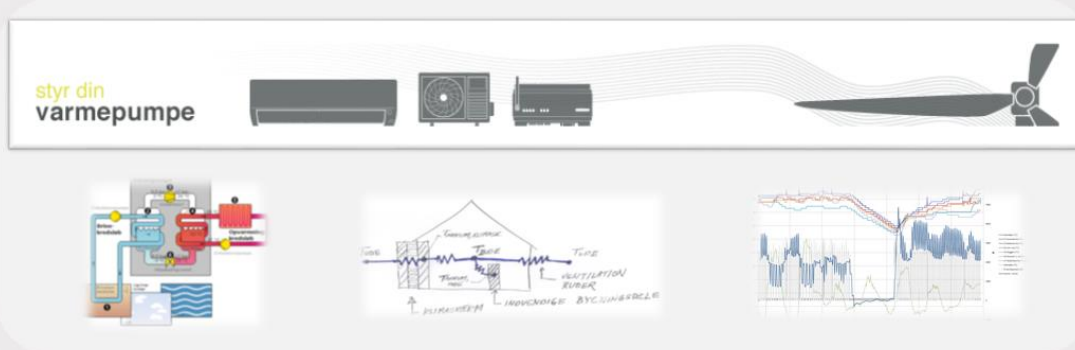


Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem

“VAFE”



Slutrapport

PSO ForskEl projekt nr. 2010-1-10490

Juni 2015

Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem

“VAFE”

Slutrapport

Søren Poulsen

Lars Olsen

Køle- og Varmepumpeteknik

Teknologisk Institut

Juni 2015

Forord

Rapporten afslutter ForskEl-projekt nr. 2010-1-10490 "Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem" (VAFE).

Projektets budget har været på 7,6 mio. kr. Projektet har modtaget en støtte på 3,3 mio. kr. fra PSO ForskEl-puljen, administreret af Energinet.dk.

Projektet er blevet gennemført i samarbejde med projekterne "Fra Vindkraft til Varmepumper" ledet af Energinet.dk og ForskEL 10469 - 2010 projektet "Intelligent Fjernstyring af Individuelle Varmepumper" (IFIV) ledet af Nordjysk Elhandel (NEAS). Energinet.dk har koordineret projekterne under den fælles titel "Styr Din Varmepumpe" (SDVP). I forbindelse med projekterne er oprettet en hjemmeside med adressen www.styrdinvarmepumpe.dk.

Projekternes overordnede mål er at bidrage til udvikling af intelligent styring af individuelle varmepumper. Dette vil kunne øge andelen af el fra vindmøller og bidrage med fleksibilitet i elforsyningssystemet, hvilket der vil blive stadig større behov for i takt med vindkraftens voksende andel af elproduktionen pga. vindkraftens fluktuerende natur.

Fleksibiliteten bygger på idéen om, at husenes varmelager i vandbeholdere og bygningskonstruktion muliggør tidsforskydning af varmepumpedriften og dermed elforbruget i et vist omfang uden at kompromittere beboernes komfort. Varmepumperne kan blive et væsentligt aktiv i et Smart Grid.

I SDVP er etableret en demonstrations- og testplatform for varmepumper, hvor varme anlæg i ca. 300 huse kan fjernovervåges og -styres ud fra signaler fra elforsyningen og fra lokale vejrprognoser.

Energinet.dk har stået for etablering af demonstrations- og testplatformen. Stamdata for varmepumpeinstallationerne er indhentet fra spørgeskemaer til varmepumpeejerne. En open-source styre- og dataopsamlingsboks er udviklet og installeret i installationerne sammen med et antal målesensorer. En serverløsning til opsamling af måledata, indhentning af vejrprognoser og elpris-signaler samt til transmission af fjernstyresignaler fra eksterne aktører er udviklet. Måledata præsenteres online grafisk i fuld tidsopløsning på www.styrdinvarmepumpe.dk.

I IFIV er udviklet og demonstreret en løsning til intelligent fjernstyring af en pulje af individuelle varmepumper, så den samlede regulerbare effekt opfylder kriteriet for at udgøre et "Virtual Power Plant" (VPP). Et VPP kan udnyttes af et balanceansvarligt elhandelsselskab til intern balancestyring og til udbud af regulerkraft.

I VAFE er det undersøgt, hvor meget varme der vil kunne lagres i husene. Der er arbejdet på at udbrede idéen om intelligent fjernstyring blandt varmepumpefabrikanter og -leverandører, fordi accept og konstruktiv medvirken herfra er afgørende for en succesrig udnyttelse af varmepumpernes potentiale for fleksibel drift. Dette arbejde har været stærkt understøttet af sammensætningen af projektgruppen bestående af Teknologisk Institut, der i mange år har arbejdet tæt sammen med Varmepumpefabrikantforeningen, en lang række varmepumpefabrikanter og -leverandører og andre fra varmepumpebranchen. Endelig er udført en undersøgelse af udfordringerne for eldistributionsnettet ved en betydelig udskiftning af olie- og gasfyr med varmepumper.

Projektet er dokumenteret i nærværende slutrapport og tre bilagsrapporter:

- Fleksibelt elforbrug - analyse af muligheder i forbindelse med varmepumper i boliger /1/
- "Tvangsstop-test af varmepumper", Teknologisk Institut, dec. 2014 /2/

- ”Løsningsforslag til større integration af varmepumper i lavspændingsnettet”, SEAS-NVE, nov. 2013 /3/

Slutrappporten er tilgængelig på: www.teknologisk.dk/projekter/projekt-varmepumper-et-aktiv-i-fremtidens-energisystem-vafe/31366

Referencer er samlet bagest i rapporten, og en henvisning til en reference x skrives /x/.

Der gøres opmærksom på, at der visse steder i rapporterne er refereret til udvalgte huse med bestemte ID-numre. Disse numre er, af hensyn til den fuldstændige anonymisering, genereret separat i VAFE og kan derfor ikke benyttes til direkte opslag i SDVP-databasen med stamdata og målinger for de 300 demo-anlæg.

Projektet er gennemført i perioden 1. april 2010 til 31. december 2014 med deltagelse af følgende projektpartnere:

Teknologisk Institut	Søren Poulsen (Projektleder) Lars Olsen Claus Schøn Poulsen
Varmepumpefabrikantforeningen	Lars Abel
SEAS-NVE	Jens Ole Pihl-Anderen Ole Alm Claus Jensen Dorte Nielsen Jamie Holmen Jensen
SE (tidl. Syd Energi)	Michael Byllemos
Alpha-InnoTec / ASAP	Rainer Carstens
BAXI	Palle Frederiksen
Danfoss Heat Pumps	Preben Eskerød
DVI – Dansk Varmepumpe Industri	Henning Pallesen
Gastech	Erik Frederiksen
Nilan A/S	Henry Yndgaard Sørensen
Pettinaroli A/S	Esben Larsen
Robert Bosch A/S	Niels Pedersen
Salling Vaske og Køleservice	Vagn Tanderup
Vaillant	Martin Pedersen
Vesttherm A/S	
Viessmann A/S	Kim L. Kristensen
Vølund Varmeteknik	Niels Peter Skov

 TEKNOLOGISK INSTITUT		seas-nve 
 alpha innoTec		
 DVI energi DANSK VARMEPUMPE INDUSTRI A/S	GASTECH 	VIESSMANN climate of innovation
 Vaillant	 Salling Vaske- og køleservice A/S	
 Vesttherm A/S <i>High quality hot water heat pumps</i>	DAIKIN  BKF-KLIMA A/S - din klimaleverandør	 PETTINAROLI STIEBEL ELTRON
 VØLUND VARMETEKNIK		

”Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem (VAFE), slutrapport 1. udgave, juni 2015

Køle- og Varmepumpeteknik

Energi og Klima

© Teknologisk Institut

Resumé

I projektet er undersøgt forskellige aspekter omkring individuelle varmepumpers muligheder og begrænsninger for at fungere som et aktivt element i fremtidens energisystem, hvor stor fleksibilitet i samspillet mellem elproduktion og elforbrug vil være en nødvendighed. Et energisystem, der ofte beskrives med den lidt upræcist definerede term 'Smart Grid'.

Baggrunden for projektet er den energipolitiske målsætning om udfasning af fossile brændsler fra Danmarks el- og varmeforsyning, som fra 2035 skal dækkes 100 % af vedvarende energi med vindkraft som den dominerende kilde. Udskiftning af olie- og gasfyr med varmepumper forventes at få stor betydning for omlægning af varmeforsyningen til el. Vindkraftens tidsvariationer korrelerer kun delvist med varmebehovet, og dette sammen med det øgede elforbrug vil presse balancen i elsystemet. Flexibilitet i elforbruget bliver en nøgleparameter. Varmepumpernes drift kan tidsforskydes uden at kompromittere beboernes komfort, i visse tilfælde helt op til 1 døgn, ved at udnytte varmelagringssevnen i boligernes konstruktion og varmtvandsbeholdere. For at realisere dette potentiale skal der udvikles både tekniske løsninger til intelligent styring af varmepumperne og attraktive forretningsmodeller for markedets aktører.

Projektet fokuserer på 4 overordnede emner, som vinkler forskellige aspekter omkring udbredelse af varmepumper og intelligent styring af disse: 1) Varmepumpers udviklingshistorik og standardisering, som er relevant for forståelsen af udgangspunktet for udviklingen af tekniske løsninger til intelligent styring af varmepumperne, 2) Vurdering af bygningers og varmepumpeinstallationers potentiale for at bidrage til fleksibilitet i elforsyningssystemet, 3) Praktiske erfaringer og barrierer for udbredelse af varmepumper, 4) Udfordringer for distributionsnettet ved en betydelig penetration med varmepumper.

I Danmark og Sverige gennemførtes over nogle år fra 1980 en massiv forskningsindsats for teknisk forbedring af varmepumperne, udvikling af metoder til test og prøvning og udarbejdelse af standarder. Et arbejde, der sidenhen kom til at præge den internationale udvikling, og varmepumper er i dag en moden og velfungerende teknologi. Først i nyere tid er der opstået behov for udvikling af metoder til intelligent styring af varmepumper i et Smart Grid. Den helt store udfordring ligger på IKT-området, hvor der kun er udført meget beskeden demonstration af fjernstyring af varmepumper og generelt mangler standarder. I øvrigt forventes udbredelsen af intelligent styrede varmepumper at fremme anvendelsen af kapacitetsstyrede (trinløs regulering) varmepumper på bekostning af de on/off-styrede.

I projektet er gennemført en grundig analyse af huses og varmepumpeinstallationers potentiale for fleksibelt elforbrug. Der er redegjort for det teoretiske grundlag for bygningers varmelagringssevne og beboernes temperaturkomfort ved svingende indtemperaturer. Der er præsenteret et katalog af teknologier og parametre i installationer og brugerincitamenter, der kan tages i anvendelse for at udfolde potentialet for fleksibilitet. Der er også gennemført en praktisk undersøgelse af huses varmelagringssegenskaber. Blandt de 300 demo-huse i SDVP er udvalgt i alt ca. 15 huse, hvor der er gennemført en dybtgående analyse af måledata for temperaturer opsamlet i et tidsrum hen over en periode på nogle timer, hvor varmepumperne har været tvangsstoppet. I 5 af de analyserede huse (plus yderligere 6 huse) blev der forlods installeret ca. 7 ekstra indetemperaturfølere som supplement til standard-måleudstyret i SDVP for at få særlig grundlæggende viden om husenes egenskaber. Analysen viser, at der kan forventes mulighed for at stoppe varmepumpen i stort set alle huse i 2 til 6 timer uden mærkbare komfortmæssige gener. Antages det, at der kan stoppes for varmepumpen i 100.000 huse i tre timer, og at dette giver en reduktion i eleffekt på 2 kW/hus, vil det tilsammen give et flyttet elektrisk energiforbrug på 600 MWh, hvilket i princippet kan gøres hver dag i varmesæsonen, 50 til 100 dage pr. år. De ekstra temperaturfølere i de i alt 11 huse nævnt ovenfor forbliver installeret, og der

genereres derfor særligt værdifulde måledata for denne gruppe huse til brug for analyser i senere projekter.

I løbet af projektet er der opsamlet viden og erfaringer omkring en lang række større eller mindre barrierer, der står i vejen for individuelle varmepumpers udberedelse generelt og mere specifikt for integration af varmepumper i et Smart Grid.

På det generelle niveau kan nævnes manglende viden hos kunder, utilstrækkelig viden og uddannelsesniveau blandt installatører, en mere omstændelig proces ved installation af en varmepumpe end for højtemperaturanlæg som fx oliefyr og pillefyr, problemer med finansiering af den relativt høje investering i udkantsområder, (måske) lidt for svingende kvalitet i installationerne, en for varmepumper mindre gunstig udvikling i prisforholdet mellem olie og el end forventet, for dårlig markedsføring i ft. andre brancher (ifølge kilder i VP-branchen selv) og dertil politisk bestemte rammevilkår som fx tilslutningspligt til fjernvarme og naturgas.

Der er også betydelige barrierer for integration af varmepumper i et Smart Grid ved intelligent styring. Varmepumpeteknisk set er der få barrierer, idét det allerede er demonstreret, at det kan lade sig gøre for en ekstern aktør at udføre puljestyling af varmepumper ud fra elprissignaler og vejrprognoser. IKT-området udgør en stor udfordring, idét der både mangler standarder og tredjepartsadgang til varmepumpestyringerne på et dybere niveau. Manglen på den gode business case og mulighed for timeafregning og afregning af varmepumpen separat fra andet elforbrug udgør betydelige barrierer. Aktører som fx boligejere, service providere, elforsyningsselskaber (DSO'er) og VP-fabrikanter har, hvis der alene ses på niveau og udsving i elpriser, således kun beskedent incitament til at interessere sig for Smart Grid. Flaskehalse i distributionsnettet som følge af den øgede belastning fra varmepumperne kunne give DSO'erne en tilskyndelse, men bl.a. grundet den meget lave frekvens for udskiftning af olie- og gasfyr med varmepumper er der endnu kun i meget beskedent omfang opstået sådanne problemer.

Udfordringer for distributionsnettet ved en betydelig penetration med varmepumper er undersøgt med udgangspunkt i en karakteristisk udførelse i SEAS-NVE's elnet, som vurderes også at være repræsentativ for en stor del af Danmarks lavspændingsudføringer. Konklusionen er, at elnettet selv ved en betydelig penetration med varmepumper vil være tilstrækkeligt stærkt på mellemspændingsniveau og de fleste steder også på lavspændingsniveau. Problemet i sidstnævnte vil primært være overskridelse af spændingsgrænser og sekundært overbelastning. Årsagen til de mulige problemer er forøgelsen i elforbruget, og at en del af dette kommer til at ligge oven i den kritiske kogespids omkring kl. 18 om vinteren - med mindre der fx indføres intelligent styring af varmepumperne. Der er også regnet på scenarier med introduktion af elbiler og solcelleanlæg, og beregningerne viser, at det kan give anledning til forværring af problemerne. Der foreslås en række løsningsmuligheder, som alle uundgåeligt medfører øgede omkostninger og/eller kompleksitet. Den måske simpleste løsning til imødegåelse af et akut flaskehalsproblem er, at forsyningsselskabet får mulighed for via fjernstyring at tvangsstoppe varmepumpen eller andet elforbrug.

Gennemførelsen af projektet har genereret ny viden og været med til at underbygge en række allerede tidligere gjorte erfaringer, og dette kan opsummeres i følgende punkter:

- Med de rigtige rammebetingelser, færdigudviklet og gennemafprøvet teknik, især på IKT-området, og attraktive produkter fra fx service-providere er det realistisk at forvente et betydeligt potentiale for fleksibelt elforbrug i individuelle varmepumper.
- Varmepumper er en energieffektiv, moden og afprøvet teknologi, der grundlæggende er klar til fremtidens energisystem

- For at varmepumper kan blive et aktiv i et Smart Grid, er der behov for videreudvikling og mere demonstration på IKT-området:
 - Der skal kunne fjernkommunikeres med varmepumperne på en intelligent måde. VP-fabrikantene skal åbne op for tredjepartsaktørers adgang til et dybere niveau i styringerne
 - Der skal gøres en fortsat intensiv indsats på internationalt niveau for at udarbejde og vedtage standarder for informationsmodeller, kommunikationsprotokoller og prøvningsmetoder og kriterier for Smart Grid-Readiness
 - Software skal være open-source for at sikre, at der kan kommunikeres på tværs af teknologier, fabrikater og produkter, således at der kan opstå et attraktivt og konkurrencebetonet marked for Smart Grid løsninger
 - Status er, at der – i andre projekter knyttet til SDVP demo-plattformen – allerede med lovende resultater er gennemført en i international sammenhæng unik demonstration af puljestyling af et antal varmepumper af en ekstern aktør. Men det er komplekst, og der er behov for mere demonstration
- Der er potentiale for at hæve kvaliteten i installationerne generelt ved at stille skærpede krav i installationsleddet. Varmepumpeanlæg kræver i højere grad omhyggelighed i dimensionering, installation og brug end oliefyr for at levere tilstrækkelig varmekvalitet til den opnåelige meget lavere driftsomkostning:
 - Vil kunne give et løft til COP-værdier og driftssikkerhed og optimere dimensionering
 - Der skal ved udskiftning af et olie- eller gasfyr (højtemperaturanlæg) med en varmepumpe (lavtemperaturanlæg) være strammere fokus på, at kravene til varmeinstallationen skærpes
 - Indregulering af anlæggene, bl.a. gulvarmekredsene, er mangelfuld i en del anlæg. Anlægsejereren skal instrueres grundigt. Der ses anlæg, hvor kurvestyringen står forkert.
 - Uddannelsesniveaulet bør hæves for installatører og energikonsulenter gennem krav og suppleres med uvildige stikprøvekontroller af nye installationer
- Den gode business case for de centrale aktører ved intelligent styring af individuelle varmepumper, der skal være med til at drive det fleksible elforbrug frem, er ikke opstillet endnu. Mangel på standarder, behov for yderligere teknisk demonstration og – ikke mindst – rammebetingelserne er væsentlige barrierer.

Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
Resumé	6
1 Indledning	13
1.1 Baggrund	13
1.2 Formål og metode.....	13
2 Udviklingshistorie, standardisering og regler og krav.....	15
2.1 Analyse af tidligere gennemførte projekter omkring styring af varmepumper	15
2.1.1 Generelt om de tidligere gennemførte projekter	15
2.1.2 Behovsstyrede varmepumper og dimensionering	17
2.1.3 Status for Smart Grid Ready-varmepumper	19
2.2 Standarder og direktiver	20
2.2.1 Standardisering – historisk tilbageblik	20
2.2.2 Ecodesigndirektivet og standardisering.....	20
2.3 Regler og krav	22
3 Analyse og dimensionering.....	23
3.1 Betragtninger omkring elforsyning, fleksibilitet og varmepumper	23
3.2 Teknologier	24
4 Demonstration og test	29
4.1 Formål med demonstration og test	29
4.2 Metode for undersøgelse af de termiske egenskaber for et hus.....	29
4.3 Udvælgelse af huse til undersøgelse	30
4.3.1 Installation og måleudstyr	30
4.3.2 Huse med detaljerede målinger	31
4.3.3 Huse med én temperatursensor.....	32
4.4 Dataanalyse	33
4.4.1 Introduktion til målingerne.....	33
4.4.2 Analysemetode	33
4.4.3 Tidskonstanter bestemt fra måledata	34
4.4.4 Teoretisk tidskonstant	34
4.5 Analyse af målte data	35
4.6 Resultater i huse med detaljerede målinger.....	36
4.7 Teoretisk estimerede tidskonstanter	37
4.8 Konklusioner ved huse med detaljerede målinger	40
4.9 Konklusion på baggrund af enkeltmålingerne.....	41
4.10 Samlet konklusion vedrørende målinger.....	42
4.11 Perspektivering.....	43
5 Problemer, barrierer, anbefalinger – erfaringer fra praksis	44
5.1 Boligejerens udgangspunkt	44
5.1.1 Viden	44

5.1.2	Økonomi.....	44
5.1.3	Proces	45
5.2	Installation.....	46
5.2.1	Generelle erfaringer med kvalitet i installationsarbejde og drift.....	46
5.2.2	Eksempler på hyppigt forekommende problemer omkring installationen	46
5.2.3	Problemstillinger ikke knyttet til selve installationsarbejdet.....	47
5.3	Energi- og uddannelsespolitik – synspunkter fra varmepumpefabrikanterne	47
5.4	Øvrige kommentarer vedr. deltagelse i projektet samt overvejelser om Smart Grid	48
5.4.1	Oplevelser ved deltagelse i VAFE	48
5.4.2	Standarder.....	48
5.4.3	Intelligent Smart Grid-styring af individuelle varmepumper – giver det mening?	48
5.5	Andre barrierer	49
6	Større integration af varmepumper i lavspændingsnettet.....	50
6.1	Formål og metode.....	50
6.2	Beskrivelse af elnet og belastning	51
6.2.1	Elnettet generelt.....	51
6.2.2	Repræsentativ lavspændingsudførelse.....	51
6.2.3	Belastningsparametre anvendt i analysen.....	53
6.3	Resultater.....	54
6.4	Løsningsforslag til større integration af varmepumper	56
6.4.1	Nettekniske løsninger	56
6.4.2	Ændring af belastningsprofil	59
6.5	Styringsstrategier til reduktion af CO ₂ -udledningen	64
6.6	Opsummering af begrænsninger, muligheder og anbefalinger	65
6.7	Afsluttende kommentar	66
7	Konklusion og perspektivering	67
7.1	SDVP's demonstrations- og testplatform.....	67
7.2	Fokuspunkter i VAFE	67
7.3	Varmepumpers udviklingshistorik og standardisering.....	67
7.4	Fleksibilitet i bygninger med varmepumper	68
7.4.1	Analyse og overvejelser om varmepumper i et fleksibelt elsystem	68
7.4.2	Demonstration og test.....	69
7.4.3	Behandling af data fra test.....	69
7.5	Barrierer for varmepumperne – erfaringer fra praksis	70
7.6	Udfordringerne for lavspændingsnettet.....	70
8	Formidling og rapportering	72
9	Referencer.....	73
10	Appendiks: Eksempel på gennemgang af et udvalgt hus til test.....	75
10.1	Overordnet beskrivelse af huset	75
10.2	Nøgleoplysninger	75
10.3	Fotos og placering af ekstra temperaturfølere	76
10.4	Forsøg.....	78
10.5	Databehandling.....	80
10.6	Samlet vurdering	82

1 Indledning

1.1 Baggrund

Baggrunden for projektet ”Styr Din Varmepumpe” er den politiske beslutning om over en årrække at udfase fossile brændstoffer og øge integrationen af vedvarende energi, især vindkraft, i energiforsyningssystemet. Et af de første tiltag var en offentlig tilskudsordning med titlen ”Skrot dit oliefyrr”, gennem hvilken oliefyrejerne i perioden marts 2010 til juni 2011 kunne søge om tilskud til at erstatte oliefyrr med fjernvarmetilslutning eller installation af varmepumpe. I ansøgningsskemaet kunne ejerne tilkendegive tilbud om at stille deres varmepumpeanlæg til rådighed for ”Styr Din Varmepumpe”.

Omlægning af varmeforsyningen til varmepumper medfører et større elforbrug, som åbner op for anvendelse af mere vindkraft, ikke mindst på grund af en vis sæsonmæssig korrelation mellem vindkraftproduktion og varmepumpedrift. Vindkrafts fluktuerende natur er en udfordring for elforsyningssystemet, der til ethvert tidspunkt fordrer en fuldstændig balance mellem elproduktion og elforbrug. Varmepumper med intelligent styring vil kunne bidrage til at erstatte fossile brændsler med VE-el til boligopvarmning og med fleksibilitet i elforsyningssystemet, hvilket der vil blive stadig større behov for i takt med vindkraftens voksende andel af elproduktionen. Fleksibiliteten bygger på, at elforbruget til varmepumperne kan tidsforskydes ved udnyttelse af varmepumpeinstallationernes varmelager i lagertanke og husenes konstruktion. Varmepumperne kan blive et væsentligt aktiv i et Smart Grid.

Ved intelligent tidsforskydning af en varmepumpes drift kan elforbruget flyttes til tidspunkter, der er mest hensigtsmæssige for en ekstern aktør, der opererer i elforsyningssystemet, enten som elhandler eller som ansvarlig for den tekniske drift. Aktørens incitament kan være økonomiske overvejelser, reduktion i udledning af CO₂ eller forebyggelse af flaskehalsproblemer i eldistributionsnettet.

Tidsforskydning af driften medfører en ændring i varmeleverancen til huset. En præmis i ”Styr Din Varmepumpe” er, at varmepumpeejersens temperaturkomfort ikke må kompromitteres. Desuden skal fjernstyring kunne udføres med en høj grad af automatik og kun principielt fordrer manuel indgriben efter ejersens eget ønske om fx at blokere fjernstyret stop eller at ændre grænser for komfortinterval.

Udvikling af de tekniske løsninger er en betydelig udfordring. Mange varmepumper har i dag én eller højst to digitale indgange for ekstern kommunikation. De fleste varmepumpers drift kan blokeres ved et signal på en digital indgang, ofte benævnt ”EVU” efter tyske forskrifter. Nogle varmepumper har desuden en digital indgang til justering af temperaturkurven mellem to niveauer. De færreste varmepumper har en port til kommunikation over internet eller GSM-telefonforbindelse og er i sådanne tilfælde forbundet med fabrikanternes proprietære systemer.

1.2 Formål og metode

Projektet har flere formål.

Den historiske udvikling af varmepumper i relation til intelligent styring i et Smart Grid beskrives for at skabe en retning for både nærværende og fremtidige projekter. I denne forbindelse redegøres også for nuværende og kommende standarder på området, da enighed om standarder, især internationalt, har fundamental betydning for realisering af varmepumpernes potentiale i forhold til opnåelse af de ovenfor beskrevne energipolitiske mål.

Huses evne til at lagre varme, både med hensyn til mængde og varighed, undersøges og testes. Denne evne er en afgørende forudsætning for, at varmepumperne vil kunne bidrage til at øge anvendelsen af vedvarende energi og med fleksibilitet til elsystemet. Det teoretiske grundlag for huses termiske egenskaber, beboeradfærd og strategier for intelligent styring af varmepumper beskrives. Et antal huses udvælges til test med tvangsstop, og måledata herfra samt fra daglig drift af demonstrationsanlæggene i SDVP analyseres med henblik på vurdering af husenes termiske egenskaber i praksis. Teori og praksis sammenholdes.

De flaskehalse og andre udfordringer, elselskaberne vil få i deres lavspændingsnet ved betydelig udskiftning af olie- og gasfyr med varmepumper, analyseres, idet scenarier for udbredelse af solceller og elbiler inddrages. Forskellige eksisterende og potentielle virkemidler til at imødegå udfordringerne beskrives.

Gennem deltagelse af en lang række partnere fra varmepumpebranchen arbejdes for at fremme fabrikanternes forståelse for varmepumpernes rolle i et Smart Grid og igangsættelse af udviklingsaktiviteter omkring intelligent styring.

2 **Udviklingshistorie, standardisering og regler og krav**

I kapitlet beskrives udviklingsforløbet omkring projekter om styring af varmepumper, som ”Styr Din Varmepumpe” bygger på. Efterfølgende beskrives de rammer for den fortsatte udvikling og udbredelse af varmepumper, som dannes af standarder, regler og krav.

2.1 **Analyse af tidligere gennemførte projekter omkring styring af varmepumper**

2.1.1 **Generelt om de tidligere gennemførte projekter**

Inden for varmepumpeområdet har der igennem årene været gennemført en lang række F&U-aktiviteter. Bl.a. gav Energiministeriet tilbage i 1980 tilskud til i alt 76 projekter inden for området, som gav en række meget interessante og relevante rapporter, som den dag i dag efterspørges og anvendes i mange sammenhænge. Programmet blev døbt ”Energiministeriets varmepumpeforskningsprogram”, og de mange projektrapporter blev offentliggjort i perioden 1982-1990. Projekterne omhandlede alle tænkelige emner inden for varmepumpeteknologien, og flere af de udarbejdede værker har relevans for ”fleksibelt elforbrug”. Bl.a. blev der tilbage i 1983-85 udarbejdet procedurer for dynamisk test af varmepumper – et emne der desværre har været nedprioriteret i det internationale standardiseringsarbejde helt frem til for ganske få år siden. Flere af de projekter, som dengang blev gennemført, har senere dannet grundlag for udviklingen af produkter, både i forbindelse med offentligt støttede projekter og naturligvis ude i de danske virksomheder, som specielt op gennem 80’erne og 90’erne blev markante aktører på varmepumpemarkedet.

Projekterne omhandlede ikke kun test og prøvning af varmepumper, men var i lige så høj grad fokuseret omkring erfaringsindsamling i forbindelse med (mindre) måleprogrammer på faktiske varmepumpeinstallationer. Dette har sidenhen haft enorm betydning, da mange af de erfaringstal (tommelfingerregler), der anvendes i forbindelse med dimensionering og installation af varmepumper, rent faktisk stammer fra disse projekter. Sidst men ikke mindst var projekterne naturligvis fokuseret omkring teknik, bl.a. omkring nye fordampertyper, varmeoptag fra jorden o.l. Det var kun relativt få af projekterne, der decideret havde varmepumpernes indpasning i det samlede energisystem som tema, men bl.a. emnet ”bivalent drift” blev berørt i nogle af projekterne. Begrebet ”bivalent” dækker her over den udetemperatur, hvorpå varmepumpen ikke længere kan dække det samlede varmebehov i boligen, og derfor skal suppleres af en anden varmekilde. Dette er naturligvis en helt afgørende størrelse i forbindelse med ekstern regulering af varmepumper, da den supplerende varmekilde normalt vil være en elpatron.

Et så ambitiøst F&U-program, som det der blev sat i søen tilbage i starten af 1980’erne, er desværre aldrig siden blevet gentaget. Men i 90’erne blev styring/regulering af varmepumper et af de helt centrale indsatsområder i andre (og lidt mindre) danske forsknings- og udviklingsprojekter inden for varmepumpeområdet. Udviklingsprogrammet for Vedvarende Energi (UVE) som administreredes af Energistyrelsen gav støtte til en række projekter, hvor fokus var rettet mod kapacitetsregulering (ofte kaldet behovstyring) af varmepumpen, hvor nye koncepter for tilpasning af varmepumpens ydelse til det aktuelle behov blev udviklet.

Grundlaget for dette udviklingsarbejde var det faktum, at on/off drift af varmepumper reducerer anlæggets effektivitet sammenlignet med kontinuert drift. Det skønnes, at en egentlig behovsstyring kan reducere energiforbruget med ca. 20-30 % sammenlignet med on/off drift. Denne forbedring skyldes flere forhold, bl.a. at varmevekslerne udnyttes bedre og mere optimalt, når anlægget ikke ”presses”, og rent køleteknisk er det fastslået, at der er en række dynamiske tab, som reduceres væsentligt, når anlæggets relative driftstid øges.

