



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Bygninger som energilager i et smart-grid

Jensen, Ole Michael; Wittchen, Kim B.; Real, Jaume Palmer ; Madsen, Henrik

Creative Commons License
Ikke-specificeret

Publication date:
2020

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, O. M., Wittchen, K. B., Real, J. P., & Madsen, H. (2020). *Bygninger som energilager i et smart-grid*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. SBI Nr. 2020:14

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

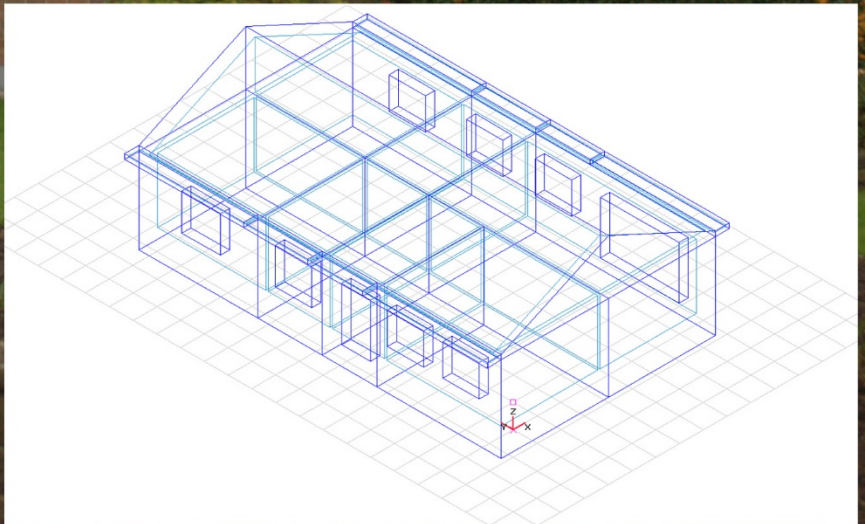
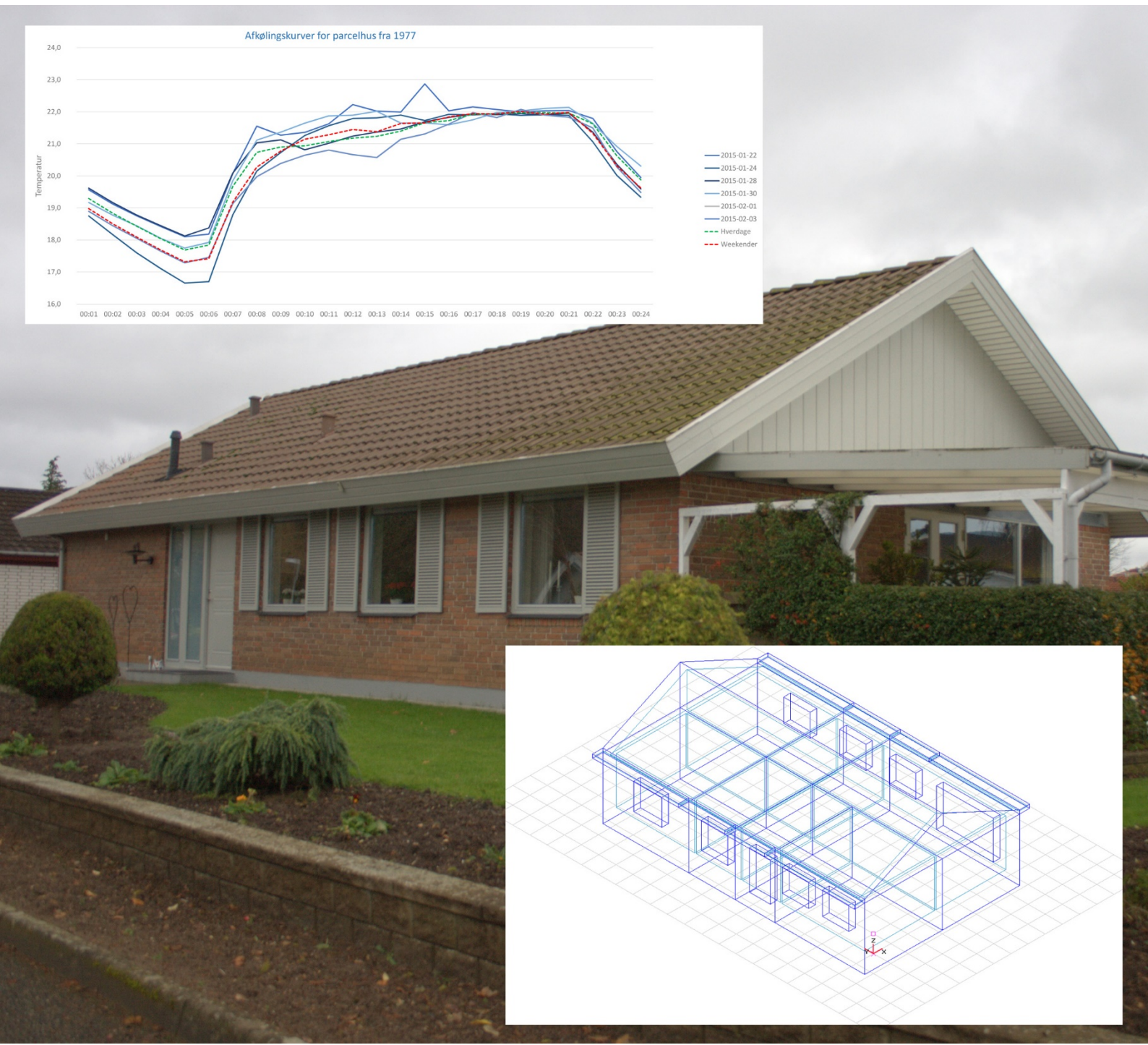
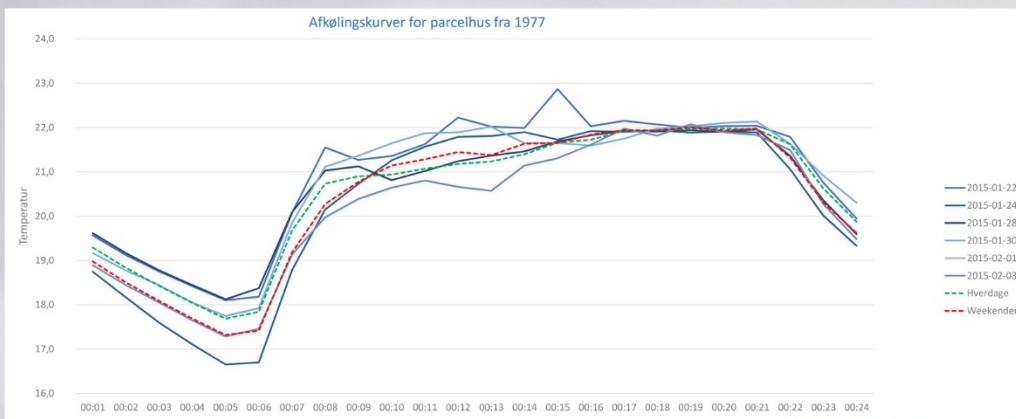
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

