



READY

Smart Grid Ready VPP Controller for Heat Pumps

Slutrapport til ForskEl



Indholdsfortegnelse

Forord	4
1 Introduktion til READY-projektet.....	5
1.1 Rapportens opbygning	7
2 Elmarkeder, rammebetingelser og økonomi.....	9
2.1 Styring efter spot- og regulerkraftmarkederne.....	9
2.2 Nuværende rammebetingelser for Smart Grid-varmepumper.....	11
2.3 Analyser af økonomiske potentialer ved styring.....	11
2.4 Forretningsmodeller for puljestyling af varmepumper	15
3 Demonstration.....	17
4 Husmodellering og udvikling af kontrolstrategi	21
4.1 Modellering og identifikation af enkelthusmodeller.....	21
4.2 Model for en portefølje af huse til brug ved indkøb på spotmarkedet	23
4.3 Kontrol af det samlede energiforbrug for en portefølje af huse.....	24
4.4 Kontrol af energiforbruget i en samling huse.....	25
4.5 Udnyttelse af fleksibiliteten til balancering og på regulerkraftmarkedet	28
4.6 Delkonklusion for modelbaseret kontrol og skedulering	30
5 Styringsstrategier.....	31
6 Implementering af READY VPP controller	33
6.1 Systemdiagram	33
6.2 Sekvensdiagrammer	33
6.3 Budstrategi	35
6.4 Begrænsninger.....	36
6.5 VPP Controller beskrivelse.....	38
6.6 VPP Controller - styringsresultater	39
7 Smart Grid-ready installationer.....	42
7.1 Variation af varmepumpe og varmeakkumulering	42
7.2 Akkumulering i vandtanke og / eller bygningsmasse	44
7.3 Delkonklusioner	45
8 Flaskehalse i distributionsnettene.....	47

8.1	Fremtidige markeder og tarifstrukturer	47
8.2	State estimation	49
8.3	State estimator og kontrolstrategier	49
8.4	Konklusion: kW max eller VPP	51
9	Forbrugeraccept	52
9.1	At blive en prosumer	53
9.2	Forbrugernes opfattelser af VPP	53
9.3	Test med studerende	54
10	Kommunikation til fremtidens varmepumpe	56
10.1	Beskrivelse af systemet	56
10.2	Signalliste	57
10.3	Videre arbejde med kommunikation til varmepumper	59
10.4	Status på arbejdet omkring standardisering	60
11	Konklusion	62
Appendiks A: Dissiminering		65
READY papers		65
READY reports		66
Appendiks B: Deltagere i READY-projektet		67

Forord

I denne slutrapport beskrives og afrapporteres ForskEl-projekt 10757-2012 "READY- Smart Grid Ready VPP Controller for Heat Pumps". Partnere i projektet er Neas Energy (projektleder), Neogrid Technologies, PlanEnergi, Ea Energianalyse, Aalborg Universitet og Aarhus Universitet. Projektperioden har været 1. juni. 2012 til 1. november 2014.

Projektet har modtaget støtte fra ForskEl-puljen som er PSO-midler administreret af Energinet.dk. READY er en videreførelse af det tidligere ForskEl 10469 - 2010 projektet "Intelligent Fjernstyring af Individuelle Varmepumper" (IFIV), som fandt sted 2010-2012. Fire af de fem partnere i IFIV er sammenfaldende med READY, samtidig med, at to nye partnere er kommet til (Ea og AU).

Ideen til projektet opstod således allerede i foråret 2009. På det tidspunkt var der kun et fåtal af Smart Grid-projekter. Siden er mange kommet til. READY-styringen er dog stadig på forkant både pga. de avancerede styringsstrategier og modeller og pga. at styring ift. spotpriser og til dels regulerkraft er testet hos virkelige forbrugere. Deres vaner har stor indflydelse på muligheden for at forudsige varmebehovet og der skal tages hensyn til komforten og modtagelsen af styringen.

Komforten for de involverede brugere har stået øverst på listen over hensyn. Igennem projektet har der været meget kontakt med mange af brugerne som har været velvilligt indstillede.

Vi takker alle som har deltaget som brugere og som har stillet deres varmepumpe til rådighed. Det har været "very friendly users" som vi har kaldt dem. Fra nogle brugere har der været en helt specielt interesse og velvillighed overfor projektet - i nogle perioder med stort set daglig kontakt.

I løbet af projektperioden har der været vidensdeling med andre projekter, her kan nævnes iPower og TotalFlex, Intelligent Energistyring samt Branchefællesskabet for Intelligent Energi. Herudover har READY-projektet deltaget i forskellige vidensdelingsseminarer ofte afholdt af Energinet.dk og andre relevante konferencer.

Ud over denne slutrapport findes som dokumentation for arbejdet seks bilagsrapporter, titlerne ses sidst i denne rapport samt en lang række videnskabelige artikler. Herudover har READY-projektet dannet baggrund for adskillige studenterrapporter både på Aalborg Universitet og CBS og til to Ph.D.-projekter på hhv. Aalborg og Aarhus Universitet. Projektet har været omtalt bla. i artikler i Ingeniøren og Nyhedsbladet Dansk Energi.

Alle deltagere i READY-projektet ses sidst i denne rapport.

December 2014

1 Introduktion til READY-projektet

I Danmark er der et politisk fastsat mål om at vindkraft skal dække 50 % af elforbruget i 2020. Alle fossile brændsler skal være ude af el og varmesektorerne inden 2035 og i 2050 skal Danmark være helt fossilfri. Når der skal integreres så stor en andel vindkraft så kan det være nyttigt at en væsentlig del af elforbruget er fleksibelt. Individuelle varmepumper med intelligent styring kan således være en vigtig del af løsningen. Ved udskiftning af oliefyr med varmepumper reduceres anvendelsen af et fossilt brændsel til opvarmning samtidig med, at varmepumperne netop har mulighed for flytte elforbruget blot husejerne føler, at komforten ikke forringes væsentligt.

Styringen er nødvendig for at det øgede elforbrug til varmepumperne kan hjælpe med udnyttelsen af den varierende vindkraft. Hvis varmepumperne øger deres elforbrug når elpriserne er lave, så kan det medvirke til, at det bliver sjældnere at vindkraft eventuelt skal stoppes. Tilsvarende vil en reduktion af varmepumpernes forbrug i dyre timer reducere de samlede omkostninger til elproduktion. Styring af forbrug kan således øge værdien af elproduktionen fra vindkraft.

Kommer der mange flere varmepumper uden, at disse er fleksible vil det være en udfordring at der lægges et ekstra elforbrug oven i det eksisterende på alle tidspunkter på døgnet. Derfor er styring af fleksibiliteten altafgørende.

Varmepumperne i READY-projektet styres efter forskellige principper. Grundlægende er det vigtigst, at brugernes komfort ikke forringes, eller i det mindste kun i et omfang, som de har indvilget i. Det skal forstås på den måde, at en varmepumpe normalt holder en konstant temperatur i huset, men hvis den skal kunne styres, således at varmepumpens interne kontrol fraviges, så er det nødvendigt, at temperaturen i huset kan variere indenfor et acceptabelt bånd. Styringen kan endvidere reducere omkostningerne til opvarmning.

Der er to overordnede mål med styring af varmepumper i READY-projektet i forhold til elsystemet. For det første skal forbruget kunne flyttes i forhold til spotprisen. Priserne i spotmarkedet er en indikation af, hvordan forbrug og produktion er koblet i den enkelte time i elsystemet. Højt forbrug og lavt udbud af produktion vil normalt give høje priser og omvendt.

For det andet skal varmepumperne bidrage til at holde balancen i driftstimen ved at levere regulerkraft. Disse to mål er eftervist i projektet og uddybet herunder og i kapitel 2.

Ved en stor andel af vindenergi i elsystemet vil vinden påvirke priserne således, at når det blæser meget er priserne lavere end de ellers ville have været og omvendt. Andre faktorer, der er med til at afgøre prisen i den enkelte time, er det samlede elforbrug, det øvrige produktionsudbud og forbindelserne ud af prisområdet. Disse faktorer har således sammen med vindkraften indflydelse på priserne og på hvornår varmepumperne skal køre.

Varmepumperne kan også bidrage til at opretholde balancen i elsystemet i driftstimen. Spotpriserne er fastlagt dagen før og det er indbygget i systemet, at der er balance mellem forbrug og produktion – time for time. Mange forhold kan ændres sig fra kl 12 dagen før til selve driftstimen. For at opretholde balancen

inde i driftstimen anvendes blandt andet regulerkraftmarkedet, hvor producenter og forbrugere kan tilbyde at øge eller reducere produktionen eller forbruget med et kvarters varsel.

Der findes overordnet to forskellige strategier for forbrugernes deltagelse i fleksibelt elforbrug. Den ene er indirekte styring, hvor der sendes et prissignal til forbrugerne og hvor forbrugerne selv styrer deres forbrug, enten manuelt eller typisk ved anvendelse af automatik. Den anden strategi er central styring, hvor forbrugerne overlader kontrollen med udvalgte apparater til en central aktør, en aggregator, der f.eks. kan være en balanceansvarlig, et handelsselskab eller en uafhængig aggregator. Aggregatoren garanterer, at temperaturen ikke varierer mere end det på forhånd er aftalt. Den direkte styring kan give mulighed for en mere præcis styring af elforbruget.

I READY-projektet har hovedfokus været at udvikle og demonstrere en avanceret direkte styring, en såkaldt VPP (Virtuel Power Plant)-controller til fjernstyring af varmepumper. Varmepumperne fjernstyres efter spotpriser og behovet for regulerkraft for at vise den størst mulige besparelse og indtjening for varmepumpeejerne, samtidig med at komforten i husene opretholdes.

Varmepumperne i READY får et signal om, hvorvidt der er op- eller nedregulering på regulerkraftmarkedet og den fleksibilitet der er i varmepumperne aktiveres. Det skal bemærkes, at styring ift. et regulerkraftsignal først kom med i sidste del af projektet og derfor har det ikke været muligt at teste dette gennem en hel varmesæson.

Styringen i READY er demonstreret i omkring 80 huse i Danmark, hvor der bor almindelige "virkelige" mennesker. Husene er fra den pulje på 300 huse, som har fået installeret en såkaldt styreboks, der opsamler en række data fra varmepumpernes drift og hvorigennem varmepumperne kan tilgås.

Styreboksene og den tilhørende kommunikationsserver har udgjort den IT-platform som READY-styringen er bygget ovenpå. Styreboksene blev opsat i 2010-2011 i projektet StyrDinVarmepumpe som blev ledet af Energinet.dk. Styreboksene blev sat op ved nogle af de varmepumper, der fik tilskud gennem Energistyrelsen, der havde en pulje på 400 mio. kr. der blev afsat på Finansloven 2010 og som fik navnet "Skrot dit oliefyr".

StyrDinVarmepumpe-projektet er siden overtaget af andelsselskabet "Intelligent Energistyring", som har fået ForskEl-midler til at drifte og udvikle projektet med de 300 styrebokse til og med udgangen af 2014. Der er netop givet tilsagn fra ForskEl om at forlænge projektet og dermed drive platformen videre. Varmepumperne der bliver styret i READY-projektet vil efter projektets afslutning blive styret videre i regi af TotalFlex-projektet.

Styreboksene i StyrDinVarmepumpe har givet adgang til en meget stor mængde enestående måledata. Et af formålene i READY har været at afprøve en puljestyring med et større antal varmepumpe. I projektet er der styret op til 80 varmepumper ad gangen. Herudover har de mange data givet et godt samlet overblik over udfordringer og specialiteter ved forskellige fabrikater af varmepumper. De mange data har ligeledes givet et værdifuldt input til standardiseringsarbejde, som også har været en del af projektet.

Der styres som nævnt indenfor et komfortbånd i husene, således at temperaturen skal holde sig indenfor en nedre og en øvre grænse, som er fastsat i samarbejde med beboerne. En begrænsning i den anvendte

styring har vist sig i det faktum at varmepumperne kan stoppes, men ikke tvangsstartes. Når der er blevet sendt startsignaler har det været varmepumpernes egen styring, der har besluttet hvornår den skulle starte. Dette bidrager til en mindre præcis styring og dermed mulig ubalance i forhold til den indmeldte plan og har samtidig betydet, at det kun i begrænset omfang har været muligt at lagre varme i husenes konstruktioner. Dette kunne være hensigtsmæssigt for at udnytte den fulde fleksibilitet i husene og dermed mulighederne i elmarkederne.

READY-projektet udmærker sig ved, at der er styret på varmepumper hos rigtige forbrugere. Udfordringen med at udvikle en husmodel der kan forudsige behovet time for time er bl.a., at der bor virkelige mennesker i husene og at temperaturerne nogle gange udvikler sig uforudsigeligt af forskellige årsager som ikke måles. Projektet har bl.a. fundet frem til, at det er mest hensigtsmæssigt at puljestyre i en aggregeret model, dvs. kørsel i ét hus retter sig efter puljens tilstand. Dette vil blive nærmere beskrevet i rapporten.

Udover selve styringen indeholder projektet: Modellering af husenes termiske egenskaber, vurdering af behovet og forslag til at håndtere netbelastninger, anbefalinger til fremtidige installationer og brugerinvolvering og brugeracceptundersøgelser.

Mindre fleksible elforbrugende enheder har ikke hidtil været styret i Danmark, hverken med indirekte- eller direkte styring. Det er demonstreret i READY-projektet. I fremtiden når tusindvis af enheder skal håndteres, forventes det her, at der skal være en forretningsenhed, der kan samle alle signaler, melde det fleksible forbrug ind til de balanceansvarlige (der handler på engrosmarkedet og leverer systemydelse) og som desuden har ansvaret for at alt det tekniske og kommunikationsmæssige fungerer. Dette er her og andre steder kaldt en aggregator. Her er det antaget, at aggregatoren kan være en del af den balanceansvarlige virksomhed, en del af handelsselskabet eller en selvstændig virksomhed. Der er ikke taget stilling til, hvad der er mest hensigtsmæssigt.

1.1 Rapportens opbygning

Denne rapport er opdelt i forskellige emner som gennemgås herunder.

- Styring af varmepumper i elmarkederne. I kapitel 2 beskrives kort de forskellige markeder som driften af varmepumperne optimeres i. Desuden beskrives nogle af de nødvendige rammebetingelser for at kunne anvende varmepumperne som fleksibelt forbrug. Dette anvendes til at analysere de økonomiske potentialer ved at styre varmepumper. Herudover overvejes nogle aspekter af forretningsmodeller for styring af varmepumper.
- I kapitel 3 er der en beskrivelse af det setup som styringen er demonstreret i og nogle af de udfordringer der har været ved at demonstrere i den virkelige verden.
- I kapitel 4 er husmodelleringen analyseret og de udviklede metoder beskrives. Metoderne har gjort det muligt centralt at kontrollere energiforbruget i varmepumperne i en samling af huse, så de billigst muligt sikrer komforten og anvender det termiske energilager i husene anvendes til flytning af energiforbruget.
- I kapitel 5 er der en oversigt over forskellige styringsstrategier, hvoraf den ene er anvendt i READY-projektet.
- Kapitel 6 indeholder beskrivelsen af den udviklede Smart Grid-ready VPP-controller, herunder den praktiske implementering og de erfaringer der er gjort i projektet. Formålet med styringen er at

afdække potentialet for en større pulje af varmepumper, som anvendes på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet.

- I kapitel 7 er Smart Grid-ready installationer analyseret. Den optimale varmepumpeinstallation diskuteres i forhold til, at varmepumperne skal kunne anvendes som fleksibelt forbrug.
- Kapitel 8 omhandler flaskehalse i distributionsnettene. Netselskaberne har forskellige muligheder for at afværge mulige fremtidige flaskehalse og i kapitlet analyseres mulige tarifstrukturer. Herudover beskrives netselskabernes forskellige muligheder for at analysere nettet. Kapitlet er et sammendrag af to bilagsrapporter som er skrevet til READY og i kapitlet sammendrages konklusionerne på en analyse af, om det er mest hensigtsmæssigt at anvende en "kilowatt-max-løsning" på flaskehalse eller en Smart Grid-løsning.
- I kapitel 9 gengives resultater af analyser der er lavet af forbrugernes motivation og barrierer af Smart Grid generelt og af deltagelse i fjernstyring af deres varmepumpe. Det bliver undersøgt, hvilke typer af forbrugere, der er mest velvilligt indstillede overfor at lade deres elforbrug fjernstyre og på den måde deltage i "Smart Grid"

Kapitel 10 beskriver det igangværende standardiseringsarbejde, som projektet har deltaget i frem mod en Smart Grid Ready varmepumpe. Det indebærer en informationsmodel med hvilken information, der kommer ud af varmepumpen samt hvilke styringsmuligheder der bør findes. Som nævnt i forordet findes yderligere uddybninger og analyser i bilagsrapporterne til denne slutrapport, titlerne ses i listen på næstsidste side.

2 Elmarkeder, rammebetingelser og økonomi

I dette kapitel analyseres de forskellige elmarkeder som anvendes til styring i READY-projektet, rammebetingelser og økonomiske potentialer samt forskellige forretningsmodeller.

2.1 Styring efter spot- og regulerkraftmarkederne

I dette afsnit beskrives de markeder som varmepumperne i READY-projektet styres efter. I nedenstående tabel er der en oversigt over de forskellige elmarkeder i Vest- og Østdanmark i 2014.

	Vestdanmark (DK1)	Østdanmark (DK2)
Testes i READY	Spotmarkedet (Elspot) Regulerkraftmarkedet	Spotmarkedet (Elspot) Regulerkraftmarkedet
Potentielle markeder	Intraday-markedet (Elbas) Rådighedsbetaling for manuel reserve Primær reserve	Intraday-markedet (Elbas) Rådighedsbetaling for manuel reserve FNR (del af primær reserve) FDR (del af primær reserve)
Pt. ikke relevante	Sekundær reserve, LFC	

Tabel 1: Relevante elmarkeder for styring af varmepumper

I READY-projektet er varmepumperne styret efter timespotpriser samt et regulerkraftaktiveringssignal. Disse markeder beskrives kort herunder. I bilagsrapporten "Intelligent styring af varmepumper i de forskellige elmarkeder" findes uddybende analyser og det er nærmere beskrevet, hvordan en pulje af varmepumperne kan anvendes i andre elmarkeder.

Elspot

På det nordiske spotmarked Elspot handles størstedelen af alt el i regionen. Det er kun de balanceansvarlige aktører, der kan handle på markedet. På vegne af producenter og forbrugere melder de balanceansvarlige salgs- og købsbud ind i markedet inden kl 12:00 dagen før driftsdøgnet. Salgsbuddene er som udgangspunkt relateret til produktionsformens såkaldte marginalomkostning, som et udtryk for, hvor meget elproducenterne minimum skal have for at køre deres anlæg. Vedvarende energikilder anvender ingen brændsler og har derfor lave marginalomkostninger, hvilket er med til at reducere spotprisen. Forbrug kan – helt tilsvarende produktion – meldes ind prisafhængigt.

Spotpriserne for det kommende døgn dannes ud fra et priskryds mellem udbud og efterspørgsel for hver time i døgnet og priserne varierer således hen over døgnet og året i forhold til faktorer som elforbrug, produktionsformer, overførselskapacitet på udlandsforbindelser mm. Ved intelligent styring af varmepumperne udnyttes disse variationer i spotprisen ved at anvende varmtvandslagre og husenes varmekapacitet og derved flytte varmepumpernes elforbrug som beskrevet i kapitel 4 og 6.

Regulerkraftmarkedet

Regulerkraftmarkedet er et fællesnordisk marked som ligeledes kun kan tilgås af de balanceansvarlige. I Danmark afgives regulerkraftbud til Energinet.dk og enheder aktiveres manuelt¹ af Energinet.dk gennem de balanceansvarlige.

Regulerkraftmarkedet kan tilgås direkte eller via rådighedsmarkedet for manuelle reserver. Hvis en enhed accepteres til rådighedsbetaling for manuelle reserver modtages en betaling for de timer, hvor et bud er accepteret, og herved forpligter aktøren til at byde kapaciteten ind i regulerkraftmarkedet. Rådighedsmarkedet for manuelle reserver og muligheden for at anvende varmepumperne på dette marked er beskrevet herunder og uddybet i bilagsrapporten.

Både forbrugs- og produktionsenheder kan levere regulerkraft. Det er tilladt at pulje forbrugsenheder eller produktionsenheder for at opnå minimumskapaciteten, som er 10 MW. Markedet er et marginalpris-system, hvor den sidst aktiverede enhed er prissættende for alle enheder i den pågældende time. Enhederne skal være i stand til at regulere op eller ned inden for maksimalt 15 minutter. I nedenstående tabel ses en oversigt over regulering for produktions- og forbrugsenheder.

Regulering	Produktion	Forbrug
Opregulering	Start	Stop
Nedregulering	Stop	Start

Tabel 2: Start og stop af produktions- og forbrugsenheder i regulerkraftmarkedet.

Styring efter regulerkraft i READY

I READY-projektet er varmepumperne styret i forhold til et aktiveringssignal, der fortæller, i hvilke timer enheder i Neas' portefølje er aktiveret i enten op- eller nedregulering på regulerkraftmarkedet. Dette er et udtryk for, om der er op- eller nedregulering i markedet. Den konkrete Pris i den pågældende time anvendes således ikke i forsøget.

Da varmepumperne er forbrugsenheder skal de allerede køre med mulighed for at stoppe for at kunne levere opregulering, og omvendt skal varmepumperne være stoppet med mulighed for at starte for at kunne levere nedregulering. Reguleringen skal kunne opretholdes i op til en time, men ved at puljestyre varmepumperne er det ikke nødvendigt, at den enkelte varmepumpe regulerer i en hel time, men blot at den samlede pulje leverer effekten.

Der er forskellige strategier for at byde ind i spotmarkedet, hvilket afleder forskellige muligheder for at byde ind i regulerkraftmarkedet. Der er analyseret en række budstrategier i READY-projektet.

¹ Manuelt er et udtryk for, at en person hos Energinet.dk beslutter, om og hvor meget regulerkraft der skal aktiveres. Alle kommunikationssignaler til og fra de balanceansvarlige foregår i Danmark automatisk.

2.2 Nuværende rammebetingelser for Smart Grid-varmepumper

For at styre en pulje varmepumper intelligently er det nødvendigt, at den enkelte varmepumpe kan timeafregnes så der er et økonomisk potentiale for at flytte forbruget. Med indførelsen af engrosmodellen i marts 2016 indføres samtidig flexafregning, som giver mulighed for timeafregning af små og mellemstore forbrugere. Flexafregning ses som et skridt på vejen til reel timeafregning. Forskellen mellem to de ordninger er, at netselskaberne har længere tid til at hjemtage og bearbejde måledata ved flexafregnede kunder i forhold til kunder med reel timeafregning, hvor måledata hjemtages dagligt. Flexafregning kan således sikre de små og mellemstore kunder en lavere abonnementsbetaling i forhold til store kunder, der har reel timeafregning. Med indførelse af flexafregning skabes der potentiale for intelligent styring i forhold til spotpriser.

For at anvende en pulje af varmepumper på de forskellige markeder er det afgørende, at varmepumperne er tilknyttet den samme balanceansvarlige. Private forbrugere med varmepumper har sandsynligvis forskellige elleverandører, som kan være tilknyttet forskellige balanceansvarlige. Varmepumperne skal samles under den samme balancesansvarlig, eventuelt igennem en aggregator. Det kan betyde, at forbrugeren må skifte elleverandør.

Et andet aspekt ved en pulje af varmepumper i størrelsesordenen på 2-5 kW hver er, at det kan være en udfordring at levere systemydelser, f.eks. regulerkraft, til Energinet.dk. I dag er minimumsbuddet for regulerkraft på 10 MW, hvilket er en udfordring for mindre forbrugsenheder. Det er dog muligt at pulje forbrugsenheder for eksempel små varmepumper med store elkedler eller varmepumper så de tilsammen kan levere den nødvendige effekt, men det kræver, at disse enheder har tilnærmelsesvis samme marginalpris. Det er besluttet at ændre minimumsbuddet fra 10 MW til 1 MW, men det er usikkert, hvornår ændringen træder i kraft. Formodentlig ikke før 2016 (Parbo, 2014). Ændringen vil gøre det betydeligt lettere for de små enheder at tilgå markedet.

