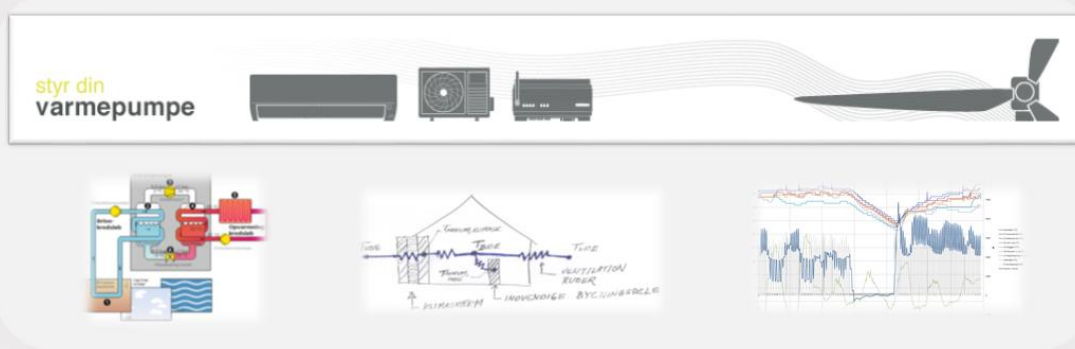




Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem

“VAFE”



Bilagsrapport

”Fleksibelt elforbrug – analyse af muligheder i forbindelse med varmepumper i boliger”

PSO ForskEl projekt nr. 2010-1-10490

Juni 2015

Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem

“VAFE”

Bilagsrapport

**”Fleksibelt elforbrug – analyse af muligheder i forbindelse med
varmepumper i boliger”**

Lars Olsen

Søren Poulsen

Køle- og Varmepumpeteknik

Teknologisk Institut

Juni 2015

Forord

I bilaget beskrives og analyseres en række overvejelser i forbindelse med anvendelse af varmepumper som en del af et fleksibelt elsystem.

Bilaget er udarbejdet som et led i gennemførelsen af projektet "Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem" (VAFE).

Projektet er støttet af PSO ForskEl og har projekt nr. 2010-1-10490.

Følgende personer har deltaget i denne del af projektet:

Lars Olsen, civilingeniør, ph.d., Teknologisk Institut (ansvarlig)

Søren Poulsen, civilingeniør, Teknologisk Institut

VAFE er gennemført af Teknologisk Institut (projektledelse), Varmepumpefabrikantforeningen, SEAS-NVE, SE (tidl. Syd Energi) samt en lang række varmepumpefabrikanter og -leverandører.

For en beskrivelse af projektet VAFE henvises til slutrapporten:

www.teknologisk.dk/projekter/projekt-varmepumper-et-aktiv-i-fremtidens-energisystem-vafe/31366

.

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

Køle- og Varmepumpeteknik

Energi og Klima

© Teknologisk Institut

Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
1 Indledning	5
2 Elforsyning, fleksibilitet og varmepumper – spørgsmål til afklaring.....	6
3 Teknologier	8
4 Scenarier	12
5 Strategi for realisering af fleksibelt elforbrug.....	13
6 Idéer til aktiviteter	15
7 Referencer	20
Appendiks 1. Muligheder for variationer af det termiske indeklima.....	21
Appendiks 2. Varmeudveksling i rum.....	23
Appendiks 3. Overslagsmæssig beregning af temperaturforløb.....	27

1 Indledning

Formålet med notatet er at give ideer til tekniske udviklingstiltag inden for Smart Grid-området vedrørende afbrydelse af varmepumper i enfamiliehuse. Gennemgangen kan betragtes som et bredt idékatalog og er udført uden at fokusere snævert på teknologiske – og økonomiske – begrænsninger.

Der redegøres kort for udfordringen med at skabe balance mellem elproduktion og -forbrug i fremtidens elforsyningssystem og behovet for fleksibelt elforbrug. Individuelle varmepumper introduceres som en del af løsningen, baseret på den varmelagringssevne, der naturligt er til stede i husene. Men inden denne løsning rulles ud i større skala, er der en række spørgsmål, der må besvares omkring bl.a. potentiale for fleksibilitet og mulige teknologier, der kan tages i anvendelse. Dette leder frem til en teoretisk og praktisk gennemgang af mulighederne omkring husenes tekniske installationer og samspillet med brugerne. Efterfølgende opstilles scenarier omkring elprissignaler som input til den løbende proces med driftsplanlægning og optimering af styrestrategien for varmepumpen, så varmepumpeinstallationens potentiale for fleksibelt elforbrug realiseres.

2 Elforsyning, fleksibilitet og varmepumper – spørgsmål til afklaring

Elforbruget varierer over døgnet og året efter et nogenlunde velkendt mønster med beherskede relative udsving i begge tidsskalaer.

Elproduktionen kom tidligere udelukkende fra ”styrbare” kraftværker, men er de senere år i stigende grad overtaget af vindmøller; en udvikling der vil fortsætte de kommende år som resultat af politisk ønske om udfasning af kraftværker fyret med fossile brændsler og på denne baggrund en markant udvidelse af vindmøllernes andel af den samlede elproduktion. El fra vindmøller kommer som vinden blæser og kan lokalt og endog på nationalt plan variere voldsomt fra time til time og på alle tidspunkter af året.

Øjeblikbalancen mellem elforbrug og elproduktion er hidtil tilvejebragt ved fortrinsvis at regulere elproduktionen på kraftværkerne, men udfordringen vil blive langt større fremover i takt med, at der sættes flere vindmøller op.

Kun i beskeden grad er der korrelation mellem øjeblikkeligt elforbrug og vindmøllers elproduktion. En stor integration af el fra vindmøller – og dette gælder også fra solceller og bølgekraft – i elsystemet med henblik på fortrængning af fossile brændsler forudsætter en langt større fleksibilitet på forbrugssiden. Individuelle varmepumper giver mulighed for fleksibilitet i den korte tidsskala i elsystemet, fordi det tilknyttede varmelager i form af varmtvandsbeholder og varmekapaciteten i bygningskonstruktionen i en vis udstrækning tillader drift, som er tidsforskuet i størrelsesordenen nogle timer fra det øjeblikkelige varmebehov.

Fleksibilitet kan opnås ved at styre varmepumperne centralt, direkte eller indirekte, så de enten afgiver varme til et lager, eller stoppes, så der alene afgives varme fra et lager /1/. Princippet i den centrale styring kan enten være i form af direkte styringssignaler fra en centralt placeret styringsenhed til den enkelte varmepumpe, eller i form af signaler for elprisen for den nærmeste efterfølgende periode, som giver mulighed for, at en lokalt placeret styreboks kan optimere varmepumpens drift under udnyttelse af udsvingene i de således på forhånd kendte elpriser.

Som en del af dette ses der i det følgende på mulighederne for at opnå et fleksibelt elforbrug i forbindelse med varmekonsumet i boliger med individuelle varmepumper.

Et fleksibelt elforbrug vil normalt ikke nødvendigvis give et lavere elforbrug, idet lagring af varme vil medføre ekstra varmetab, og varierende ydelser frem for mere konstante ydelser fra varmepumper vil normalt også give et lidt større elforbrug.

For at eksemplificere mulighederne for at lagre varme i forbindelse med varmepumper i bygninger kan det overvejes at benytte en vandtank eller at udnytte varmekapaciteten i selve bygningskonstruktionerne. Der ses på et eksempel, hvor der lagres i en vandbeholder på 200 liter. Hvis det er det muligt at hæve eller sænke temperaturen med 15 K, svarer det til en lagret energimængde på 3,4 kWh. Hvis temperaturerne i bygningskonstruktionerne i et middeltungt hus med teglvægge kan hæves eller sænkes 2 K og bygningens areal er 100 m², vil det give mulighed for at lagre ca. 16 kWh.