SBI 2020:14

Bygninger som energilager i et smart-grid





BYGNINGER SOM ENERGILAGER I ET SMART- GRID

Ole Michael Jensen
Kim B. Wittchen
Jaume Palmer Real
Henrik Madsen

SBi 2020:14
Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet København
2020

TITEL	Bygninger som energilager i et smart-grid
SERIETITEL	SBi 2020:14
UDGIVELSEÅR	2020
UDGIVET DIGITALT	Juni 2020
FORFATTER	Ole Michael Jensen, Kim B. Wittchen, Jaume Palmer Real & Henrik Madsen
SPROG	Dansk
SIDETAL	71
LITTERATURHENVISNINGER	Side 70-71
EMNEORD	Fleksibilitet, Energilagring, Parcelhuse, Bygninger, Smart-grid
ISBN	978-87-563-1950-8
OMSLAGSILLUSTRATION	Kim B. Wittchen & Ole Michael Jensen
UDGIVER	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.anvisninger.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

INDHOLD

FORORD	6
INDLEDNING	8
LANGSOM KØLING	12
SEIH-projektet	12
Datagrundlag	12
Forsøg med natsænkning	13
Smart-grid	15
Smart el-net	15
Smart fjernvarmenet	17
TIDSKONSTANTER OG FLEKSIBILITET I ET SMART-GRID	20
Afkølingskurver og tidskonstanter	20
Autoregressiv analyse	22
Analyse af bygninger med natsænkning	22
Middelfarthusers tidskonstanter	24
Signaler i nettet og fleksibilitet	25
UDVALGTE HUSE	28
Arketype-fordeling	29
Stuehus på landet 1907	30
Enfamiliehus fra 1932	31
Enfamiliehus fra 1953	33
Enfamiliehus fra 1966	34
Enfamiliehus fra 1977	36
Enfamiliehus fra 1979	37
SIMULERING AF VARMEBEHOV OG INDEKLIMA	42
Simulering af arketype huse	42
Arketype 1850-1930	44
Arketype 1931-1950	46
Arketype 1951-1960	48
Arketype 1961-1972	50
Arketype 1973-1978	52
Arketype 1979-1998	54
Sammenfatning fra simuleringer	56
POTENTIALET FOR SAMLET VARMELAGER I DANSKE PARCELHUSE	60
Varmelager i danske huse	60
ØGET FLEKSIBILITET	62
Ekstra isolering	62
Tætning	62

Flere tunge materialer	63
Forøgelse af varmtvandsbeholder	63
SAMMENFATNING OG KONKLUSION	66
REFERENCER	70

The background of the page is a decorative pattern of thin, dark blue wavy lines. These lines are arranged in concentric, flowing curves that create a sense of movement and depth. The lines are most dense in the corners and become sparser towards the center, framing the text.

FORORD

FORORD

Denne rapport er udarbejdet som en del af EUDP (j.nr. 64017-0039) - Bygninger som energilagere i et smart-grid. Projektet er gennemført som et samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut (nu BUILD) ved Aalborg Universitet og Institut for Matematik og Computer Science ved Danmarks Tekniske Universitet.

I lyset af den danske regerings målsætning om en fossilfri energiforsyning i 2050 er det vigtigt at være opmærksom på potentialet for fleksibilitet i energiforbruget. Opvarmning af bygninger tegner sig for op mod en tredjedel af det samlede danske energiforbrug. Ud af den samlede boligmasse udgør parcelhuse med potentiale for at kunne levere fleksibilitet 28,5% af det opvarmede etageareal, og en endnu større del af boligernes energiforbrug på grund af deres større energiforbrug pr arealenhed. Potentialet for fleksibilitet kan realiseres i parcelhuse, der kan blive, eller allerede er, opvarmet ved en varmepumpe. Derfor kan optimering af energiforbruget i disse huse i forhold til den generelle belastning i forsyningsnettet (fleksibilitet) og dermed CO₂-niveauet. Brug af energien på det rigtige tidspunkt kan være en nøgelfaktor til reduktion af den nødvendige kapacitet i fremtidens vedvarende energiforsyningssystemer.

BUILD, Statens Byggeforskningsinstitut
Aalborg Universitet
Maj 2020

Søren Aggerholm
Forskningschef

The background of the page is a white space filled with a pattern of thin, dark blue lines. These lines are curved and wavy, creating a sense of movement and depth. The lines are more densely packed in some areas and more sparse in others, particularly around the central text.

INDLEDNING

INDLEDNING

Udgangspunktet for dette projekt udspringer af resultatet af et tidligere projekt: SEIH-projektet, der gik ud på at undersøge effekten af automatisk natsænkning. Det overraskende var her, at der for langt de fleste huses vedkommende var forbavsende lidt at spare. Forklaringen på dette, viste det, var, at temperaturen i husene faldt meget langsomt. Er en bygning med andre ord lang tid om at køle ned, efter at varmetilførslen er afbrudt, falder differencen mellem temperaturen ude og inde tilsvarende langsomt, og varmetabet er begrænset. Følgelig kan der ikke spares nævneværdigt med energi i nattens løb ved at acceptere en større differens mellem temperaturen ude og inde.