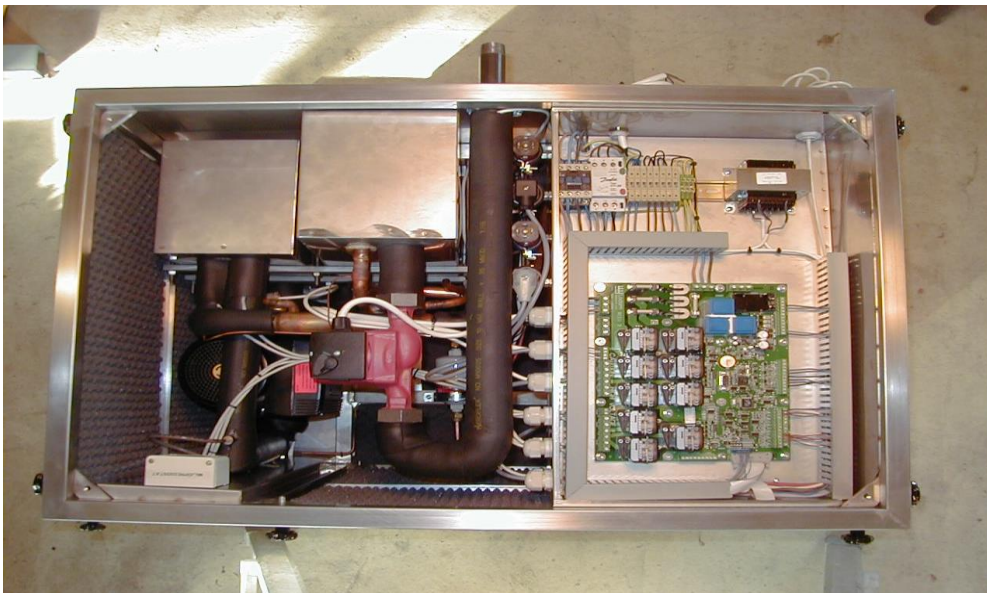
Helt grundlæggende reduceres tabene i varmepumpen, når denne behovsstyres. En række rent køletekniske gevinster kan opnås med denne driftsform, bl.a. lavere kondenseringstemperatur og højere fordampningstemperatur, som begge er faktorer, der meget positivt påvirker anlæggets samlede virkningsgrad. Desuden vil mere kontinuert drift reducere de tab, der opstår i et kølesystem som følge af eksempelvis trykudligning i systemet.

I relation til fleksibelt elforbrug giver de nyudviklede styringer en række fordele sammenlignet med traditionel on/off drift. Bl.a. medfører trinløs kapacitetsregulering, at det er muligt at regulere varmepumpens ydelse op og ned i takt med, at elprisen hhv. falder og stiger, uden at det påvirker bygningens komfort i samme grad, som hvis varmepumpen afbrydes helt.

I projektet ”Individuelle eldrevne varmepumper- implementering af ny teknologi fase 5-10 (ENS j.nr.: 51191/00-0001)” /4/ blev der endvidere arbejdet med udviklingen af en adaptiv regulering, som var tænkt som en styring, der med udgangspunkt i et ret omfattende målesystem ifm. installationen kunne ”lære” husets forbrug at kende og korrigere reguleringen, således at den højest mulige effektivitet kunne opnås. Det lykkedes desværre kun delvist at udvikle denne styring, da en række faktorer viste sig at have endog meget stor indflydelse på driften af det enkelte varmepumpeanlæg – faktorer som vindpåvirkning, periodisk ændret brugsmønster (fx ferie, jul etc.) og varierende jordslangetemperatur (anlægget var forsynet med en energifanger, som medførte meget store temperaturvariationer i optagersystemet). I det nævnte projekt kunne det i øvrigt konstateres, at kapacitetsregulering kunne medføre nogle ret markante besparelser sammenlignet med on/off drift. Nedenfor ses et eksempel på dette:

Målinger	Uge 46/2001 behovsstyret	Uge 46/2002 reference on/off
Middel udetemperatur i periode	4,8°C	4,7°C
Solkorrigerede graddage	68 graddage	83 graddage
Middel brinetemperatur, indløb (ved drift)	7,3°C	7,4°C
Middel fremløbstemperatur radiatorer (ved drift)	37,0°C	40,7°C
Afgivet varmemængde	596,2 kWh	645,2 kWh
Tilført elenergi	169,5 kWh	224,4 kWh
Tilført fra jordslange	495,7 kWh	517,0 kWh
Energinyttevirkning	3,52 (-)	2,88 (-)
Kompressor relativ on-tid	73,0 %	48,9 %

Figur 2.1: Data på varmepumpe - behovsstyret kontra on/off



Figur 2.2: Billede af prototypestyring til demoprojekt

Anvendelsen af frekvensomformere i køle- og varmepumpesystemer er yderst interessant og relevant i forhold til et fleksibelt elsystem, da muligheden for at regulere varmepumpen trinløst giver helt unikke muligheder for fleksibilitet, ligesom de frekvensomformere, der i dag anvendes, har mulighed for løbende optimering af elmotoren i kompressoren. Dette vil alt andet lige give en effektivitetsforbedring samt forbedret levetid for motor/kompressor, ligesom der sker kontinuerlig overvågning af motoren, der bl.a. giver øget driftssikkerhed.

I projektet "Behovsstyring af mindre køleanlæg ved hjælp af kompressorregulering (ENS j.nr.: 731327/01-0108)." /5/ er der bl.a. udarbejdet en vejledning omkring anvendelse af frekvensomformere på køle- (og dermed og varmepumpe-) kompressorer. Denne vejledning, en større projektrapport samt et beregningsværktøj til bestemmelse af den mulige energibesparelse ved anvendelse af denne teknologi kan findes på <http://www.energiledelse.com/visArtikel.asp?artikelID=1665>.

2.1.2 Behovsstyrede varmepumper og dimensionering

Der er igennem de nævnte projekter høstet en række erfaringer omkring mange forhold, bl.a. omkring dimensionering af varmepumpe i forhold til husets behov. Disse erfaringer er ikke nødvendigvis videnskabeligt underbygget, men det vurderes, at der alligevel er basis for at nævne dem her. Bl.a. er der et tydeligt billede af, at varmepumper, der er kapacitetsreguleret eller behovsstyret, bør have en mindre ydelse end varmepumper, der køres on/off. Dette skyldes flere forhold, bl.a. at varmepumpernes ydelse stiger med faldende kondenseringstemperatur, og da den behovsstyrede varmepumpe pr. automatik har flere driftstimer, vil den faktiske fremløbstemperatur (og dermed kondenseringstemperatur) under drift være lavere, hvilket i øvrigt fremgår tydeligt af figur 2.1. Endvidere har behovsstyrede varmepumper også mulighed for at øge deres kapacitet ud over det, der svarer til den nominelle kapacitet, og dette giver flere frihedsgrader, da det dermed er muligt at forcere driften fx når elprisen er lav, eller i perioder, hvor der af andre grunde ønskes en højere temperatur i boligen.

Der er naturligvis en række forhold, man skal have med i betragtning ift. dimensioneringen:

- Grænse for nedregulering af varmepumpen; afhænger typisk af kompressorens minimumsomdrejningstal

- Det højest tilladelige omdrejningstal, som også er en kompressorafhængig størrelse, og som desuden også afhænger af det aktuelle temperaturniveau på varm og kold side
- Bufferkapacitet – både i vandkredsen og i selve bygningen
- Andre varmekilder i bygningen – her skal der fx tages højde for anvendelsen af brændeovn og/eller solvarme, som i perioder kan supplere varmen fra varmepumpen.

En meget stor andel af de varmepumper, som markedsføres herhjemme, er de seneste år blevet udviklet til også at være baseret på ”invertertechnologien” til behovsstyringen (kapacitetsreguleringen), og dette gør varmepumpernes dimensionering en anelse lettere for installatøren, da den enkelte varmepumpe typisk spænder over et større kapacitetsområde. Nogle varmepumper, fx dem med de såkaldte rotationskompressorer, spænder over et meget stort reguleringsområde, da kompressorerne har et stort arbejdsområde og typisk kan reguleres fra området omkring 10-20 % og helt op til måske 150 % af nominel kapacitet.

Der findes i øvrigt en frivillig kvalitetssikringsordning for varmepumpeinstallatører, VarmepumpeOrdningen (VPO), som udstikker en række retningslinjer for dimensionering af varmepumper. Se www.vp-ordning.dk /6/ for yderligere information.

Der kan desuden henvises til anden interessant litteratur, nemlig ”Den lille blå om varmepumper” /7/, Håndbogen er udgivet af Dansk Energi og giver en række erfaringsværdier for varmepumper samt en mere detaljeret beskrivelse af dimensioneringsgrundlaget for disse. Diskussionen omkring varmepumpernes dimensionering, og særligt placeringen af det såkaldte ”bivalentpunkt”, som er den temperatur, hvor varmepumpen lige netop kan dække husets samlede varmebehov uden tilskudseffekt fra elpatron eller lignende, har taget en interessant drejning efter præsentationen af den nye DS 469 (Norm for varmeanlæg /8/). I denne har man noteret, at varmepumpen skal kunne dække husets varmebehov ned til en udetemperatur på -7 °C uden tilskud i form af elpatron eller lignende. Dette medfører i praksis, at varmepumperne fremover skal dimensioneres med væsentligt større ydelse end tidligere, hvilket for nogle apparater vil medføre forringet effektivitet, mens det for andre vil betyde en ”klarmelding” ift. Smart Grid, da varmepumperne vil have en væsentlig større reservekapacitet end tidligere.

Med hensyn til bestemmelse af graden af reguleringsfleksibilitet i den enkelte installation, er der en række forhold, som har betydning:

- Mulighed for varierende ydelse af varmepumperne, specielt ved genopvarmning efter en afbrydelse
- Styling af varmepumpen enten udefra på grundlag af enten start-stop signaler eller lokalt ved hjælp af prissignaler
- Varmelagringsmuligheder
- Varmaefgivelse fra varmeanlægget
- Bygningens varmetab
- Påvirkningen af brugeren ved stop eller forceret drift af varmeanlægget, fx den termiske komfort
- Alternative supplerende opvarmningsformer (brændeovne eller gashybridvarmepumper).

2.1.3 Status for Smart Grid Ready-varmepumper

En forudsætning for, at varmepumperne kan fjernstyres, er først og fremmest, at de er udstyret med et interface for ekstern kommunikation, hvilket i sin mest simple form er en digital indgang for styring af start/stop gennem lokal tilslutning (ekstern styreboks).

I juni 2013 gennemførtes en undersøgelse med det formål at klarlægge status for Smart Grid Ready-varmepumper på markedet ("Forundersøgelse vedrørende Smart Grid Ready-husstandsvarmepumper til DREAM projektet", Martin Frølich Olesen /9/). Undersøgelsen var en opdatering af en tidligere undersøgelse, der blev udført som forløber for SDVP ("Fra vindkraft til varmepumper", slutrapport bilag 2, juli 2012, Energinet.dk /10/). Ca. 10 varmepumpefabrikanter og -leverandører responderede på et skema, i hvilket der blev spurgt ind til styrings- og målingsmuligheder i deres varmepumper og gennem hvilke grænseflader. Der blev lagt særligt fokus på eksterne kommunikationsmuligheder og virksomhedens holdning til og tanker omkring Smart Grid.

På baggrund af besvarelserne af skemaerne fik varmepumpefabrikanterne en karakter, som skal indikere, hvor Smart Grid Ready-produktet er. Karakteren blev givet ud fra følgende skala:

1. Varmepumpen kan reagere direkte på et prissignal over internettet uden modificering
2. Varmepumpen kan modificeres til at reagere på et prissignal over internettet
3. Varmepumpen kan sættes til forskellige "modes", over internettet
4. Varmepumpen kan sættes til forskellige "modes" gennem lokal tilslutning (ekstern boks)
5. Start/stop og setpunkter kan styres over internettet
6. Kun Start/stop kan styres over internettet
7. Start/stop og setpunkter kan styres gennem lokal tilslutning (ekstern boks)
8. Kun Start/stop kan styres gennem lokal tilslutning (ekstern boks)
9. Intet kan styres eksternt og intet eller lidt kan måles, men interesse for udvikling
10. Intet kan styres eksternt og intet eller lidt kan måles, samt INGEN interesse for udvikling.

Kriterierne for karakterne 3 og 4 er inspireret af den tyske forskrift for Smart Grid Readiness /11/.

Ud fra tilbagemeldingerne blev de forskellige fabrikater rangeret i tre kategorier ud fra en vurdering af fabrikatets anvendelighed i relation til Smart Grid-anvendelse:

Vurdering	Karakter	Beskrivelse
God kandidat	Ca. 1-5	Der skal foretages meget små eller ingen ændringer på varmepumpen, for at den kan indgå i et Smart Grid-system. Eventuelt nødvendige eksterne systemer vurderes at være relativt simple.
Mulig kandidat	Ca. 6-7	Det tyder på, at der er muligheder for at benytte varmepumpen i et Smart Grid-system, men der kræves en del arbejde, for at det vil virke. Dette arbejde kan også ligge hos producenten, såfremt de er villige til det.
Ikke en kandidat	Ca. 8-10	Varmepumpen har ikke de nødvendige funktioner for at kunne styres på en hensigtsmæssig måde, og/eller producenten har ikke interesse for projektet.

Ingen af fabrikanterne fik umiddelbart karakteren 1, og dermed har ingen af de forespurgte en "plug-and-play"-løsning. Dette skyldes, at det endnu er uvist, hvordan kommunikationen i et fremtidigt Smart Grid-system vil foregå. Flere fabrikanter varmepumper er dog klargjort til at kunne reagere på et simpelt signal over internettet. To fabrikanter opnåede således karakteren 2. Det vil kræve arbejde fra deres side, for at deres varmepumpe opnår karakteren 1, da der umiddelbart skal ændres i

varmepumpens styresystem. To fabrikanter opnåede karakteren 4, fordi de angav, at de følger den tyske forskrift for Smart Grid Readiness. Da deres produkter endnu ikke er online, kræves der ekstern hardware for at forbinde varmepumpen til et Smart Grid. De øvrige fabrikanter fik lavere karakterer, hvilket skyldtes ikke-fyldestgørende besvarelser, mangel på tekniske løsninger eller manglende vilje eller interesse for at samarbejde om udvikling af Smart Grid-løsninger.

2.2 Standarder og direktiver

2.2.1 Standardisering – historisk tilbageblik

Der er generel konsensus om, at mange ting bliver meget nemmere, når der er udarbejdet klare og entydige retningslinjer for området, og standardisering er et godt eksempel på, at det giver mening at harmonisere den måde, man gør ting på. Tilbage i 1980'erne var Danmark sammen med Sverige langt foran på varmepumpeområdet, og dette resulterede bl.a. i udarbejdelsen af flere fælles nordiske standarder inden for området. Det var særligt kravene til deklaration af varmepumper, der dengang var i fokus, og derudaf udsprang de første prøvningsstandarder, som blev udarbejdet i samarbejde mellem danske og svenske aktører på området.

Samarbejdet mellem Danmark og Sverige blev styrket op gennem 1990'erne og ind i dette årtusinde, primært fordi de første fælles europæiske aktiviteter inden for standardisering på varmepumpeområdet blev styret relativt markant af sydeuropæiske interesser, hvilket bl.a. betød, at de første forslag til standarder på området lå langt fra det, som de nordiske lande så som nødvendig i en standard. I dag er den pågældende tekniske komité (TC'en) ganske professionel, og vi oplever, at de standarder, som de seneste år er blevet udarbejdet på området, alle har et yderst professionelt snit og giver et retvisende billede af virkeligheden, fx de nye standarder til bestemmelse af årseffektivitet.

2.2.2 Ecodesigndirektivet og standardisering

Varmepumperne er omfattet af ecodesigndirektivet, og dette betyder bl.a. en række helt nye dokumentationskrav, hvoraf de første trådte i kraft i starten af 2013 (gældende for luft/luft varmepumper) og de næste bliver implementeret i september 2015 gældende for luft/vand og væske/vand varmepumper. Grundlæggende betyder disse nye krav, at behovsstyrede varmepumper vil få en fordel frem for on/off varmepumper, og det må forventes, at de nye krav vil rykke markedet mod flere og flere varmepumper med kapacitetsregulering (behovsstyring). Ud over de nye ecodesign-krav er der også stillet særligt skrappe krav i Danmark til varmepumper, der installeres. Bl.a. er der krav i Bygningsreglementet til deres minimumseffektivitet, som ligger betydeligt over de minimumskrav, som fremover stilles til luft/vand og væske/vand varmepumper. Mere information om de danske krav ifm. ecodesigndirektivet kan ses på <http://www.ens.dk/forbrug-besparelser/apparater-produkter/ecodesign> /12/.

Af gældende og relevante standarder direkte relateret til varmepumperne kan nævnes:

- DS/EN14511. Den helt grundlæggende standard, som beskriver målemetoder, usikkerhed, deklaration mv. og som angiver, hvordan varmepumpen testes i et enkelt driftpunkt /13/
- DS/EN14825. Denne standard beskriver, hvordan varmepumpen testes i variabel drift, og særligt hvordan den såkaldte Seasonal Coefficient Of Performance (SCOP) beregnes.

Anvendes grundlæggende ift. den kommende energimærkning af alle varmepumpetyper, dog undtaget brugsvandsvarmepumper /14/

- DS/EN16147. Denne standard beskriver, hvorledes brugsvandsvarmepumper testes og deklarerer /15/
- DS/EN12102. Denne standard beskriver, hvordan støj måles på varmepumper /16/

Energistyrelsen driver en liste over varmepumper, som alle er testet på akkrediteret prøvningsinstitut, enten efter standarden EN14511 eller den nye standard EN14825. Sidstnævnte er den standard, som giver mulighed for at beregne en såkaldt SCOP, som er et udtryk for, hvor effektiv en given varmepumpe er på vores breddegrader set over et helt år. Grundlæggende består SCOP-beregningsmetoden i en opdeling af varmesæsonen i et antal timer med forskellige temperaturer (kaldet bins), som samlet skal afspejle temperaturvariationerne over varmesæsonen ("Beregning af SCOP for varmepumper efter EN 14825", Pia Rasmussen for Energistyrelsen, 2011 /17/). Desuden defineres en varmebehovskurve for temperaturerne, som giver det varmebehov, varmepumpen skal opfylde for hvert temperatursæt. Der findes en COP-værdi i hver af disse bins, som tilsammen danner grundlag for beregningen af den gennemsnitlige COP kaldet SCOP. Mere information om dette kan findes på <http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/forbrug-besparelser/apparater-produkter/energikrav-produkter/husholdningsprodukter/klimaanaelg/teknisk-rapport-Beregning-af-SCOP-for-varmepumper-efter-En14825.pdf>.

Førnævnte liste over varmepumper kan findes her:

<http://sparenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/varmepumpelisten> /18/.

Den anden standard, EN14511, giver mulighed for at beregne en "normeffektivitet" som en størrelse, der også angiver forventet årseffektivitet, men da denne normeffektivitet er en særlig dansk måde til at beregne varmepumpernes effektivitet, er det tanken, at alle varmepumper fremover skal dokumenteres i henhold til EN14825. Modellen blev oprindeligt udviklet i 2008 på Teknologisk Institut, da Energistyrelsen på daværende tidspunkt igangsatte en liste over energieffektive varmepumper og manglede en model til beregning af årseffektivitet.

Varmepumper og Smart Grid behandles endnu ikke i samme standarder, og ser man på det mere Smart Grid-relaterede, er bygningers varmetab og varmekapacitet blandt de vigtigste faktorer. Bygningens varmetab har indflydelse på, hvor hurtigt temperaturen i bygningen stiger eller falder ved forceret varmetilførsel eller stop af varmeafgivelse. Et mål for dette er bygningens tidskonstant, hvor bygningens samlede varmekapacitet sættes i relation til bygningens varmetab pr. temperaturforskel over klimaskærmen. Bestemmelsen af bygningers varmetab er dækket af DS 418 ("Beregning af bygningers varmetab", Dansk Standard, 2011 /19/), mens tidskonstanten ikke er veldefineret i standardiseringsmæssig henseende. Ved bestemmelse af varmelagring i bygningskonstruktioner kan DS/INF 418-2 benyttes til at bestemme en varmekapacitet for bygningerne, idet der er givet en beregningsmetodik og en forenklet metode til fastlæggelse af varmekapaciteten /20/.

I efteråret 2014 startede et projekt ved navn "HPCOM". En af projektets vigtigste opgaver er at skubbe til de internationale standardiseringsaktiviteter, således at der også fremover bliver taget højde for produkternes Smart Grid-readiness, hvilket ikke er et emne i standarderne i dag. Arbejdet er igangsat som et samarbejde mellem nogle af Danmarks førende aktører inden for Smart Grid og varmepumper, og de erfaringer, der er gjort tidligere i andre projekter, vil naturligvis blive anvendt som basis for arbejdet i dette projekt. Det forventes at blive en relativt kompliceret opgave at igangsætte arbejdet med nye standarder, som også dækker Smart Grid-vinklen, men Danmark er

centralt placeret i arbejdet med nye standarder gennem en historisk aktiv deltagelse i CEN-arbejdet og de tilhørende arbejdsgrupper (WG'er). HPCOM-projektet er i øvrigt støttet af Energinet.dk gennem ForskVE-ordningen (projekt nr. 2014-1-12240).

2.3 Regler og krav

De krav, der stilles til varmepumperne gennem ecodesigndirektivet og dermed de minimumseffektiviteter, som fremover er gældende på europæisk plan, er ganske overkommelige for de fleste producenter. Derimod har man i en årrække i Danmark haft minimumskrav til varmepumper, der er installeret her i landet. Disse krav bliver løbende skærpet, og der er et ønske fra de danske energimyndigheder om at sikre, at varmepumperne er så effektive som muligt, således at man kan opnå den maksimale effekt af konverteringen fra fossile brændsler til varmepumper. De gældende krav for varmepumper kan ses i on-line-udgaven af Bygningsreglement 2010, som kan ses her: http://bygningsreglementet.dk/br10_04_id171/0/42/21/.

I Bygningsreglementet er kravene afhængig af anlægstype, og de refererer en tid endnu til den standard, der kaldes EN14511 /13/ og som muliggør beregning af "normeffektfaktor". Som et eksempel gengives her minimumskravene, som pt. er følgende for væske/vand varmepumper tilsluttet et gulvvarmesystem:

Bygningsreglementet § 8.6.4 Stk. 4.

For væske/vand varmepumper (jordvarmeanlæg) skal anlæg mindst have en normeffektfaktor jf. Energistyrelsens energimærkningsordning afhængig af størrelse og om anlægget forsyner gulvvarme:

Størrelse	Normeffektfaktor
0 – 3 kW	3,0
3 – 6 kW	3,6
> 6 kW	3,7

Har producenten i stedet dokumentation for SCOP-værdien, er $SCOP \times 0,85$ = normeffekt faktoren

Som det ses af ovenstående, er varmepumperne inddelt i størrelser svarende til små, mellem og større varmepumper. Der stilles ligeledes krav til, at varmepumper (og køleanlæg) med et årligt forbrug højere end 3.000 kWh skal udstyres med en separat elmåler. Der er dog ingen krav, hvad angår Smart Grid, hverken i Bygningsreglementet eller i ecodesigndirektivet, men det er dette emne, projektet "HPCOM" har særlig fokus på.

Kravene i ecodesigndirektivet er ligeledes minimumskrav; krav som skærpes løbende med ca. to års mellemrum. Men som nævnt ligger minimumskravene for varmepumpernes effektivitet langt under kravene, der stilles i Danmark gennem Bygningsreglementet (som i øvrigt svarer til de krav, der er for optagelse på Energistyrelsens liste på www.spareenergi.dk). For luft/luft varmepumpernes vedkommende er minimumskravene i ecodesign allerede trådt i kraft, og for væske/vand og luft/vand varmepumper træder de i kraft pr. 26. september 2015, hvorefter alle EU-medlemsstater forpligter sig til tilsyn, som i Danmark indtil nu har været effektueret gennem stikprøvekontroller på produkter af forskellige slags.

3 Analyse og dimensionering

I dette kapitel er beskrevet og analyseret en række overvejelser i forbindelse med anvendelse af varmepumper som en del af et fleksibelt elsystem. I bilagsrapporten /1/ er der givet en række yderligere detaljer.

I afsnit 3.1 præsenteres en række overordnede betragtninger, og i det følgende afsnit 3.2 går mere i detaljen omkring forskellige teknologier og parametre, der kan tages i anvendelse.

3.1 Betragtninger omkring elforsyning, fleksibilitet og varmepumper

Elforsyningen forandres => behov for fleksibelt elforbrug

Dansk elforsyning er under radikal forandring. Styrbare kul- og gasfyrede kraftværker fortrænges af ustyrlig vindkraft. Nem tilpasning af produktion til forbrug afløses af udfordrende tilpasning af forbrug til produktion. Udfordrende, fordi samfundets behov for basale energitjenester kontinuerligt skal dækkes uden kvalitetsdyk uagtet vindmøllernes fluktuerende produktion. Behovet for fleksibilitet i elforbruget vokser. Drift af elforbrugende udstyr må tilstræbes lagt på tidspunkter med stor elproduktion til elnettet og omvendt. Men elnettets kapacitet sætter grænser – der kan opstå flaskehalse, især i lavspændingsnettet.

Intelligent styrede individuelle varmepumper – en del af løsningen

Individuelle varmepumper kan bidrage med fleksibilitet til elnettet ved intelligent udnyttelse af det varmelager, der naturligt er til stede i enhver bolig i varmtvandsbeholder, buffertank til varmepumpen og ikke mindst i bygningskonstruktionen, der ofte vil have en helt afgørende varmekapacitet. Beboerne vil inden for et komfortinterval på nogle få K omkring den normale indetemperatur normalt ikke opleve ubehag ved langsomme variationer. Varmepumpens drift kan således forskydes i et tidsrum uden gener for beboerne og dermed bidrage med fleksibelt elforbrug. Potentialet afhænger af husets varmebehov i forhold til det samlede varmelagers kapacitet og varmepumpens kapacitet. En underdimensioneret varmepumpe vil på kolde dage ikke kunne tilbyde fleksibilitet. Styling efter fleksibilitet vil ofte koste ekstra elforbrug afhængig af, hvordan styringen foregår. Lagring af varme medfører større varmetab, og varierende frem for mere konstante ydelser fra varmepumpen vil medføre en lidt lavere COP. En varmepumpe kan tilbyde fleksibilitet, men hvis den installeres som erstatning for et oliefyr, vil det øgede elforbrug give anledning til en øget belastning af elnettet og dermed øge risikoen for flaskehalse. Aktiveres en elpatron (COP = 1) som supplement til en underdimensioneret varmepumpe på kolde dage, forstærkes risikoen for en flaskehals betydeligt, fordi dette ofte vil indtræffe, når elnettet i forvejen er hårdest belastet.

Driftsplanlægning

Intelligent styring af varmepumpen kræver løbende driftsplanlægning. I en normal bolig er varmelagringskapaciteten og dermed antallet af timer, driften kan forskydes, begrænset. En realistisk planlægningshorisont vil være i størrelsesordenen et døgn. Planen fastlægger ud fra et sæt kriterier i hvilke tidsrum, varmepumpen skal køre hhv. være slukket. Løbende input til planlægningen kan, udover historiske måledata op til planlægningstidspunktet, fx være forvarslede elpriser (spotpriser) og andre prissignaler fra elforsyningen, vejrprognoser og ejerens egne præferencer.

Men en gennemtænkt driftsplan kan blive udfordret, fordi der selv i en meget kort planlægningshorisont kan optræde mange forstyrrelser. Optænding af en brændeovn kan reducere varmebehovet fra varmepumpen betydeligt. Andre forstyrrelser kan være ændret solindfald, gæster, øget udluftning, varme fra solfangeranlæg og fravær fx ved ferie.

Indirekte eller direkte styring

Driftsplanlægning og styring kan udføres af en lokal enhed til opsamling af måledata og styring placeret ved eller integreret i varmepumpeanlæggets styring og vil i så tilfælde blive optimeret primært ud fra et privatøkonomisk hensyn fx ved at udnytte udsving i spotpriserne på el hen over et driftsdøgn. En lav spotpris tilskynder til forceret drift og omvendt. Set fra elforsyningen kan styringen af varmepumpen betegnes som *indirekte*.

I et andet scenarie udføres planlægning og styring *direkte* af fx et balanceansvarligt elhandelsselskab med adgang til fjernovervågning og -styring af varmepumpen. Selskabet kan have en økonomisk interesse i at kunne optimere driften af en pulje af varmepumper for at skabe intern balance eller kunne tilbyde regulerkraft – ud over den økonomiske gevinst ved at udnytte udsving i spotpriserne. Driften af den enkelte varmepumpe optimeres ikke nødvendigvis til den økonomisk bedste udnyttelse af spotprisvariationerne, og det vil fordre en aftale mellem selskab og varmepumpeejers, der regulerer styringsvilkår og varmepumpeejers kompensation for at stille fleksibilitet til rådighed.

En anden styringsparameter kan være lav CO₂, dvs. styring efter maksimal udnyttelse af VE-strøm i stedet for udnyttelse af elprisudsving. Heller ikke i dette tilfælde optimeres varmepumpen til udnyttelse af spotpriser eller lavt energiforbrug.

Præmissen for begge styringsscenarier er, at varmepumpeejers temperaturkomfortintervaller på rumvarme og varmt brugsvand ikke kompromitteres. De baseres også på de samme inputparametre:

- Spotpriser på el time for time det kommende døgn
- Vejrprognoser
- Viden om husets konstruktion og brugernes adfærd
- Aktuelle og historiske målinger af temperaturer, flow og elforbrug
- Varmepumpeejers præferencer.

3.2 Teknologier

For at opnå den ønskede fleksibilitet i elforbruget kan der tages forskellige *teknologier* i anvendelse. Disse kan opdeles efter:

- Type af varmekilde (dvs. type af varmepumpe og eventuelt supplerende varmekilder såsom elpatron og brændeovn)
- Type af varmeanlæg (gulvvarme, radiatorer mm.)
- Regulering af varmeanlæg (kontrolenhed og type af termostat)
- Type af lager (bygningsskonstruktion, vandbeholder mm.)
- Bygningstype (udformning der har betydning for varmebehov og varmelagringsmulighed).

Der er forskellige *parametre*, der skal tages hensyn til ved udnyttelse af fleksibelt elforbrug, bl.a.:

- Variation af elpriser
- Brugs- og komfortmæssige konsekvenser
- Udeklimamæssige forhold.

Nedenfor er skitseret en række muligheder, der kan tages i anvendelse og problemstillinger, som skal afklares for at opnå et fleksibelt elforbrug i den beskrevne sammenhæng. Beskrivelsen er ikke

stringent efter teknologiområde, men søger at beskrive en række muligheder i lyset af sammenhængen mellem teknologi og brugsmæssige og omgivende forhold.

1. Elprissignaler

Elforsyningssystemets omkostninger for at levere el varierer løbende, bl.a. påvirket af vindforholdene. Ved at fastlægge og udsende elpriser med et vist varsel kan elforbrugerne få et økonomisk incitament til at styre og optimere elforbruget i hensigtsmæssig retning. Jo større variationer i elprisen og jo oftere der forekommer ændringer, jo mere vil der kunne opnås ved en styring og optimering. Hvis variationen er lille og sjældent forekommende, vil der ikke være et stort incitament til at styre elforbruget.

2. Varmelager

Den første umiddelbare mulighed for at opnå fleksibilitet vil være at have et decideret varmelager tilknyttet varmepumpen, som kan tages i anvendelse. Varmelageret kan være en væskebaseret beholder, hvori der kan lagres varme på et tidspunkt, og hvorfra der kan tappes varme på et senere tidspunkt /7/. En fordel er, at der normalt ikke er nogen komfortmæssige gener. Ulemperne vil være omkostningerne til investering i lageret, der skal have en vis størrelse, for at der opnås en rimelig virkning, og til et lidt forøget varmetab samt ekstra pladsforbrug. En strategi for drift af lageret kan være at fylde varme på lageret, når elprisen er lav og bruge den akkumulerede varme ved høje elpriser. En anden strategi kan være at have lageret permanent opvarmet. Hvis elprisen stiger over et vist niveau, kan der så anvendes varme fra lageret. En tredje mulighed kan være at tage varme til varmepumpen fra lageret, hvis temperaturen af varmelageret ikke er tilstrækkelig høj, og derved opnå en væsentlig bedre nyttevirkning af varmepumpen i en periode end ved at tage varmen fra jordslanger. Derved opnås et reduceret elforbrug i en periode.