Som illustreret vil det normalt være nemmere at lagre en større varmemængde i bygningskonstruktionerne end i separate vandlagre af normal størrelse.

For at afklare mulighederne for at have et fleksibelt elforbrug i bygninger i forbindelse med opvarmning er der en række grundlæggende spørgsmål, der ønskes besvaret:

- Hvor stor en effekt kan overføres?
- Hvilke temperaturvariationer kan accepteres?
- Hvor lang tid kan det gøres i?
- Hvor meget varme kan lagres?
- Hvad er effektiviteten af varmelagringen?
- Hvad er konsekvensen for det samlede varmeforbrug?
- Hvad er den energimæssige konsekvens (når COP af varmepumpe inddrages)?
- Hvor stort et elforbrug kan flyttes?
- Hvad er den økonomiske konsekvens?
- Hvordan varierer temperaturerne (tidsmæssigt og i rummet)?
- Hvad er den komfortmæssige konsekvens?

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

- Type af varmekilde (dvs. type af varmepumpe og eventuelt supplerende varmekilder som elpatron og brændeovn)
- Type af varmeanlæg (gulvvarme, radiatorer eller andet)
- Regulering af varmeanlæg (kontrolenhed og type af termostat)
- Type af lager (bygningkonstruktion, vandbeholder eller andet)
- Type af bygning (udformning der har betydning for varmebehov og varmelagringsmulighed).

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

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

Afklaring af disse forhold kan ske ved hjælp af følgende *procedurer*:

- Afklaringsfase (valg af forudsætninger og afhængigheder samt afgrænsning af opgaven)
- Modellering (og målinger) af systemer og indbyrdes afhængigheder
- Karakterisering af systemer, indbyrdes sammenhænge og nøgletal
- Vurdering af resultater.

3 Teknologier

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, brugsmæssige og omgivende forhold.

1. For at styre og optimere elforbruget kan der udsendes *elprissignaler* med et vist varsel. Jo større variationerne i elprisen er, og jo oftere der forekommer ændringer, jo mere vil der kunne opnås ved en styring og optimering af elforbruget. Hvis variationen er lille og sjældent forekommende, vil der ikke være noget stort incitament til at styre elforbruget.

2. 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. En fordel er, at der normalt ikke er nogen komfortmæssige gener. Ulemperne vil være omkostningerne til investering i lageret samt plads, idet lageret skal have en vis størrelse, for at der opnås en rimelig virkning, til et lidt forøget varmetab og til ekstra pladsforbrug. En strategi for drift af lageret kan enten 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 overstiger et vist niveau, kan der så anvendes varme fra lageret. En tredje mulighed kunne være at tage varme til varmepumpen fra lageret, hvis temperaturen af varmelageret ikke er tilstrækkeligt høj, og derved opnå en væsentligt bedre nyttevirkning af varmepumpen i en periode end ved at tage varmen fra jordslanger. Derved opnås reduceret elforbrug i en periode.

3. En mulighed er at benytte en *elpatron* i forbindelse med varmepumpen. Dette gøres i en del tilfælde, for at selve varmepumpen ikke bliver overdimensioneret. 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. 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").

4. Ovennævnte metodikker vil ikke nødvendigvis give nogen 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
- Arealmæssigt varierende setpunktstemperaturer

Der kan tænkes forskellige former for medvirken. Under alle tilfælde skal der indgås en aftale med elleverandøren om vilkårene for medvirken. Der vil normalt altid være en form for incitament, når en

sådan aftale indgås. Forbrugeren bør også have mulighed for at afvise en central styring, da der kan være tidspunkter, hvor brugeren har et stort behov for tilfredsstillende 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 dette notats rammer).

En mulighed kunne være, at der i hver bolig er installeret en styreboks, som indeholder den nødvendige information til at foretage 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.

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 brugere 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 varmeforbrug.

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 Appendiks 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 Appendiks 1 diskuteres det, 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 som 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, hvilket der 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 vil blive lidt større, men dette skal kompenseres af en lavere elpris.

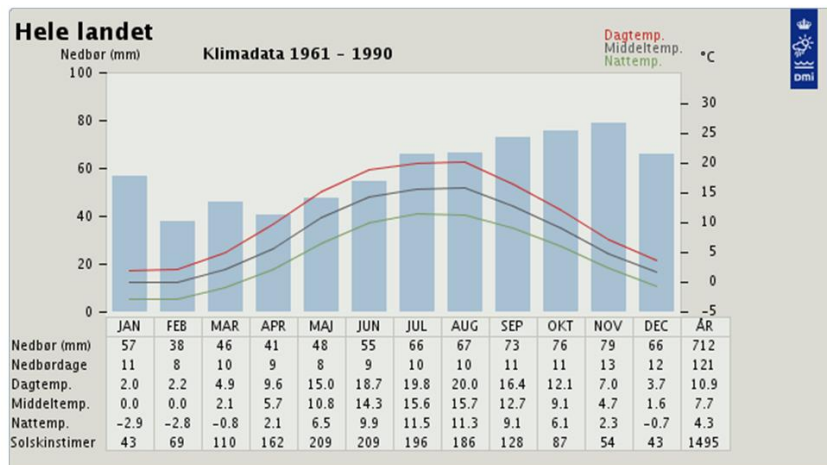
5. Supplerende varmeanlæg.

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, der fortæller, hvornår det kan betale sig 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.

6. Styring af varmetilførslen

Udeklimaet har indflydelse på varmebehovet. Udeklimaet har også betydning for nyttevirksomheden af varmepumper, specielt for luft/vandvarmepumper. 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 1).

Klimanormaler for Danmark



Figur 1: Gennemsnit af dag-, middel- og nattemperaturer. Kilde: DMI /2/.

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

7. Styring af varmepumpen.

Nogle varmepumper kan kapacitetsreguleres (variabelt omløbstal) i stedet for at blive styret on/off. Er den 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, at ved høje driftstemperaturer er der et ekstra slid på varmepumpen. 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

hævning af varmtvandstemperaturen til fx 65 °C altså for at reducere slitage og af rent køletekniske begrænsninger.

8. 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 omkring 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.

9. 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* på radiatorerne, 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 enkelt 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 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 ½ K. De forventes at have en batterilevetid på 2 år.

4 Scenarier

Det foreslås at undersøge forskellige scenarier for styring af varmepumper:

1. *Lav elpris*

Udgangstilstanden er, at der er normal komforttemperatur og normal elpris. Elprisen ændres derefter fra et normalt niveau til et meget lavt niveau. Der tilføres efterfølgende ekstra varme fra varmepumpen i en periode, hvor elprisen er lav. Derefter stiger elprisen til et normalt prisniveau og varmeydelsen fra varmepumpen stoppes, indtil den normale komforttemperatur er nået. Herefter kører varmepumpen på et normalt niveau.

Diskussion: Der vil være et ekstra varmetab ved varmelagring. Det ekstra varmetab skal som minimum kunne betales af den reducerede elpris. En øget varmeydelse skal sammenholdes med den ændrede COP for varmepumpen.

2. *Høj elpris – kort tid*

Udgangstilstanden er normal komforttemperatur og normal elpris. Elprisen ændres derefter til et meget højt niveau. Varmepumpen stoppes og temperaturen falder til et niveau, der kan accepteres i en vis periode. Herefter sker der en genopvarmning til den normale komforttemperatur.

Diskussion: Ved genopvarmning skal der leveres en øget varmeydelse fra varmepumpen og dette vil give en lavere COP i dette tidsrum. Tidsforbruget til genopvarmning skal overvejes.

3. *Høj elpris – lang tid*

Udgangstilstanden er normal komforttemperatur og normal elpris. Elprisen ændres derefter til et meget højt niveau. Varmepumpen stoppes og temperaturen falder til et acceptabelt minimumsniveau. Herefter sker der en opvarmning, så den lidt lavere temperatur opretholdes, indtil elprisen er faldet til et normalt niveau.