Omvendt bliver bygninger, der køler langsomt, interessante i et forsyningsnet, der typisk er belastet med stor efterspørgsel af energi i korte perioder morgen og aften. Man taler om morgen- og aftenspidser (peaks). For bygninger, der køler langsomt, behøver ikke at få tilført varme på alle tider af døgnet, fx under morgen- og aftenspidser. Dette gælder bygninger placeret i et fjernvarmenet, og det gælder bygninger, der opvarmes eller kan opvarmes med varmepumpe, i et el-net. Med andre ord kan bygninger med langsom afkøling, i fald de er net-opkoblet og udrustet med den nødvendige automatik, levere fleksibilitet til nettet.

Dette er baggrunden for projektet og grunden til, at der i første kapitel redegøres nærmere for SEIH-projektet og de målinger, der pegede i retning af at udnytte langsom køling i ældre danske huse i et smart-grid, det være sig "smart-grid"-løsninger i eksisterende el- og fjernvarmenet.

I det andet kapitel om tidskonstanter og fleksibilitet, redegøres der for det teoretiske grundlag for projektet. Det forhold, at en bygning taber energi til omgivelserne efter et bestemt mønster, kan aflæses i bygningens afkølingskurve. Kender man både ude- og inde-temperaturen med korte tidsintervaller i hele afkølingsforløbet, er det muligt at udlede en eller flere såkaldte tidskonstanter. Det er matematiske udtryk, som dels siger noget, om hvor utæt bygningen er, dels siger noget om hvor godt, den er isoleret, og hvor meget termisk masse, den indeholder. Med denne viden og viden om udbudsprisen i et net, time for time henover døgnet, kan man regne sig frem til en given bygnings såkaldte fleksibilitetsindeks.

I det tredje kapitel finder man et udvalg af huse fra SEIH-projektet. Det er huse, som hver især refererer til en bestemt byggeperiode. I alt 6 byggeperioder er repræsenteret i det store datamateriale, som først og fremmest indeholder logninger af ude og indetemperaturer i perioden fra 2013 til 2015. De 6 byggeperioder er kendetegnet ved bestemte byggeprincipper og isoleringskrav. Et typisk hus inden for hver af de seks perioder betegnes et arketype-hus. Det er altså ikke arketype-huse, der gives eksempler på, men huse hver især tilhørende en arketype-periode.

Ud over en beskrivelse af de enkelte huse vises en serie af huses afkølingskurver, ligesom resultatet af en nærmere analyse af et meget stort antal afkølingsforløb vises. Med denne analyse udført af Compute, DTU er husets ideelle afkølingskurve vist med tilhørende tidskonstant.

I det efterfølgende kapitel om simulering af varmebehov og indeklima er der udført en simulering for hver af arketypernes varme- og effektbehov. Det er sket ved hjælp af BUILD's simuleringssprogram BSim. Simuleringerne er gennemført for at udregne arketypernes samlede årlige varmebehov (kWh) og det maksimale effektbehov (kW), dvs. hvor meget energi, der skal tilføres bygningen per tidsenhed, for at en ønsket rumtemperatur kan opretholdes.

Det leder frem til et kapitel, hvor potentialet for det samlede varmelager for danske parcelhuse og endelig et kapitel, hvor mulighederne for øget fleksibilitet undersøges.



LANGSOM KØLING

LANGSOM KØLING

Det var en observation af langsom køling i forbindelse med et forsøg med automatisk natsænkning i danske bygninger, der lagde grunden til nærværende projekt om bygninger som varmelager i et smart-grid. Forsøget med natsænkning var en del af det såkaldte SEIH-projekt udført i Middelfart med 175 deltagende huse. Forsøget viste, at gevinsten med hensyn til at spare på energien var begrænset natsænkning. I et stort antal af de huse, der indgik i forsøget, faldt temperaturen kun 2-2,5 °C i løbet af de nattetimer, hvor varmforsyningen var afbrudt. Dette var omvendt udtryk for, at bygningerne som en god termokande kunne holde på varmen og dermed fungere som varmelager. SEIH-projektet omtales kort nedenfor.