3. Elpatron

En mulighed er at benytte en elpatron i forbindelse med varmepumpen. Dette gøres i en del tilfælde, for at selve varmepumpen ikke bliver overdimensioneret, hvilket både medfører en merinvestering og normalt også en lavere COP pga. flere start/stop – sidstnævnte problem lidt mindre udtalt på behovstyrede varmepumper. I mange tilfælde kan det forudses, at der er behov for at anvende elpatronen på et senere tidspunkt. Er dette tilfældet, kan det måske betale sig at planlægge brug af elpatron til tidspunkter, hvor elprisen er billigere, eller benytte varmepumpen til at opvarme et lager. Er elprisen meget lav, kan der måske afsættes varme fra både varmepumpe og elpatron, hvilket kan give mening, hvis det vides, at elprisen stiger meget senere på dagen. Aktivering af elpatronen på et højpristidspunkt bør undgås både af hensyn til driftsøkonomien og til stabiliteten i elforsyningen, idet den høje pris netop ofte afspejler aktuelt høje marginalomkostninger for at producere og distribuere energi. Endelig er der i nogle varmepumper indbygget mulighed for en temperaturgymnastik, som hæver temperaturen mindst hver 14. dag for at undgå problemer med legionella (den såkaldte ”legionella-kur”). Dette kan planlægges til tidspunkter med lave elpriser.

4. Medvirken fra brugeren

Ovennævnte metodikker vil ikke nødvendigvis give ændringer for brugeren. Tillades derimod en vis grad af medvirken fra brugeren, vil der være en række muligheder for at reducere og flytte elforbruget.

Medvirken af brugeren kan ske på forskellig vis:

- Ændringer i grænser for setpunktstemperaturer af:
 - Rumtemperaturer, radiatorer

- Rumtemperaturer, gulvvarme
- Tidsmæssigt varierende setpunktstemperaturer
- Rummæssigt varierende setpunktstemperaturer.

Der kan tænkes forskellige former for medvirken. Under alle omstændigheder skal der indgås en aftale med elleverandøren om vilkårene for medvirken. Der skal være en form for incitament, når en sådan aftale indgås. Forbrugeren bør også have mulighed for at overstyre en central styring (scenariet med *direkte* styring, se afsnit 3.1), da der kan være tidspunkter, hvor brugeren har et særligt stort behov for opvarmning (omvendt kan den ansvarlige for elnettet have behov for at lægge restriktioner på varmepumpens drift af hensyn til nettets stabilitet, hvilket dog ligger uden for rammerne i nærværende undersøgelse. I kap. 7 er præsenteret en analyse af udfordringerne for netselskaberne ved en betydelig udskiftning af olie- og gasfyr med varmepumper).

En mulighed er, at der i hver bolig er installeret en styring; separat eller integreret i varmepumpens styring, som indeholder den nødvendige information til at udføre styringen. I denne kan være indkodet brugerens krav og ønsker til temperaturforholdene. Disse krav skal kunne ændres på simpel vis i en periode, hvor der fx ønskes holdt en højere temperatur i en gildesal eller i et gæsteværelse, hvor der normalt holdes en relativt lav temperatur.

5. Setpunktstemperaturer

Mange varmeanlæg bliver i dag brugt således, at rumtemperaturen bliver holdt relativt konstant og relativt ensartet fra rum til rum. Der er dog en tendens til, at nogle holder en permanent lavere temperatur i mere perifere rum og højere temperatur i andre rum, fx badeværelser. Ved at tillade en vis variation i setpunktstemperaturerne vil det være muligt at lagre varme eller udsætte et varmekonsum. En variation af temperaturerne kan have betydning for brugernes termiske komfort. Ved at begrænse temperaturvariationerne kan indflydelsen på den termiske komfort være acceptabel. Det kan forventes, at de acceptable ændringer fra den optimale temperatur ligger i området 1-3 K, se bilagsrapport /1/. De aktuelle grænser vil være meget individuelle fra person til person – både med hensyn til optimal temperatur og med hensyn til, hvor store afvigelser fra den optimale temperatur, der kan accepteres. I bilaget er der diskuteret, hvor stor en temperaturvariation, der kan forventes at være acceptabel.

Hvis brugeren er interesseret i at deltage aktivt, kan setpunkterne varieres med døgnrytmen og med en variation fra rum til rum. Typisk kan der tillades lavere temperaturer om natten i soverum. Der kan også tillades periodisk højere temperaturer i rum, hvor der ikke er ophold om natten, fx i stuen.

Tilføres ekstra varme til perifere rum uden ophold, kan der også tillades en højere temperatur her. Dette vil dog give et ekstra varmetab gennem den del af klimaskærmen, som ligger ud for det perifere rum, men giver samtidig en varmelagring, som kan komme den øvrige del af huset til gode på et senere tidspunkt. Denne form for lagring giver et ekstra varmetab, som bør tages hensyn til ved en optimering.

Eksempel: Hvis der i et gæsteværelse stoppes med opvarmning, og de omgivende rum holder en uændret temperatur, vil temperaturen i gæsteværelset falde mindre stejlt og til et højere niveau, end hvis opvarmningen stoppede samtidig i hele huset, fordi der vil blive afgivet varme fra de omkringliggende rum til gæsteværelset. Når elprisen igen er billig, kan der opvarmes i gæsteværelset. Denne opvarmning vil modvirke det varmetab, der ellers sker fra de øvrige rum til gæsteværelset og til det fri. Det samlede varmetab kan blive lidt større, men dette skal kompenseres af en lavere elpris.

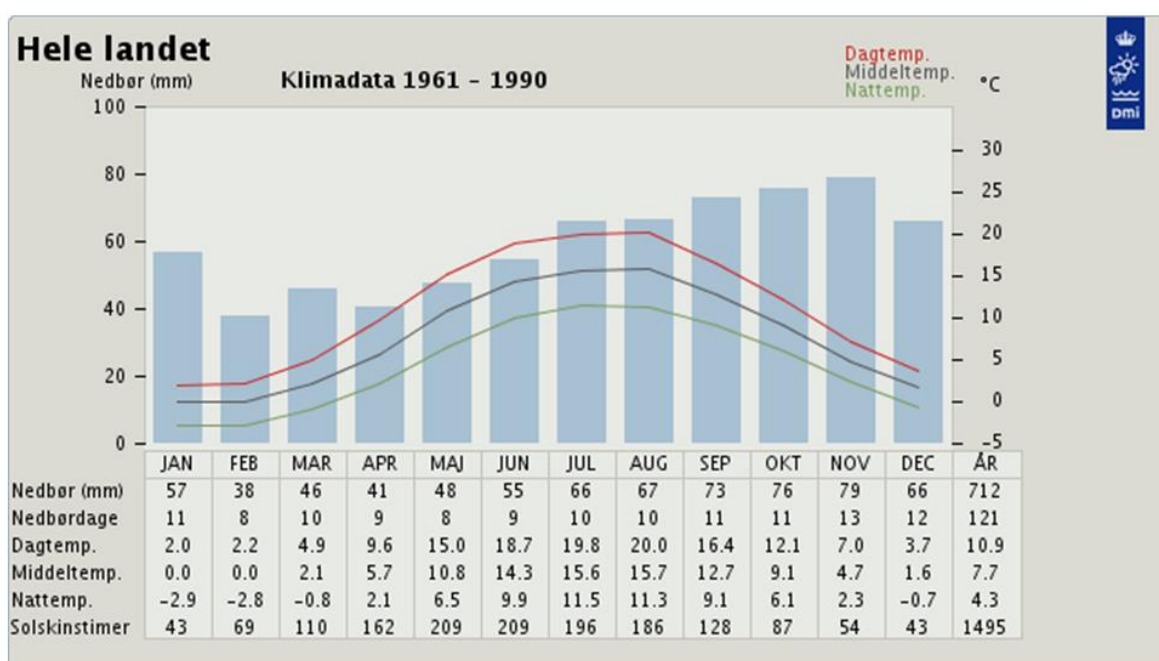
6. Supplerende varmeanlæg

En mulighed er at kombinere med andre former for varmeanlæg som fx brændeovne. Der kan være en form for signal, fx en lille grøn lampe eller en app, der fortæller, hvornår det er en god ide at tænde for brændeovnen. Der kan også indbygges en styring, som medfører en relativt lav temperatur ved høje elpriser i de rum, som kan opvarmes med brændeovn. Dette vil give et incitament til at tænde brændeovnen.

7. Styring af varmetilførslen

Udeklimaet har indflydelse på varmebehovet. Det har også betydning for nyttevirkningen af varmepumper, specielt for luft/vand varmepumper. De udeklimaparametre, som har størst betydning, er udetemperaturen, solindfaldet, vindhastigheden og vindretningen. Der er en døgnvariation på mellem 4-9 K mellem maksimal og minimal udetemperatur (se figur 3.1).

Klimanormaler for Danmark



Figur 3.1 Gennemsnit af dag-, middel- og nattemperaturer. Kilde: DMI /22/

Hvis der sker lagring af varme til senere brug, vil det være en fordel at kunne prognosticere udeklimaet (kan eventuelt hentes automatisk fra DMI), så størrelsen af og tidspunktet for den nødvendige varmetilførsel kan optimeres. Nyttevirkningen af hele varmepumpesystemet vil kunne optimeres sammen med oplysninger om forventet udeklima og elpriser.

8. Styring af varmepumpen

Nogle varmepumper kan kapacitetsreguleres (variabelt omløbstal) i stedet for at blive styret on/off. Er varmepumpen kapacitetsreguleret, vil dens effektivitet afhænge af driftspunktet og der vil være et optimalt driftspunkt. Nogle gange kan det være bedre med en stor effekt med en lidt lavere effektivitet, mod til gengæld at undgå brug af elpatronen.

Varmepumpens effektivitet vil også afhænge af varmekilden (jordens eller luftens temperatur), temperaturen varmen skal afgives ved (fx fremløbstemperaturen) og hvor meget kapacitet varmepumpen skal levere.

Ved store varmebehov, der overskrider varmepumpens maksimale kapacitet, vil elpatronen blive indkoblet, såfremt en sådan er monteret i varmepumpen.

Ved at prognosticere varmebehovet vil det være muligt at styre således, at der arbejdes mest muligt tæt på det optimale driftspunkt og at elpatronen anvendes mindst muligt.

Ved svingninger i varmebehovet, som varmepumpen skal dække, kan der være en reduceret COP eller et behov for en varmepumpe med større kapacitet.

Ved styring af varmepumpen er det også nødvendigt at tage hensyn til det ekstra slid på varmepumpen ved høje driftstemperaturer. Det er bl.a. årsagen til, at der ofte benyttes en elpatron til at løfte temperaturen det sidste stykke i de tilfælde, hvor der fx skal foretages legionellagymnastik med en hævnning af varmtvandstemperaturen til fx 65 °C, for derved at reducere slitage og af hensyn til rent køletekniske begrænsninger.

9. Styring af varmeanlægget

Det vil være optimalt, at varmeafgiverne er ensartet dimensioneret, således at der kan opnås en god afkøling i alle varmeafgiverne. Hvis varmetilførslen koncentrerer om nogle få rum og nogle tidsmæssigt begrænsede perioder, vil dette mindske afkølingen i varmeafgiverne. Dette har indflydelse på nyttevirkningen af varmepumpen og bør indregnes ved en optimering af systemet. Alternativt kan størrelsen af varmeafgiverne øges, så de svarer til de forventede variationer i varmeafgivelsen på grund af varmelagring eller ved genopvarmning efter reducerede rumtemperaturer. En større varmeafgivelse fra varmeafgiverne vil også give en generelt højere virkningsgrad på varmepumpen.

10. Termostater

Mulighederne for styring afhænger af de valgte termostater på varmeafgiverne.

Termostater på gulvvarmeanlæg giver normalt gode muligheder for regulering af varmen, hvis termostaterne styres centralt på grundlag af rumfølere.

Traditionelle *selvregulerende termostater* på radiatorerne vil give mulighed for at sænke rumtemperaturerne ved at stoppe eller reducere varmetilførslen. Der vil derimod ikke være mulighed for at tilføre mere varme ved at hæve rumtemperaturerne, idet termostaterne så vil stoppe varmetilførslen.

Anvendes derimod *elektroniske termostater*, der kan fjernstyres, vil der være langt bedre mulighed for en mere nuanceret styring, som kan være individuel i forhold til rummene. Reguleringen kan gøres mere præcis end selvregulerende termostatventiler, og den vil både kunne regulere temperaturen op og ned og dermed både medvirke til at kunne lagre varme og til at kunne stoppe varmetilførslen. Der behøver ikke nødvendigvis at være en elektronisk termostat for hver eneste radiator. Flere eller alle radiatorer i samme rum kan være koblet til den samme termostat. Det vil også være muligt at reducere antallet af elektroniske termostater ved kun at anbringe dem i de største rum eller i rum med et stort varmebehov. For at undgå at trække ledninger kan der anvendes elektroniske termostater på radiatorerne, som er trådløse og batteridrevne og som skulle kunne regulere temperaturen inden for 0,5 K. Batterilevetid forventes at være på op til to år.

4 Demonstration og test

I projektet er gennemført demonstration og test på et antal udvalgte huse. Formålet med undersøgelserne og baggrunden for den valgte metode og tilgang til test og dataanalyse beskrives. Proceduren for udvælgelse af huse blandt de 300 demohuse fra SDVP gennemgås. Derefter følger selve dataanalysen med en mere detaljeret gennemgang af teori og metode samt resultaterne af analysen. Kapitlet afrundes med en opsummering af de vigtigste konklusioner omkring husenes varmelagringsegenskaber og hvad der heraf kan udledes omkring potentialet for fleksibelt elforbrug i individuelle varmepumpeinstallationer.

4.1 Formål med demonstration og test

Et af formålene med projektet er at undersøge og teste de termiske egenskaber for huse, udtrykt ved evnen til at lagre varme. Denne evne er en afgørende forudsætning for, at varmepumperne vil kunne bidrage til at øge anvendelsen af vedvarende energi og med fleksibilitet til elsystemet.

Mere konkret analyseres forløbet af temperaturfaldet i huset efter et stop af varmepumpen henholdsvis temperaturstigningen efter genstart. Jo langsommere temperaturændringer, desto større fleksibilitet i elforbruget.

Varmelagringsevnen for et hus beskrives ved varmekapacitet og varmetab, som tilsammen danner en tidskonstant (se afsnit 4.4.2 og bilagsrapporten /2/ for uddybning af teorien). En anden egenskab, der ønskes undersøgt, er tidsforsinkelsen fra varmetilførslen til huset stopper eller starter, til dette begynder at påvirke rumtemperaturerne. Tidsforsinkelsen kan give et ekstra tidsrum, hvori varmepumpen kan slukkes. Størrelsen af tidsforsinkelsen afhænger af det aktuelle tidspunkt, som varmepumpen slukkes på. Sker stoppet af varmepumpen, lige før varmepumpen ellers ville blive stoppet, kan der forventes en relativt stor tidsforsinkelse. Hvis modsat at varmepumpen stoppes lige før, at den skulle starte igen efter et stop, kan der kun forventes en lille eller ingen tidsforsinkelse.

Ud over at få mere viden om varmelagringsevnen som grundlag for vurdering i en større sammenhæng af individuelle varmepumpers potentiale for at øge anvendelsen af vedvarende energi og bidrage med fleksibilitet, tjener undersøgelsen endnu et formål. Som beskrevet i kapitel 3, medfører intelligent styring af varmepumperne, at der løbende skal laves en driftsplan med henblik på optimering af driften ud fra et sæt kriterier. Input hertil er driftsmålninger, elprissignaler, vejrprognoser, brugerpræferencer og stamdata for boligen, brugerne og varmepumpeinstallationen.

Algoritmen til beregning af driftsplan og styring vil skulle bygges op omkring en matematisk model af de termiske egenskaber af det enkelte hus. Jo mere præcis viden om tidskonstant (og tidsforsinkelse), desto mere optimal en driftsplan kan opnås. Bedst resultat vil kunne opnås, hvis algoritmen gøres adaptiv, dvs. at der løbende udføres en systemidentifikation ud fra måledata, og den deraf opnåede viden om husets grundlæggende egenskaber – og også brugsmønsteret – benyttes derefter til justering af parametrene i modellen.

4.2 Metode for undersøgelse af de termiske egenskaber for et hus

Tidskonstanten for et hus kan bestemmes teoretisk ved beregning ud fra stamdata om bl.a. areal, let/tung konstruktion og isoleringsstandard. Dette kan gøres med en relativt god nøjagtighed. Bestemmelsen kan også ske ved at udføre test og efterfølgende analysere udvalgte måleserier af rumtemperaturer og udetemperaturer for huset. Testen går ud på at tvangsstoppe varmepumpen over et

lidt længere tidsrum, efter at den har været i normal drift for derefter at frigive den til normal drift igen. Jo koldere vejr under testen, desto større temperaturforskel er der mellem inde- og udetemperaturer og desto mere præcist kan tidskonstant og tidsforsinkelse bestemmes. Desuden reduceres betydningen af måleusikkerheder. Den detaljerede analyse af målingerne fra temperaturfølerne gennemføres for et tidsinterval på nogle dage fra før starten af et forsøg henover stopintervallet til et par dage efter, hvor alle temperaturer atter er normale. Derefter kan de teoretisk bestemte tidskonstanter sammenholdes med tidskonstanterne bestemt ved analyse af målingerne.

4.3 Udvalgelse af huse til undersøgelse

Et antal huse blandt de 300 anlæg i demonstrationsprojektet blev udvalgt til undersøgelsen.

Husene er fordelt i to grupper. I den ene gruppe har husene standardmåleudstyr, som det blev installeret fra starten i projektet ”Styr Din Varmepumpe”, dvs. med kun én rumtemperaturføler. I den anden gruppe er der gennemført mere detaljerede målinger af rumtemperaturer. I alt blev udvalgt ca. 20 huse, dels bestemt af tidsmæssige og økonomiske rammer og dels ud fra følgende egnethedskriterier:

- Fordeling på forskellige gængse hustyper
- Fordeling på forskellige gængse typer varmepumper
- Historiske måleserier over længere perioder med sandsynlige og pålidelige målinger inden for normale intervaller.

I afsnit 4.3.1 beskrives installation og måleudstyr for de to grupper huse og derefter beskrives i afsnittene 4.3.2 og 4.3.3 udvælgelsen af hver af de to grupper mere detaljeret.

4.3.1 Installation og måleudstyr

Omfanget af målepunkter i et hus fremgår af figur 4.1, både i standardversionen og i den detaljerede version. Som det ses, er der i standardversionen kun én rumtemperaturføler. I husene med de mere detaljerede målinger er der installeret 6 til 7 ekstra rumtemperaturfølere.

Der blev aflagt besøg i husene, hvor der blev gjort forskellige observationer som supplement til og for korrektion af de allerede registrerede stamdata. Husene blev gennemfotograferet og ejeren blev udspurgt om detaljer vedrørende husets konstruktion, varmepumpe og brugsmønster. Der blev installeret 6 til 7 ekstra temperaturfølere strategisk placeret i forskellige rum og det blev tjekket, at stop/start af varmepumperne kunne fjernstyres, så der kunne udføres tvangsstopptest uden manuel indgriben fra ejeren. Endelig blev supplerende information om husene fremskaffet via BBR.

Dermed var der gjort klar til, ved fjernstyring via LIAB-boksen, at udføre forsøg med tvangsstop af varmepumpen et antal timer efter aftale med varmepumpeeieren.

I et appendiks (kap. 11) er metoden til validering og supplerings af stamdata, til test og til databehandling af måledata beskrevet gennem et eksempel for et af husene.

Tilsvarende analyser for de andre huse er beskrevet detaljeret i en separat bilagsrapport /2/.

4.3.3 Huse med én temperatursensor

Disse huse blev ikke aflagt besøg og udvælgelsen skete alene ud fra stamdata og fra vurdering af måleserier over tidsforløb, hvor varmepumpen har været tvangsstoppet. Stoppene er udført i forbindelse med fjernstyring af varmepumperne gennemført under IFIV-projektet (se forordet).

Firmaet Neogrid (partner i IFIV-projektet) har leveret en logfil med 65.000 scenarier over styring af varmepumper placeret i hele landet. Start/stop-scenarierne har fundet sted i perioden fra 2012-2014 og er af variabel længde og tid på dagen.

Logfilen er benyttet til at opstille følgende kriterier for udvælgelsen af huse og relevante måleserier til analysen af tidskonstanterne:

- Periodelængden mellem start og stop af varmepumpen er mellem 3 og 12 timer. Baggrunden er, at der i næsten alle tilfælde kan accepteres en afbrydelse af varmepumpen på op til 3 timer. En afbrydelse der er større end 12 timer vil normalt ikke være relevant.
- Varmepumpestoppet er sat i gang efter kl. 16:00 og før kl. 05:00. Lange perioder, som går fra tidlig morgen og ud på eftermiddagen, er fravalgt for at undgå for store forstyrrelser fra solindfald gennem vinduerne.
- De udvalgte måleserier ligger i månederne fra november og frem til marts for at have tilstrækkelig lave udetemperaturer; helst 5 °C eller lavere. I nogle af tilfældene har det vist sig nødvendigt at medtage målinger med udetemperaturer et par grader over det ønskede. Ved efterfølgende at se på de udvalgte data, kunne det konstateres, at afbrydelserne i perioden december til marts har været af relativt kort varighed. Typisk mindre end 4 timer. Derfor er der også udvalgt en række eksempler i månederne november 2013 og april 2014.

I alt blev udvalgt 9 huse i denne gruppe.

4.4 Dataanalyse

Her følger selve dataanalysen med en mere detaljeret gennemgang af teori og metode, udførte test samt resultaterne af analysen.

4.4.1 Introduktion til målingerne

Af de 11 huse, hvor der, som beskrevet i afsnit 4.3.2, er installeret ekstra temperaturfølere, er udvalgt 5 til de følgende analyser. For de øvrige huse var det ikke muligt at udføre test under tilfredsstillende betingelser. Således lå udetemperaturen næsten uafbrudt ekstremt højt for årstiden og det var en stor udfordring at finde tidspunkter, hvor temperaturen lå lavt i tilstrækkelig mange timer og hvor det samtidig var acceptabelt for husejerne, at varmepumpen blev tvangsstoppet med risiko for, at indetemperaturen kom under den nedre komfortgrænse. Men installationen af ekstra temperaturfølere, også i de huse hvor der ikke blev udført test, har alligevel betydelig værdi, da målingerne under normal drift fortsætter fremover. Pålideligheden af målingerne og kvaliteten af stamdata blev kontrolleret ved besøgene i husene og der genereres derfor måledata af høj kvalitet over meget lange tidsrum, som vil kunne benyttes i senere analyser og test med intelligent fjernstyring.

Den næste serie omfatter de 9 udvalgte huse bestykket med standardudgaven af måleudstyret, dvs. med én indetemperaturføler.

4.4.2 Analysemetode

Den nøgleparameter, der er fokus på i analyserne, er hastigheden af faldet af rumtemperaturerne. På grundlag af forløbet af rumtemperaturerne bedømmes tidskonstanter fra måledata. Der bestemmes ligeledes teoretiske tidskonstanter ud fra informationer om de specifikke huse.

4.4.2.1 Tidskonstanter i bygninger

Tidskonstanterne er opstillet ud fra teori om varmelagring i bygninger og giver et simplificeret udtryk for temperaturfaldet i afhængighed af udetemperaturen (se bilagsrapport /1/). Tidskonstanten kan beskrives ved

$$\tau = \frac{C}{H} \quad (1)$$

hvor C er varmekapaciteten i bygningen og H er det specifikke varmetab.

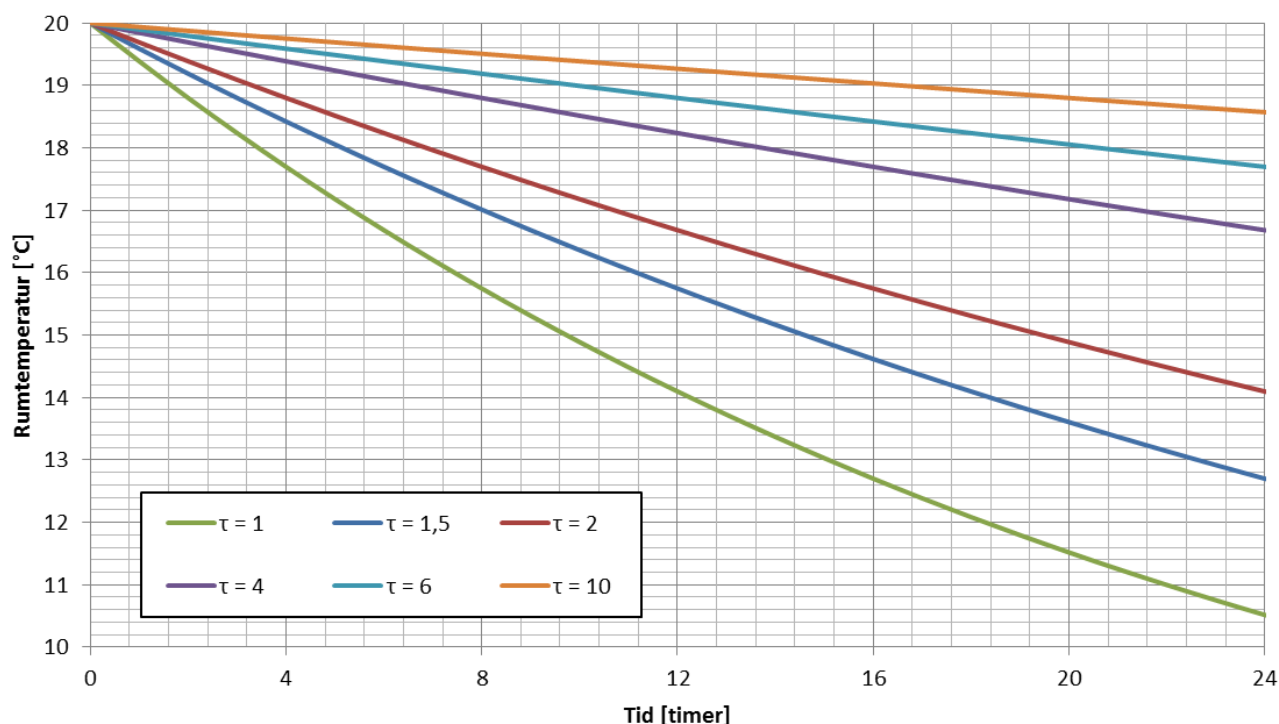
Temperaturen i bygningen (θ_i) ved stop af varmetilførslen kan beskrives ved

$$\theta_i = (\theta_{i0} - \theta_e) \cdot e^{-(t/\tau)} + \theta_e \quad (2)$$

hvor θ_{i0} er starttemperaturen, θ_e er omgivelsernes temperatur og t er tiden efter stoppet af varmetilførsel.

Eksempel på tidskonstanter

For at få et overblik over tidskonstanternes størrelse og deres indflydelse på rumtemperaturen, er der på figur 4.2 vist seks tidskonstanter (τ) variende fra 1 til 10 døgn. Starttemperaturen i rummet er sat til 20 °C, hvilket er normal opvarmning i familiehuse. Udetemperaturen er sat til 5 °C.



Figur 4.2: Illustration af forskellige tidskonstanter (τ) udtrykt i døgn. Figuren viser rumtemperaturens fald fra en starttemperatur på 20 °C som funktion af tiden. Udetemperaturen er 5 °C.

Figur 4.2 viser, at hvis der tillades 2 K rumtemperaturfald, og udetemperaturen er 5 °C, vil der ved en tidskonstant på 1 døgn gå 3,2 timer, før grænsen nås. Er tidskonstanten 2 døgn, tager det 6,5 time, imens det ved en tidskonstant på 4 døgn tager 13 timer.

4.4.3 Tidskonstanter bestemt fra måledata

For at kunne generalisere temperaturfaldet er der ud fra måledata søgt bestemt både en tidsforsinkelse, hvor temperaturen ikke falder og en tidskonstant, der bedst muligt beskriver forløbet af temperaturfaldet efter tidsforsinkelsen. Ved at bestemme disse størrelser vil det være muligt med tilnærmelse at kunne forudsige temperaturfaldet ved andre udetemperaturforhold.

4.4.4 Teoretisk tidskonstant

For hvert af de analyserede huse er der søgt bestemt de teoretiske tidskonstanter. Disse er baseret på en beskrivelse af de enkelte indvendige bygningsdele i husene, som er benyttet til at finde varmekapaciteterne for de enkelte bygningsdele (som beskrevet i afsnit 4.7 samt /20/ og /24/). Med standardforudsætninger for bygningernes indvendige geometriske udformning er der beregnet en samlet varmekapacitet for hele huset. Varmekapaciteten opgøres pr. bruttoetageareal.

Den anden parameter, der skal bestemmes for at finde husets tidskonstant teoretisk, er det specifikke varmetab pr. etageareal (se ligning (1)). Det bestemmes på tre måder (metode A, B og C). Ved den ene metode benyttes varmepumpens kapacitet (metode A). Denne bør i det store og hele svare til det dimensionerende varmetab. Varmepumper dimensioneres typisk med en kapacitet lidt mindre end det dimensionerende varmetab, men da der kan være spring i modelstørrelser og indregning af behov til opvarmning af varmt brugsvand, vurderes det, at varmepumpernes kapacitet vil være et godt udgangspunkt for bestemmelsen af det dimensionerende varmetab.

Den anden måde til fastlæggelse af det dimensionerende varmetab er en generisk bestemmelse ud fra analysen af energimærker, der viser afhængigheden af opførelsesår. En række af bygningerne er dog energirenoverede og dette vil reducere varmetabet. Ved metode B er det specifikke varmetab beregnet på baggrund af opførelsesåret og ved metode C er beregningen sket på baggrund af renoveringsåret. Med disse tre metoder kan der bestemmes tre teoretiske tidskonstanter. Disse vil blive sammenstillet med de analytisk fundne tidskonstanter baseret på målingerne for at se, om der kan observeres en sammenhæng.

4.5 Analyse af målte data

For hver bygning vurderes de målte temperaturer og varmeafgivelser først visuelt. Der udvælges et tidsinterval omkring afbrydelsen af varmen. Det har en udstrækning, der starter ved det første hele døgn før afbrydelsen og strækker sig til det efterfølgende hele døgn efter afbrydelsen. Det er derved muligt at vurdere, hvordan rumtemperaturerne varierer normalt og se på variationen af udetemperaturen. Det er også muligt at se, hvor hurtigt rumtemperaturerne bliver normale igen efter afbrydelsen af varmepumpen.

Tidspunktet for afbrydelsen af eltilførslen til varmepumpen bestemmes. Dernæst ses på temperaturkurverne. Det tidspunkt, hvor temperaturen begynder at falde, bestemmes. Forskellen mellem disse to tidspunkter kaldes *tidsforsinkelsen*. Tidsforsinkelsen har forskellige årsager. Det tager et stykke tid, før varmen i selve varmeafgiverne bliver afgivet til rummet, og temperaturen i varmeafgiverne falder væsentligt. Især hvis der er gulvvarme, kan det tage lang tid, før temperaturen begynder at falde. Hvis varmepumpen kører on/off, vil det have betydning, hvornår i en on/off-cyklus, eltilførslen afbrydes. Er varmepumpen tæt på at skulle starte, men alligevel ikke bliver startet, vil temperaturen begynde at falde relativt hurtigt. Hvis det modsatte er tilfældet; at varmepumpen kører og eltilførslen bliver afbrudt tæt på, at varmepumpen alligevel skal stoppe, vil der gå et stykke tid, før et temperaturfald kan registreres. I nogle tilfælde kan tidsforsinkelsen i princippet være negativ, dvs. at temperaturfaldet starter før eltilførslen til varmepumpen afbrydes. I dette tilfælde sættes tidsforsinkelsen til 0.

Når tidspunktet for temperaturfaldets start er bestemt, indlægges en eksponentielkurve, der lader temperaturen falde i samme takt som i målingerne. Værdierne på kurven bestemmes på grundlag af temperaturen ved starten af temperaturfaldet og en gennemsnitlig udetemperatur, som er skønnet ud fra udetemperaturerne under temperaturfaldet og ca. 6 timer før for at tage hensyn til den tidsforsinkelse, der er ved varmetransmission gennem klimaskærmen. I nogle tilfælde er kurven for temperaturfaldet ikke veldefineret, fx hvis der er sket ændringer af forholdene i rummet. For at tage hensyn til dette indlægges i nogle tilfælde kurver, der afgrænser variationen. Ud fra kurverne findes en tidskonstant for temperaturfaldet. Tidskonstanterne afrundes med spring på et døgn for at udtrykke den usikkerhed, de bliver bestemt med. I nogle tilfælde er der også udført en analyse af forløbet af genopvarmningen og bestemt en tidskonstant for dette.