Diskussion: Der er ingen varmeydelse eller elforbrug, indtil grænsetemperaturen nås, derefter er varmeydelsen lidt lavere end før sænkningen, dels på grund af, at der fortsat afgives lidt akkumuleret varme fra den midterste del af konstruktionerne og dels på grund af den lidt mindre temperaturforskel mellem inde og ude.

5 Strategi for realisering af fleksibelt elforbrug

For at realisere fleksibelt elforbrug kan der opbygges en styring, som tager hensyn til forskellige parametre. Nedenfor er skitseret en række muligheder for, hvilke emner/parametre kan tages med i optimeringen af en driftsstrategi for varmepumpen. Det skal prioriteres, hvilke af disse parametre, der skal inddrages i den forsøgsmæssige del af projektet:

1. Elprissignaler (prisvariation, tidshorisont). Fastlagte og forventede elpriser
2. Hvilke former for lagring medtages
 - Bygningens varmekapacitet (radiatorer og gulvvarme)
 - Gulvets varmekapacitet (gulvvarme)
 - Varmelager (varmt vand)
3. Under hvilke forhold skal anvendelse af elpatron medtages i overvejelserne
 - Forøg varmeydelse fra varmepumpe, hvis det kan forudses, at der er behov for, at elpatron vil blive sat ind på et senere tidspunkt
 - Legionella-kur mindst hver 14. dag, hvor temperaturen i varmtvandsbeholder øges til mindst 65 °C
 - Er elpris så billig, at varmeoptag i varmtvandsbeholder kan forøges med elpatron
4. Brug af andre supplerende opvarmningsformer
 - Temperatur kan sænkes til et lavere niveau, hvis det er forudsat, at der tages en brændeovn i brug i visse rum, når elprisen er høj
5. Komfortgrænser fastlægges
 - Maks./min. rumtemperaturer (radiatorer og gulvvarme)
 - Maks./min. overfladetemperaturer (gulvvarme)
 - Maks./min. varmtvandstemperaturer
 - Tidsafhængighed af maks./min.
 - Rumafhængighed af maks./min.
 - Brug af bygning (fx hverdag, weekend, ferie uden brug af bygning eller særlig anvendelse fx ved fester)
6. Udeklimaet
 - Det forudsættes, at der opstilles forudsætninger eller gives prognose (de næste 24 timer eventuelt mere) for
 - Udetemperatur
 - Solindfald
 - Vindhastighed
 - Eventuelt vindretning
7. Varmepumpens afhængighed af driftsforhold
 - COP som funktion af
 - Ydelse (kapacitetsstyring eller on/off styring)
 - Temperatur af brinekreds /fremløbs- og returtemperatur til varmeanlæg/
 - Maksimal kapacitet uden elpatron, størrelse af elpatron.
8. Varmebehov i varmeanlæg
 - Der skal fremskaffes informationer om:
 - Varmeafgivelse fra varmeafgivere
 - Afkøling af cirkulerende vand ved forskellige ydelser
 - Varmebehov ved forskellige driftsstrategier

Muligheder for styring af varmeafgiverne og eventuelt udskiftning af styring eller termostater

9. Scenarier

Der tages hensyn til ovennævnte kriterier, parametre og forudsætninger ved forskellige scenarier. Der foretages en optimering ud fra de kriterier, som udvælges. Optimeringen vil med det valgte system ske ud fra en økonomisk vurdering. Brugeren kan ændre kriterierne eller have mulighed for en overstyring af indstillingerne i en periode.

For hvert af punkterne kan det overvejes og undersøges, hvor vanskeligt det er at fremskaffe og udnytte disse informationer samt hvilken betydning, informationerne har for fleksibiliteten.

6 Idéer til aktiviteter

Nedenfor er skitseret en række mulige aktiviteter, der kunne gennemføres med henblik på undersøgelse og test af mulighederne for anvendelse af fleksibelt el i boliger med varmepumper. Afgrænsningen i aktiviteterne er sket ud fra den tanke, at de skulle kunne gennemføres på testfaciliteten, EnergyFlexHouseFamily (EFH) /3/ ved Teknologisk Institut i Tåstrup. EFH er en moderne, energieffektiv og beboet villa, som er designet til testformål. I det følgende beskrives mulighederne i EFH og idéer til aktiviteter nærmere.

A. Test i EnergyFlexHouseFamily – rumvarme

Styring

EFH er udstyret med et omfattende målesystem, så temperaturer og energimæssige forhold kan følges løbende og detaljeret. Beboernes reaktioner kan registreres gennem diverse spørgeskemaer mv.

Der er installeret to varmepumper, hhv. et jordvarmeanlæg og et boligventilationsanlæg. Disse er indbygget i samme kabinet. Varmeforsyningen kommer desuden fra et solvarmeanlæg. Solvarmen har førsteprioritet til at producere brugsvand til en brugsvandstank og eventuelt overskud kan gå i gulvvarmeanlægget. Boligventilationsanlægget er sat til at producere brugsvand, hvis solvarmeanlægget ikke kan følge med, og sekundært leverer det rumvarme i form af opvarmet frisk ventilationsluft. Hvis hverken solvarme eller boligventilation kan levere tilstrækkeligt med varmt brugsvand, tænder en elpatron (on/off) i brugsvandstanken. Jordvarmeanlægget producerer varme til gulvvarmeanlægget, hvis solvarmeanlægget ikke kan følge med. Til jordvarmeanlægget hører en buffertank på ca. 10 liter, hvori en elpatron er installeret. Varmepumperne har så stor kapacitet, at elpatronerne kun sjældent er i drift.

Der kan gennemføres test med fjernstyring af termostaterne. Derved vil status for temperaturer målt af termostaterne og de aktuelle setpunkter kunne registreres, og det vil være muligt individuelt at justere setpunkterne for de 10 termiske zoner i bygningen.

For at sikre at brugerne ikke bliver generet unødigt, har de mulighed for at trykke på en knap, hvorved indstillingerne neutraliseres, så temperaturerne indstilles på en basistemperatur fx 21 °C.

Kapaciteten af jordvarmepumpen er 3,8 kW. Varmepumpen vil under normale omstændigheder (dvs. ikke alt for koldt) kunne trække alt varmeforbruget bortset fra opvarmning af indblæsningsluften. Der skal dog være fokus på, at der er tilstrækkelig kapacitet, når det er meget koldt udendørs.

Forsøg

Formålet er især at bestemme, hvordan temperaturforløbet bliver, når varmetilførslen stoppes eller der tilføres maksimal varme, samt når setpunktstemperaturerne ændres. Der kan også måles på, om varmepumpens effektivitet ændres, og om der er reaktioner fra beboerne.

Der kan foretages tests, hvor setpunktstemperaturen hæves og sænkes i et tidsrum. Det er muligt at vælge en temperatur på 21 °C som udgangspunkt (kan eventuelt justeres).

I et måleprogram kan der startes med mindre temperaturvariationer med en varighed på mellem 1 og 6 timer.

Det foreslås, at der startes med temperaturvariationer i den første periode på ± 1 K. I næste periode kan der prøves med temperaturvariationer på ± 2 K. Dette interval kan måske forøges.

Beregninger

Der kan opstilles en beregningsmodel for EnergyFlexHouse i programmet BSim, se /4/ og /5/, og der kan udføres analyser af effekten af ændringer af setpunkter og af stop af varmepumpen. Det vil dermed være muligt at få overblik over de forventede konsekvenser af ændringer i fx størrelsen af temperaturændringen, ændringens varighed, tidspunkt på dagen og fordelingen på de enkelte rum. Det vil altså være muligt at få et mere uddybende og konsistent billede af konsekvenserne af et fleksibelt elforbrug end ved målinger. Målingerne vil derimod kunne fortælle om de forventede (simulerede) resultater vil kunne opnås i praksis.