2.3 Analyser af økonomiske potentialer ved styring

Det økonomiske potentiale ved at styre en varmepumpe i spotprismarkedet og i regulerkraftmarkedet er sammenlignet med en beregning af, hvor meget det ville have kostet at køre varmepumpen uden styring med hhv. en fastprisaftale og en spotprisaftale.

Faktorer som bestemmer fleksibilitet

Fleksibiliteten for et hus er et udtryk for, hvor meget varmepumpens elforbrug kan flyttes i tid. Dermed er fleksibiliteten betydende for det økonomiske potentiale ved at kunne styre en varmepumpe i det enkelte hus. Fleksibiliteten er bestemt af:

- Husets tidskonstant (τ , timer), et udtryk for, hvor hurtigt huset varmer op eller køler af. Lang tidskonstant betyder stor energilagring og dermed fleksibilitet.
- Husets varmetab (UA , kW/m²)
- Forholdet mellem varmepumpens kapacitet og husets varmetab. Et stort forhold betyder, at varmepumpen skal køre i færre timer. Herved kan kørslen lettere flyttes, hvilket giver mere fleksibilitet
- Komfortkravene i huset – middeltemperatur og særligt det bånd som temperaturen må svinge indenfor.

Potentiale ved spotprisoptimering og regulerkraft

For at undersøge potentialet ved spotprisoptimering og regulerkraft er der lavet økonomiske analyser af at styre varmepumperne. Der gøres opmærksom på, at de økonomiske potentialer der her er analyseret vil være en øvre grænse for potentialet med den anvendte analysemetode og forudsætninger for styring af et typisk hus.

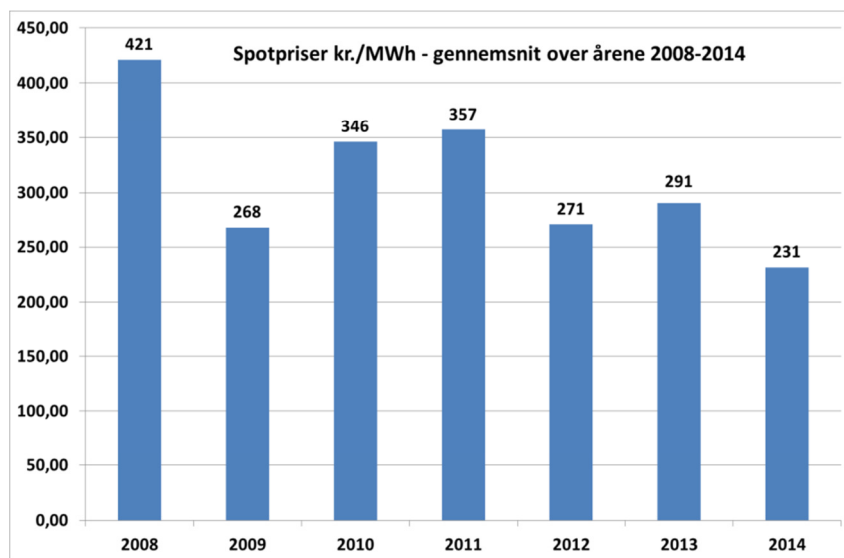
Beregningerne tager udgangspunkt i et standardhus og tilhørende komfortkrav:

- $\tau = 48$ timer
- $UA = 0,15 \text{ kW/}^\circ\text{C}$
- P_{heat} (varmepumpens max kapacitet) = 4,8 kW
- Temperaturkomfortvindue: $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Der er anvendt følgende indstillinger til simuleringen:

- Udetemperaturer fra "Danish Reference Year"²
- Solinput og brugsvand negligeret
- Spotpriser og regulerkraftpriser for DK1 fra markedsudtræk fra Energinet.dk.

Der er analyseret på seks forskellige år fra 2008 til 2013, da elpriserne ændrer sig fra år til år. De svinger bl.a. i takt med mængden af vand i de nordiske vandkraftværker, kulpriser og CO₂-priser og er afhængige af de økonomiske konjunkturer o.l. Priserne ændrer sig også på baggrund af udviklingen i elmarkedsbetingelser og udbud og efterspørgsel. I diagrammet herunder ses gennemsnitsspotpriserne i de enkelte år. De foreløbige tal for 2014 er også medtaget.



Figur 1: Gennemsnitlige spotpriser i DK1 for de enkelte år 2008 til 2014. Priser i 2014 er til og med 7. oktober 2014.

² "Implementering af nyt referenceår" fra DTU 1995, http://www.byg.dtu.dk/~media/Institutter/Byg/publikationer/lfv/lfv_281.ashx

Husparametrene svarer til et typisk 80'er hus med en tung væg- og/eller gulvkonstruktion efter Bygningsreglement BR08. Den anvendte kapacitet (P_{heat}) svarer til en dimensionerende temperatur på varmepumpen på $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, som ofte er udgangspunktet når varmepumpen dimensioneres. Temperaturkomfortvinduet er det der er anvendt i styringen. Solinputtet er udeladt da bidraget til huset er begrænset i fyringssæsonen. Ligeledes er brugsvand udeladt, da det er meget brugeradfærdsstyret. Hvis huset var udstyret med en varmepumpe, hvor brugsvandsopvarmningen kunne styres separat, ville det gøre huset mere fleksibelt, da behovet typisk kun er nogle få timer dagligt. Mere om brugsvandet senere i rapporten.

Besparelsespotentialer for optimering i forhold til spotpris

Der anvendes en førsteordens husmodel og simuleringen foregår i to trin. Først beregnes varmepumpekørslen for konstant at holde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i huset. Dette anvendes som reference og svarer til, hvordan varmepumpen ville køre uden styring. Derefter er der foretaget en daglig spotprisoptimering, hvor kravet er laveste pris og samtidig anvendelse af samme daglige energi som ved referencekørslen og samtidig sikring af at husets komfortvindue overholdes.

I tabellen herunder ses resultaterne fra beregningerne. I referencen kører varmepumpen efter, at der holdes præcis $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i alle timer og det giver et elforbrug på 5.376 kWh pr år. Der regnes på besparelser for kunder, der allerede har en spotprisaftale og for kunder der er fastprisafregnede.

År	Elforbrug [kWh]	Besparelse i forhold til eksisterende spotprisaftale			Besparelse i forhold til eksisterende fastprisaftale		
		Elpris [kr./år]	Besparelse i kr. og (%)		Elpris [kr./år]	Besparelse i kr. og (%)	
			Typisk VP	Stor VP		Typisk VP	Stor VP
2008	5.376	2.032	336 (17)	400 (20)	2.263	567 (25)	632 (28)
2009	5.376	1.452	189 (13)	234 (16)	1.443	180 (12)	224 (16)
2010	5.376	1.856	238 (13)	305 (16)	1.861	243 (13)	310 (17)
2011	5.376	1.909	265 (14)	333 (17)	1.921	277 (14)	345 (18)
2012	5.376	1.453	240 (17)	298 (20)	1.453	240 (17)	298 (21)
2013	5.376	1.493	210 (14)	264 (17)	1.563	280 (18)	334 (21)
Gennemsnit	5.367	1.700	246 (14)	306 (18)	1.751	265 (15)	357 (20)

Tabel 3: Besparelse ved spotprisoptimeret kørsel for et typisk hus med varmepumpe.

Alle tallene er elpriser uden tariffer, skatter og afgifter. Medregnes disse vil den relative besparelse typisk blive 3-5 gange lavere, mens den absolutte besparelse i kroner er uforandret. Variationen skyldes bl.a. de forskellige nettariffer, som er geografisk bestemte.

Af tabel 3 ses også, at er forskel på besparelsen for en forbruger med eksisterende spotprisaftale i forhold til en forbruger med eksisterende fastprisaftale. Det skyldes, at varmepumpen uden styring typisk kører de kolde timer, som oftest er om natten og der er strømmen som regel billigere end om dagen. Hvis der købes ind til efter fastprisaftale, vil nogle af natterne således have en højere pris end spotprisen.

Resultaterne for en "Stor VP" er med en overdimensioneret varmepumpe til -20 °C (4,8 kW til 6 kW) og her bliver besparelsen større. Besparelsen som i denne beregning er 50 kr. årlig, vil ikke kunne betale merudgiften for den kraftigere varmepumpe.

Det er også undersøgt, hvad komfortgrænserne betyder for besparelsen. Udvidelse af komfortgrænserne fra ± 2 °C til ± 3 °C giver ikke meget for et hus på med en tidskonstant på 48 timer. Det skyldes at varmepumpen stadig kan være afbrudt i op til 4 timer ved en udetemperatur på 0 grader uden komforttab og det er tilstrækkelig til at de dyre timer kan undgås.

Besparelsens afhængighed af tidskonstanten i huset er også undersøgt og analyser viser, at tidskonstanten skal under 12 timer før besparelsen reduceres synligt. Først da vil temperaturen dykke så hurtigt at de dyre timer ikke undgås. Omvendt kan fleksibiliteten fås tilbage, hvis komfortvinduet i huset øges.

Besparelspotentiale for optimering i forhold til regulerkraft

Der er lavet analyser af potentialet ved regulerkraft for perioden 2008 til 2013.

År	Besparelse i alt		Nedregulering		Opregulering	
	DKK	%	Timer	Besparelse %	Timer	Besparelse %
2008	1121	66,1	2179	22,9	3584	43,2
2009	655	51,8	2443	27,1	2415	24,7
2010	941	58,2	1897	30,7	2761	27,4
2011	822	50,0	2301	25,8	2408	24,2
2012	927	76,4	2687	33,9	2367	42,5
2013	792	61,8	2485	33,7	2095	28,1
Gennemsnit	877	51,5	2332	24,4	2605	27,0

Tabel 4: Best case besparelser i regulerkraftmarkedet for et typisk hus.

I ovenstående tabel er der anvendt følgende antagelser:

- Varmepumpen er budt ind med dens nominelle effekt, hver gang regulerkraft aktiveres i DK1
- Aktiveringen gælder altid hele timen
- Buddet accepteres og bliver aktiveret hver gang
- Besparelsen er forskellen mellem regulerkraftprisen og spotprisen

I det følgende forklares hvordan tallene for 2008 er fremkommet. Besparelsen er set i forhold til en spotpris, hvor varmepumpen holder 20 °C i huset. Som det ses, kan der i absolut best case typisk hentes 50 % af spotprisen hjem. Aktiveringen fordeler sig på 2179 timers nedregulering, som giver ca. 17,2% af besparelsen og 3.584 timers opregulering, som giver 32,4 % af besparelsen.

Det ses af ovenstående tabel at varmepumpen var aktiveret i regulerkraftmarkedet i over 500 timer om året, dvs. i over halvdelen af timerne. Det er urealistisk at varmepumpen kan have indmeldt en plan day ahead, der muliggør dette. Mere realistisk vil det være at melde bud ind, således der altid skal "tjenes" f.eks. 10 øre pr. kWh. Det reducerer antallet af aktiverede timer markant og herved fås følgende tabel:

År	Besparelse		Nedregulering		Opregulering	
	DKK	%	Timer	Besparelse %	Timer	Besparelse %
2008	912	40,3	835	12,8	876	27,4
2009	396	27,5	436	13,1	352	14,4
2010	708	38	747	21,4	633	16,7
2011	583	30,4	851	15,5	534	14,9
2012	659	45,3	762	16,5	794	28,9
2013	538	34,4	536	17,5	612	16,9
Gennemsnit	633	37,2	695	16,1	634	20,0

Tabel 5: Besparelser i regulerkraftmarkedet for et typisk hus med reduceret antal aktiveringer.

Nu er antallet af aktiverede timer reduceret markant og besparelsen er stadig signifikant. Generelt vil varmepumpen nemmere kunne udnytte nedregulering end opregulering. For nedregulering kræves det at varmepumpen kan startes og denne tilstand er noget mere sandsynlig end at varmepumpen kører set over hele året. Ligeledes vil nogle timers "ekstra kørsel" en dag nemt kunne udlignes i form af en nedjusteret indmeldt plan næste dag.

For et typisk hus er besparelsen på deltagelse i ved spotprisojusteret kørsel under 300 kr. om året. Ved deltagelse i regulerkraftmarkedet er besparelsen markant større, men mere usikker. Besparelsen kan dog let blive yderligere 500 kr. om året selv hvis kun nedregulering udnyttes og der tages højde for at typisk aktivering er under en time.

2.4 Forretningsmodeller for puljestyling af varmepumper

I READY-projektet er der på baggrund af den anvendte styring genereret erfaringer, der kan tænkes ind i en forretningsmodel. For forbrugerne er det sandsynligvis afgørende, at der er en økonomisk gevinst ved at overgive styringen af varmen og samtidig skal der være økonomisk incitament for den balanceansvarlige ved at styre varmepumperne.

Ved den anvendte puljestyling er det optimeringen af puljen og ikke det enkelte hus som er i fokus. Individuel styring er en anden styringsstrategi som primært er analyseret i READY-projektets forgænger, IFIV projektet. Ved puljestyling af varmepumperne kan kapaciteten på varmepumperne anvendes til at levere systemydelse, men når det er puljen der tilgodeses kan der være nogle udfordringer i forhold til afregning af forbrugerne:

- **Timeafregning:** Styringen af varmepumperne udnytter variationerne i elpriser for at minimere udgiften til at producere varmen. Men afregning af den enkelte forbruger ud fra forbrug og timepriser er ikke optimalt når varmepumperne puljestyres, da puljestyling tilgodeser det samlede forbrug. F.eks. kan en situation opstå, hvor nogle varmepumper leverer regulerkraft, mens andre ikke gør, selv om der er kapacitet til rådighed, i en time med favorable priser. En andet eksempel er, at nogle varmepumper startes for at udligne en ubalance, forårsaget af andre i puljen, i en time med høje priser. Hvis forbrugerne er afregnet efter timepriser så vil det i denne time blive dyrere for dem der skruede op for forbruget. Dagen efter kan rollerne være byttet om, men i denne time er prisen måske ikke så høj og derfor er den økonomiske konsekvens mindre. Afregning af den enkelte forbruger i forhold til timepriser er således ikke optimalt når der puljestyres.

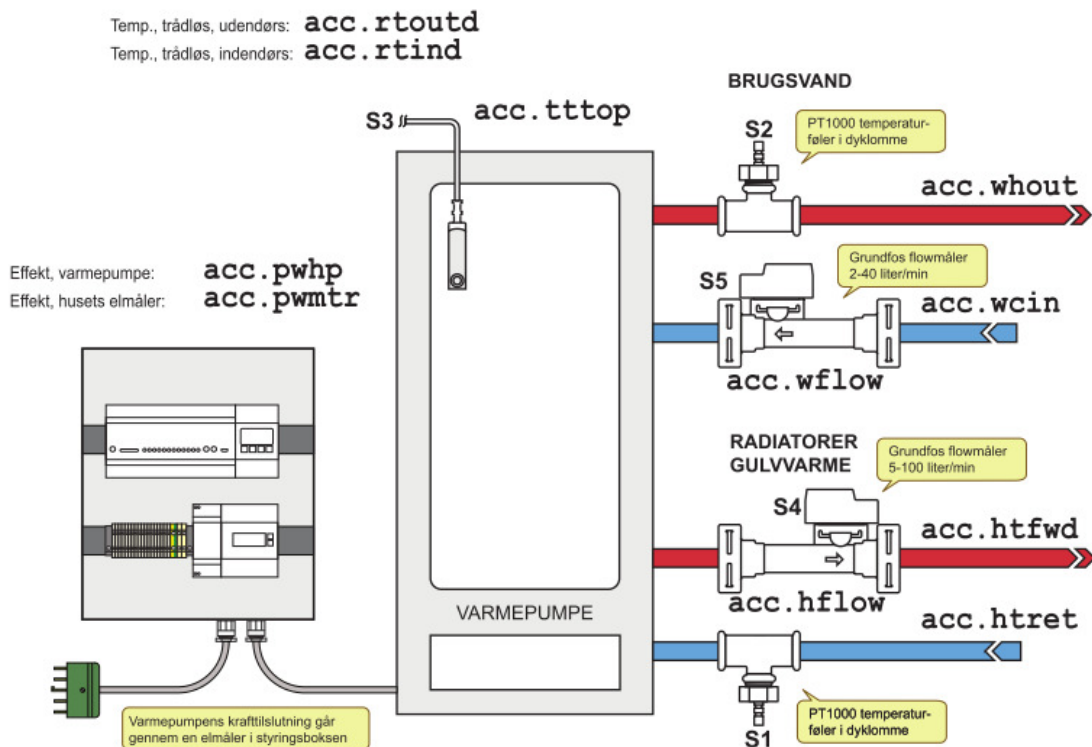
- **Energiforbrug:** Det er vigtigt for den enkelte forbruger, at afregningen er transparent i den forstand, at den enkelte afregnes på baggrund af sit faktiske forbrug på varmepumpen. Som beskrevet ovenover vil nogle varmepumperne aktiveres til at levere f.eks. regulerkraft, mens andre ikke vil i en given time. På kort sigt kan det give en forskel i forbruget mellem forbrugerne i puljen. Set over en længere periode forventes denne forskel at blive udlignet, og derfor er aktuelt at regne efter energiforbrug ved puljestyling af varmepumper.
- **Fleksibilitet:** Der kan være forskel på, hvor meget fleksibilitet den enkelte forbruger stiller til rådighed for den balanceansvarlige. Fleksibiliteten bestemmes ud fra husets varmekapacitet og den tilladte temperaturafvigelse. Det vil betyde, at huse med højere varmekapacitet er mere fleksible, da forbruget kan flyttes i en længere periode end huse med lavere varmekapacitet. Ligeledes vil et øget komfortbånd resultere i en større fleksibilitet. Det kan forventes, at en varmepumpe med stor fleksibilitet vil blive aktiveret mere på forskellige markeder, til gavn for alle i puljen i forhold til en varmepumpe med lavere fleksibilitet. Graden af fleksibilitet kan tænkes ind i forretningsmodellen.
- **Risiko:** Pga. etprismodellen for forbrug kan der både være en risiko for at betale mere og mulighed for at betale mindre end spotprisen for at være i ubalance i en pågældende time. Den balancesvarlige kan medtage det i sin strategi for at styre varmepumperne. Nogle gange kan der være varmepumper, der afviger meget fra den forventede kørsel pga. uforudset brugeradfærd. Hvis det antages at være i en meget dyr time, der kan have indflydelse på hele puljen. Det kan diskuteres hvem der skal tage risikoen. Da styringen sker centralt og at være i ubalancer kan være en del af strategien må det være naturligt at det er den balanceansvarlige der tager risikoen ved ubalancen. Oftest vil ubalanceregningen dog i sidste ende havne hos forbrugerne f.eks. ved, at der lægges et ubalancetillæg ovenpå elprisen.

På baggrund af ovenstående kan det konkluderes, at når der skal afregnes puljestyrlingsløsninger sker det mest hensigtsmæssigt med en afregning af energiforbruget over en periode. På den måde vil forbrugerne ikke kunne se koblingen mellem time og pris. Dette er dog mest hensigtsmæssigt. Som vist i sidste afsnit er der en besparelse ved styringen. Denne skal afspejles i den pris som kunderne betaler.

Elhandleren kan tilbyde en fast pris til kunden. Denne pris kan indeholde et rabatelement, som er afhængig af fleksibilitet. Tilbuddet vil kunne konkurrere med en alm. fast pris. Rabatten angives på forhånd, men kunne justeres årligt efter faktisk fleksibilitet.

	Spotpris-kontrakt	Fastpriskontrakt	READY-kontrakt
Energi-pris	Spotpris	Midlet spotpris	Midlet spotpris
Profiltillæg	Nej (afregnes efter faktisk forbrug pr timer)	Profiltillæg (er i praksis ens for alle kunder)	Profiltillæg (er i praksis ens for alle kunder)
Ubalancetillæg	Ja (fast beløb)	Ja (fast beløb)	Ja (fast beløb), men mindre
Gevinst ved regulerkraft	Nej	Nej	Ja

Tabel 6: Sammenligning af forskellige typer kontrakter.



Figur 3: Principskitse over varmepumpeinstallation med styreboks.

I READY-projektet er der arbejdet med en pulje på ca. 70 til puljestyling. Dette er nok til at vurdere potentialet i styringen samt til at reducere "støjen" fra kørsel som følge af den uforudsigelige brugeradfærd. Der er også mange installationer som er fravalgt, bl.a. som følge af:

- Varmepumpen er en model, der reelt ikke kan styres
- Installation er defekt og/eller ikke fuldført
- Huset er så utæt og varierende at fleksibiliteten er for ustabil til at muliggøre en styring
- Husejeren har sin egen timerstyring på opvarmning af det varme vand
- Huset er kun delvist beboet og i perioder lukket ned
- Husejere styrer selv
- Husejer ønsker ikke at vi styrer
- Andre projekter o.l. end READY har styringsadgang til det pågældende hus

Kommunikationen med varmepumpen skal være stabil og med en tilpas hyppighed således at fjernstyring giver mening i forhold til de elmarkeder, der skal styres efter. I "Styr din varmepumpe" foregår kommunikationen via husets eget internetforbindelse og internettet vil formodentlig også være den typiske kommunikationsform fremover. Der er dog en vis sårbarhed i at benytte den router, som husstanden i øvrigt benytter. Desuden skal varmepumpen kunne overvåges så variationer i drift og forbrug kan indgå i styringsstrategien. I "Styr din varmepumpe" kalder varmepumpen op til serveren hver 3. minut og det giver et godt flow af målinger og en passende kommunikationshastighed i forhold til spotmarkedsoptimering. Imidlertid kan der gå op til 9 minutter fra en styrekommando er sendt til der kan konstateres en driftsændring. Det er for lang tid, til at muliggøre en indregulering af den samlede effekt i regulerkraft-

markedet, som er nødvendig her, idet vi ikke kan tvangsstarte varmepumperne. Hvis varmepumperne skal indgå i regulerkraftmarkedet.

De næsten 300 varmepumper på denne platform blev installeret i perioden 2010-2011 i forbindelse med Energistyrelsens skrotningstilskud til ejendomme med oliefyr. På det tidspunkt blev de enkelte fabrikater af varmepumper spurgt om deres modeller var parate til fjernstyring. I praksis blev det udlagt til om modellerne havde den såkaldte "EVU" indgang. Det svarede en lang række af fabrikater ja til, men det viste sig senere, at ikke alle modellerne levede op til det. Dels var der tilfælde, hvor den pågældende model alligevel ikke var forberedt og dels var der tilfælde, hvor nogle varmepumper på en ellers forberedt model ikke blev monteret med den pågældende klemrække, da de ikke skulle sælges på det tyske marked. En stor del af de 300 varmepumper i platformen var dog forberedt med EVU-indgangen således, at de kunne forbindes til den eksterne styreboks som er en del af setuppet i "styrdinvarmepumpe".

De sidste 3-5 år siden varmepumperne i platformen blev solgt, er der dog sket en teknologisk udvikling, således at flere fabrikater har udviklet varmepumper, som er mere intelligente og kommuniker-bare.

I opsætningen til fjernstyring var det nødvendigt at besøge mange af de installationer, der nu er gjort klar til fjernstyring. Årsagen til det var primært, at den elektriker der havde monteret styreboksen og ledningerne til EVU relæet i klemmer på varmepumpens egen styring ikke havde forberedt den til fjernstyring i varmepumpens egen display. Det viste sig, at det heller ikke i alle tilfælde var helt enkelt.

READY-projektet var rundt ved en stor del af disse varmepumper. Erfaringen med de enkelte fabrikater var lidt forskellig, men for de fleste modeller kunne opkobling til fjernstyring godt lade sig gøre. Der var dog enkelte gamle udgaver som ikke var monteret med EVU indgang. På de nyere modeller var det i orden. For de forskellige modeller skulle det også undersøges, om det var muligt at blokere både kompressor og elpatron samtidig og om der stadig ville være prioritering af varmt brugsvand. Der er ofte mulighed for generelt at blokere for brug af elpatronen, men der er en problematik omkring legionella da de fleste fabrikater har en funktion ca. hver 14 dage, hvor varmepumpen hæver brugsvandstemperaturen til omkring 60 °C og det kræver at elpatronen giver det sidst løft af temperaturen.