Tidskonstanter for genopvarmning relateres til sluttemperaturen. Sluttemperaturen er sat til temperaturen før afbrydelsen af varmepumpen, som er det bedste bud på en setpunktstemperatur for rummet. De bestemte tidskonstanter for afkøling og genopvarmning kan derfor ikke sammenlignes. Tidskonstanterne er fundet for de rum, hvor det har været muligt. Nogle rum har enten haft slukket for varmen eller det er vurderet, at der har været mulig brug af brændeovn. I disse tilfælde er der ikke indlagt tidskonstanter for opvarmningen.

4.6 Resultater i huse med detaljerede målinger

Nedenfor i tabel 4.1 er vist en sammenfatning af resultaterne fra huse med detaljerede målinger. En beskrivelse af målingerne på de enkelte huse kan findes i bilag /2/.

ID	Bygge- år	VP kapa- citet pr. areal	Start dato	Start tid	Udetem- peratur	Periode længde	Rum	T_start	Tids- forsin- kelse	Tids- kon- stant Temp. Fald	Tids- kon- stant Genopv.
		W/m²	d:m:å	t:m	°C	h	-	°C	h	døgn	h
5791 *)	1912	65	01-04-2014	20:55	4	8	(11) Køkken	19,9		3-3,5	14
							(12) Bad	21,8	2,8	3-3,5	
							(13) Vær. 1 sal, N	19,0	4,2	3,50	
							(14) Vær. 1 sal, S				
							(15) Vær. 1 sal, Ø	18,7	2,5	2,5-3	
							(16) Stue, syd	20,1	2,0	2	6
8480	1948	72	01-04-2014	22:25	3,5	6,5	(11) Vær. kld.				
							(12) Bad	21,7	0,8	2-2,5	
							(13) Vær. 1 sal, N	20,8	1,2	2	
							(14) Vær. 1 sal, S	20,5	2,2	2	
							(15) Entre	17,9	0,2	4	
							(16) Vær. 1 sal, V	20,4	1,5	3	
							(17) Værksted kld.	18,3	1,8	3,5	
431	(1970)	44	01-04-2014	20:25	5	32,5	(11) Sovev.	20,0	0,0	4	14
							(12) Stue	17,5	0,0	3	10
							(13) Bad	20,5	1,2	4	18
							(14) Lars rum	18,6	0,0	4,5	10
							(15) Bryggers	19,8	0,0	4,5	16
							(16) Vær. 1 sal	20,0	0,0	3	10
							(17) Studer	20,2	0,0	3,5	12
1590	(2010)	43	01-04-2014	21:30	3,5	7,5	(11) Kontor, SØ	21,3	0,5	4,0-4,5	
							(12) Bad, Ø	21,1	4,0	8,0-9,0	
							(13) Vær. 1 sal, N	20,5	2,8	5,0-5,5	
							(14) Vær. 1 sal, Ø	21,8	0,2	5,5	
							(15) Vær. 1 sal, SV				
							(16) storrums 1 sal, V	21,0	1,0	3,5-5,0	
8331	(2001)	44	30-01-2014	13:45	-3,5	8,4	(11) Anneks	19,7	1,6	6,5	
							(12) Kontor NV	22,4	0,0	1,5-2	8
							(13) Soveværelse V				
							(14) Bad V	22,2	2,5	4-4,5	16
							(15) Vær. 1 sal, V	20,5	0,7	3,5	10
							(16) Bad entre	21,4	1,0	3,5-4,5	8

*) Areal i alt 170 m², heraf 100 m² i stueetagen, 70 m² på første sal med el-radiatorer

Tabel 4.1. Resultater fra stop af varmepumpe i huse med detaljerede målinger. Tabellen viser husets ID-nr., opførelsesår, varmepumpens kapacitet pr. etageareal, dato og tidspunkt for stop af varmepumpen, gennemsnitlig udetemperatur, afbrydelsesperiodens længde, rumtemperatur ved start af temperaturfald, længden af tidsforsinkelsen før temperaturfald, den fundne tidskonstant for faldet af rumtemperaturerne og tidskonstant ved genopvarmning.

ID	Bygge- år	VP kapacitet pr. areal	Start dato	Start tids- punkt	Ude- tempe- ratur	Periode længde	Tidsfor- sink- else	Tids- konstant
		W/m ²	d:m:å	t:m	°C	h	h	døgn
919	1877	64	03-01-2014	17:35	7,0	4,4	1,75	1-1,5
919	1877	64	26-03-2014	22:40	2,2	4,3	1,67	1,5
919	1877	64	10-03-2014	22:50	2,7	4,2	0,58	1-1,5
3501	1906	63	17-02-2013	00:05	0,8	7,8	0,33	1,5-2
3501	1906	63	28-12-2013	17:15	6,5	4,8	2,00	1,5-2
2201	1913	-	08-12-2013	18:45	7,7	10,5	4,75	3,0-4,0
2201	1913	-	22-02-2014	20:20	4,5	10,8	3,92	5
1041	1920 *)	56	07-02-2013	19:00	-1,0	6,0	3,00	3,0-4,0
7591	1982	57	12-04-2014	19:10	7,0	7,0	3,00	2,0-3,0
141	2000	36	12-04-2014	19:10	7,5	8,0	3,00	4
2501	2001	56	18-04-2014	00:00	6,0	4,0	0,00	4
2501	2001	56	27-02-2014	23:05	5,7	8,3	2,67	4,5
2501	2001	56	12-04-2014	21:00	8,3	7,0	3,83	1,5
496	2010	34	12-04-2014	19:10	7,5	8,0	2,75	5
1391	2010	25	08-11-2013	20:35	7,7	7,8	3,50	6
1391	2010	25	10-11-2013	23:25	5,5	6,3	0,00	5,5
1391	2010	25	13-11-2013	19:10	6,7	5,8	3,17	3,5
*) Renoveret 2010								

Tabel 4.2. Resultater fra stop af varmepumpe i huse med enkelt målinger. Tabellen viser husets ID-nr., opførelsesår, dato og tidspunkt for stop af varmepumpen, udetemperatur, afbrydelsesperiodens længde, længden af tidsforsinkelsen og den fundne tidskonstant for faldet af rumtemperaturerne.

4.7 Teoretisk estimerede tidskonstanter

På grundlag af den opstillede teori for tidskonstanter er der søgt bestemt tidskonstanter efter principperne beskrevet i afsnit 4.4.2 (Analysemetode). Der bestemmes en varmekapacitet og et specifikt varmetab for husene. Data opgøres pr. bruttoetageareal. Varmekapaciteten opgøres ved sammensætning af varmekapaciteter for de enkelte indvendige overflader efter principperne i DS/INF 418-2 /20/. I denne publikation er der givet en række typiske værdier af varmekapaciteten for sammensatte konstruktioner. Publikationen har til hensigt at bestemme varmekapacitet, som kan anvendes som inddata til programmet Be10. Det vurderes, at værdierne også vil give anvendelige resultater i forbindelse med tidskonstanter relateret til varmetabet fra bygninger. For husene med detaljerede målinger er der tegninger og fotos, som kan understøtte fastlæggelsen af, hvilke typer af overflader, der findes i husene. Disse beskrivelser muliggør en bestemmelse af den effektive varmekapacitet for de enkelte overflader (gulve, ydervægge, skillevægge og lofter). Varmekapaciteterne ganges med standardværdier for den andel, de enkelte overfladearealer udgør i forhold til bruttoetagearealet. De enkelte led summeres, og der tillægges en standardværdi på 10 Wh/(m²·K) for at tage hensyn til effekten af inventaret. Den effektive varmekapacitet for huset opgøres pr. bruttoetageareal. Den anden størrelse, der skal findes for huset, er det specifikke varmetab. Ved Metode A bestemmes det på grundlag af varmepumpens kapacitet, der må forventes at være dimensioneret til hele huset. Kapaciteten divideres med bruttoetagearealet og den dimensionerede temperaturforskel på 20-(-12) = 32 K for at finde det specifikke varmetab.

Ved metode B benyttes generiske værdier for det specifikke varmetab, som findes på grundlag af opførelsesåret. Ved metode C anvendes generiske værdier for det specifikke varmetab for det seneste renoveringsårstal.

Data for de generiske værdier stammer fra et antal Energimærker, hvor input til Be10-beregninger er registreret. Alle de fundne data er vist i tabel 3.

Tidskonstanterne fundet ved de forskellige metoder er sammenlignet i tabel 4.3, samt på figur 4.3 og 4.4.

Huse med detaljerede målinger																				
Hus ID	Bygge- år	Evt. reno- vering	Bolig Areal	Gulvvarme	VP. Effekt	Gulve	Ydervæg	Skillevæg	Loft	Gulve	Yder- væg	Skille- væg	Loft	Effektiv varme- kapacitet	Specifikt varmetab Met. A	Specifikt varmetab Met. B	Specifikt varmetab Met. C	Tidskon- stant, Met. A	Tidskon- stant, Met. B	Tidskon- stant, Met. C
Nr.	År	År	m²		kW	Type	Type	Type	Type	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K	Døgn	Døgn	Døgn
5791 +)	1912	2010	170	Ja (primaer)	11	Trægulv m. isol	Murværk	Murværk	Trælister	4,9	37,8	18,9	3,6	68,0	2,0	2,5	0,8	1,4	1,1	3,4
8480	1948	1948	138	Ja (rad. primaer)	10	Trægulv u. isol	Murværk	Murværk	Puds	11,4	37,8	18,9	6,5	75,7	2,3	2,3	2,3	1,4	1,4	1,4
431	1902	1970	193	Ja (badev.)	8,4	Beton	Murværk	Gasbeton	Trælister	73,5	37,8	7,4	3,6	108,4	1,4	2,5	2,0	3,3	1,8	2,3
1590	1995	2010	210	Ja (primaer)	9	Trægulv på isol	Murværk	Murværk	Gips	4,9	37,8	18,9	3,3	67,8	1,3	1,3	0,8	2,1	2,1	3,3
8331++)	1830	2005	273	Ja (primaer)	12	Beton og trægu	Murværk	Murværk	Gips	43,1	37,8	18,9	3,3	99,1	1,4	2,5	1,0	3,0	1,7	4,0
+) renoveret 1981 og 2010 ++)																				
Renoveret 2001 og 2008																				
Huse med én temperaturmåling																				
Hus ID	Bygge- år	Evt. reno- vering	Bolig Areal	Gulvvarme	VP. Effekt	Gulve	Ydervæg	Skillevæg	Loft	Gulve	Yder- væg	Skille- væg	Loft	Effektiv varme- kapacitet	Specifikt varmetab Met. A	Specifikt varmetab Met. B	Specifikt varmetab Met. C	Tidskon- stant, Met. A	Tidskon- stant, Met. B	Tidskon- stant, Met. C
Nr.	År	År	m²		kW	Type	Type	Type	Type	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	Wh/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K	Døgn	Døgn	Døgn
919	1877	1997	188	Ja (Primaer)	12	Beton	Murværk	Gips	Puds	33,2	37,8	6,5	3,3	73,8	2,0	2,5	1,3	1,5	1,2	2,4
3501	1906	1906	190	Ja (rad. primaer)	12	Trægulv u. isol	Murværk	Murværk	Puds	11,4	37,8	18,9	6,5	75,7	2,0	2,5	2,5	1,6	1,3	1,3
2201	1913	2012	182	Ja (Primaer)		Beton	Murværk	Murværk	Puds	33,2	37,8	18,9	6,5	93,6		2,5	0,8		1,6	5,1
1041	1920	2010	142	Ja (primaer)	8	Trægulv på isol	Murværk	Gips	Puds	4,9	37,8	6,5	6,5	53,3	1,8	2,5	0,8	1,3	0,9	2,6
7591	1982	1982	175	Ja (primaer)	10	Trægulv på isol	Murværk	Gasbeton	Trælister	4,9	37,8	7,4	3,6	52,1	1,8	1,7	1,7	1,2	1,3	1,3
141	2000	2000	153	Ja (primaer)	5,5	Beton	Murværk	Gasbeton	Gips	33,2	37,8	7,4	3,3	75,1	1,1	1,2	1,2	2,8	2,6	2,6
2501	2001	2001	180	Ja (primaer)	10	Beton	Murværk	Murværk	Gips	33,2	37,8	18,9	3,3	91,0	1,7	1,2	1,2	2,2	3,3	3,3
496	2010	2010	237	Ja (primaer)	8	Beton	Murværk	Murværk	Gips	33,2	37,8	18,9	3,3	91,0	1,1	0,8	0,8	3,6	4,5	4,5
1391	2010	2010	220	Ja (primaer)	5,5	Beton	Murværk	Beton	Gips	33,2	37,8	16,7	3,3	87,9	0,8	0,8	0,8	4,7	4,3	4,3

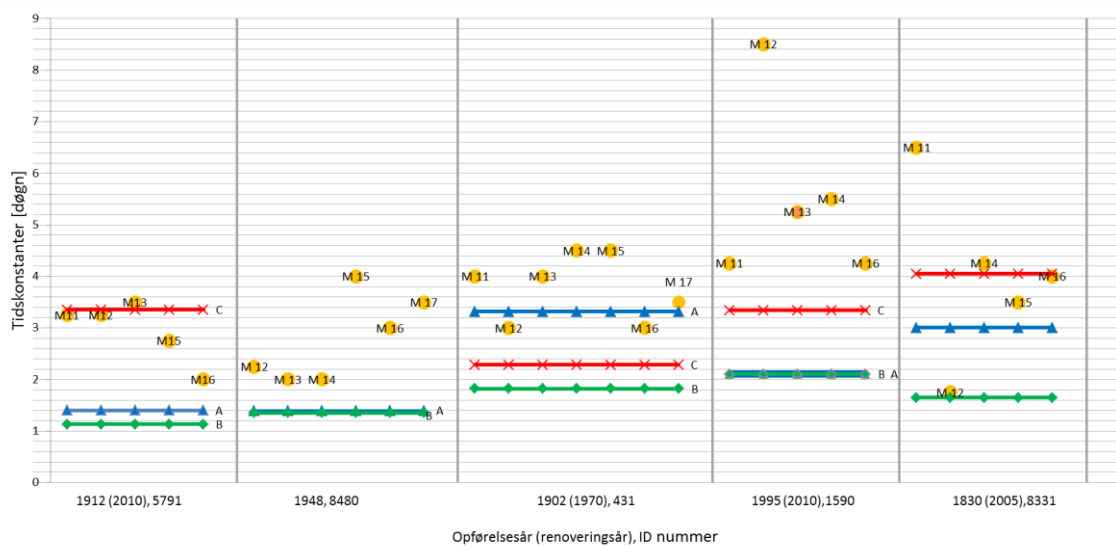
Tabel 4.3. Teoretiske tidskonstanter for huse med detaljerede målinger og huse med én temperaturmåling. Tabellen viser husets ID, opførelsesår, eventuelt renoveringsår (baseret på oplysninger fra brugere eller BBR /23/), boligareal, omfang af gulvvarme, effekt af varmepumpe, type af indvendige overflader for gulve, ydervægge, skillevægge og lofter. Varmekapaciteter af de enkelte indvendige overflader og samlet for bygningen /20/, specifikke varmetab baseret på effekt af varmepumpe (Metode A), ved en vurdering pga. opførelsesår (Metode B) og vurdering pga. renoveringsår (Metode C). Tidskonstanter beregnet ved metode A, B og C er angivet i døgn.

4.8 Konklusioner ved huse med detaljerede målinger

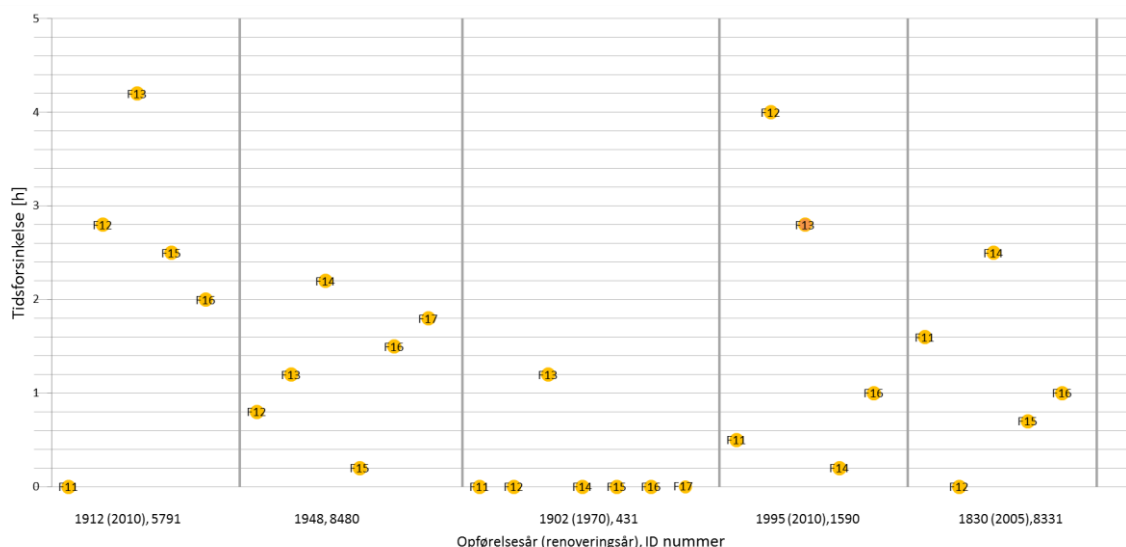
For de fleste rum i husene med de detaljerede målinger (figur 4.3) ses det, at de målte tidskonstanter har en tendens til at være større end de teoretisk bestemte tidskonstanter. Samtidig ses en stor variation i tidskonstanter fra rum til rum.

Variationerne i de målte tidskonstanter fra rum til rum kan skyldes forskelle i udformningen, men også at rummene er opvarmet til forskellige temperaturer. Når varmetilførslen afbrydes, vil der ske en vis temperaturudjævning mellem rummene. Det medfører, at rum opvarmet til en høj temperatur taber varme til naborum, mens rum opvarmet til lavere temperaturer modtager varme fra naborum. Disse forhold medfører en tendens til, at rum opvarmet til høje temperaturer får små tidskonstanter, mens rum opvarmet til lave temperaturer tilsvarende får store tidskonstanter.

De målte tidsforsinkelser mellem stop af varmepumpe og start på fald i temperaturer er vist i figur 4.4. Der ses værdier mellem 0 og ca. 4 timer med en relativt tilfældig spredning inden for dette interval.



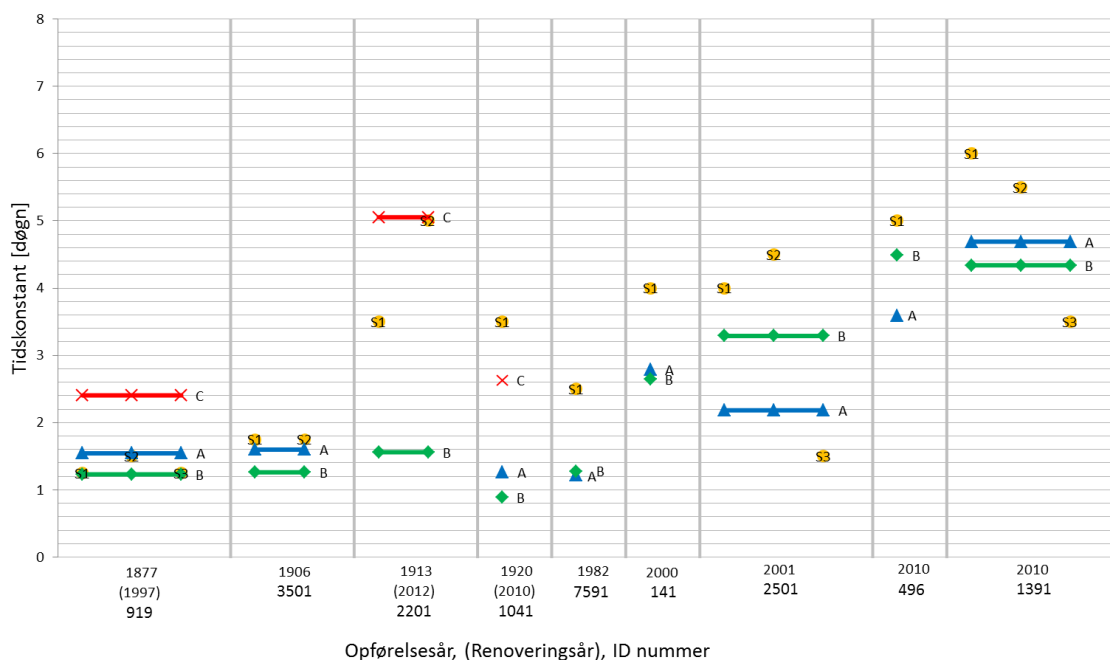
Figur 4.3: Sammenstilling af de målte tidskonstanter for de enkelte rum (M_{xx}) i de 5 huse med detaljerede målinger og de teoretiske tidskonstanter for de enkelte huse



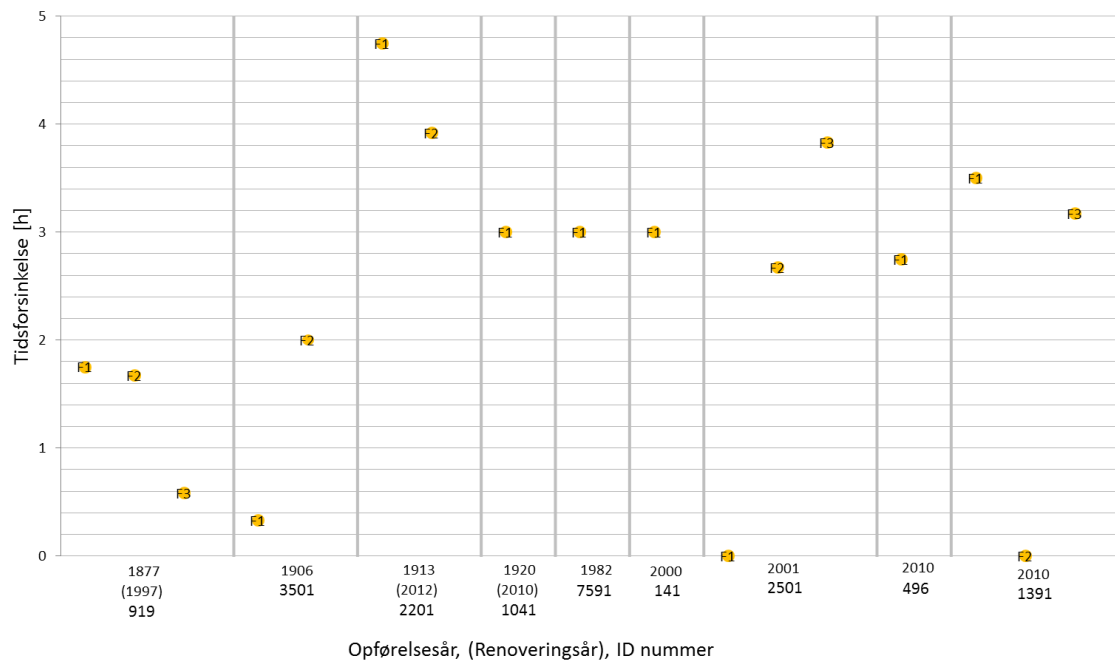
Figur 4.4: Målte tidsforsinkelser (F_{xx}) i de enkelte rum i de 5 huse med detaljerede målinger

4.9 Konklusion på baggrund af enkeltmålingerne

Overordnet set er tidskonstanterne (se figur 4.5) på baggrund af målingerne i nogenlunde overensstemmelse med de beregnede teoretiske tidskonstanter, når der tages hensyn til den store spredning. De målte tidskonstanter har ligget i samme størrelsesorden, men har ikke i alle tilfælde været inden for intervallet skabt af de tre teoretiske tidskonstanter. En årsag til usikkerheden ved sammenligningen mellem de målte og de teoretiske tidskonstanter kan til dels skyldes manglende information om de pågældende huse (byggningsdata og billeder samt placering af temperatursensoren). Derudover er der for nogle af husene med flere perioder med varmepumpestop en stor spredning på værdierne for de målte tidskonstanter. Da der kun er en sensor i hvert hus, samt begrænset information om placeringen af temperatursensorerne eller brugen af bygningerne, er det meget vanskeligt at udtale sig om grunden til forskellene i tidskonstanterne, og hvad der sker i de resterende af husets rum. De målte tidsforsinkelser mellem stop af varmepumpe og start på fald i temperaturer er vist i figur 4.6. Der ses værdier mellem 0 og ca. 4 timer med en relativt tilfældig spredning inden for dette interval.



Figur 4.5: Sammenstilling af de målte tidskonstanter (S_x) i de forskellige afbrydelsesperioder i de 9 huse med enkeltmålinger og de teoretiske tidskonstanter for det enkelte hus



Figur 4.6: Målte tidsforsinkelser (F_x) i de forskellige afbrydelsesperioder i de 9 huse med enkeltmålinger

4.10 Samlet konklusion vedrørende målinger

Samlet set findes der en vis overensstemmelse mellem de målte tidskonstanter og de teoretisk beregnede værdier for tidskonstanter af temperaturfaldet ved stop af varmepumperne. Der er dog observeret en række temperaturvariationer, som ikke følger det forventede forløb, hvor der kan sandsynliggøres, men ikke dokumenteres, en årsag, og som derfor må tilskrives brug af bygningen, fx anvendelse af ovne, elapparater eller udluftning af rummene.

Der tegner sig et billede af, at de målte tidskonstanter i mange tilfælde ligger noget over, hvad der teoretisk kan bestemmes. Derudover er der i mange tilfælde en tidsforsinkelse mellem stop af varmepumpen og starten på faldet i temperaturerne.

Til trods for spredningen af resultaterne skønnes det, at der kan tegnes et rimeligt billede af, hvorledes tidskonstanterne afhænger af de teoretisk bestemte værdier. I de situationer, hvor der har været lavere tidskonstanter end forventet ud fra teoretiske overvejelser, har der samtidig været en væsentlig tidsforsinkelse fra stop af varmepumpe til start af temperaturfald. Dette forhold skyldes sandsynligvis, at der har været en varmetilførsel af kortere varighed, som ikke har opvarmet de tungere bygningsdele og som derfor hurtigt afgiver varme til omgivelserne, hvilket medfører en tilsyneladende mindre tidskonstant.

Den tidsforsinkelse, der har været mellem stop af varmepumpe og fald af rumtemperaturerne, har ligget mellem 0 og helt op til ca. 4 timer. Det er overraskende lang tid i forhold til, hvad der var forventet.

Med de opnåede resultater vil det kunne forventes, at der kan findes et dækkende billede af tidskonstanter generelt, og at der i en konkret bygning kan bestemmes en tidskonstant med en rimelig

tilstrækkelig nøjagtighed ud fra viden om relativt få grundlæggende data. De vigtigste data er det dimensionerende varmetab og varmekapaciteten for bygningen.

Der er dog en række forhold, som gør, at der er individuelle variationer i tidskonstanten i det samme hus. Eksempler herpå er:

- Varmeafgivere. Tung gulvvarme vil have større tidskonstant end let gulvvarme, der igen har en større tidskonstant end radiatorer
- Der kan være rum i et hus, som har større varmetab, fx pga. vinduer eller ventilation. Nogle rum kan have mindre varmekapacitet; der kan være møbler som dækker og isolerer bagvedliggende tunge konstruktioner
- Forskelle fra rum til rum og varmeudveksling mellem rum.

4.11 Perspektivering

De udførte undersøgelser viser, at der kan forventes mulighed for at stoppe for varmetilførslen i stor set alle huse i 2 til 6 timer, uden at det vil medføre mærkbare komfortmæssige gener.

For at eksemplificere dette kan der siges, at hvis der i 100.000 enfamiliehuse kan stoppes for varmepumpen i et tidsrum på 3 timer, og at dette giver en reduktion i effektforbrug på 2 kW pr. hus, vil det reducere effektforbruget sammenlagt 200 MW. På 3 timer giver det et flyttet elektrisk energiforbrug pr. hus på 6 kWh og totalt for alle huse på 600 MWh.

Dette kan i princippet gøres hver dag i varmesæsonen. Så pr. år kan det måske være relevant i 50 til 100 dage pr. år. Hvis det gøres i 100 dage pr. år vil det flyttede energiforbrug pr. hus pr. år udgøre i alt 600 kWh.

Jo mere det er muligt at spare, jo flere foranstaltninger vil være relevante. Nogle foranstaltninger vil være relevante af komfortmæssige årsager. "Home automation" kan forventes at få stigende udbredelse. Derved vil det være muligt at styre rumtemperaturer og måske ventilation individuelt efter behov. Dette giver også et godt udgangspunkt for introduktion af styring efter udnyttelse af fleksibelt elforbrug, hvor der samtidig tages hensyn til komfortmæssige forhold.

I rapporten er beskrevet en række muligheder for at opnå fleksibilitet. Det enkleste vil være at slukke for varmepumpen i en periode og derefter starte den igen efter et vist tidsrum. Erfaringen ved måling af rumtemperaturer og udetemperaturer vil kunne give erfaringer for de enkelte huse, således at det i en given situation kan forudsiges, hvor længe varmepumpen kan afbrydes. Er det økonomiske potentiale større, kan der overvejes forceret drift, hvor rumtemperaturerne hæves i perioder med meget billig el, hvis der er en forventning om, at der efterfølgende vil være en periode med dyr el.

Tilsvarende forcering kan også ske ved at hæve temperaturerne i rum, der normalt ikke opvarmes til de normale komforttemperaturer, men hvor rummene er i termisk forbindelse med normalt opvarmede naborum.

Er der installeret brændeovn, solceller og/eller solvarme vil en optimeret drift sammen med disse også have betydning for et maksimalt udbytte.

5 Problemer, barrierer, anbefalinger – erfaringer fra praksis

Individuelle varmepumper blev for en håndfuld år siden spået en hastigt stigende udbredelse som erstatning for olie- og gasfyr, dels fordi økonomien forventedes at udvikle sig gunstigt i forhold til olie og gas, og dels fordi oliefyr gennem lovgivning er på vej til at blive faset helt ud. Markedet voksede betydeligt op til dette tidspunkt. Men derefter har man ikke kunnet indfri forventningerne til væksten. Finanskrisen er formentlig en væsentlig årsag, men kan næppe forklare det hele.

I det følgende gives en række bud på barrierer og problemstillinger, der står i vejen for varmepumpernes fremmarch, både helt generelt men også mere specifikt for Smart Grid-løsninger.

Kapitlet er baseret på oplevelser og synspunkter fra projektpartnerne, heriblandt varmepumpefabrikanterne, samt en række andre aktører med indgående kendskab til varmepumpebranchen, varmepumpeinstallationer i praksis og markedet. Der har i projektforløbet kun i beskeden grad været direkte kontakt til installatørerne, hvis synspunkter derfor ikke er repræsenteret i de følgende vurderinger. Ytringerne fra aktørerne har været næsten enslydende, hvilket styrker udsagnene og giver vægt til diskussionen om, hvordan vejen banes for flere og mere velfungerende varmepumper i elsystemet. Flere af projektpartnerne, primært fabrikanter, har udtalt sig om deres oplevelser i forbindelse med selve projektet og om deres fremtidsplaner omkring Smart Grid, og disse opsummeres kort.

Sidst i kapitlet beskrives kort et par andre faktorer, som ikke er direkte relateret til varmepumper, men som står i vejen for varmepumper og Smart Grid.

5.1 Boligejerens udgangspunkt

Adskillige forudsætninger skal være opfyldt, før udskiftning af et oliefyr (eller gasfyr) med et varmepumpeanlæg vil blive en realitet. Viden, økonomi og proces er tre nøgleord.

