derudover har nogle vindmøllejere lavet en aftale med Energinet.dk, om at de får en specifik pris pr. kWh, de leverer. Det gør, at de får et tilskud, hvis deres strøm bliver solgt for billigt, men samtidig får de ikke del i overskudet, når deres strøm bliver solgt dyrere end aftalt [Andersen, 2009].

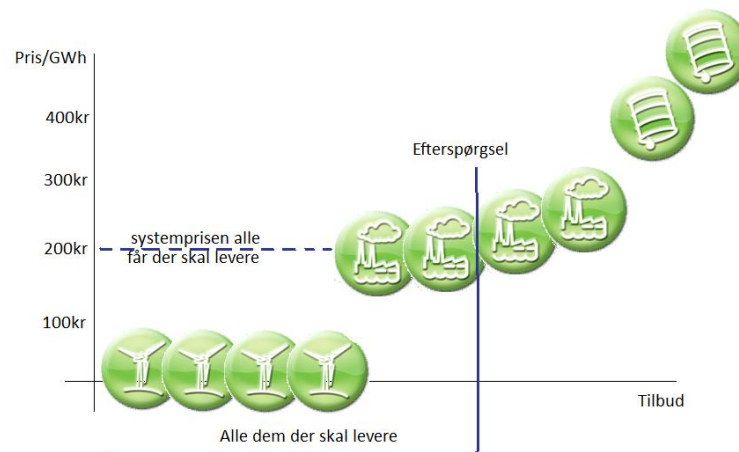
Elbas

Da der kan opstå uventede behov eller fejlberegninger, er der mulighed for at handle med strøm frem til en time, inden den skal benyttes. Tidsgrænsen på en time er nødvendigt, da eksportøren skal kunne regulere deres produktion. Denne handel kan kun ske såfremt, at der er plads på elnettet til den. Det vil sige, at hvis der allerede på spotmarked er indgået en aftale om, at Danmark leverer det maksimale, som nettet kan bære til Sverige, kan det ikke lade sig gøre at handle med Sverige for at eksportere mere strøm. Der opstår så en såkaldt flaskehals, og prisen vil derfor være lavere i Vestdanmark end resten af Skandinavien.

For at vindmøllejerne er sikker på at sælge deres strøm, vil de i mange tilfælde underbyde udbudsprisen, for at være sikker på at få deres strøm solgt. Strømmen bliver solgt til en pris, når det er muligt at opfylde alle købstilbudene. Hvis der genereres for meget strøm, og Danmark ikke kan eksportere mere til udlandet pga. at der i forvejen bliver eksporteret den højeste mængde strøm, vil der opstå flaskehalse, som overopheder forsyningskablerne.

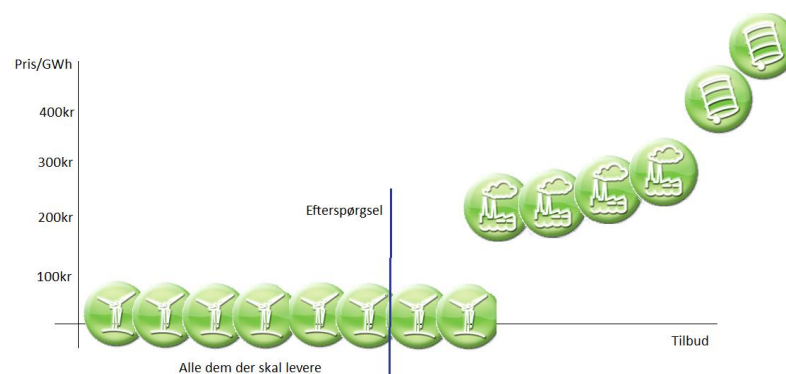
1.5 Vindens indflydelse på elspotprisen

Da vindmøllerne gerne vil være sikre på at sælge deres strøm, vil de oftest byde meget billigt som set på figur 1.8. Kulkraftværkerne vil oftest have en aftale om, at deres minimums kørsel bliver solgt til det lokale fjernvarme anlæg til en god pris, således at de er sikret på at køre, og derved slipper for at skulle lukke helt ned, hvis der kommer kritiske eloverløb [Andersen, 2009]. Det ses endvidere på figur 1.8, at alle de udbydere, der får solgt deres strøm får den samme pris pr. GWh, hvilket er i vindmøllejernes fordel, når de underbyder.



Figur 1.8. Billede af de bud, der kommer ind fra vindmøller, kraftværker og gasturbiner. Vindmøllerne byder lavt for at være sikre på at sælge strømmen.

Stigningen i udbudsprisen fra kraftværkerne er et udtryk for at kraftværkerne har differentieret deres priser efter, hvor meget de skal leverer. Hvis de skal køre med 50% last er prisen det her, hvis de skal gå helt op til 80% last, skal de have flere penge for de resterende 30%, og hvis de skal helt op og køre på fuld last skal de have endnu mere [Andersen, 2009]. Tønderne på figuren er gasturbiner, der findes rundt om i landet, som gerne vil gå i gang, når prisen er høj nok, da de den vej så kan tjene sig selv ind, og ikke behøver at køre på et minimum hele tiden som kraftværkerne [Andersen, 2009]. Når vinden blæser rigtig meget, uden der dog er tale om et kritisk overløb, vil antallet af vindkraftsudbud i bunden af figuren stige. Det vil betyde, at en større andel af den strøm, der bliver solgt vil komme fra vindmøller, og derfor vil strømmen, der bliver solgt ved eloverløb ofte være mere miljøvenlig, end strømmen, der bliver solgt på andre tidspunkter. Ved et kritisk eloverløb vil udbudet nærmere ligne figur 1.9. Efterspørgelsen er ikke stor nok til at matche udbudet fra vindmøller, og udover at en stor del af strømmen bliver solgt til under produktionspris, skal man også ind og lukke ned for nogle af vindmøllerne, da man ellers vil have et sammenbrud på nettet pga. for meget strøm.



Figur 1.9. Da vindmøllerne opfylder mere end efterspørgelsen, bliver nogle af vindmøllejerne nødt til at lukke ned. Da prisen på vindmølleproduktionen er højere end salgsprisen vil der i dette tilfælde være tab.

De fleste kontrakter, der indgås handles til systemprisen. Det sker, at prisen ikke er den samme overalt i Skandinavien. Hvis vinden blæser rigtig meget i Danmark, og elproduktion derfor går kraftigt op på grund af vindkraftproduktionen, vil man sælge så meget, man kan til udlandet. I Danmark kommer der også ofte udsving i prisen pga. at Øst- og Vestdanmark er to systemer. Der bygges allerede nu på en forbindelse mellem Øst- og Vestdanmark og det forventes at den vil være færdig i år 2010 [Andersen, 2009].

Vindkraften har direkte indflydelse på, hvordan prisen ændrer sig på spotmarkedet, da der ved høj vindkraftproduktion vil være en større andel vind, der bliver solgt. Deraf vil der ikke være behov for kulkraften, og man vil ikke komme så højt op prismæssigt i deres udbud.

Prisen for den enkelte forbruger Når danskerne i dag køber strøm, bliver de fleste afregnet til en gennemsnitspris af deres elselskab. Forbrugerne har derfor ingen fordel af at gå ind og bruge en masse strøm, når vi er tæt på et eloverløb. Man kan også vælge at blive tilsluttet til en variabel pris, som følger spotmarkedet. Det afhænger af, hvilket selskab og bindingstype man vælger. Liberaliseringen af el-markedet i slutningen af 1990'erne medførte, at forbrugerne selv kan vælge el-leverandør. Hvis man ikke benytter dette valg, er man sikret el-leverance fra det lokale elselskab. Fælles for alle kunder er dog, at man skal betale en afgift til det lokale netselskab. Netselskabet er dem, der er ansvarlige for at kabler og ledninger fungerer, og de stiller elnettet til rådighed for elselskabet.

Der betales en abonnementspris, som dækker over det, det koster at være tilsluttet som kunde på elnettet og nettatrukker, der er en pris pr. kWh, man bruger. Udover de faste udgifter opkræver netselskabet afgifter på statens vegne. Der er tale om elafgift, eldistributionsafgift, elsparebidrag, CO₂-bidrag og moms. Afgifterne beregnes som en pris pr. kWh. Dette er vist i et eksempel på elprisens sammensætning i tabel 1.3. Samlet set udgør ca. 70-80 procent af en almindelig husstands elregning udgifter, som man ikke kan ændre ved at skifte hverken selskab eller bindingsmetode. Hvis man ser det i forhold til, at der ikke er store udsving på spotmarkedet, vil gennemsnitsprisen i forhold til elspotprisen ikke betyde det store for forbrugeren medmindre vedkommende er meget opmærksom på kun at handle, når prisen er meget lav. At flytte alt forbruget til et billigere tidspunkt, er ikke realistisk. Det kan forventes, at forbrugeren kan få en besparelse på op mod ca. 10% af elregningen ved at ændre forbrugsvaner.

Produkt	øre/kWh
Betaling til leverandør	
Betaling for el	33,69
Øvrige omkostninger	0,25
Abonnement	1,89
Moms (25,00 %)	8,96
I alt	44,79
Betaling til netselskabet	
Transportbetaling - lokalt net	11,73
Trans. - overliggende net	7,50
Offentlige forpligtelser (PSO)	12,86
Abonnement	15,85
Effektbetaling	0,00
Moms (25,00 %)	11,99
I alt	59,93
Afgifter (opkræves via netselskabet)	
Elafgift	55,00
Eldistributionsafgift	4,00
Elsparebidrag	0,60
CO2-afgift	8,90
Moms (25,00 %)	17,13
I alt	85,63
Pris pr. kWh:	190,34

Tabel 1.3. Eksempel på elregning. Der er regnet med et årligt forbrug på 4000kWh, og tallene er et gennemsnit fra 4 forskellige selskaber i 5 forskellige byer (Frederiksberg, Odense, Århus, Aalborg og Esbjerg), hvor forbrugeren bliver afregnet til en fast elpris på årsbasis.

Hvis mængden af eloverløb stiger, vil det få en indflydelse på systemprisen på el, og Danmark vil i endnu højere grad end i dag, sælge strømmen til under produktionspris, til nabolandene. At få forbrugerne til at ændre forbrugsvaner, for at få dem til at bruge mere strøm, når prisen er lav, er en mulighed. Når 70-80% af elregningen alligvel er afgifter, er det ikke her, at man vil forvente, at den største motivation til at gøre noget ved eloverløbene skal findes.

Løsningsrum og problemformulering 2

Dette kapitel fokuserer på løsningsrummet for, hvordan man i fremtiden kan afhjælpe problemet med eloverløb. Hver enkelt løsning vurderes i forhold til økonomi, ressourcer og CO₂ besparene potentiale. Derefter kommer problemformuleringen og til sidst afsluttes med fremgangsmåden for resten af rapporten.

Efter at have set på nogle af de problemer der er forbundet med vindkraft, mulighederne for handel med el og måden, det danske elsystem er indrettet på, vil der arbejdes videre med en løsning, der kan hjælpe på problemet med eloverløb.

Der ses på fire forskellige løsninger på problemet:

- Danmark kan forære strømmen til nabolandene.
- Danmark kan lukke dele af produktionen ned for at afstemme niveauet efter forbruget.
- Danmark kan øge forbruget således, at det matcher produktionen.
- Danmark kan lagre elektriciteten, når der er eloverløb, og bruge det, når der er mangel på el.

At forære strømmen eller sælge den til under produktionspris til nabolandene er et spild, når det er Danmark, der har brugt penge på at udbygge elnettet og vindmøllerne. Derudover har der været enkelte sager, hvor man har betalt nabolandene for at tage imod den overskydende strøm. Denne løsningsform bør kun benyttes, hvis det er billigere end at nedregulere produktionen. Hvis man ender med at betale for at få nogen til at aftage strømmen, er det bedre for Danmark, hvis det bliver danske forbrugere og virksomheder. De skal betale afgifter til den danske stat, hvorimod nabolandene ikke betaler noget. I figur 1.6, der bygger på fremskrevne tal fra Energistyrelsen, forudsiger Energistyrelsen, at der vil komme en stor stigning i eloverløb, samt at Danmark får flere kritiske eloverløb. Årsagen til stigningen er den allerede planlagte udvidelse af vindmølleparkerne (se figur 1.2), og ambitionerne om en udvidelse af vindkraftbaseret el til op mod 36% i år 2025. Danmark kan ikke eksportere sig ud af kritiske eloverløb- og derfor er det ikke muligt at forære strømmen væk. Man kan betragte det, at forære strømmen væk, som en midlertidig løsning, der ikke er holdbar i fremtiden. Den CO₂ neutrale vindmøllekraft bliver brugt -

bare ikke af danskerne. Så det er stadig positivt for miljøet. Et modargument til dette er, at de lande, der modtager el fra de danske eloverløb, ikke er engagerede i selv at producere vedvarende energi, fordi de får det fra Danmark. På den måde vil det at sælge strømmen til under produktionspris væk være en ulempe for miljøet.

At lukke ned er teknisk set en besværlig løsning. Hvis man kigger på kraftværkerne, så tager det tid og koster penge at lukke ned, og det tager tid og koster penge at få kraftværkerne op og køre igen. Dette er ikke økonomisk rentabelt, medmindre man bliver nødt til det for at undgå kritisk eloverløb. Ved eloverløb skal man reagere hurtigt, og derfor virker løsningen med at lukke ned for kraftværkerne ikke, da det tager 3 dage for et kraftværk at lukke ned og 3 dage at starte op. Man kan i stedet stoppe vindmøllerne ved eloverløb. Pointen med vindmøller er dog, at de skal producere CO_2 fri el. Hvis denne løsning bliver gældende vil flere af de opstillede vindmøller komme til at stå stille en del af tiden. Det vil ikke være rentabelt at bruge penge på at opstille vindmøller, hvis de en del af tiden ikke er i brug. Det vil medføre, at møllerne ikke bliver sat op, og ambitionen om op mod 36% vindkraftbaseret el ikke bliver en realitet. Derfor er det at lukke ned heller ikke en holdbar løsning for hverken kraftværker eller vindmøller.

At øge forbruget vil sige, at man i perioder med eloverløb hæver forbruget af el, således at der er en større korrelation imellem udbud og efterspørgelsen. Dette stiller krav til, at der er forbrugere, der er i stand til at reagere hurtigt og fleksibelt, hvis behovet opstår. Hermed flytter forbrugerne eller virksomhederne noget af deres elforbrug til perioder, hvor der er eloverløb. Denne løsningsform vil være den mest attraktive, da man så udnytter vindkraften til noget, der alligevel ville være brugt energi på. I det følgende vil der blive præsenteret flere forskellige muligheder for at øge forbruget:

- **Brint- og elbilsamfund:** Hvis der i fremtiden bliver flere husstande, der får biler, som enten helt eller delvist kører på el, vil der være et større behov for at lade bilernes batterier op. Et af projekterne, der er i gang, hedder Edison-projektet, som er startet af Dong Energy og californiske Better Places. Deres idé er, at en privatperson med en elbil sætter den til at oplade om natten, hvor forbruget er lavt, og på den måde stabiliserer elnettet. En intelligent elmåler kan ud fra prisen holde øje med produktionen fra vindmøller. Elmåleren kan afbryde en opladning, når prisen er for høj og omvendt starte opladning, når der er en høj produktion af el og derved lav pris [Energinet.dk, februar 2009a].

Et forslag, der vil gøre det mere attraktivt at eje en elbil, er ved at bruge dem som energilagere. Når der er overproduktion af strøm fra vindmøller, så sættes elbilerne til at oplade, og når der er en lav produktion fra vindmøllerne, så sættes elbilerne til at afgive strømmen til elnettet igen. Ejerne af disse elbiler kan på denne måde tjene penge ved at fungere som et el-lager [Schaltz, 23. oktober 2009]. At en elbil udover at skulle kunne køre også skal bruges som el-nettets lagre, stiller store krav til dens batteri. Et eksperiment med denne idé vil blive foretaget på Bornholm i år 2011. En sådan løsning virker holdbar, men der skal ske en udvikling i batteriteknologien, samt findes på løsninger til, hvordan opladningen skal foregå på infrastrukturplan. Løsningen vil samtidig være miljømæssig gavnlig, da elbiler i så fald vil erstatte

benzin og diesel drevne biler, som udleder meget CO_2 . Den miljømæssige fordel vil samtidig stige i takt med, at der bliver sat flere vindmøller op, da en større del af elproduktionen vil komme fra vindkraft [Dansk Energi, 2009a].

- **Varmetank på fjernvarmeanlæg:** Ved at installere en vandtank som lager på fjernvarmeanlæggene, vil man kunne udnytte overskudsenergien. I praksis ville man fylde tanken op med varmt vand, når prisen er i bund, og gemme den til der er behov for varmen ude i husstandene. Denne løsning vil være fuldt ud mulig og vil både sørge for at CO_2 emissionen bliver mindre fra fjernvarmeanlæggene og kan i længden give en besparelse på fjernvarmeanlægget.
- **Varmepumpe hos den enkelte husstand:** Lageret kunne sidde ude hos forbrugeren, hvor en varmepumpe vil sørge for opvarmningen af vandet, og en intelligent elmåler ville styre forbruget. Motivationen for den enkelte forbruger kan være en reel besparelse i kroner og ører, såfremt de bliver afregnet til den gældende spotmarkedpris og deres forbrug bliver styret af en intelligent elmåler. Med en stigende andel af vindkraft, vil denne løsning til opvarmning af huset blive mere miljørigtig i forhold til CO_2 , og på den måde kan det være en løsning til eloverløb, da en implementering af varmepumper vil give et større elforbrug, og en bedre korrelation imellem udbud og efterspørgelsen af el.

At lagre energien vil sige, at man omdanner den overskydende elektricitet ved eloverløb til en anden form for energi, hvor man kan opbevare den i en given tid for derefter at omdanne den til elektricitet igen.

- **Danne potentiel energi:** I Norge bruger man energien til at pumpe vandet fra en side af en dæmning til den anden side (fra et lavt punkt til et højere), således at den potentielle energi bliver større. Når behovet for el opstår vendes processen, som får vandet til at drive turbiner. Da Danmark er et forholdsvis fladt land, er dette ikke en mulighed, men der er lavet forsøg med, at man via en pumpe eller motor tryksætter en nedgravet beholder. Når der er behov for energien, driver den tryksatte vandmængde en turbine, hvorfra man kan udnytte energien [Schultz, 23. oktober 2009].
- **Danne kinetisk energi:** Ved flywheels er energien blevet brugt til at få et "hjul" op i høj roterende fart. Derefter lader man den køre indtil, energien skal udnyttes. Det må forventes, at der er et stort tab ved denne metode, da der ved gnidning, omdannes kinetisk energi til varme. Den mængde elektricitet, som bruges til at få hjulet op i fart med, er derfor blevet formindsket efter den kinetiske energi igen bliver omdannet til elektricitet [Schultz, 23. oktober 2009].
- **Brintsamfund:** Med ordet brintsamfund definerer man et samfund, hvor brint spiller en stor rolle, både som lagringsmetode, men også som brændstof til køretøjer. I denne løsning vil man kigge på, om det er muligt og holdbart at bruge elektriciteten ved eloverløb til at spalte vand i brint og ilt. Brinten kan opbevares i en beholder, og derefter udnytte denne i en brændselscelle, hvor brinten sammen med ilt bliver omdannet til elektricitet og vand. Der er stadig problemer med opbevaringen af

brint. Tankene til at opbevare brinten bliver meget store, og det er et problem, hvis det skal bruges som brændsel i en bil [Schaltz, 23. oktober 2009].

Fælles for de tre lagringsmuligheder, der er blevet beskrevet, er, at de alle miljømæssigt er holdbare løsninger, da der ikke bliver udledt drivhusgasser. Ved omdannelsen af brint til elektricitet er restproduktet vand, som ikke skader miljøet. Ulempen ved disse løsninger er deres effektivitet. Der forskes meget i, hvordan man omdanner den overskydende elektricitet til energi som lagres, sådan at energitabet er mindst muligt.

Nu er problemet med eloverløb beskevet, og løsningsrummet undersøgt. Det besluttes at holde fokus på implementeringen af varmepumper med lager hos forbrugeren, således at varmepumpen kører, når prisen er tilstrækkeligt under gennemsnitsprisen på elmarkedet. Dette er valgt ud fra den vurdering, at denne løsning både vil give en CO_2 besparelse og afhjælpe problemet med eloverløb.

2.1 Problemformulering

Vores rapport vil fokusere på 3 store spørgsmål:

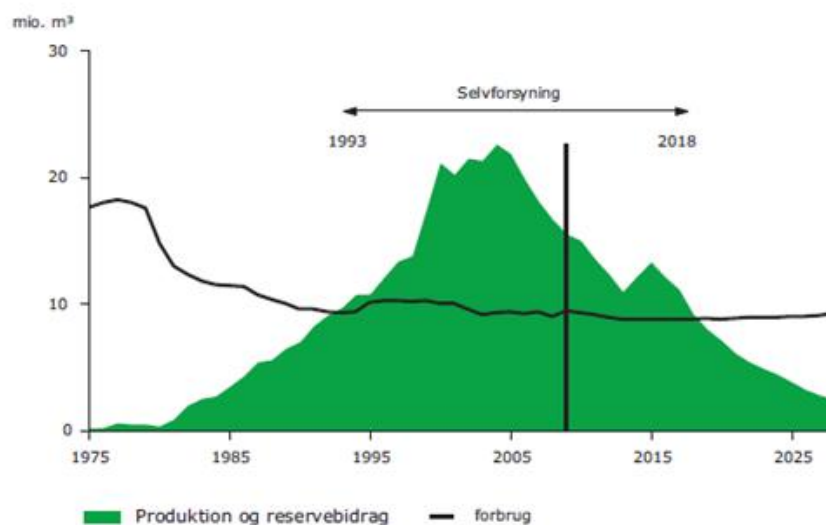
- Er varmepumpens implementering i det danske elsystem en løsning på eloverløb?
- Hvilken CO_2 besparelse kan der opnås ved implementering af varmepumper i alle husstande, der nu har elovne, olie- og naturgasfyr?
- Hvordan skal lageret modelleres for at opfylde varmebehovet i et hus?

2.2 Fremgangsmåde

Vi vil redegøre for vindkraftens andel af energiproduktionen. Under dette vil vi se på det danske elnet, og undersøge om der er et problem med eloverløb. Vi vil lave en analyse af mulighederne for at udskifte nogle af de mest kendte opvarmningsformer (fjernvarme, elovne, naturgas- og oliefyr) i Danmark. Der lægges vægt på det miljømæssige aspekt. Vi vil redegøre for mulighederne indenfor spotmarkedet og vurdere, om vi kan integrere dette i almindelige husstande ved hjælp af intelligente elmålere. Ud fra dette vil vi lave en teknisk optimering af en privat husstands varmemeforbrug, hvor der vil blive anvendt en varmepumpe, i stedet for opvarmning med fossile brændsler. Der vil opstilles en varmetabsanalyse for lageret med henblik på at modellere lageret. Derudover vil der opstilles en model, der beregner, hvornår varmepumpen skal køre, og hvor lang tid det vil tage at fylde lageret op. Vi vil til sidst se på den samlede besparelse i CO_2 emission, hvis løsningen bliver implementeret i alle husstande, der nu har elvarme, olie- eller naturgasfyr.