I perioden med aktiv fjernstyring, har projektet oplevet flere fejl, hvor nogle af varmepumperne er startet alligevel, men det forventes, at de nyste opdateringer råder bod på dette. Det har også vist sig, at ikke alle fabrikater af varmepumper opfatter stop-signalerne på samme måde, og det har været nødvendigt at lave tilretninger ude hos forbrugerne.

Der har været afholdt to møder for brugere i perioden samt to tilsvarende møder i regi af Andelsselskabet Intelligent Energistyring, som ejer platformen StyrDinVarmepumpe.dk. Møderne blev afholdt i Aalborg, Hørning, Kolding og Høje Taastrup.

På møderne blev der blandt andet orienteret om:

- Overordnet formål med projektet og muligheder for varmepumper ved indpasning af el fra bl.a. vedvarende energi.
- Effektiviteten af varmepumper.
- Forbrugernes ønsker og forventninger til Smart Grid og styring af varmepumper.

- De første undersøgelser af mulighederne for at lagre varme i huset.
- Fremtidens styring af varmepumper "Smart Grid ready".

Under og efter oplæggene var der livlig debat og spørgelyst. Der var 20 – 40 deltagere på hver af møderne.

4 Husmodellering og udvikling af kontrolstrategi

Det overordnede formål med dette kapitel er at

I forbindelse med ForskEl-projektet, "Intelligent Fjernstyring af Individuelle Varmepumper" (IFIV) er der udviklet et koncept til central styring af varmpumper i private boliger. Der opstilles en model for sammenhængen mellem indendørstemperaturen i enkelthusene og lokale vejrdato, tilskudsvarme i husene fra eksempelvis andet elektrisk udstyr og effekten i varmepumpen. Modellen anvendes i en modelbaseret prædiktiv regulator (MPC) som optimerer en kostfunktion for prisen på indkøbt el og komfortniveauet i husene. I IFIV er optimeringen testet med simuleringer. I READY er det målet at afprøve og videreudvikle konceptet til mange beboede huse for at kunne flytte energiforbrug i mængder som er relevante for den balanceansvarlige.

I praksis er MPC meget afhængig af, at der findes en god model for temperaturudviklingen i hvert enkelt hus. Hvis det skal være realistisk at anvende metoden for mange varmepumper, skal der udvikles et værktøj som automatisk finder modeller for husene på baggrund af målinger.

4.1 Modellering og identifikation af enkelthusmodeller

READY-projektet har adgang til målinger fra et stort antal huse i "styrdivarmepumpe" platformen. Disse huse er anvendt til identifikation af modeller. Modelbestemmelsen omfatter dels bestemmelse af en tilstrækkelig modelorden og dels individuel identifikation af modelparametrene i den valgte model.

Modellens orden er bestemt ved brug af Matlabs systemidentifikationsværktøj "n4sid" på 9 måneders data fra 6 forskellige huse. Der er testet 1. og 2. ordens modeller. Undersøgelsen viser at en 1. ordens model er tilstrækkelig. For at opnå fordele ved en 2. ordens model kræves flere målepunkter.

Den valgte generelle 1. ordensmodel til beskrivelse af temperaturændringen i et hus er

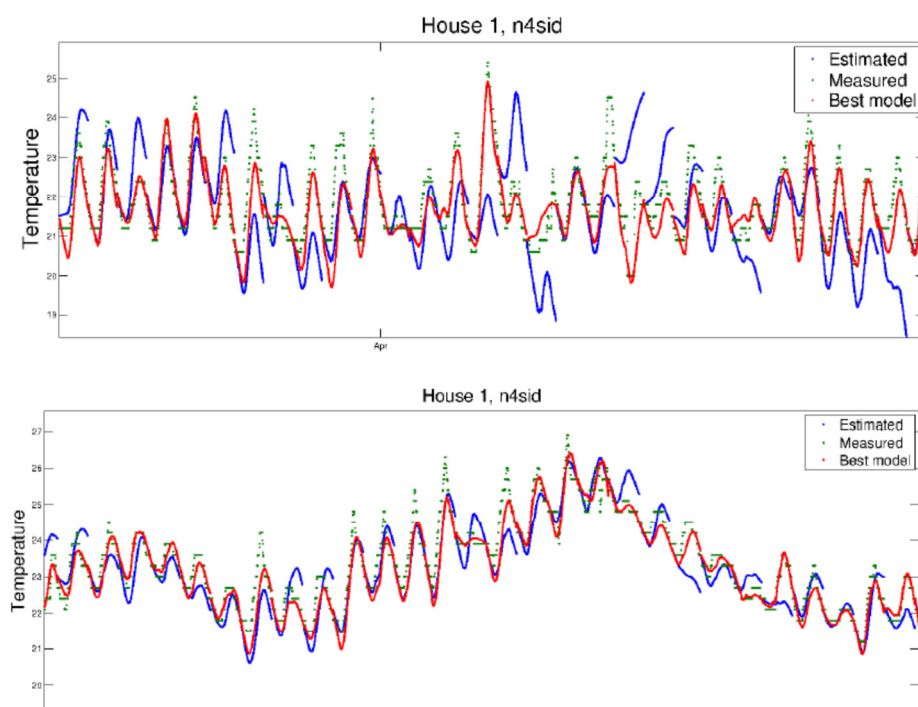
$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{CM} (U + hA(T_o - T) + \gamma r + U_a)$$

T er indendørstemperaturen, CM er husets varmekapacitet, hA er varmetransmissionskoefficienten, U er effekten fra varmepumpen, T_o er udendørstemperaturen, γr effekten fra solindfaldet, U_a er effekten fra andre kilder f.eks. beboeradfærd som åbne eller lukkede døre og vinduer, andet elektrisk udstyr, brændeovn etc.

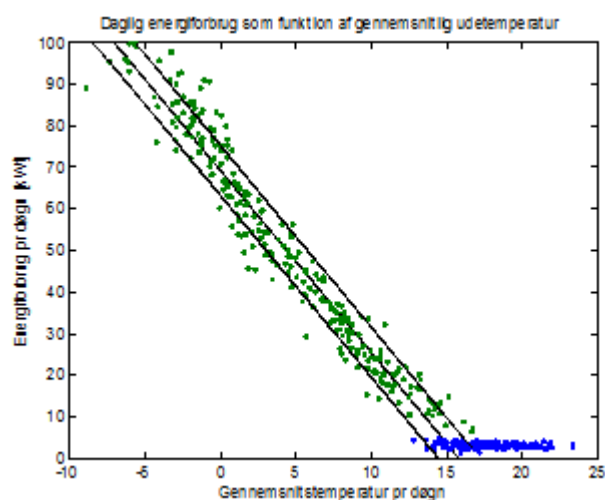
Modellens parametre bestemmes på forskellig måde. Solindfaldet γr og udetemperaturen T_o estimeres og måles af DMI. Via målingerne i "styrdivarmepumpe" er der adgang til måling af effektforbruget på varmepumpen U og indendørstemperaturen T . Modellens øvrige parametre bestemmes ved identifikation. Der er anvendt to forskellige metoder: Systemidentifikation til dynamiske modeller og en bestemmelse af statiske parametre på baggrund af lange måleserier. De dynamiske parametre er vanskelige at bestemme i beboede huse, da den eksisterende varmepumperegulator holder indendørstemperaturen næsten konstant, dermed kommer identifikationen til at foregå i lukket sløjfe.

Det antages, at modellens parametre i nogen grad er årstidsafhængige. Ved systemidentifikationsmetoden er det derfor valgt at identificere modelparametrene på baggrund af de forgående tre døgn data, de

identificerede modelparametre bruges til at estimere de kommende 36 timers effektforbrug. For at verificere parametrene er målte data for varmepumpeeffekt, udendørstemperatur og solindfald brugt som input til modellen og indendørstemperaturen er beregnet. I figur 3 ses et godt og et dårligt match mellem prædikerede og målte temperaturer. Tilskudseffekten U_a er identificeret og meget varierende, hvilket antages at være hovedårsag til forskellen. På baggrund af undersøgelser (Andersen et al. 2014) konkluderes det, at det i praksis er vanskeligt at identificere en model som kan lave et tilstrækkeligt godt estimat af et beboet hus' energibehov.



Figur 4: Målt og prædikeret indendørstemperatur for to perioder for det samme hus, med dårligt og godt resultat.



Figur 5: Bestemmelse af varmetransmissionskoefficient.

Alternativt kan varmetransmissionskoefficienten hA bestemmes ved at undersøge den statiske sammenhæng mellem udendørstemperaturen T_o og varmepumpeeffekten U . I figur 5 er der plottet 300 døgns sammenhørende værdier for middelværdien over et døgn af $(T-T_o)$ og døgns samlede effektforbrug på varmepumpen. For døgn med middelterperaturer under 15°C er der plottet en lineær approksimation med standardafvigelse. For døgn med middelterperaturer over 15°C er der ingen korrelation mellem temperatur og effektforbrug. Effektforbruget er lavt – under 5 kWh, det skyldes, at rumopvarmningen er afbrudt og effektforbruget kun anvendes til opvarmning af brugsvand. Figuren indikerer, at målinger fra en lang periode med udendørstemperaturer under 15°C kan bruges til at bestemme varmetransmissionskoefficienten hA .

Et estimat på varmekapaciteten CM findes ved at sætte et step på varmepumpeeffektreferencen. Hældningen på middelindendørstemperaturen divideret med effektsteppet angiver varmekapaciteten.

Bestemmelsen af hA og CM giver statiske egenskaber for et hus, de giver ikke information om de store variationer i energitilskudet U_a fra husets beboere.

Undersøgelsen har vist, at det er meget vanskeligt automatisk at finde brugbare modeller for enkelthuse, hvilket skyldes flere faktorer: Antal og placering af sensorer, kvalitet af målesignaler, variationer i tilskudsvarme, variationer i husparametre f.eks. varmekapacitet som ænders ved at åbne/lukke døre og vinduer.

4.2 Model for en portefølje af huse til brug ved indkøb på spotmarkedet

For at købe billigst muligt ind på elspotmarkedet er anvendt optimering baseret på modeller af husene. Der er anvendt to modelleringskoncepter: Modellering og prædiktering for enkelthuse og summation af husenes energiplaner og en aggregeret model som repræsenterer hele porteføljen af huse.

For enkelthuse beregnes en energiplan $E_p(k)$. $E_p(k)$ er en vektor med 24 elementer som repræsenterer energiforbruget time for time, den findes ved at minimere kostfunktionen C .

$$C(E_{hp}, \gamma_p, \gamma_{Tp}, T) = \sum_{k=1}^{24} [E_{hp}(kT_s) \gamma_p(kT_s) + |T_{ref}(kT_s) - T(kT_s)| \gamma_{Tp}(kT_s)]$$

$\gamma_p(k)$ ($k=1,2,\dots,24$) er en prisvektor som indeholder spotprisprognose time for time. γ_{Tp} er en faktor som vægter mellem komfort og energipris dvs. at store værdier vil tvinge algoritmen til at holde temperaturen $T(k)$ nær referencen $T_{ref}(k)$ og små værdier vil give en lavere energipris. T estimeres fra husmodellen, vejrdata og tilført effekt fra varmepumpen, der medtages en middelværdi for U_a . I minimeringen er der begrænsninger, så temperaturen T holdes indenfor komfortbåndet, effekten fra varmepumpen er mellem 0 og varmepumpens max-effekt. Resultatet af minimeringen er en energiplan, hvor størst mulig andel af energi indkøbes i timer med lav pris.

Den aggregerede model og tilhørende energiplan beregnes efter samme metode som for enkelthuse. Der anvendes blot en model, hvor den samlede varmekapacitet er fundet ved at summere de estimerede varmekapaciteter for enkelthuse og varmeovergangstallet er gennemsnittet af enkelthusenes varmeovergangstal. Konceptet er beskrevet i (Nielsen et al. 2013)(Biegel et al. 2013, 2014).

I forhold til indkøb på spotmarkedet er der ikke forskel på de to metoder. Anvendelse af en aggregeret model er væsentligt mindre beregningstung end beregning på enkelthusmodeller.

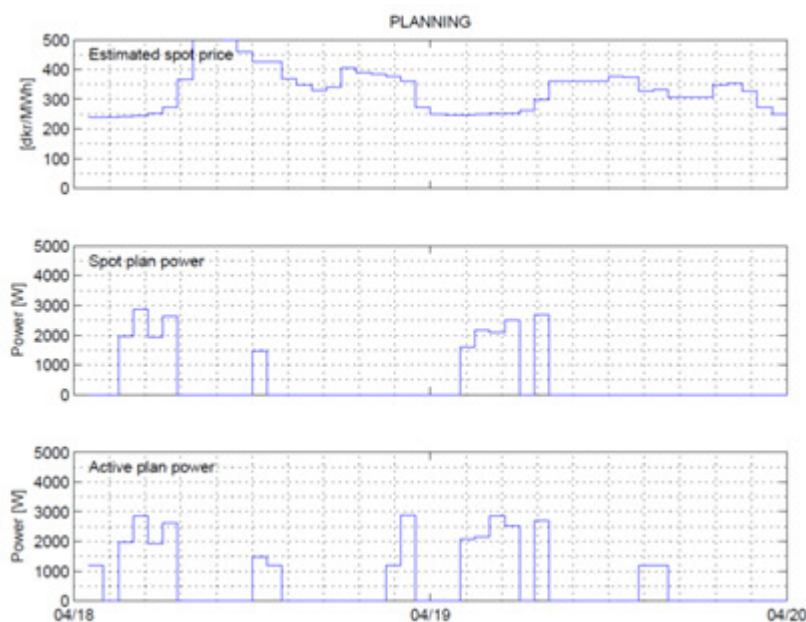
4.3 Kontrol af det samlede energiforbrug for en portefølje af huse

I projektet er udviklet og testet to strategier for kontrol af energiforbruget i en portfolio af huse. En strategi, hvor energiplanen for hvert enkelt hus overholdes under hensyntagen til komfortgrænserne og en strategi, hvor det samlede forbrug i en portfolio af huse overholdes.

Kontrol af energiforbruget i enkelthuse

Kontrolsystemet skal sikre, at komforten i husene overholdes i driftsdøgnet samtidigt med at den indkøbte energi så vidt muligt anvendes. Modelusikkerhed og forstyrrelser fra f.eks. vejret og beboere kan medføre, at energibehovet for det enkelte hus er forskelligt fra den indkøbte energi, dvs. at brug af præcis den indkøbte energi vil medføre temperaturer udenfor komfortgrænserne.

For at overholde komfortgrænserne så billigt som muligt laves en ny forbrugsplan i afviklingsdøgnet. Der minimeres en performancefunktion som tager hensyn til den indkøbte energi på spotmarkedet, komfortgrænserne, restriktionerne i tænd/sluk-tider for varmepumpen og prisen for afvigelse fra den indkøbte energi svarende til regulerkraftprisen. Et eksempel på spotmarkedsindkøb og kontrol af energiforbruget i driftsdøgnet ses i figur 6.





Figur 6: Spotmarkedspriser, optimeret indkøb på spotmarkedet og effektueret energiforbrug for et hus.

Resultaterne af afprøvning af reguleringskonceptet fremgår af (Nielsen et al. 2013) og figur 6. Det ses at de individuelle indendørstemperaturer kan reguleres indenfor komfortgrænserne. Energiforbruget kan flyttes i forhold til vindenergiproduktionen/spotprisen. Den indkøbte energi er ikke altid nok til at sikre komforten. Afvigelserne fra spotplanen er ikke samtidig i alle huse. Beregningerne er komplekse og en pulje med mange huse vil give beregningstidsproblemer.

For enkelthuse konkluderes det, at forbedringer i indkøbet på elspotmarkedet er afhængigt af bedre modeller og flere målinger i husene. Det øgede energiforbrug kan skyldes varmtvandsforbruget - temperaturvariationerne i varmtvandsbeholderen ses nederst i Figur 6. Fordelingen af energiforbruget indenfor døgnnet er meget følsomt for forstyrrelser og en re-optimering er beregningstung. Det vil ofte være nødvendigt at justere den indkøbte energi i driftsdøgnnet. Metoden er testet på 5 forsøgshuse.

4.4 Kontrol af energiforbruget i en samling huse

For at kunne anvende private varmepumpers energiforbrug i handel på markedet skal husene puljes sammen. Indkøb til en pulje af huse kan foregå ved at addere de energiplaner der beregnes for de enkelte huse i en pulje time for time. Det antages variationerne i U_a fra døgn til døgn i nogen grad er uafhængige fra hus til hus, og at et samlet indkøb kan kompensere for variationerne.

I driftsdøgnnet antages det ligeledes, at variationerne i behovet for varmepumpeeffekt på grund af variationer i U_a udlignes indenfor en pulje af huse. I stedet for at forsøge at afvikle enkelthusplanerne så nøjagtigt som muligt, udvikles der et kontrolkoncept som skal overholde en samlet energiplan for en pulje af huse, mens komfortgrænserne for indetemperaturen i de enkelte huse overholdes. Et sådant kontrolkoncept kan baseres på skedulering/sortering.

Der er udviklet en skedulering som bygger på følgende overordnede kriterier.

- Det samlede energiforbrug indenfor hver time skal være så tæt som muligt på den købte energi
- Afvigelsen fra referencetemperaturen i de enkelte huse skal være så lille som muligt og altid indenfor komfortgrænserne.
- De tidsmæssige grænser for ON/OFF-skift på varmepumpen overholdes
- Der reserveres fleksibilitet til regulerkraft

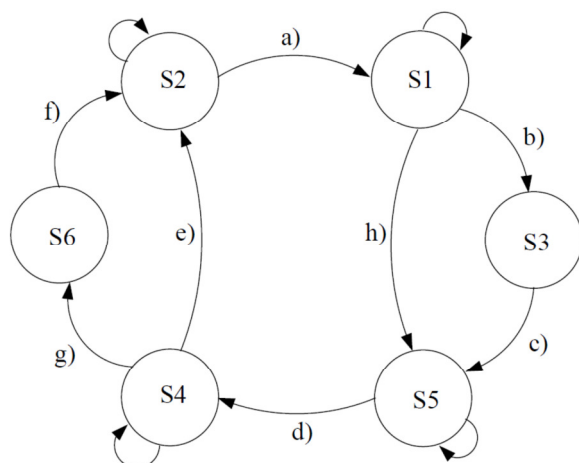
Kriterierne er til en vis grad modstridende, derfor er den valgte løsning et kompromis af ovenstående.

For at kunne foretage skedulering beskrives hvert hus ved følgende egenskaber og tilstande:

- Driftsstatus for varmepumpen ON/OFF
- Tid siden sidste skift i run time status
- Tid til den indendørs temperatur når komfortgrænserne
- Målt indendørstemperatur og målt udendørs temperatur
- Varmetransmissionskoefficient, varmekapacitet
- Tilskudsvarme fra andre kilder
- Minimum ON og OFF tid for varmepumpen
- Øvre og nedre temperaturgrænse i komfortbåndet
- Referencetemperatur
- Max effekt på varmepumpen
- Husidentifikation

Der er udviklet en skeduleringsprocedure som bestemmer, hvilke varmepumper der skal være tændte. I skeduleringen tages højde for, hvor tit en varmepumpe må svitse og at indendørstemperaturen skal holdes indenfor komfortgrænserne. Varmepumperne dels op i følgende tilstande:

S1	Varmepumpen er ON og kan skiftes til OFF, den samlede varmenergi i S1 er P1
S2	Varmepumpen er ON og skal forblive ON, den samlede varmenergi i S2 er P2
S3	Varmepumpen er ON og skal skiftes til OFF, den samlede varmenergi i S3 er P3
S4	Varmepumpen er OFF og kan skiftes til ON, den samlede varmenergi i S4 er P4
S5	Varmepumpen er OFF og skal forblive OFF, den samlede varmenergi i S5 er P5
S6	Varmepumpen er OFF og skal skiftes til ON, den samlede varmenergi i S6 er P6



Figur 7: Tilstandsdiagram for skeduler

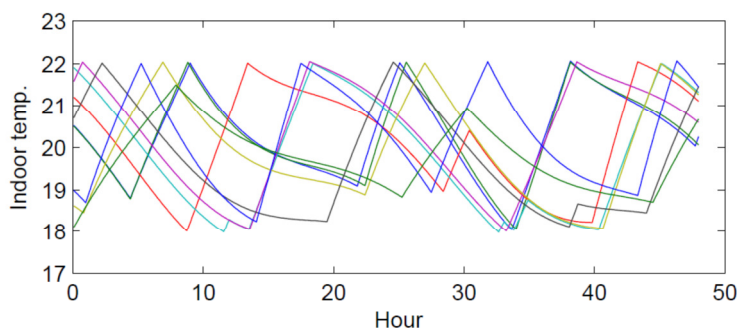
I figur 7 er tilstandslisterne repræsenteret som cirkler og de betingede skift mellem tilstandene som pile

- a) Varmepumpen har været ON længere end minimum ON run-time.
- b) Øvre grænse i temperaturbåndet nås før 5 min.
- c), h) Skift fra ON til OFF af skeduleringen
- d) Varmepumpen har været OFF længere end min OFF run-time.
- e), f) Skift fra OFF til ON af skeduleringen
- g) Minimumsgrænsen i temperaturbåndet nås inden for 5 min

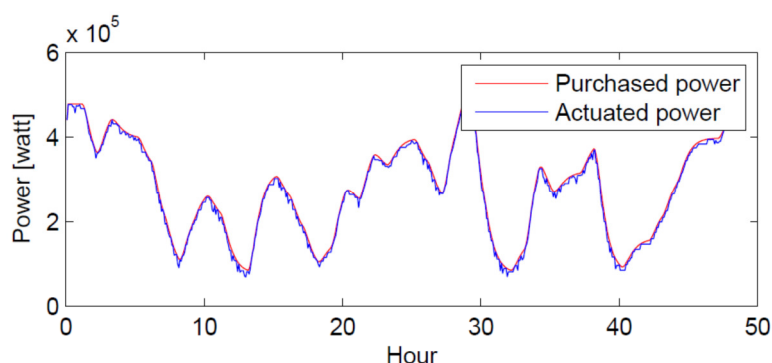
Tiden til temperaturgrænserne nås for hvert enkelt hus beregnes på baggrund af en 1. ordens husmodel og måledata.

Valget af varmepumper der skal skifte tilstand sker ud fra ovennævnte kriterier og krav om at det samlede forbrug skal være tættest muligt på den indkøbte energi.

For at teste konceptet er der foretaget simuleringer med 10, 100 og 10000 huse. Husene har realistiske og varierende varmeovergangstal, varmekapaciteter og størrelser for varmepumperne. Temperaturvariationerne i 10 huse ses i figur 8 og evnen til at følge en indkøbt energimængde ved 100 huse ses i figur 9.



Figur 8: Temperaturvariationer i 10 huse.



Figur 9: Samlet effektforbrug for 100 huse, indkøbt og forbrugt.

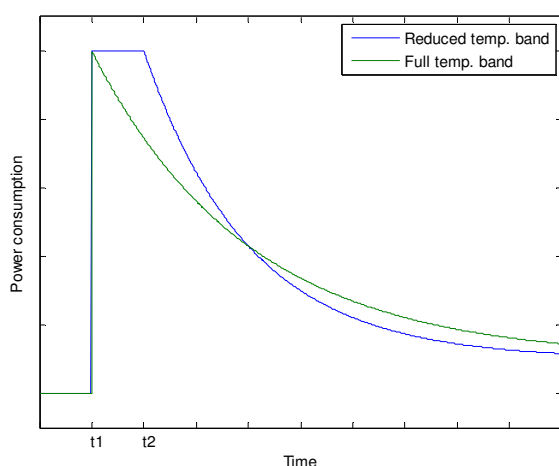
Konceptet kan simplificeres så der ikke er brug for individuelle modeller, men tænd/sluk afgøres af hvor tæt øjebliksværdien af indetemperaturen er på komfortgrænserne (Pedersen et al. 2014).