5.1.1 Viden

En grundlæggende betingelse for om en boligejer bringes til at overveje udskiftning af oliefyret, er kendskab til og viden om varmepumpen, både teknisk som et alternativ til oliefyret og økonomisk. Flere kilder har udtrykt, at det generelle vidensniveau, trods diverse informationskampagner, stadig er lavt, og valget falder ikke på en varmepumpe, hvis ikke installatøren foreslår det. Kilder i varmepumpebranchen mener heller ikke, at branchen har en klar markedsføringsstrategi og oplever stærk konkurrence fra fjernvarmebranchen, der er bedre organiseret og har langt bedre markedsføring. Kunderne hælder mere til fjernvarme og vælger i mange tilfælde denne løsning (eller andre varmekilder som olie, gas, eller biobrændsel, som alle er nemme at forstå), til trods for at varmepumpen ville have været billigere på længere sigt. Endelig cirkulerer stadig historier om dårlig kvalitet i varmepumperne og om folk, der fryser – enkelte historier er berettigede, men mange har udspring i fortidens anlæg af mere tvivlsom kvalitet.

5.1.2 Økonomi

Afhængig af omstændighederne omkring udskiftning af oliefyret med et varmepumpeanlæg kan det være en udfordring at foretage en økonomisk sammenligning mellem et nyt varmepumpeanlæg og de eventuelt mulige alternativer (bibeholdelse af oliefyret, nyt gasfyr, nyt pillefyr eller fjernvarme), idet en større energirenovering af boligen kan være påkrævet, for at varmepumpen får acceptable driftsbetingelser, hvilket først og fremmest vil sige lav fremløbstemperatur. I øvrigt står boligejeren typisk foran en akut beslutning, når oliefyret på en søndag aften i januar går ned – her er det svært at træffe en langsigtet beslutning og i stedet vælges den nemme løsning. Alternativerne til varmepumpen leverer varme ved høj temperatur og stiller derfor mindre krav til varmeafgiverfladens areal eller

udformning (fx radiatorernes størrelse). Udskiftning med et varmepumpeanlæg kan nødvendiggøre ombygning af varmeafgiversystemet og anden energirenovering af boligen. En investering der samlet kan løbe op, men som alligevel kan være privatøkonomisk ræsonnabel (= forholdsvis kort tilbagebetalingstid), da den modsvares af lavere driftsomkostninger og ofte også af bedre boligkomfort. Uden for områder med kollektiv forsyning vil et pillefyr være et nærliggende alternativ. Investeringen er lavere, men har højere driftsomkostninger og medfører tidsforbrug til den daglige pasning, som bør tages med i overvejelserne ved valg af varmekilde.

Driftsomkostningerne forbundet med udgifterne til olie hhv. el har ikke udviklet sig i favør for el og dermed varmepumperne, som ellers forventet. Olieprisen har ikke fulgt den forventede stigning men er tværtimod faldet ultimo 2014.

Gasselskaberne har indført et gebyr på 5-10.000 kr. for afkobling fra gasnettet. En udgift, der kan lægges direkte på prisen for varmepumpen ved udskiftning af gasfyr.

Et solcelleanlæg kan komplicere økonomiberegningen yderligere. Har boligejeren et varmepumpeanlæg (eller elvarme), ydes der elafgiftsreduktion på elforbrug, der ligger over 4.000 kWh/år. Et solcelleanlæg skærer det årlige elforbrug i toppen – elforbrug der ellers kunne købes til reduceret takst (gældende på tidspunktet for rapportens udgivelse). Dette forøger tilbagebetalingstiden.

Finansiering

Vanskeligheder med finansiering af varmepumperne er af flere kilder blevet fremhævet som en barriere. Som nævnt kan investeringen være stor, og i områder med lave huspriser kan et lån komme til at udgøre så betragtelig en andel af boligens værdi, at bankerne afslår at yde lånet. Måske er dette en af forklaringerne på, hvorfor der ikke er en eneste varmepumpeinstallation fra Lolland, Falster og Møn blandt de 300 demoanlæg.

Solcelleanlæg

Den voldsomme interesse, der opstod omkring solceller i 2011 til 2013, har sandsynligvis også virket til ugunst for varmepumperne. Massive prisfald og afskrivningsmulighed (115 %) kombineret med nettoafregningsordningen favoriserede solcelleanlæg over varmepumpeanlæg og gjorde solcellerne til en mere gennemskuelig, god og sikker privatøkonomisk investering. Bankerne stod i kø for at yde lån. Indtil de politisk bestemte afregningsvilkår blev kraftigt forringet, skete der en ekstrem udbygning med solcelleanlæg. Investeringen i et solcelleanlæg er i samme størrelsesorden som et varmepumpeanlæg og kan have lagt beslag på boligejerens disponible likviditet til varmepumpe og den i mange tilfælde nødvendige energirenovering. Solcelleanlægget er dog, selv på de gamle, gunstige vilkår (indtil ultimo 2012), ikke altid en bedre forretning end varmepumpeløsningen, men nemmere at beregne og med lavere usikkerhed. Desuden har solcelleanlæg en fordel i, at de som oftest er så simple at installere, at to mænd kan klare det på en dag, næsten uden gener for boligejeren.

5.1.3 Proces

Det kan være svært for boligejeren at overskue den samlede proces omkring etablering af et varmepumpeanlæg, både økonomisk og teknisk, hvilket kan påvirke valget af varmekilde. Især hvis det samlede projekt indebærer en energirenovering af boligen med de herved forbundne ombygningsgener i en periode.

Et driftssikkert oliefyr er fristende at beholde i flere år, uagtet at et nyt varmepumpeanlæg måske ville være en privatøkonomisk fordelagtig løsning.

Er oliefyret udtjent, er et relativt billigt og nemt alternativ at udskifte det med et pillefyr, der også er et højtemperaturanlæg og derfor ikke medfører eventuelt nødvendig ombygning af varmeafgiversystemet eller større energirenovering.

5.2 Installation

Mange branchefolk har tilkendegivet, at der er plads til forbedringer i den generelle kvalitet i VP-installationerne. Uafhængige aktører udtrykker direkte, at langt det største potentiale for forbedringer af varmepumpeanlægs COP, driftspålidelighed og tilfredsstillende varmeleverance til kunden ligger i installationsleddet.

Manglende uddannelse kombineret med manglende koordinering og kommunikation imellem de fagspecialister, der er direkte eller indirekte involveret i installationen af varmepumpen og tilhørende varmefordelersystemer, resulterer i den svingende kvalitet af VP-installationerne. I højere grad end det gør sig gældende for oliefyr – eller alternativerne -, kræver varmepumpeanlæg omhyggelighed og kvalitet i design, installation, indregulering og instruktion til forbrugeren for at opnå optimal drift.

Nedenfor beskrives en række synspunkter om ofte forekommende problemer samt forslag til optimering, som de er udtrykt mere eller mindre direkte af forskellige branchefolk. Kun synspunkter, der på forskellig vis er udtrykt fra flere sider (dog uden bidrag fra installatørerne, som nævnt i kapitlets indledning), er taget med.

5.2.1 Generelle erfaringer med kvalitet i installationsarbejde og drift

Der ses (for) mange anlæg, med ikke-optimal dimensionering, fejl i installation eller dårlig indregulering af anlægget. To årsager går igen i udsagnene: For ringe uddannelse af installatørerne og for mange installatører med for lidt erfaring – de installerer for få anlæg. Det er problematisk, fordi installatørerne ud over installationen typisk også forestår rådgivningen til slutkunderne og dimensioneringen af anlæggene, som ofte bærer præg af, at ”vi gør som vi plejer”, baseret på viden om oliefyr, gasfyr og fjernvarme. Flere fabrikanter har taget konsekvensen og stiller skærpede krav til installatørerne. Et eksempel er en fabrikant, der er begyndt at forlange mange flere oplysninger om husene og deres installationer som udgangspunkt for dimensionering, specifikation og projektering af VP-anlæg. Installatørerne finder det tungt, men det har medvirket til at højne kvaliteten mærkbart. Andre fabrikanter tillader ikke installation af VP-anlæg, før installatøren har været på kursus hos fabrikanten selv, eller hvis installatøren ikke er med i VarmePumpeOrdningen (VPO). VPO er en frivillig kvalitetssikringsordning for installatører, som skal medvirke til at sikre høj kvalitet i installation og komponenter samt energieffektiv drift og god økonomi.

5.2.2 Eksempler på hyppigt forekommende problemer omkring installationen

Her følger en række eksempler på hyppigt forekommende problemer omkring installationen.

Varmepumpeanlægget installeres, som om det er et højtemperaturanlæg som det gamle oliefyr. Varmeafgiversystemet er derfor underdimensioneret til en varmepumpeinstallation (særligt forekommende i huse, hvor der ikke er sket en kraftig efterisolering). Rør til varmekredsene er ikke dimensioneret til at føre den væsentligt forøgede vandmængde, hvilket det ofte er undladt at gøre noget ved (der kan være en særlig udfordring i installationen, se senere afsnit).

Samspillet mellem varmepumpen og centralvarmeanlægget fungerer ikke optimalt, med negativ virkning på COP-værdien til følge, fordi man ikke har åbnet rumtermostaterne helt eller meget betydeligt. I en varmeinstallation med oliefyr er fremløbstemperaturen høj og radiatortermostaterne er normalt skruet en del ned. Et varmepumpeanlæg skal af hensyn til COP'en helst levere varme ved en så lav fremløbstemperatur som muligt, og for at radiatorerne kan afgive tilstrækkelig varme, skal flowet hæves og termostaterne stå helt eller meget åbne. Åbnes termostaterne ikke, vil cirkulationspumpen, der kører i ”Auto” og automatisk tilpasser sig trykmodstanden i systemet, ikke øge flowet, og radiatorerne har derfor svært ved at afgive tilstrækkelig varme. Det medfører, at varmepumpen skal have hævet sin udetemperaturkompenseringskurve (og herved

fremløbstemperaturen), hvilket øger elforbruget og giver en lavere COP. En erfaren uafhængig aktør vurderer, at der ofte kan opnås en forbedring på mellem 6-8 % blot ved at åbne op for radiatorventilerne og øge flowet.

Varmepumpeanlæg uden buffer, der direkte forsyner gulvvarmekredse, mangler ordentlig indregulering af udetemperaturkompenseringskurve og af de enkelte kredse trods krav herom i normerne.

Boliger med gulvvarme, der forsynes fra et højtemperaturanlæg, er bestykket med en blandeshunt ved gulvvarmekredsen for at sikre, at gulvtemperaturen aldrig overskrider den maksimale temperatur på fx 37 °C. Når der skiftes til varmepumpeanlæg (med lav fremløbstemperatur, der indstilles på varmepumpen) er blandeshunten overflødig eller direkte skadelig. Den vil altid stå fuldt åben og alt opvarmningsvandet til hele boligen skal passere igennem (en radiatorventil), hvilket giver en unødigt flowrestriktion og forringede driftsbetingelser for varmepumpen. Blandeshunten bør fjernes. Der ses eksempler på, at der installeres en blandesløjfe i helt nye huse med ren gulvvarme og varmepumpeanlæg.

Dertil kommer andre mindre fejl. Et enkelt eksempel er anvendelse af forkerte O-ringe i brine-kredsen; de tørrer ud og bliver utætte.

5.2.3 Problemstillinger ikke knyttet til selve installationsarbejdet

Mange huse fra 1960'erne har et-strengede varmeinstallationer, som kræver en meget høj fremløbstemperatur, hvilket reducerer varmepumpernes effektivitet betydeligt.

Rør fra oliefyr til varmekredsene, der som tidligere nævnt ofte er underdimensionerede til at føre den forøgede vandmængde i et varmepumpeanlæg, kan være omstændelige at udskifte, hvis de fx ligger skjult.

Problemer, som kan medføre meget høje omkostninger til afhjælpning.

5.3 Energi- og uddannelsespolitik – synspunkter fra varmepumpefabrikanterne

Følgende synspunkter stammer udelukkende fra varmepumpefabrikanter.

Flere fabrikanter har en opfattelse af, at det officielle energipolitiske ønske om at fremme udbredelsen af varmepumper ikke understøttes af den førte politik. Fx opleves det, at fjernvarme og naturgas favoriseres gennem energifgifterne. De finder det ikke rimeligt, at der ved nybyggeri fortsat er tilslutningspligt til fjernvarme og naturgas og foreslår den afskaffet. Det foreslås også, at der generelt stilles krav om anvendelse af VE-løsninger, herunder varmepumper, i område 4.

Det anbefales at registrere varmepumpeanlæg i BBR ligesom gasfyr.

Uddannelserne halter, og det gælder både installatører, VE-uddannede og energikonsulenter.

Sidstnævnte gruppe har for lidt viden om varmepumper, og når de i forbindelse med salg af en bolig gennemgår denne, skal det ofte gå stærkt, og så er det nemmest at foreslå de velkendte løsninger.

Konkret foreslås det at gøre uddannelse af installatører obligatorisk og at sikre, at EU CERT og VPO-uddannelserne fungerer sammen. EU CERT er den europæiske brancheorganisation EHPA's installatør-kvalitetssikringsordning, og den er pt. er under implementering i VPO.

Desuden foreslås det at styrke varmepumpeteknologien i VE-uddannelsen i forbindelse med godkendelsesordningen for virksomheder, der monterer små vedvarende energianlæg, og i uddannelsen af energikonsulenterne.

5.4 Øvrige kommentarer vedr. deltagelse i projektet samt overvejelser om Smart Grid

Flere fabrikanter og andre projektpartnere har knyttet kommentarer til deres oplevelser ved at deltage i projektet og til deres syn på individuelle varmepumper i et Smart Grid.

5.4.1 Oplevelser ved deltagelse i VAFE

De fabrikanter, der har rapporteret om deres oplevelser i VAFE – og med hele SDVP-projektet i øvrigt – har alle givet udtryk for, at de har haft nytte af deltagelsen.

I alle tilfælde har det sat gang i tanker om fremtidens krav til varmepumper og om deres individuelle engagement i udviklingen af intelligent styring af individuelle varmepumper.

En håndfuld varmepumpefabrikanter tog mod et tilbud om at få adgang til, efter aftale med den enkelte varmepumpeejers, at følge varmepumper af eget fabrikat og udtrykker tilfredshed med muligheden. Den ultimative fordel er, at de her kan følge varmepumpen online i normal drift i en installation med målinger af temperaturer, flow og elforbrug, og at de kan udtrække historiske værdier og koble disse med klimadata og husenes stamdata. Typisk er data blevet brugt til fra tid til andet at lave et hurtigt tjek på, om varmepumperne kører fornuftigt, enten reaktivt efter en henvendelse fra en kunde eller installatør eller proaktivt. En fabrikant beretter, at han i et par anlæg, hvor varmepumpen efter hans vurdering ikke har kørt optimalt, har rettet henvendelse til installatøren af anlægget for at få gjort noget ved problemet. En fabrikant har forsøgt sig med finjustering af et par varmepumper på distancen med ejeren som den forlængede arm og har forbedret driften, men det er generelt ikke en farbar vej, da det fordrer teknisk indsigt i varmepumpeanlæg ud over det normale hos slutkunderne.

Ingen fabrikanter har benyttet IT-plattformen til at udføre egne eksperimenter med fjernstyring. De har ikke benyttet lejligheden til at udnytte open-source-fordelene. Tilbageholdenheden vurderes at skyldes, at det generelt er nyt for dem, samt at der mangler vedtagne standarder på området.

5.4.2 Standarder

Der gives entydigt udtryk for blandt de fabrikanter, der udvikler løsninger til fjernovervågning og -styring, at der mangler standarder som udgangspunkt for udvikling af Smart Grid-løsninger. Uden standarder er det vanskeligt at designe varmepumper, så de overholder fremtidens krav til Smart Grid-readiness. En dansk fabrikant udtaler: ”Smart Grid-udviklingen skal drives frem internationalt gennem standarder, så vi ikke skal bruge ressourcer på at opfinde særlige danske løsninger”.

Kun ganske få fabrikanter har tilkendegivet, at de har udviklingsaktiviteter decideret rettet mod individuelle varmepumper og Smart Grid. Manglen på standarder er en blandt flere begrundelser.

5.4.3 Intelligent Smart Grid-styring af individuelle varmepumper – giver det mening?

Flere fabrikanter har givet udtryk for en vis skepsis omkring gevinsten ved fjernstyring af individuelle varmepumper. Først og fremmest vurderes der at være for lille økonomisk gevinst for forbrugeren i forhold til ekstraomkostningerne til udstyr og måske også mindre optimale driftsbetingelser for varmepumpen. Der vurderes typisk at være væsentligt større gevinster ved intelligent styring af større varmepumper i fjernvarmesystemer. En enkelt fabrikant stoler desuden ikke på, at det kan lade sig gøre i praksis at indføre intelligent styring af de individuelle varmepumper uden komfortulempen for beboerne.

Enkelte fabrikanter følger dog udviklingen omkring varmepumper og Smart Grid tæt og er klar til at handle, hvis ideen om intelligent fjernstyring af VP for alvor får momentum.

5.5 Andre barrierer

Der er en række andre barrierer for udbredelse af Smart Grid og varmepumper, som ikke specifikt knytter sig til varmepumper.

Bolius pegede i september 2012 (www.bolius.dk/kan-du-spare-penge-paa-at-bruge-stroem-om-natten-7337) på følgende tre forudsætninger som de vigtigste for at få det intelligente elnet Smart Grid til at fungere i private hjem:

- Digitale elmålere, der kan afregne elforbruget på timebasis
- Smart Grid-elektronik i hjemmet, der får vaskemaskine, tørretumbler osv. til at tænde, når elprisen er lav
- Elpriser, der varierer fra time til time, så det er billigere at bruge strøm uden for spidsbelastningsperioder.

De digitale elmålere er på vej, men er ikke fuldt udrullet. Godt 2 mio. målere er udrullet af i alt 3,3 mio. forbrugssteder. De digitale elmålere rulles ud som såkaldte fjernaflæste målere. Ifølge en bekendtgørelse fra Energistyrelsen vil de fjernaflæste målere være endelig udrullet inden udgangen af 2020. For at den økonomiske gevinst af Smart Grid Ready-produkter kan høstes, kræves det endvidere, at detailmarkedet er klar til at håndtere fleksibelt elforbrug. Dette sker i april 2016, hvor både en engrosmodel og DataHub vil være på plads. Endvidere er det gjort muligt for netvirksomhederne at anvende variable tariffer i døgnet og regulerkraftmarkedet er udvidet til også at omfatte elforbrug og ikke kun produktion. Kilder /25/ og /26/.

6 Større integration af varmepumper i lavspændingsnettet

Der er gennemført en analyse af lavspændingsnettets tekniske udfordringer ved en betydeligt øget varmepumpepenetration i lokalområder.

En større udskiftning af oliefyr med varmepumper vil give anledning til et væsentligt ekstra elforbrug, og det overordnede formål med analysen er at undersøge grænserne for, hvor stor en ny varmepumpeeffekt, der kan tillades tilsluttet elnettet, før det overbelastes, eller før elkvalitetskrav ikke kan overholdes. Analysen er derfor ikke i direkte ”indgreb” med resten af projektet, der har fokus på demonstration af måling og dataopsamling samt intelligent styring af et større antal varmepumper under normal drift.

Forenklet sagt er analysen med til at afdække tekniske grænser for udbredelsen af varmepumper, som vil være en præmis for udformningen af en Smart Grid-styringsstrategi for varmepumperne.

Hele analysen er dokumenteret i en særskilt bilagsrapport, udarbejdet af SEAS-NVE, ”Løsningsforslag til større integration af varmepumper i lavspændingsnettet” /3/. I det følgende opsummeres analysen. For en detaljeret gennemgang af forudsætninger og beregninger henvises til bilagsrapporten.

Resuméet er enkelte steder suppleret med betragtninger, der placerer analysen i projektets bredere ramme.

6.1 Formål og metode

Analysen tager udgangspunkt i energiselskabet SEAS-NVE’s nettopologi i lavspændingsnettet, viden om belastninger og erfaringer med at drive et distributionsnet. I enkelte scenarier inddrages udviklingen i solcelleanlæg og elbiler, da de i kombination med varmepumper kan forstærke udfordringerne.

Typerne af de tekniske udfordringer undersøges, og grænserne for antal varmepumper og elektrisk effekt, der kan installeres i nettet uden at skabe problemer, vurderes under forskellige forudsætninger. Analysen slutter med opstilling af forslag til løsninger, der kan skabe plads til flere varmepumper, og en prioritering af forslagene.

Analysens fremgangsmetode er følgende:

- Hvordan ser et gennemsnitligt lavspændingsnet ud for parcelhuse?
- Nuværende ledige kapacitet i en gennemsnitlig lavspændingsudføring
- Ledig kapacitet når fremtidige belastninger i lavspændingsnettet medtages (elbiler, solcelleanlæg)
- Hvor mange procent af boligerne kan installere varmepumper på samme udføring, før nettet overbelastes?
- Løsningsforslag til øget implementering af varmepumper. Styringsstrategi mm.
- Styringsstrategier til reduktion af CO₂-udledningen.

Alle netberegninger er repræsentative for SEAS-NVE’s forsyningsområde, hvilket forventes overordnet at være sammenligneligt med hovedparten af forsyningsnettene i Danmark.

6.2 Beskrivelse af elnet og belastning

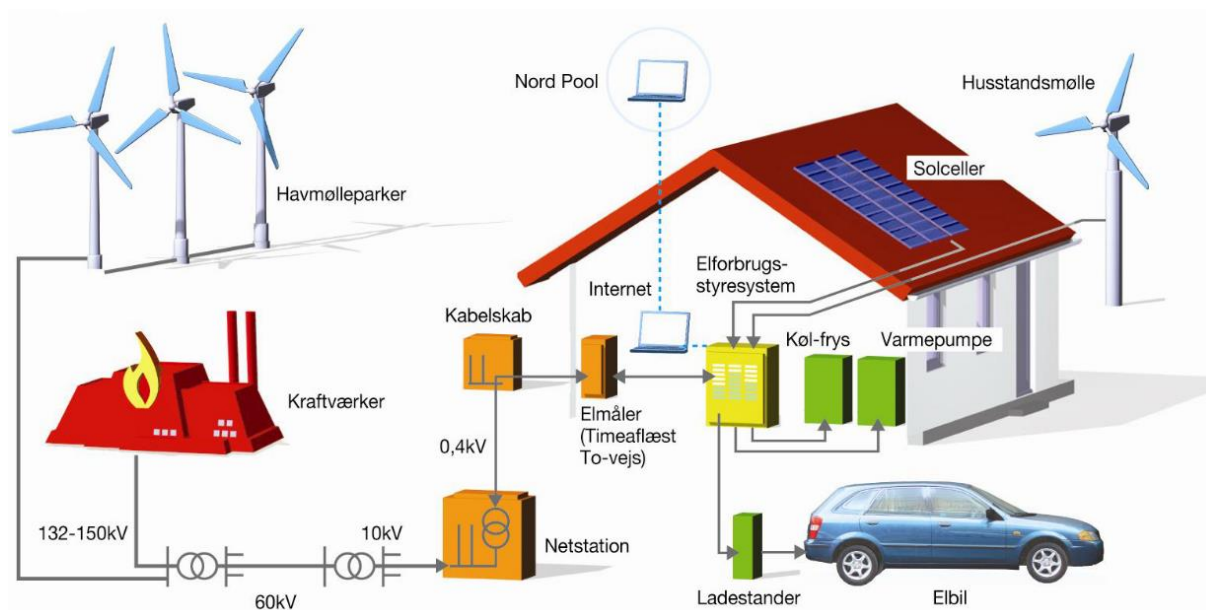
6.2.1 Elnettet generelt

Nedenstående figur viser elnettets transportveje fra de større centrale produktionsanlæg og helt ud til privatforbrugeren.

De forskellige spændingsniveauer kan sammenlignes med vejnettet, hvor motorvejene svarer til transmissionsnettet med spændinger på 400-65 kV, større og mindre hovedveje til mellemspændingsnettet med spændinger på 65-10 kV og villaveje til lavspænding på 0,4 kV. Omformningen mellem de forskellige spændingsniveauer sker i transformerstationerne. Omformning fra mellem- til lavspændingsnettet 10/0,4 kV sker i en distributionstransformer, hvorefter en til flere udføringer (kabler) transporterer el til kabelskabene og slutteligt via kundens stikledning til husets elmåler og gruppetavle.

Figuren illustrerer eksempler på nuværende og kommende scenarier, hvor slutkunden ikke blot forbruger, men også producerer eleffekt vha. fx solcelleanlæg, mikro vindmøller eller mikrokraftvarme og kontrollerer forbrug og eventuelt produktion i forhold til priser, netbelastning, CO₂-belastning mm.

Analysen vedrører udelukkende lavspændingsnettet (0,4 kV), da det primært er her, fremtidens elforbrugende og -producerende anlæg i første omgang vil kunne skabe overbelastning. Mellemspændingsnettet er væsentligt stærkere og enkelte overbelastede udføringer i lavspændingsnettet vil under normale forhold ikke påvirke dette nævneværdigt.

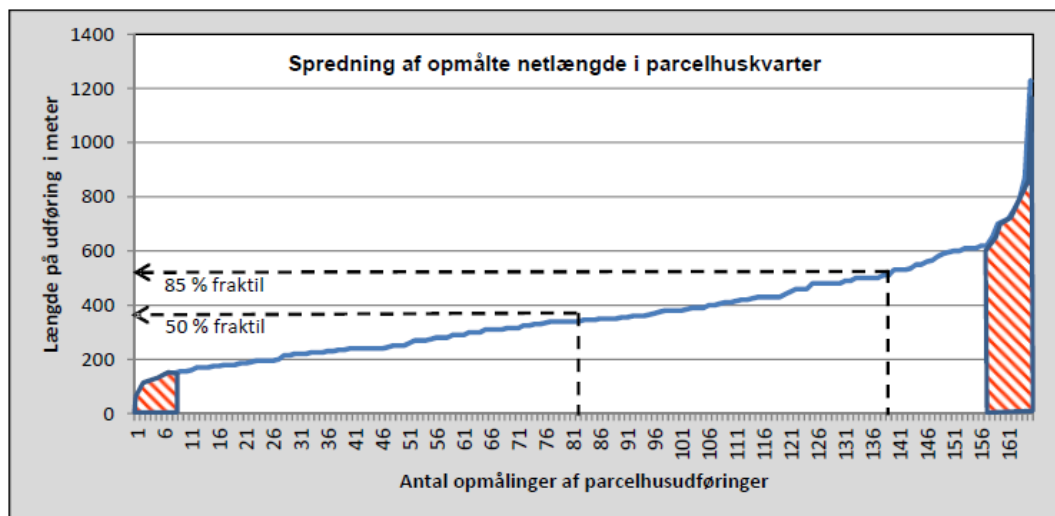


Figur 6.1: Principdiagram for elnettet og tilsluttede belastninger og produktionsanlæg

6.2.2 Repræsentativ lavspændingsudføring

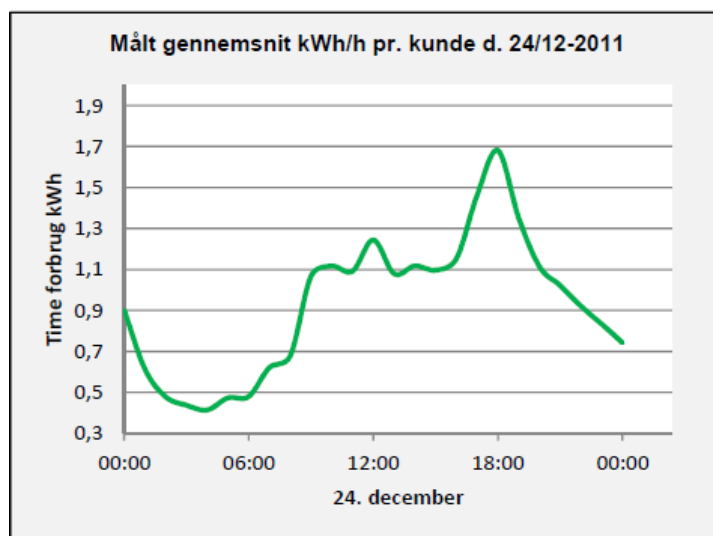
Nettopologien for et repræsentativt lavspændingsnet er undersøgt, og et modelnet er defineret ud fra en gennemgang af 167 udføringer. Udføringerne er blevet opmålt og for hver er noteret kabeldimensioner og længder, nettets alder, kategori, transformerstationens nummer, antal kunder og årlig belastning pr. kunde. De noterede længder er afstand til fjernest placerede kabelskab.

Der er bygget et modelnet, som er repræsentativt for henholdsvis 50 %- og 85 %-fraktilen af de opmålte udføringers længder for at vise forskellen mellem et gennemsnitligt lavspændingsnet og et svagere net, som udgør ca. 15 % af de opmålte udføringer.



Figur 6.2: Spredningen af de opmålte udføringer. De 5 % korteste og længste udføringer er ikke medtaget.

Årets maksimalbelastning på udføringen er beregnet på basis af elforbruget, der normalt måles på årsbasis, vha. den empirisk bestemte Velander-korrelation for lavspændingsnet. I de kommende år indføres timemålinger, som vil kunne give et mere præcist beregningsgrundlag.

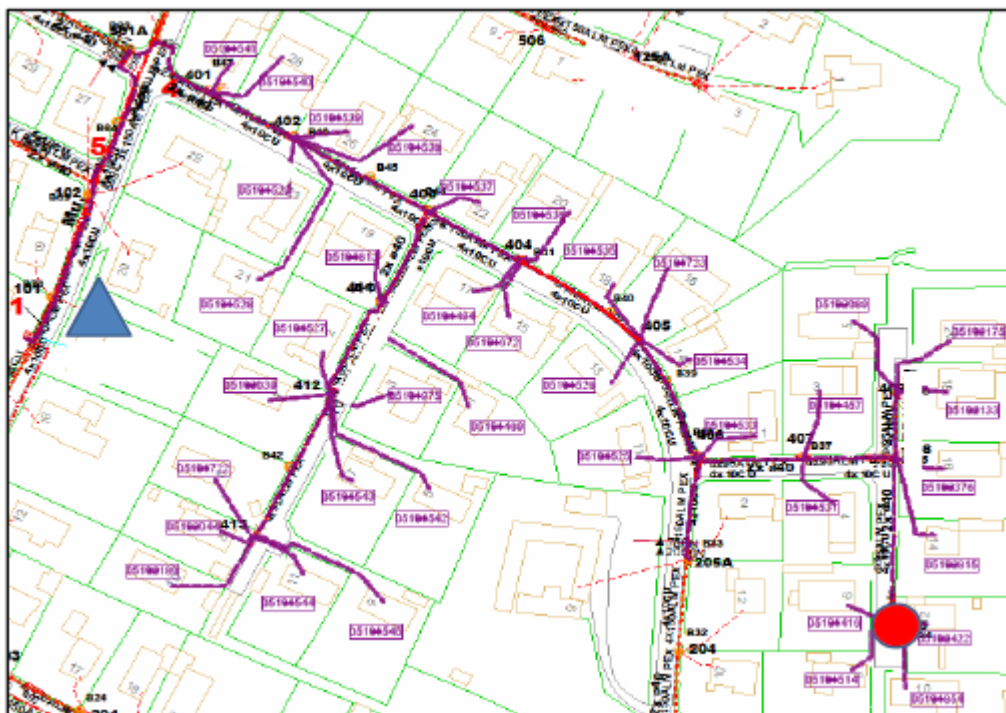


Figur 6.3: Målt belastningskurve på en udføring d. 24. december, der normalt er årets mest kritiske dato. Den karakteristiske spids omkring kl. 18 kaldes "kogespidsen" og året rundt ligger den dagligt hårdeste belastning omkring dette tidspunkt.

Ud fra analyse af de noterede udføringer og deres belastninger er følgende modelnet defineret.

	50% fraktil	85% fraktil
Antal kunder pr. udføring	33 stk.	42 stk.
Gennemsnit peak pr. kunde pr. fase	3,1 A*	2,7 A*
Peak belastning pr. udføring pr. fase	102,3 A*	113,4 A*
Installationer pr. kabelskab	4 stk.	4 stk.
Kabelskabe pr. udføring	8 stk.	10 stk.
Samlet længde på udføring	345 m	500 m
Sammensætning af kabeldimensioner	172m 150AL+173m 95AL	300m 150 AL+200m 95AL

Figur 6.4: Defineret modelnet for parcelhusområdet



Figur 6.5: Modelnet. Lilla streg er udføringen. Blå trekant er 10/0,4 kV transformer. Rød prik er fjerneste kabelskab.