Evnen til at holde på varme er omvendt en god egenskab i et smart-grid. For det betyder, at en bygning, der er god til at holde på varmen, kan levere fleksibilitet til et kollektivt forsyningsnet; det være sig et fjernvarmenet eller el-net, hvor bygningerne forsynes med varme via varmepumper. Flexibiliteten opstår, hvis huse, der køler langsomt, befinder sig i et smart-grid, dvs. i en forsyningsenhed, som er i stand til at balancere forbrug og efterspørgsel kontinuerligt og til at flytte efterspørgslen videre til perioder med overskudskapacitet og billig tilgang til effekt, fx fra en fra en fluktuerende produktion af vedvarende energi. Elementerne i et smart-grid omtales kort nedenfor.

SEIH-projektet

SEIH-projektet blev gennemført i årene 2013-15. SEIH står for "Smart Energi i Hjemmet", hvilket igen henviser til et omfattende forsøg med intelligent energistyring af små 200 huse i Middelfart Kommune. Formålet med dette projekt var at undersøge, om der kunne opnås energibesparelser i enfamiliehuse ved at bruge automatik til at sænke rumtemperaturen om natten, men også når beboerne ikke var hjemme om dagen eller i ferier. Ud over automatisk styring at temperatursænkningen med respekt for vejrlig var det tanken at undersøge, om teknologien kunne vække brugernes interesse for energibesparelser i bred forstand og dermed gøre dem motiveret for rådgivning (Jensen, 2016).

Datagrundlag

Middelfart Kommune, der har stået for ledelsen af projektet, har stillet alle måledata til rådighed for BULID og DTU/Compute. Den engelske energistyringsvirksomhed, PassivSystems, stod for opsætning af varmestyringssystemet samt tilhørende dataopsamling. Opsamlingen skete på en engelsk server og blev overført en server i Bolius (Boligejernes Videncenter – www.bolius.dk). Bolius var i projektperioden ansvarlig for fjernrådgivning og formidling undervejs i projektet. Efterfølgende er data blevet overført til en server på Aalborg Universitet. SEIH-projektet blev finansieret af fonden Realdania.

I alt 191 enfamiliehuse var oprindeligt tilmeldt forsøget. Fremme ved starten af forsøget var dette tal faldet til 174. Ud af disse blev der installeret automatisk dag- og natsænkning i 146 huse. Resten af husene, dvs. 28 huse, har fungeret om kontrolgruppe i den forstand, at der i disse huse kun fandt monitorering og ikke styring sted.

Husene er valgt, således at flere bygningstyper og flere byggeperioder blev repræsenteret i materialet. Ligeledes er der valgt huse med forskellig varmforsyning, dvs. huse med

kollektiv varmforsyning i form af fjernvarme eller naturgas og huse med individuel varmforsyning, typisk i form af oliekedler. Tilsvarende var der ved valget af huse gjort bestræbelser på, at forskellige husstandstyper var repræsenteret. Kort sagt var der ved udvælgelsen af huse og husstande sikret en vis spredning, således at resultaterne kan forventes at være repræsentative.

Tabel 1. Fem hustyper var repræsenteret i forsøget af de deltagende huse fritliggende parcelhuse. Tallene stammer fra en spørgeskemaundersøgelse, hvor de 174 aktive deltagere har svaret.

Hustype	Antal	Procent
Fritliggende hus	132	76%
Byhus	21	12%
Landejendom	11	6%
Enderækkehus	4	2%
Række-/klyngehus	6	3%
Sum	174	100%

Af de 174 huse var 80 forsynet i forsøgsperioden forsynet via fjernvarme, 60 huse var forsynet med naturgas, mens 34 huse blev opvarmet ved brug af individuelle oliekedler.

Måledata foreligger for en periode på 2 år, fra 1. kvartal i 2013 til 1. kvartal 2015. En gældende tilslutning til systemet betød, at først fra 3. kvartal i 2013 var alle huse udrustet med måleudstyr og loggere.