Varmepumpens muligheder i Danmark 3

Den løsning, som giver en betydelig CO₂ reduktion, er udskiftning af alle elovne, naturgas- og oliefyr med en varmepumpe. Implementeringen af en varmepumpe vil give forbrugeren en besparelse både CO₂ mæssigt og økonomisk, forudsat at der bliver anvendt den rette styringsteknologi. Forsyningssikkerheden bliver bedre, da afhængigheden af olie og gas forsvinder. Varmepumpens opbygning og virkning vil ligeledes blive behandlet.



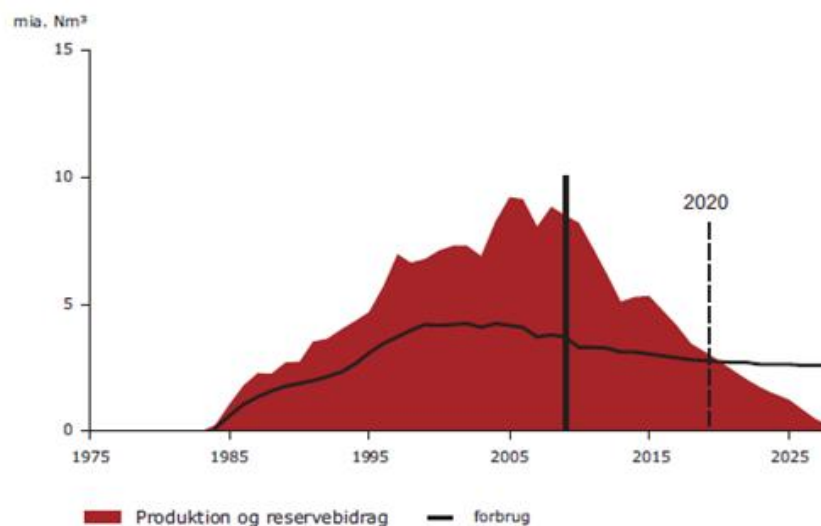
Figur 3.1. Olieproduktion og reservebidrag for Danmark 2008 [Energistyrelsen, 2009c, side 60].

Opvarmning i Danmark

Fjernvarme er en samproduktion med elproduktionen for at udnytte energien bedst. Da kraftvarmeverkerne er optimeret for at reducere deres energispild og CO₂ emission, vil det være bedre at udnytte fjernvarmen før andre opvarmningstyper. Andre fjernvarmeverker bruger f.eks. affald og biobrændsel til produktionen, og da disse er restprodukter, er de betegnet som CO₂ neutrale. Det er billigt at koble en by til fjernvarmen, fordi alle husene ligger tæt. Da husene ligger tæt, vil udgifterne til fjernvarmerør være billigere, og derfor er en stor del af danskerne også forbundet til et fjernvarmeverk. Når man bevæger sig

udenfor bygrænserne bliver det dyrere at blive koblet på fjernvarmen, fordi det er dyrt at lægge rør ned over længere afstande, hvis det kun er til nogle få huse. Derfor bliver dem, der bor udenfor byerne nødt til at have deres eget fyr. Man kan blandt andet få naturgas-, olie- og træpillefyr, som alle er udbredt blandt landejendomme.

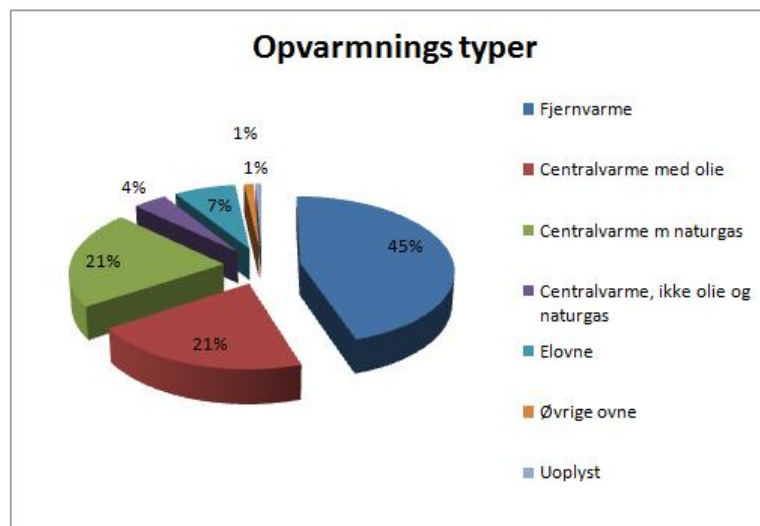
Danmark er i dag selvforsynende med olie og naturgas, og det er med til at holde stabile priser på markedet. Men ifølge Energistyrelsens prognoser, figur 3.1, vil dette ikke være tilfældet efter år 2018, hvor det ikke længere er muligt at udvinde nok råolie til at dække Danmarks forbrug. Det samme gør sig gældende for naturgassen, figur 3.2, hvis reserver ikke vil kunne dække efterspørgslen efter år 2020. Derefter vil danskerne være nødt til at købe olie og naturgas fra udlandet, og så vil priserne være bestemt af den generelle forsynings situation i verden. Af hensyn til Danmarks økonomi og miljø mål i fremtiden, vil det være bedre at være selvforsynende i energisektoren.



Figur 3.2. Naturgasproduktion og reservebidrag for Danmark 2008 [Energistyrelsen, 2009c, side 59].

Opvarmning af husstande i Danmark

Siden år 1986 er antallet af boliger med oliefyr faldet 15% [Energistyrelsen, 2009b, side 34]. Det skyldes blandt andet fjernvarmen, som 61% af forbrugerne anvender i dag. Naturgassen bliver anvendt af 15% [Energistyrelsen, 2009b, side 34]. På figur 3.3 er antallet af boliger afgrænset som beskrevet i figurteksten. Tallene fra Danmarks Statistik viser, at ud af de i alt 679.519 husstande, der bruger fjernvarme, er der kun 1.713 landbrugsejendomme tilsluttet. Dette er med til at støtte op om, at husstande udenfor bygrænserne bliver nødt til at have deres egne opvarmnings anlæg.



Figur 3.3. Tallene er hentet fra Danmarks Statistik. Der er inkluderet informationer om stuehuse til landbrugsejendomme, parcelhuse og række-, kæde- og dobbelthuse. Tabellen viser hvor mange af disse husstande, der har den bestemte opvarmningsform. Der er udeladt etageboligbebyggelse, kollegier, døgninstitutioner, anden helårsbeboelse, uoplyst og beboede fritidshuse (2005-), da disse vil have større variation af isolerings grad, størrelse på varmepumper og størrelse på varmtvandsbeholdere.

Danmark er efter hhv. år 2018 og år 2020 ikke længere selvforsynende af olie og naturgas. Hvis Danmark stadig ønsker at være selvforsynende skal forbruget af olie- og naturgasfyrene nedbringes.

3.1 Den intelligente elmåler

En ”intelligent“ elmåler indeholder en tovejskommunikation. En normal elmåler, måler konstant elforbruget, som derefter aflæses årligt (eller oftere, afhængig af elselskab), hvorefter forbrugeren bliver afregnet til en fast gennemsnitspris. En intelligent elmåler kommunikerer i stedet med elselskabet, og fortæller om forbruget time for time (eller en anden tidsenhed), hvorefter man så kan blive afregnet til gennemsnitsprisen for det tidsinterval. Idéen ved at integrere en intelligent elmåler er, at man håber på, at kunne flytte forbrugers elforbrug til tidspunkter, hvor elprisen er lav.

I dag kan man opdele de intelligente elmålere i tre typer;

1. Elmålere, der sender tal hjem til elselskabet.
2. Elmålere, der også modtager prissignaler.
3. Elmålere, som styrer forbruget efter prissignalet.

Den første sender information til elselskabet pr. tidsenhed om forbruget, hvorefter forbrugeren bliver afregnet til gennemsnitsprisen pr. tidsforbrug. Den anden type er mere avanceret, da udbyderen ligger det i hænderne på forbrugeren at agere efter, hvordan prisen er. Den sidste er mest avanceret, da den selv tager beslutningen om at opbygge

varmelageret, når prisen er lav. Denne form for handling kommer på baggrund af de foruddefinerede standarder, man har, for at prisen er lav.

Det der mangler i forhold til at udnytte det optimalt, er den rette software, hvor man får elmåleren og en computer til at snakke sammen og styre forbruget. Med den rigtige software burde det være muligt at programmere vaskemaskinen til at gå i gang, når det passer bedst. Softwaren beregner, hvornår det økonomisk kan betale sig at starte i løbet af det næste døgn og udføre opgaven.

I artiklen "Opfordring: Intelligente elmålere - nu", der blev bragt i Ingeniøren, stiller Forbrugerrådet, Elsekskabernes Brancheforening, Dansk Energi, Danmarks Vindmølleforening og Vindmølleindustrien tre krav til de intelligente elmålere

- Der skal kunne bygges ovenpå med yderligere styringsteknologi til energibesparelser.
- De skal baseres på åbne standarder.
- Forbrugs- og målerdata skal være tilgængelige for den enkelte forbruger.

Der har allerede været forsøg med forbrugere og intelligente elmåler og afregning af elprisen efter spotmarked. I rapporten "Prisfølsomt elforbrug i husholdninger" der er udarbejdet af DI - Energibranchen, SydEnergi a.m.b.a., SEAS/NVE a.m.b.a., Siemens A/S, Danfoss A/S og Ea Energianalyse A/S, [2009], har 500 husstande deltaget med forskellige elmålingsteknikker i en periode på 3½ år.

Kort om undersøgelsens forsøgspersoner:

Denne undersøgelse har omhandlet husholdninger med særligt stort elforbrug (over 15.000 kWh/år). Disse husholdninger har været delt ind i 4 grupper.

- En gruppe, som har fået installeret udstyr, der automatisk regulerer elvarmen i forhold til elprissignalerne efter foruddefinerede standarder.
- En gruppe, som har modtaget elektronikudstyr, som kan vise prissignalerne, hvorefter forsøgsdeltageren selv regulerer elforbruget.
- En gruppe, som dagligt har modtaget en e-mail eller en sms med angivelse af udsving i elprisen, hvorefter forsøgsdeltageren selv regulerer elvarmen.
- En kontrolgruppe, som hverken har haft viden om eller deltaget i forsøget.

En af erfaringerne fra forsøget er:

"Forsøget har vist, at det ikke giver nogen signifikant effekt alene at oplyse kunderne om udviklingen i elprisen og gøre opmærksom på dyre timer. Kun hvis der er installeret automatik til at styre forbruget bliver effekten så tydelig, at den kan ses på det samlede forbrug" [DI - Energibranchen, SydEnergi a.m.b.a., SEAS/NVE a.m.b.a., Siemens A/S, Danfoss A/S og Ea Energianalyse A/S, 2009, side 5]

For at kunne regne med en effektiv virkning vil dette projekt bygge på, at brugeren har en intelligent elmåler. Den reagerer, når prisen bliver lav nok og derfra opbygges et varmelager vha. en varmepumpe.

Kravspecifikationer til den intelligente elmåler i projektets løsningsforslag:

- Regulere forbruget uden opmærksomhed fra forbrugeren.

- Elmålerne får spotpriserne at vide 24 timer før, når de bliver fastsatte. Dermed fastlægges et bestemt prisniveau, som billig el/købs muligt el.
- Sende signaler til varmepumpen, så den kan opbygge varmelageret, når elprisen er lav.
- Få besked fra lageret, når den har nået et bestemt niveau. Og derved begynde at opbygge varmelageret ligegyldigt hvilken elpris, der er.

Delkonklusionen er, at hvis man vil løse problemet med eloverløb, så skal varmepumpen være styret af en intelligent elmåler. Den kan reagere på elspotpriserne og ud fra dem, kan varmepumpen starte eller stoppe med at varme brugsvandet op.

3.2 Sådan fungerer en varmepumpe

Udviklingen af varmepumper startede tilbage i 1950'erne, men ved oliekrisen i 1970'erne kom der mere fokus på varmepumper. I en tid hvor omverdenen for alvor har fået øjnene op for klimakrisen, er alternative løsninger til oliefyrene blevet forbedret.

En varmepumpe består af et ydre anlæg. Dette kan være alt fra en ventilator i luft/vand varmepumpen til slanger i jorden i en jordvarmepumpe. I disse anlæg løber der et kølemiddel, som optager energien fra luften/jorden/vandet, da kølemidlet har en lavere temperatur end luften/jorden/vandet. Fra det ydre anlæg løber det fordampede kølemiddel igennem en kompressor, som hæver trykket og hermed stiger temperaturen kraftigt.

Det komprimerede og varme kølemiddel løber herefter i rør gennem akkumuleringsstanken og kølemidlet afgiver sin energi til vandet, og dette opvarmes. Derefter løber det afkølede kølemiddel gennem en ekspansionsventil, som sænker trykket, og hermed sænkes temperaturen yderligere. Kølemidlet løber så videre til det udendørsanlæg, hvor det på ny kan optage energi.

Når temperaturforskellen mellem kølemidlet og udetemperaturen er stor, koster det mindre el, når kompressoren skal hæve trykket og dermed temperaturen. Men når temperaturforskellen er størst er der også mindre behov for opvarmning. Derfor giver et moderne anlæg forbrugeren pr. år ca. 2,5-3,5 kW varmeenergi pr. kW el, det forbruger.

Varmepumpen kan virke ned til temperaturer omkring -12°C . Til perioder hvor temperaturen er lavere end de -12°C , har mange moderne varmepumper en varmepatron i deres tank, for at sikre forsyningen af varmt vand til forbrugeren. [Klima- og Energiministeriet, 2009]

3.3 Typer af varmepumper

Der er mange forskellige typer af anlæg. Her nævnes de mest almindelige typer:

- Jord/vand anlæg: Det ydre anlæg består af jordslanger under jorden, som optager den varme, solen har lagret i jorden. I disse slanger løber kølevæsken. Senere opvarmer denne væske vandet i akkumuleringsstanken.



Figur 3.4. Tegning af system med jordvarmepumpe [Comfort, 2009].

- Luft/vand anlæg: Dette anlæg har en ventilator, der sidder uden på husmuren, og leder udeluften hen til køleelementet. Her opvarmes kølevæsken af udeluften. Dette anlæg kan også have en akkumuleringskøleelementet.
- Luft/luft anlæg : Luft/luft er bedre kendt som et aircondition system. Dette anlæg optager varmen fra udeluften og afgiver det i en varmeplade, der kan være placeret i et ventilationssystem eller direkte i rummet.

Disse tre typer af varmepumper kan installeres hos forbrugere i byer, hvor staldvarmepumper og grundvandsanlæg ikke kan installeres.

3.4 Teknisk gennemgang af varmepumpen

Carnotmaskinen

I år 1824 beskrev den franske ingeniør Sadi Carnot en maskine, som sidenhen blev kendt som Carnotmaskinen. Han beskrev den således, at den ville gennemgå en kredsproces hvor ingen energi ville gå tabt i cyklussen. Dette betød, at den tilførte mængde mekanisk arbejde og den flyttede varmeenergi udgjorde den tilførte varmeenergi [Aage B. Lauritsen, 2007]. Se sætning 3.1.

For virkningsgraden ved maskiner som er opført fysisk, vil Carnots virkningsgrad være højere. Dette skyldes, at Carnots maskine ikke taber energi til omgivelserne, i form af varme. I den fysiske maskine, vil en del af energien gå tabt til f.eks. gnidninger mellem metaller. I varmepumpen vil en del af energien gå tabt i kompressoren, varmtvandslageret og rørene til og fra huset.

Der findes to måder at udregne virkningsgraden η på. Den første kan udtrykkes som i sætning 3.4 og sætning 3.5 [Aage B. Lauritsen, 2007].

$$(3.1) \quad Q_h = Q_c + W \quad [J]$$

$$(3.2) \quad \frac{Q_h}{Q_h} = \frac{Q_c}{Q_h} + \frac{W}{Q_h}$$

$$(3.3) \quad \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

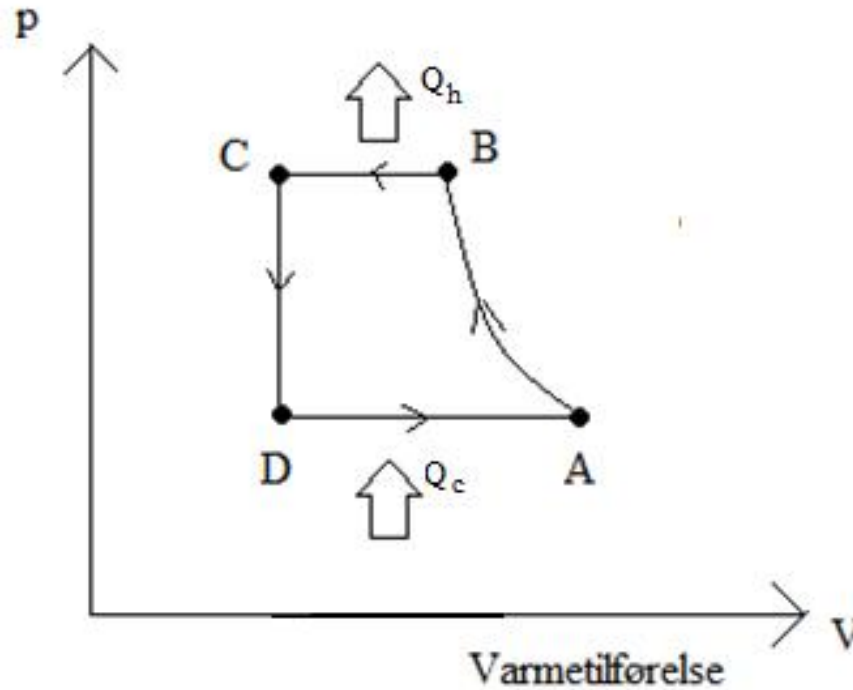
$$(3.4) \quad \eta_c = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \Leftrightarrow \eta_c = 1 - \frac{m * c * T_c}{m * c * T_h}$$

$$(3.5) \quad \eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Den anden virkningsgrad kaldes COP (Coefficient of Performance). COP blev indført, da man også kan udnytte varmepumpen, til at omdanne arbejde til forflytning af termiskenergi. COP har den egenskab, at den kan overstige 100%, dvs. at varmepumpen kan flytte større mængder termiske energi, end den bruger tilsvarende af mekanisk energi. Formlen for COP-værdien i carnot-varmepumpe, viser hvordan energien flyttes fra et koldt depot til et varmere [Aage B. Lauritsen, 2007].

$$(3.6) \quad COP_c = \frac{|Q_h|}{W}$$

Varmepumpen: På figur 3.5 er der tegnet varmepumpens kredsproces, som vil blive brugt til at beskrive de forskellige termodynamiske processer, som finder sted i varmepumpen [Øhlenschläger, 2004].



Figur 3.5. Varmepumpens kredsproces i et pV diagram.

A til B:

Gassen komprimeres, hvilket foregår hurtigt således, at den ikke afgiver varme til kompressoren. Dette ses på pV diagrammet på figur 3.6, da processen A til B går mod en mindre volume, samtidigt med at trykket stiger. Når trykket stiger, stiger gassens temperatur. Denne proces kaldes en isentropisk proces. En isentropisk proces er defineret ved, at processen er adiabatisk og reversibel, dvs. at der ikke udveksles varme til omgivelserne ($Q=0$), og forløbet også er tabsfri ($W=0$). Isentropiens grundligning (kaldes isentropeksponenten):

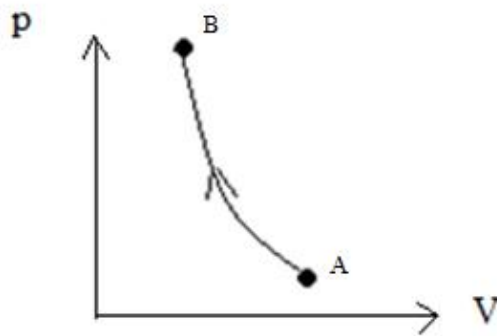
$$(3.7) \quad p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa \quad \text{eller} \quad p V^\kappa = \text{konstant}$$

Grundligningen kan udbygges så tryk og volumen sammenkobles med temperatur. Der indsættes:

$$(3.8) \quad p = m R_i \frac{T}{V}$$

og fås:

$$(3.9) \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1^\kappa}{V_2^\kappa} = \frac{T_2 V_1}{V_2 T_1}$$



Figur 3.6. En isentropisk proces i et pV diagram.

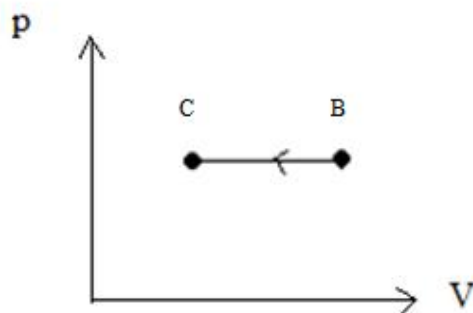
B til C:

Den opvarmede gas, som har en højere temperatur end vandet i lagertanken, afgiver varme til lagertanken, som kondenserer til væskefase. Denne proces forløber under konstant tryk og er derfor isobar. En isobar proces er defineret ved konstant tryk under forløbet. Idealgasloven medfører:

$$(3.10) \quad pV_1 = mR_iT_1 \quad \text{og} \quad pV_2 = mR_iT_2$$

Hvilket giver:

$$(3.11) \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$$



Figur 3.7. En isobar proces i et pV diagram.

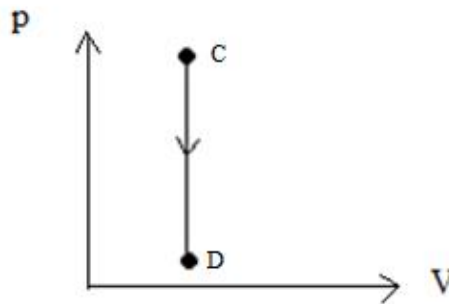
C til D:

Nu åbner ventilen ved en given trykforskel, hvilket medfører, at væsken bliver lukket ind i fordampere. Væsken er nu blevet afkølet ved den proces, og er nu koldere end den var i tilstand A.

Denne proces forløber under en konstant volumen, og er derfor en isokor proces. Temperaturen falder som følge af, at volumen er konstant, mens trykket falder.

Vi viste før at sætning 3.10 er en isobar proces. Den samme sætning kan bruges til at vise at:

$$(3.12) \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



Figur 3.8. En isokor proces i et pV diagram.