Sammenligning mellem målinger og *BSim-model* af bygningen kan være vanskelig (og dermed meget tidskrævende), da mange parametre har indflydelse på den målte virkelighed. Eksempler på dette forhold er bl.a. styringen af varmeanlægget, der er vanskelig at simulere korrekt, detaljeringsgraden af modellen, hvor modellen er væsentlig mindre detaljeret end de virkelige forhold, og interne luftstrømninger i bygningen som ikke simuleres detaljeret.

Bemærkninger vedr. øvrige installationer i bygningen

Forsøgsmæssigt vil det være enklest at have en konstant indblæsningstemperatur, så lufttilførslen fra *boligventilationsvarmepumpen* ikke leverer en ekstra varmeydelse, hvis varmetilførslen fra jordvarmepumpen ønskes reduceret. En mulighed kan være at give den tilførte luft fra denne varmepumpe et lidt lavere setpunkt end normalt, fx 18-19 °C. Derved vil varmebidraget fra denne varmepumpe være relativt konstant og kun have en lille indflydelse på driften af jordvarmepumpen. *Solvarmeanlægget* kan give forstyrrelser af resultaterne, ved at der kan tilføres varme fra solfanger til retur på gulvkreds. Det foreslås, at der lukkes for denne kreds, da der ikke bliver målt på varmetilførslen, og da der kun bliver tilført en marginal mængde varme fra solfanger, idet tilførsel af solvarme til varmt brugsvand har førsteprioritet.

Elpatronen i varmepumpen bliver startet, når fremløbstemperaturen er lavere end et vist setpunkt (bestemt af den normale fremløbstemperatur minus en vis temperaturforskel). Hvis denne temperatur underskrides, går elpatronen i gang med en vis effekt. Når setpunktet for fremløbstemperaturen er nået, fortsætter elpatronen med at afgive varme i et vist ekstra tidsrum. Efter dette tidsrum slukker elpatronen og afgiver først varme igen, når fremløbstemperaturen igen bliver for lav. Det vil være ønskeligt at styre varmepumpen, så brugen af elpatronen minimeres. En mulighed kunne være at mindske den fremløbstemperatur, som elpatronen starter ved. Dette sætter så begrænsninger på den maksimale varmeydelse ved spidsbelastninger, men gør, at selve varmepumpen kan køre i længere tidsrum.

Formål

Der er følgende formål med disse test i EFH

- Kontrollere at teknikken virker; dvs. at styrestrategien for varmepumpen medfører, at elforbruget mindskes væsentligt i perioden med nedsat temperatur. I tilfælde af at temperaturerne skal hæves, skal det sikres, at varmepumpen kører fornuftigt dvs. uden at elpatronen aktiveres
- Måle hastighed af temperaturændringer
- Måle temperaturændring i konstruktioner og dermed muligheder for varmelagring
- Få erfaringer med ydelsen (og COP) af varmepumpe ved varierende belastning
- Opsamle måledata som kan sammenstilles/sammenlignes med beregnede værdier fra BSim.

B. Beregninger

B1. BSim simuleringer – rumvarme

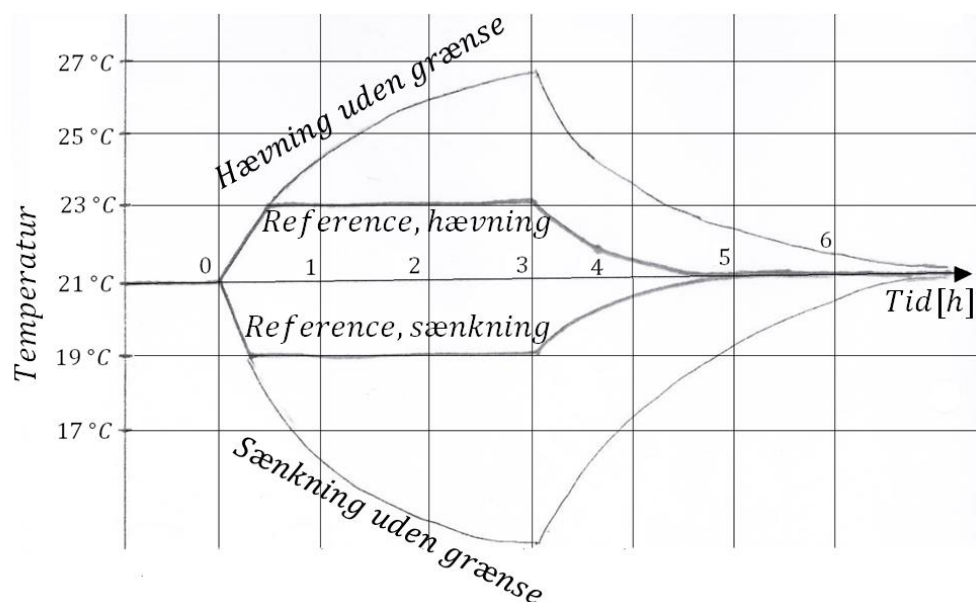
Fastlæggelse af forudsætninger

Der kan vælges 1-3 typiske modelbygninger. Der kan tages udgangspunkt i et typisk enfamiliehus – opført af mursten. Bygningen opvarmes til en referencetemperatur som sættes til at være konstant 21 °C. Der vælges forskellige driftsstrategier for opvarmning af bygningen. Temperaturen hæves eller sænkes i en varierende længde på visse tidsrum af døgnet. I nogle af tilfældene kan varmetilførslen stoppes, i andre kan varmetilførslen stoppes, indtil der nås en vis temperaturgrænse, hvorefter der holdes en konstant temperatur. I andre tilfælde kan varmpumperne køres med fuld kapacitet i et vist tidsrum. Det er også muligt at lade varmpumperne køre med fuld kapacitet, indtil der opnås en vis grænsetemperatur. Der sættes en øvre grænse på de tidsrum, hvori der er en ændret driftstrategi.

Nedenfor er vist et forslag til beregninger som viser forholdene ved forskellige variationer mht. varighed og ændringens størrelse:

Varighed	Sænkning af temperatur		Hævning af temperatur		
	Ingen grænse	Min. 19 °C	Ingen grænse	Maks. 23 °C	Maks. 25 °C
1 time	X	X	X	X	X
2 timer	X	X	X	X	X
3 timer	X	Reference	X	Reference	X

Tabel 1: Forslag til beregninger som viser forholdene ved forskellige variationer mht. varighed og ændringens størrelse



Figur 2: På figuren er vist fire eksempler på hævnning og sænkning af temperaturen i tre timer, henholdsvis uden temperaturgrænse og med temperaturgrænserne 23 °C og 19 °C

De beregninger, der i tabel 1 er markeret som reference, kan benyttes som udgangspunkt ved de efterfølgende analyser. Der kan også varieres mht. den maksimale effekt af varmpumpen. En anden mulighed er, at der indlægges en temperaturkurve afhængig af udetemperaturen, som bestemmer den maksimale effekt, varmpumpen yder. Det foreslås, at der ses på varmpumper, som har en kapacitet svarende til henholdsvis 80 %, 100 % og 120 % af det dimensionerende varmetab. Varmepumper (væske/vand og luft/vand) dimensioneres normalt til at dække 80-85 % af det dimensionerede varmetab (maksimal effekt), hvilket medfører, at mellem 95 og 100 % af varmebehovet (energi på årsbasis) kan dækkes af varmpumpen /1/.

Der kan vælges bygningsudformninger, som giver et opvarmningsbehov på mellem 100 og 150 kWh/m².

Der ses eventuelt på konsekvensen af individuel styring af de enkelte rum.

Med hensyn til bygningens varmekapacitet er der en variation på mellem ca. 25 og 200 Wh/m²K /6/. Der benyttes en referenceværdi på ca. 80 Wh/m²K.

Formål

Finde varmebehov og temperaturforhold ved de forskellige former for styring af varmepumpe.

Konsekvenser for det samlede rumvarmeforbrug beregnes. Resultaterne og strategien vil afhænge af de aktuelle varmebehov dvs. det aktuelle udeklima og dermed også af årstiden.