Implementering og afprøvning af kontrolkonceptet på beboede huse er beskrevet i kapitel 6.

4.5 Udnyttelse af fleksibiliteten til balancering og på regulerkraftmarkedet

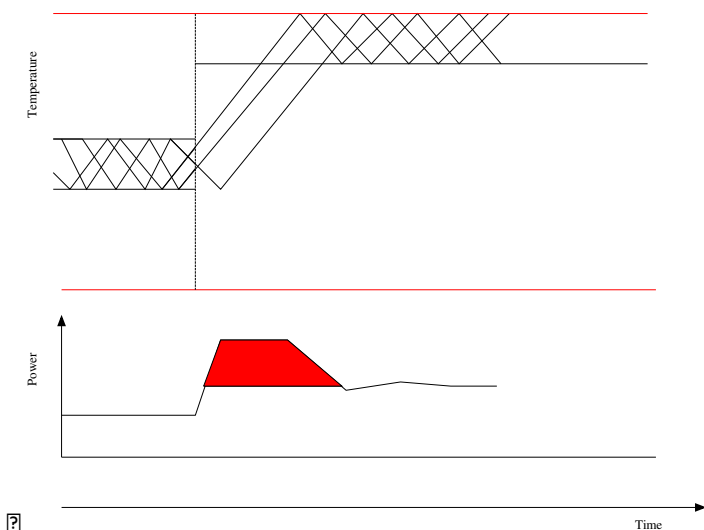
Når indendørstemperaturen i husene må variere indenfor komfortgrænserne, repræsenterer forskellen på den aktuelle temperatur og grænsetemperaturen et energilager, som kan anvendes til intern balancering hos den balanceansvarlige eller på regulerkraftmarkedet. Energilageret kan udløses ved at hæve eller sænke den gennemsnitlige indendørstemperatur. Inden for en kort tidshorisont er det muligt at udnytte en større del af lageret. Det er muligt at udløse den lagerkapacitet som er i de huse, hvor varmepumpen på et givet tidspunkt kan skifte driftstilstand (ON/OFF).

Det øjeblikkelige energilager til nedregulering er repræsenteret ved det øgede energiforbrug der kan skabes ved at starte alle varmepumper som må startes og som ikke allerede kører. Det øjeblikkelige energilager til opregulering er alle de varmepumper som kan stoppes og ikke allerede er stoppede. Typiske temperaturvariationer ved brug af skeduleringsalgoritmen ses på figur 10. Det fremgår, at ca. halvdelen af varmepumperne er tændte og halvdelen stoppede. Ønskes der f.eks. en nedregulering kan stoppede varmepumper startes – tændte varmepumper forbliver tændte. Forbruget kan holdes indtil indendørstemperaturen i de enkelte hus når den øvre grænse. Et typisk forløb af energiforbruget ved nedregulering er vist i figur 10 (grøn kurve). Reguleringen sker til tiden t_1 . Det fremgår at der hurtigt sker en stigning i energiforbruget svarende til, at indendørstemperaturen i husene når max grænsen så varmepumpen stoppes. Det energilager som på lang sigt vil kunne udnyttes svarer til ændringen i den gennemsnitlige indendørstemperatur.



Figur 10: Muligt effektforbrug ved nedregulering, fuldt temperaturbånd (grøn), minimumstemperaturbånd (blå).

Hvis der ønskes et højt bidrag fra energilageret over en længere periode kan skeduleringsstrategien ændres. Temperaturbåndet som indendørstemperaturen kan variere indenfor laves mindst muligt omkring referencetemperaturen (Pedersen et al. 2014), svarende til de temperaturgrænser varmepumpens minimum ON/OFF tider vil medføre, se figur 11. Ved nedregulering vil varmepumper som er stoppede kunne startes så snart deres run-time begrænsninger udløber. Tændte varmepumper vil kunne forblive tændte til de når max-grænsen i komfortbåndet. Tiden før nogen af varmepumperne når max temperaturen og dermed stopper er øget, se figur (Pedersen et al. 2014), (Nielsen et al. submitted).



Figur 11: Minimums temperaturbånd. Effektforbrug og temperaturvariationer ved opregulering.

Konklusionen er at der kan laves en skeduleringsalgoritme som giver større fleksibilitet men kræver mange ON/OFF skift af varmepumpen.

4.6 Delkonklusion for modelbaseret kontrol og skedulering

I projektet er der opstillet en husmodel som beskriver sammenhængen mellem indendørstemperaturen og effekt fra varmepumpen, vejrdata og husparametre. Modellens orden er bestemt og parametrene er forsøgt bestemt ud fra målinger på 6 forskellige huse. De dynamiske parametre er svære at bestemme i beboede huse, da den eksisterende varmepumperegulator holder indendørstemperaturen næsten konstant og beboerne giver anledning til store forstyrrelser fra f.eks. brændeovn, åbne/lukke vinduer og døre, ovn. De statiske parametre kan bestemmes ved midling over mange målinger.

For at kunne købe billigt ind på spotmarkedet er der som nævnt anvendt model prædiktiv kontrol (MPC). Der er opstillet en performancefunktion som på baggrund af husmodellen, spotprisprognoser og vejrdata fra DMI har været anvendt til at estimere og prisoptimere energiforbruget 36 timer frem i tid. Algoritmen har gjort det muligt at planlægge større energiforbrug på tidspunkter med lav energipris. Det er testet ved simulering og på beboede enfamiliehuse, at det optimerede energiindkøb kan dække det enkelte hus' varmebehov i driftsdøgnet. Testen viser at energiforbruget kan flyttes og energiplanen kan holdes, dog kan forstyrrelser fra beboerne og vejrskift medføre, at det ikke altid er muligt at anvende præcist den indkøbte energi hvis komforten i huset skal overholdes.

I en større samling huse ses det, at forstyrrelserne fra beboerne i stor udstrækning er uafhængige, dermed antages det, at forstyrrelserne fra enkelthuse kompenserer hinanden. Derfor er der udviklet et kontrolkoncept, hvor en samling af huse skal overholde en samlet energiplan som består af summen af enkeltplaner. Kontrolsystemet er en skeduleringsalgoritme som sikrer, at den samlede energiplan holdes samtidigt med at temperaturen i alle huse er indenfor komfortgrænserne og varmepumpernes driftsbetingelser overholdes. Algoritmen er afprøvet på et større antal beboede huse og viser gode resultater.

Indendørstemperaturen i husene må variere indenfor komfortgrænser, derfor repræsenterer forskellen på den aktuelle temperatur og grænsetemperaturen i komfortbåndet et energilager. Lageret kan anvendes til intern balancerings hos BRP eller på regulerkraftmarkedet. De enkelte varmepumpers driftstilstand bestemmer, hvor meget energi der aktuelt kan udløses. Der er udviklet en algoritme som optimerer den mængde energi som kan udløses til balancerings. Algoritmen er testet på realistiske data og viser gode resultater.

5 Styringsstrategier

Der er tre arketyper af styringsstrategier, som sammenlignes i det følgende:

Type	Beskrivelse
Spotpriser og individuel modellering og styring	Her laves en model over husets energibehov. Spotpriser nedtages og der beregnes en plan lokalt, som der køres efter, f.eks. med ændrede set-punkter for varmepumpen i dyre og billige timer. Der leveres ikke regulerkraft.
Puljemodellering og direkte styring	Her modtages nøglemålinger centralt sammen med historiske vejrdato. Baseret på dette laves en overordnet model, som planlægger kommende døgn kørsel. Styringen udgår centralt således det samlede forbrug hele tiden tilgodeses.
Prissignalstyring	Her modtages 5 minutters regulerkraftpriser lokalt, som der reageres på.

Tabel 7: Arketyper af styringsstrategier.

De to første styringer i ovenstående tabel er direkte styring og sidste er indirekte styring vha. prissignaler, som beskrevet i et andet ForskEl projekt, "FlexPower"³.

Imellem disse findes varianter som kombinerer funktionalitet på tværs, som f.eks. individuel modellering og puljestyring. Ligeledes kan den individuelle modellering laves såvel lokalt som centralt. De forskellige typer af styringsstrategier sammenlignes nu på en række parametre.

Parameter	Individuel styring	Puljestyring	Prissignalstyring
Kompleksitet i huset	høj	lav	høj
Kompleksitet hos BRP	ingen	middel	middel
Kompleksitet hos aggregator	ingen	høj	ingen
BRP ubalancebidrag	begrænset	begrænset	delvis
Energiovervågning husejer	ja	(ja)	(ja)
Kontrakttype	direkte pris	fastpris + bonus	direkte pris
Afhjælpe netflaskehalse	ja	ja	ja
Udnytte fleksibiliteten	i høj grad	delvis	begrænset
Storskala velegnet	ringe	delvis	optimal
Egnethed for varmepumper	kompleks	ideel	delvis
Egnethed for simple enheder	ringe	ringe	optimal

Tabel 8: Sammenligning af tre typiske styringsstrategier.

Prissignalstyring er angivet som komplekst i huset, idet der skal være en omsætning af et prissignal til en styring af varmepumpen. Det kan selvfølgelig være en simpel tærskelstyring, som hhv. tvangsstarter og – stopper varmepumpen ved givne niveauer. Bedre vil det sikkert være at vælge disse grænser afhængig af middelpriisen og basere varigheden af reaktionen på en slags modellering af huset. En udfordring her er at

³ http://www.ea-energianalyse.dk/projects-danish/1027_flexpower_markedsdesign.html

hvis prissignalet er 5 minutters, så kan varmepumpen ikke skifte tilstand hvert 5. minut. Ligeledes er den individuelle styrings kompleksitet høj, idet der kræves individuel modellering og styring.

Aggregatorrollen er "kun" relevant for puljestyringen i denne sammenligning. Hvad angår evt. ubalancebidrag hos den balanceansvarlige, så bidrager den individuelle styring kun lidt til dette og kun i det omfang at den balanceansvarlige ikke kan forudsige planen som der styres efter. Ved puljestyring vil ubalancen være begrænset idet den søges udjævnet af puljen. For prissignalstyringen vil der være nogen ubalance, idet en reaktion på et prissignal vil udløse en "kick-back" eller "modreaktion" på et senere tidspunkt for at komme tilbage til normaltilstanden. Denne kick-back kan ligge intraday.

Såfremt forbrugsdata for det enkelte hus er tilgængelig giver alle tre styringer mulighed for at foretage energiovervågning af det enkelte hus, men den individuelle modellering benytter sig af individuelle modeller og giver dermed som den eneste styring mulighed for afledte services som oplysninger om klimaskærm, registrering af unormalt varmetab og uventet varmepumpebidrag.

Hvis der er flaskehalse i nettet kan alle styringer undgå kørsel i disse perioder. Det kræver dog for prissignalsstyringen at prissignalet afspejler dette.

Ved puljestyring vil det enkelte hus' kørsel være afhængig af kørslen i de andre huse i puljen. Derfor kan det aktuelle forbrug i huset ikke bruges til endelig afregning.

Den individuelle modellering og styring estimerer ideelt set fleksibiliteten 100 % og styrer efter dette. Brugeradfærden er dog typisk vanskelig at forudsige og giver typisk anledning til justering af køreplanen i driftsdøgnet. For prissignalsstyringen vil styringen altid være baseret på en triggerværdi om der skal køres eller ej og det bliver aldrig en optimal plan der udnytter en modelleret fleksibilitet.

Udfordringen ved puljestyring er at man ikke kender de enkelte huses begyndelsestemperatur for den aggregerede model. Dette betyder at puljestyringen bliver nødt til at anvende et reduceret dynamikområde for at undgå leveringsproblemer. Omvendt håndterer puljestyringen den "uforudsigelige" brugeradfærd godt, ved at prioritere kørslen hvor den størst brugerkomfort.

Konceptet med simpel prissignalstyring i varmepumpen er velegnet til storskaladrift, idet et udsendt prissignal kan bruges af "uendelig" mange enheder. Understøttelse af direkte puljestyring er omvendt simpel i varmepumpen men kræver at aggregatoren har fat i alle enheder og ved rigtig mange enheder bliver det en væsentlig opgave.

Det er først ved apparater som har et væsentlig energiforbrug (f.eks. elbiler og varmepumper) at det giver mening med direkte styring, som er mere kompleks at implementere. For mindre enheder er prissignalstyring ideel.

6 Implementering af READY VPP controller

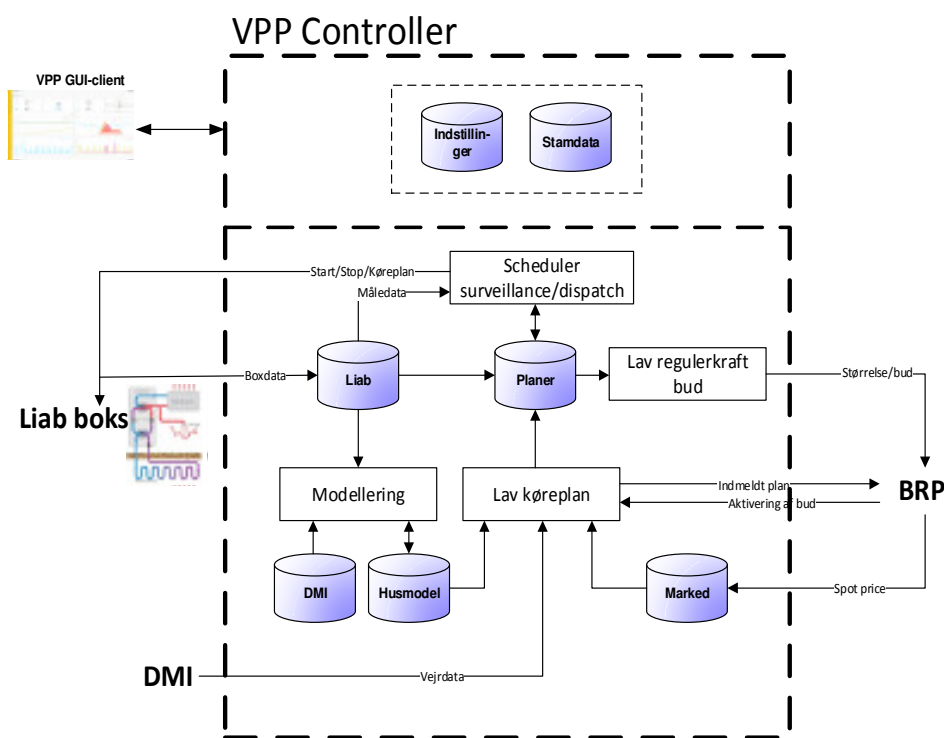
I dette kapitel beskrives den valgte styring af varmepumperne, den praktiske implementering og erfaringen med styringen af varmepumperne.

Formålet med styringen er at afdække potentialet for en større pulje af varmepumper, som anvendes på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet.

Der er tidligere beskrevet tre arketyper af styringskoncepter. READY-projektet tester den direkte styring, som giver den mindste samlede ubalance for en pulje af varmepumper i forhold til en indmeldt plan. Det skyldes, at puljestyringen udjævner variationerne i den enkelte varmepumpes drift på tværs af puljen. Der testes potentialet ved aggregeret modellering, da dette er noget mere simpelt og skalerbart end den individuelle modellering.

6.1 Systemdiagram

Der er følgende systemdiagram over VPP Controller.



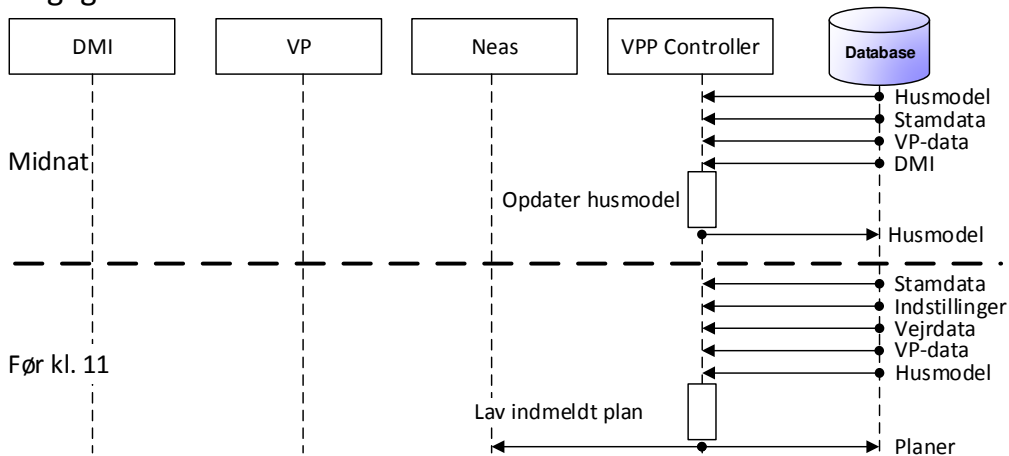
Figur 12: Blokdiagram over VPP Controller.

Til styringen modtages der 5 minutters data fra varmepumpen samt vejrudsigter med timeopløsning hver 6. time.

6.2 Sekvensdiagrammer

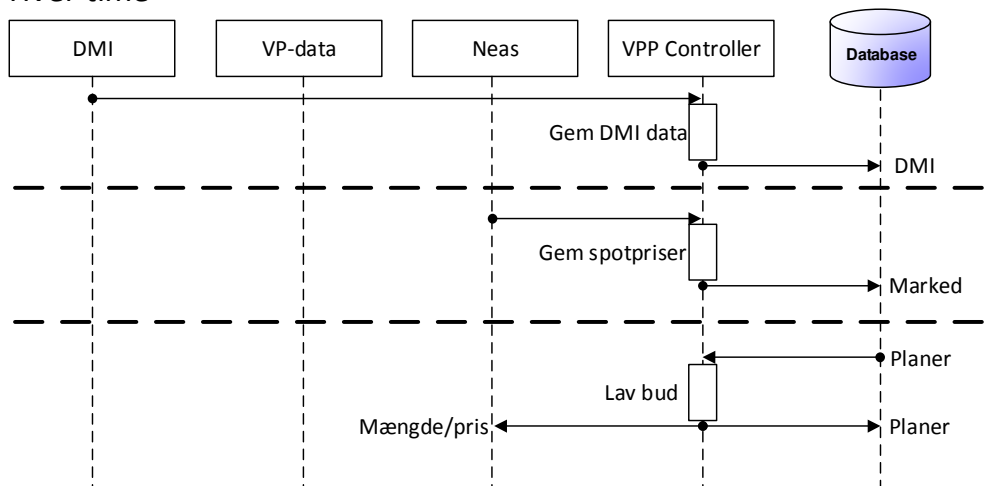
For at forstå arbejdsgangen i VPP controlleren er der lavet sekvensdiagrammer:

Daglig



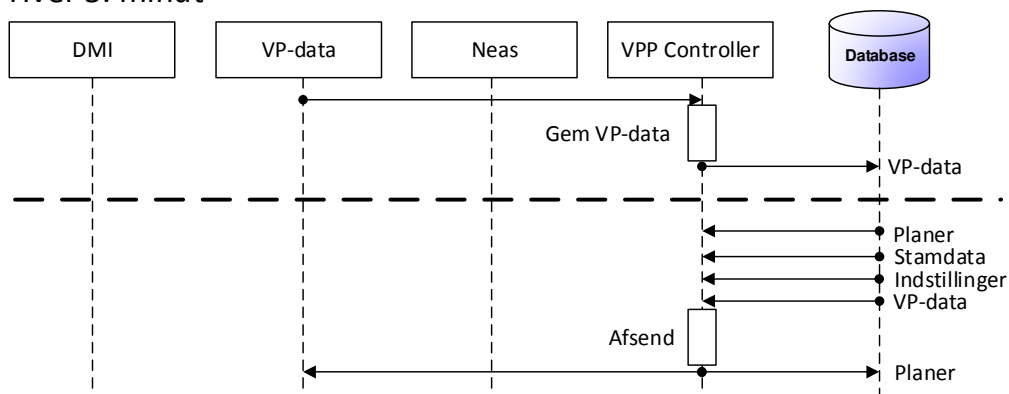
Figur 13: Sekvensdiagram over day-ahead aktiviteter.

Hver time



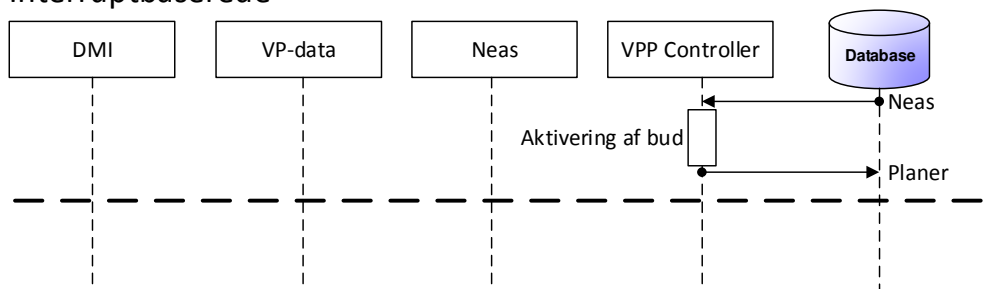
Figur 14: Sekvensdiagram over aktiviteter hver time.

Hver 5. minut



Figur 15: Sekvensdiagram over aktiviteter hver 5. minut.

Interruptbaserede



Figur 16: Sekvensdiagram over interruptbaserede aktiviteter.

6.3 Budstrategi

I dette afsnit beskrives mulige budstrategier day-ahead for spotprismarkedet og intraday for regulerkraftmarkedet.

Konservativ budstrategi

En konservativ budstrategi kan bestå af:

Periode	Beskrivelse
Day-ahead	Spotprisoptimeret plan baseret på spotprisprognoser, som efter afsendelse til BRP bliver indmeldt plan. Det sikres, at den anvendte energi i den spotprisoptimerede plan er samme størrelse som den energi varmepumperne skal bruge for at holde referencetemperaturen.
Intra-day	Hver time beregnes, hvor meget der kan startes og stoppes i forhold til den indmeldte plan, hvor det samtidig sikres, at den indmeldte plan stadig kan følges i resten af døgnets timer. Budprisen kan være timens spotpris, men vil typisk være en margin til spotprisen, så varmepumpen ikke bliver aktiveret hele tiden til en meget begrænset fortjeneste. En margin kan også tage hensyn til at ekstraforbruget ved nedregulering fortrænger noget fremtidigt forbrug, som måske er billigere end den aktuelle times spotpris og dels at det sparede forbrug giver anledning til et senere ekstra forbrug ligeledes til en ukendt spotpris.

Tabel 9: Den konservative budstrategi.

Intra-day buddene kan udvides til at omfatte flertrinsbud, hvis der er aftalt flere niveauer af komfort med husejerne i deres kontrakt. En udvidelse af komfortgrænserne giver større fleksibilitet i huset og dermed større værdi for VPP Controlleren.

Ligeledes kan der anvendes betingede bud for day-ahead, hvorved der købes ekstra energi ind, hvis prisen er særlig attraktiv.

Det bemærkes her, at hvis der bydes ind på regulerkraftmarkedet efter der er indmeldt en plan for kommende døgn, skal der tages højde for dette ved budmængden således det sikres, at den resterende del af den indmeldte plan for intra-day samt indmeldt plan for day-ahead kan følges, uanset om buddet aktiveres eller ej.

Buddene på intraday kan løbende ændres. De binder bare et kvarter før hver time. En strategi er at forsøge at sælge forventede ubalancer i intraday. Ligeledes kan det forsøges at korrigere for fejl i prisprognose ved at købe og sælge.

Aggressiv budstrategi

For den aggressive budstrategi gælder, at der bydes ind uanset om dette evt. giver anledning til tvangskørsel senere i driftsdøgnet eller day-ahead. Der er mange niveauer af dette, som har hver deres risikoprofil.