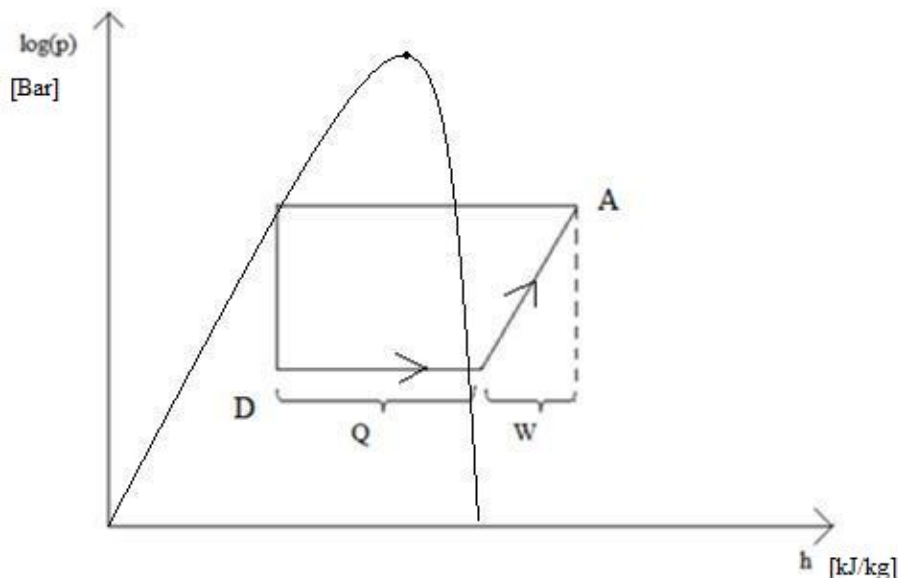
D til A:

Omgivelserne udenfor tilfører nu varme til kølevæsken, som opvarmes og fordamper ved konstant tryk. Denne gas løber så gennem ventilen, som lukker, når gassen igen komprimeres, og processens starter igen (A til B).

3.5 Varmepumpens energi

Hvor kommer den energi fra som varmepumpen bruger til at varme kølemidlet op med?

På figur 3.9 ses processen D til A. Hvis man følger pilene fra D til A, kan man se, hvordan varmepumpen henter varme fra omgivelserne (Q), og bruger elektriciteten til at tilføre energi til kølemidlet (W). Q og W sammenlagt giver den samlede energi som skal føres rundt i varmepumpen. Det stemmer overens med det Carnot formulerede i sætning 3.1. Kurven viser kølemiddelet i et $\log(p)h$ diagram, hvor trykket er afbilledet logaritmisk op ad y-aksen, og entalpien er afbilledet ad x-aksen. Det er kølemiddelet R314 (R314, Hydro Flour Carbon, er et kølemiddel, som har den kemiske opbygning: CF_3CH_2F), som er vist. Punktet på kurven er det kritiske punkt, hvor kølemiddelet overgår fra væske til gas uden nogen overgangsfase. Til venstre for kurven er kølemiddelet på væskefase. Under kurven er kølemiddelet i en overgangsfase (blanding med væske og gas) inden cyklussen kommer over på højre side, hvor kølemiddelet er på gasform.



Figur 3.9. Varmepumpens kredsproces i et $\log(p)h$ diagram. Q = varme, W = tilført energi.

Kredsprocessen med to forskellige kølemidler (R314 og CO_2)

De mest almindelige kølemidler i en varmepumpe er HFC'er, mens de mere moderne varmepumper bruger CO_2 . HFC'er har i mange år været det fortrukne kølemiddel, da de er i stand til, at lade processen køre ved et lavere tryk end f.eks. med kølemidlet CO_2 . Et lavere tryk gør, at der stilles mindre krav til komponenterne i varmepumpen, og da varmepumper i mange år har været anset som en niche, har det fra producenternes side ikke været økonomisk rentabelt at bruge CO_2 .

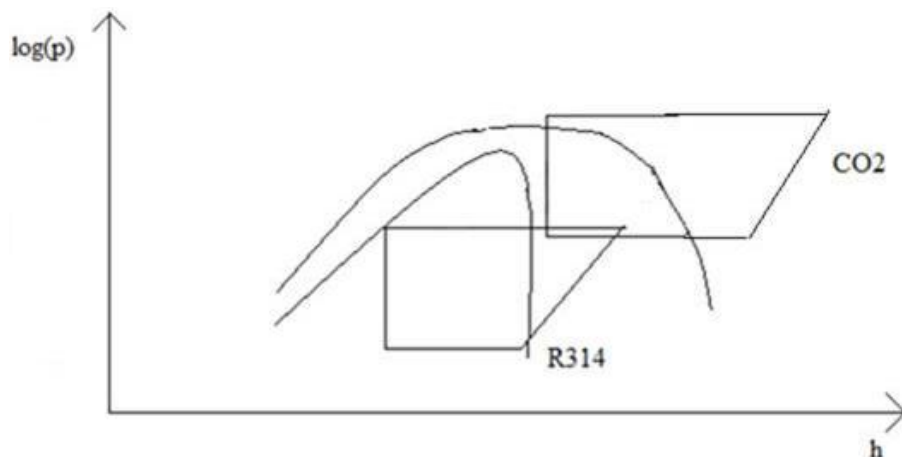
HFC som kølemiddel giver dog en række problemer, især at HFC ved udslip har en betydende drivhuseffekt. Et eksempel på et HFC kølemiddel er R314, der har en drivhuseffekt på 3500 gange, hvad CO_2 har [Videncenter for HFC-fri køling, 2006]. Dette er grunden til, at miljøstyrelsen har ambitioner om at udfase brugen af HFC som kølemiddel. Den teknologiske udvikling har gjort, at det høje tryk ikke længere er nogen hindring for CO_2 som kølemiddel. [Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S., 2001].

CO_2 har følgende egenskaber som kølemiddel:

- Den er ikke brandfarlig.
- Den er ugiftig.
- Den er tungere end luft.
- Der skal være et højere tryk end ved brug af HFC.
- Der er en høj isentropisk virkningsgrad.
- Der er en høj COP ved brug i varmepumper.
- Bedre til at udnytte store temperatur forskelle.

CO_2 som kølemiddel i varmepumper er oplagt, da det er muligt at opnå høje virkningsgrader. Ved høje temperaturer, er CO_2 bedre end traditionelle varmepumper, der

bruger HFC'er som kølemiddel. CO_2 kølemidlet kan bedre udnytte det temperaturglid, der opstår i kondensatoren. Det estimeres, at hvis man implementerede CO_2 som kølemiddel, ville man få en besparelse i elforbruget, da varmepumpen vil være i stand til at køre med højere COP ved store temperaturforskelle. Men hvordan ser forskellen, mellem at bruge en varmepumpe med hhv. CO_2 og HFC kølemiddel, ud termodynamisk? På figur 3.10 er der på et ph diagram tegnet to varmepumpers kredsproces for to forskellige kølemidler [Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S., 2001].



Figur 3.10. To varmepumpers kredsproces for to forskellige kølemidler i et $\log(p)h$ diagram. Bygget på [Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S., 2001].

Når CO_2 anvendes som kølemiddel vil processen afhænge af temperaturen på kondensatorsiden, forstået på den måde, at ved lav temperatur, vil processen forløbe som Carnot-processen (som ved andre kølemidler). CO_2 kondenserer ikke ved sit kritiske punkt $31^\circ C$. Det betyder, at kondensatoren ikke bruges til at kondensere kølemidlet, men til at køre transkritisk. Det at køre transkritisk vil sige, at der ikke er en kobling mellem tryk og temperatur som ved de konventionelle kølemidler [Miljøstyrelsen, 2006]. På figur 3.10 ses denne forskel. Man kan se at varmepumpen, der bruger CO_2 , kører med et højere tryk, der er i stand til at flytte mere varme, hvilket betyder, at den har en højere COP. Det højere tryk stiller større krav til komponenterne, som f.eks. rørsystemet [Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S., 2001].

Der kan konkluderes, at fremtiden i kølemidler til varmepumper ligger i CO_2 og en udfasning af HFC'erne, fordi HFC'erne er nogle kraftige drivhusgasser. CO_2 gør det muligt at have en høj COP ved store temperaturforskelle.

3.6 Varmepumpers kørsel

Projektet tager udgangspunkt i modelboligen. I denne bolig er varmemeforbruget dækket af en varmepumpe. Varmeforbruget for boligen er beregnet med SBI's [Statens Bygnings

Institut, marts 2006] formel for varmeforbrug:

$$(3.13) \quad \text{Varmeforbruget} = 4816 \text{ kWh} + 104 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \text{ antal } m^2 \text{ i boligen}$$

Modelboligen får et netto varmebehov på 18.336 kWh/år. Dette behov bliver dækket af en varmepumpe. I tabel 3.1 er vist forskellige luft/vand varmepumper (uden lager), alle med forskellige varmeydelser og omkostninger. Varmeydelsen er den afgivne effekt.

Installation og pris

Udover driftsomkostningerne skal der bruges penge på installationen. Varmepumpen kan installeres i ældre boliger, hvis de gamle vandinstallationer er intakte. Her tænkes især på gulvvarme og radiatorer. Hvis dette ikke gør sig gældende, skal køberen oven i prisen for varmepumpen også medregne prisen for indkøb og installation af alle vandrørene og de vandbaserede radiatorer. Det optimale ville være at tage et system, hvor dette rørarbejde allerede er lagt, eller ved nybyggeri at tænke det ind fra starten.

Priserne på varmepumper varierer meget, alt efter hvilken type varmepumpe køberen skal have, og om der skal være en akkumuleringskøber med. Hos Dansk Varmepumpe Industri spænder priser fra 63.000kr. til 108.000kr [Industri, 2009]. Denne store prisforskel skyldes bl.a. størrelsen og effekten af varmepumpen samt størrelsen af lageret og den dertilhørende omfattende installation.

Model	Varmeydelse i kW	Pris i kr. uden tank og installation	Drifttimer/år	Procentvis kørsel af år
030B-TF (Phnix)	8	42.900	2292	26
040B-TF (Phnix)	12,5	45.900	1467	17
050B-TF (Phnix)	16	49.900	1146	13
060B-TF (Phnix)	20	54.900	917	10
Fighter 2025-6	6,14	42.774	2956	34
Fighter 2025-8	8,4	45.505	2183	25
Fighter 2025-10	10,3	48.236	1780	20
Fighter 2025-14	14,1	52.234	1300	15
LG: model H09SNE	9	39.995	2037	23
Large KS70	8,5	38.995	2157	25
Large KS50	6,2	31.245	2957	34
SHP-C45DEN	4,5	25.056	4076	47
SHP_C90GEN	9	36.442	2037	23

Tabel 3.1. Behandlet tal fra følgende producenter og forhandlere: Wellmore [Wellmore, 2009], Vølund varmeteknik [Varmeteknik, 2009], Andes [Andes, 2009] og AirconWarehouse [Warehouse, 2009]

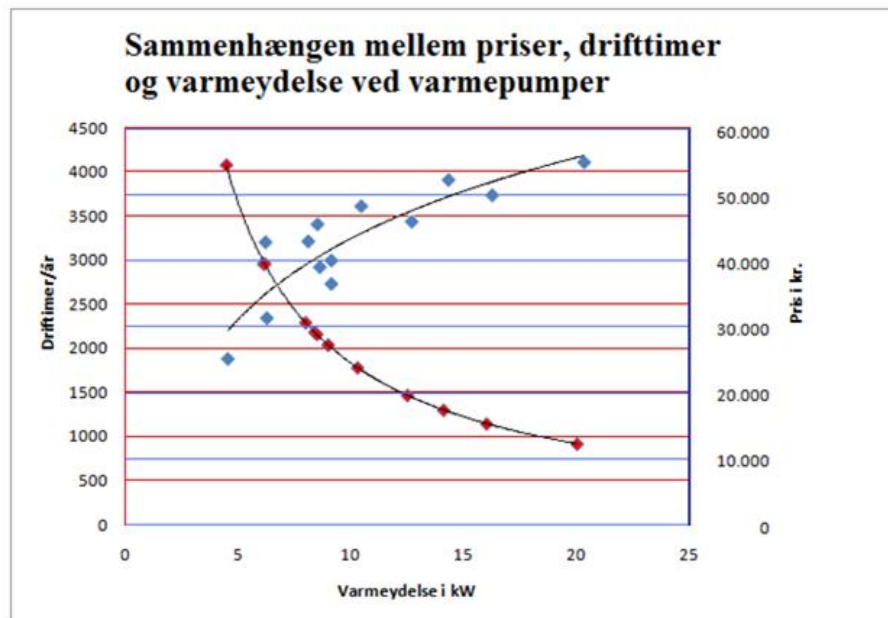
For at vide hvor mange timer varmepumpen skal køre om året er drifttimerne pr. år beregnet. Drifttimer pr. år er beregnet på følgende måde:

$$(3.14) \quad \frac{18336 \text{ kWh/år}}{\text{Varmeydelse}} = \text{drifftimer}$$

Procentvis kørsel pr. år er beregnet på følgende måde:

$$(3.15) \quad \frac{\text{Drifftimer/år}}{8760 \text{ timer/år}} * 100 = \% \text{ kørsel af år}$$

Herved kan der konstateres, at de udvalgte varmepumper uden lager, skal køre mellem 15% og 47% om året. De har alle en varmeydelse mellem 4,5 og 20 kW, for at dække varmekonsumet. I denne beregning, er der ikke taget hensyn til sæsonforbruget. Dette er afbilledet i figur 3.11, som viser sammenhængen mellem varmeydelse og drifftimer.



Figur 3.11. Forholdene mellem varmeydelser og pris og forholdet mellem varmeydelser og drift timer. Varmepumpernes pris stiger logaritmisk, når varmeydelsen stiger. Denne sammenhæng antyder, at det bliver billigere at installere en varmepumpe pr. kW varmeydelse. Her kan ses en sammenhæng mellem drift timer og prisen på varmepumpen. Drift timerne falder eksponentielt, når varmeydelsen og priserne stiger. Data fra tabel 3.1.

Det ses, at der er en sammenhæng mellem drifttimer, varmeydelse og pris. Afhængig af husets stand, hvilke opvarmningsmetoder, der er blevet benyttet og hvilken varmepumpe-løsning man vælger, kan prisen for at få installeret en varmepumpe variere.

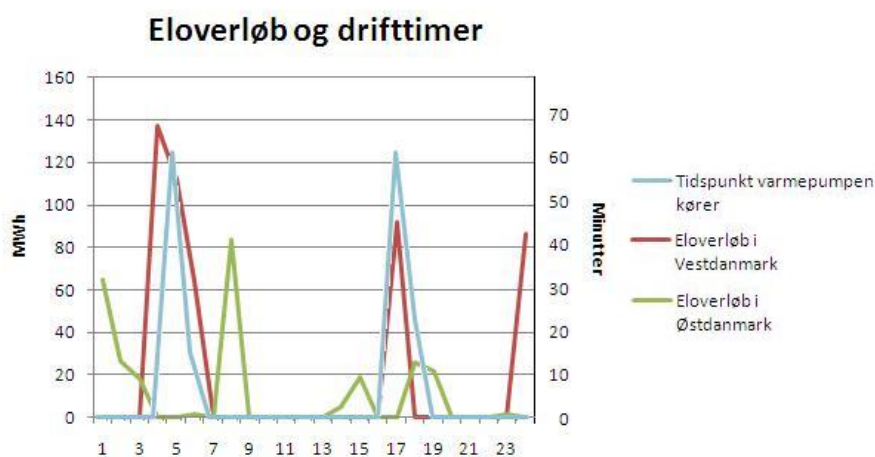
3.7 Eloverløb og varmepumpen

Ideelt set burde varmepumpen kun køre, når der er kritiske eloverløb og prisen derfor er i bund. Det kan ikke forventes at der er kritiske eloverløb i passende intervaller. I stedet kan man udnytte at prisen svinger i løbet af døgnet og derefter planlægge forbruget, til når prisen er lav. Når prisen er lav, er sandsynligheden stor, for at det skyldes vindkraftproduktionen, og derved opnås en større CO_2 besparelse. Der er lavet et program, som kan regne ud, hvornår en bestemt varmepumpe skal køre i løbet af et døgn, samt i hvor langt tid og hvor meget det vil koste.

I det konstruerede Excel program [Bilag C - Excel ark2], fastsættes der følgende værdier:

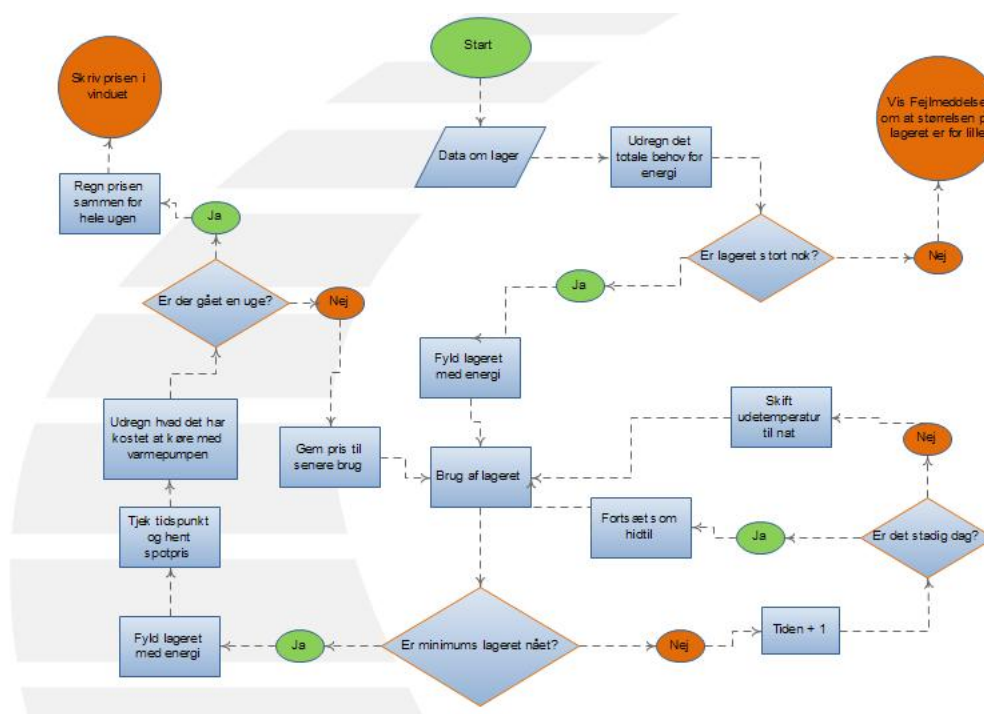
- $130m^2$ hus
- Lagerstørrelse: 500 L
- Minimum niveau som altid skal være tilbage i lageret/tanken: 40%
- Antal personer i hustanden: 4
- Varmeydelse varmepumpe: 12 kW
- COP varmepumpe: 3,5 (Antages at den ikke ændrer sig, selvom temperaturen ændrer sig).
- Varmpumpe el forbrug: 3,42 kW
- Dags temperatur: $0^\circ C$
- Nat temperatur: $-7^\circ C$

Ud fra disse dataer kan programmet udregne, hvornår varmepumpen skal fylde lageret op og udregne prisen for et givet døgn. På figur 3.12 er der taget udgangspunkt i d. 05.02.2009, hvor eloverløbet vises ved de røde og grønne grafer. Programflow kan ses på figur 3.13.



Figur 3.12. Sammenhængen mellem hvornår varmepumpen skal køre og eloverløbene i Vest- og Østdanmark for d. 05.02.2009 [Energinet.dk, februar 2009b].

Figur 3.12 viser, hvornår der er eloverløb (grøn og rød grafer i MWh,) og hvornår varmepumpen skal køre (blå graf i minutter). Dog skal der siges, at varmepumpen ikke



Figur 3.13. Flowdiagram for excelprogrammet der beregner prisen pr. time/uge/år.

kan bruge de ca. 120 MWh i 5. time, da lageret er fyldt ved start, men blot illustrere at varmepumpen rent faktisk skal køre, når eloverløbet foregår. Og med hjælp fra en intelligent elmåler, kunne det tænkes, at varmepumpen fyldte lagret op, når der var eloverløb. Ved at køre som grafen foreskriver, vil prisen også blive betydeligt mindre. Ved at indsætte spotpriserne for Vestdanmark i det givne døgn, bliver prisen 35,42 kr [Bilag C].

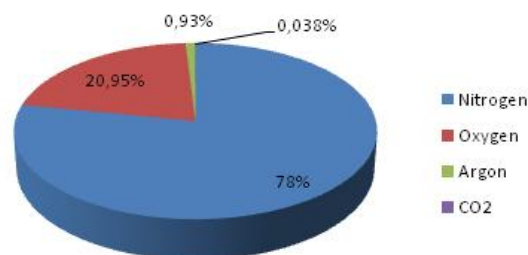
Et andet scenarie kunne være at der var kritisk eloverløb, dette kunne resultere i, at prisen ville blive nær 0 kr. fordi man skal af med overproduktionen. Der ville varmepumpen med lager og intelligent elmåler kunne yde sit optimale.

Der kan drages den konklusion, at varmepumpens ydelse ikke er det, der afgør driftsprisen og miljøbesparelse, men de økonomiske og miljø mæssige fordele også afhænger af lagerets størrelse. Lagerets størrelse bestemmer, hvor længe varmepumpen skal køre for at fylde lagret op, og dermed den samlede elregning for varmepumpen.

Miljømæssige aspekter ved vores løsning 4

Motivationen for det følgende kapitel vil være at kigge på, hvor meget der vil blive sparet på CO_2 emission, hvis man i stedet for oliefyr, naturgasfyr og elovne, anvendte varmepumper til brug af boligopvarmning.

Da et af de store emner for tiden er klimaforandringerne, vil det være oplagt at kigge på danskernes udledning af CO_2 . Der er i dag, ca. $5,3 \cdot 10^{15}$ tons luft i atmosfæren, luften består af 78% nitrogen, 20,95% oxygen, 0,93% argon og 0,038% CO_2 . [Blarke, maj 2008]



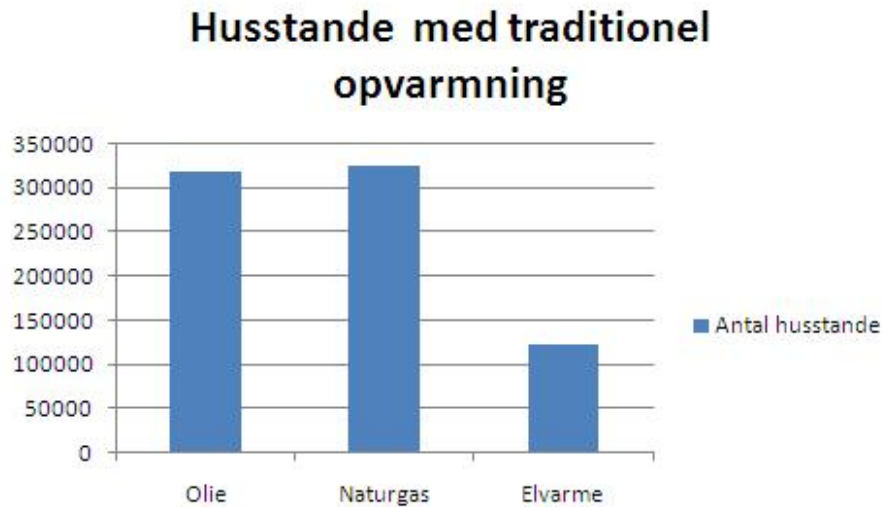
Figur 4.1. Atmosfærens bestanddele.

Da nogle af de første målinger blev lavet i år 1958 af Charles Keeling [Blarke, maj 2008, side 8], lå CO_2 procenten af den preindustrielle luft på 0,028%, hvor den i dag ligger på 0,038%. Mange forskere og førende politikere mener, at der er en sammenhæng mellem temperaturstigninger og den øgede CO_2 mængde.