En parameter, der bør ses på, er, hvor stort et elforbrug, der kan flyttes.

B2. Varmepumpeberegninger

Styring af varmepumper

Der er muligt at foretage beregninger af varmepumpen baseret på de varmebehov, som er beregnet efter BSim. Et problem er dog, at det i BSim ikke er muligt frit at indlæse varierende setpunkttemperaturer igennem et år. Der kan enten udføres meget simplificerede beregninger, eller der kan benyttes beregningsprogrammet PackCalc. Konsekvenser for energiforbrug og drift af varmepumpe bestemmes.

B3. Varmeakkumulering i vandlager

Det foreslås at regne simplificeret på varmeakkumulering i vandlager.

Der kan ses på beholderstørrelse, maksimal effekt af varmepumpe, maksimale og minimale temperaturer i vandlager, tider til opvarmning og afladning af varmelager.

Der kan derved gives estimater for energiforbrug og flytning af elforbrug.

Der kan eventuelt regnes mere detaljeret med programmet PackCalc.

C. Optimeringsstrategi for drift af varmepumpe

Der er mange muligheder for at inddrage faktorer, som det er beskrevet i afsnit 4. I praksis vil det i starten sandsynligvis være for omfattende at inddrage alle faktorerne. Det skal derfor vælges hvilke parametre, der som minimum skal tages hensyn til og starte med disse. Efterfølgende kan strategien udbygges med flere faktorer.

Et eksempel kunne være traditionel dimensionering af varmepumpen til en kapacitet på 80 % af det dimensionerende varmebehov. Her vil der være et behov for at bruge elpatronen i vintersituationen med et stort varmebehov ved en normal (traditionel) driftsstrategi for varmepumperne. De tidspunkter, hvor den anvendes, kan forventes at være om natten, hvor der er ikke er tilskud fra solindfald gennem vinduerne, og hvor udetemperaturerne er lavest, samt i forbindelse med opvarmning af varmt brugsvand, hvilket typisk sker om formiddagen og tidlig aften. I nogle tilfælde kan elprisen være så lav, at det kan betale sig, samtidig med drift af varmepumpen, at anvende elpatronen, men det må anses for at være sjældent forekommende. I de fleste tilfælde må det forventes, at der er en typisk døgnvariation af elprisen, som er mere begrænset, og som gør, at anvendelsen af elpatronen skal minimeres. Dette forhold medfører, at varmepumpen bør køre i lange tidsrum, måske i døgn drift, og dermed lagre varme i brugsvandsbeholderen og i bygningskonstruktionerne (op til en vis temperatur)

og dermed sikre, at elpatronen bliver anvendt mindst muligt. Når elpatronen endelig skal bruges, bør det ske på tidspunkter, hvor prisen er lavest mulig, hvilket ofte vil være om natten efter midnat. Her bør afsættes så meget varme, at rumtemperaturen er acceptabel om morgenen, og at der er tilstrækkeligt med varmt vand i varmtvandsbeholderen.

Ses på en periode i foråret eller i efteråret, så udnyttes varmepumpens kapacitet ikke fuldt ud. Der vil være gode muligheder her for at udnytte lav- og højprisperioder, uden at der er behov for at indkoble elpatronen. Om dagen vil rumvarmebehovet ofte være begrænset på grund af solindfaldet. Om aftenen skal der ske en opvarmning, mens temperaturen af brugsmæssige forhold normalt kan sænkes sent på aftenen. Om natten (sidste del), hvor der typisk er lave priser, kan der ske en genopvarmning af både rum og det varme vand.

Omfanget af hvilke informationer der kan inddrages i forbindelse med projektet, afhænger af erfaringerne, der opnås i løbet af projektet.

D. Målesystem til test af systemer i praksis

For at undersøge de praktiske muligheder kan der foretages et antal målinger, hvor styring af varmepumper af hensyn til fleksibelt elforbrug skal testes. I disse forsøg kan der som forudsætning vælges nogle fiktive prissignaler, som driften af varmepumperne skal optimeres ud fra. Afhængig af tilgængelig hardware og software vil driften blive optimeret. Der udformes en driftsplan, som anvendes for varmepumpe og varme anlæg.

Driften af anlæggene kan følges ved detaljerede målinger. Det er muligt at benytte teknikker svarende til dem, som er beskrevet under testene i EFH.

7 Referencer

- /1/ Den lille blå om Varmepumper. Jorn Borup et al. Dansk Energi. 2011
- /2/ Klimanormal, <http://www.dmi.dk/vejr/arkiver/normaler-og-ekstremer/klimanormaler-dk/>, Danmarks Meteorologiske Institut. Januar 2015
- /3/ EnergyFlexHouse, <http://www.teknologisk.dk/projekter/energyflexhouse>, Teknologisk Institut, Januar 2015
- /4/ BSim, Integreret edb-værktøj til analyse af bygningers energi og indeklimaforhold. <http://www.sbi.dk/indeklima/simulering>. 2014
- /5/ Renovering af varmepumper – Smart Grid og lavtemperaturfjernvarme, Teknologisk Institut, Lars Olsen, December 2012
- /6/ DS/INF 418-2: Beregning af bygningers varmetab – Del 2: Beregning af effektiv varmekapacitet for bygninger, 2014
- /7/ DSF 3033, 2009 Klassificering af indeklimaets kvalitet i boliger, institutioner og kontorer. Høringsudgave. Dansk Standard
- /8/ DS/EN 15251: 2007. Inputparametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. Dansk Standard. 2007
- /9/ Bygningsreglement 2010. (BR10). Lovtidende A. 28. juni 2010. Økonomi- og Erhvervsmin., Erhvervs- og Byggestyrelsen
- /10/ DS 474. 1995. Norm for specifikation af termisk indeklima. Dansk Standard. København 1995
- /11/ Indeklimahåndbogen. SBI-anvisning 196. Statens Byggeforskningsinstitut 2000. 2. udgave

Appendiks 1. Muligheder for variationer af det termiske indeklima

For at kunne akkumulere varme i bygningskonstruktionerne er det nødvendigt at arbejde med og anvende en vis variation af rumtemperaturerne. I det følgende er diskuteret, hvor store variationer der generelt set kan forventes accepteret.

Der findes ikke veldefinerede krav til acceptable temperaturvariationer i boliger.

Problemstillingen er bl.a., at der i boliger ofte er mulighed for at ændre påklædningen alt efter temperaturforholdene, og der er i en vis grad mulighed for at skifte opholdssted. Fx vil det som regel være muligt at flytte sig, så det ikke er nødvendigt at sidde i direkte solskin i en bolig. Derimod er der fx i kontorer mere snævre grænser for påklædningen og mulighederne for løbende at flytte sig. Der er derfor for kontorer givet retningslinjer for, hvorledes der opnås et acceptabelt komfortniveau. For at give et indtryk af mulighederne for variationer af indeklimaet er de termiske indeklimakrav til kontormiljøer beskrevet nedenfor. Der er foretaget en inddeling i 5 kvalitetsklasser for indeklimaet, DSF 3033 /7/.

Beskrivelse af de fem kvalitetsklasser for indeklimaet generelt:

Klasse A: Det rigtigt gode indeklima

Den bedste klasse, som indebærer, at de termiske forhold er komfortable året rundt, og at der er gode muligheder for individuelle indstillinger. Luftens indhold af uønskede forureninger er lav, selv i situationer hvor forureningsproduktionen er større end normalt. Lys- og lydforhold er gode med gode muligheder for individuelle reguleringer.

Klasse B: Det gode indeklima

Det gode indeklima. I forhold til den bedste klasse vil der dog kunne forekomme gener som træk samt lyd- og lugtgener.