- 1) Ændre day-ahead plan baseret på spotprisprognoser, så den tilgodeser forventede regulerkraftsmuligheder og interne muligheder.
- 2) Byde ind maksimalt og minimalt ind i regulerkraft uanset risikoen for senere tvangskørsel
- 3) Indmelde en plan day-ahead, som fra starten er afhængig af puljen aktiveres på regulerkraftmarkedet.

Forslag 1) kan realiseres uden at der indmeldes en "urealistisk" plan, dog vil den nye plan ikke være spotprisoptimeret og er således afhængig af en senere aktivering og gevinst på regulerkraftmarkedet, hvis den skal give mening.

Forslag 2) kan gøres mindre risikabelt, hvis den mulige tvangskørsel ligger langt ude i fremtiden. Derved stiger sandsynligheden for at en evt. regulerkraftaktivering i mellemtiden fjerner behovet for tvangskørsel.

Forslag 3) er den "ultimate" måde at gå efter den maksimale gevinst ved regulerkraft i en bestemt retning. Hvis der forventes nedregulering i kommende døgn, kan den bevidst meldes for lidt ind for derved at øge mulighederne for at byde nedregulering ind. I forslag 3) skal der en aktivering i regulerkraftmarkedet til enten at levere energi nok til husene eller for ikke at levere for meget energi til husene. Hvis de nødvendige aktiveringer udebliver er det nødvendig med tvangskørsel eller –blokering for at komforten holdes i husene.

I de efterfølgende praktiske forsøg er der primært anvendt den konservative budstrategi.

6.4 Begrænsninger

Når data samles op fra puljen og der laves en aggregeret model, bliver den samlede fleksibilitet noget mindre end det teoretisk maksimale. Det har følgende årsager:

Årsag	Beskrivelse
Ingen tvangsstart	Herved mistes muligheden for at "lagre" ekstra energi i huset og styringen mister halvdelen af fleksibiliteten.
Ingen ekstern prioritering af varme frem for brugsvand	Forbruget af det varme vand samt tanktemperaturen måles og prioriteres. Et tilpas stort forbrug giver umiddelbart anledning til varmepumpekørsel.
Stokastisk brugeradfærd	Der er husejere der har komfortgulvvarme slået til, som skal køre. Ligeledes luftes ud og bades på forskellige tidspunkter. Alt i alt betyder det at der reserveres 10-20% fleksibilitet til grundkørsel.

Termostater giver variabel varmekapacitet	Mange huse har begrænset varmetilførslen ved termostater. Termostaterne er indstillet forskelligt i de enkelte rum. Det betyder, at varmekapaciteten er temperaturafhængig i huset og i praksis at der opereres med en reduceret gennemsnitskapacitet i styringen.
Styrings- og feedback delay på op til 10 minutter	Det betyder i praksis at effekten i VPP Controller ikke kan reguleres på plads på under en time. Den ønskede effekt skal altså kunne opnås ved at styringen rammer rigtig uden feed back.
Luft-vand VP	VP kræver afrimning, som starter automatisk et stykke inde i timen. Det betyder at minimum køretid skal forlænges tilsvarende.
Svært at estimere VP reelle sætpunkt	Styringen estimerer varmepumpens egen indstilling af sætpunkt og skal gerne holde temperaturen i huset lidt under således at varmepumpen kalder på varme og vil køre når den får lov til det.
Effektforbruget kan ikke nå den maksimale effekt hele puljen kan trække	Det kræver at alle rummene med varmepumper bliver holdt lidt koldere end sætpunktet. Det vil betyde et tab i komfort, og derfor undgås dette.

Tabel 10: Sammenligning af tre typiske styringsstrategier.

Der er således fire kategorier af begrænsninger for fleksibiliteten i denne puljestyling i forhold til et ideelt Smart Grid hus med beboer hvis brugeradfærd kan forudsiges og tages med i planlægningen:

- Begrænsninger i varmepumpens styringsmuligheder
- Installationsbegrænsninger i huset
- Puljestylingbegrænsninger
- Brugeradfærd

Den første kategori dækker over manglende tvangsstart af varmepumpen, forsinket styring og feedback fra varmepumpen, ingen separat styring af varme- og brugsvandsproduktion samt afrimningsproces hos luft til vand varmepumper.

Den næste kategori dækker over termostatsbegrænsninger i huset, så hele komfortvinduet ikke udnyttes.

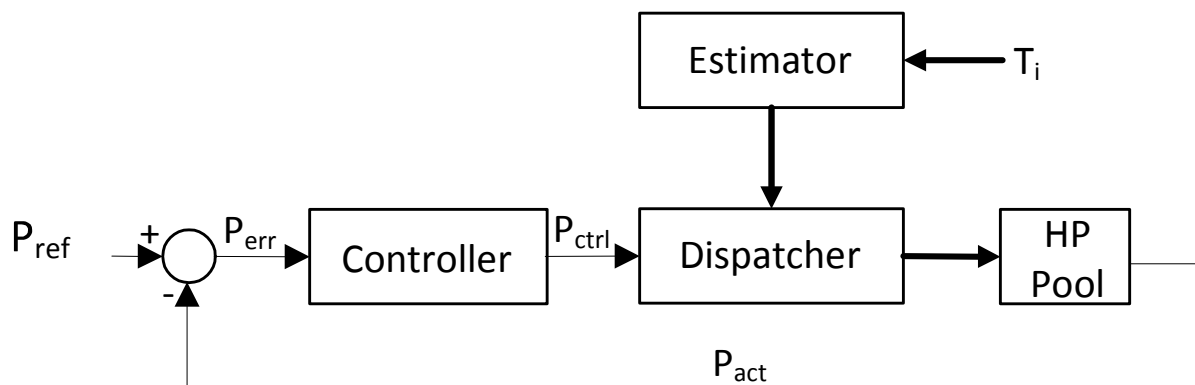
Den tredje kategori skyldes at modellen for puljestylingen ikke har de individuelle tilstande beskrevet for de enkelte huse. Hvis tilstandene ligger jævnt fordelt udlignes effekten af dette delvist, men der vil altid skulle reserveres et bånd foroven og forneden i den samlede pulje.

Den fjerde kategori skyldes uforudset brugeradfærd. Dette udlignes til dels ved at puljestylingen styrer på tværs af husene.

Resultatet af ovennævnte giver en reduktion af fleksibiliteten på 60-80%.

6.5 VPP Controller beskrivelse

Den overordnede struktur af VPP Controlleren er vist i blokdiagrammet på nedenstående figur.



Figur 17: Overordnet blokdiagram af VPP.

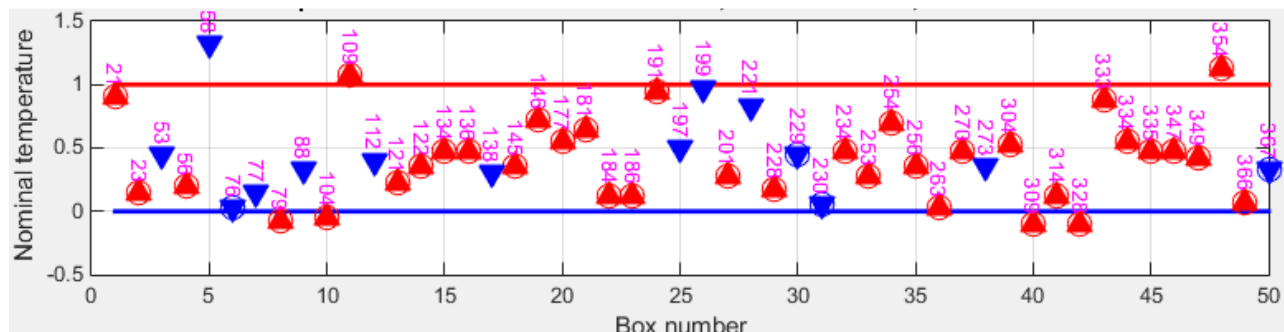
Input til *Controller* er P_{err} . Det er fejlen mellem det ønskede samlede effektforbrug for puljen, P_{ref} og det målte effektforbrug for puljen. P_{ref} kommer fra den indmeldte plan, day-ahead, evt. korrigeret med aktiveret regulerkraft. *Controller* leverer nu et styresignal P_{ctrl} til *Dispatcher*, som herefter afgør hvilke varmepumper i puljen, som skal hhv. må køre og som skal blokeres. Output fra *Dispatcher* er således start- og stopkommandoer til de involverede varmepumper i *HP Pool*. Da det ikke er muligt at tvangsstarte varmepumperne er det ikke sikkert at de vil køre når de får lov til at køre. Det afhænger af varmepumpens interne tilstand samt om huset har nået varmepumpens interne set punkt. Til at estimere varmepumpernes reelle effektforbrug, hvis de får lov til at køre anvendes *Estimator*, som blandt andet bruger de sidste målte indetemperaturer som input. Yderligere detaljer omkring de aftestede styringsprincipper er at finde i bilagsrapport.

Controlleren i ovenstående figur kører hvert femte minut, hvor fejlen P_{err} hele tiden søges minimeret. Når fejlen er kendt styres relæet på et antal varmepumper efter følgende kriterier:

- Slip blokering øjeblikkelig, hvis
 - Temperatur i varm brugsvandstank under grænse
 - Der er anvendt varmt brugsvand over en vis grænse siden varmepumpen blev stoppet
 - Varmepumpen har været stoppet i over 3 timer
- Bloker øjeblikkelig, hvis
 - Temperatur indenfor er over grænse
- Så længe P_{err} positiv, tænd varmepumpe hvis
 - Køre- og hviletider er overholdt
 - Vælg dem med relativ lavest temperatur først
- Så længe P_{err} negativ, sluk varmepumpe hvis

- Køre- og hviletider er overholdt
- Vælg dem med relativ højest temperatur først

Til at visualisere de enkelte varmepumpers drift kan følgende figur anvendes.

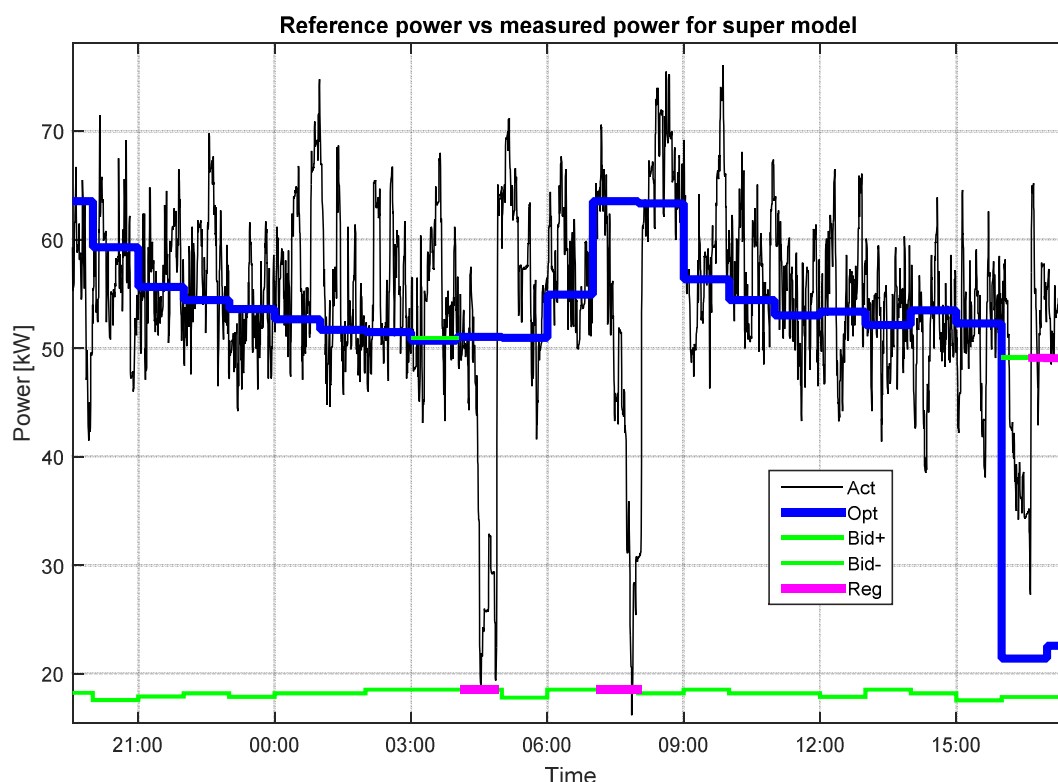


Figur 18: Temperaturfordeling for den enkelte varmepumpe ved puljestyling.

I ovenstående figur er hvert enkelt varmepumpe afbildet i forhold til den nominelle indendørstemperatur, T_{nom} . Hvis T_{nom} er 0 er temperaturen lig den laveste accepterede temperatur, T_{min} og er T_{nom} 1 er temperaturen lig den højeste accepterede temperatur, T_{max} . En rød trekant indikerer at varmepumpen må køre og en blå at den er blokeret. En ring omkring trekanten indikerer yderligere at varmepumpen er låst ud fra køre- og hviletidskravene for denne. Enkelte varmepumper er tændt selvom temperaturen er over T_{max} , det skyldes typisk der er behov for produktion af varmt vand i huset.

6.6 VPP Controller - styringsresultater

Styring af puljen med VPP Controller giver følgende typiske billede.



Figur 19: Den målte effekt for puljen sidst i november i forhold til forskellige planer.

Ovenstående figur viser målt (sort kurve) for puljen i forhold til referencen (blå kurve). Når der er aktiveret regulerkraft (lilla kurve) vises dette. Yderligere ses buddene for op- og nedregulering (grønne kurver). Som det ses er der nogen udsving til begge sider hver gang referencen ændres. Det skyldes igen at varmepumperne som følge af det tilgængelige styringskoncept ikke nødvendigvis starter når relæet slippes, men kun hvis varmepumpens indbyggede styring mener der er et behov. Henover timen udglattes denne variation dog delvist. Det ses at der ikke lukkes mere ned end til ca. 20 kW for puljen. Det er fordi, der skal være plads til kørsel for at sikre brugerne varmt vand. Forbruget af dette er typisk sammenfaldende med spidslasttimerne, som søges undgået. Samtidig planlægges det at puljen ikke bruger mere end 45 kW, som også svarer til ca. 45% af nominel effekt. Det skyldes igen at varmepumperne ikke kan tvangsstartes og derfor ikke i længere tid forventes samlet at ville køre med max power.

Puljen har været testet hen over november 2014 med mindre afbrydelser undervejs af hensyn til småjusteringer. Der har til stadighed været tilsluttet 50-60 varmepumper. Der er foretaget forskellige finjusteringer af komfortgrænserne, idet bl.a. nogle huse og deres beboere har vist sig mere følsomme overfor temperatursvingninger end først antaget.

Spotprisbesparelsen har i gennemsnit været 41 kr. pr. varmepumpe eller 13% af eludgiften før skatter og afgifter. Det kunne være blevet til en del mere hvis det havde været muligt at tvangsstarte varmepumpen. Således har de anvendelige arbejdsområde for puljen været 15-45% af nominel effekt.

Puljen er også testet med hensyn til regulerkraft. Således er der hver time budt en opregulering og nedreguleringsmængde ind til Neas med en tilhørende budpris, alt sammen i forhold til den indmeldte plan. Når så Neas har aktiveret noget regulerkraft har puljen fået samme aktiveringssignal. Buddet har været konservativt, således at puljen ikke kommer uden for komfortgrænserne uanset om den bliver aktiveret eller ej. Puljen er dog blevet aktiveret for få gange i november (< 20) til at der kan bestemmes et potentiale. Der vil dog alt andet lige altid være en ekstra gevinst ved regulerkraftsaktivering.

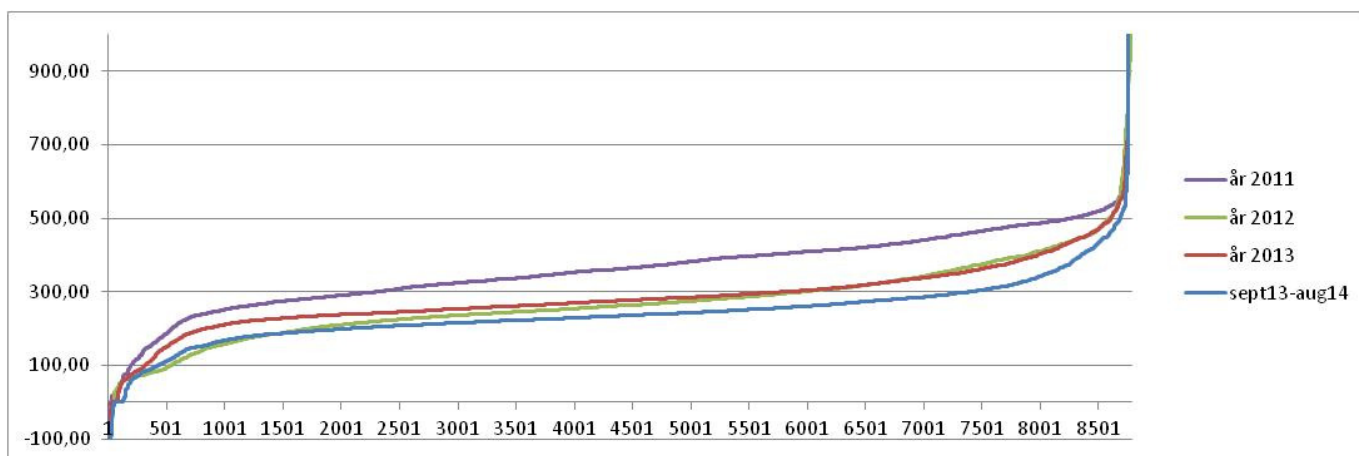
Styringen af puljen har ikke belastet serveren væsentlig og med 5 minutters styringen vil det umiddelbart være muligt at tilslutte over 1000 varmepumper, før der evt. skal ekstra serverkapacitet til eller ske en parallelisering. Det er kommunikationen ud til varmepumperne (når relæet skal styres), der tager tid.

7 Smart Grid-ready installationer

I dette afsnit er nogle af de parametre som har betydning for en Smart Grid-ready drift af varmepumper undersøgt. Der er i projektet analyseret på nogle af de data der er opsamlet via ”styrdivarmepumpe”. Disse data danner baggrund for opstilling af en beregningsmodel, hvor forskellige sammensætninger af anlægstyper kan beregnes.

For at give anbefalinger til en optimal varmepumpeinstallation er der udført modelberegninger på en række alternativer hvor der både er varieret på størrelse af varmepumpe (kompressoreffekt) og størrelse og mulighed for akkumulering af varme i beholdere eller betongulve. Desuden er der regnet på effekten af solvarme sammen med en varmepumpe. Derudover er der set på forskellige fabrikaters mulighed for fjernstyring og overvågning (se bilagsrapport).

I modelberegningerne tages udgangspunkt i de reelle elpriser fra spotmarkedet i et år. I nedenstående figur er spotprisen sorteret fra de lavest til de højeste for 4 forskellige år.



Figur 20: Sortering af elpriser for Vestdanmark for årene 2011, 2012, 2013 samt perioden september 2013 til august 2014. x-aksen er årets timer og y-aksen er spot-elprisen i kr./MWh.

Det ses i grafen at elpriserne generelt er faldet gennem de sidste år. Desuden ses det, at de fleste af årets timer har temmelig ens priser, f.eks. 200 til 300 kr./MWh for den nederste periode. Denne tendens ser ud til at være blevet mere udtalt for perioden på 4 år. I samme periode er der kommet en øget andel af vind i elsystemet.

I beregningerne er der taget udgangspunkt i priserne fra 2011.

7.1 Variation af varmepumpe og varmeakkumulering

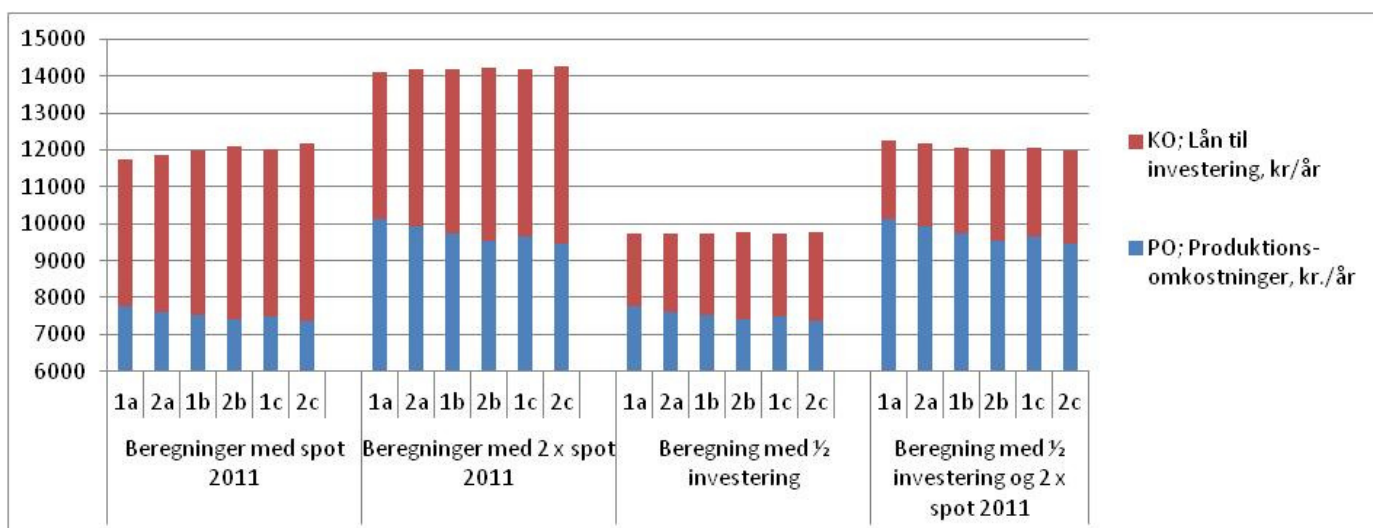
Formålet med beregningen i det følgende er at se om en større varmepumpe eller en større bufferbeholder har en positiv effekt på drift i forhold til Smart Grid og på økonomien.

For at bedømme økonomien i alternativerne er der sat pris på investeringerne i alternativerne. Der er gennemført en række beregningen med en række variationer.

For varmepumpen er der regnet på investering i to størrelser af SVK varmepumper samt bufferbeholderne. Kapitalomkostningerne, KO er udregnet med en rente på 4% og en løbetid for et lån på 20 år. PO, produktionsomkostninger er udregnet i modelprogrammet EnergyPro.

For at se hvad der skal til for at illustrere en tydelig forskel i økonomien i den bedste Smart Grid installation er alternativerne udregnet med følgende ændringer:

- Basis med spotpriser fra 2011, som vist ovenfor.
- De dobbelte spotpriser som kan illustrer større variation mellem høje og lave priser.
- Beregning med det halve niveau i investering. Der er i basis regnet med dages prisniveau, men ved en effektivisering og større salg kan forudses lavere priser.
- Sidste sæt beregninger er både større udsving i elpriserne og lave investeringer.

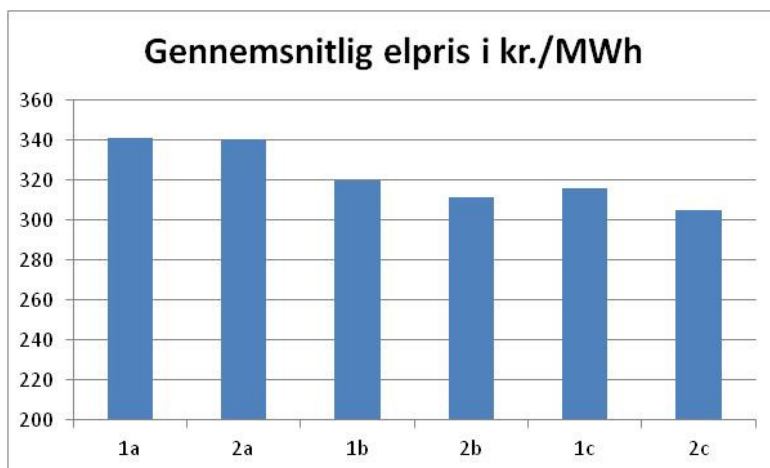


Figur 21: 4 sæt beregninger med dobbelte elpriser og 1/2 merinvestering med de tidligere variationen af størrelse af varmepumpe (1=5kW og 2=7kW) og bufferbeholder (a=0 l, b=500 l og c=800 l). y-aksen viser en årlig udgift i kr. for et standard hus.