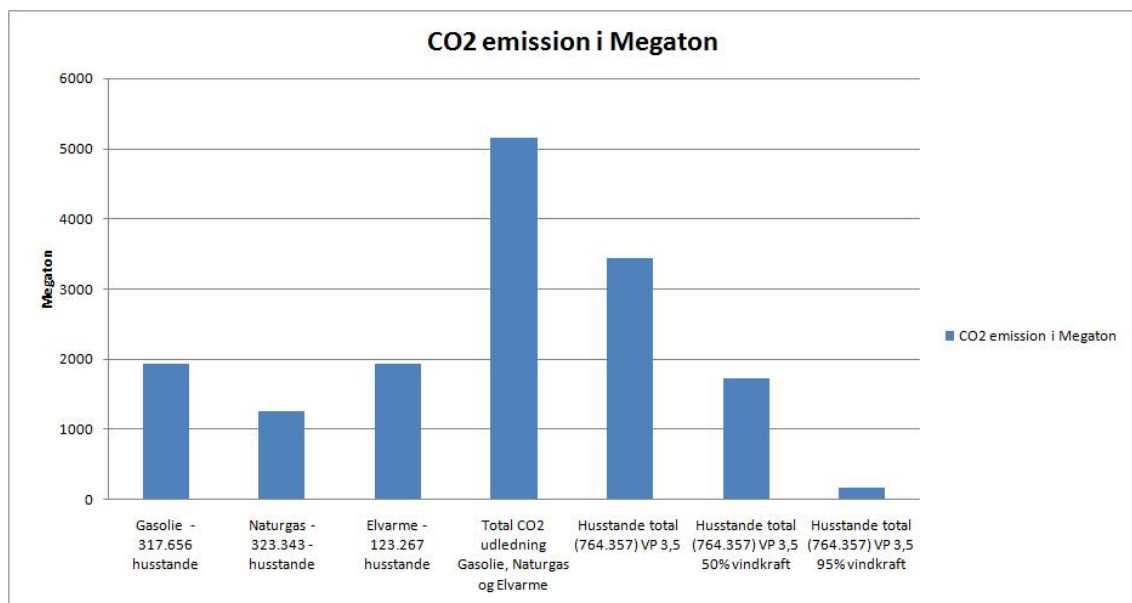
Et af målene for dette kapitel er at kunne finde ud af, hvor meget CO_2 , der kunne blive sparet, hvis man erstatter alle oliefyr, naturgasfyr og elovne i private husstande i Danmark med en varmepumpe. I modellen regnes med en luft/væske varmepumpe med en konstant COP på 3,5, hermed tages forbehold for at COP'en ændrer sig over året. Varmepumpen skal køre mindst muligt, når spotprisen er høj, altså når udbudet af el er højt, og primært køre i de timer, hvor efterspørgslen på el er høj.

Dette er for at kunne balancere elforbruget med elproduktionen, og derved udnytte den energi der i dag bliver eksporteret til udlandet. For at kunne beregne CO_2 emission på

oliefyr, naturgasfyr og elvarme kigges der på, hvor mange husstande der anvender disse typer.



Figur 4.2. Husstande der opvarmes med olie, naturgas og el. [Statistik, 2009]



Figur 4.3. Viser CO₂ emission fra de husstande med gasolie, naturgas og elvarme. Den samlede CO₂ emission fra de 3 traditionelle opvarmningskilder (olie, gas og el), emissionen fra disse kilder, hvis de udskiftes med en varmepumpe, VP, med en COP på 3,5. De sidste to søjler viser de totale CO₂ emissioner hvor samtlige olie, gas og elvarmekilder er skiftet ud med en varmepumpe, der kører på henholdsvis 50% og 95% vindkraft [bilag A] og Bilag[C - Excel ark1]].

Ved at brænde fossile brændsler udledes der også SO₂ og NO_x gasser. Der findes 3 forskellige typer fyringsolie, som har lavt, mellem og højt svovlindhold. Det er fyringsolien med højt svovlindhold, der er mest anvendt i Danmark [Key2green, September 2007]. På

figur 4.3 ses et diagram over CO_2 emissionen for boligopvarmningsformer. Der antages, at varmepumperne med 50% og 95% vindkraft har fået installeret intelligente elmålere, og at de kan udnytte 50% og 95% af vindkraften. Ud fra beregningerne i bilag [C - Excel ark1] kan det ses, at pr. husstand udleder elvarmen 15,8 Ton CO_2 årligt, hvilket er mere end dobbelt så meget som den anden største, gasolien, som udleder 6,1 Ton CO_2 .

På figur 4.3 kan man se, at selvom der kun er 123.267 [Bilag A] husstande, der bruger elvarme, står de for den største CO_2 udledning af de tre former for opvarmning, der bruger fossile brændsler. Den samlede udledning fra de tre opvarmningsformer er på 5.148.349 ton CO_2 [Bilag C - Excel ark1]. Det er 10% af den samlede danske CO_2 emission på 49.614.000 ton [Energistyrelsen, 2009b]. Hvis disse opvarmningsformer blev skiftet ud med varmepumper uden lager, og som kørte uden nogen form for styring, ville der blive udledt 3.439.742 ton CO_2 [Bilag C - Excel ark1]. I forhold til Danmarks mål om at opfylde Kyoto-aftalen skal CO_2 niveauet fra år 1990 nedbringes med 21%. CO_2 niveauet i år 1990 var på 80.000.000 ton, så ved at erstatte de tre opvarmningsformer fra figur 4.2 med varmepumper, som har en COP på 3,5, opnår Danmark en reduktion på:

$$(4.1) \quad \frac{5.148.349 \text{ ton } CO_2 - 3.439.742 \text{ ton } CO_2}{80.000.000 \text{ ton } CO_2} * 100 = 2\%$$

Vælger man derimod at bruge en varmepumpe med varmelager og intelligent elmåler får man en højere CO_2 besparelse. Der er taget højde for, at varmepumpen 50% af tiden opfylder lageret med ren vindkraft. Ud fra beregningerne i Excelprogrammet, viser det, at varmepumperne udleder 1.719.871 ton CO_2 . Dette giver Danmark en reduktion på:

$$(4.2) \quad \frac{5.148.349 \text{ ton } CO_2 - 1.719.871 \text{ ton } CO_2}{80.000.000 \text{ ton } CO_2} * 100 = 4\%$$

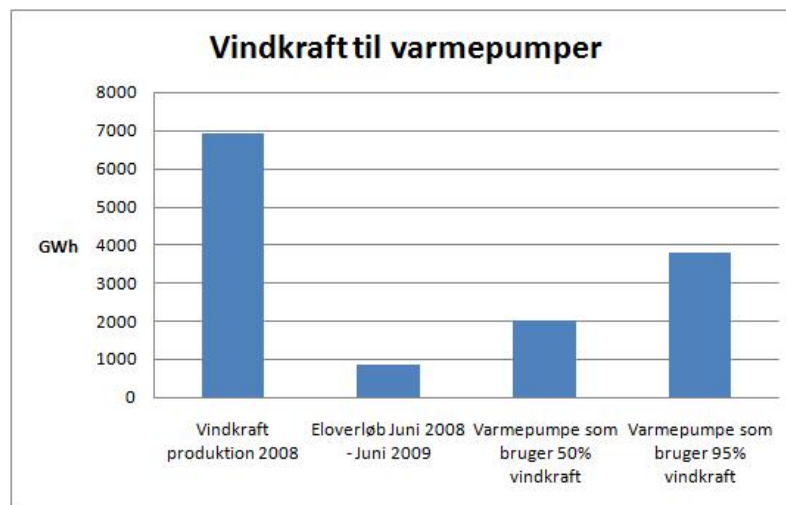
Hvis det antages, at varmepumpen og den intelligente elmåler kommer til at fungere som ønsket og bruger 95% el fra vindkraft, udledes 171.987 ton CO_2 . Hvis varmepumpen erstattede samtlige husstande med oliefyr, naturgas og elvarme ville CO_2 besparelsen være:

$$(4.3) \quad \frac{5.148.349 \text{ ton } CO_2 - 171.987 \text{ ton } CO_2}{80.000.000 \text{ ton } CO_2} * 100 = 6\%$$

På figur 4.4 kan det udledes, at der er nok vindkraft til at opfylde varmepumpernes forbrug. Det ses ligledes at både varmepumpen på 50% og 95% vindkraft har et forbrug, der overstiger den samlede mængde eloverløb for perioden juni 2008 til juni 2009. Herved kan varmepumperne afhjælpe eloverløbet, selvom det skulle blive større.

Hvis man kender husstandens årlige forbrug af el, ved elvarme, kan der udregnes hvor meget en varmepumpe vil komme til at forbruge. COP har en indflydelse på dette, da varmepumpen overfører mere termisk energi end mekanisk energi. Formlen nedenunder giver et estimat på husstandens forbrug af el til opvarmning ved et årligt forbrug på 18.336 kWh.

$$(4.4) \quad \frac{18.336kWh}{3,5COP} = 5.238,86kWh \text{ pr. husstand om året}$$



Figur 4.4. Total vindkraft produktion [Energinet.dk, november 2009] og total forbrug for varmepumperne: Hvis olie, naturgas og elvarme blev udskiftet med varmepumper på 50% og 95% vindkraft.

Problemet med eloverløb kan løses ved at udskifte oliefyr, naturgasfyr og elvarme med varmepumper med lager, som er styret af en intelligent elmåler. Hvis varmepumpen kører på mellem 50% og 95% el fra vindkraft, er CO_2 besparelsen på mellem 4% og 6% af Danmarks samlede CO_2 emission fra år 1990.

4.1 Scenarieanalyse

Hvordan vil udviklingen være i eloverløb og CO_2 , hvis man udskiftede alle oliefyr, gasfyr samt elopvarmning med en varmepumpe i dag? Hvad sker der med elspotprisen?

Hvis man forestiller sig, at oliefyr, gasfyr og elvarme blev skiftet med en varmepumpe, så ville det samlede antal varmepumper komme op på 784.357 varmepumper:

	Olie	Naturgas	Elvarme	Varmepumper	Antal varmepumper når olie, gas og el bliver erstattet
Antal husstande	317.656	323.434	123.267	20.000	784.357

Tabel 4.1. Antallet af varmepumper er et skøn, da der ikke findes nogen opgørelse over, hvor mange husstande, der benytter sig af varmepumper. Data fra [Energistyrelsen, Maj 2009].

Efterspørgslen på el er lav om natten, men hvis alle 784.357stk. var kørende, ville der pludselig være et behov for el. Eftersom, at denne efterspørgsel pludselig stiger, så stiger prisen også, da det er regulerkraftmarkedet, der dækker denne pludselige efterspørgsel. En anden ting, som man kan tage med er, at prisen på el nok ikke vil blive mindre om dagen. For en privat forbruger vil det nok ikke få en stor betydning i prisen, idet elforbruget vil være mindre om dagen, da brugsvand og rumvarmevandet oplades om natten. Det kunne forstilles, at kraftværkerne ville være interesseret i at styre dette forbrug, da forbrugeren kun vil have varmt vand kl. 7, men er ligeglad, med hvornår lageret fyldes.

Vil elprisen i fremtiden blive presset i bund, hvis der ikke findes en metode til at overkomme eloverløb? Men hvordan vil dette scenarie påvirke CO_2 udledningen?

De forskellige opvarmningskilder udleder pr. husstand følgende CO_2 mængde om året:

	CO_2 (Ton) udledning pr. husstand	CO_2 (Kilotons) udledning pr. år
Gasolie	6,11	1.940
Naturgas	3,92	1.267
Elvarme	15,75	1.942
Varmepumpe med en COP på 3,5	4,50	90

Hvis alle oliefyr, naturgasfyr og elovne bliver udskiftet med en varmepumpe ville der ske følgende CO_2 reduktion:

	CO_2 (Kiloton)
Samlet før udskiftning	5.239
Varmepumpe med en COP på 3,5 efter udskiftning	3.530
Samlet reduktion	1.709

Altså vil Danmark udlede 1.709 kilotons CO_2 mindre ud om året ved en implementering af 784.357 varmepumper. Men hvor meget vil elforbruget så stige? I det tænkte eksempel, hvor der er blevet implementeret 784.357 varmepumper, vil der være et langt højere elforbrug, end der er i den nuværende situation.

	Før (GWh)	Efter (GWh)	Ændring (GWh)
Elvarme	2.260	0	-2.260
Varmepumpe med en COP på 3,5	105	4.109	4.004
Stigning i elforbrug	2.365	4.109	1.744

Tabel 4.2. Stigning i elforbrug før og efter, pr. år [Energistyrelsen, Maj 2009]

Den anvendte beregning:

$$\frac{\text{Husstandens varmekonsum}}{\text{Varmepumpens COP}} * \text{Antal husstande med varmepumpe} = \text{Husets samlede elforbrug}$$

Altså en stigning i det årlige elforbrug på landsplan på 1.744 GWh ved en implementering af 784.357 varmepumper, set i forhold til den samlede el produktion, som var på 36.390 GWh [Energistyrelsen, 2008]. Vil det sige, at man skal producere den mængde strøm mere? Det er ikke tilfældet, da der tidligere i rapporten er gjort rede for, at der forekommer eloverløb, hvor Danmark er nødt til at eksportere det overskydende strøm eller lukke vindmøller og kraftværker i en periode. Der vil nu blive redegjort for, om en intelligent elmåler kan afhjælpe problemet med eloverløb. Danmark eksporterede i år 2008 11.361 GWh [Energistyrelsen, 2008] væk, hvilket i stedet kunne have været brugt til at drive de implementerede varmepumper i scenariet. Nedenfor er der nogle specifikationer, der beskriver en varmepumpe, som opvarmer hver femte time.

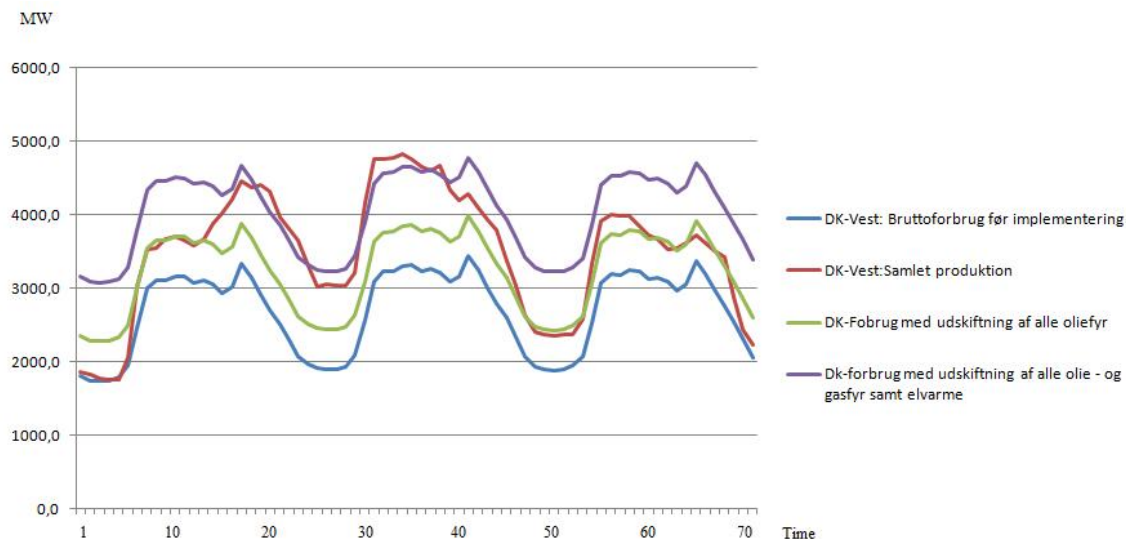
Specifikationer:

- 130 m^2 hus
- Lagerstørrelse: 1000 L
- Minimum niveau som altid skal være tilbage i lageret/tanken: 35%
- Antal personer i husstanden: 4
- Varmeydelse varmepumpe: 12 kW
- COP for varmepumpe: 3,5
- Varmepumpens elforbrug: 3,42 kW
- Dagstemperatur gennemsnit: 7 C°
- Nattemperatur gennemsnit: 4 C°
- Tidsrum: 3/11 – 09 til 5/11 – 09
- El-net: DK-VEST

Time:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lagerkapacitet i %	100	91	82	74	65	100	93	86	79	72	65	58
Time:	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lagerkapacitet i %	51	44	36	100	43	85	78	70	60	52	43	34

Tabel 4.3. Figuren viser lagerkapacitetet til en bestemt time i døgnet over 3 døgn. Dataerne er hentet fra Excelmodellen.

Kurverne nedenfor beskriver elproduktionen og elforbruget i tidsrummet 3/11 – 09 til 5/11 – 09. Elproduktionen er den røde kurve, og man kan se, hvordan elproduktionen udvikler sig til tiden. I tidsrummet var der en stor produktion af el fra vindkraft, der var i gennemsnitlig 36% af el-produktionen, som kom fra vind. Det er et døgn, hvor elproduktionen overstiger forbruget. Dette kan man se på figur 4.5, hvor den blå kurve viser, hvad el-forbruget var, og det fremgår, at man kunne implementere varmepumper for at udnytte det overskydende el i stedet for at eksportere det. Men hvor mange kan man implementere? Den grønne graf viser en udskiftning af alle oliefyr. Den lilla graf viser en udskiftningen af alle olie- og gasfyr samt elvarme. Det viser sig, at scenariet med at udskifte alle olie- og gasfyr samt elvarme med 784.357 varmepumper vil kunne lade sig gøre, men man bliver nødt til at importere el i noget af tidsrummet eller lade kraftværkerne køre med højere last. Det er de punkter, hvor den lilla kurve er over den røde kurve. Det viser sig, at scenariet med at udskifte oliefyrene vil være muligt over den 3 døgns periode.



Figur 4.5. Data fra [Energinet.dk, 2009]

Stigningen i elforbruget regnes således:

(4.5)

$$\text{Total stigning i elforbrug} = \frac{\text{elforbrug pr. varmepumpe} \cdot \text{antal af implementeret varmepumper}}{2 \text{ timer}}$$

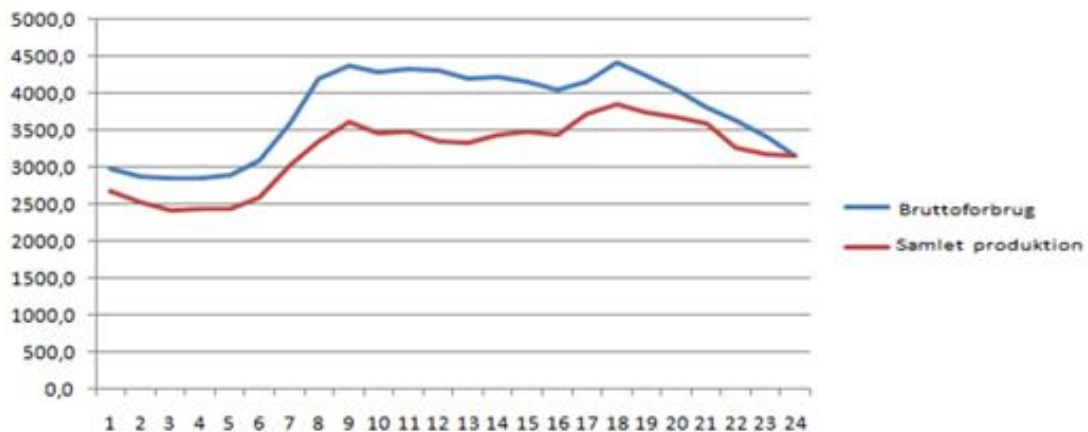
For udskiftningen af olie og gasfyr samt elvarme.

$$(4.6) \quad \frac{3,42 \text{ kW}}{1000} * \frac{784.357 \text{ varmepumper}}{2 \text{ timer}} = 1.341 \frac{\text{MW}}{\text{time}}$$

For udskiftning af oliefyr

$$(4.7) \quad \frac{3,42 \text{ kW}}{1000} * \frac{317.656 \text{ varmepumper}}{2 \text{ timer}} = 543 \frac{\text{MW}}{\text{time}}$$

I beregningen er der lavet den forudsætning at temperaturen over de tre døgn ikke ændrer sig for hhv. dag og nat temperatur, og at varmepumperne er ens, og at der i alle husstande hvor varmepumperne implementeres er det samme varmekonsum. Der divideres med "2 timer" fordi varmepumperne ifølge vores model skal køre hver 2. time, derfor er der blevet valgt at antallet af alle husstande bliver delt op i 2 dele, hvor hver del skiftevis kører en time, således at forbruget bliver udjævnet, og der stadig er samme procentdel varmt vand i tanken som vist på tabellen før. For at dette skal kunne virke skal varmepumpen styres af en intelligent elmåler som beskrevet i kapitel 4. Tidsrummet 3/11-09 til 5/11-09 var præget af meget vind, hvilket betyder at produktionen fra vindmøllerne var stor. Dette er ikke altid tilfældet, fordi vindkraft er en diskontinuer energikilde. Derfor kan man ikke regne med, at der altid vil være stor nok produktion af el til at køre det nuværende elforbrug plus en implementering af 317.656 varmepumper. Et eksempel på dette er døgnet den 4/1-09, hvor der ikke var nogen produktion fra vindmøllerne. Grafen nedenfor viser elproduktionen samt elforbruget inklusiv en implementering på 784.357 varmepumper i det døgn.



Figur 4.6. Data fra [Energinet.dk, 2009]

For at kunne forsyne med el i dette døgn vil Danmark være nødt til at importere en stor mængde el fra udlandet, og dette vil ske hver gang produktionen fra vindmøllerne ikke er stor nok. Man kunne i disse tilfælde skrue op for kraftvarmeverkerne, men disse bruger ofte fossile brændsler. Man sparer en stor mængde CO_2 udledning ved implementeringen (1.709 kilo tons), og derfor kan man godt hæve produktionen fra kraftværkerne, så længe man ikke udleder mere end det, man sparede. Implementeringen af varmepumpen løser problemet med eloverløb og sparer en stor mængde CO_2 , men for at implementere varmepumper i stedet for alle olie- og gasfyr samt elvarme, skal produktionen fra kraftværkerne stige.

Mulige forbedringsforslag til regnemodellen i Excel, kunne bestå i, at den selv satte varmepumpen i gang, når der var en lav spotpris. En justerbar temperaturskala, ville også kunne bidrage til en mindskning af forbruget af el, da modellen vil blive mere præcis. Lige nu regnes der med 12 timer nat og 12 timer dag, så en varierende temperatur i løbet af døgnet vil gøre en forskel. Endvidere er en mangel, at modellen ikke kan udregne den eksakte pris, hvis varmepumpen skal kører over 2 timer i træk. Modellen kan også forbedres i forhold til tidsintervallet mellem målingerne i tanken. Modellen er ligenu indstillet til, at den skal fylde tanken op, hvis lageret kommer under 40%. Problemet med den nuværende programmering er, at hvis lageret er 45% i starten af en time, bruger modellen af de 45% til drift af huset i den time. Så når timen er endt, kan niveauet ende på 15 %, hvorefter varmepumpen begynder at opvarme igen.

Implementeringen af varmepumper løser problemet med eloverløb og spare på CO_2 udledningen, men for at implementere varmepumper i stedet for alle olie- og gasfyr samt elvarme, skal produktionen fra kraftværkerne stige, eller man skal hæve rumfanget af varmepumpens lager.