6.2.3 Belastningsparametre anvendt i analysen

I nedenstående tabel ses de belastninger og belastningsparametre, som er anvendt i beregningerne. Parametrene er defineret ud fra SEAS-NVE's egne erfaringer, relevant litteratur og bidrag fra eksperter. Belastninger fra elbiler og solcelleanlæg er medtaget i nogle af scenarierne, da udbredelsen forventes at kunne ske relativt samtidigt med varmepumper, og da de i kombination med varmepumper kan øge belastningen på lavspændingsnettet.

Varmepumpe luft/luft

Luft/luft varmepumper anvendes ofte i forbindelse med supplerende varme til parcelhuset og ofte som primær varmekilde i sommerhuse. Afhængig af størrelse og antal kan luft/luft varmepumpen være den primære varmekilde i parcelhuse, hvor det eksisterende varmesystem til brugsvandopvarmning bibeholdes til brugsvandvarme og eventuelt til supplerende rumopvarmning på de koldeste dage. Mindre luft/luft varmepumper er næsten udelukkende 1-fase apparater.

Varmepumpe væske/vand

Oliefyr i områder uden for den kollektive varmeforsyning udskiftes ofte med jordvarmeanlæg (væske/vand) som primær varmekilde. Varmepumpen er typisk 3-faset. Beregningerne forudsætter, at varmepumperne er dimensionerede til at dække 100 % af varmeforbruget, hvilket er ensbetydende med, at den indbyggede elpatron i anlægget kun anvendes ved eventuelle driftsfejl på varmepumpen. Fortsætter den hidtidige praksis med at dimensionere varmepumpen til kun at dække 80-85 % af det dimensionerende varmetab, forstærkes problemerne for lavspændingsnettet betydeligt, fordi det medfører, at elpatronen aktiveres på kolde dage, hvor elnettet i forvejen er hårdest belastet.

Elbiler

Elbiler er medtaget i beregningerne, da et fremtidigt scenarie kunne være, at en udførelse belastes af varmepumper såvel som af elbiler. Mindre elbiler findes primært som 1-fasede apparater, hvor effektoptag ofte ligger på det maksimale iht. 1-fasede apparater. Primært større elbiler, som er på vej ind på markedet, kan også lade på 3-faser

Solcelleanlæg

Solcelleanlæggene er medtaget i beregningerne, da en større koncentration af solcelleanlæg på samme udførelse kan resultere i en nedjustering (trapning) af udgangsspændingen på distributionstransformerer for at kunne optage solcelleanlæggenes producerede effekt. Dette vil betyde, at det acceptable spændingsfald forårsaget af varmepumper og elbiler (om vinteren) bliver mindre, og at der derfor bliver ”mindre” plads til disse belastninger.

Brugsgenstande	Effekt kW	1- Faset	2-Faset	3-Faset
Varmepumpe luft/luft	1,5	x		
Varmepumpe Væske/vand	2,8			x
Elbil 1 faset	3,7	x		
Elbil 3 faset	11			x
Solcelleanlæg 4 kW 1faset	4	x		
Solcelleanlæg 6 kW 2 faset	6		x	
Solcelleanlæg 6 kW 3 faset	6			x

Figur 6.6: Belastningsparametre anvendt i analysen

6.3 Resultater

Beregningerne med forskellige scenarier og parametervariationer (se bilagsrapport for detaljer) har resulteret i et antal observationer, som i generel form opstilles i det følgende. Der er stor spredning i beregningsresultaterne afhængig af de valgte forudsætninger. Observationerne bør derfor betragtes som indikationer på afhængigheder og ”worst case”-situationer i et lavspændingsnet med et betydeligt antal nye varmepumper (subsidiært solceller og elbiler).

Beregningerne har i visse tilfælde vist, at der kun var plads til få varmepumper, når disse placeres fjernest på en svag udførelse.

Antallet af potentielle varmepumper på en udførelse afhænger af disse forskellige parametre:

Nettopologi

Den grundlæggende nettopologi, herunder kablets omgivende materiale, tværsnit og længde, samt transformerkapaciteten, er bestemmende for udføringens belastningskapacitet.

Spændingsinterval

Den primære årsag til kapacitetsbegrænsning i lavspændingsnettet er udfordringen med at overholde spændingsintervallet og i mindre grad at overholde strømbegrænsningerne på kabler og distributionstransformere. Således vil udføringen kunne trække en væsentligt større effekt på eksisterende kabler, hvis udgangsspændingen på udføringen hæves.

Placering af forbrugende komponenter

Beregningerne viser betydningen af, hvor belastningen placeres på udføringen. Specielt for spændingsfaldet har det stor betydning, om belastningen hovedsageligt er først eller sidst på udføringen, hvilket har stor indflydelse på størrelsen af den effekt, som kan trækkes i den pågældende udføring.

Producerende komponenter

Tilkobling af solcelleanlæg på samme udføring vil resultere i en spændingsstigning i sommerhalvåret, netop hvor varmepumper belaster mindst, og det begrænser muligheden for en fast høj udgangsspænding fra transformerstationen, medmindre der kan skabes en samhørighed mellem produktion og forbrug på den enkelte udføring. Hvis dette er muligt, og produktion og forbrug er afstemt, er der kapacitet til flere varmepumper og solcelleanlæg på samme udføring. Opnås denne samhørighed ikke, vil det med et fastindstillet omsætningsforhold i distributionstransformeren ikke være muligt at opretholde en høj udgangsspænding året rundt, hvis solcelleanlæggene skal kunne afgive effekt til udføringen uden risiko for overspænding.

Begrænsning i samtidig anvendelse af det tilkøbte leveringsomfang

Generelt forudses udfordringer for netselskaberne i lavspændingsnettet, hvis antagelser om fremtidige større effekttræk, produktion og stærkt varierende forbrug og øget samtidighed pga. dynamiske tariffer realiseres. Herved vil forholdet mellem kundernes tilkøbte leveringsomfang og udføringens maksimale kapacitet udfordres. Et beregningseksempel viser, at maks. 40 % af kunderne på et 50 %-fraktilnet kan udnytte deres tilkøbte leveringsomfang samtidig, forudsat at de resterende kunder intet forbrug har. Antages de resterende kunder at trække den beregnede maksimale grundlasteffekt (3,1 A pr. fase) reduceres antallet til 32 %, som kan aftage det tilkøbte leveringsomfang på 3x25 A. Iht. tidligere beskrevne er der desuden kunder med et leveringsomfang på 63 A. pr. kunde pr. fase, hvilket yderligere understreger problematikken.

Optimale løsninger til implementering af flere varmepumper i lavspændingsnettet afhænger i høj grad af den pågældende udføring og de eksisterende eller fremtidige tilkoblinger, der måtte forekomme. Løsningsforslag varierer derfor afhængigt af den givne udføring. Indhentning og udnyttelse af information omkring de pågældende udføringer vil muliggøre mere præcise og målrettede løsninger for de specifikke lavspændingsudføringer og er derfor et vigtigt redskab, når der analyseres og beregnes på potentialet for implementering af varmepumper. Hvis ingen andre løsninger er tilstrækkelige til at løse udfordringerne på en given udføring, kan det i sidste ende være nødvendigt at etablere en ny og stærkere udføring, men det vil ofte være en dyr løsning. De løsningsforslag, der vurderes egnet, bør økonomisk og funktionsmæssigt sammenholdes, således at mere simple og billigere løsninger, også på længere sigt, prioriteres.

6.4 Løsningsforslag til større integration af varmepumper

I det følgende afsnit beskrives løsningsforslag til at øge potentialet for integration af varmepumper. Først fokuseres på de el-tekniske muligheder for at styrke elnettet, og efterfølgende beskrives alternative løsninger, som kan ændre belastningsprofilen og/eller størrelse af påvirkningen fra varmepumper i lavspændingsnettet.

6.4.1 Nettekniske løsninger

Herunder beskrives de løsninger, som netselskabet kan gennemføre uden at involvere kunden.

6.4.1.1 Asymmetrisk belastning

Asymmetriske belastninger, altså uens belastning af faserne, kan have stor betydning for den aktuelle ledige kapacitet på en udføring, da det altid er den mest belastede fase, der er den begrænsende for udføringens samlede kapacitet. Dette til trods for at de to andre faser eventuelt kun er belastet i begrænset omfang. Ved at fordele belastningerne ligeligt mellem faserne udnyttes kablet bedst muligt mht. størst effektoverførsel, mindste spændingsfald og mindste nettab.

Flere målinger har indikeret, at især nyere parcelhusområder kan have stor asymmetri. Hvorvidt det skyldes, at hovedparten af alle nyere hvidevarer, herunder specielt ovn og kogeplader, i dag modsat tidligere, er 1-faset udstyr, og/eller at de autoriserede elektrikere ikke er omhyggelige nok med at fordele belastninger jævnt mellem faserne, er endnu ikke undersøgt.

I dag er det krav fra netselskabet, at kundens belastning er fordelt bedst muligt mellem faserne, dog er kravet ikke specificeret yderligere. Dette krav skal den autoriserede elinstallatør honorere efter bedste evne ved etablering af gruppetavle eller eftermontering af nye grupper i tavlen. Det kan dog være vanskeligt for den autoriserede elektriker at skabe en symmetrisk belastning mellem faserne, da fordelingen er stærkt afhængig af forbrugerens adfærd og tidspunktet på døgnet.

Vigtigst er det dog, at symmetrien er bedst mulig fordelt i kogespidsen, hvor elnettet er mest belastet.

50%-fraktilnet: Sammenligning mellem symmetrisk og asymmetrisk belastning. Asymmetrien af maks. grundlast er: L1:50%, L2:30%, L3:20%	Ekstra symmetrisk belastning først på udføringen før min. spænding L1= 207V eller overbelastning af kabel	Ekstra symmetrisk belastning bagerst på udføringen før min. spænding L1= 207V
Asymmetrisk	95 kW*	38 kW
Symmetrisk	127 kW*	75 kW

85%-fraktilnet: Sammenligning mellem symmetrisk og asymmetrisk belastning. Asymmetrien af maks. grundlast er: L1:50%, L2:30%, L3:20%	Ekstra symmetrisk belastning først på udføringen før min. spænding L1= 207V	Ekstra symmetrisk belastning bagerste på udføringen før min spænding L1= 207V
Asymmetrisk	20 kW	4 kW
Symmetrisk	121 kW*	47 kW

Figur 6.7: Eksempler på beregning på asymmetri. *Belastningen er begrænset af kablets maks. strømbelastning og ikke spænding.

Forslag til forbedring af asymmetrisk belastning:

- Der udarbejdes guidelines til autoriserede elektrikere, som beskriver hvordan forbruget, specielt i kogespidsen, fordeles bedst muligt mellem faserne.

- Indhentede data fra de ”intelligente” elmålere (type AMR (Automatic Meter Reading)) vil på sigt kunne beskrive asymmetrien hos hver enkelt kunde. Disse oplysninger kunne gøres tilgængelige for den autoriserede elektriker, således at der kunne flyttes rundt på kundens forbrug ved stor asymmetri og/eller tilkobles nye effekter bedst muligt i forhold til den aktuelle asymmetri.
- En mulighed for elseskabet kunne være at bytte rundt på faserne i kabelskabet, hvor kundens stikledning bliver tilsluttet, således at drejefeltet forbliver ens, mens den asymmetriske fordeling nu er anderledes fordelt mellem faserne.
- I henhold til ovenstående forslag vil en løsningsmodel, hvor et relæ, der skifter om på faserne i gruppetavlen eller på afgangssiden af AMR-måleren, ligeledes kunne udjævne den asymmetriske belastning på en udføring. Igen forbliver drejefeltet uændret, kun fordelingen på faserne ændres.

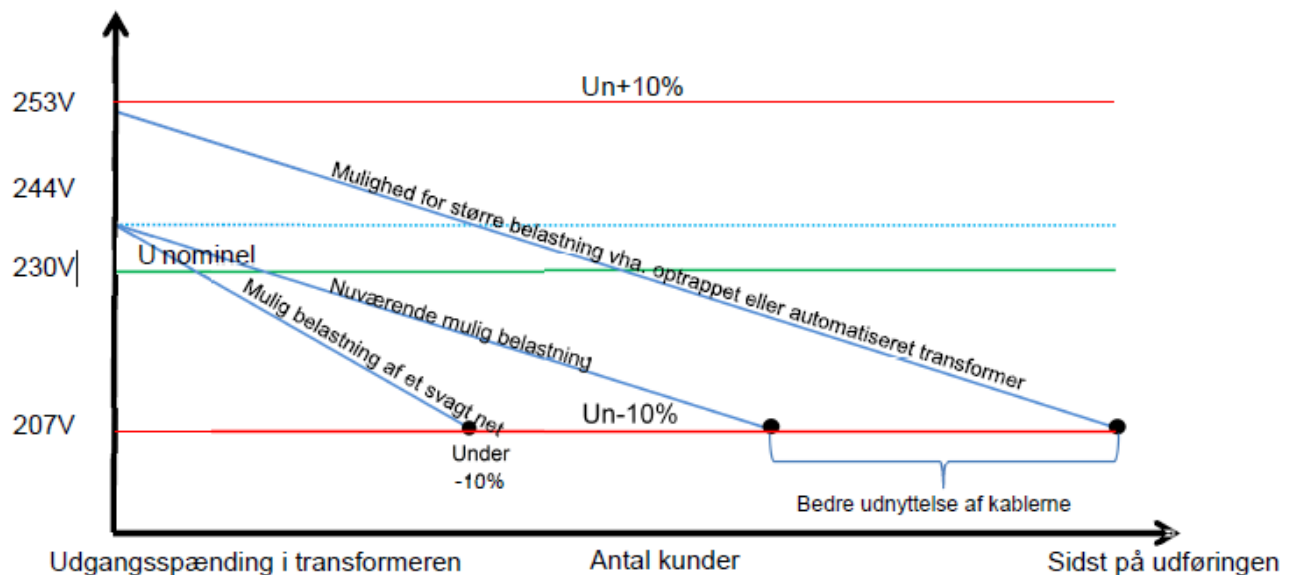
Beregningerne viser, at der vil frigøres størst mulig ledig effekt på udføringen, hvis det er asymmetriske belastninger længst ude på udføringen, som gøres mere symmetriske.

6.4.1.2 Variabel udgangsspænding på distributionstransformer

Ved at variere udgangsspændingen på distributionstransformerens sekundære side kan der delvist kompenseres for store spændingsfald eller spændingsstigninger på den aktuelle udføring. Den primære årsag til kapacitetsbegrænsning i lavspændingsnettet er udfordringen med at overholde spændingsintervallet og i mindre grad at overholde strømbegrænsningerne på kabler og distributionstransformere. Nedenfor er to principper til variation af udgangsspændingen beskrevet.

6.4.1.2.1 Trappe transformerne efter spændingsmålinger på lavspændingsudføringen
Langt de fleste distributionstransformere i SEAS-NVE's net har 5 trin. Med følgende omsætningsforhold 10 kV/0,400 kV +/- 2 x 2,5 %. De fleste af beregningerne i denne rapport er udført i trin 3, det midterste trin. Enkelte beregninger er også udført i trin 1 og trin 4 for at anskueliggøre betydningen af trinkoblerens indstilling. Det skønnes, at de fleste af transformerne i SEAS-NVE's net står i trin 2 eller trin 3. Hvis det er muligt at hjemhente data fra AMR-målerne med måling af leveringsspændingsintervallet og logge disse data henover året, vil det give et godt overblik over spændingsforholdene på en lavspændingsudføring og vil dermed være et godt værktøj til optimering af trinindstillingen. Trinnet skal typisk være højt om vinteren, hvor belastningen fra varmepumper og andre elforbrugende apparater er størst, og mindst om sommeren, hvor solcellernes elproduktion er størst. Dermed vil lavspændingsnettet kunne udnyttes bedre. Bortset fra hjemtagning af spændingsmålinger kan ændring af trin på transformerstationen udføres på det eksisterende anlæg uden ekstra anlægsinvesteringer. Dog skal transformeren kortvarigt være strømløs under omkoblingen, og desuden skal ændringen udføres manuelt, og derfor vil det ikke være formålstjenligt at udføre denne operation gentagne gange.

6.4.1.2.2 Automatiseret spændingsregulering af 10/0,4 kV-transformeren
Den optimale løsning på regulering af spændingen vil være en automatisk regulering henover året og døgnet, som det kendes fra hovedstationerne. På denne måde vil leveringsspændingsintervallet kunne udnyttes optimalt. Data til en sådan regulering vil eventuelt kunne hentes fra AMR-målerne hos de enkelte kunder. En automatisk regulering af spændingen vil være omfattende og kræve indførelse af helt nye komponenter i distributionsnettet med betydeligt forøgede etablerings- og vedligeholdelsesomkostninger til følge.



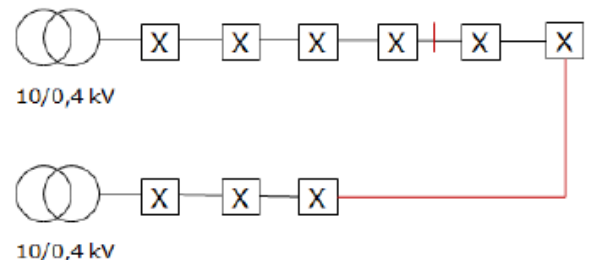
Figur 6.8: Illustration af belastninger ift. udgangsspænding fra transformere

6.4.1.3 Netforstærkning

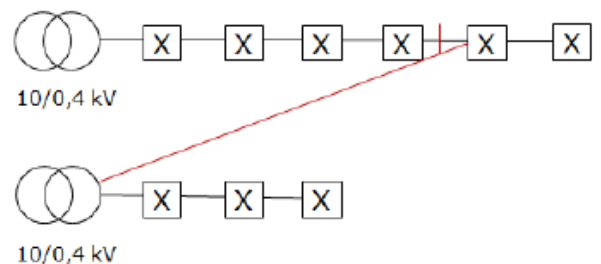
Herunder vises de oftest anvendte løsninger til traditionel netforstærkning. Den mest hensigtsmæssige løsning afhænger af den pågældende udførelse og de tilstødende udførelses udseende og belastning. I hvert enkelt tilfælde må det vurderes, hvad der er den optimale tekniske og økonomiske løsning. Netforstærkning kan være forbundet med betydelige omkostninger.

Ofte anvendte netforstærkningsløsninger:

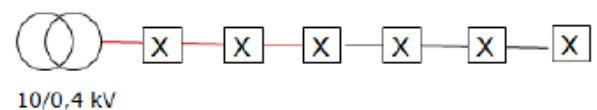
- Gennembygninger mellem forskellige lavspændingsudførelser, flytning af kunder fra en svag til en stærkere tilstødende udførelse.



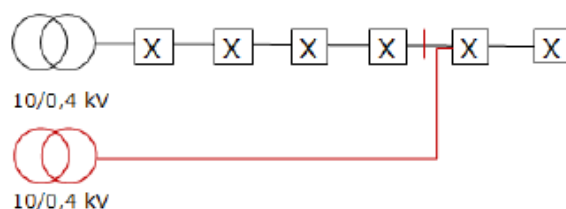
- Etablering af nye lavspændingsudførelser. Der etableres en ny udførelse under en tilstødende transformerstation og kunder flyttes til den nye udførelse.



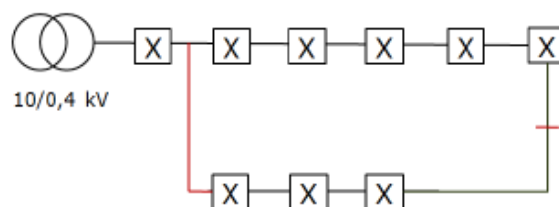
- Første del af udføringskabel udskiftes, hvilket reducerer spændingsfaldet sidst på udførelsen.



- Ny transformator og opdeling af eksisterende udføring, således at kunder kan flyttes fra svag udføring.



- Ændringer af de elektriske grænser og etablering af nye kabler.



Figur 6.9: Ofte anvendte netforstærkningsløsninger

6.4.2 Ændring af belastningsprofil

Følgende løsningsforslag forudsætter, at forbrugerne - *manuelt eller via automatik* - ændrer deres belastningsprofil. Formålet med metoderne er at reducere dagens spidsbelastning ved at flytte noget af belastningen væk fra dette tidspunkt, som typisk er kogespidsperioden omkring kl. 18, til et andet tidspunkt på døgnet. Derved vil netkapaciteten kunne udnyttes bedre. Det økonomiske incitament vil direkte eller indirekte være det, der primært tilskynder forbrugeren til at ændre belastningsprofil, hvilket nedenstående metoder tager udgangspunkt i.

6.4.2.1 Termisk lagring

Behovet for varmt vand varierer i løbet af dagen typisk med det største forbrug om morgenen og i kogespidsperioden. Ved at anvende en større varmtvandstank i husholdningen i forbindelse med anvendelsen af en varmepumpe vil forbrugeren kunne begrænse eller helt undgå effektbehovet til varmt vand i kogespidsperioden, da det forøgede tankvolumen skaber større fleksibilitet mht. opvarmning af brugsvandet. Anvendes desuden en integreret varmtvands- og rumopvarmningstank øges tankvoluminet og dermed fleksibiliteten yderligere.

6.4.2.2 Isolering og termisk træghed

Forbedring af en hustrands isolering vil sænke varmebehovet generelt og følgelig også dagens spidseffektforbrug i varmesæsonen.

Ved at anvende termisk træge materialer, eksempelvis betonopvarmet gulv, vil akut behov for opvarmning være begrænset, da materialerne holder længere på varmen. Dette vil medføre større fleksibilitet, da effektforbrug til rumopvarmning i kogespidsperioden derved kan undgås uden at gå på kompromis med komfortkravene.

6.4.2.3 Ændring af forbrugsmønstre

Forbrugeren kan bidrage aktivt til at reducere effektbehovet på de kritiske tidspunkter ved at flytte varmtvandsforbruget til andre tidspunkter. Yderligere kan spidseffektforbruget minimeres ved dynamisk styring af temperaturen i vandtanken. I de fleste hjem holdes temperaturen i vandtanken konstant. Ved at sænke vandtemperaturen i tanken i de perioder af døgnet, hvor der normalt ikke er behov for varmt vand, vil effektforbruget falde.

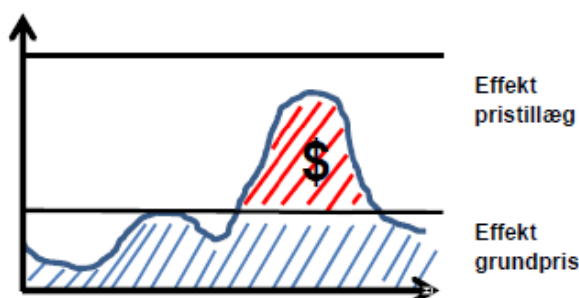
I perioden inden kogespidsen kan vandtemperaturen om muligt hæves så højt, at varmtvandsbehovet i kogespidsen kan dækkes uden samtidig drift af varmepumpen.

6.4.2.4 Effekt- og pristariffer

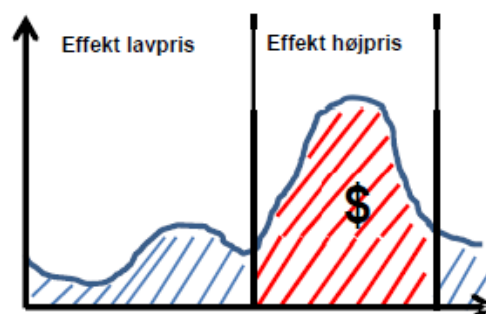
Tidsdifferentierede priser på effekt kan tilskynde forbrugeren til at begrænse effektforbruget på dagens kritiske tidspunkter. Dette kan udformes på forskellige måder

Der kan benyttes en fast grundpris med tilføjelse af et pristillæg pr. anvendt kW over et givent effektforbrugsniveau. Dette vil tilskynde forbrugeren til at udjævne effektforbruget over døgnet for at undgå betaling af pristillæg.

Alternativt kan effekttariffen differentieres ud på bestemte tidspunkter af døgnet, værende dyrest for forbrugeren netop der, hvor nettet er mest belastet. Dette vil tilskynde forbrugeren til at reducere effektforbruget mest muligt på det dyreste tidspunkt. Denne model kan enten træde i kraft på bestemte tidspunkter af døgnet, hvor elselskaberne erfarer, at nettet belastes mere, eller være automatiseret i forhold til de belastningsvariationer, der forekommer på nettet i løbet af et døgn. Uanset om der anvendes en fast eller dynamisk tidsdifferentiering af effekttariffen, skal forbrugeren kende effekttariffen et stykke tid ud i fremtiden for at kunne lægge en tidsplan for sit effektforbrug, så han får den økonomisk mest optimale løsning under hensyntagen til at få dækket sit minimumbehov til ethvert tidspunkt.

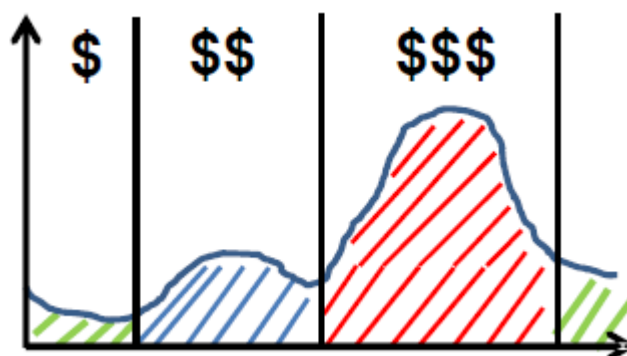


Figur 6.10: Effektpris samt pristillæg



Figur 6.11: Effektpris inddeling over døgnet

Differentierede priser på strøm (kWh), bestemt af døgntidspunktet, kan ligeledes tilskynde forbrugeren til at ændre forbrugsmønster og derved minimere energiforbruget i perioder, hvor dette er ønskværdigt for elforsyningen, hvad enten det er for at reducere effektforbruget af belastningsmæssige årsager, eller fordi elselskabets omkostning pr. energienhed er høj. Såvel prisudsving som tidsintervaller kan i princippet være faste eller dynamiske. Uanset hvilken model skal forbrugeren kende strømprisens (kr./kWh) tidsvariation et stykke tid ud i fremtiden for at kunne lægge en tidsplan for sit strømforbrug, så han får den mest optimale løsning.



Figur 6.12: Pristariffer på strøm inddelt i døgnprofilen

Det skal i den forbindelse nævnes, at omkostningen for elseskabet for at levere ekstra energi (kWh) ikke nødvendigvis korrelerer tidsmæssigt tæt med omkostningen for at levere ekstra effekt (kW), selvom det ofte er tilfældet, eksempelvis netop i kogespidsperioden. Der kan være tidspunkter, hvor energiprisen i det samlede elforsyningssystem er lav fx på grund af stor elproduktion på vindmøllerne, men hvor en lavspændingsudførelse samtidig er effektmæssigt udnyttet helt til grænsen for overbelastning.

En høj succesrate for at få forbrugeren til at flytte sit effekt- hhv. energiforbrug fra kritiske til mindre kritiske tidspunkter forudsætter, dels at der er signifikante udsving mellem høje og lave priser, dels at forbrugeren kender prisernes tidsvariation et stykke ud i fremtiden, og endelig at forbrugeren har et indgående kendskab til sit forbrugsmønster, som muliggør udarbejdelse af en gunstig tidsplan for effekt- hhv. energiforbrug. De færreste forbrugere i dag har overhovedet kendskab til deres elforbrug ud over det årlige køb af kWh, som fremgår af årsafregningen fra elseskabet. Mange har end ikke timemåling af elforbruget og kan derfor heller ikke få disse informationer fra elseskabet. Forbrugeren vil naturligvis have tilskyndelse til at minimere omkostningerne for at få dækket elforbruget. Men han kan også prioritere fx at kunne trække høj effekt netop i kogespidsen, fordi det er bekvemt i dagligdagen, og det betyder, at der er grænser for den af elseskabet tilstræbte forbrugsændring foranlediget af de nævnte forslag.

Det kan heller ikke forventes, at forbrugerne vil eller kan bruge meget tid i dagligdagen på at lægge driftsplaner for elforbruget. Forslagene forventes derfor først at få mærkbar virkning, den dag teknologiske (først og fremmest timemåling af elforbrug) og markedsmæssige instrumenter er udviklet så meget, at automatik kan udføre en væsentlig del af arbejdet med driftsplanlægning og ind- og udkobling af de fleksible effektforbrugende komponenter.

Forslagene kan dog allerede introduceres nu som et af virkemidlerne i kombination med andre forslag til at øge potentialet for varmepumper i lavspændingsnettet.

6.4.2.5 Smart Grid – styring og regulering

Intelligent styring af varmepumper – og andre belastninger – kan gennem potentialet til at skabe fleksibilitet i elsystemet være et middel til at løse flere udfordringer. Varmepumper kan blive et vigtigt element i et Smart Grid.

Nationalt er det et mål at indpasse en stærkt forøget kvantitet elproduktion fra fluktuerende vedvarende energikilder, primært vindkraft, i energisystemet for at fortrænge fossile brændsler. Fossilt baseret energiforbrug skal ændres til elbaseret. Der fordres større tidsmæssigt sammenfald mellem elproduktion og -forbrug, og udfordringen er at skabe den nødvendige fleksibilitet, teknologisk og adfærdsmæssigt på elforbrugssiden, så den tilpasser sig den øjeblikkelige elproduktion.

Elforsyningssystemets opgave er at realisere denne fleksibilitet, hvor en stor udfordring er på lokalt niveau, primært i lavspændingsnettet og delvist i mellemspændingsnettet, at undgå flaskehalsproblemer og bibeholde en høj stabilitet og kvalitet i elforsyningen med færrest mulige ekstra udgifter til ud- og ombygning af elnettet og til drift.

Gennem intelligent styring og regulering af varmepumperne i et Smart Grid kan den eksisterende el-infrastruktur udnyttes og drives tættere på den maksimale belastningsgrænse i fremtiden, og indpasningen af fluktuerende vedvarende energi kan øges.

Uden den rette styring og regulering udebliver de individuelle varmepumpers positive potentiale som balanceskabende komponent for elnettet på lokalt såvel som nationalt plan. Lokalt vil uregulerede

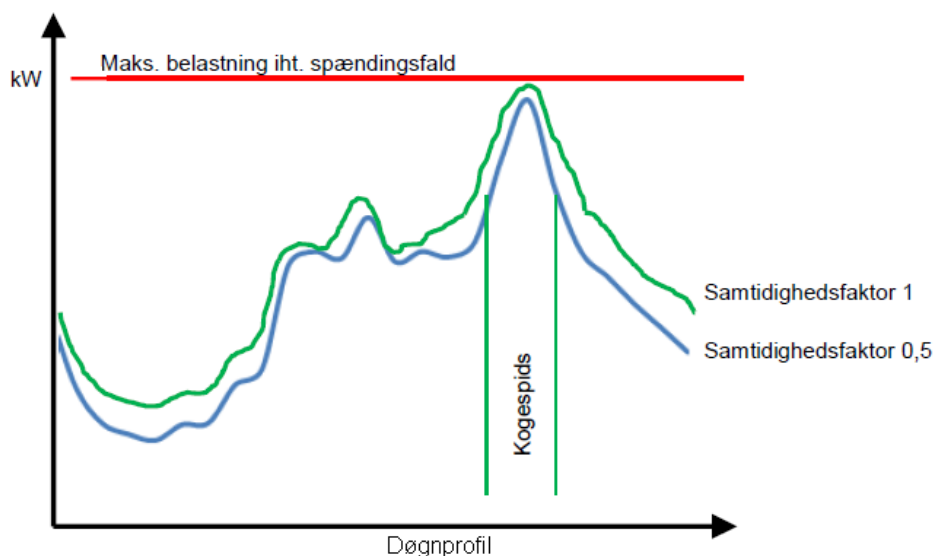
varmepumper kunne påvirke belastningsprofilen på uhensigtsmæssige tidspunkter, pga. stor samtidighed, og herved reducere lavspændingsnettets ledige kapacitet til et i værste fald kritisk lavt niveau.