Økonomien indenfor hver sæt beregninger er temmelig ens. Det ses at produktionsomkostningerne (som primært er til køb af el) falder når varmepumperne og bufferbeholderen bliver større. Samtidig stiger investeringerne så det samlede resultat næsten udligner sig.

Generelt er der ikke stor forskel på økonomien i alternativerne. Dét der spares i driftsudgifter med en mere "Smart Grid ready" installation koster det i afdrag i ekstra investeringer i den større varmepumpe og større bufferbeholder.

Et udtryk for hvor godt alternativet spiller sammen med elnettet er den gennemsnitlige elpris i kr./MWh for den el der forbruges.

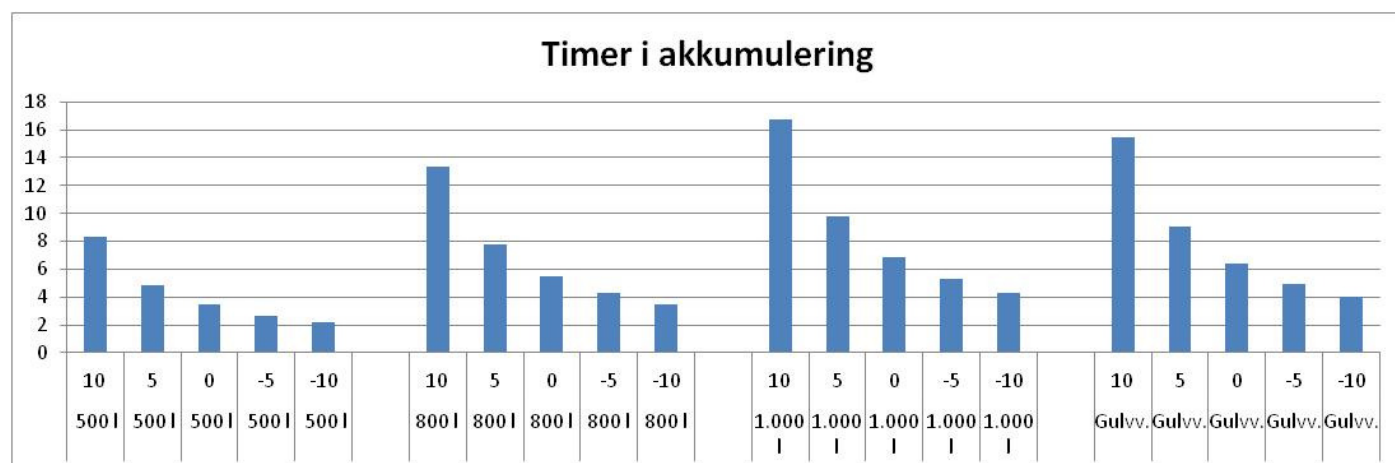


Figur 22: Den gennemsnitlige elpris for forbrugt el i alternativerne med elspot fra 2011.

Det ses i figuren at gennemsnitsprisen på det forbrugte el falder jo større effekt varmepumpen har og jo større akkumulering. Den laveste elpris i alternativ 2c kan tolkes således, at den største varmepumpe og det største lager i alternativerne giver den bedste indpasning til elsystemet.

7.2 Akkumulering i vandtanke og / eller bygningsmasse

Det at gemme energi i akkumuleringstanke er standard i beregningsmodellen. For at estimere kapaciteten i bygningsmassen (for eksempel et betongulv) findes en ækvivalens for denne. For at få et indtryk af evnen til at akkumulere varme med beholdere eller betongulv er der regnet på det antal timer den akkumulerede varme kan opvarme huset.

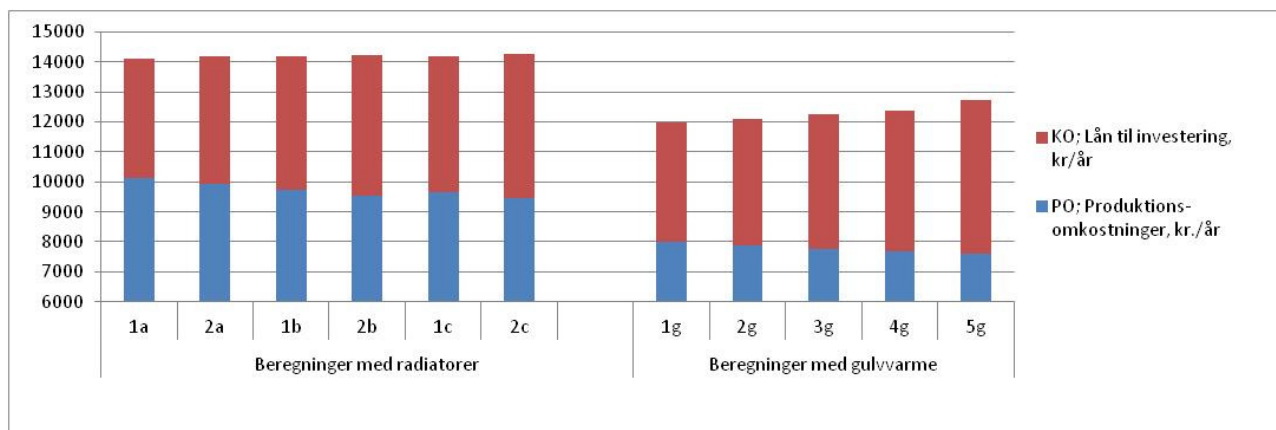


Figur 23: Graf for hvor mange timer der er ved forskellige størrelser af akkumuleringstank / gulvvarme i forhold til udetemperaturen. Ved beregningen er der regnet med at beholderen kan rumme varme mellem 45 og 25 °C. Ved gulvvarmen er der regnet med temperaturer mellem 26 og 21 °C.

På figuren ses, at ved for eksempel en udetemperatur på 0°C kan være ca. 3½ times varme i en beholder på 500 l og ca. 5½ time i en beholder på 800 l. Beregningen er lavet på et standard hus. For gulvvarme kan der være store forskelle i hvor meget varme der tabes fra et betongulv ud gennem soklen. Derfor kan nogle huse med gulvvarme have langt mindre akkumuleringstid end angivet i figuren.

I Danmark er udetemperaturen store dele af året mellem 0 og 10 gr. C og der giver selv en beholder på 500 l timer nok til at undgå varmepumpedrift i dyre timer i en kogespids fra kl. 17 til 19.

I det følgende er der regnet på et års drift for at sammenligne standardhuset med radiatorvarme og beholderakkumulering med gulvvarme.



Figur 24: Sammenligning mellem anlæg med radiatorer og gulvvarme

Det ses, at det er markant billigere at opvarme standardhuset, hvis det har gulvvarme. Det ses også at merinvesteringen i større kompresser i gulvvarmeserien ikke kan betale sig med de forudsatte elpriser (2 x Spot2011).

7.3 Delkonklusioner

Analyserne viser generelt, at der er ringe økonomi for forbrugerne i optimering af en varmepumpeinstallation med de nuværende prisniveauer, tarif- og afgiftsforhold. For elsystemet er det imidlertid en fordel, hvis forbrugerne forbereder varmepumpeinstallationen til bedre at kunne indgå aktivt i elsystemet (i forhold til timeafregnet el).

- Installation af en større varmepumpe og større varmeakkumulering kapacitet giver mere reguleringskapacitet i elsystemet. Dette øger muligheden for at producere varme, når elprisen er lav.
- Der er dog ikke nogen økonomisk fordel for forbrugeren i at investere i større varmepumpe eller akkumuleringsbeholder i forhold til besparelser på spotmarkedet.
- Varme kan akkumuleres i en beholder (buffer) og / eller i bygningsmasse. Der er fordele for elsystemet ved begge typer akkumulering. Hvis man i forvejen har gulvvarme i et betongulv, er det selvfølgelig den billigste akkumulering. Selv med et betongulv kan det dog ikke betale sig for forbrugeren at investere i en større varmepumpe.
- Solvarme i forbindelse med en varmepumpe er et fint tiltag, der sparer el, men sammenholdt med timeafregning af el til varmepumpen, er der ikke økonomi i merinvesteringen i solvarme. Det skyldes bl.a. at det er relativt billig el som solvarmen erstatter.

- Varmepumpeproducenterne har generelt ikke fokus på Smart Grid, men flere er så småt kommet i gang med at udvikle styring som kan tilgås fra nettet – dog i begrænset omfang. Enkelte fabrikanter kan også hente elpriser fra Nordpool mv. Systemerne er dog foreløbig proprietære og der er ikke åben adgang for 3. part.
- Varmepumpe-producenter er generelt positive over for overvågning af varmepumper og erfaringer med online opsamling af driftsdata kan være med til fremme fabrikanternes tilgang til aktiv styring som en del af fremtidens energisystem.

8 Flaskehalse i distributionsnettene

I dette kapitel analyseres, hvilke udfordringer der kan være i de lokale distributionsnet, hvis elforbruget øges markant og hvilke muligheder der er for at afhjælpe eventuelle flaskehalse. Der foreslås forskellige muligheder for tariffer og gennemgås en række problemstillinger. Der er analyseret to løsninger for et netområde i Midtjylland, hvor projektet har fået adgang til data. Yderligere uddybninger findes i to bilagsrapporter.

8.1 Fremtidige markeder og tarifstrukturer

I fremtiden kan efterspørgslen efter elektricitet i boligområder ændre sig dramatisk. Varmepumper kan introduceres i stort tal for at reducere olieforbrug og de individuelle varmeudgifter. Elbiler kan på samme måde reducere benzin- og dieselforbruget, og begge disse tendenser vil øge elforbruget. For eksempel anvender en typisk dansk husstand (uden elvarme) 4.000 kWh/år i dag. Det øges med 5.000-10.000 kWh/år, hvis en varmepumpe installeres, og med yderligere 2.000-3.000 kWh/år, hvis husstanden får en elbil.

De fleste små slutbrugere har i øjeblikket (2014) ikke variable elpriser, og har derfor ikke noget incitament til at regulere elforbruget i henhold til timepriser. Dette vil ændre sig, da det forventes, at fra marts 2016 vil slutbrugere kunne vælge at blive flexafregnet og dermed betale en timepris for elforbruget. (Parbo, 2014).

Varmepumper og elbiler kan potentielt skabe overbelastning af distributionsnettet. Disse kan navnlig overbelastes, hvis et stort antal enheder trække elektricitet på samme tid. Denne udfordring forstærkes når varmepumper (og andre fleksible enheder) reagerer på prissignaler. Økonomisk optimering af varmepumpestyring kan endda i nogle situationer resultere i et øget sammenfald af deres elforbrug. Prissignaler kan således føre til tab af mangfoldighed ved tænd og sluk af apparater.

Distributionsnettene i Danmark har forskellige historier, og i nogle tilfælde forventes overbelastning først at dukke op på mellempændingsnettet, mens det i andre net er lavspændingsnettet der potentielt kan blive kritisk. Overbelastning kan ske både i kablerne eller i transformerne. De fleste selskaber i Danmark fortæller, at de forventer at blive udfordret på deres 0,4 kV-nettet i forhold til den forventede stigning i forbruget fra elbiler og varmepumper. Det største netselskab i Danmark, Dong Eldistribution, rapporterer imidlertid, at de forventer udfordringer i 10 kV-nettet. De løsninger, der er analyseret i dette kapitel vil være relevante for begge spændingsniveauer.

For net, hvor der er potentielle problemer har netselskaberne hovedsageligt to muligheder⁴:

1. Øge netkapaciteten ved at investere i yderligere netinfrastruktur
2. Investere i priselastisk elforbrug dvs. Smart Grid værktøjer, der kan flytte og / eller reducere efterspørgslen

⁴ En tredje mulighed for DSOerne er at investere i og udnytte ekstra måleudstyr for at reducere sikkerhedsmarginer. Dette er muligt på baggrund af større viden om udnyttelse af kapaciteten i de lokale net.

I en undersøgelse, hvor de to ovennævnte muligheder blev undersøgt, blev det konkluderet, at i forhold til bare at investere i en udvidelse af transmissions- og distributionsnettene, vil der være besparelser på over 6 milliarder kroner ved at investere i Smart Grid-teknologier (Energinet.dk og Dansk Energi, 2010).

Hvordan fremtidige signaler fra DSO til forbrugeren vil fungere i praksis er en åben diskussion, da der er en række muligheder. Disse varierer med hensyn til geografiske omfang, timing, varsel, og prisniveau. Tabel 11 viser fire af de mest diskutererede muligheder.

	Time-of-use tariffer (TOU)	Kritisk peak pricing (CPP)	Variabel tarif	Dynamisk tarif
Advisering	Før spot			Efter spot
Aktivering	Ugentligt mønster uafhængigt af nødvendig aflastning	Aktiveres når relevant		
Timing af prisfastsættelse	Året inden	Året inden + dagen inden	Day ahead	Intra day
Tarif-karakteristikker	Tarif fastsat et år i forvejen	Fast lav og høj tariff for et år ad gangen. Meddelelse om anvendelse dagen før	Variabel tarif for hver time. Meddelelse om anvendelse dagen før	Variabel. Meddelelse om anvendelse op til driftstimen
Prisvariationer	Moderate	Typisk store variationer		
Fordele	Simpel at anvende. Kan afhjælpe aktivering af f.eks. manuel kontrol eller simpel timekontrol	Kan designes til at begrænse forbrugerens risiko, f.eks. med et maksimalt antal timer som høj pris kan aktiveres i	Mere fleksibel end CPP pga. timetariffer. Større incitament for forbrugerne	Kan anvendes hvis flaskehalse er opstået pga. levering af regulerkraft
Ulemper	TOU tariffer er generelle og er ikke rettet mod specifikke problemer	Mere kompleks Vil typisk kræve automatiseret kontrol		
Åbne spørgsmål		Risiko for netselskab?		Hvordan koordineres med spotmarkedet?
Geografisk afgrænsning	Fælles for DSO-området	Tarif for hele for hele DSO-området eller kun overbelastet net?		

Tabel 11: Sammenligning af forskellige typer af tariffer til håndtering af flaskehalse.

Som det ses i tabellen har de forskellige muligheder forskellige fordele. Derudover varierer de i investerings- og driftsomkostninger.

Vores foreløbige resultater indikerer, at der er en række problemstillinger:

- Det signal, der indikerer en potentiel overbelastning i distributionsnettene skal stamme fra netselskabet, og dette signal vil blive dirigeret til handelsselskabet / aggregator / balanceansvarlig, som vil sende det videre til slutbrugerne.
- Ideelt set bør signalet med nettatariffer blive sendt til alle slutbrugere (ikke kun varmepumper) i det overbelastede område (dvs. muligvis en brøkdel af DSO-området). Det er et åbent spørgsmål, hvor

detaljeret den geografiske skala i praksis bør være: Kan prissignaler udelukkende blive sendt til de slutbrugere, der bidrager til en overbelastet linje. Eller skal prissignal sendes til større områder?

- Simple time-of-use tariffer kan være et vigtigt første skridt i retning af dynamiske tariffer. Time-of-use takster kan motivere adfærdssændring, dvs. styring og kommunikation er ikke et krav. Det er ikke blevet analyseret i detaljer, hvor langt det er relevant at gå i retning af den ideelle dynamiske tarif. Mange praktiske aspekter kan føre til det resultat, at meget enkle løsninger, såsom time-of-use takster, vil blive foretrukket, især på kort til mellemlang sigt.
- Via anvendelse af de metoder, der allerede findes i dag, er betydelige investeringer i måleudstyr ikke nødvendige og netinvesteringer kan dermed reduceres. Netselskaberne kan bruge disse teknikker til at forudsige potentielle flaskehalse. Disse teknikker omfatter state estimators, laststrømme estimators, og andre metoder, der anvender en bred vifte af informationstyper. For eksempel besidder timeaflysninger en stor mængde information, der er særligt nyttig, når den kombineres med nettopologien.

Med hensyn til, hvordan slutbrugeren aktiveres, kan efterspørgslen styres af en computer i hvert hjem, der reagerer på et prissignal, der stammer fra DSO, eller det kan blive kontrolleret af et centraliseret system, f.eks. en virtuel kraftværk (VPP) setup. IFIV og READY-projekterne har påvist den praktiske udførelse af en VPP til at kontrollere varmepumper. VPP set-up er i fokus i dette projekt, men signaler fra DSO-erne kan sandsynligvis være brugbar i både indirekte og direkte løsninger.⁵

8.2 State estimation

Ovenstående afsnit beskrev potentielle set-ups og tarifordninger. En række af disse kræver dog, at DSOerne har kendskab til tilstanden i nettet med henblik på at sende det rigtige signal ud. State estimators bruger 'maximum likelihood'-metoder til at beregne tilstanden i nettet. Metoden kan bruge målinger af varierende kvalitet, bruge oplysninger af den fysiske topologi af nettet, og bruge profiler af forbrugergrupper til at beregne den mest sandsynlige tilstand af alle netelementer. State estimators anvendes ofte i relation til transmissionsnettet, men kan udvikles til distributionsnettene. Nogle DSO'er har allerede projekter, hvor denne metode udvikles. I et transmissionssystem er der tilstrækkelige målinger, mens målingerne i distributionssystemer normalt er meget sparsomme. Installation af nye timemålere vil dog ændre dette, da de kan give en række nye oplysninger.

8.3 State estimator og kontrolstrategier

For at illustrere potentialet ved en forenklet udgave af en state estimator har vi været heldige at få faktiske forbrugsdata fra Galten Elværk (GE Net A/S). Disse data blev anvendt til at analysere og sammenligne to styringsstrategier, nemlig en "kW max" og en VPP løsning.

Galten Elværk er et netselskab vest for Aarhus med 24.000 kunder. Nettet indeholder 638 km 10 kV og 899 km 0,4 kV distributionsnet - alt kabellagt. Samlet årligt forbrug i området i 2011 var 293 GWh. I 2011

⁵Denne antagelse må ses som et kompromis mellem den decentrale (indirekte) og den (direkte) centrale metode. Vi mener, at DSO'erne ikke bør vælge side denne diskussion. Ved at udsende et prissignal kan begge metoder anvendes. Og de kan konkurrere om slutbrugernes interesse. Eksempler på den central metode findes i Sundström and Binding (2012).

begyndte GE at udrulle intelligente målere til alle deres kunder. Galten Elværk er i stand til at læse alle målere med et varsel på 3-4 timer og en hit-rate på omkring 90 % af alle målere. Efter 7-8 timer stiger hit-raten til ca. 99,9%. Læsning af f.eks. 50 målere kan være afsluttet på 3-10 minutter med en hit-rate på 99,9%. Data er typisk timemålinger, men tidsintervallet kan være 5 minutter, hvis det er nødvendigt. I øjeblikket indsamles kun kWh/h data for hver måler, men målerne er i stand til at overføre flere informationer, f.eks. forbrug per fase og spænding (dog er faseid (L1, L2, L3) ikke synkroniseret for alle installationer). (Rasmussen, 2012 & 2013).

En interessant observation var det faktum, at ingen af de nævnte forbrugere havde deres maksimale elforbrug i den time, hvor der var det samlede maksimale forbrug.

Galten - kW max solution

En af de foranstaltninger, der ofte er nævnt som værende en potentiel mulighed for at reducere flaskehalse i distributionsnettene er en "kW max", som lægger en grænse for den mængde elektricitet en kunde kan trække på et givet tidspunkt. Den nuværende kontrakt tillader private slutbrugere i Danmark at trække 17 kW, andre brugergrupper har en højere grænse. For at teste effekten af en kW maksimumsgrænse blev forbrugsdata fra slutningen af juni 2011 til oktober 2012 fra station 52 i Galten-nettet analyseret.⁶

Station 52 består af 62 slutkunder med en samlet timebelastning på 113 kWh/h i den time af året med den højeste belastning. Af disse 62 slutbrugere er 40 almindelige enfamiliehuse uden varmepumper, elvarme eller solcelleanlæg, som tilsammen har en belastning på 48 kWh/h i timen, i timen med den højeste belastning. Desuden blev der opstillet et scenarie, hvor otte af de fyrrer huse i Galten fik en varmepumpe, og dermed blev deres daglige elforbrug øget i fyringssæsonen. Der blev anvendt data fra virkelige varmepumper opsamlet med StyrDinVarmepumpe styreboksene. Deres samlede kombinerede belastning i timen med den højeste belastning for det år blev derved øget fra 48 kWh til 70 kWh. I analysen blev en fiktiv maksimum kWh/h herefter sat ved disse 40 enheder for at se, hvordan det påvirker belastningerne på kabler og transformere under station 52.

Implementering af en kW-max-løsning på enfamiliehuse uden elvarme i et område som Galten viser, at den nuværende maksimale belastning (ca. 17 kW) skal være betydeligt lavere, før det vil have nogen mærkbar effekt på den maksimale efterspørgsel per time. Hvis otte af de fyrrer huse i Galten får en varmepumpe installeret, skal den maksimale tilladte belastning sættes ned til 6,0 kWh h. I denne situation er den årlige maksimale efterspørgsel reduceret med omkring 3 kWh/h (svarende til cirka 4,7 % af enfamiliehusenes forbrug). Desuden betyder det, at 25% af alle huse vil få deres forbrug reduceret i mindst en time i løbet af året som følge af den maksimale.

Galten - VPP

For at reducere den samlede efterspørgsel, er der analyseret en alternativ mulighed til ovenstående kW max grænse. Det er et virtuelt kraftværk (VPP), hvor slutbrugerne tillader en aggregator at styre en del af

⁶ Rådata for månederne marts til juni indeholdt ikke individuelle målinger og blev derfor ikke benyttet.

deres elforbrug. I praksis kan dette gennemføres enten via en indirekte (udsendelse af prissignaler til slutbrugere), eller en direkte kontrolstrategi (VPP). En førstegenerations-VPP vil sandsynligvis have tilladelse til at regulere særlige enheder i huset efter aftalte parametre. Ikke-varme relaterede enheder kan omfatte vaskemaskiner, tørretumblere, opvaskemaskiner, elektriske køretøjer, etc., som alle kan få deres elforbrug udskudt samtidig med at det vil resultere i ringe eller ingen nedgang i kundernes komfort. Ud over dette er der det varme-relaterede elforbrug, for eksempel fra køleskabe, frydere, varmepumper eller direkte elvarme, hvor elforbruget kan ændres med lidt eller ingen tab i kundernes komfort.

Data fra de førnævnte 40 Galtenforbrugere blev igen anvendt, denne gang til at simulere implementering af en VPP med det nuværende elforbrug og de samme otte huse med fiktive varmepumper. I praksis vil det elforbrug, som kan fremrykkes afhænge af en række faktorer herunder: Time på dagen, ugedag, årstid, vejr, og disse vil variere meget fra bruger til bruger. For nemheds skyld er det antaget, at i hvert af de 40 huse uden elvarme er 30% af elforbruget i hver time fleksibel, og det kan forskydes maksimalt 3 timer fremad. Desuden antages det, at 50% af det øgede elforbrug fra varmepumperne er fleksibel, og kan forskydes op til 3 timer. Med førnævnte begrænsninger var målet at minimere elforbruget i timen med den højeste samlede efterspørgsel.

Med elforbruget fra otte varmepumper bidrager VPP'en ved de 40 forbrugere med at reducere den maksimale systembelastning med mere end 15 kWh/h i den time, hvor der er maksimal samlet belastning.

8.4 Konklusion: kW max eller VPP

Analysen viser klart, at hvis en VPP kan flytte en bestemt efterspørgslen fremad, så er dette en signifikant bedre løsning end den, der involverer et maksimum kW. Desuden har VPP'en den ekstra fordel, at det ikke resulterer i tabt komfort for kunden på andre tidspunkter i løbet af året, som det er tilfældet med kW max-løsningen, som reducerer elforbruget i timer, hvor der ikke er behov for en reduktion. VPP-løsningen er dog ikke uden ulemper, da den kræver infrastruktur og kommunikationsteknologi for at fungere. Hvor store de nødvendige investeringer er i forhold til de omkostninger, der er forbundet med at skulle udvide kapaciteten af distributionssystemet, vil i sidste ende bestemme levedygtigheden af VPP-løsningen i lokale distributionsnet.