Forsøg og virkelighed 5

Dette kapitel vil bekræfte de konstruerede formler omkring varmelageret. Der vil kort være en gennemgang af det udførte forsøg om varmetabet i en beholder og tankerne omkring dette.

5.1 Forsøgsopstillingen og beregninger

Formål: Formålet med forsøget er, at bestemme en formel for varmetabet i en vandbeholder. For at gøre det så realistisk som muligt, er starttemperaturen i vandbeholderen 75°C og sluttemperaturen 47°C , som i en varmepumpe med lager.

Hypotese: Ved at lave en model for varmetabet i Matlab er det muligt at lave forudsigelser med hensyn til, hvordan ”varmelageret“ vil opføre sig. Forventningen til ”varmelageret“ er, at vandets temperatur vil falde eksponentielt, jo længere tid forsøget strækker sig over. Når temperaturforskellen mellem beholderens indre og dens omgivelser er stor, vil temperaturen i beholderen falde hurtigere, end når temperaturerne er tæt på hinanden. Isoleringen af beholderen vil have en indflydelse på hastigheden af afkølingen, alt efter hvilken varmelednings evne det isolerede materiale har.

Udstyr:

- Programmerne LabView og Matlab
- Dataopsamlingskort (DAQ)
- K-termometer (-40°C til 1000°C)
- Dypkoger/omrøre. Model: Haake D1
- Kasse med de udvendige mål: $0,43\text{m} * 0,32\text{m} * 0,52\text{m}$ og $0,05\text{m}$ isolering. Denne isolering består af flamingo, træ og plastik.
- Print med kreds



Figur 5.1. Forsøgsopstillingen.

Matlab: De formler, der er blevet konstrueret, tager alle højde for massen, den specifikke varmekapacitet, materialernes varmekonduktivitet, temperaturen inde og ude, kassens overfladeareal samt tykkelsen af isoleringen. I forsøget er værdierne givet ved konstanterne:

Konstanter:

- $k = 0,136 \frac{W}{m \cdot K}$
- $A = 1,0552 m^2$
- $T_{start} = 74,64^\circ C$
- $T_C = 20^\circ C$
- $m = 20 kg$
- $c = 4186 \frac{J}{(kg \cdot ^\circ C)}$
- $l = 0,063 m$

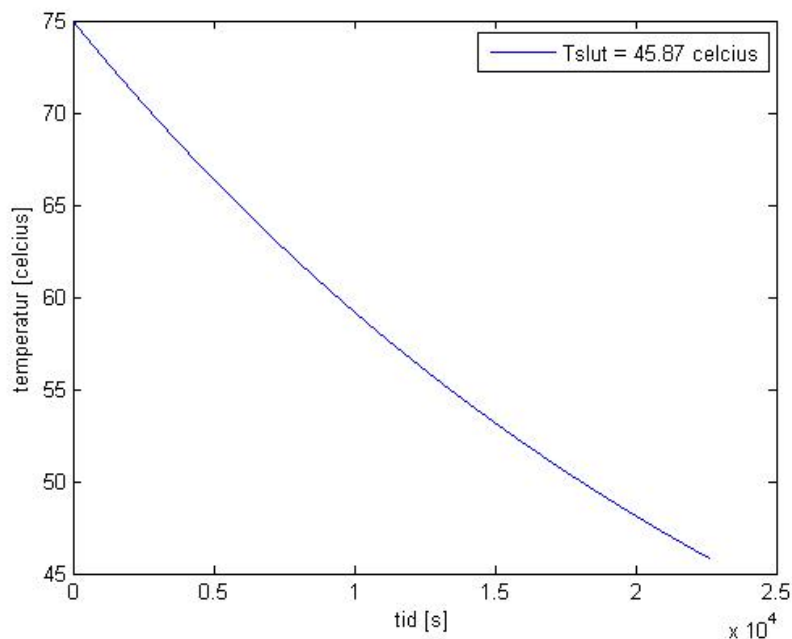
Den konstruerede formel for varmetabet i beholderen, som programmet Matlab bruger:

$$(5.1) \quad Q_{tab}(ii) = k * A * \frac{\left(T_{start} - \frac{Q_{tab}(ii-1)}{m * C} - T_C\right)}{l * dt} + Q_{tab}(ii - 1) \quad [J]$$

Da varmetabet afhænger af forskellen mellem inde- og udetemperaturen i beholderen, er det nødvendigt at lave en formel, der indholder en løkke. Sådan at forskellen i temperatur bliver starttemperaturen fratrasket den temperatur, der allerede er tabt $Q_{tab}(ii - 1)$, fratrasket temperaturen udenfor kassen. dt angiver tidslængden mellem løkkerne og er her beregnet til at være 1 sek. Derudover er der defineret et sluttidspunkt i programmeringen, sådan at formlen ikke kører uendeligt. Den konstruerede formel for temperaturen inde i beholderen.

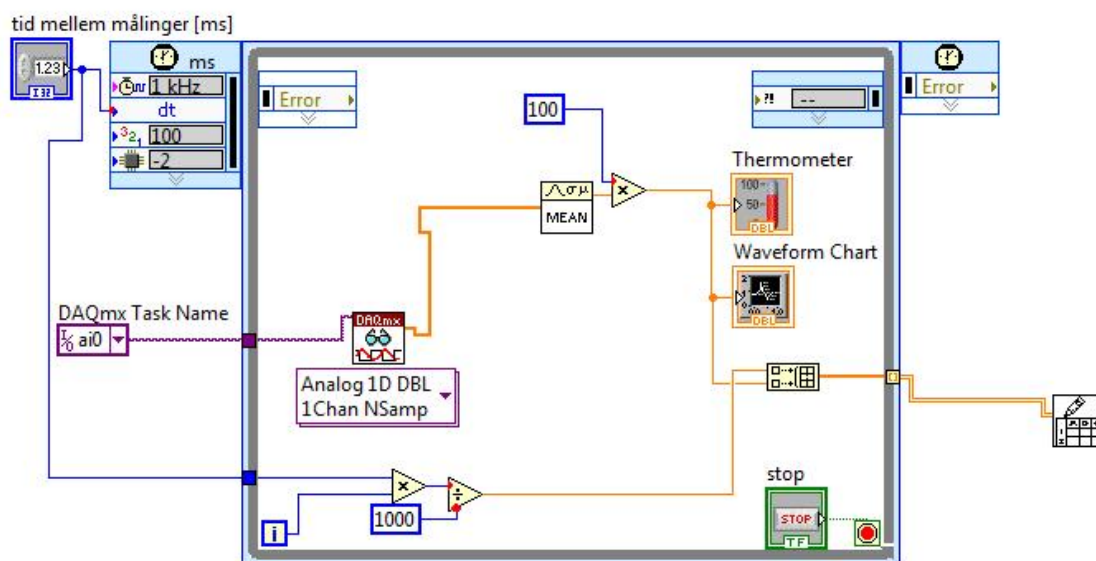
$$(5.2) \quad T_{slut} = T_{start} - \frac{Q_{tab}(ii)}{m * C} \quad [^\circ C]$$

Hermed er det muligt at finde temperaturen i beholderen. Forsøgets tidslængde er 24.900s og efter denne er temperaturen i kassen faldet til 47°C ifølge vores model. Nedenstående figur 5.2 viser modellen.



Figur 5.2. Figuren viser varmetabet for beholderen beregnet ud fra Matlab.

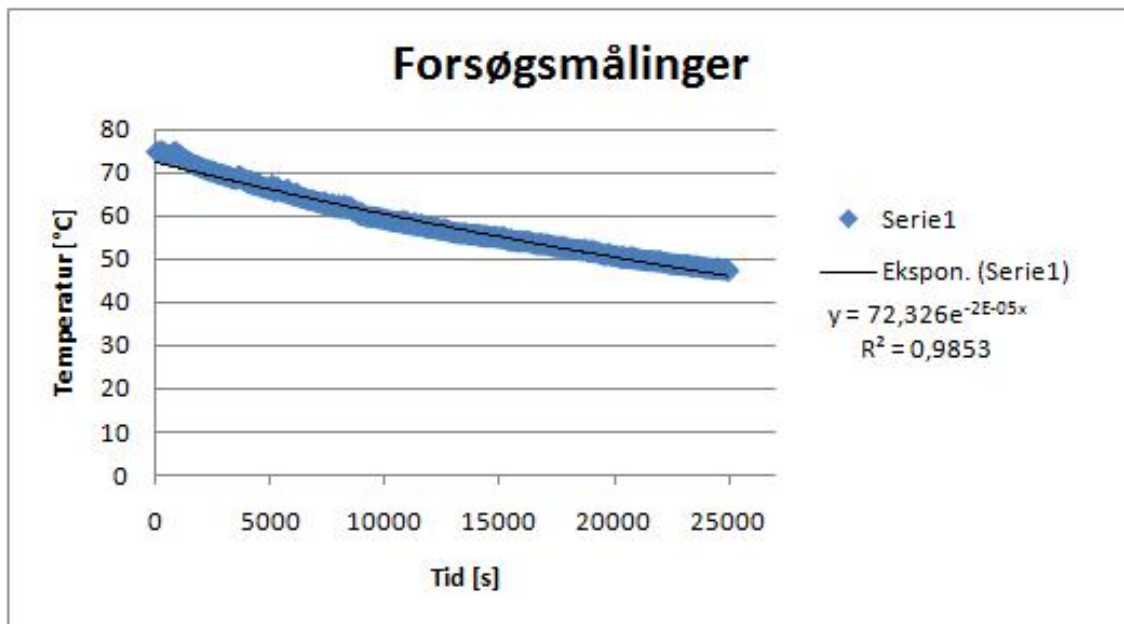
LabView: I LabView er der programmeret et system, som kan opsamle dataerne fra forsøget. Temperaturen bliver målt hvert minut.



Figur 5.3. Figuren viser LabView programmeringen til at opsamle målingerne.

Udførelse: 20L vand hældes i kassen. Haake D1 sættes fast på kassen og låget lægges over. Varmer vandet op til 70°C. K-termometeret sættes fast, så det ikke kommer i kontakt med siderne på kassen. LabView åbnes, programmet startes og målingerne opsamles. Dette foretages indtil vandets temperatur inde i kassen er 47°C.

Resultater: Der er givet resultater i form af figur 5.4. Dataerne fra forsøget kan ses i bilag B.



Figur 5.4. Målingerne fra forsøget. Det ses, at sammenhængen er en eksponentialfunktion.

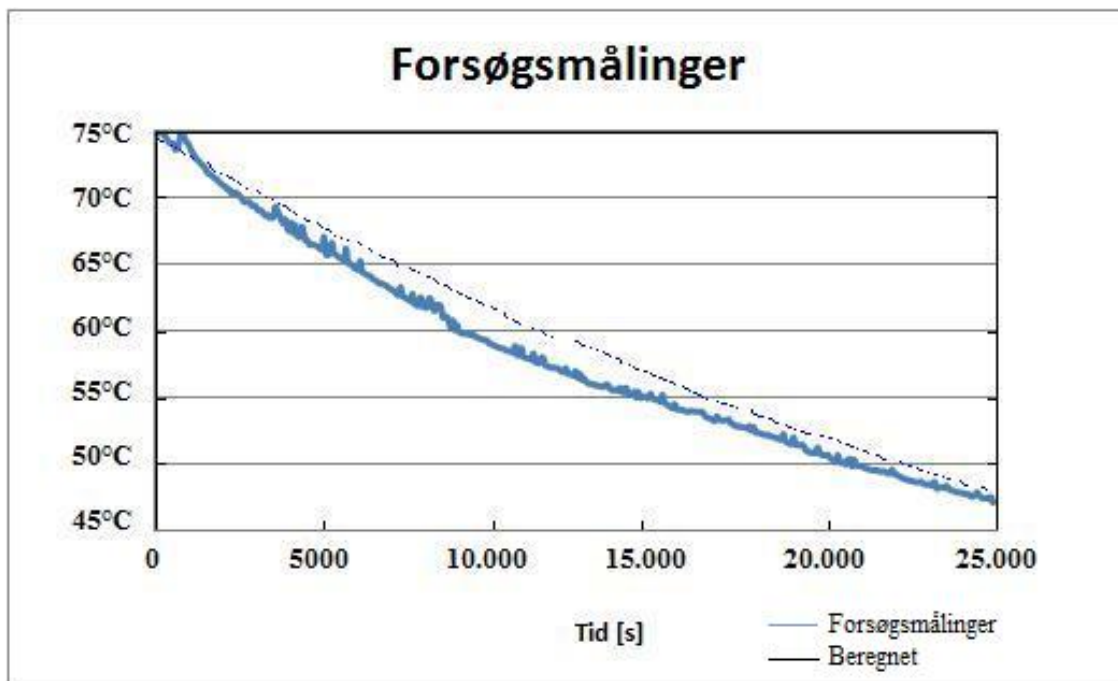
Fejlkilder: Effekttabet i modellen er for lille i forhold til forsøgsmålingerne. Dette skyldes fejlkilderne.

- Der er en åbning i beholderen, hvor Haake D1 er sat på kassen. Dette gør, at varmen afgives hurtigere til luften.
- Åbningen i beholderen medfører, at dampen kan slippe ud, hvilket gør vandets masse mindre. Dette medfører, at der hurtigere bliver afgivet varme til omgivelserne.
- Haake D1 bliver siddene på beholderen under forsøget. Varmelegemerne, som bruges til at opvarme vandet, har en temperatur, der er højere end vandets, og vil derfor stadig afgive varme til vandet et stykke tid efter, det er slukket.
- Vandet i beholderen står stille, da der ingen omrøring er, hvilket medfører, at vandet i beholderen virker isolerende på vandet i midten. Da temperatur målingerne foretages i midten af beholderen, er temperaturen, som bliver målt, højere end gennemsnitstemperaturen i hele beholderen.
- k-værdien er ikke præcis. k værdierne for isoleringsmaterialerne er ikke specifikt kendt, så i beregningerne er den oplyste k-værdi et gennemsnit af værdierne for de tre materialer.

Konklusion på forsøg:

Den konstruerede formel i Matlab giver et scenarie, hvor temperaturen er 47,75°C ved

24.900s. Ifølge forsøget er temperaturen $47,01^{\circ}\text{C}$ 24.900s efter start. Hermed kan der konstateres, at den konstruerede formel for varmetabet i en vandbeholder gælder, da den beregnede temperatur kun afviger med 1,6% i forhold til forsøget.



Figur 5.5. Her ses, at der er overensstemmelse mellem den beregnede og den målte temperaturkurve.

Beregning på 20 liters tank: Hvis der var en vandtank på 20L med et overfladeareal på $1,0552\text{m}^2$, der stod inde i et hus med en rumtemperatur på 20°C og havde en starttemperatur på 75°C . Hvor lang tid ville det tage før temperaturen var det samme som rumtemperaturen?

Ved at bruge den eksponentialligning, der er den bedste ligning for sammenhængen, kan tiden findes:

$$(5.3) \quad T_{Slut} = 72,326 * e^{-2*10^{-5}*t_{Slut}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$(5.4) \quad t_{Slut} = -50.000 * (\ln(T_{Slut}) - \ln(72,326)) \quad [\text{s}]$$

$$(5.5) \quad t_{Slut} = -50.000 * (\ln(20) - \ln(72,326)) \quad [\text{s}]$$

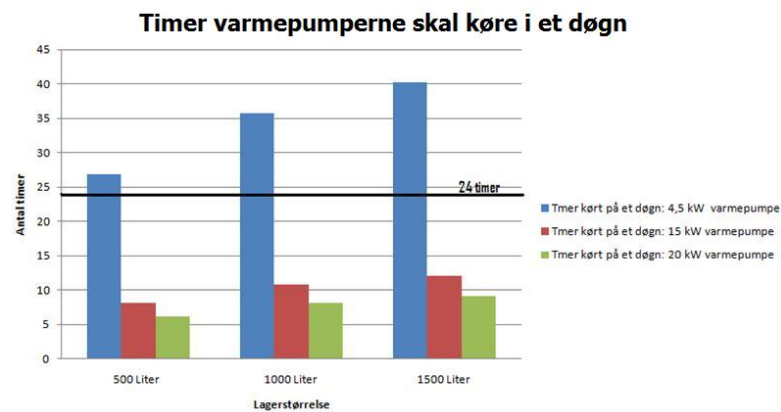
$$(5.6) \quad t_{Slut} = 64272,6\text{s} \approx 17,85\text{timer}$$

Det vil tage 17,85 timer, at afkøle 20L vand i en beholder med 0,068m isolering fra 75°C til 20°C , hvis den bare fik lov at stå.

Forsøget efterbeviste den konstruerede formel om varmetabet i et lager. Den formel bruges i de senere beregninger vedrørende lageret.

5.2 Forskellige lagerkapaciteter og varmepumpestørrelser

Det konstruerede programmet (Excel ark 2, se bilag 2) viser hvor mange timer en given varmepumpe skal køre i døgnet. Hvis varmepumpen skal køre 24 timer eller mere, kan der konkluderes, at varmepumpen er for lille eller lageret er for stort til, at det kan fyldes 100% op, inden det bliver brugt igen. På figur 5.6 ses et scenarie for et vinterdøgn, hvor nattetemperaturen er -2°C og dagstemperaturen er $0,6^{\circ}\text{C}$. Vores husstand er på 130m^2 og er beboet af en familie på 4 personer, som forbruger 124 liter varmtvand i døgnet. Minimumsniveauet er sat til, at der skal være 40% tilbage i tanken hele tiden, så det ikke går ud over rumopvarmningen, som kører konstant med en temperatur på 45°C . Kravet til varmepumpen med lager var, at den skulle bruge lageret i den tid på døgnet, hvor elspotprisen var dyrest. Dog kan dette program kun vise, hvor lang tid varmepumpen skal køre på et døgn uden at tage hensyn til elspotprisen. En optimeringsmulighed var at få varmepumpe til at fylde lageret, selvom tanken ikke har nået det kritiske punkt på 40%. Varmepumpen skal køre i de timer, hvor spotprisen er lavest, så det bliver rentabelt.



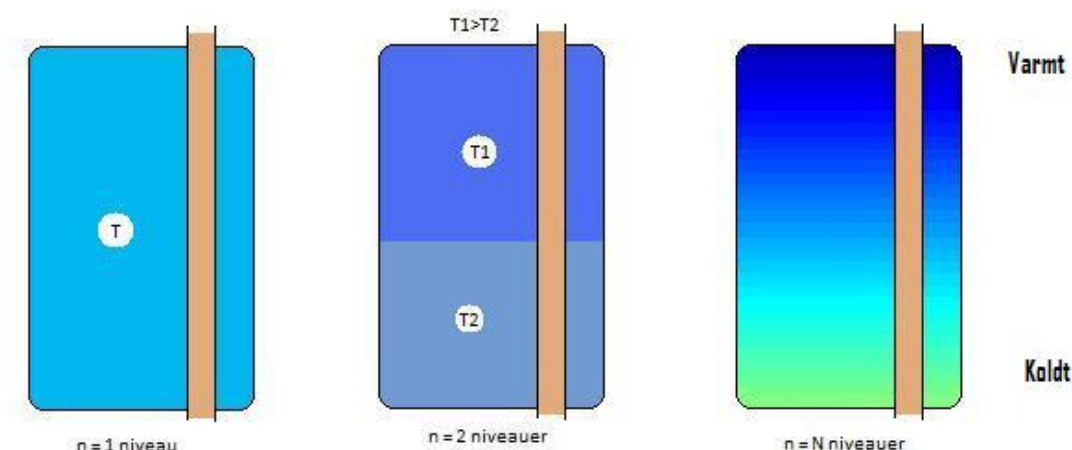
Figur 5.6. Forskellige tanke og varmepumpe størrelser.

Der konkluderes, at det ikke er muligt at fylde nogen af de tre tankstørrelser med 4,5 kW varmepumpen. Endvidere kan man slutte, at jo højere varmeydelse jo færre timer skal den køre for at fylde tanken, og på den måde kan man optimere, således at varmepumpen opfylder lageret, når spotprisen er lavest ved hjælp af en intelligent elmåler.

Model og analyse af varmelag 6

Afhængig af hvordan man regner med, at vandet vil opføre sig i beholderen, vil man få nogle forskellige temperaturer ud i rørsystemet til forskellige tider. Hvordan man programmerer kontrollen af lageret vil have indflydelse på, hvad der vil være mest optimalt at starte med mht. lageret.

Beregningerne på hvor længe lageret i modelboligen holder, hvilken temperatur man får til varmt brugsvand mv., hviler alle på en antagelse om lagdelingen og opførslen af vandet i lageret.



Figur 6.1. Forskellige måder at lagdele vandet på i akkumuleringstanken.

På figur 6.1 er der vist forskellige løsninger til, hvordan det kunne antages, at vandet ville fordele sig. I tanken til venstre er temperaturen ens overalt, hvilket er en mulighed, hvis der er tilstrækkelig med omrøring i vandtanken. Man kunne antage, at vandet vil fordele sig som billedet i midten, hvis vandet opfører sig, som biologer kender det fra søer med springlag. Hvis vandet er stillestående, vil det fordele sig med det varmeste vand øverst og det koldeste vand nederst. Dette skyldes, at vandets densitet afhænger af temperaturen og saltkoncentrationen, og deraf vil det letteste, altså det varmeste, ligge sig

øverst. I tilfælde med springlag spiller saltkoncentrationen en vigtig rolle, og da der ikke er salt til stede i lageret, må det antages, at vandet ligger sig i N antal lag. Det har ikke været muligt at skaffe dokumentation for ét bestemt antal N -lag, derfor regnes der med en temperaturforskel mellem lagene i stedet for, som antages til at være forholdsvis lille.

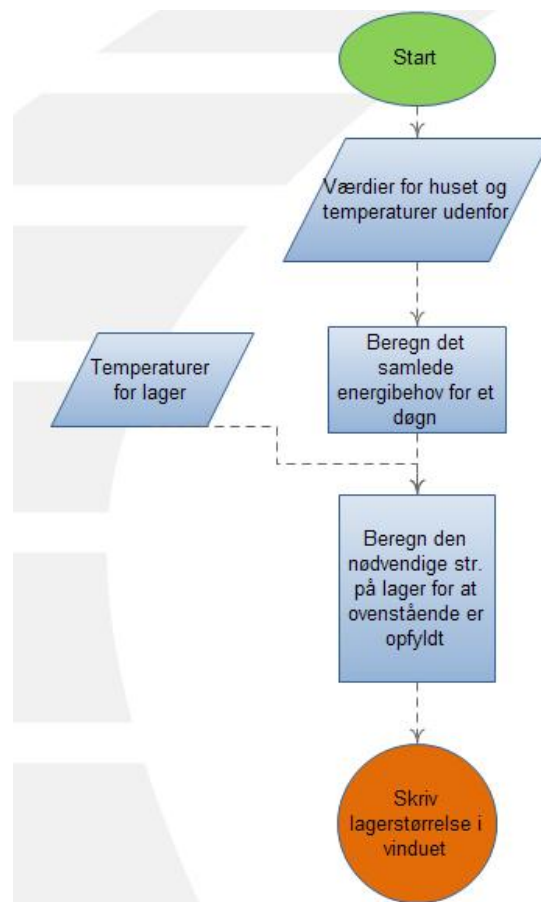
6.1 Dimensionering af lager

For bedre at kunne regne på lagene er der blevet programmeret en model, hvor kildekoden findes i bilag C. I modellen optræder der en række antagelser, som vil blive nævnt, fordi de har betydning for præcisionen af modellen. Der er i modellen forudsat at:

- Vandtanken antages at have cylinderform.
- Alle lagene er lige store.
- Flowet er konstant, dvs. varmt brugsvand antages at blive samlet i en lille varmtvandsbeholder ved siden af. Da flowet ellers burde varierer, når nogen gik i bad eller være timesat til at blive øget i morgentimerne af hensyn til personernes bad.
- Nat og dag er hver især 12 timer, og der er én temperatur gennem henholdsvis natten og dagen.
- Der ganges med 1,33 til overfladearealet i $Q_{tab(ii)}$, da overflade arealet er regnet uden top og bund. Det skyldes, at det øverste lag burde være det varmeste, men hvis det samtidig har kontakt med hele toppen, vil det øverste lag derfor tabe energien hurtigere til omgivelserne og derefter synke ned. Det vil skabe bevægelser i lageret og ødelægge lagdelingen.
- Det antages, at 1 liter vand vejer 1 kg, og at $1m^3$ rummer 1000 liter vand svarende til 1000kg vand.
- Det antages, at noget af varmen fra det varme brugsvand vil gå til opvarmning af huset, da badeværelset vil blive varmt efter, der er blevet taget et varmt bad. Denne genanvendelses faktor er i koden betegnet som nablavand.
- Det antages, at brugsvandet i røret kommer ind fra bunden af tanken, og går ud i toppen.