I husene med automatik blev der foretaget måling og logning i 10 målepunkter. Det drejer sig om to temperaturfølere og en flowmåler ved tilgang og afgang til brugsvandssystemet og ved tilgang og afgang til rumvarmforsyningen. Dertil kom to temperaturfølere ved kedlens til- og afgang til den samlede varmforsyning og endelig to temperaturfølere ved varmesystemets tilgang og afgang til rumopvarmningen. I alt blev der opsat to flowmålere og 8 temperaturmålere med elektronisk logning, knyttet til centralvarmesystemet. Derudover blev der logget temperatur i soveværelse og opholdsrum.

De måledata, der altovervejende indgår i dette projekt med undersøgelse af husenes varmelagringskapacitet, er logninger af temperatur i opholdsrum samt korresponderende vejrdata for udetemperaturen.

Forsøg med natsænkning

Gennem hele forsøget, fra de første husstande fik enheden til intelligent styring installeret og til forsøgets ophør, var et vekslende antal husstande aktive i forsøget, forstået på den måde at man i de enkelte huse i højere eller mindre grad udnyttede muligheden for nat- og dagsænkning. De mest aktive brugere udnyttede både muligheden for fast indstilling af natsænkning og muligheden for at spare energi ved at vælge dagsænkning og ferie-sænkning ved længere tids fravær. To stikprøver taget i henholdsvis 2014 og 2015 viser, hvor aktive brugere var de pågældende dage, se tabel 3.

Tabel 2 Stikprøver, som viser hvor aktive brugerne har været med hensyn til at vælge nat- og dagsænkning samt eventuel ferisænkning. Tallene i parentes angiver antallet af husstande, hvor man har holdt nat-/dags-/ferie-sænkning konstant over de undersøgte døgn.

	Antal huse	Nat-sænkning	Dag-sænkning	Ferie-sænkning	Ingen sænkning
28.01.2014	110	99 (1)	57 (1)	0 (0)	7
19.02.2014 (vinterferie)	109	98 (1)	58 (1)	0 (0)	4
11.02.2015 (vinterferie)	93	93 (0)	41(3)	4 (2)	13
22.03.2015	92	92 (1)	24(2)	3 (2)	9

Ud af i alt 110 husstande med energistyring var mellem 95 og 100 husstande aktive i den forstand, at de etablerede natsænkning. Kun halvdelen valgte imidlertid at gå skridtet videre for at udnytte muligheden for dagsænkning.

To af stikprøverne blev taget i skolernes vinterferie (uge 8 i 2014 og uge 7 i 2015). I de uger ses, at man i kun to husstande valgte ferisænkning. Det lavere antal huse med dag-sænkning i februar og især marts 2015 kan have været udtryk for, at forsøget nærmede sig sin afslutning, og at interessen derfor var svækket.

Det gennemsnitlige varmeforbrug for alle huse lå vinteren 2012-13, dvs. før forsøget gik i gang, på 133 kWh/m². Se tabel 1. Lidt uventet ligger det gennemsnitlige energiforbrug anvendt på opvarmning i huse opført i perioden 1962-1973, dvs. højere end i huse opført i perioden før. Dette kunne tyde på, at de ældre huse ved udstrækning er blevet efterisoleret. En anden årsag til det lavere brug i ældre huse kan være, at man som ejer af et gammelt hus er mere fokuseret på at spare på varmen, hvor det kan lade sig gøre.

Tabel 3. Energiforbruget i de 133 huse, som der forelå målinger for i vinteren 2012-13, dvs. vinteren før forsøget gik i gang. Det højeste forbrug pr. kvadratmeter har huse opført før 1950. Det næsthøjeste forbrug har de huse i forsøget, der er opført i perioden 1962-1973.

kWh/m ²	før 1950	1950-1961	1962-1973	1974-1985	Alle huse
Alle forsyninger	143	130	135	109	133
Fjernvarme	134	136	140	118	135
Naturgas	154	97	116	112	129
Olie	156	128	173	64	140

Vinteren efter, altså efter at forsøget var iværksat, var det gennemsnitlige energiforbrug faldet til 107 kWh/m². Dette blev i første omgang taget til indtægt for at forsøget var lykkedes. Men graddageregulering viste, at det forholdt sig nærmest modsat. Den samlede besparelse for alle implicerede huse lød på -3,5%, altså en forøgelse af varmeforbruget på 3,5%. De mindste besparelser blev opnået i de ældste huse, se tabel 4.