9 Forbrugeraccept

I dette kapitel gennemgås READY-projektets analyser af forbrugernes holdninger til Smart Grid-styring.

De private forbrugeres fordele af Smart Grid og virtuelle kraftværk (VPP) inkluderer automatisk læsning af deres elforbrug og dermed mulighed for forbedret feedback om elforbrug og en mulighed for at drage fordele af lave priser henover døgnet. Men de samfundsmæssige fordele er større, herunder mere effektive elmarkeder, øget forsyningssikkerhed og større integration af vedvarende energikilder i elsystemet. Analyser i READY-projektet peger på, at forbrugere opfatter, at der er risici i forbindelse med Smart Grid og VPP, såsom tab af komfort, krænkelser af privatlivet, øgede omkostninger, helbredsrisici, mindre fleksibilitet, og mere besvær.

Husstande, der allerede har en varmepumpe kan være velegnede til at bidrage til et elsystem, hvor slutbrugerne kan flytte en del af elforbruget og er med til at levere balancering i form af systemydelser.

For de fleste private forbrugere er VPP noget nyt og ukendt. Typisk bliver en sådan innovation først taget op af en lille gruppe mennesker, som opfatter de potentielle risici som mindre betydningsfulde end andre på grund af brugernes personlige forudsætninger, behov, ønsker og nysgerrighed. Dette segment af "early adopters" er vigtig for en innovationssucces, fordi de tester innovation og fungerer som opinionsledere, som potentielle senere adoptanter kan henvende sig til for at få råd og information, og dermed mindske deres usikkerhed. Ved at identificere kundegrupper, der sandsynligvis vil blive early adopters, kan kampagner målrettes mod disse segmenter i den tidlige fase af markedsindtrængningen, for større effekt.

Der eksisterer flere undersøgelser af forbrugernes opfattelse af intelligente målere, men få af intelligente målere og fjernstyring af forbrug. E-flex projektet fandt, at private forbrugere i stort omfang er villige til at lade deres varmepumper være eksternt regulerede. Vigtige incitamenter viste sig at være sparede udgifter og miljøhensyn samt interesse i ny teknologi. Andre undersøgelser har fundet, at deltagerne er villige til at tillade fjernstyring af deres husholdningsapparater, så længe dette ikke resulterer i tab af komfort (Ilic, Da Silva, Karnouskos, & Griesemer, 2012). Så vidt vi ved, er READY-projektet det første forsøg på at identificere et segment af sandsynlige early adopters af Smart Grid-teknologi med fjernstyring, en teknologi, der endnu ikke almindeligt tilgængelig på markedet.

Forbrugernes accept af at blive en aktiv del af Smart Grid i almindelighed og specifikt af en VPP er undersøgt i READY-projektet. Kvalitative interviews med deltagende husholdninger er anvendt til at få et rigt og selvstændigt billede af, hvilke motiver og barrierer forbrugerne opfatter, at der er for at blive en del af Smart Grid i almindelighed – for at blive en såkaldt "prosumer." Derudover undersøgte vi forbrugernes motivation og barrierer for at være en del af et "virtuelt kraftværk".

Kvalitative interviews i kombination med et kort spørgeskema blev brugt til at undersøge forskellene mellem tre grupper: Elforbrugere med et oliefyr (7 interviews), elforbrugere med en varmepumpe med Smart Grid-teknologi (10 interviews), og elforbrugere med en varmepumpe uden Smart Grid-teknologi (7 interviews). Interviewene blev gennemført med alle voksne (normalt mand og kone) i husstanden.

9.1 At blive en prosumer

At være en aktiv del af Smart Grid er nyt for de fleste nuværende elforbrugere. Derfor blev det undersøgt, hvem der er villig til at indtage sådan en aktiv rolle, og hvorfor? Baseret på innovationsadoptionsteori (Rogers, 2003) blev det undersøgt om forbrugere, der allerede bruger andre typer af ny energiteknologi, såsom en varmepumpe, er mere velvilligt indstillede til Smart Grid-teknologi end andre forbrugere. Til dette formål skelnes der mellem de tre nævnte elforbrugergrupper: Husstande med en oliefyr, husstande med en standard varmepumpe, og husstande med en varmepumpe, der er udstyret med Smart Grid-teknologi.

Det ser ud til, at mænd er mere innovative end kvinder, når det kommer til at tage Smart Grid teknologier i brug. Dette viste sig især i gruppen af husstande med en varmepumpe, der er forbundet til fjernstyring (her italesat som Smart Grid). Ibrugtagning af Smart Grid-teknologien synes også at være relateret til dens forenelighed med mændene i familiernes værdier og oplevede barrierer.

Ikke overraskende er én af de faktorer, der tilskynder elforbrugere til at blive en del af Smart Grid, økonomiske motiver. Elforbrugere, der forventer at spare penge og elektricitet ved at blive en del af Smart Grid, er mere tilbøjelige til at deltage. Ikke alle mener dog, at de vil drage økonomisk fordel af Smart Grid. Nogle er bekymrede for, at fleksible elpriser kan føre til en stigning i omkostningerne, og de er derfor tilbageholdende med at blive en del af Smart Grid.

Et andet motiv for at blive en del af Smart Grid er ønsket om at bidrage til samfundet. Mange af de adspurgte oplyste, at de er mere villige til at blive en del af Smart Grid, hvis det bidrager til at reducere den negative påvirkning på miljøet og hvis det giver et positivt bidrag til samfundet. Disse resultater er meget i tråd med resultater af en tidligere undersøgelse i tre lande (Broman Toft, Schuitema, & Thøgersen, 2014).

Når der henvises til barrierer for at blive en del af Smart Grid, nævnes ofte meget specifikke problemer og bekymringer. For eksempel er forbrugerne bekymrede for, at deres komfort vil falde eller teknologien ikke fungerer ordentligt. Det er typisk barrierer, der kan overvindes ved at give forbrugerne oplevelser med Smart Grid-teknologi. Et væsentligt resultat af denne undersøgelse er, at antallet af problemer, der er nævnt, er langt mindre i gruppen af interviewpersoner, der har mest erfaring med Smart Grid (dvs. forbrugere, der bor i en husstand med et varmepumper, som er forbundet til READY-styringen). Tilsyneladende bliver disse specifikke problemer mindre stærke eller mindre relevante, når man har levet med Smart Grid-teknologier.

9.2 Forbrugernes opfattelser af VPP

Et vigtigt tema i interviewene var at forstå forbrugernes motivationer og barrierer for at blive en del af et virtuelt kraftværk (Virtual Power Plant, VPP). Et første krav er, at forbrugerne forstår, hvad et VPP er. Interviewene afslørede tydeligt, at begrebet "virtuelt kraftværk" er problematisk. Forbrugerne har ikke nogen viden om og forstår ikke, hvad et VPP er. Det skal her bemærkes, at i interviewene blev et VPP beskrevet, snarere end nævnt som sådan. Beskrivelsen af et virtuelt kraftværk viste sig at være langt ud over den forståelse forbrugerne i dag har om Smart Grid og elsystemet i almindelighed.

Fordi forbrugerne ikke har nogen viden om og forståelse af, hvad en VPP er, er de forbeholdne over for at blive en del af en VPP. De nævner bekymringer, der ikke nødvendigvis afspejler virkeligheden for en VPP. For eksempel appellerer det ikke til de fleste forbrugere at være forbundet til andre husholdninger og

virksomheder. Desuden er et flertal ikke overbevist om, at det at være en del af et virtuelt kraftværk vil give dem økonomiske besparelser.

De tre forbrugergrupper, som blev interviewet, adskilte sig ikke m.h.t. deres opfattelser af en VPP. Modstanden var lige stærk i alle grupper. Dette er interessant, da én af grupperne faktisk var med i den VPP, der er indbygget i READY-projektet. Dette tyder på, at selv erfaringer med at være en del af en VPP ikke fører til ændrede opfattelser. En mulig forklaring kunne være, at disse forbrugere ikke var rigtig klar over, at de var en del af et virtuelt kraftværk. Undersøgelsen fandt visse indikationer på, at de nok var klar over, at deres varmepumpe blev reguleret, men ikke at de var en del af et virtuelt kraftværk.

Det rejser spørgsmålet om, hvorvidt der er behov for specifik kommunikation om virtuelle kraftværker. På den ene side kunne man vælge en strategi om ikke at kommunikere overhovedet om eksistensen af virtuelle kraftværker. Dette ville have den fordel, at man undgår at skulle forklare et kompliceret begreb. Og i princippet behøver forbrugerne ikke at være opmærksomme på, at de er en del af et VPP, så længe de accepterer fjernstyring af deres apparater.

På den anden side er der argumenter, der taler for kommunikation om virtuelle kraftværker til forbrugere. Et argument er, at hvis forbrugerne bliver opmærksomme på, at oplysninger holdes tilbage fra dem, kan det føre til modstand i sig selv. Hvis for eksempel institutioner eller NGO'er har indvendinger mod virtuelle kraftværker, og de beslutter at føre kampagne imod dem, vil forbrugerne sandsynligvis være mere modtagelige for negative oplysninger, hvis ikke de tidligere er blevet informeret om virtuelle kraftværker og deres formål.

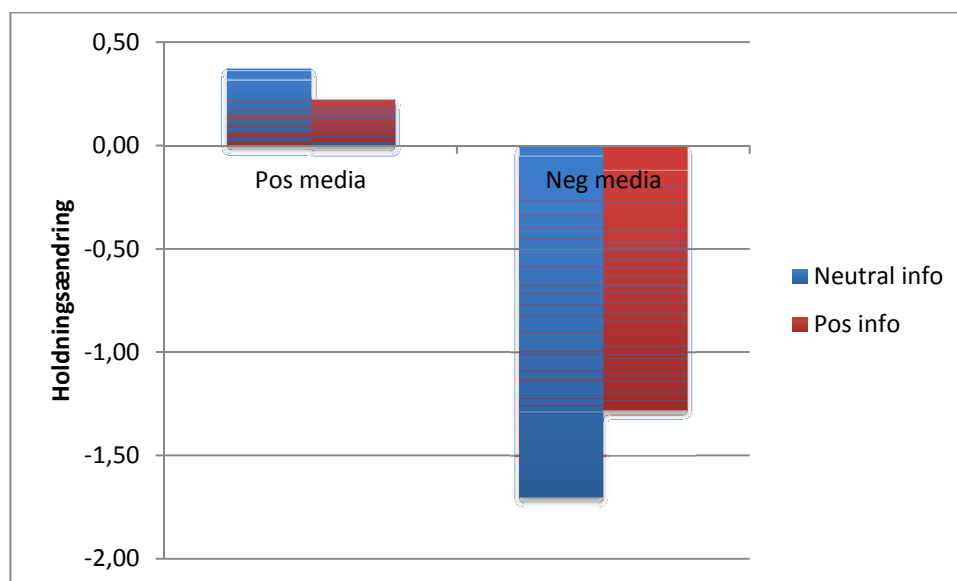
9.3 Test med studerende

Vi testede derfor effekten af forebyggende information på holdninger til VPP i tilfælde af negativ medieomtale. Vi opdelte forsøgsdeltagerne (i dette forsøg studerende på Aarhus Universitet) i fire grupper; hver af dem fik forskellige informationer om VPP i to trin. I første trin modtog den ene (randomiserede) halvdel af deltagerne en kort, neutral og faktuel beskrivelse af en VPP, mens den anden halvdel modtog positive, uddannende oplysninger om VPP, hvor fordele og ulemper blev beskrevet. Herefter blev bl.a. holdningen til at deltage i en VPP målt. I det andet trin, blev enten positive eller negative (fiktive) medieoplysninger givet til deltagerne (igen randomiseret), og igen blev holdningen til at deltage i et VPP målt.

Bemærk at begge grupper i forsøget blev informeret om VPP. Det blev gjort for ikke at skabe en for forskellig forsøgssituation, vel vidende, at det gør forskellen mellem grupperne mindre end i en situation, hvor den ene gruppe slet ingen information har fået.

Efter trin 1 (neutral vs positiv information) var der ingen forskel på deltagernes holdning til VPP. Hvilken type oplysninger (neutral vs positive) deltagerne havde modtaget i trin 1, gjorde imidlertid en forskel for, hvordan de efterfølgende reagerede på negativ medieomtale (se Figur 1). På y-aksen repræsenteres holdningsændringen: En positiv score betyder, at deltagerne blev mere positivt indstillede til en VPP efter medieomtalen, en negativ score betyder, at deltagernes holdning udviklede sig negativt. Resultaterne viser, at positiv medieomtale kun ændrede deltagernes holdning til VPP marginalt, uanset hvilken type information (neutral vs positiv) de havde modtaget inden første holdningsmåling. Negativ

medieoplysninger havde, som ventet, en negativ indflydelse på holdningen, men indflydelsen var mindre, hvis deltagerne havde fået positiv information om VPP i Trin 1. Dette tyder på, at grundig information om VPPs fordele for samfundet og den enkelte delvist "vaccinerer" folk mod negativ medieomtale: De får argumenter til at modsige den negative omtale. Disse resultater er foreløbige, da de er baserede på en stikprøve af studerende, men de er lovende og skal følges op i fremtidig forskning.



Figur 25: Ændringen i holdninger til virtuelle kraftværker som følge af positiv og negativ medieomtale opdelt på deltagere, som forinden har modtaget neutral/beskrivende hhv. positiv/uddannende information om virtuelle kraftværker. Holdningsskala fra 1 (meget negativ) til 7 (meget positiv). N=170. Interaktionen mellem type af information på forhånd og type af medieomtale er statistisk signifikant ($p < .05$, one-tailed).

10 Kommunikation til fremtidens varmepumpe

READY-projektet har sammen med tidligere projekter givet anledning til at få beskrevet en række informationer, der skal kunne udveksles mellem varmepumpe og eksterne enheder, i forbindelse med understøttelse af Smart Grid behov fra nettet.

Dette kapitel beskriver konteksten for disse anbefalinger i relation til kommunikationssnitfladen samt en generel beskrivelse af informationsmodellerne.

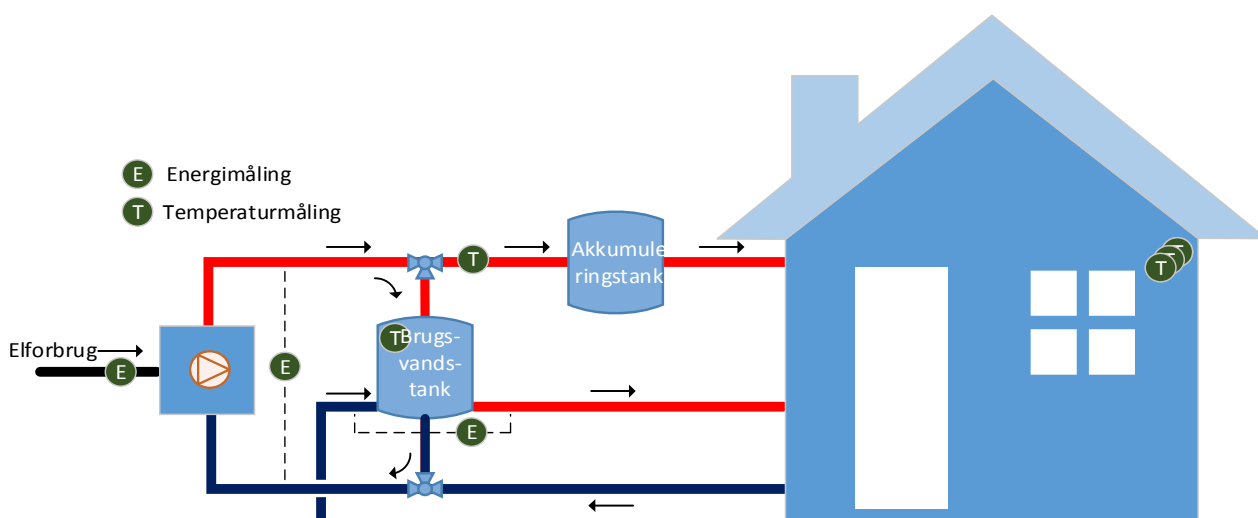
10.1 Beskrivelse af systemet

Varmepumpen kan opereres ud fra flere forskellige styringsstrategier.

Ønskes varmepumpen f.eks. udelukkende anvendt til at levere "simple" Smart Grid ydelser, som f.eks. at undgå spidslastperioder, er det måske nok at kunne starte og stoppe pumpen og yderligere at monitorere rumtemperaturen, for at undgå der bliver for koldt i huset.

En anden styrestrategi baserer sig på modeller af husets energibehov samt vejrprognoser. Herved kan der opstilles en prognose for husets varmeefterspørgsel og fleksibilitet, der så kan bruges til at tilrettelægge varmepumpedriften ud fra f.eks. billigste el-/varmepris eller til at tilrettelægge en driftsplan, der minimerer bygningens energiforbrug. Yderligere vil der kunne leveres en forbedret prognosekonfidens omkring leverance af hurtige ydelser til grid support. De mange måledata, som informationsmodellen beskriver, vil yderligere kunne bruges til at lave beregninger og vise information for den enkelte bygningsejer omkring klimaskærm, såsom varmetab og varmekapacitet.

Det er ikke nødvendigt, at varmepumpen stiller samtlige parametre til rådighed, men færre parametre begrænser selvsagt mulighederne for forretningsmodeller, som varmepumpen vil kunne indgå i.



Figur 26: Blokdigram for det system som varmepumpen indgår i med placering af de forskellige sensorer.

Systemet, som varmepumpen indgår i, er illustreret i figuren, som er den model, langt de fleste varmepumpeinstallationer er opbygget efter. Varmepumpen (yderst til venstre) anvender el til at producere varme. Varmen leveres enten til bygningen, via en serieforbunden akkumuleringsstank, eller

direkte til brugsvandstanken. Normalt prioriterer varmepumpen produktion af brugsvand, hvis enten tanktemperaturen falder til et specificeret niveau eller hvis der tappes varmt vand fra tanken. Akkumuleringsstanken installeres ikke som standard, men det vurderes fra installation til installation om en sådan er nødvendig. Tanken tjener i Smart Grid opstillingen til to formål. Dels fungerer den som buffer mellem On/Off varmepumpen og bygningen, for at begrænse antallet af start/stop, dels fungerer den i Smart Grid setuppet som en del af bygningens varmekapacitet.

De grønne boblesignaturer indikerer placeringen af hhv. energi- (E) eller temperaturmålingssensorer (T).

Der er placeret Energimålere efter varmepumpen og henover brugsvandstanken. Disse anvendes til at afgøre hvor meget energi, der produceres og afgives til hhv. brugsvandsproduktion samt afsættes i bygning samt akkumuleringsstank, samt energien af brugsvandet, der sendes ud i huset. Dernæst er der behov for målinger af varmfremløbet, samt temperaturen i brugsvandstanken. Sidstnævnte måling er vigtig, for at kunne give en grov indikation af tankens tilstand, hvis f.eks. varmepumpen har været stoppet et stykke tid.

Der er minimum behov for at måle rumtemperaturen i ét centralt rum i bygningen, der er repræsentativ for hele bygningens tilstand. Er der store forskelle til temperaturer rundt i bygningen, bør der anvendes flere sensorer.

10.2 Signalliste

Udover de sensorer, hvis placering, der er beskrevet i foregående afsnit, er der behov for en række andre signaler, der er vist i figur 27 herunder. Signalerne er ordnet under overskrifterne Setup, Control, Status, Measurements samt Basic Data i henhold til hvad IEC61850 foreskriver.

Som tidligere nævnt, vil det ikke nødvendigvis være et krav, at varmepumpen understøtter samtlige signaler, dette afhænger hvilken styringsstrategi varmepumpen ønskes at indgå i. Ønskes f.eks. en simpel styring, hvor varmepumpen kan standses eller startes i kortere perioder, som i nogle tilfælde vil være tilstrækkeligt for at opnå en simpel Smart Grid styring, behøver pumpen ikke at understøtte de resterende signaler. Dog kan det være en god idé, at kunne måle eleffekten på varmepumpen, for at kunne dokumentere, at pumpen har reageret, samt at måle rumtemperaturen i bygningen, for at undgå at genere beboerne unødigt.

Ønskes derimod en mere avanceret styring, som er anvendt i READY⁷ projektet, vil det være nødvendigt, at pumpen understøtter den fulde signalliste.

Betydningen af de enkelte signaler er uddybet i det følgende. Ønskes en mere detaljeret gennemgang, henvises til informationsmodellen⁸, placeret i eksternt dokument.

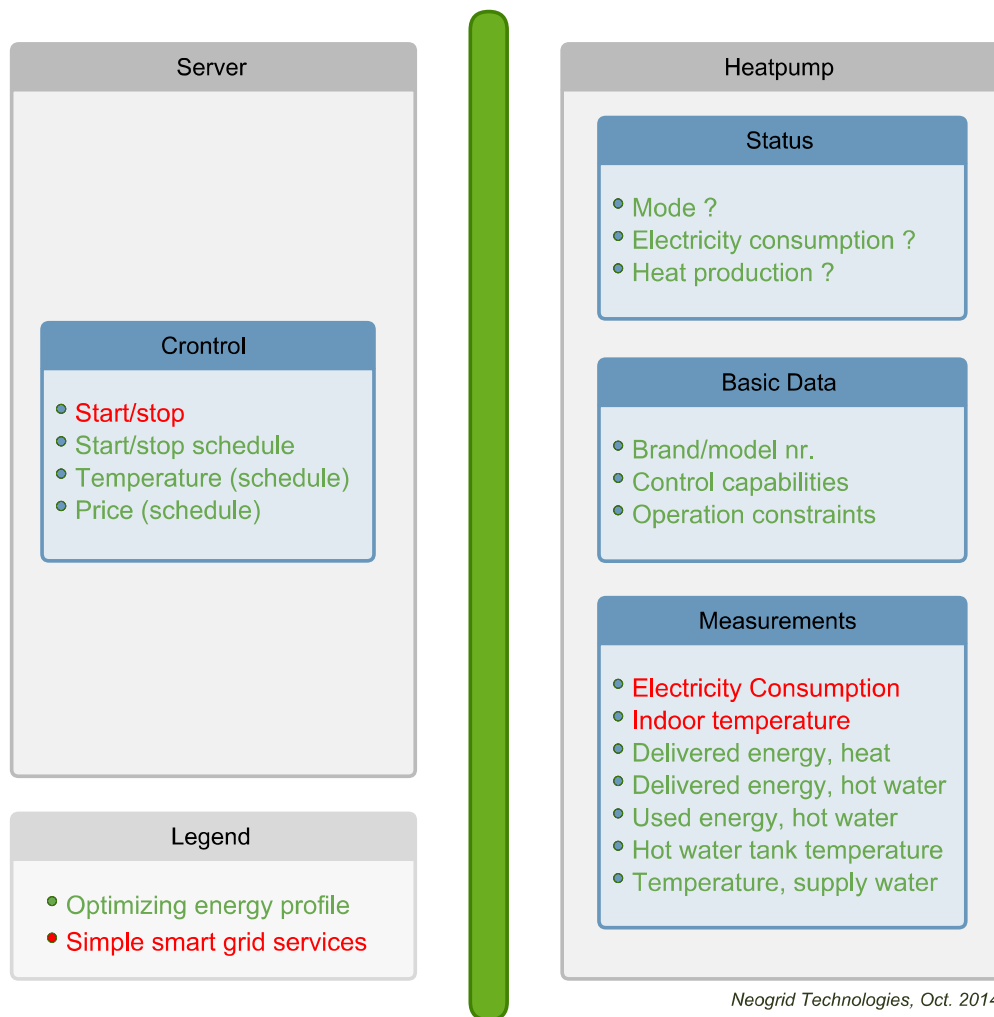
⁷ ForskEl – Smart Grid Ready Heat Pump VPP Controller

⁸ Informationsmodel_v1.3.pdf

Basic Data

Basic data, er general information omkring varmepumpen, der normalt vil kunne findes i bruger- eller servicemanualen. Men interfaces der til mange forskellige varmepumper, vil det lette forretningsgangen, hvis disse data kan tilvejebringes elektronisk.