Klasse C: Indeklima svarende til kravene i bygningsreglementet

Indeklimaet svarer til minimumskravene i bygningsreglementet, som opnås enten ved at opfylde bygningsreglementets krav ved nybyggeri/ombygning, eller som resultat af målinger/vurderinger. Risikoen for negative helbredseffekter er lille, men der kan forekomme gener, fx i form af for høje temperaturer på varme dage eller lugt.

Klasse D: Indeklima ringere end minimumskravene i bygningsreglementet

Indeklimaet indebærer, at risikoen for negative helbredseffekter er større end i klasse C, men dog stadig lille. En betydelig andel af brugerne vil opleve gener på varme eller kolde dage samt lugt.

Klasse E: Indeklima med en vis risiko for negative sundhedseffekter og betydelige gener

Den ringeste af de fem kvalitetsklasser. Der er en vis risiko for negative helbredseffekter og sikkerhedsmarginen er begrænset. Betydelige gener kan forekomme hos store dele af de brugere, der opholder sig i et indeklima af denne klasse.

I DSF 3033 er givet følgende temperaturgrænser for kontorer i de 5 kvalitetsklasser:

Værdier	A	B	C	D	E
Operativ temperatur (°C)					
Sommer	24,5±1,0*	24,5±1,0	24,5±1,5	24,5±2,5	Ingen grænse
Vinter	22,0±1,5*	22,0±1,5	22,0±2,0	22,0±2,5	Ingen grænse

For boliger er der ikke i DSF 3033 angivet egentlige grænser for temperaturer, men retningslinjer for hvordan et godt indeklima opnås. I DS/EN 15251 /8/ er der vist temperaturniveauer i forskellige klasser. Det ses, at der i nogle rum, såsom køkken, tillades lavere temperaturer end i opholdsrum, såsom stue og soveværelser.

A.3 Recommended indoor temperatures for energy calculations

Table A.3 — Temperature ranges for hourly calculation of cooling and heating energy in three categories of indoor environment

Type of building or space	Category	Temperature range for heating, °C	Temperature range for cooling, °C
		Clothing ~ 1,0 clo	Clothing ~ 0,5 clo
Residential buildings, living spaces (bed room's living rooms etc.) Sedentary activity ~1,2 met	I	21,0 -25,0	23,5 - 25,5
	II	20,0-25,0	23,0 - 26,0
	III	18,0- 25,0	22,0 - 27,0
Residential buildings, other spaces (kitchens, storages etc.) Standing-walking activity ~1,5 met	I	18,0-25,0	
	II	16,0-25,0	
	III	14,0-25,0	

Temperaturniveauer ved timebaserede beregninger ved køling og opvarmning i tre klasser. Uddrag af DS/EN15251:2007

I Bygningsreglementet 2010 /9/ henvises til DS 474 /10/. Her er skrevet, at den operative temperatur i opholdszonen bør ligge i intervallet: $20\text{ °C} < t_o < 24\text{ °C}$.

Sommerforhold dog: $23\text{ °C} < t_o < 26\text{ °C}$.

Der er også givet retningslinjer for ændringshastigheden af rumtemperaturerne. Der er anbefalet en temperaturændring på mindre end 2 K/time og en projekteret maksimal temperaturstigning på mindre end 4 K pr. dag. Der er også givet andre krav vedrørende det termiske indeklima som fx stråling og overfladetemperaturer af gulve. Se fx Indeklimahåndbogen.

Diskussion

I tabellerne er vist, at der tillades lidt større temperaturvariation om vinteren end om sommeren, hvilket skyldes den øgede påklædning om vinteren i forhold til om sommeren.

På grundlag af ovenstående vurderes, at en temperaturvariation på $\pm 1\text{ K}$ normalt altid kan tillades, og at det i nogle tilfælde vil kunne accepteres at have en temperaturvariation på $\pm 3\text{ K}$. Det skønnes, at den gennemsnitlige acceptable temperaturvariation er på $\pm 2\text{ K}$.

Appendiks 2. Varmeudveksling i rum

Varmeudveksling i rum mellem varmeafgiver, luften og det varmeakkumulerende materiale (dvs. den termiske masse) i konstruktionerne danner en kompleks sammenhæng.

Emnet vil blive behandlet på forskellige niveauer. Det første og simpleste niveau 1 er hvis temperaturen af rumluften, overfladerne og den termiske masse i et rum betragtes som identiske. Antages varmetilførslen at være konstant, bortset fra stepvise ændringer, kan forholdene beskrives relativt simpelt med eksponentialfunktioner. Dette er beskrevet i Appendiks 3.

Det næste niveau 2 er, hvor forholdene er lidt mere komplekse, og det antages at temperaturforholdene i bygningen kan beskrives ved hjælp af en lufttemperatur, en temperatur af den termiske masse, der er placeret i bygningens klimaskærm, og en temperatur af den termiske masse placeret i de indvendige bygningsdele, som ikke har termisk kontakt med udeklimaet. Luften udveksler varme direkte til de indvendige bygningsdele og til bygningsdele i klimaskærmen samt til det fri. Nedenfor i dette afsnit er vist en skitse af modellen. Der er ikke opstillet et formelgrundlag for denne model, men givet nogle betragtninger omkring de forskellige former for varmeudveksling.

Det tredje niveau er BSim-modellerne. Her benyttes en mere kompliceret model, hvor der tages hensyn til temperaturer i luften og temperaturforholdene i de enkelte flader. Der kan modelleres en bygning med flere rum. Temperaturer og varmestrømme beregnes ved hjælp af denne model for at give et nuanceret billede af de forventede forhold.

Det fjerde niveau er virkeligheden i bygninger. Der foretages målinger i bygninger for at se responsen på ændringer i varmetilførslen. Der foretages systematiske påvirkninger, som kan hjælpe med til at finde nøgletal for de enkelte bygninger og anlæg.

Ved hjælp af modeller på disse forskellige niveauer ønskes det at bestemme:

- Konsekvenser af et fleksibelt elforbrug
- Nøgletal for de forskellige systemer
- Et grundlag som kan benyttes ved en optimering af bygningers energiforbrug, hvor der tages hensyn til et fleksibelt elforbrug og komfortmæssige forhold.

Betragtninger omkring varmuudveksling

Med udgangspunkt i modellen, som er beskrevet nedenfor, er der diskuteret en række forhold vedrørende varmeudveksling i bygninger:

Ved ændring af setpunktstemperaturer vil der hurtigt kunne ske en ændring af lufttemperaturen, da varmekapaciteten af luften er beskedent i forhold til varmekapaciteten af det varmeakkumulerende materiale i konstruktionerne og da der er en vis modstand ved overgang mellem luften og det varmeakkumulerende materiale.

Det varmeakkumulerende materiale i klimaskærmen vil normalt have en lidt lavere temperatur end det varmeakkumulerende materiale i skillevejge og inventar på grund af varmetabet ud gennem klimaskærmen til det fri.

Det varmeakkumulerende materiale, som befinder sig tættest på overfladerne, kan udveksle varme lidt hurtigere med rumluften end materiale i konstruktioner, som ligger dybere inde i konstruktionerne.