Beregningerne i rapporten tager udgangspunkt i "worst-case"-situationer i forhold til samtidighed, hvilket betyder, at alle varmepumperne er i drift på samme tid, svarende til en samtidighedsfaktor på 1,0. Ved hjælp af optimal styring og regulering kan samtidighedsfaktoren reduceres/varieres mest muligt til gavn for lavspændingsnettets ledige kapacitet. Et beregningseksempel for et relativt svagt net viser, at en reduceret samtidighedsfaktor på 0,5 i kogespidsperioden vil bevirke, at der reelt kan være 100 % flere varmepumper i den pågældende udførelse, se nedenstående tabel.

Samtidig- hedsfaktor	Beregning	Fraktilnet	Last	Antal last enheder / %	Kablets udnyttelses grad	Spændings interval udnyttet
1	2	85%	2,8 kW / 3-F	20 stk. / 48%	42%	100%
0,5	2	85%	2,8 kW / 3-F	40 stk. / 96%	42%	100%

Figur 6.13: Samtidighedsfaktorens indflydelse på maksimalt antal varmepumper

Styring af en pulje af belastninger, fx varmepumper, mod en reduceret samtidighedsfaktor vil som vist på figuren herunder kunne reducere udførelsens maksimale belastning, ikke bare i kogespidsen, men over hele døgnprofilen. Effektlastningen af varmepumperne, for samtidighedsfaktor 0,5 og 1,0, ligger oven på en grundlast.



Figur 6.14: Illustration af det mulige effektforbrug i døgnprofilen ved styring og regulering af varmepumper i kogespidsperioden, inklusivt grundforbrug

En forudsætning for, at varmepumpen kan reguleres/stoppes i kogespidsperioden, er, at varmepumpen har en overkapacitet i forhold til det aktuelle varmebehov. Dette kan være en udfordring på årets koldeste dage, hvor en varmepumpes overkapacitet kan være stærkt begrænset eller ikke til rådighed, hvis komfortkravende skal overholdes.

De fleste varmepumper er i dag on/off-styrede. Frekvensstyrede varmepumper kan skabe en større grad af fleksibilitet, fordi de løbende kan stilles til nøjagtig den belastning, der er ønsket, hvad enten det drejer sig om at dække øjeblikksbehovet for varme i huset eller om at undgå overbelastning af og

transiente fænomener på lavspændingsudføringen. Frekvensstyrede varmepumper har en højere effektivitet og længere levetid end de on/off-styrede, fordi varmepumpen en stor del af tiden kører i et mere optimalt driftspunkt og undgår den dårlige virkningsgrad under start/stop-forløb, og fordi start/stop-forløb slider på varmepumpen. For et elseskab med adgang til at fjernstyre en varmepumpe er det også en fordel, at spærretid efter stop af en on/off-styret varmepumpe undgås med de frekvensstyrede. Endelig vil mange frekvensstyrede varmepumper kunne tåle at køre med overhastighed i et kortere tidsrum, om end med lavere COP og større slid, og dermed eliminere behovet for en egentlig overdimensionering. Krav om frekvensstyring vil øge fleksibiliteten og skabe plads til flere varmepumper. Udviklingen går mod frekvensstyrede varmepumper.

6.4.2.6 Styringsprincipper for individuelle varmepumper

Varmepumpens egen styring, der varetager selve varmepumpens tekniske komponenter og sikrer, at den ikke kommer til at arbejde under betingelser, så den lider overlast, suppleres med en overordnet intelligent styring, hvis væsentligste opgave primært er at sørge for, at ejerens behov for varme og varmt vand dækkes, subsidiært at sørge for at imødekomme de ovennævnte behov på lokalt og nationalt plan.

Styringen af varmepumpen baseres på en række parametre, bl.a.:

- Stamdata for hus og varmepumpeinstallation
- Målinger af husets og varmepumpeanlæggets drift (temperaturer, flow, elforbrug mm)
- Tillært viden om beboernes adfærdsmønster og husets egenskaber
- Spotprissignal for de kommende timer fra elsystemet
- Vejrprognoser
- Brugerpræferencer.

En præmis for styringen er, at beboernes komfortgrænser ikke må kompromitteres. Styringen kan være indirekte eller direkte. Ved indirekte styring forstås, at styringen, der foretager driftsplanlægningen og ind- og udkobling af varmepumpen (og eventuelt andre belastninger), ligger lokalt ved varmepumpen, og den har til formål at optimere driften af varmepumpen ud fra nogle af varmepumpeejeren besluttede kriterier, fx økonomi. Ovennævnte parametre kan eventuelt suppleres med signal fra elsystemet, som har til formål at reducere samtidigheden af varmepumpernes drift på en udføring. Muligheden for at optimere driftsøkonomien består i at styre varmepumpen efter at udnytte udsvingene i spotpriserne på el. Ved direkte styring forstås, at en ekstern aktør sender signal om, at varmepumpen skal starte eller stoppe. Aktøren kan være en aggregator, der styrer en pulje af varmepumper. Et elhandelsselskab er et eksempel på en aggregator. I dette tilfælde udføres driftsplanlægningen for hver enkelt varmepumpe på en server ejet af selskabet. Målene her er også at dække beboerens basale behov og at imødekomme de lokale og nationale behov. Desuden kan selskabet optimere driften af puljen af varmepumper til at skabe fleksibilitet til fx at kunne bidrage til den interne balance og at kunne stille regulerkraft til rådighed. Regulerkraft kan kun handles i et kvantum af minimum 10 MW, hvilket udelukker, at den enkelte varmepumpeejers kan deltage i dette marked. Selskabet vil således supplere ovennævnte parametre med andre signaler om behov for ydelser til elsystemet.

6.4.2.7 Regulatoriske lovkrav

Regulatoriske krav til forbrugskomponenter, såsom varmepumper samt styring og regulering af disse, kan begrænse belastningen, som udføringen påvirkes med. Ved i større grad at anvende 3-fasede komponenter minimeres peak-belastningen på udføringen og sandsynligheden for asymmetrisk belastede udføringer begrænses. Ligeledes vil krav om begrænset anvendelse af elpatroner i

varmepumper til kun at være i drift ved havari afhjælpe belastningen på en udføring. Elpatroner i varmepumper forbruger betydelige effekter, som ofte vil ligge på tidspunkter, hvor udføringens belastning i forvejen er høj, og derfor er det væsentligt at begrænse brugen af disse.

En høj samtidighedsfaktor begrænser det mulige antal af varmepumper betragteligt, men en større grad af intelligent styring og regulering vil i mange tilfælde kunne reducere den betydeligt. Således vil krav til implementering af en central styringsenhed, der videresender information om driften og varmebehovet, give mulighed for at styre og regulere varmepumperne, så driften tilpasses den aktuelle netbelastning, og dermed forøges potentialet for integration af varmepumper.

For at varmepumperne kan agere fleksibelt også på årets koldeste dage, kræver det en vis grad af overdimensionering, således at der er mulighed for at etablere et termisk overskudslager, der kan fungere som buffer til de perioder, hvor varmepumpen er slukket. Er dette ikke tilfældet, bortfalder fleksibiliteten og muligheden for at øge antallet af varmepumper. Krav til overdimensionering kan være et middel til at skabe fleksibilitet.

I forlængelse af ovenstående kan et lovkrav til driftsfrie tidsrum også være en mulighed, hvorfor varmepumpe producenter og forbrugere skal sikre sig, at varmepumpen er overdimensioneret til et givent fleksibilitetskrav.

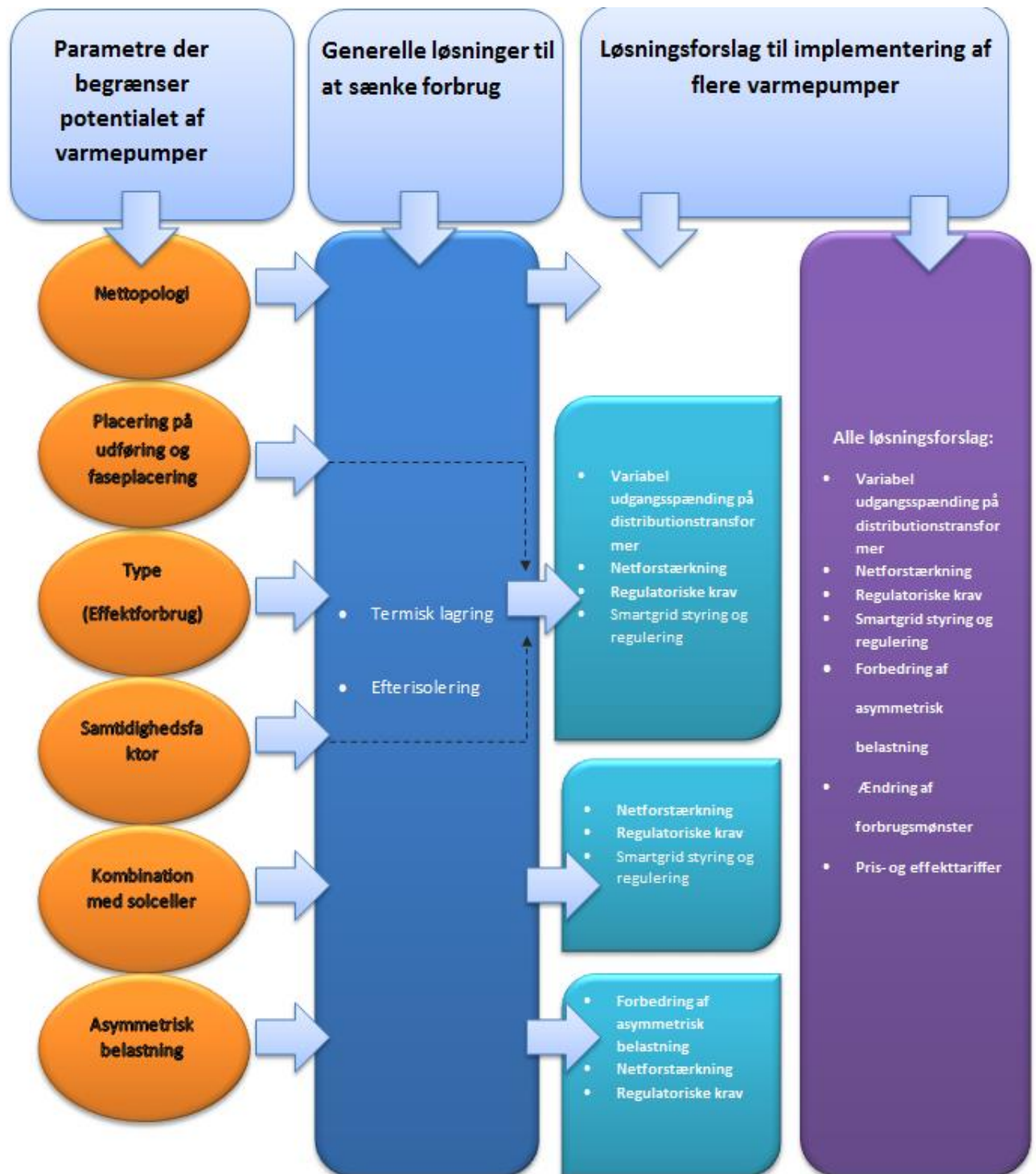
De fleste varmepumper er i dag on/off-styrede. Frekvensstyrede varmepumper kan skabe en større grad af fleksibilitet, fordi de løbende kan stilles til nøjagtig den belastning, der er ønsket, hvad enten det drejer sig om øjeblikksbehovet for varme i huset, eller det drejer sig om at undgå overbelastning af og transiente fænomener på lavspændingsudføringen. Frekvensstyrede varmepumper har en højere effektivitet og længere levetid end de on/off-styrede, fordi varmepumpen en stor del af tiden kører i et mere optimalt driftspunkt og undgår den dårlige virkningsgrad under start/stop-forløb, og fordi start/stop-forløb slider på varmepumpen. For et elselskab med adgang til at fjernstyre en varmepumpe er det også en fordel, at spærretid efter stop af en on/off-styret varmepumpe undgås med de frekvensstyrede. Endelig vil mange frekvensstyrede varmepumper kunne tåle at køre med overhastighed et kortere tidsrum, om end med lavere COP og større slid, og dermed eliminere behovet for en egentlig overdimensionering. Krav om frekvensstyring vil øge fleksibiliteten og skabe plads til flere varmepumper.

6.5 Styringsstrategier til reduktion af CO₂-udledningen

CO₂-udledning i forbindelse med elproduktion varierer i løbet af døgnet, hvilket skyldes de forskellige produktionstyper. Energinet.dk udgiver dagligt en døgnprognose for den forventede udledning af CO₂ i g/kWh produceret el pr. time, hvilket sker i samarbejde med elproducenterne. Fleksible komponenter, såsom varmepumper, vil være i stand til at flytte og tilpasse forbrug til tidspunkter af døgnet, hvor der udledes mindre CO₂, i den udstrækning, det er muligt uden at gå på kompromis med eventuelle komfortkrav. Rent teknisk kan forbruget tilpasses CO₂-udledningen, ved at der hver dag sendes et signal med data om døgnprognosen, hvorefter dataene behandles og det vurderes, vha. automatisk styring, hvilke tidspunkter af døgnet det er mest hensigtsmæssigt at forbruge el på. Styres og reguleres forbruget, således at det tilpasses de ”grønne” tidspunkter af døgnet, reduceres CO₂-udledningen til gavn for miljøet. Ved sammenfald mellem lav CO₂-udledning og kogespids, vil nettet muligvis blive belastet yderligere, hvorfor der kan opstå behov for at begrænse forbruget i tilfælde af

dette scenarie, hvis ikke nettet kan håndtere den større belastning. For miljøet vil sammenfald mellem lav CO₂-udledning og kogespids være positivt, da det vil betyde at udledningen begrænses.

6.6 Opsummering af begrænsninger, muligheder og anbefalinger



Figur 6.15: Begrænsende faktorer samt dertilhørende løsningsforslag for implementering af varmepumper

På baggrund af de opstillede scenarier bør nedenstående løsninger tages i betragtning til større integration af varmepumper i lavspændingsnettet. Den optimale løsning afhænger af den specifikke udførings udseende og påvirkning, hvorfor et indgående kendskab til disse parametre er væsentligt for valg af den mest egnede løsning. Nedenstående løsningsforslag er prioriteret på baggrund af de beregnede scenarier, der indgår i rapporten.

- Optimal indstilling/trapning af distributionstransformer
- Udbedring af asymmetrisk belastning på udføring
- Ændring af forbrugsmønstre
- Netforstærkning
- Smart Grid styring og regulering
- Regulatoriske krav.

6.7 Afsluttende kommentar

Analysen af elsystemets udfordringer og muligheder er – med udgangspunkt i en energipolitisk målsætning om mere vedvarende energi i energisystemet – gennemført ud fra en grundlæggende præmis om, at der skal leveres en given mængde varme og varmt vand til husene med individuelle varmepumper, uden at komfortgrænserne kompromitteres.

Flere af løsningsforslagene indebærer omkostninger, der ikke er helt negligeable. Før en løsning vælges, bør der udføres en grundig cost-benefit-beregning. I denne beregning kunne indgå nedenstående løsningsforslag, der ikke er omtalt i analysen, men som ud fra en samfundsmæssig betragtning i en række tilfælde kunne være det billigste alternativ.

Netforstærkninger og trapning af transformatorer kan være relativt omkostningstunge løsninger. På en svag udføring kunne et billigere alternativ være, at husene længst ude på en udføring blev energirenoveret eller fik en ikke-elbaseret varmebackup som fx et pillefyr, således at kravet til varmepumpens spidseffekt kunne reduceres. Dermed vil det maksimale effekttræk på en udføring falde, og spændingsfaldet på udføringen vil blive mindre kritisk og måske så lavt, at netforstærkningen helt kan undgås.

Det vil imidlertid kræve, at politikerne fastsætter principper for, hvordan omkostningerne til energirenoveringen eller varmebackup'en skal fordeles.

7 Konklusion og perspektivering

7.1 SDVP's demonstrations- og testplatform

Der er i SDVP etableret en værdifuld og i international sammenhæng unik demonstrations- og testplatform for varmepumper, hvor varme anlæg i ca. 300 huse kan overvåges og styres ud fra lokale prognoser for vejr og elforsyning. Temperaturer, flow og elforbrug måles i hver installation og opsamles med høj tidsopløsning lokalt af en nyudviklet open-source styreboks. Data sendes videre til en central open-source server og gøres via denne tilgængelig online sammen med vejrdata med høj geografisk opløsning, elforsyningsdata og stamdata for installationerne. Samtidig muliggør styreboksen, at en aggregator via den centrale server kan sende styresignaler til varmepumperne og udføre Smart Grid styring af disse. Der er dermed skabt en meget stærk platform for udvikling af intelligente Smart Grid-produkter og -løsninger.

7.2 Fokuspunkter i VAFE

I VAFE, som er et af de tre projekter under SDVP, er der fokuseret på 4 overordnede emner, som vinkler forskellige aspekter omkring udbredelse af varmepumper og intelligent styring af disse: 1) Varmepumpers udviklingshistorik og standardisering, som er relevant for forståelsen af udgangspunktet for SDVP, 2) Vurdering af bygningers og varmepumpeinstallationers potentiale for at bidrage til fleksibilitet i elforsyningssystemet, 3) Praktiske erfaringer og barrierer for udbredelse af varmepumper samt 4) Udfordringer for distributionsnettet ved en betydelig penetration med varmepumper.

7.3 Varmepumpers udviklingshistorik og standardisering

I rapportens *kapitel 2* beskrives udviklingsforløbet for tidligere projekter om styring af varmepumper, som SDVP bygger videre på. I begyndelsen af 1980'erne igangsattes en offentligt støttet ambitiøs udvikling af varmepumpeteknologien, som også omfattede måleprogrammer og udvikling af test og prøvning. I 1990'erne fik styring/regulering af varmepumperne større vægt i F&U-indsatsen ud fra det faktum, at on/off drift af varmepumper reducerer anlæggets effektivitet sammenlignet med kontinuert drift i kapacitetsregulerede varmepumper. Indirekte blev det første frø for udvikling mod Smart Grid sået, da kapacitetsregulerede varmepumper mere dynamisk kan reagere på varierende signaler, fx elprisvariationer, og der opnås en dimensioneringsfordel med hensyn til at eliminere behov for tilskudseffekt fra elpatroner, som det kendes i traditionelt dimensionerede on/off varmepumper. Elpatrondrift er uønsket, fordi den typisk falder på (kolde) tidspunkter, hvor elnettet i forvejen er hårdt belastet og har behov for aflastning. Varmepumper som element i et Smart Grid er et forholdsvis nyt tema. Det stiller krav til varmepumpers evne til kommunikation med eksterne aktører, fx aggregatorer, der skal kunne fjernstyre varmepumperne. I den forbindelse er den fysiske grænseflade for kommunikation samt paletten af informationer, der kan udveksles med varmepumpen, undersøgt for gængse varmepumpefabrikater. Konklusionen på undersøgelsen er, at ingen varmepumper kan siges at være fuldstændig Smart Grid Ready, hvilket der kan være flere årsager til, fx mangel på en entydig international definition på Smart Grid Ready, mangel på standarder, og måske også usikkerhed om business casen, varmepumpen skal indgå i.

Standarder på varmepumpeområdet er beskrevet historisk og aktuelt. Den betydelige danske og svenske F&U-indsats fra ca. 1980 og frem gik parallelt med udarbejdelse af nordiske standarder, som senere blev harmoniseret med andre (mindre ambitiøse) europæiske standarder. I dag kører det

internationale standardiseringsarbejde professionelt. EU's ecodesigndirektiv er en driver for udviklingen af varmepumpeteknologien bl.a. gennem etablering af fælles effektivitetskrav for alle EU-lande og virker til fordel for de kapacitetsregulerede varmepumper. I Danmark er kravene til minimumeffektiviteten skærpet yderligere og formuleret i Bygningsreglementet. Desuden findes en håndfuld andre DS/EN-standarder, der fastlægger krav til måle- og testmetoder på varmepumper, heriblandt den nye standard DS/EN14825, som giver mulighed for at beregne en såkaldt SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance), som er et udtryk for, hvor effektiv en given varmepumpe er på vores breddegrader set over et helt år. Den frivillige kvalitetssikringsordning for installatører, VPO, som udstikker retningslinjer for dimensionering, og en liste drevet af Energistyrelsen med varmepumper, som er testet af et akkrediteret prøvningsinstitut, har også stor betydning for fremme af energieffektive og velfungerende varmepumpeinstallationer.

Internationalt standardiseringsarbejde rettet mod varmepumpers samspil med elnettet i et Smart Grid er påbegyndt. Det vurderes, at først når standarderne så småt er på plads, vil varmepumpefabrikanterne opprioritere udviklingen af Smart Grid Ready varmepumper. Tyskland har defineret sit eget forslag til et SG Ready-label, og et stort antal varmepumper har opnået certifikat på at leve op til de stillede krav. I projektet er det forsøgt afklaret, hvordan ordningen fungerer i praksis, men det har ikke været muligt at finde detaljerede oplysninger om procedurer for administration og godkendelse eller om aftalevilkår mellem elselskaber og varmepumpeejere, endsize om der overhovedet kører varmepumper i praksis i henhold til styringsprincipperne foreskrevet i ordningen.

7.4 Flexibilitet i bygninger med varmepumper

Kapitlerne 3, 4 og 5 omhandler vurdering af bygningers og varmepumpeinstallationers potentiale for at bidrage til flexibilitet i elforsyningssystemet.

7.4.1 Analyse og overvejelser om varmepumper i et fleksibelt elsystem

I *kapitel 3* er beskrevet og analyseret en række overvejelser i forbindelse med anvendelse af varmepumper som en del af et fleksibelt elsystem. Der er redegjort for baggrunden for behovet for flexibilitet i elforsyningssystemet og for, hvorfor intelligent styrede varmepumper kan være en del af løsningen.

Jo mere energi det er muligt at flytte (dvs. jo mere flexibilitet), desto flere foranstaltninger vil være relevante. Nogle foranstaltninger vil være relevante af komfortmæssige årsager. "Home automisation" kan forventes at få stigende udbredelse. Derved vil det være muligt at styre rumtemperaturer og måske ventilation individuelt efter behov. Dette giver også et godt udgangspunkt for introduktion af styring efter udnyttelse af fleksibelt elforbrug, hvor der samtidig tages hensyn til komfortmæssige forhold.

I kapitlet er beskrevet en række muligheder for at opnå flexibilitet. Det enkleste vil være at slukke for varmepumpen i en periode og derefter starte den igen efter et vist tidsrum. Erfaringen ved måling af rumtemperaturer og udetemperaturer vil kunne give erfaringer for de enkelte huse, således at det i en given situation kan forudsiges, hvor længe varmepumpen kan afbrydes. Er det økonomiske potentiale større, kan der overvejes forceret drift, hvor rumtemperaturerne hæves i perioder med meget billig el, hvis der er en forventning om, at der efterfølgende vil være en periode med dyr el. Tilsvarende forcering kan også ske ved at hæve temperaturerne i rum, der normalt ikke opvarmes til de normale komforttemperaturer, men hvor rummene er i termisk forbindelse med normalt opvarmede naborum.

Er der installeret brændeovn, solceller og/eller solvarme vil en optimeret drift sammen med disse også have betydning for et maksimalt udbytte. Brændeovnen giver en mulighed for ekstra flexibilitet.

En betydelig udfordring for at få succes med intelligent styring er en rimelig nøjagtig forudsigelse af husets varme- og varmtvandsbehov på timebasis i op til et døgn og sammenstilling af dette med de forudmeldte spotpriser på el og eventuelt andre signaler fra elsystemet, således at der kan lægges en robust driftsplan for varmepumpen. Kvaliteten af driftsplanen kan øges, hvis den bygger på en model med specifikke termiske parameterverdier for det enkelte hus. I kapitlet er gennemgået og vurderet en række forskellige teknologier og metoder, der kan drages i anvendelse i et hus med en varmepumpeinstallation med henblik på at muliggøre tidsforskydning af varmepumpens drift, og der er foreslået forskellige driftsstrategier.

Gennemgangen er beskrevet som et bredt idékatalog og er udført uden snævre økonomiske betragtninger.

7.4.2 Demonstration og test

I *kapitel 4* er forberedelserne til en undersøgelse af huses termiske egenskaber og evne til at lagre varme beskrevet. Denne evne er en afgørende forudsætning for, at varmepumperne vil kunne bidrage til at øge anvendelsen af vedvarende energi og til at opnå fleksibilitet til elsystemet. Konkret undersøges faldet i rumtemperaturerne i husene i forbindelse med tvangsstop af varmepumperne i et tidsrum på nogle timer. Jo større forskel mellem inde- og udetemperatur, desto mere præcis viden om husets termiske egenskaber kan der udledes fra måleresultaterne, og derfor udvælges målinger fra tvangsstop på kolde vinterdage til undersøgelsen.

Husene er udvalgt blandt de 300 huse i demoprojektet ud fra egnethedskriterierne: 1) Fordeling på forskellige gængse hustyper, 2) Fordeling på forskellige gængse typer varmepumper samt 3) Historiske måleserier over længere perioder med sandsynlige og pålidelige målinger inden for normale intervaller.

Husene er fordelt på to grupper. I den første gruppe er husene bestykket med standard måleudstyret for alle 300 huse, dvs. én indetemperaturføler. De udvalgte huse er fundet ved en screening af den centrale database med stamdata og historiske måleserier. Inden screeningen er feltet af mulige huse indsnævret, idet firmaet NeoGrid, partner i IFIV, har sendt en logfil over et antal huse, hvor de har udført forsøg med fjernstyret tvangsstop. Der er fundet et antal måleserier af en kvalitet, som er egnet til undersøgelsen. I den anden gruppe er husene derudover bestykket med 6 til 7 ekstra indetemperaturfølere for at få mere grundlæggende viden om huses termiske egenskaber. Husene er aflagt besøg for dels at kvalitetssikre stamdata og supplere disse med ekstra oplysninger, dels at installere de ekstra temperaturfølere. Proceduren er beskrevet gennem en case.

7.4.3 Behandling af data fra test

I *kapitel 5* er analysen af måledata fra 9 huse i gruppen med enkeltmålinger og 5 huse i gruppen med detaljerede målinger beskrevet. Der er indledningsvist redegjort for teorien bag analysen, hvor varmekapacitet, varmetab og tidsforsinkelse er nøgleparametre. Teoretiske beregninger sammenlignes med resultaterne fra undersøgelsen af målingerne under tvangsstop.

De udførte undersøgelser viser, at der kan forventes mulighed for at stoppe for varmetilførslen i stor set alle huse i 2 til 6 timer, uden at det vil medføre mærkbare komfortmæssige gener. For at eksemplificere dette kan det siges, at hvis der i 100.000 enfamilieshuse kan stoppes for varmepumpen i et tidsrum på 3 timer, og at dette giver en reduktion i effektforbrug på 2 kW pr. hus, vil det reducere effektforbruget sammenlagt 200 MW. På 3 timer giver det et flyttet elektrisk energiforbrug pr. hus på 6 kWh og totalt for alle huse på 600 MWh. Dette kan i princippet gøres hver dag i varmesæsonen, 50 til 100 dage pr. år.

7.5 Barrierer for varmepumperne – erfaringer fra praksis

Kapitel 6 omhandler erfaringer fra praksis og beskriver problemer og barrierer, der står i vejen for udbredelsen af varmepumper. Kapitlet er baseret på oplevelser, opnået både i forbindelse med deltagelse i SDVP's demonstrationsdel og fra almen praksis, og fra projektpartnerens synspunkter, heriblandt varmepumpefabrikanterne, samt en række andre aktører (minus repræsentation fra installatørerne, hvilke kun har været beskeden direkte kontakt til i projektet) med indgående kendskab til varmepumpebranchen, varmepumpeinstallationer i praksis og markedet. Afgørende for varmepumpernes udbredelse er boligejernes prioritering ved udskiftning af oliefyret, hvilket forudsætter basal viden om varmepumper, attraktiv økonomi og en overskuelig proces med den fysiske udskiftning af oliefyret med varmepumpen og eventuelt nødvendig energirenovering af boligen. Den generelle viden om varmepumper er stadig moderat sammenlignet med olie- og gasfyr og fjernvarme og det gælder både hos boligejerne og mange installatører. Bedre markedsføring af varmepumper og eliminering af dårlige historier skal adresseres.

Det leder frem til, at mange af aktørerne, der har været kontakt til i projektet, udtrykker, at der er potentiale for væsentlige forbedringer i installationsleddet, lige fra rådgivning til dimensionering og installation. De tilskriver det blandt andet utilstrækkeligt uddannelsesniveau, og at mange installatører for sjældent installerer varmepumpeanlæg til at opbygge tilstrækkelig erfaring. Resultatet er mange varmepumpeanlæg med for lav COP og ikke-optimale driftsbetingelser. Varmepumpefabrikanter finder også vidensniveauet hos VE-uddannede og energikonsulenter for ringe. De anbefaler et generelt kvalitetsløft i uddannelserne og obligatorisk uddannelse af installatørerne. Varmepumpefabrikanterne finder, at de energipolitiske mål for varmepumper ikke understøttes af den førte politik og foreslår forskellige politiske tiltag, fx fjernelse af tilslutningspligt til fjernvarme og naturgas ved nybyggeri og krav om varmepumper ved byggeri i område 4. Smart Grid-tankegangen er ikke trængt helt ud eller accepteret blandt varmepumpefabrikanterne. Manglende standarder og dokumentation af brugerøkonomien anføres som væsentlige årsager. Flere af varmepumpefabrikanterne giver udtryk for godt udbytte af projektet, men ingen har benyttet SDVP's open-source IT-plattform til konkret teknologiudvikling eller test.

7.6 Udfordringerne for lavspændingsnettet

I kapitel 7 gives et resumé af en analyse af udfordringerne for lavspændingsnettet ved en større integration af varmepumper. Distributionsselskaberne er bekymret for, at der vil kunne opstå problemer med kapacitet og spændingskvalitet visse steder i nettet, og undersøgelsen er udført for at opnå mere viden om, hvor der typisk kan opstå problemer, problemernes størrelsesorden og hvilke midler, der kan drages i anvendelse for at imødegå eller afhjælpe problemerne.

Udgangspunktet for analysen er – med basis i netdata fra SEAS-NVE's distributionsnet – konstruktion af en lavspændingsradial med belastninger, som anses at være repræsentativ for lavspændingsnet mange steder i Danmark. Analysen viser, at der med stor sandsynlighed vil opstå problemer visse steder. Problemerne er primært knyttet til overholdelse af spændingsgrænserne hos forbrugeren og kun i beskedent omfang til overbelastning af kablerne. Hvor mange steder og hvor alvorlige er svært at sætte tal på. Det afhænger af de lokale forhold, herunder lavspændingsradialens relative styrke og antallet af olie- og gasfyr, der udskiftes med varmepumper. Problemet er, at det forøgede elforbrug i radialen ofte vil falde samtidig med de eksisterende spidsbelastningstidspunkter, hvilket bevirker et forøget spændingsfald ud gennem radialen. Et problem der kan reduceres men næppe elimineres ved intelligent styring af varmepumperne. Sker udbygningen med varmepumper samtidig med en udbygning med solcelleanlæg i radialen, forstærkes problematikken. De nye varmepumper trækker

spændingen i radialen længere ned om vinteren, mens de nye solcelleanlæg hæver spændingen om sommeren. Resultatet er større årlige spændingsudsving med risiko for udsving uden for de tilladte grænser i den ydre ende af radialen.

Der foreslås en række løsningsmuligheder til at imødegå eller afhjælpe problemerne. Løsningerne er grupperet i *nettekniske løsninger* (symmetri i fasebelastninger, netforstærkning, variable distributionstransformere) og *ændring af belastningsprofil* (termisk lagring og isolering, ændring af forbrugsmønster, effekt- og pristariffer, intelligent styring og regulering). Fælles for dem er, at ingen er gratis eller helt simple. I særligt tilspidsede situationer kan det tænkes, at forsyningsselskabet, der har ansvaret for driften af lavspændingsnettet, skal have mulighed for at udkoble en varmepumpe (såfremt selskabet har adgang til fjernstyring) med risiko for, at en eller flere varmepumpeejere derved kan komme til at opleve overskridelse af komfortgrænserne.