Control capabilities fortæller, hvordan varmepumpen kan styres, f.eks. kan varmekurven ændres eller understøtter den kun start/stop signaler. Operation constraints specificerer hvor længe varmepumpen skal holde pause efter den er blevet standset før den startes igen. Yderligere beskrives også, hvis der er krav til at pumpen minimum skal køre ét specifikt tidsrum, når den er startet.



Figur 27: Navneliste over signaler til og fra varmepumpen. Farveangivelser angiver signaler nødvendig for henholdsvis fuld og begrænset funktionalitet.

Status

Statussignalerne lever aktuelle informationer omkring nuværende elforbrug eller varmeproduktion, om styringen har blokeret varmepumpen, samt om husejeren har slået styringen fra.

Measurements

Målingerne specificeret her, er historiske målinger med fast interval, kan hentes ud af pumpen.

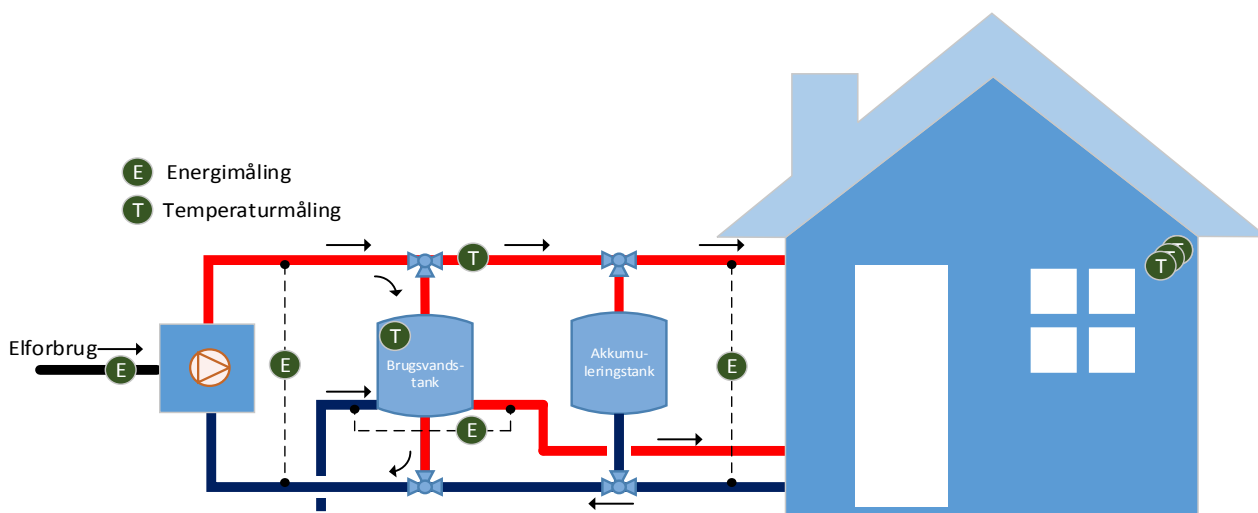
Control

Denne gruppe specificerer de signaler, der anvendes til ekstern styring af varmepumpen. Signalerne udover Start/stop, er ment som indirekte måder at kontrollere om varmepumpen skal starte eller stoppe. Fordelen er, at varmepumpen ved f.eks. temperatur- eller prissignalet, selv afgør om den skal køre ud fra de komfortkrav der er til bygningen, men omvendt så er sikkerheden for en øjeblikkelig reaktion mindre.

Temperatursignalet referer i varmepumpen til en varmekurveforskydning, der igen ændrer fremløbstemperaturen i systemet.

10.3 Videre arbejde med kommunikation til varmepumper

Der har I projektet været diskuteret hvorvidt det skal være muligt at styre om, varmepumpen producerer til varme eller til varmt brugsvand, samt om akkumulerings tanken skal placeres parallelt i installationen, for også at kunne styre om varmepumpen producerer til varmelager (akkumulerings tank) eller varmen leveres til bygningen. Kan sidstnævnte styres, vil det også være muligt at afbryde varmeproduktionen og samtidig levere varme til bygningen via akkumulerings tanken.



Figur 28: Blokdigram for system med paralleltforbundet akkumulerings tank.

Placeringen af varmeakkumulerings tanken parallelt, som vist i figur 28, giver en ekstra frihedsgrad i forbindelse med at anvende installationen til SmartGrid services. Styringen til dette setup vil kræve flere startsignaler, eller at yderligere signaler:

1. Producer til brugsvandstank
2. Producer til akkumulerings tank alene
3. Producer til direkte til bygning
4. Standser varmepumpen og sender varme fra akkumulerings tank til bygning

I skrivende stund forfølges denne strategi ikke yderligere, men vil være en del af videre dialoger med varmepumpeproducenterne.

10.4 Status på arbejdet omkring standardisering

Informationsmodellen, der er udviklet i IFIV projektet og videre modnet i READY-projektet, danner grundlag for det videre standardiseringsarbejde, der har foregået i projektet Styr Din Varmepumpe version 2 (SDVPv2) og videre i HPCOM projektet.

Der er stadig issues, der skal koordineres og verificeres med varmepumpeproducenterne. Udfordringen i det arbejde, der indtil nu er foretaget er, at ønsket om en standardiseret kommunikation til varmepumper primært ligger hos eksterne aktører (Elbranchen og Aggregatorer), der ønsker et eksternt interface til at kontrollere driften af varmepumpen. Varmepumpeproducenterne selv har indtil nu ikke set behovet for et sådan interface, idet det ikke umiddelbart er en feature, der giver et yderligere salg. Kommer der på et senere tidspunkt en efterspørgsel på dette område, vurderes det, at producenterne vil begynde at åbne op her.

Enkelte større varmepumpeproducenter er i gang med at udvikle egne cloud-løsninger, der samler data op fra varmepumper og præsenterer disse data via App's rettet mod den enkelte forbruger. Yderligere giver det også forbrugerne mulighed for at starte og stoppe varmepumpen og i nogle tilfælde også at ændre indstillinger i varmepumpen.

Udfordringen i disse initiativer er, at der udvikles proprietære løsninger omkring lukkede proprietære økosystemer, men hvor en dataudveksling mellem eksterne aktører kan muliggøres, da enkelte dele af informationsmodellen er understøttet.

Yderligere fokuserer producenterne meget mod det tyske marked, hvor varmepumpefabrikantforeningen har udviklet deres egen forskrift⁹, hvor varmepumpen via to eksterne relæindgange kan styres i forskellige start- og stopmodes.

Styr Din varmepumpe version 2

Fælles for ovenstående initiativer er, at det fysiske kommunikations-lag og –protokol er forskellige. Derfor er der i projektet SDVPv2, bl.a. blevet arbejdet på at implementere og teste næste generations kommunikationsprotokol for små-skala Smart Grid enheder sammen med den informationsmodel beskrevet her. Formålet med dette er at stille et standardiseret kommunikationsinterface til rådighed for aktørerne på varmepumpeplatformen¹⁰ samt for resten af varmepumpebranchen.

Protokollen er baseret på XMPP, som begynder at vinde fodfæste hos større amerikanske aggregatorer så som EnerNoc, Bosch og andre. XMPP er én af flere kandidater til næste generation af protokoller, der kan anvendes til at kontrollere systemer med mange enheder, modsat de kommercielle protokoller, der anvendes i dag til Smart Grid komponenter.

⁹ http://www.waermepumpe.de/...Ready_Regularien_Version1.1.pdf

¹⁰ www.iesamba.dk

HPCOM

Det videre arbejde med at samle og kommunikere arbejdet omkring standardiseret kommunikation til varmepumper, bliver videreført i projektet HPCOM, som parterne bag ovenstående arbejde netop har modtaget bevilling til.

HPCOM har til formål at styrke udvikling og implementering af informations- og datakommunikations-teknologi og infrastruktur på varmepumpeområdet, ved at fokusere på standardisering, testmiljøer samt udarbejdelse af FU&D strategi og roadmap for IKT på varmepumpeområdet. Formålet med indsatsen på disse tre områder er at styrke den danske innovation og udvikling af IKT for varmepumper og Smart Grid.

11 Konklusion

De mulige potentialer ved spotprisoptimering og regulerkraft er undersøgt baseret på markedsdata fra 2008 og til nu for DK1. Resultatet er, at potentialerne ved spotprisoptimering er mellem 15 og 20 % på elprisen alene. Desuden er der yderligere mulighed for en gevinst af tilsvarende størrelse i regulerkraft-markedet. Specielt omkring regulerkraftdelen knytter der sig dog mange forudsætninger, som bl.a. at puljen bliver aktiveret jævnlige når der bydes ind.

Den tilgængelig måleplatform omkring varmepumperne i projektet er kort beskrevet i kapitel 3. Her gives en kort introduktion til, hvilke data der er tilgængelige, samt hvordan de måles. Der er opstillet en husmodel som beskriver sammenhængen mellem indendørstemperaturen og effekt fra varmepumpen, vejrdata og husparametre. Modellens orden er bestemt og parametrene er forsøgt bestemt ud fra målinger på seks forskellige huse. De dynamiske parametre er vanskelige at bestemme i beboede huse, da den eksisterende varmepumperegulator holder indendørstemperaturen næsten konstant og beboerne giver anledning til store forstyrrelser fra f.eks. brændeovn, åbne/lukke vinduer og døre og oven.

For at kunne købe billigt ind på spotmarkedet er der anvendt model prædiktiv kontrol (MPC). Der er opstillet en performancefunktion som på baggrund af husmodellen, spotprisprognoser og vejrdata fra DMI har været anvendt til at estimere og prisoptimere energiforbruget 36 timer frem i tid. Algoritmen har gjort det muligt at planlægge større energiforbrug på tidspunkter med lav energipris. Det er testet ved simulering og på beboede enfamiliehuse, at det optimerede energiindkøb kan dække det enkelte hus' varmebehov i driftsdøgnet. Testen viser, at energiforbruget kan flyttes og energiplanen kan holdes, dog kan forstyrrelser fra beboerne og vejrskift medfører, at det ikke altid er muligt at anvende præcist den indkøbte energi, hvis komforten i huset skal overholdes.

I en større samling huse ses det, at forstyrrelserne fra beboerne i stor udstrækning er uafhængige, derfor antages det, at forstyrrelserne fra enkelthuse kompenserer hinanden. Der er udviklet et kontrolkoncept, hvor en samling af huse skal overholde en samlet energiplan. Kontrolsystemet er en skeduleringsalgoritme som sikrer, at den samlede energiplan holdes samtidigt med, at temperaturen i alle huse er indenfor komfortgrænserne og varmepumpernes driftsbetingelser overholdes.

Indendørstemperaturen i husene må variere indenfor komfortgrænser, derfor repræsenterer forskellen på den aktuelle temperatur og grænsetemperaturen i komfortbåndet et energilager. Lageret kan anvendes til intern balancering hos BRP eller på regulerkraftmarkedet. De enkelte varmepumpers driftstilstand bestemmer, hvor meget energi der aktuelt kan udløses. Der er udviklet en algoritme som optimerer den mængde energi som kan udløses til balancering.

De tre overordnede styringsprincipper: Individuel modellering og styring, puljemodellering og styring samt prissignalstyring er analyseret og sammenlignet.

Forskellige budstrategier for en puljes anvendelse på regulerkraftmarkedet er analyseret og den konservative budstrategi er afprøvet. Her bydes der ind således at de tilsluttede huses komfort overholdes uanset om regulerkraft aktiveres eller ej.

De forskellige styringsstyringsbegrænsninger ved puljen er analyseret. Den væsentligste udfordring er den manglende tvangsstart. Det betyder bl.a. at puljens dynamik er reduceret til ca. 50 % af nominel effekt. Ligeledes er dynamikken i bunden begrænset til mindst 15% i spidslasttimerne for at sikre, at der altid er varmt vand.

Der er udviklet en VPP Controller, som styrer en pulje af huse med henblik på laveste mulige eludgift. VPP Controlleren er koblet op til Neas Energy, hvortil der indmeldes en samlet plan, som der styres efter. Det har været mulig i november måned 2014 at opnå en besparelse på den rå eludgift på 13 %. Der er ligeledes hver time indmeldt et opregulerings- og nedreguleringsbud (mængde og pris). Når Neas er blevet aktiveret i regulerkraftmarkedet er puljen også blevet aktiveret. Der har været under 20 aktiveringer i november og derfor er potentialet noget usikkert, men er helt klart værd at gå efter, da det er en naturlig funktionalitet for puljen. Det er således demonstreret i praksis, at det er muligt at lade en server håndtere et stort antal varmepumper, som kan bydes ind på elmarkederne. Når de næste generations varmepumper som kan tvangsstartes og hvor brugsvandsopvarmningen kan styres uafhængig af varmeproduktionen kommer på markedet vil det være oplagt at udnytte fleksibiliteten fra de tilsluttede huse.

I projektet er der lavet analyser af forskellige parametres betydning for Smart Grid-ready drift, som input til fremtidige retningslinjer for varmepumpeinstallationer. Til analyserne er der udarbejdet en model i programmet EnergyPRO, som er et software der ofte anvendes til at analysere driftsmønstre af enkelte værker. Modellen simulerer varmepumpens drifts time for time over hele året. Der tages udgangspunkt i et standardhus og at varmepumpen afregnes til timespotpris, 2011 priser. Det antages, at der tages et lån til at tilbagebetale investeringen i varmepumpe og buffertank.

I den første analyse er hensigten at analysere, om det kan betale sig at investere i en større varmepumpe eller en akkumuleringstank for i højere grad at kunne udnytte timer med lave elpriser. Der er analyseret to varmepumper med effekter på henholdsvis 1,67 og 2,07 kW_{el}, samt to størrelser buffertanke på henholdsvis 500 og 800 liter. Det viser sig, at afdraget ved at investere i en større varmepumpe og buffertank er højere end den besparelse på der opnås på driftsomkostningerne.

I den anden analyse er gulvvarme (akkumulering i bygning) sammenlignet med radiatorvarme og akkumulering i buffertank. Derudover er 2 x spotprisen anvendt for at analysere, hvordan en større variation i spotpriser influerer projektets økonomi. Fremløbstemperaturen ved gulvvarme er lavere end ved radiatorvarme, hvilket resulterer i en bedre COP-faktor for varmepumpen. Det resulterer i lavere driftsomkostninger ved gulvvarme end ved radiatorvarme.

Til sidst er det analyseret, om det kan betale sig at investere i et solfangeranlæg til at supplere varmepumpen. I denne analyse er der også anvendt 2 x spotpriser for at simulere en større variation i priserne. Ved at investere i solfangeranlægget opnås der en driftsbesparelse, men besparelsen er over 1.000 kr. lavere end afdraget på investeringen. Solfangeranlægget reducerer elforbruget, men primært om sommeren, hvor elprisen ofte er lavere end i vintermånederne.

På baggrund af analyserne kan konkluderes, at det ikke er rentabelt at investere i større varmepumpe, akkumuleringstank eller solvarmeanlæg i forhold til de besparelser der kan opnås i spotmarkedet og den nuværende afgiftsstruktur, der er fast i alle timer.

I projektet er forbrugernes holdninger og accept af styring af deres varmepumpe undersøgt. I første omgang blev der foretaget kvalitative interviews med 24 husholdninger i tre forskellige grupper: Nogle med oliefyr, og nogle med varmepumpe hhv. med og uden fjernstyring.

Konklusionen ud fra interviewene er, at elforbrugere der forventer en økonomisk gevinst er mere tilbøjelige til at deltage i styring af forbruget. Nogle mener dog, at de ikke vil drage økonomisk fordel af Smart Grid. Andre er sågar bekymrede for, at fleksible elpriser kan føre til en stigning i omkostningerne, og de er derfor tilbageholdende med at blive en del af Smart Grid. Disse forbrugere er bekymrede for, at deres komfort vil falde eller teknologien ikke fungerer ordentligt. De interviewpersoner, der allerede har været en del af READYS fjernstyringsforsøg er dog lagt mere positive. Det ser således ud til, at barrierer overfor "Smart Grid" kan overvindes ved at forbrugerne lever med teknologien og oplever, at den fungerer.

Ikke overraskende er det, at forbrugerne ikke har nogen viden om og forståelse af, hvad en VPP eller Smart Grid er. Samtidigt var det vanskeligt for dem, også selv om de fik det forklaret. Selv de forbrugere, der var tilfredse med, at deres varmepumpe er fjernstyret, var ikke klar over, at de er en del af "et virtuelt kraftværk". Dette begreb skal ikke anvendes, men der skal findes et andet mere forståeligt begreb.

Der er argumenter både for og imod at informere forbrugerne om de er en del af et virtuelt kraftværk. Effekten af forebyggende information blev undersøgt. Deltagere i et forsøg (170 studerende ved Aarhus Universitet) fik enten neutral eller positiv information om VPP og herefter blev effekten af enten negative eller positive medieoplysninger givet og deres holdninger blev efterfølgende målt. Hvilken type oplysninger (neutral vs positive) deltagerne havde modtaget i Trin 1, gjorde en forskel for, hvordan de reagerede på negativ medieomtale. Det tyder således på, at grundig information om VPPs fordele for samfundet og den enkelte delvist "vaccinerer" folk mod negativ medieomtale, formodentlig fordi de får argumenter til at modsige den negative omtale. Disse resultater er foreløbige, da de er baserede på en stikprøve af studerende, men de er lovende og skal følges op i fremtidig forskning.

Rapporten indeholder til slut et kapitel der beskriver det igangværende standardiseringsarbejde, som projektet har deltaget i frem mod en Smart Grid Ready varmepumpe. Det indebærer en informationsmodel med hvilken information, der kommer ud af varmepumpen samt hvilke styringsmuligheder der bør findes.

Appendiks A: Dissiminering

READY papers

Broman-Toft, M. Consumer motivation for becoming a prosumer in the Smart Grid, a qualitative study. *International Journal of Consumer Studies (targeted journal), working paper.*

Broman-Toft, M., Schuitema, G., & Thøgersen, J., (2013), Vil du deltage i fremtidens intelligente elsystemet? (Do you want to participate in the electricity system of the future?). Poster presented at the Festival of Research, Aarhus University, Denmark.

Broman-Toft, M. (Forthcoming). Exploring private consumers' willingness to adopt an active role in the Smart Grid. Paper to be presented at 28th International Conference of Applied Psychology, Paris, France.

Schuitema, G., Broman-Toft, M., & Thøgersen, J., (2013), IMPROSUME & READY: Aims, results and challenges. Workshop følgegruppemøde for brugerinddragelse, Energinet.dk, Fredericia, Denmark.

Broman-Toft, M., Schuitema, G., Thøgersen, J., & Grønhøj, A. (2013). Exploring the prosumers role in the Smart Grid. Poster presented at the 10th Biennial Conference on Environmental Psychology, Magdeburg, Germany.

Broman-Toft, M., Schuitema, G., & Thøgersen, J., (2013). El-forbrugernes forventninger til fremtidens el-system og styring af varmepumper. Styring af varmepumpe møde med deltagerne, Aalborg, 25 november 2013.

Broman-Toft, M., Schuitema, G., & Thøgersen, J., (2013). El-forbrugernes forventninger til fremtidens el-system og styring af varmepumper. Styring af varmepumpe møde med deltagerne, København, 28 november 2013.

K. M. Nielsen, P. Andersen, T. S. Pedersen, 'Aggregated Control of Domestic Heat Pumps'. 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Hyderabad, India, August 28-30, 2013. (Peer reviewed publication)

Benjamin Biegel, Palle Andersen, Tom S. Pedersen, Kirsten Mølgaard Nielsen, Jakob Stoustrup, Lars Henrik Hansen, 'Smart Grid Dispatch Strategy for ON/OFF Demand-Side Devices'. 2013 European Control Conference (ECC), July 17-19, 2013, Zürich, Switzerland. (Peer reviewed publication)

Benjamin Biegel, Palle Andersen, Tom S. Pedersen, Kirsten Mølgaard Nielsen, Jakob Stoustrup, Lars Henrik Hansen, 'Electricity Market Optimization of Heat Pump Portfolio'. 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Hyderabad, India, August 28-30, 2013. (Peer reviewed publication)

Benjamin Biegel, Palle Andersen, Jakob Stoustrup, Mathias Bækdal Madsen, Lars Henrik Hansen, Lotte Holmberg Rasmussen, 'Aggregation and Control of Flexible Consumers – A Real Life Demonstration', 19th

World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014 (Peer reviewed publication)

Palle Andersen, Tom S. Pedersen and Kirsten M. Nielsen, 'An Investigation of Energy Storage

Possibilities in Single Family Houses for Smart Grid Purposes', 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014 (Peer reviewed publication)

Tom S. Pedersen, Kirsten M. Nielsen and Palle Andersen, 'Maximizing Storage Flexibility in an Aggregated Heat Pump Portfolio'. 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2014), 8 - 10 October 2014 Antibes/Nice (Peer reviewed publication)

Kirsten M. Nielsen, Palle Andersen and Tom S. Pedersen, 'Analysis of the Storage Capacity in an Aggregated Heat Pump Portfolio'. submitted (Peer reviewed publication)

READY reports

Ea Energy Analyses: READY - English Summary report – Focus on markets and grid congestion

Ea Energy Analyses and Neas Energy: READY - Managing congestions in distribution grids - Market design considerations - WP2 REPORT 1

Ea Energy Analyses and Neas Energy: READY - Congestion in distribution grids - DSO option for congestion management - WP2 Report 2

Neas Energy: READY - Intelligent styring af varmepumper i elmarkeder

Neogrid Technologies: READY - Bilagsrapport VPP styring

PlanEnergi: READY - Varmepumpeinstallationer i Smart Grid - Undersøgelser og anbefalinger

Appendiks B: Deltagere i READY-projektet

Partner	Deltagere	Kontakt
Neas Energy		Skelagervej 1 9000 Aalborg CVR: 20293195
Projektleder	Lotte Holmberg Rasmussen	lhr@neasenergy.com, 40 56 36 07
	Lasse Helleskov Ravn	lra@neasenergy.com, 61 65 02 18
	Anders Borup	abo@neasenergy.com, 21 71 59 31
Administration	Mia Karup Ladefoged	mkl@neas.dk, 99 39 58 15 / 41 31 78 16
Neogrid Technologies ApS		Niels Jernes Vej 10 DK-9220 Aalborg Øst CVR: 32773818
	Per Dahlgaard Pedersen	pdp@neogrid.dk, 30 65 47 10
	Henrik Lund Stærmose	hls@neogrid.dk, 30 65 46 61
	Esben Holm	esh@neogrid.dk
Aalborg Universitet	Department of Electronic Systems Section: Automation & Control	Aalborg Universitet Fredrik Bajers vej 7C 9220 Aalborg Ø SE : 29102384
	Kirsten Mølgaard Nielsen	kmn@es.aau.dk, 99 40 87 61
	Palle Andersen	pa@es.aau.dk, 99 40 87 42
	Tom Søndergaard Pedersen	tom@es.aau.dk, 99 40 87 36
PlanEnergi		Jyllandsgade 1 9520 Skørping
	Jakob Worm	jw@planenergi.dk, 29 72 68 45
	Morten Vang Jensen	mvj@planenergi.dk 96 82 04 08
Ea Energianalyse		Frederiksholms Kanal 4, 3.th 1220 København K
	Mikael Togeby	mt@eaea.dk, 60 39 17 07
	Christian Bang	cb@eaea.dk, 60 39 17 17
	Rune Brus	br@eaea.dk, 31 47 31 72
Aarhus Universitet	Department of Business Administration	Haslegårdsvej 10 8210 Aarhus V
	Madeleine Broman Toft	matoft@badm.au.dk, 87 16 54 06
	Geertje Schuitema	g.schuitema@asb.dk
	John Thøgersen	jbt@badm.au.dk, 87 16 50 08