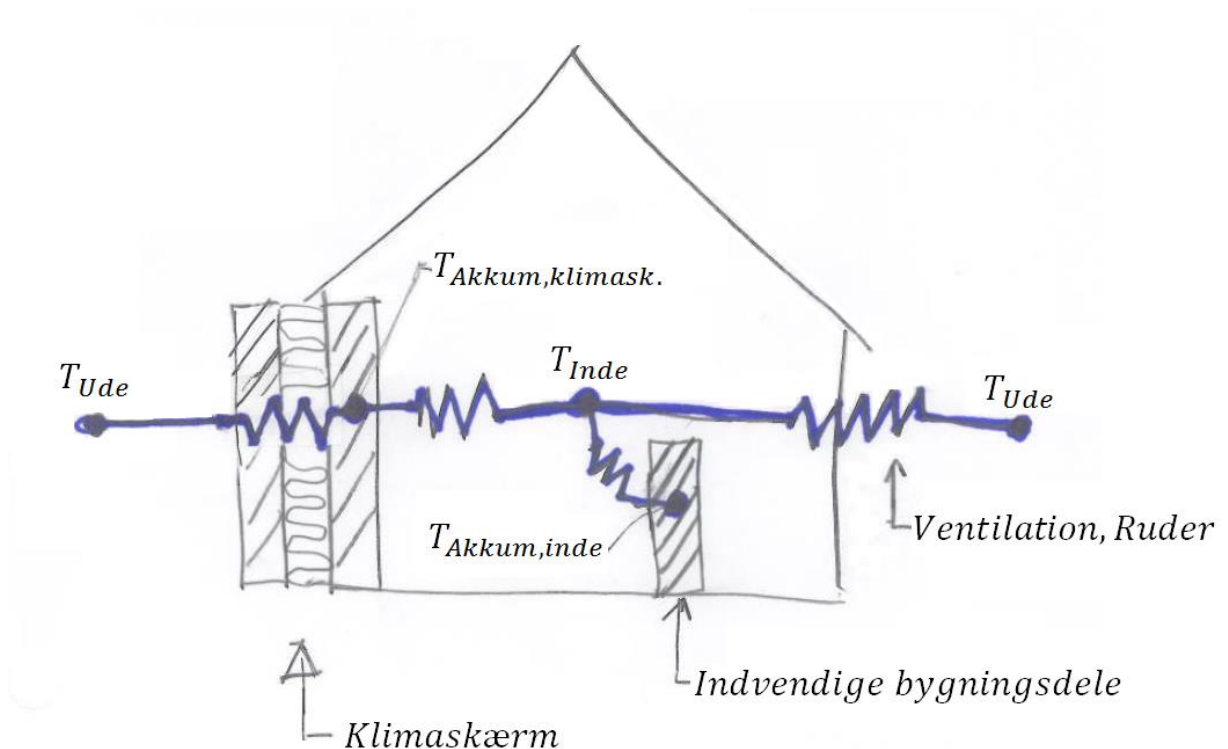
Komfortoplevelsen afhænger i lige så stor grad af temperaturen af rumluften som temperaturen af overfladerne i rummet.

Af disse betragtninger kan udledes:

Det er muligt at hæve og sænke temperaturerne i luften hurtigere end at ændre temperaturerne i de varmeakkumulerende dele af konstruktionerne. Ændringer i lufttemperaturen vil påvirke varmetabet fra bygningen ved ventilation og gennem ruderne med det samme, mens ændringer af temperaturen i de varmeakkumulerende dele sker væsentligt langsommere, hvilket også betyder at varmetabet til det fri ændres langsomt.

Ved kortvarige ændringer af varmetilførsel vil det være det varmeakkumulerende materiale tæt på overfladerne, som dominerer temperaturforholdene. Ved langvarige ændringer vil det være det varmeakkumulerende materiale, der ligger mere dybt i konstruktionerne, som dominerer forholdene.

Simplificeret bygningsmodel (niveau 2)



Betragtes temperaturen af luften som den styrende parameter, kan luftens udveksling af varme opdeles i:

- 1. Varmeoverføring til det fri uden varmekapacitet. Dvs. varmetab ved ventilation og gennem ruder i bygningen.
- 2. Varmeoverføring til varmeakkumulerende materiale med direkte forbindelse til udeklimaet. (Dvs. klimaskærm bestående af ydervægge, lofter og terrændæk). Er bygningen velisoleret, vil temperaturen af overfladen skønsmæssigt typisk ligge 0,3 K til 1 K lavere end lufttemperaturen. Er bygningen dårligt isoleret, vil denne temperaturforskel kunne være væsentlig større.

- 3. Varmeoverføring til varmeakkumulerende materiale uden direkte forbindelse til udeklimaet. (Dvs. indvendige bygningsdele mv. bestående af skillevæge, inventar og etageadskillelser mellem etager).

Eksempel

For at eksemplificere de forskellige varmestrømme gives et eksempel nedenfor.

Simpelt overslag pr. gulvareal (der ses bort fra varmekapacitet af luft og af ruder):

- 1. Luftsifte $0,5 \text{ h}^{-1}$, højde af rum $2,5 \text{ m}$. Varmeoverføring til det fri fra luftsifte: $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vinduer: $U = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Areal af vinduer pr. gulvareal: $0,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Varmeoverføring til det fri gennem vinduer: $2 \times 0,2 = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dvs. i alt varmeoverføring til det fri: $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 2. Varmeoverføring til klimaskærm:
 - Areal: $1,5 \times$ gulvareal. Indvendig overgangsisolans: $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Varmeoverføring mellem rumtemperatur og overflade: $1,5/0,13 = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$.
 - Er U -værdien $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ er overføringen mellem den varmeakkumulerende del og det fri $1,5 \times 0,3 = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 3. Varmeoverføring til indvendige bygningsdele mv.:
 - Areal: $1,5 \times$ gulvareal. Varmeoverføring mellem rumtemperatur og overflade: $1,5/0,13 = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Sammenlagt svarer varmeoverføringen fra rumluften til de varmeakkumulerende dele til summen af punkt 2 og 3; dvs.: $12 + 12 = 24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Hvad kan udledes:

Den effekt som kan overføres fra varmeanlægget til de varmakkumulerende dele ved en overtemperatur på 2 K : $24 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2 \text{ K} = 48 \text{ W/m}^2$. Sker det i en time, svarer det til ca. 50 Wh/m^2 . (Er huset 100 m^2 , er det ca. $5000 \text{ W} = 5 \text{ kW}$).

Varmekapaciteten i bygninger ligger typisk i området: $30\text{-}160 \text{ Wh/m}^2\text{K}$.

Tidskonstanter

Der kan defineres forskellige tidskonstanter.

Den ene tidskonstant bestemmer, hvor hurtigt de varmeakkumulerende dele kommer i ligevægt, hvis der tilføres en ændret mængde varme til rummet. (Opvarmning – akkumulering). Der tages ikke hensyn til varmetabet fra bygningen i denne størrelse.

Tidskonstanten med hensyn til overførsel mellem de varmeakkumulerende dele og rumluften kan i dette eksempel beregnes til: 1 til 7 timer. Den kan være større på grund af større termisk modstand mellem rumluft og varmeakkumulerende materiale fx møbler op af vægge, gulvbelægninger og modstand ved varmeledning i selve de varmeakkumulerende materialer.

Den anden tidskonstant bestemmer, hvor hurtigt temperaturen af det varmeakkumulerende lager ændres ved stop af varmetilførslen til bygningen. Her er udveksling af varme med det fri den afgørende faktor. I det viste eksempel kan denne tidskonstant bestemmes til at være på mellem 60 og 320 timer.

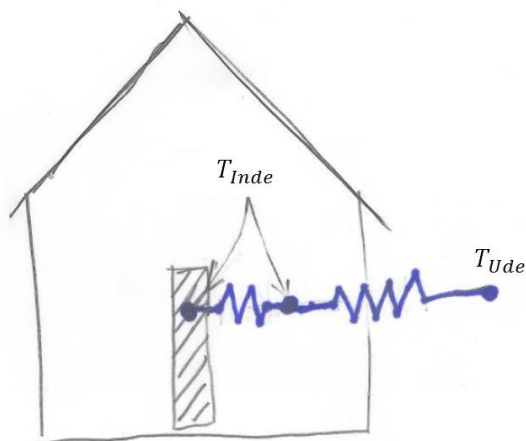
Det skal bemærkes, at disse tidskonstanter ikke er så konstante, som det vil være ønskeligt, da en række forhold påvirker dette. Nogle eksempler er, at der vil være en blanding af forskellige varmeakkumulerende dele, som har forskellige varmeovergangstal til rumluften. Der vil være

varmeovergang ved varmestråling mellem overfladerne, og der vil være varmeakkumulering og tidsforsinkelse i selve varmeanlægget og i varmeafgiverne.