Først og fremmest skal lageret dimensioneres. Det skal have en sådan størrelse, at det kan stå og blive forbrugt et helt døgn, hvorefter varmepumpen skal køre igen. Det antages, at det er muligt at finde ét tidspunkt i løbet af 24 timer, hvor varmepumpen vil kunne køre forholdsvis billigt. For at sikre, at lageret kan holde et helt døgn på en hvilken som helst dag i året, bliver det dimensioneret, så det kan klare den koldeste dag. I år 2009 var det uge 5, der havde de koldeste temperaturer med en nattemperatur på -2 grader og en dagstemperatur på 0,6 grader [Danmarks Meteorologiske Institut, uge 48 2009]. Se programmets flow på figur 6.2. Til de før nævnte temperaturer og med et varmtvandsbehov i boligen på 124 liter om dagen (31 liter pr. person) [Statens Bygnings Institut, marts 2006], er det nødvendigt med en tank på 6200 liter. Det ses ligledes af modellen, at ved at reducere boligens varmetab med 20%, vil huset kunne nøjes med en tank på 4900 liter. I købsituation af varmepumpe og lager vil det derfor være interessant at se, om nogle af

pengene kunne investeres bedre i efterisolering af boligen i forhold til at købe en større vandtank.



Figur 6.2. Programflow for beregning af lagerets størrelse til 1 døgn.

Der kan konkluderes at ved dimensionering af tanken, skal man kigge på, om en investering i bedre isoleringen kan være mere rentabelt end at investere i en større tank.

6.2 Lagdelingens betydning

Alt energien til brugsvandet og opvarmning kommer fra lageret. Så lageret skal fungere så optimalt som muligt. Lageret skal styres elektronisk via sensorer i tanken og røret, så man kan få den rette mængde energi ud. Til beregningerne på lageret er der skrevet en udvidelse til førnævnte program, hvor flowcharten kan ses på figur 6.3, og kildekoden findes i bilag C under programmet. Til at modellere vandtanken med omrøring, hvor der kun er ét lag, er der skrevet et særskilt program, som ligeledes findes i bilag C under afsnittet ”Program for et lag”.

Lagerne er modelleret på 3 forskellige måder:

Ettagstanken:

- Består af en tank med den samme temperatur, da der er omrøring for at sikre, at der ikke dannes lag.

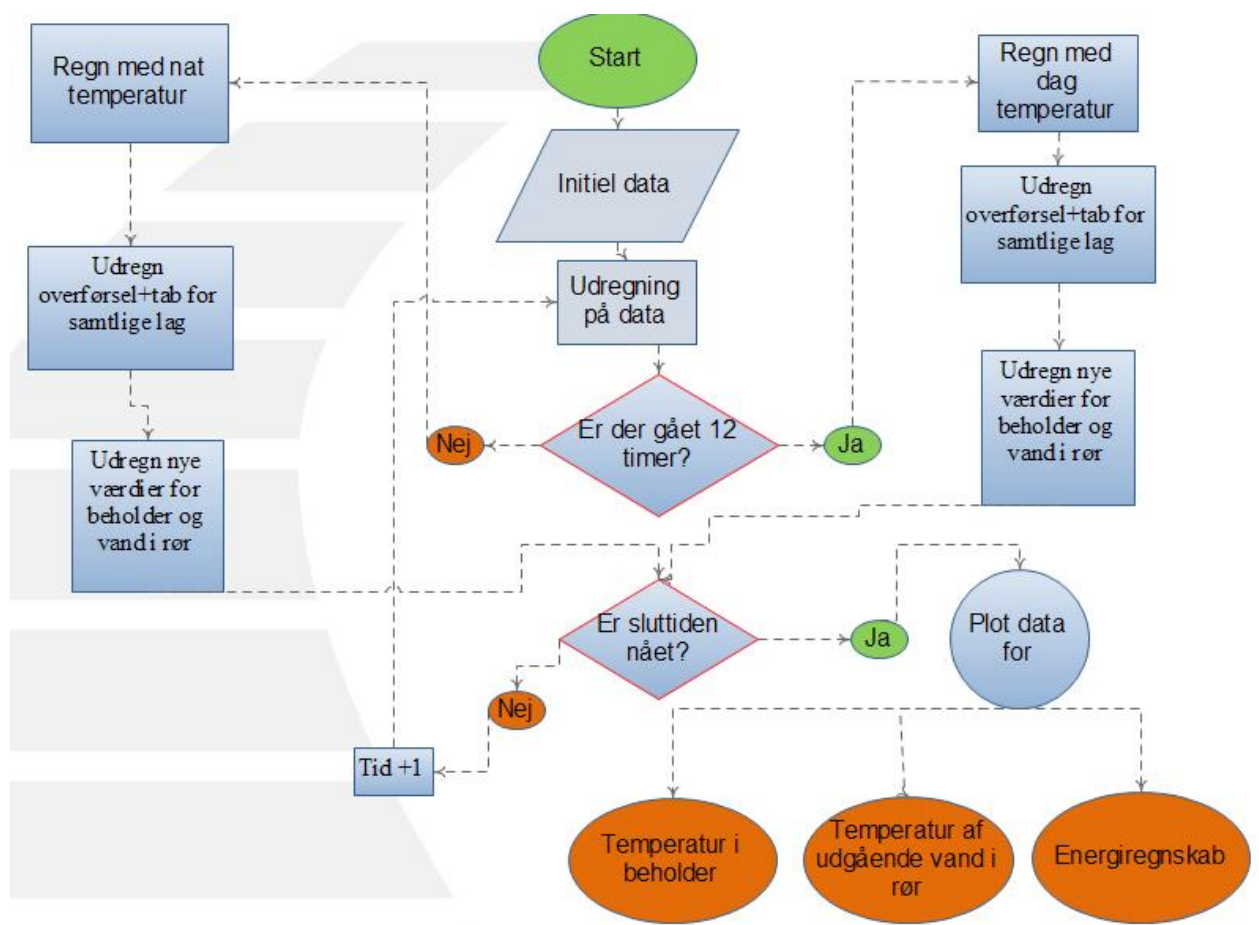
Kunstigt skabt lagdeling:

- Modellen er fra starten lagdelt og vandet er stillestående.

Lagdeling senere:

- Hele lageret har samme temperatur ved start, og pga. stillestående vand vil vandet i tanken lagdele sig, som tiden går.

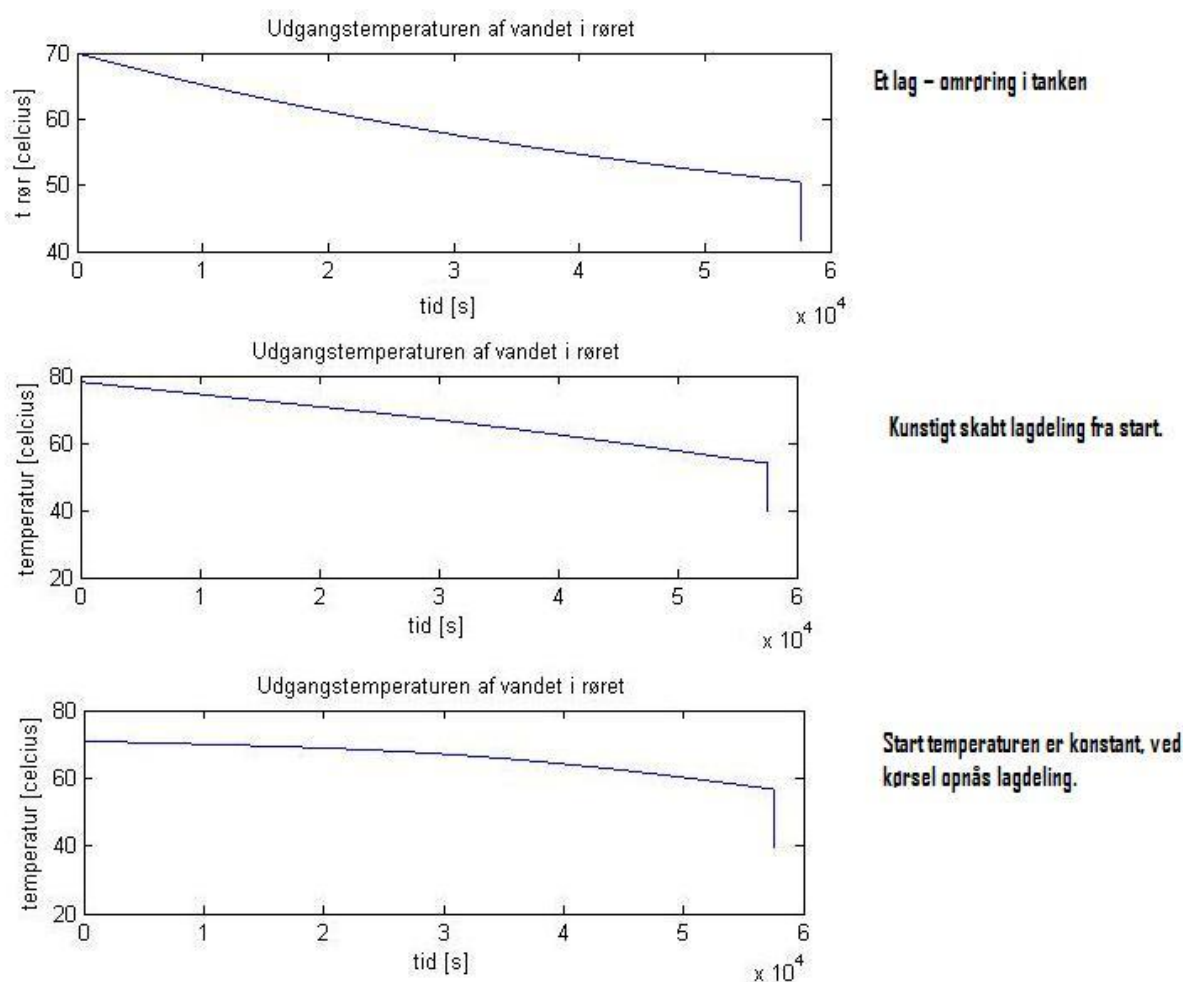
For at kunne lave en fornuftig sammenligning indeholder de tre lagre alle den samme mængde energi. For lageret med omrøring og lageret, der senere lagdeles er starttemperaturen 70°C. For lageret, hvor lagdelingen allerede findes, er temperaturen i bunden 60°C og i toppen 80°C, og da lagene er lige store, svarer det til et gennemsnit, hvor hele tanken er 70°C som hos de andre to.



Figur 6.3. Flowdiagram over beregningerne.

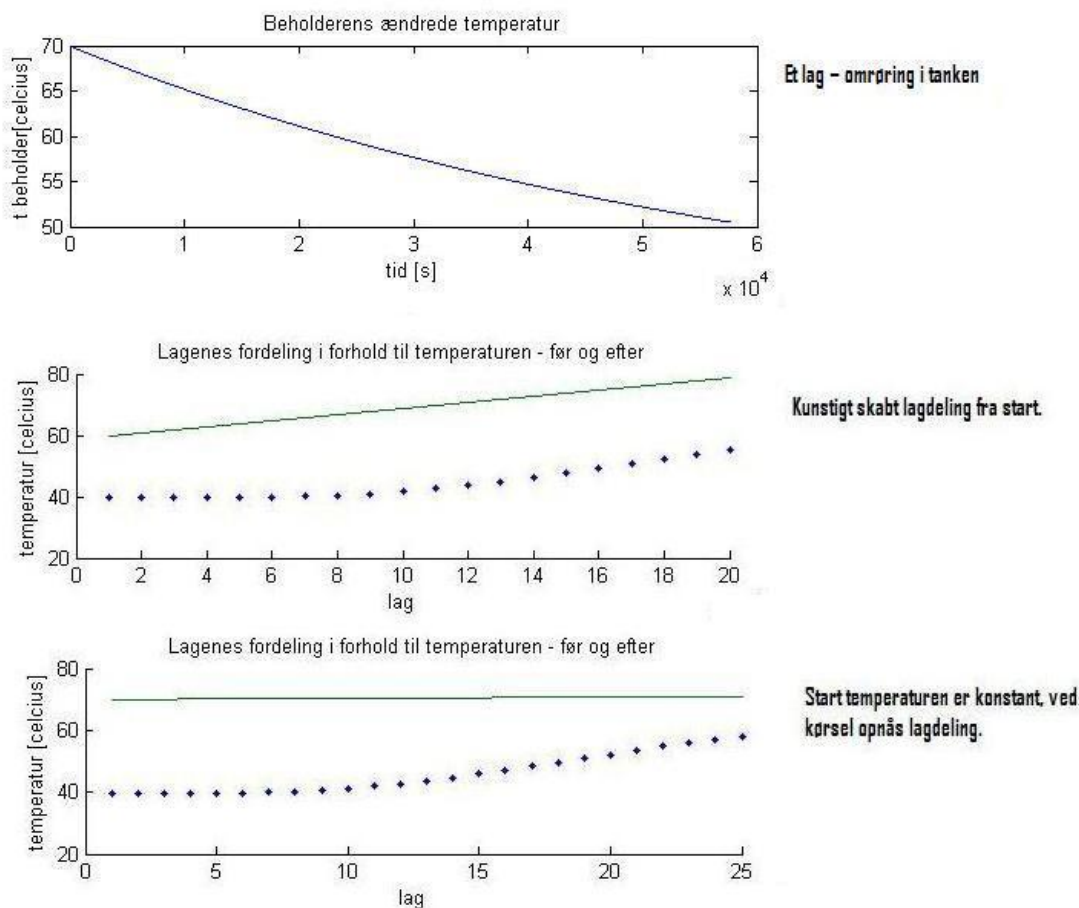
Størrelsen på de 3 lagre er ens, det samme gælder for rørerne, samt hastigheden af vandet i rørene. Lagene er modelleret over den koldeste dag, men kun over 16 timer i stedet for et helt døgn, da det så er muligt at sammenligne brugbarheden af de 3 lagertyper, når 2/3 dele af tiden er gået.

På figur 6.4 ses udløbstemperaturen for vandet, der kommer ud af røret, som skal bruges til brugsvand. Det bemærkes, at den skarpe lodrette linje til sidst på hver af graferne skyldes, at der er noget af vandet i røret, der er under opvarmning, når tiden ender. Det er derved ikke nået at blive varmet helt op, og ligger derfor mellem indløbstemperaturen på 40°C og udløbstemperaturen af røret. I lageret med omrøring falder udløbstemperatur mere markant end i de 2 andre tanke. I lageret med kunstig lagdeling falder temperaturen på vandet støt i det øverste lag fra 80°C til lidt under de 60°C. Lageret, der ved kørsel opnår lagdeling holder temperaturen på udløbsvandet sig forholdsvis jævnt, hvor det går fra 70°C til ned under 60°C. Ud fra denne sammenligning vil det være bedst at sørge for, at hele lageret er gennemvarmet som i lager 3, inden man tager det i brug og sørger for, at vandet i tanken forbliver stillestående, således at lagdelingen bliver muliggjort.



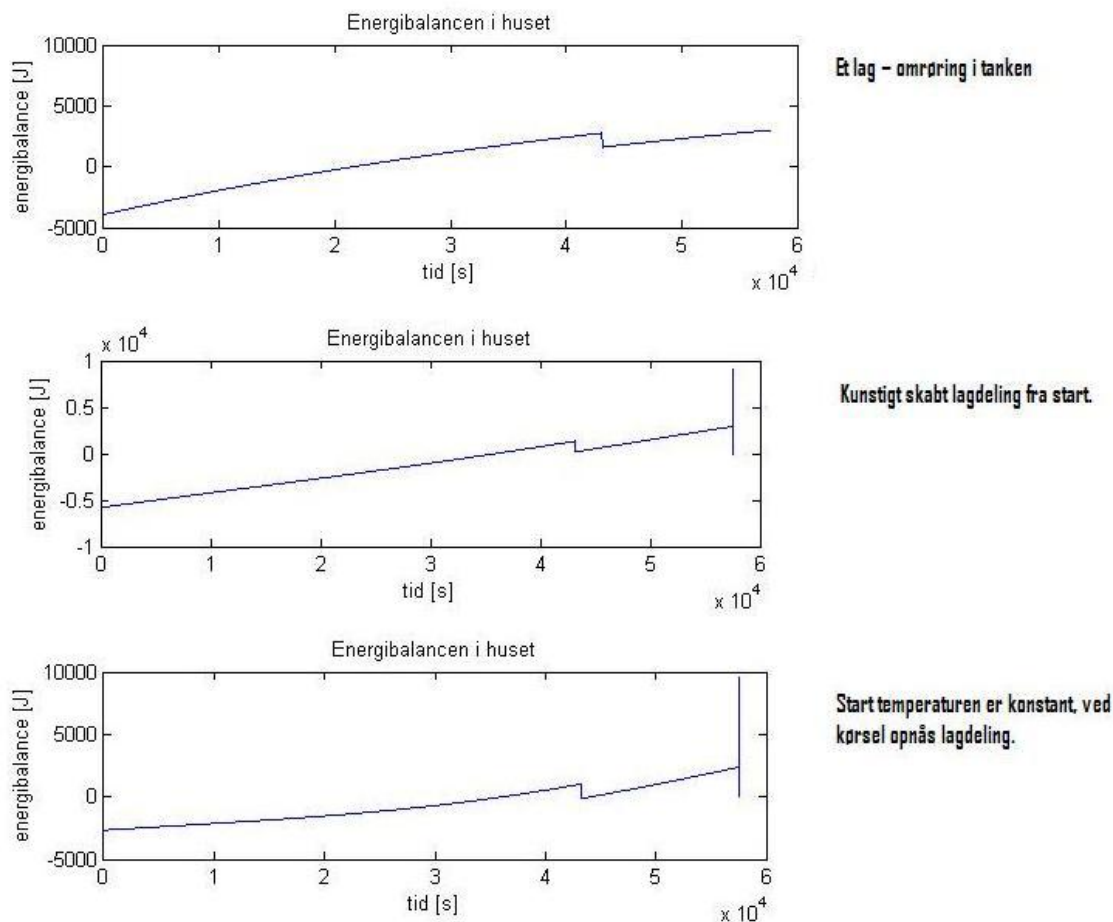
Figur 6.4. Udløbstemperaturen på vandet til brugsvand. Stregen ned til sidst på graferne er det vand, der stadig er i rørerne og derfor ikke er varmet færdigt op.

På figur 6.5 sammenlignes selve lageret. Efter de 16 timer er gået, er lageret uden lagdeling koldere end de andre. Det er interessant at bemærke, at tankene med lagdeling har fordelt sig stort set ens, når der er gået de 16 timer. Så selvom de startede ud med at afgive varmt vand i forskellige temperaturer, er deres lager til tiden 16 timer stort set ens, og det kan derfor antages, at de vil opføre sig næsten ens den sidste tredje del af tiden, inden døgnet er gået.



Figur 6.5. Afbildning af selv lageret. På lagrene med lagdeling er den grønne linje repræsentativ for lagerets udseende ved starttidspunktet. De blå prikker repræsenterer de forskellige lag hele vejen op (lag 1 er bund og den to cifrede ende toppen). Ved ét lag med omrøring konstateres at temperaturen er 50 grader ved sluttidspunktet.

På figur 6.6 sammenlignes energibalancen i huset. Da der i modellen ikke ændres på flowet i røret, vil der være tidspunkter, hvor der sendes for meget varme ud i huset og tidspunkter, hvor der ikke er nok energi. Y-aksen angiver afvigelsen fra at energibehovet er dækket perfekt. Når der bliver sendt for meget energi ud, er det vist på grafen på den negative del af y-aksen og for lidt på den positive del af y-aksen. For at varmebehovet bliver opfyldt, skal der derfor være lige så meget negativt som positivt for at det udligner sig, ellers skal grafen ligge på 0. Alle 3 vandtanke starter med at afgive for meget varme, og ender med at afgive for lidt. Vandtankene med lagdeling, ligger sig forholdsvis pænt omkring 0 punktet. Vandtanken uden lagdeling kommer hurtigere til at mangle energi i forhold til de andre tanke.



Figur 6.6. Hakked der optræder efter 12 timer, skyldes en omstilling fra nat- til dagstemperatur.

Baseret på den sammenlignende analyse af de forskellige tanke vil det bedste lager være en tank med stillestående vand, dvs. uden omrøring. Ved energiopfyldning tilstræbes det at opnå, at temperaturen bliver ens for hele tanken. Den er især at foretrække fordi, at på det første halve døgn falder temperaturen på brugsvandet kun lidt. Af udviklingsmuligheder på modellen kunne det være interessant at udbygge den, så flowet af vandet hele tiden blev justeret for at få energibalancen til at blive 0 samt give programmet en brugerflade.

Konklusion 7

Efter endt rapport kan det konstateres, at der i fremtiden vil opstå flere kritiske eloverløb, altså eloverløb Danmark ikke kan eksportere sig ud af. Dette skyldes, at Danmark allerede i dag har problemer med kritiske eloverløb, selvom at kun 20% af energiproduktionen stammer fra vindkraft. I år 2025 skal op mod 36% af Danmarks energi komme fra vindkraft i følge regeringen. Det er derfor nødvendigt at finde en løsning, således at Danmark ikke sælger til under produktionspris til nabolandene eller bliver nødt til at lukke for dele af produktionen i perioder. I undersøgelsen af løsningen på problemet er det er ikke fundet fornuftigt at lukke kraftværker ned i perioden. Hybridbiler, elbiler, stort varmelager på kraftværk, brintsamfund, danne potentiel energi, danne kinetisk energi og varmepumper med lager hos den enkelte husstand er alle fundet som en tilfredsstillende løsning på problemet.