8 Formidling og rapportering

- 12-03-2010: Offentlig varmepumpedag
- 09-04- 2010: Møde med Project Zero, Energinet.dk og Projekt IFIV (NEAS). Samarbejde og koordinering
- 06-05-2010: Møde med LODAM om varmepumpestyringer
- 23-06-2010: VP-Foreningens generalforsamling, oplæg
- 24-06-2010: Møde med Energitjenesten
- 28-06-2010: Møde med elskaberne SEAS-NVE og Syd Energi om potentielle udfordringer for eldistributionsnettene forårsaget af varmepumpernes udbredelse
- 25-08-2010: Følgegruppemøde med oplæg
- 05-01-2011: Vært for møde og studietur for IFIV-projektgruppe
- 27-01-2011: Oplæg på møde med international gruppe fra Bosch
- 01-03-2011: Følgegruppemøde med oplæg
- 03-03-2011: Danske Køledage, udstilling af LIAB-boks og varmepumpe
- 22-03-2011: Balslev Rådgivende Ingeniører A/S, mødeoplæg
- 05-04-2011: Møde med Energinet, Syd Energi og Enervision, status for VP og andre teknologier i en Smart Grid-sammenhæng
- 28-04-2011: Arrangør og oplægsholder på dialogmøde med hele VP-branchen om status og fremtid for varmepumper i Dk
- 22-06-2011: Smart Grid Applied Conference, Californien, præsentation
- 01-11-2011: Møde med KVCA Køleklyngen om intelligent styring af køle- og varmepumpeanlæg
- 21-11-2011: Følgegruppemøde med oplæg
- 28-11-2013: Møde med VP-ejere
- 25-04-2014: Arrangør for og præsentation på åbent temamøde for varmepumpebranchen om VP måleprojekter og Smart Grid
- 30-04-2014: Arrangør for og præsentation på åbent temamøde for varmepumpebranchen om VP måleprojekter og Smart Grid

9 Referencer

- /1/ Flexibelt elforbrug – analyse af muligheder i forbindelse med varmepumper i boliger, bilagsrapport, Teknologisk Institut, Lars Olsen og Søren Poulsen, marts 2015, s. 3
- /2/ Tvangsstop-test af varmepumper, bilagsrapport, Teknologisk Institut, Lars Olsen og Søren Poulsen, marts 2015, s. 4
- /3/ Løsningsforslag til større integration af varmepumper i lavspændingsnettet, SEAS-NVE, nov. 2013, s. 4
- /4/ Individuelle eldrevne varmepumper - implementering af ny teknologi fase 5-10 (ENS j.nr.: 51191/00-0001), Teknologisk Institut. December 2002, s. 12
- /5/ Behovsstyring af mindre køleanlæg ved hjælp af kompressorregulering (ENS j.nr.: 731327/01-0108), Teknologisk Institut. November 2004, s. 13
- /6/ VarmePumpeOrdningen (VPO), <http://www.vp-ordning.dk/>. Januar 2015, s. 14
- /7/ Den lille blå om varmepumper. Jorn Borup et al. Dansk Energi. 2011, s. 14
- /8/ DS 469, 2.udgave, 2013-02-06, Varme- og køleanlæg i bygninger, Dansk Standard, s.14
- /9/ Martin Frølich Olesen, Forundersøgelse vedrørende Smart Grid Ready husstandsvarmepumper til DREAM projektet, 03-06-2013, Teknologisk Institut, s. 15
- /10/ Fra vindkraft til varmepumper, slutrapport bilag 2, juli_2012, Energinet.dk
- /11/ "Regularium für das Label „SG Ready“ für elektrische Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen", Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., Version 1.1, 01-01-2013
- /12/ Ecodesignkrav, <http://www.ens.dk/forbrug-besparelser/apparater-produkter/ecodesign>. Januar 2015, s. 16
- /13/ DS/EN 14511, del 1, Airconditionanlæg, væskekølere og varmepumper med eldrevne kompressorer til rumopvarmning og rumkøling - Del 1: Termer, definitioner og klassifikation, 2013-11-21, Dansk Standard, s. 16
- /14/ DS/EN 14825, 1. udgave, Klimaanlæg, væskekølere og varmepumper med eldrevne kompressorer til rumopvarmning og rumkøling – Prøvning og effektmåling under delbelastning samt beregning af sæsonbestemt ydeevne, 2012-05-02, Dansk Standard, s. 16
- /15/ DS/EN 16147:2011, Varmepumper med eldrevne kompressorer – Prøvning og krav til mærkning af apparater til varmt brugsvand, 2011-03-18, Dansk Standard, s. 16
- /16/ DS/EN 12102:2013, Klimaanlæg, væskekølere, varmepumper og affugtere med eldrevne kompressorer til rumopvarmning og rumkøling - Måling af luftbåren støj - Bestemmelse af lydeffektniveau, 2013-09-26, Dansk Standard, s. 16

- /17/ Pia Rasmussen, 2011, Beregning af SCOP for varmepumper efter EN 14825, Energistyrelsen, www.ens.dk, s. 16
- /18/ Varmepumpelisten (ENS), Findes på <http://spareenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/varmepumpelisten>. Januar 2015, s. 17
- /19/ DS 418:2011, Beregning af bygningers varmetab, 2011-06-17, Dansk Standard, s. 17
- /20/ DS/INF 418-2:2014, Beregning af bygningers varmetab - Del 2: Beregning af effektiv varmekapacitet for bygninger, 2014-02-13, Dansk Standard, s. 17
- /21/ Bygningsreglement 2010. (BR10). Lovtidende A. 28. juni 2010. Erhvervs- og Byggestyrelsen, s. 17
- /22/ Klimanormal, <http://www.dmi.dk/vejr/arkiver/normaler-og-ekstremer/klimanormaler-dk/>, Danmarks Meteorologiske Institut. Januar 2015, s. 23
- /23/ Bygnings og Boligregistret (BBR), <http://bbr.dk/>. December 2014, s. 29
- /24/ L. Olsen, Bygningers tidskonstanter, Internt notat, Teknologisk Institut. December 2014, s. 39
- /25/ ”Strategi for dansk indsats inden for Smart Grid/Smart Energy”, præsentation af Torben Schulze, Energistyrelsen, temadag i forbindelse med projektet ”Smart Energi i Midten”, 10. marts 2015
- /26/ <http://www.ens.dk/info/nyheder/nyhedsarkiv/elmaalere-vaere-fjernaflaeste-2020>

10 Appendiks: Eksempel på gennemgang af et udvalgt hus til test

Dette appendiks knytter sig til kapitel 4 om demonstration og test af et antal udvalgte huse.

Gennem en case for et enkelt hus med udvidet måleprogram (dvs. ekstra temperaturfølere i forhold til standardbestykningen med måleudstyr i de 300 demohuse) beskrives, hvordan der for denne gruppe huse er gennemført en mere detaljeret bestemmelse af husenes stamdata og termiske egenskaber ved test. Formålet med analysen af varmelagringsegenskaberne er at opnå viden, som kan bruges til at vurdere størrelsen af varmepumpeinstallationens fleksible elforbrug. De vigtigste resultater fra dataanalysen af huset præsenteres.

10.1 Overordnet beskrivelse af huset

Huset er et gammelt trelænget husmandssted fra 1902, typisk for sin tid (se figur 4.2).

Energirenovering er påbegyndt; bl.a. isolering, nye vinduer og gulvvarme. Der er installeret et jordvarmeanlæg. I huset bor 1 person, lejlighedsvist 2.



Figur 10.1: Luftfoto

10.2 Nøgleoplysninger

Stamdata for huset ses i nedenstående tabel 10.1. Data stammer fra databasen fra ”Styr din varmepumpe”, BBR /23/ og fra observationer på adressen og interview af ejeren.

Datatype	Værdi	Enhed	Bemærkning
Opført	1902		
Rum	10	Stk.	
Opvarmet areal	193	m ²	160 m ² stueplan, 33 m ² 1. sal
Olieforbrug	2000	L	
Ydervægge	Mursten		
Indervægge	Gasbeton		
Lofter	Trælister		
Gulvkonstruktion	Beton		
Gulvvarme	Ja		Badevær. + renoveret værelse
Radiatorer	Ja		
Primær opvarmning	Radiatorer		
Kælder	Nej		

1_sal		Ja		33 m ²
Vinduesareal syd		6	m ²	
Brændeovn		Ja		
Brændeforbrug		3	m ³	
Varmepumpe Fabrikat og model	IVT Greenline HT+ C9			Kapacitet 8,4 kW
Lagertank kapacitet	185		L	
Voksne	1			Lejlighedsvist 2

Tabel 10.1: Stamdata for huset (ID nr. 431)

10.3 Fotos og placering af ekstra temperaturfølere

Under besøget blev huset gennemfotograferet, og der blev monteret 7 trådløse temperaturfølere.

Følgende tabel viser registreringer af billeder samt følerplaceringer og -betegnelser:

Foto	M	Rum	Etage	Ydervæg	Indhold	Føler nr	Føler placering
DSC_6613	N	Fyrrum	Stueplan	N, S	VP		
DSC_6614	N	Stuerkammer	1. sal	Ø, V	Kammer og føler	17	T. h. for dør mod N
DSC_6615	N	Stuerkammer	1. sal	Ø, V	Kig ind i kammer	17	T. h. for dør mod N
DSC_6616	N	Stuerkammer	1. sal	Ø, V	Føler	17	T. h. for dør mod N
DSC_6617	N	Soveværelse	1. sal	Ø, V	Føler	16	T. h. for dør under kontakter
DSC_6618	N	Soveværelse	1. sal	Ø, V	Føler	16	T. h. for dør under kontakter
DSC_6619	V	Soveværelse	1. sal	Ø, V	Soveværelse		
DSC_6620	V	Soveværelse	1. sal	Ø, V	Tynde rør til radiator		
DSC_6621	Ø	Trappeskakt	1. sal		Kig ned		
DSC_6622	NV	Soveværelse	Stueplan	N	Føler	11	På skabsside lige inden for dør
DSC_6623	N	Soveværelse	Stueplan	N	Soveværelse		
DSC_6624	S	Soveværelse	Stueplan	N	Soveværelse		
DSC_6625	Ø	Gang	Stueplan	N, S	Gang		
DSC_6626	SØ	Badeværelse	Stueplan	N	Føler	13	T. h. inden for dør
DSC_6627	SØ	Badeværelse	Stueplan	N	Føler	13	T. h. inden for dør
DSC_6628	N	Badeværelse	Stueplan	N	Badeværelse		
DSC_6629	V	Værelse	Stueplan	V	Værelse		
DSC_6630	Ø	Værelse	Stueplan	V	Værelse med føler	14	På dørens inderside
DSC_6631	Ø	Værelse	Stueplan	V	Værelse med føler	14	På dørens inderside
DSC_6632	S	Værelse	Stueplan	V	Værelse med føler	14	På dørens inderside
DSC_6634	Ø	Stue	Stueplan	Ø, S, V	Stue med føler	12	I hjørnereol SØ hjørne
DSC_6635	Ø	Stue	Stueplan	Ø, S, V	Stue med føler	12	I hjørnereol SØ hjørne
DSC_6636	V	Stue	Stueplan	Ø, S, V	Stue		
DSC_6637	SV	Stue	Stueplan	Ø, S, V	Stue		
DSC_6638	Ø	Køkken	Stueplan	Ø	Køkken	Rumføler	I lille hjørneskab
DSC_6639	Ø	Køkken	Stueplan	Ø	Køkken	Rumføler	I lille hjørneskab
DSC_6640	S	Spisestue	Stueplan	V	Spisestue		
DSC_6641	N	Bryggers	Stueplan	N	Føler	15	Under vægskab i østre side
DSC_6642	N	Bryggers	Stueplan	N	Føler	15	Under vægskab i østre side
DSC_6643	Ø	Gang	Stueplan	N, S	Gang		

Tabel 10.2: Liste over billeder samt følerplaceringer og -betegnelser

Husejeren har adgang til at følge alle målinger på www.styrdinvarmepumpe.dk.

De røde pile og cirkler på billederne herunder markerer placeringen af temperaturfølerne.



Fig. 10.2: Soveværelse 1. sal. Føler 16 (DSC_6632)



Fig. 10.3: Fyrrum (DSC_6613)

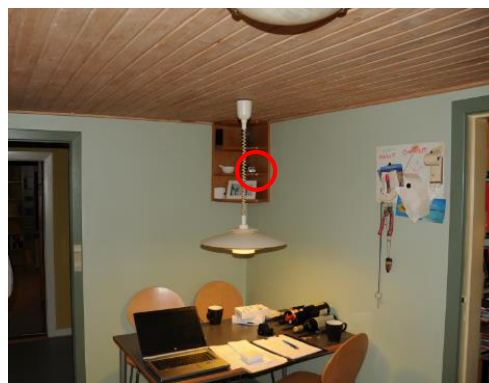


Fig. 10.4: Køkken. Rumføler i hjørneskab (DSC_6638)



Fig. 10.5: Soveværelse stueplan. Føler 11 bag skabsside (usynlig) (DSC_6623 og DSC_6624)



Fig. 10.6: Stue, stueplan (brændeovn) (DSC_6636)



Fig. 10.7: Stue, stueplan. Føler12 (DSC_6635)



Fig. 10.8: Badeværelse, stueplan. Føler 13 (DSC_6626)



Fig. 10.9: Værelse, stueplan. Føler 14 (DSC_6632)



Fig. 10.10: Bryggers, stuepl. Føler15 (DSC_6642)

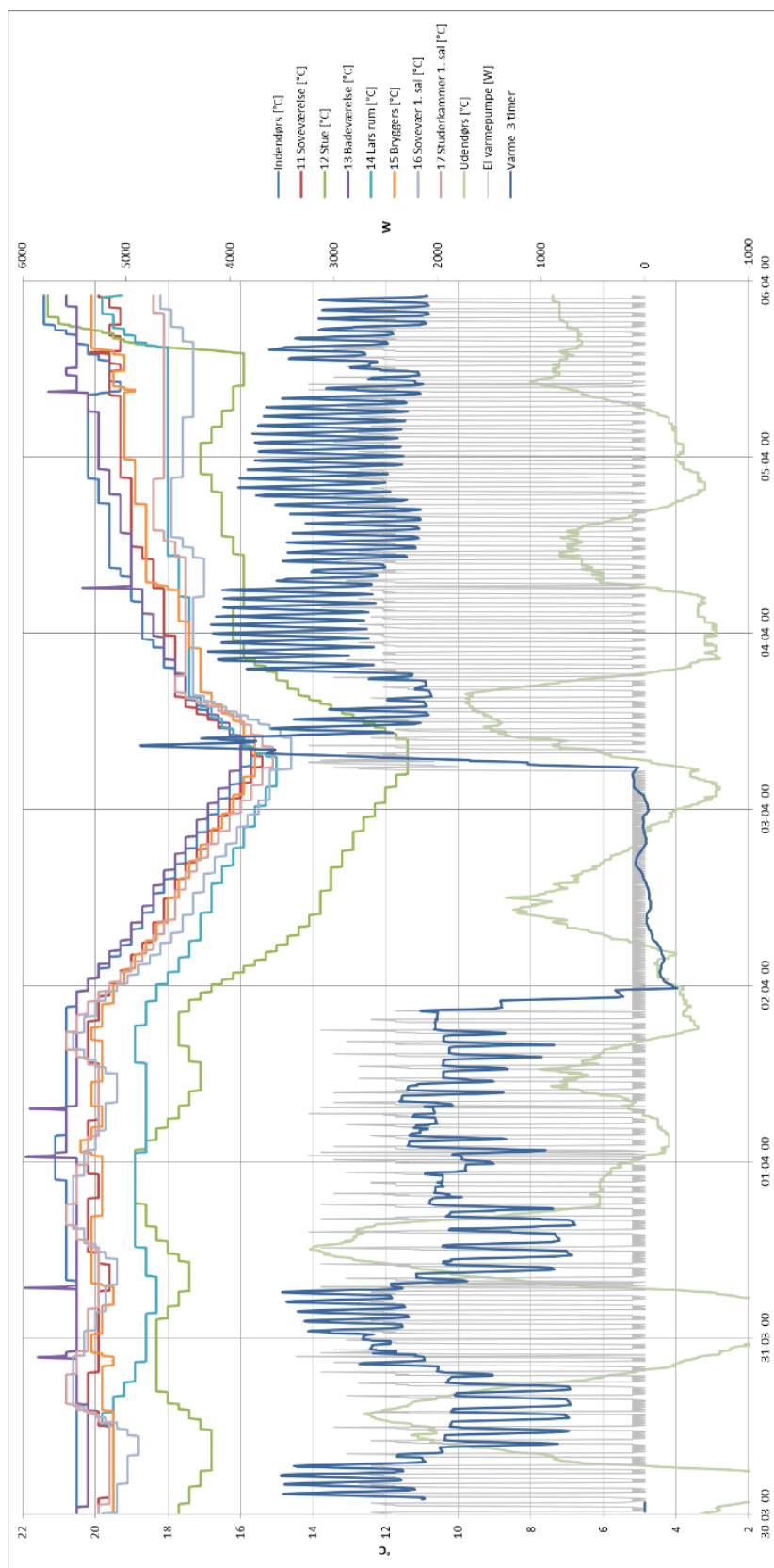


Fig. 10.11: Studerekammer 1.sal. Føler17 (DSC_6614)

10.4 Forsøg

Ejeren af huset skulle på rejse og varmepumpen kunne derfor holdes slukket i mange timer. Der blev slukket for varme fra den 1. april kl. 20.25 til den 3. april kl. 5.15. I alt 32,5 timer.

Figur 10.12 viser målinger af rumtemperaturer, udetemperatur og el- og varmeeffekt.



Figur 10.12: Målinger af rumtemperaturer og udetemperatur (venstre akse), og el- og varmeeffekt (højre akse) over en uge. De tre faser: før, under og efter forsøget fremgår tydeligt af kurverne for el (grå) og varme (blå). Den nederste svagt grønne kurve er udetemperatur. Over denne ses kurven for stuetemperatur. Den øverste kurve med de kortvarige spidser er badeværelset.

10.5 Databehandling

Databehandlingen har som mål at bestemme en tidskonstant for huset. Den gennemføres dels ud fra målingerne og dels teoretisk ud fra husets stamdata.

Tidskonstant skønnet ud fra målinger

Af figur 10.12 springer det umiddelbart i øjnene, at temperaturen i stuen (måling nr. 12) varierer mere end i andre rum og at den generelt er ret lav. Det stemmer overens med, at stuen er et dårligt isoleret rum med relativt større vinduesarealer end husets øvrige rum. Spidserne på kurven om aftenen afslører, at brændeovnen står i dette rum og bliver tændt op hver aften. Den øverste kurve med de kortvarige spidser er badeværelsestemperaturen (måling nr. 13).

Efter at varmepumpen er slukket afgives der ikke varme fra anlægget. Varmen bliver afbrudt midt i en cyklus for varmepumpen efter ca. 10-15 minutter, hvor den plejer at køre i ca. 30 minutter. Temperaturen begynder derfor at falde relativt hurtigt efter afbrydelsen af varmeanlægget.

Der er normal opvarmning i de fleste rum med temperaturer på mellem 19 og 21 °C. Der holdes en lavere temperatur i værelset (måling nr. 14), (ca. 18,5-19,5 °C) og i stue (ca. 17-19 °C).

Det øjeblik, varmetilførslen afbrydes, er der forskellige temperaturer i de enkelte rum, som svarer til ovenstående temperaturer. Temperaturen begynder at falde i alle rum og vedbliver med at falde, til der sættes varme på anlægget. Sluttemperaturerne ved genstart af opvarmningen ligger for de fleste rum mellem 15 og 16 °C. I stuen er temperaturen faldet til 11,5 °C. Efter at der sættes varme på anlægget vedbliver temperaturen med at falde i et kort tidsrum med op til 0,3 K. I nogle rum er temperaturen konstant ved den lave temperatur i op til 4 timer. Derefter begynder temperaturen at stige og det varer et par døgn, før billedet af rumtemperaturerne er identisk med temperaturerne før afbrydelsen af varmeanlægget.

Faldet i rumtemperaturerne er påvirket af solindfald gennem vinduerne den 2. april, og af at udetemperaturerne er højere midt på dagen. Påvirkningen er dog relativt beskeden.

For at karakterisere konsekvenserne af afbrydelsen af varmen fra varmepumpen kan man sige, at huset er opvarmet til vidt forskellige temperaturer. Der ser ud til, at der er sat varme på brændeovnen umiddelbart før afbrydelsen. Dette medfører, at temperaturfaldet er svært at karakterisere.

For at karakterisere temperaturfaldet i de enkelte rum er der indlagt kurver med forskellige tidskonstanter, der tilnærmer temperaturfaldet (se figur 4.14). Der er forudsat en gennemsnitlig udetemperatur på 5 °C.

I badeværelset (måling nr. 13) er der sat en starttemperatur på 20,5 °C. Temperaturfaldet er sat til at starte 1 time senere end afbrydelsen af varmen. Det skyldes, at gulvet er af beton, hvilket medfører, at der afgives varme til badeværelset i et stykke tid efter afbrydelsen af varmepumpen. Temperaturfaldet svarer til en tidskonstant på 4 døgn.

I soveværelset (måling nr. 11) er der sat en starttemperatur på 20,0 °C. Temperaturfaldet svarer til en tidskonstant på 4 døgn.

I soveværelset på 1. sal (måling nr. 16) er der sat en starttemperatur på 20,0 °C. Temperaturfaldet svarer til en tidskonstant på 3 døgn.

I stuen (måling nr. 12) er der sat en starttemperatur på 17,5 °C. Temperaturfaldet svarer i starten af forløbet til en tidskonstant på 1,5 døgn. Midt på dagen sker der et knæk på kurven, der sikkert skyldes solindfald. Resultatet bliver, at temperaturfaldet kan tilnærmes med en tidskonstant på 2 døgn.

I værelset (måling nr. 14) er der sat en starttemperatur på 18,5 °C. Temperaturfaldet svarer til en tidskonstant på 4,5 døgn.

Genopvarmningen tager i princippet flere døgn. Fra kurverne ses, at varmepumpen kører ca. halvdelen af tiden. Når varmepumpen kører, afgiver den en effekt på op til ca. 8 kW, hvilket svarer til det forventede. I princippet burde varmepumpen køre med fuld effekt, indtil genopvarmningen er afsluttet. En årsag kan være, at varmepumpen stopper, når returtemperaturen bliver højere end det indstillede. Så en mulighed er at anvende indstillinger af varmepumpen, som giver højere fremløbstemperaturer. Dette vil dog nedsætte effektiviteten af varmepumpen. En anden mulighed er at øge arealet af varmeafgiverne (radiatorerne) for derved at øge den effekt, der kan afgives til bygningen. Af kurverne kan ses, at under genopvarmningen bliver den afgivne varme reduceret efter middag den 3. april, selvom rumtemperaturerne ikke er oppe på det normale niveau. Dette kan måske skyldes, at solindfaldet eller eventuelt de høje udetemperaturer påvirker reguleringen.

Der er indlagt tidskonstanter for opvarmningen, se figur 10.13.

Tidskonstant skønnet teoretisk ud fra stamdata

For at få en ide om bygningens tidskonstant teoretisk skal man kende bygningens specifikke varmetab. Dvs. varmetab i forhold til forskellen mellem ude- og indetemperatur.

Den anden parameter er bygningens varmekapacitet.

Begge størrelser er vanskelige at bestemme uden større analyser.

For at få et skøn over det specifikke varmetab benyttes varmepumpens maksimale ydelse (eksklusiv elpatron). Det er oplyst, at det er en IVT Greenline HT plus C9. Fra producentens datablad og fra måledata skønnes, at det er model 9 med en ydelse på 8,4 kW med et elinput på 2,6 kW (ved temperatursættet 0/55 °C). Der er ikke kendskab til, hvorledes den aktuelle varmepumpe er dimensioneret. Varmepumpens kapacitet er brugt som det dimensionerende varmetab ved -12 °C ude. Dermed kan det specifikke varmetab skønnes til:

$$8.400 \text{ W} / (20 - (-12)) = 262,5 \text{ W/K}$$

Med et bruttoetageareal på 193 m² er det specifikke varmetab pr. bruttoetageareal på:

$$H = 262,5 / 193 = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Det skal bemærkes, at denne metode kun giver en indikation, da det kan være valgt at under- eller overdimensionere varmepumpen, og da der ofte er begrænsede oplysninger til rådighed ved dimensioneringen.

Husets varmekapacitet er også vanskelig at bestemme. For at få et skøn benyttes DS/INF 418-2 /19/.

I denne publikation er der givet en række typiske værdier af varmekapaciteten for sammensatte konstruktioner. Publikationen har til hensigt at bestemme varmekapacitet, som kan anvendes som inddata til programmet Be10. Det vurderes, at værdierne også vil give anvendelige resultater i forbindelse med tidskonstanter relateret til varmetabet fra bygninger.

I tabel 3 i denne publikation benyttes følgende forudsætninger ved sammensætning af data:

Gulv: Det antages, at den dominerende gulvkonstruktion er tæppe på beton. Alternativt beton uden trægulv eller tæppe, som er relevant på badeværelsesgulve.

For de to alternativer kan varmekapaciteten for hele huset beregnes:

1: 60 Wh/(m²K) for trægulv med filt på beton

2: 87 Wh/(m²K) for betongulv uden træ eller tæppe

Hvis opvarmningen af betonen i gulvet sker fra rummet, vil alternativ 1 være mest relevant. Hvis varme tilføres som gulvvarme, skønnes det, at alternativ 2 vil være relevant. Da der i huset opvarmes både med gulvvarme eller radiatorer, vælges en middelværdi på 73,5 Wh/(m²K) af de to alternativer. Arealandelen udgør 82 %, idet gulvarealet udgør typisk 82 % af bruttoetagearealet.

Dermed kan bidraget til varmekapaciteten bestemmes til: 60,3 Wh/(m²K).

For de øvrige konstruktionsdele findes:

Ydervægge: Murværk. Varmekapacitet: 37,8 Wh/(m²K). Arealandel: 0,66. Bidrag: 24,9 Wh/(m²K).

Skillevægge: Porebeton. Varmekapacitet: 7,4 Wh/(m²K). Arealandel: 1,38. Bidrag: 10,2 Wh/(m²K)

Loft: Gipsplader. Varmekapacitet: 3,6 Wh/(m²K). Arealandel: 0,82. Bidrag: 3,0 Wh/(m²K)

Inventar: I værdierne er inkluderet en standardværdi på 10 Wh/(m²K) fra inventar mv.

Den samlede varmekapacitet for bygningen pr. m² bruttoetageareal kan summeres til: 108,4 Wh/(m²K).

Med disse forudsætninger skønnes tidskonstanten, beregnet som varmekapaciteten divideret med det specifikke varmetab, til:

$$\tau = 108,4 \text{ Wh/(m}^2\text{K)} / 1,4 \text{ W/(m}^2\text{K)} = 77 \text{ h} = 3,2 \text{ døgn}$$

10.6 Samlet vurdering

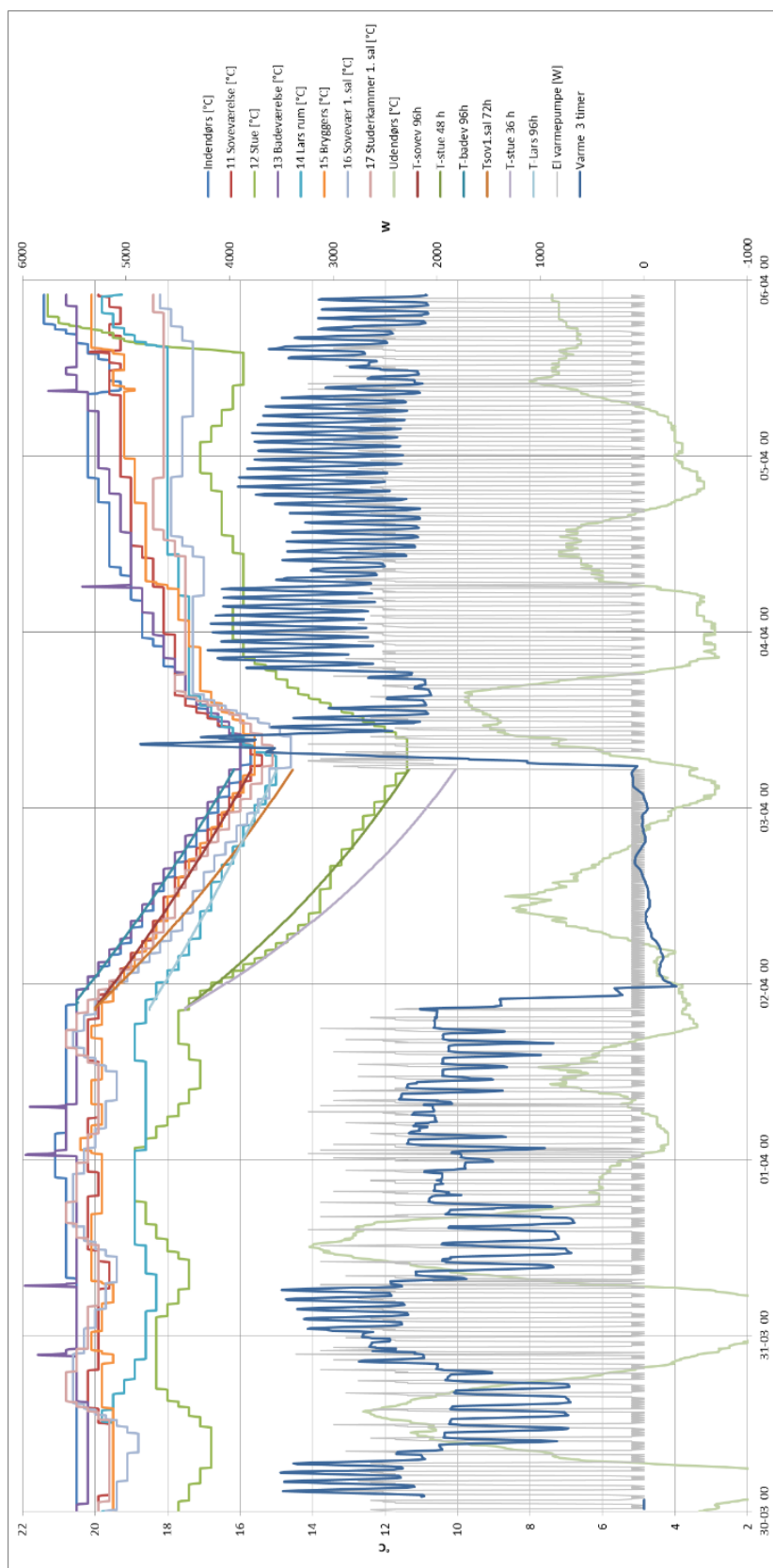
Resultaterne fra målingerne viser, at temperaturfaldet i mange rum svarer til tidskonstanter på mellem 3 til 4,5 døgn. I stuen er der en mindre tidskonstant på 1,5 til 2 døgn.

Tidskonstanten bestemt teoretisk ovenfor er 3,2 døgn, hvilket stemmer overens med de mange rum. I stuen er tidskonstanten mindre, hvilket kan skyldes et større varmetab pga. vinduerne. Årsagerne kan ligge i gulvvarme, der giver en større tidskonstant eller i et mindre specifikt varmetab end forventet eller en større varmekapacitet.

Bygningen er uens opvarmet, hvilket alt i alt gør, at tidskonstanter er vanskelige at bestemme både teoretisk og praktisk.

Den vigtigste konklusion, der kan udledes af eksemplet, er imidlertid:

Tidskonstanterne er så store, at det er muligt at stoppe varmetilførslen i et antal timer, uden at dette vil give store problemer med temperaturforholdene.



Figur 10.13: Målinger af rumtemperaturer og udetemperatur (venstre akse) og el- og varmeeffekt (højre akse) over en uge. Der er indtegnet kurver, som svarer til temperaturfald svarende til forskellige tidskonstanter.