Tidskonstanter kan være et nyttigt hjælpemiddel til at karakterisere bygningerne og varmeanlægget, idet de viser noget om, i hvor lang en periode der på fornuftig vis kan foretages op- eller afladning af de varmeakkumulerende dele i bygningerne.

Appendiks 3. Overslagsmæssig beregning af temperaturforløb

For at kunne danne sig et overblik over mulighederne for at kunne lagre varme opstilles en model af en bygning simplificeret mest muligt. Der forudsættes, at der i bygningen er én varmekapacitet (C), der har samme temperatur som rumluften (θ_i). Rumluften udveksler varme med udeluften (temperatur (θ_e)). Varmeudvekslingen er bestemt af temperaturforskellen mellem rumluft og udetemperatur og det specifikke varmetab (H). Det specifikke varmetab er her varmeoverføringen mellem varmekapaciteten og udeluften. Rummet tilføres en konstant varme (Φ_0).



Der ses på et meget simplificeret system med konstant udetemperatur. Til start er der ligevægt i modellen. Den varme der tilføres giver en temperaturstigning på Φ_0/H (i forhold til udetemperaturen).

Rumtemperaturen kan udtrykkes som:

$$\theta_i = \Phi_0/H + \theta_e \quad (1)$$

Sker der en ændring i varmetilførslen til værdien Φ fra tidspunktet $t_0 = 0$, kan rumtemperaturen til tidspunktet t bestemmes af ligningen:

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

hvor θ_{i0} er temperaturen til tidspunktet t_0 .

I systemet kan defineres en tidskonstant:

$$\tau = C/H \quad (3)$$

Tidskonstanten er bestemmende for det tidsmæssige forløb af temperaturerne.

En anden måde at udtrykke ligningen på er:

$$\theta_i = \theta_{i0} + \Delta\Phi/H (1 - e^{-(t/\tau)}) \quad (4)$$

hvor ændringen af varmetilførslen er: $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0$

Afbrydes varmetilførslen til tiden $t_0 = 0$ er $\Phi = 0$ og $\Delta\Phi = -\Phi_0$

Temperaturen kan dermed beregnes til:

$$\theta_i = \theta_e + \Phi_0/H \cdot e^{-(t/\tau)} \quad (5)$$

Ved hjælp af ligningen er det muligt at få et overslag over:

- Hvor hurtigt opnås en bestemt temperatur, hvis varmetilførslen stopper?
- Hvis der tilføres en vis varmeeffekt, hvor hurtigt stiger temperaturen, og hvornår opnås en bestemt temperatur?

Den mængde energi, der er afgivet fra varmekapaciteten til det fri under et temperaturfald i tidsrummet fra t_{x1} til t_{x2} , kan bestemmes af (fra (2)):

$$Q = (\theta_{ix1} - \theta_{ix2}) \cdot C = (\theta_{i0} - \theta_e - \Phi/H) \cdot (e^{-(t_{x1}/\tau)} - e^{-(t_{x2}/\tau)}) \cdot C \quad (6)$$

Eller (fra (4)):

$$Q = (\theta_{ix1} - \theta_{ix2}) \cdot C = \Delta\Phi/H \cdot (e^{-(t_{x1}/\tau)} - e^{-(t_{x2}/\tau)}) \cdot C \quad (7)$$

Bestemmes energimængden afgivet fra varmekapaciteten fra tidspunktet $t_{x1} = t_{i0} = 0$ til t_{x2} , fås (fra (7)):

$$Q = (\theta_{ix1} - \theta_{ix2}) \cdot C = \Delta\Phi/H \cdot (1 - e^{-(t_{x2}/\tau)}) \cdot C \quad (8)$$

Ved hjælp af ligningen er det muligt at få et overslag over:

- Hvor meget varme kan afgives fra varmekapaciteten, hvis varmetilførslen stoppes i en periode?
- Hvor meget varme kan lagres i varmekapaciteten ved tilførsel af varme i en vis periode?

Det er ønsket at finde, hvor lang tid det tager at genopvarme med en vis effekt, når der har været en nedkøling.

Det forudsættes, at der har været en afbrydelse af effekten Φ_0 i et tidsrum t_1 . Derefter foretages genopvarmning. Den temperatur, der opnås ved en afbrydelse, er (fra (4) og (5)):

$$\theta_{i1} = \theta_{i0} - \Phi_0/H \cdot (1 - e^{-(t_1/\tau)}) \quad (9)$$

$$\theta_{i1} = \theta_e + \Phi_0/H \cdot e^{-(t_1/\tau)} \quad (10)$$

Denne temperatur θ_{i1} svarer til ligevægtstemperaturen ved en tilførsel af en effekt på Φ_1 .

Ligevægtsvarmestrømmen ved denne temperatur kan bestemmes til (ligning (10) og (1)):

$$\Phi_1 = \Phi_0 \cdot e^{-(t_1/\tau)} \quad (11)$$

Efter tidspunktet t_1 tilføres der i et tidsrum t_2 varme med effekten Φ_2 . Der tilføres varme, indtil temperaturen θ_{i0} nås. Benyttes ligning (4) kan temperaturforløbet bestemmes af:

$$\theta_{i0} = \theta_{i1} + \Delta\Phi/H (1 - e^{-(t_2/\tau)}) \quad (12)$$

$$\theta_{i0} - \theta_{i1} = (\Phi_1 - \Phi_2)/H (1 - e^{-(t_2/\tau)}) = (\Phi_0 \cdot e^{-(t_1/\tau)} - \Phi_2) \cdot (1 - e^{-(t_2/\tau)}) / H \quad (13)$$

Sammenholdes ligning (9) og (13) fås at:

$$\Phi_2/\Phi_0 = (1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}) / (1 - e^{-(t_2/\tau)}) \quad (14)$$

Det er også muligt at finde t_2 , hvis de øvrige parametre kendes.

$$t_2/\tau = \ln((\Phi_2/\Phi_0 - e^{-(t_1/\tau)}) / (\Phi_2/\Phi_0 - 1)) \quad (15)$$

eller

$$t_2 = \ln((\Phi_2/\Phi_0 - e^{-(t_1/\tau)}) / (\Phi_2/\Phi_0 - 1)) \cdot \tau \quad (16)$$

Der kan beregnes en energibesparelse (eller eventuelt merforbrug ved forhøjede temperaturer) på:

$$E_{\text{spar}} = \Phi_0 \cdot (t_1 + t_2) - \Phi_2 \cdot t_2 \quad (17)$$

Symboler

C	Varmekapacitet af bygning	Wh/K
E_{spar}	Energibesparelse	Wh
H	Specifikt varmetab for bygning	W/K
t_0	Tidspunkt hvor varmetilførsel stoppes	h
t	Tiden fra varmetilførslen stoppede	h
t_{x1}	Tiden x1 fra varmetilførslen stoppede	h
t_{x2}	Tiden x2 fra varmetilførslen stoppede	h
t_1	Tidsperiode med stoppet varmetilførsel	h
t_2	Tidsperiode med genopvarmning	h
Φ	Varmetilførsel efter ændring	W
Φ_0	Varmetilførsel før ændring	W
Φ_1	Varmetilførsel ved ligevægt ved θ_{i1}	W
Φ_2	Varmetilførsel ved genopvarmning	W
$\Delta\Phi$	Ændring af varmetilførsel	W
τ	Tidskonstant for bygningen	h
θ_e	Udetemperaturen	°C
θ_i	Rumtemperatur	°C
θ_{i0}	Rumtemperatur til tidspunktet 0	°C
θ_{i1}	Rumtemperatur til tiden t_1	°C
θ_{i2}	Rumtemperatur til tiden t_2	°C
θ_{ix1}	Rumtemperatur til tiden t_{x1}	°C
θ_{ix2}	Rumtemperatur til tiden t_{x2}	°C