Set ud fra at CO_2 emissionen også skal begrænses er der valgt at satse på varmepumper hos den enkelte husstand. Hvis det antages at alle husstande, der har elovne, naturgas- og oliefyr skiftede til varmepumper (i alt 784.357 husstande) fremgår det af figur 4.4, at varmepumpen er en mulig løsning på problemet med eloverløb. Alene ved at implementere varmepumper med en COP på 3,5 i alle boliger, som nu har elovne, naturgas- og oliefyr, sparer Danmark 2% af Danmarks samlede CO_2 emission i forhold til 1990. Hvis varmepumpen er styret af en intelligent elmåler, der afregner til spotprisen, har et lager og kører ca. 50% af tiden med ren vindkraft, kan der opnås en samlet besparelse på 4% af Danmarks samlede CO_2 emission i forhold til 1990. Lagerets størrelse og placering gør meget for elforbruget. Et stort lager placeret indenfor kan nedbringe elregningen, da varmepumpen kun skulle køre om natten, når elprisen oftest er lavest. Det bemærkes dog, at der i en købsituation burde overvejes at efterisolere huset således, at man kan nøjes med et mindre lager, og deraf vil reducere endnu mere af CO_2 emissionen og elforbruget. Vi har lavet et forsøg, hvor vi har målt varmetabet for en flamingoisoleret 20 liters beholder. Denne stemte overens med vores beregninger. Udfra beregningerne videreudviklede vi et program, der kunne modellere lageret. Dette blev programmeret i Matlab og er vedlagt i bilag C. Det findes, at det bedste lager er delt i flere lag som opnås ved stillestående vand i lageret. Derudover er det at foretrække at hele lageret hver gang bliver opvarmet til høj temperatur både i top og bund.

Vi har også lavet en model i Excel for hvornår varmepumpen skal køre for at opfylde boligens varmebehov ved forskellige udetemperaturer. Alt i alt kan det konkluderes at varmepumper er en af løsningerne til fremtidens energiproblemer.

Litteratur

- Aage B. Lauritsen, Søren Gundtoft, 2007.** Aage B. Eriksen Aage B. Lauritsen, Søren Gundtoft. *Termodynamik -teoretisk grundlag, praktisk anvendelse*. Nyt teknisk forlag, 2007.
- Andersen, 2009.** Anders Andersen. *Videnskab, menneske og samfund, kursusgang 3*. PE-kursusforelæsning Energi d. 4. november, 2009.
- Andes, 2009.** Andes. *Produkter*. URL:
<http://www.andespro.dk/shop/luft-til-vand-223p.html>, 2009.
- Arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsen, 2001.** Arbejdsgruppe nedsat af Energistyrelsen. *Rapport fra arbejdsgruppen om kraftvarme- og VE-elektricitet*, Energistyrelsen, 2001.
- Blarke, maj 2008.** Morten B. Blarke. *From stardust to sustainability*, Department of Development and Planning, Aalborg Universitet, URL:
<http://people.plan.aau.dk/~blarke/teaching/vms/kursusgang1/essay%20-%20from%20stardust%20to%20sustainability%20.pdf>, maj 2008.
- Comfort, 2009.** Comfort. *Vedvarende energi*. URL:
<http://comfort.dk/files/billeder/VVS/Vedvarende%20energi/00004304.jpg>, 2009.
- Danmarks Meteorologiske Institutt, uge 48 2009.** Danmarks Meteorologiske Institutt. *Uge oversigt*. URL:
<http://www.dmi.dk/dmi/index/danmark/ugeberetning.htm>, uge 48 2009.
- Danmarks Vindmølleforening, 2009a.** Danmarks Vindmølleforening. *Vindmøller på havet*. Fakta om Vindenergi, 2009.
- Danmarks Vindmølleforening, 2009b.** Danmarks Vindmølleforening. *50% af Danmarks elforbrug med vindenergi i 2025*. 2009.
- Dansk Energi, 2009a.** Dansk Energi. *EDISON - et projekt om infrastruktur til elbiler*. URL: <http://www.danskeenergi.dk/Netteknik/Edison.aspx>, 2009.
- Dansk Energi, 2009b.** Dansk Energi. *Dansk Elforsyning Statistik 2008*. ISSN 0907-5259. 2009.
- DI - Energibranchen, SydEnergi a.m.b.a., SEAS/NVE a.m.b.a., Siemens A/S, Danfoss A/S og Ea Energianalyse A/S, 2009.** DI - Energibranchen,

- SydEnergi a.m.b.a., SEAS/NVE a.m.b.a., Siemens A/S, Danfoss A/S og Ea Energianalyse A/S,. *Prisfølsomt elforbrug i husholdninger*, energiselskaber, 2009.
- EMD International A/S, 2009.** EMD International A/S. *Estimeret elproduktion og forbrug i vest-Danmark (Jylland/Fyn)*. URL: <http://www.emd.dk/el/main.php?>, 2009.
- Energinet.dk, februar 2009a.** Energinet.dk. *Fakta om edison*. URL: <http://www.energinet.dk/NR/rdonlyres/606A67A2-C915-42D4-9A3C-C46B16B29BE3/0/FaktaomEDISON.doc>, februar 2009.
- Energinet.dk, februar 2009b.** Energinet.dk. *Elspot priser fra d. 05.02.2009 og eloverløb fra d. 05.02.2009*. URL: <http://www.energinet.dk/da/menu/Marked/Udtr%c3%a6k+af+markedsdata/Udtr%c3%a6k+af+markedsdata.htm>, februar 2009.
- Energinet.dk, november 2009.** Energinet.dk. *Udtræk af markedsdata*. URL: <http://www.energinet.dk/da/menu/Marked/Udtr%c3%a6k+af+markedsdata/Udtr%c3%a6k+af+markedsdata.htm>, november 2009.
- Energinet.dk, 2009.** Energinet.dk. *Danmarks elforbrug og -produktion som kort*. URL: <http://www.energinet.dk/Integrationer/ElOest/ElsystemetLigeNu/energinet1.swf>, 2009.
- Energinet.dk, 2009.** Energinet.dk. *Markedsdata til scenarie*. URL: <http://www.energinet.dk/da/menu/Marked/Udtr%C3%A6k+af+markedsdata/Udtr%C3%A6k+af+markedsdata.htm>, 2009.
- Energistyrelsen, 2009a.** Energistyrelsen. *Statistik og Nøgletal*. URL: http://www.ens.dk/da-DK/Info/TalOgKort/Statistik_og_noegletal/Oversigt_over_energisektoren/Stamdataregister_vindmoeller/Documents/Oversigtstabeller_UK-DK.xls, 2009.
- Energistyrelsen, 2009b.** Energistyrelsen. *Energi statistik 2008*, Energistyrlsen, 2009b.
- Energistyrelsen, 2009c.** Energistyrelsen. *Danmarks olie- og gasproduktion og anvendelse af undergrunden 2008*, Energistyrelsen, 2009c.
- Energistyrelsen, Maj 2009.** Energistyrelsen. *Pdf: Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet*. URL:<http://www.ens.dk/da-dk/info/talogkort/fremskrivninger/analyser/beregningsforudsatninger/Sider/Forside.aspx>, Maj 2009.
- Energistyrelsen, 2008.** Energistyrelsen. *Markedsdata om Danmarks elforbrug*. URL: <http://www.ens.dk/da-dk/info/nyheder/nyhedsarkiv/2009/sider/20090130elforbrugetfaldti2008.aspx>, 2008.
- Øhlenschlæger, 2004.** Erik Øhlenschlæger. *Grundlæggende fysik 1*. Gyldendal, 2004.
- Industri, 2009.** Dansk Varmepumpe Industri. *Produkter*. URL: <http://www.jordvarme.dk/>, 2009.

- Ingeniøren.** Ingeniøren. *Opfordring: Intelligente Elmålere nu*. URL: <http://ing.dk/artikel/79599-opfordring-intelligente-elmaalere-nu>, year = 2007,.
- Key2green, September 2007.** Key2green. *Nøgletal – fyringsolie, træ og halm*. URL: <http://www.key2green.dk/page73.aspx>, September 2007.
- Klima- og Energiministeriet, 2009.** Klima- og Energiministeriet. *Energisparebolig - Varmepumper*. URL: <http://www.energisparebolig.dk/da-DK/LuftVandVarmepumper/Teknikken/Sider/Saadanfungerervarmepumpen.aspx>, 2009.
- Miljøstyrelsen, 2006.** Miljøstyrelsen. *Sammenligning af energiforbruget til køling i supermarkeder med transkritisk CO2 og kaskade system*, Miljøstyrelsen, 2006.
- Schaltz, 23. oktober 2009.** Erik Schaltz. *Lagring af elektrisk energi*. Forelæsning for energiteknik i kurset Fremtiden energisystemer, 23. oktober 2009.
- Statens Bygnings Institut, marts 2006.** Statens Bygnings Institut. *Sammenfatning af Husholdningernes energi- og vandforbrug*. URL: <http://www.sbi.dk/miljo-og-energi/livsstil-og-adferd/husholdningers-energi-og-vandforbrug/sammenfatning>, marts 2006.
- Statistik, 2009.** Danmarks Statistik. *Byggeri og boligforhold*. URL: <http://www.statistikbanken.dk/430>, 2009.
- Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S., 2001.** Teknologisk Institut, Vesttherm, A/S Vestfrost Group og Lodam Elektronik A/S. *CO2 som kølemiddel i varmepumper*, Teknologisk Institut i samarbejde med andre, 2001.
- Transport- og Energiministeriet, juni 2005.** Transport- og Energiministeriet. *Energistrategi 2025- Perspektiver frem mod 2025 og Oplæg til handlingsplan for den fremtidige el-infrastruktur*. Transport- og Energiministeriet, juni 2005.
- Varmeteknik, 2009.** Vølund Varmeteknik. *Produkter*. URL: <http://www.volundvt.dk/>, 2009.
- Videncenter for HFC-fri køling, 2006.** Videncenter for HFC-fri køling. *Kølemlernes hoveddata*. URL: <http://www.hfc-fri.dk/19550>, 2006.
- Warehouse, 2009.** Aircon Warehouse. *Produkter*. URL: http://www.airconwarehouse.com/acatalog/Sanyo_CO2_ECO_Air_Source_CO2_Heat_Pump.html#a150, 2009.
- Wellmore, 2009.** Wellmore. *Produkter*. URL: <http://www.wellmore-energi.dk/>, 2009.

Vindkraft og husstande



Beregning af den totale vindkraft produktion i Danmark 2008: 24,94 PJ [Energistyrelsen, 2009b].

$$(A.1) \quad \frac{1TWh}{3,6PJ * 24,94PJ} = 6,93TWh = 6928GWh$$

Total antal husstande i Danmark Statistik [2009].

2008: 2.530.494 husstande

2009: 2.548.240 husstande

Total antal husstande i Danmark (De typer der er valgt at blive kigget på) [Statistik, 2009]:

2008: 1.530.222 husstande

2009: 1.541.240 husstande

Statestikbanken	2008	2009
Fjernvarme	674.975	685.581
Centralvarme med olie	330.449	317.656
Centralvarme m. naturgas	314.441	323.434
Centralvarme, ikke olie og naturgas	55.494	60.994
Elovne	124.390	123.267
Øvrige ovne	19.405	19.053
Uoplyst	11.068	11.255

Tabel A.1. Fordeling af opvarmningstyper i forhold til det de ovennævnte antal husstande. [Statistik, 2009]

Målingsdata B

Følgende data er alle målinger fra forsøget. Tiden er målt i sekunder, og temperaturen er målt i °C.

Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.
0	74,640	1500	72,096	3000	69,254	4500	66,662	6000	64,692
60	74,583	1560	71,805	3060	68,984	4560	66,653	6060	64,490
120	74,757	1620	71,674	3120	68,907	4620	66,340	6120	65,160
180	74,682	1680	71,575	3180	68,919	4680	66,406	6180	64,288
240	74,854	1740	71,462	3240	68,689	4740	66,342	6240	64,242
300	74,541	1800	71,322	3300	68,532	4800	66,271	6300	64,119
360	74,332	1860	71,266	3360	68,608	4860	66,212	6360	64,008
420	74,042	1920	71,030	3420	68,370	4920	66,076	6420	64,030
480	73,911	1980	70,930	3480	68,469	4980	66,014	6480	63,796
540	73,957	2040	70,782	3540	68,401	5040	66,946	6540	63,731
600	73,625	2100	70,713	3600	69,215	5100	65,643	6600	63,657
660	73,468	2160	70,521	3660	68,813	5160	65,562	6660	63,479
720	73,919	2220	70,535	3720	68,564	5220	65,794	6720	63,456
780	74,722	2280	70,196	3780	68,145	5280	66,510	6780	63,425
840	74,672	2340	70,233	3840	67,916	5340	65,681	6840	63,346
900	74,288	2400	70,273	3900	68,267	5400	65,633	6900	63,297
960	74,030	2460	70,193	3960	67,557	5460	65,446	6960	63,133
1020	73,849	2520	70,026	4020	67,382	5520	65,370	7020	63,043
1080	73,460	2580	69,876	4080	68,011	5580	65,292	7080	63,000
1140	73,234	2640	69,627	4140	67,186	5640	65,209	7140	62,837
1200	72,943	2700	69,526	4200	67,782	5700	66,063	7200	62,691
1260	72,732	2760	69,552	4260	66,972	5760	64,967	7260	62,571
1320	72,634	2820	69,555	4320	66,921	5820	64,916	7320	63,187
1380	72,409	2880	69,312	4380	67,702	5880	64,866	7380	62,497
1440	72,302	2940	69,223	4440	67,255	5940	64,593	7440	62,416

Tabel B.1. Data fra forsøg målt med LabView, del 1.

Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.
7500	62,317	9360	59,657	11220	57,752	13140	55,857	14460	54,887
7560	62,221	9420	59,558	11280	58,226	13200	55,764	14520	54,924
7620	62,137	9480	59,626	11340	57,549	13260	55,791	14580	54,988
7680	62,663	9540	59,500	11400	57,563	13320	55,695	14700	54,833
7740	61,882	9600	59,415	11460	57,470	13380	55,699	14760	55,197
7800	61,910	9660	59,334	11520	57,910	13440	55,888	14820	54,849
7860	61,765	9720	59,311	11580	57,853	13500	55,840	14880	54,794
7920	62,416	9780	59,218	11640	57,272	13560	55,559	14940	54,721
7980	61,736	9840	59,221	11700	57,267	13620	55,444	15000	54,739
8040	61,671	9900	59,175	11760	57,195	13680	55,458	15060	54,601
8100	61,635	9960	58,952	11820	57,127	13740	55,518	15120	55,121
8160	62,313	10020	58,923	11880	57,163	13800	55,388	15180	54,531
8220	62,292	10080	58,826	11940	57,112	13860	55,647	15240	54,415
8280	61,606	10140	58,774	12000	57,110	13920	55,301	15300	54,292
8340	61,386	10200	58,688	12060	56,938	13980	55,347	15360	54,215
8400	61,863	10260	58,644	12180	56,818	14040	55,654	15420	54,108
8460	61,850	10320	58,592	12240	57,123	14100	55,088	15480	54,430
8520	61,747	10380	58,574	12300	56,678	14160	55,155	15540	54,000
8580	60,898	10440	58,468	12360	56,648	14220	55,133	15600	54,013
8640	60,995	10500	58,375	12420	56,668	14280	55,366	15660	53,988
8700	60,973	10560	58,426	12480	56,540	14340	54,892	15720	53,981
8760	60,638	10620	58,355	12540	56,893	14400	55,356	15780	53,889
8820	60,128	10680	58,262	12600	56,380	14460	54,887	15840	53,874
8880	60,694	10740	58,781	12660	56,705	14520	54,924	15900	53,819
8940	59,941	10800	58,089	12720	56,219	14580	54,988	15960	53,921
9000	60,354	10860	58,069	12780	56,344	14640	54,901	16020	53,874
9060	59,865	10920	58,627	12840	56,121	14160	55,155	16080	53,864
9120	59,716	10980	57,933	12900	55,968	14220	55,133	16140	53,857
9180	59,716	11040	57,888	12960	55,948	14280	55,366	16200	53,859
9240	59,665	11100	57,834	13020	55,930	14340	54,892	16260	53,810
9300	59,680	11160	57,806	13080	55,828	14400	55,356	16320	53,819

Tabel B.2. Data fra forsøg målt med LabView del 2.

Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.	Tid	Temp.
16260	53,810	18480	51,918	21060	49,799	23160	48,271	24660	47,383
16320	53,819	18900	51,456	21120	49,640	23220	48,618	24720	47,364
16380	53,519	18960	51,409	21180	49,573	23280	48,095	24780	47,403
16440	53,435	19020	51,934	21240	49,585	23340	48,110	24840	47,283
16500	53,384	19080	51,383	21300	49,476	23400	48,188	24900	47,471
16560	53,307	19140	51,341	21360	49,475	23460	48,214	24960	47,012
16620	53,230	19200	51,336	21420	49,430	23520	48,116		
16680	53,151	19260	51,362	21480	49,433	23580	48,293		
16740	53,488	19320	51,299	21540	49,433	23640	48,096		
16800	53,255	19380	50,968	21600	49,338	23700	47,952		
16860	53,206	19440	50,901	21660	49,389	23760	47,939		
16920	53,200	19500	50,777	21720	49,376	23820	47,869		
16980	53,217	19560	50,744	21780	49,312	23880	47,789		
17040	53,186	19620	50,799	21840	49,208	23940	47,832		
17100	53,278	19680	50,750	21900	49,241	24000	47,760		
17160	52,940	19740	51,176	21960	49,500	24060	47,696		
17220	52,934	19800	50,709	22020	49,173	24120	47,742		
17280	52,770	19860	50,643	22080	49,136	24180	47,619		
17340	52,722	19920	50,562	22140	49,038	24240	47,662		
17400	52,789	19980	50,562	22200	48,966	24300	47,480		
17460	52,698	20040	50,634	22260	48,871	24360	47,524		
17520	52,654	20100	50,386	22320	48,808	24420	47,578		
17580	52,667	20160	50,285	22380	48,776	24480	47,819		
17640	52,589	20220	50,200	22440	48,691	24540	47,616		
17700	52,785	20280	50,068	22380	48,776	24600	47,422		
17760	52,410	20340	50,603	22440	48,691	24660	47,383		
17820	52,729	20400	50,031	22500	48,699	24720	47,364		
17880	52,327	20460	50,075	22560	48,620	24780	47,403		
17940	52,252	20520	50,048	22620	48,598	24840	47,283		
18000	52,249	20580	49,883	22680	48,573	24900	47,471		
18060	52,149	20640	50,236	22740	48,576	24960	47,012		
18120	52,173	20700	50,314	22800	48,612	24300	47,480		
18180	52,071	20760	49,756	22860	48,480	24360	47,524		
18240	52,111	20820	50,278	22920	48,412	24420	47,578		
18300	52,039	20880	49,852	22980	48,370	24480	47,819		
18360	51,984	20940	49,777	23040	48,440	24540	47,616		
18420	51,943	21000	49,794	23100	48,397	24600	47,422		

Tabel B.3. Data fra forsøg målt med LabView del 3.

Kildekode til Matlab program og Excel program



Bilag C findes også på den vedlagte cd, hvor værdierne ligger i filen NivVærdier.m og selve behandlingen af dem ligger i filen Niveauer.m. Modellen for vandtanken med omrøring findes under modelllag.m og her optræder alle værdierne igen i starten, da den har et anderledes defineret tidsinterval. Tiden i den første model bliver defineret efter, hvor lang tid vandet er i hvert lag, hvorimod den i model for et lag er 0.1 sek. Hvis tidsskridtene bliver for store eller flowet for langsomt fungerer programmet ikke. Hvis man vil ind og ændre i koden for at se hvad en bedre varmeisolering af huset, kh, for eksempel betyder, så opfordres det til at man kun ændrer i værdierne i filen NivVærdier.m, gemmer og så køre filen Niveauer.m for at se, hvad det betyder. Selve koden står ude til venstre, og alt der kommer efter % er forklaringer til, hvad der sker på den enkelte linje kode. Til sidst i bilaget findes dokumentationen for Excelkoden

Alle de værdier der optræder i programmet

```
%værdier for selve tanken:
kT = 0.14;          %Varmekonduktivitet for beholder , altså tab ud af
                    %tanken [W/(m*C)]
dTb = 25;           %Forskel i temp. mellem øverste og nederste lag
                    %i beholder [C]
TBbund = 40;        %bundtemperaturen [C]
lT = 0.05;          %Tykkelse af beholderens væg [m]
dl = 1;             %Antal grader mellem hvert lag i varmebeholder [C]
dTBl = dl/dTB;      %Forholdet mellem grad lagtykkelse og temperatur-
                    %forskellen mellem top og bund hver del af laget udgør
h = 1.3;            %Højde af varmebeholder [m]
mB = 500;           %Masse af vand i beholder [kg]
AD = (mB/(pi*1000*h))^(1/2)/0.5+lT; %diameter af bunden [m]
AT = AD*pi*h;       %Overfladeareal af beholderen [m^2]
%værdier for rør
kV = 401;           %Varmekonduktivitet for varmeudvekslingen mellem
                    %vand og rør [W/(m*C)]
```

```

dV = 0.025;      %Diameter af rør [m]
lV = 0.01;       %Tykkelse af varmerør [m]
v = 0.18;        %Flow-hastighed i rør [m/s]
TRind = 40;      %Indgangstemperaturen for vandet i røret
Ar = pi*dV*h;    %overflade areal for rør [m^2]
%tidsværdier
tslut = 3600*1;  %Slut-tid i sek. ligenu står den som
                  %sek/time *antal timer [s]
dt = h*dTBl/v;   %Tid, hvert vandmolekyle har pr. lag i rør [s]
%andet
c = 4186;        %Specifik varmekapacitet for vand [J/(kg*C)]
Qtabgemt = 0;    %summen af alle qtab starter med intet tabt
Qoverfgemt = 0;  %summen af alt det overført, starter med
                  %intet er overført

%Hus
Ah = 268;        %Overflade areal af hus [m^2]
kh = 0.35;       %varmekonduktivitet for huset [W/(m*C)]
Ta = 19;         %Indetemperatur [C]
Tudnat = -2;     %Udetemperaturen om natten [C]
Tuddag = 0.6;    %Udetemperaturen om dagen [C]
lh = 0.21;       %tykkelse af væggene i huset [m]
varmtvand = 124; %massen af varmt vand pr. dag [kg]
                  %(31 kg pr person) [kg]
nablavand = 0.5; %genanvendelsesfaktor af det varme forbrugsvand
                  %til opvarmning af hus

%funktioner for lag i beholder
ATB = AT*dTBl;   %Overfladeareal for hvert lag i beholder [m^2]
mBl = mB*dTBl;   %Masse af hvert vandlag i beholder [kg]
%funktioner for lag i rør
AV = Ar*dTBl;    %Overfladeareal for rør i hvert lag [m^2]
mRl = pi*(dV/2)^2*dTBl*h*1000; %Masse af vand i varmerør
                               %pr. lag [kg]

%funktioner for varmetab i hus
Qhusnat = kh*Ah*(Ta-Tudnat)/lh*dt;
                               %varmetab om natten for huset i [J]
Qhusdag = kh*Ah*(Ta-Tuddag)/lh*dt;
                               %varmetab om dagen for huset [J]
Qvarmtvand = c*varmtvand*25/tslut/dt*(1-nablavand);
                               %varmemængde til vand pr sekund
Qhustemp = Qhusnat+Qvarmtvand;
                               %Varmebehovet starter med natopvarmning og
                               %varmt vand. Heraf tiden starter om natten.

%dimensionering af lager
Qnat = kh*Ah*(Ta-Tudnat)/lh*12*3600;
    %al den energi der skal bruges til at holde huset varmt om natten
Qdag = kh*Ah*(Ta-Tuddag)/lh*12*3600;

```

```

%al den energi der skal bruges til at holde huset varmt om dagen
Qtot = Qnat+Qdag+c*varmtvand*25*(1-nablavand);
%energimængden der skal bruges til at varme den ønskede mængde vand
Lagerstr = Qtot/c/(TBbund+0.5*dTB-TRind)
%Beregner lageret str. intet semikolon for så bliver værdien
%af lagerstr smidt ud i matlab vinduet
lagerenergi = mB*c*(TBbund+0.5*dTB-TRind)
%Beregner mængden af energi til rådighed i lageret intet semikolon
%for så bliver værdien af lagerstr smidt ud i matlab vinduet
time = 0:dt:round(tslut-dt);
%hvor mange tidsindelinger der er i alt, og tiden slutter.

```

Selve programmet:

```

NivVaerdier %henter værdierne fra filen Nivvardier
ArrayB = zeros(1,round(dTB/dl));
%Talrække over temperaturen i beholderens lag [C]
ArrayR = zeros(1,round(tslut/dt));
%Talrække over temperaturen af hvert lag i varmerøret [C]
ArrayH = zeros(1,round(tslut/dt));
%Talrække over energibalancen for hust (for meget eller
%lidt energi ifht. behovet
for ii = 1:round(tslut/dt) %Temperaturen i rørerne
    ArrayR(ii)=TRind; %starter ved deres indgangstemperatur
end
for jj = 0:round(dTB/dl-1)% temperaturen af de forskellige lag
    ArrayB(jj+1)=TBbund+jj*dl; %starter alle ved temperaturen i
end %bunden + den forskel, der er mellem bund og lagets placering
ArrayBgemt = ArrayB; %Vi gemmer talrækken til senere sammenligning
%da den viser lageret lagdelinger ved start
for ii = 1:tslut/dt %ii=start:interval:slut
    if ii == round(12*3600/dt) %hvis tiden er lig med et halvt døgn,
        Qhustemp=Qhusdag+Qvarmtvand; %så skift til dag
    end
    ArrayH(ii)=Qhustemp; %starter med at opvarmningsbehovet er for
    %natten samt varmt vand
    for jj = 1:dTB/dl
        Qoverf = kV*AV*(ArrayB(jj)-ArrayR(ii))/lV*dt;
        %beregnet det der bliver overført til røret
        ArrayB(jj)=ArrayB(jj)-Qoverf/(mBl*c);
        %træk det der blev overført til røret fra beholderen
        ArrayR(ii)=ArrayR(ii)+Qoverf/(mRl*c);
        %Læg det der bliver overført til røret til rørets
        %temperatur
        Qtab = kT*ATB*(ArrayB(jj)-Ta)/lT*dt;
        %Beregn varmetabet for vandtanken
        Qtab = Qtab*1.33; %Pga. manglende top og bund - fordeler
    end
end

```

```

        %tabet fra top og bund ud på de andre lag
        %(ellers opstår der et problem med det øverste
        %lags tab, der vil være meget stort)
    ArrayB(jj)=ArrayB(jj)-Qtab/(mBl*c);
        %træk det der blev tabt fra beholderen i tab
        %fra beholderen
    ArrayH(ii)=ArrayH(ii)-Qoverf-Qtab;
        %Tjek om der er nok energi ved at trække det
        %overførte og det tabte fra det der er nødvendigt.
        %(Skal helst ligge tæt på 0.)
    if ii+jj >= tslut/dt %for at der skal være vand i røret
        %hele vejen op breaker den, ellers skulle hver
        %portion vand igennem hele røret før
        %den næste startede
        break
    end
end
    ArrayH(ii)=ArrayH(ii)/dt; %Omregner energibalancen efter tiden
end
subplot(3,1,1)
    % plot det første af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
plot(time,ArrayR);
    % tiden på x akse og temperaturen i røret på y
title('Udgangstemperaturen af vandet i røret') %navngiver graf
xlabel('tid [s]') %Navngiver x akse
ylabel('temperatur [celcius]') %Navngiver y akse
subplot(3,1,2) % plot det andet af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
hold all %sørger for at begge linjer i grafen bliver vist
plot(1:length(ArrayB),ArrayB, '. ');
    %plot til sluttiden lagdelingen i tanken i forhold til
    %lag og temperatur
plot(1:length(ArrayB),ArrayBgemt);
    %plot den oprindelig lagdeling til sammenligning i forhold til
    %lag og temperatur
title('Lagenes fordeling i forhold til temperaturen – før og efter')
    %navngiver graf
xlabel('lag') %Navngiver x akse
ylabel('temperatur [celcius]') %Navngiver y akse
subplot(3,1,3) % plot det tredje af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
plot(time,ArrayH) %plot energibalancen til tiden
title('Energibalancen i huset') %navngiver graf
xlabel('tid [s]') %Navngiver x akse
ylabel('energibalance [J]') %Navngiver y akse

```

Program for et lag

%værdier for selve tanken:

```

kT = 0.14;          %Varmekonduktivitet for beholder, altså tab ud af
                    %tanken [W/(m*C)]
Tstart = 70;        %starttemperaturen [C]
AT = 12.3;          %Overfladeareal af beholderen [m^2]
lT = 0.05;          %Tykkelse af beholderens væg [m]
h = 2;              %Højde af varmebeholder [m]
mB = 6200;          %Masse af vand i beholder [kg]
%tidsværdier
tslut = 3600*16;    %Slut-tid i sek. [s]
dt = 0.1;           % interval i hver tidsregning i tid [s]
%værdier for rør
kV = 401;           %Varmekonduktivitet for varmeudvekslingen mellem
                    %vand og rør [W/(m*C)]
dV = 0.025;         %Diameter af rør [m]
lV = 0.01;          %Tykkelse af varmerør [m]
v = 0.18;           %Flow-hastighed i rør [m/s]
ldR = dt*v;         %Længde af hvert stykke tidsinddelt vand [m]
TRind = 40;         %Indgangstemperaturen for vandet i røret
AV = pi*dV*ldR;     %Overfladeareal for rør [m^2]
mRl = pi*(dV/2)^2*1000*ldR; %Masse af vand i varmerør [kg]
%andet
c = 4186;           %Specifik varmfylde for vand [J/(kg*C)]
Qtabgemt = 0;       %summen af alle qtab starter med intet tabt
%Hus
Ah = 268;           %Overflade areal af hus
kh = 0.35;          %varmekonduktivitet for huset
Ta = 19;            %Indetemperatur [C]
Tudnat = -2;        %Udetemperaturen om natten [C]
Tuddag = 0.6;       %Udetemperaturen om dagen [C]
lh = 0.21;          %tykkelse af væggene i huset [m]
varmtvand = 124;    %massen af varmt vand pr. dag
                    %(31 kg pr person) [kg]
nablavand = 0.5;    %genanvendelsesfaktor af det varme forbrugsvand
                    %til opvarmning af hus
%funktioner for varmetab i hus
Qhusnat = kh*Ah*(Ta-Tudnat)/lh*dt;
                    %varmetab om natten for huset i [J]
Qhusdag = kh*Ah*(Ta-Tuddag)/lh*dt;
                    %varmetab om dagen for huset [J]
Qvarmtvand = c*varmtvand*25/(tslut/dt)*(1-nablavand);
                    %varmemængde til vand pr sekund
Qhustemp = Qhusnat+Qvarmtvand;
                    %Varmebehovet starter med natopvarmning og
                    %varmt vand. Heraf tiden starter om natten.
%Dimensionering af lager
Qnat = kh*Ah*(Ta-Tudnat)/lh*12*3600;

```

```

%al den energi der skal bruges til at holde huset varmt om natten
Qdag = kh*Ah*(Ta-Tuddag)/lh*12*3600;
%al den energi der skal bruges til at holde huset varmt om dagen
Qtot = Qnat+Qdag+c*varmtvand*25*(1-nablavand);
%energimængden der skal bruges til at varme den ønskede mængde vand
Lagerstr = Qtot/c/(Tstart-TRind)
%Beregner lageret str. intet semikolon for så bliver værdien
%af lagerstr smidt ud i matlab vinduet
lagerenergi = mB*c*(Tstart-TRind)
%Beregner mængden af energi til rådighed i lageret intet semikolon
%for så bliver værdien af lagerstr smidt ud i matlab vinduet
time = 0:dt:tslut-dt;
%hvor mange tidsindelinger der er i alt
ArrayR = zeros(1,round(tslut/dt));
%Talrække over temperaturen af hvert lag i varmerøret [C]
ArrayB = zeros(1,round(tslut/dt+1));
%Talrække over temperaturen i beholderens lag [C]
ArrayH = zeros(1,round(tslut/dt));
%Talrække over energibalancen for hust (for meget eller
%lidt energi ifht. behovet
for ii = 1:round(tslut/dt) %Temperaturen i rørerne
    ArrayR(ii)=TRind; %starter ved deres indgangstemperatur
end
ArrayB(1)= Tstart;
for ii = 1:tslut/dt %ii=start:interval:slut
    if ii == round(12*3600/dt) %hvis tiden er lig med et halvt døgn, så skift t
        Qhustemp=Qhusdag+Qvarmtvand;
    end
    ArrayH(ii)=Qhustemp; %starter med at opvarmningsbehovet er for
        %natten samt varmt vand
    for jj=ii:-1:round(ii-h/ldR)
        if jj <=0
            break
        end
        Qoverf = kV*AV*(ArrayB(ii)-ArrayR(jj))/lV*dt;
        %beregnet det der bliver overført til røret
        ArrayB(ii)=ArrayB(ii)-Qoverf/(mB*c);
        %træk det der blev overført til røret fra beholderen
        ArrayR(jj)=ArrayR(jj)+Qoverf/(mRl*c);
        %Læg det der bliver overført til røret til rørets
        %temperatur
        ArrayH(ii)=ArrayH(ii)-Qoverf;
        %Tjek om der er nok energi ved at trække det
        %overførte og det tabte fra det der er nødvendigt.
        %(Skal helst ligge tæt på 0.)
    end
end

```

```

Qtab = kT*AT*(ArrayB(ii)-Ta)/lT*dt;
        %Beregn varmetabet for vandtanken
Qtab = Qtab*1.33;
%Pga. manglende top og bund – fordeler
        %tabet fra top og bund ud på de andre lag
        %(ellers opstår der et problem med det øverste
        %lags tab, der vil være meget stort
ArrayB(ii+1)=ArrayB(ii)-Qtab/(mB*c);
%træk det der blev tabt fra beholderen i tab
        %fra beholderen
ArrayH(ii)=(ArrayH(ii)-Qtab)/dt;
%Tjek om der er nok energi
%tabte fra det der er nødvendigt.
        %(Skal helst ligge tæt på 0.)
end
subplot(3,1,1)
        % plot det første af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
plot(time,ArrayR);
        % tiden på x akse og temperaturen i røret på y
title('Udgangstemperaturen af vandet i røret') %navngiver graf
xlabel('tid [s]') %Navngiver x akse
ylabel('temperatur [celcius]') %Navngiver y akse
subplot(3,1,2) % plot det andet af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
hold all %sørger for at begge linjer i grafen bliver vist
plot(1:length(ArrayB),ArrayB, '. ');
        %plot til sluttiden lagdelingen i tanken i forhold til
        %lag og temperatur
plot(1:length(ArrayB),ArrayBgemt);
        %plot den oprindelig lagdeling til sammenligning i forhold til
        %lag og temperatur
title('Lagenes fordeling i forhold til temperaturen – før og efter')
        %navngiver graf
xlabel('lag') %Navngiver x akse
ylabel('temperatur [celcius]') %Navngiver y akse
subplot(3,1,3) % plot det tredje af 3 plots i 3 rækker og én kolonne
plot(time,ArrayH) %plot energibalancen til tiden
title('Energibalancen i huset') %navngiver graf
xlabel('tid [s]') %Navngiver x akse
ylabel('energibalance [J]') %Navngiver y akse

```

Excelprogrammer

Excelkode der bruges i afsnit 3.7. Første figur er Excelark 1, CO_2 model for opvarmningsformer. De næste 4 billeder er kode for Excelark 2, model for lagrets kørsel:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Brandsted	CO2	CH4	NGO	SO2	NOx		Indeholder m2			
2	Isolering	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh		CO	Følgende kWh		
3	Isolering	14	4	1	2	5			8356		
4	Isolering	17	4	1	2	5					
5											
6	Brandsted	Varmt vand	Varmt vand	Varmt vand	Varmt vand	Varmt vand					
7	Isolering	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh		CO2	CO2 emission (g)	CO2 emission (ton)	Procent af Danmarks total emission
8	Isolering	14,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
9	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
10	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
11	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
12	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
13	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
14	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
15	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
16	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
17	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
18	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
19	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
20	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
21	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
22	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
23	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
24	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
25	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
26	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
27	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
28	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
29	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
30	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
31	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
32	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
33	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted
34	Isolering	17,2	4,2	1,2	2,2	5,2		Brandsted	Brandsted	Brandsted	Brandsted

	L	M	N
1			
2	Rumvarme forbrug per døgn	Tank 1 energi indhold i procent	Tank 2 energiindhold (Bliver ikke brugt)
3	MJ	MJ	MJ
4	$\frac{(Q23*60*60*12)+(Q24*60*60*12)}{1000000}$	$\frac{Q10}{1000000}$	$\frac{Q14}{1000000}$
5			
6	Per time dag (Rumopvarmning) (MJ)	Eventuelle fejl!!	
7	$\frac{HVIS(Q24-QSUM(0),SUM((Q24*60*60)/1000000))}{HVIS(B51+F51>0; "For lille lager, varmepumpe eller minimum niveau"; "Varmepumpen fungerer")}$		
8	Per time nat (Rumopvarmning) (MJ)		
9	$\frac{(Q23*60*60)/1000000}{PRIS PER Uge (Kr) (Med samme gennemsnits temperatur)}$	$\frac{H27*7}{PRIS PER Uge (Kr) (Med samme gennemsnits temperatur)}$	
10			
11	Varmtvand forbrug i alt (Per Døgn)	$\frac{H27*365}{PRIS PER Uge (Kr) (Med samme gennemsnits temperatur)}$	
12			
13	$\frac{Q219}{1000000}$	Timer varmepumpen skal køre på et døgn	
14		$\frac{SUM(F3:F26)}{60}$	
15	Varmtvands forbrug mellem (Kl. 7-8) (70%)		
16	MJ		
17	$\frac{(Q19*0,7)*P6}{1000000}$		
18			
19	Rest forbrug 10% varmtvand (Kl. 16 - 18 - 22)		
20	$\frac{(Q19*P6)*0,1}{1000000}$		
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27		Antal minutter for at opvarme (Bliver ikke brugt - test)	
28		$\frac{((Q28*P28*Q28)/728)/60}{((M28/60)*100)}$	
29			
30			
31		Eventuelle fejl!!	
32		$\frac{HVIS(B51>0; "For lille lager, varmepumpe eller minimum niveau"; "Varmepumpen fungerer")}{Eventuelle fejl!!}$	
33			
34		$\frac{HVIS(F51>0; "For lille lager, varmepumpe eller minimum niveau"; "Varmepumpen fungerer")}{Eventuelle fejl!!}$	

	O	P	Q	R	S	T	U
1							
2							
3							
4							
5	Minimum niveau Tank	Antal personer	Varmeydelse (W)	COP	Liter tank		
6	35	=AbeMadiA3	12000	3,5	1000		
7							
8	Tank 1 energiindhold						
9	Q (Energiindhold i joule)	m (kg)	c (specifik varmekapacitet for vand)	deltaT (temperatur)	Temperatur top	Temperatur bund	
10	$\frac{P10*Q10*P10}{56}$	=56	4186	$\frac{S10-T10}{70}$	70	40	
11							
12	Tank 2 energiindhold (BLIVER IKKE BRUGT)						
13	Q (Energiindhold i joule)	m (kg)	c (specifik varmekapacitet for vand)	deltaT (temperatur)	Temperatur top	Temperatur bund	
14	$\frac{P14*Q14*P14}{6000}$	6000	4186	$\frac{S14-T14}{65}$	65	20	
15							
16							
17	Varmtvands forbrug						
18	Q (Energiindhold i joule)	liter	c (specifik varmekapacitet for vand)	deltaT (temperatur)	Temperatur ind	Temperatur ud	
19	$\frac{Q19*P19*P19}{31}$	31	4186	$\frac{T19-S19}{40}$	40	65	
20							
21	Rumopvarmning				19,8	13,7	
22	Q, hustab (Energi tab i joule)	Tidspunkt	u (W/(m*c))	A (Overflade area)	Temperatur i huset	Temperatur udenfor i (vægtfylde i meter)	
23	$\frac{Q23*P23*P23}{0,48}$	nat (19-7)	0,48	268	19	4	0,21
24	$\frac{Q24*P24*P24}{0,48}$	dag (7-19)	0,48	268	19	7	0,21
25							
26	Varmepumpe opvarmning						
27	c (specifik varmekapacitet for vand)	m (liter som skal opvarmes)	DeltaT	T ind (vand temper)	T ud	P (W) (watt tilført til Forbrug (W) (Varmepumpeforbrug)	
28	=Q14	$\frac{((100-Q6)/100)*P10}{5,28*6,28}$	5,28*6,28	40	65	=Q6	$\frac{S128-T6}{5,28*6,28}$

G		H	I	J	K
1	Hvis det tager længere tid end 50 min, overføres minuterne til næste time				
2	Minuter over en time	Minuter opvarmning	Spotpris / 60 (min) * Varmepumpe forbrug i MW * antal min til opvarmning	e)Spot priser MWh gennemsnit hele året	E)spotpris + Afgift pr MWh (1560 kr)
3	=HV(S\F3>60;SUM(F3>60);SUM(I0))	=HV(S\F3>60;SUM(60);SUM(F3))	Priser i Kr	293,48	=13+1560
4	=HV(S\F4>60;SUM(F4>60);SUM(I0))	=HV(S\F4>60;SUM(60);SUM(F4))	=K(4/60)*(U28/1000000)*(G3+H4)	290,95	=14+1560
5	=HV(S\F5>60;SUM(F5>60);SUM(I0))	=HV(S\F5>60;SUM(60);SUM(F5))	=K(5/60)*(U28/1000000)*(G4+H5)	285,36	=15+1560
6	=HV(S\F6>60;SUM(F6>60);SUM(I0))	=HV(S\F6>60;SUM(60);SUM(F6))	=K(6/60)*(U28/1000000)*(G5+H6)	280,96	=16+1560
7	=HV(S\F7>60;SUM(F7>60);SUM(I0))	=HV(S\F7>60;SUM(60);SUM(F7))	=K(7/60)*(U28/1000000)*(G6+H7)	280,74	=17+1560
8	=HV(S\F8>60;SUM(F8>60);SUM(I0))	=HV(S\F8>60;SUM(60);SUM(F8))	=K(8/60)*(U28/1000000)*(G7+H8)	289,53	=18+1560
9	=HV(S\F9>60;SUM(F9>60);SUM(I0))	=HV(S\F9>60;SUM(60);SUM(F9))	=K(9/60)*(U28/1000000)*(G8+H9)	307,05	=19+1560
10	=HV(S\F10>60;SUM(F10>60);SUM(I0))	=HV(S\F10>60;SUM(60);SUM(F10))	=K(10/60)*(U28/1000000)*(G9+H10)	446,35	=10+1560
11	=HV(S\F11>60;SUM(F11>60);SUM(I0))	=HV(S\F11>60;SUM(60);SUM(F11))	=K(11/60)*(U28/1000000)*(G10+H11)	469,17	=11+1560
12	=HV(S\F12>60;SUM(F12>60);SUM(I0))	=HV(S\F12>60;SUM(60);SUM(F12))	=K(12/60)*(U28/1000000)*(G11+H12)	463,09	=12+1560
13	=HV(S\F13>60;SUM(F13>60);SUM(I0))	=HV(S\F13>60;SUM(60);SUM(F13))	=K(13/60)*(U28/1000000)*(G12+H13)	464,435	=13+1560
14	=HV(S\F14>60;SUM(F14>60);SUM(I0))	=HV(S\F14>60;SUM(60);SUM(F14))	=K(14/60)*(U28/1000000)*(G13+H14)	464,03	=14+1560
15	=HV(S\F15>60;SUM(F15>60);SUM(I0))	=HV(S\F15>60;SUM(60);SUM(F15))	=K(15/60)*(U28/1000000)*(G14+H15)	458,55	=15+1560
16	=HV(S\F16>60;SUM(F16>60);SUM(I0))	=HV(S\F16>60;SUM(60);SUM(F16))	=K(16/60)*(U28/1000000)*(G15+H16)	412,355	=16+1560
17	=HV(S\F17>60;SUM(F17>60);SUM(I0))	=HV(S\F17>60;SUM(60);SUM(F17))	=K(17/60)*(U28/1000000)*(G16+H17)	386,24	=17+1560
18	=HV(S\F18>60;SUM(F18>60);SUM(I0))	=HV(S\F18>60;SUM(60);SUM(F18))	=K(18/60)*(U28/1000000)*(G17+H18)	325,14	=18+1560
19	=HV(S\F19>60;SUM(F19>60);SUM(I0))	=HV(S\F19>60;SUM(60);SUM(F19))	=K(19/60)*(U28/1000000)*(G18+H19)	315,98	=19+1560
20	=HV(S\F20>60;SUM(F20>60);SUM(I0))	=HV(S\F20>60;SUM(60);SUM(F20))	=K(20/60)*(U28/1000000)*(G19+H20)	361,65	=20+1560
21	=HV(S\F21>60;SUM(F21>60);SUM(I0))	=HV(S\F21>60;SUM(60);SUM(F21))	=K(21/60)*(U28/1000000)*(G20+H21)	322,98	=21+1560
22	=HV(S\F22>60;SUM(F22>60);SUM(I0))	=HV(S\F22>60;SUM(60);SUM(F22))	=K(22/60)*(U28/1000000)*(G21+H22)	311,81	=22+1560
23	=HV(S\F23>60;SUM(F23>60);SUM(I0))	=HV(S\F23>60;SUM(60);SUM(F23))	=K(23/60)*(U28/1000000)*(G22+H23)	307,64	=23+1560
24	=HV(S\F24>60;SUM(F24>60);SUM(I0))	=HV(S\F24>60;SUM(60);SUM(F24))	=K(24/60)*(U28/1000000)*(G23+H24)	301,3	=24+1560
25	=HV(S\F25>60;SUM(F25>60);SUM(I0))	=HV(S\F25>60;SUM(60);SUM(F25))	=K(25/60)*(U28/1000000)*(G24+H25)	301,38	=25+1560
26	=HV(S\F26>60;SUM(F26>60);SUM(I0))	=HV(S\F26>60;SUM(60);SUM(F26))	=K(26/60)*(U28/1000000)*(G25+H26)	295,04	=26+1560
27			=SUM(I3:J26)		=SUM(K3:K26)/24
28					=K27/1000