Tabel 4. De opnåede besparelser efter graddageregulering. Negative tal betyder, at der reelt blev brugt mere energi til opvarmning i 2013-14 end i startåret 2012-13. Som det fremgår af tabellen, har alle huse tilsammen brugt 3,5 % mere energi i vinteren 2013-14 sammenlignet med vinteren 2012-13. Den største stigning er sket blandt fjernvarmebrugere.

	før 1950	1950-1961	1962-1973	1974-1985	Alle huse
Alle forsyninger	-6,3 %	-5,2 %	0,2 %	-0,8 %	-3,5 %
Fjernvarme	-9,1 %	-7,8 %	-4,5 %	-6,3 %	-7,4 %
Naturgas	-0,3 %	-10,2 %	1,1 %	2,4 %	0,9 %
Olie	-10,0 %	0,5 %	27,3 %	-24,2 %	-2,2 %

I et forsøg på at vurdere forsøget så objektivt som muligt blev den såkaldte varm-vinter-effekt inddraget. Det forholdt sig nemlig sådan, at vinteren 2012-13 var en hel del koldere end vinteren 2013-14. Hvor den første vinter, inden forsøget gik i gang, lå 7,5 % over normalen, hvad graddage angår, lå den anden vinter, første år af forsøget, 17,5 % under normalen, når graddagetallet for de to år lægges til grund.

Varmvinter-effekten er udtryk for, at energiforbruget efter graddagekorrektion generelt er større, når vinteren er lun sammenlignet med, når vinteren er rigtig kold. De nærmere omstændigheder for denne effekt kendes ikke, men det formodes, at det hænger sammen med, at mange finder det mere naturligt at spare på varmen, når det er koldt udenfor, end når det er varmt.

Ser man på udviklingen over et stort antal vintre, viser det sig, at forbruget, når det falder i en varm vinter, ligger 4 % over, og når det er en kold vinter 4 % under det, man når frem til ved at graddageregulere. (Jensen, 2016).

Med denne korrektion indført, beløber besparelsen sig til 6,5 %, se tabel 5 . Naturgasforbrugerne har opnået de største besparelser, fjernvarmebrugerne de mindste. Selvom olieforbrugerne lægger sig på gennemsnittet, må dette resultat alligevel tages med forbehold, idet den løbende indberetning af olieforbrug har været af svingende kvalitet.

Tabel 5. De opnåede besparelser efter graddageregulering og efterfølgende korrektion for en varm-vinter-effekt. Som det fremgår af tabellen, har alle huse på det grundlag opnået en gennemsnitlig besparelse på 6,5 %. Besparelserne opnået blandt oliebrugerne er usikre pga. mangelfuld indberetning

	før 1950	1950-1961	1962-1973	1974-1985	Alle huse
Alle forsyninger	3,7 %	4,8 %	10,2 %	9,2 %	6,5 %
Fjernvarme	0,9 %	2,2 %	5,5 %	3,7 %	2,6 %
Naturgas	9,7 %	-0,2 %	11,1 %	12,4 %	10,9 %
Olie	0,0 %	10,5 %	37,3 %	-14,2 %	6,5 %

Oversigten over de opnåede besparelser viser, at det har været lettest at opnå besparelser i nyere huse, altså huse opført fra 1962 og frem. Mistanken er, at huse opført efter 1962 har færre tunge materialer indbygget og derfor køler langsommere, når varmforsyningen, som i forsøget, afbrydes om natten. Det er med andre ord lettere at opnå besparelser ved nat- og dagsenkning, hvis huset er bygget af lette materialer og typisk er opført efter 1961.

Dette bekræftes af en stikprøve taget den 28. januar, som viser hvem og hvor mange husstande, der denne vinterdag har aktiveret natsenkningen. Især naturgasbrugere med huse opført i perioden fra 1962-1973 sparer noget. Dette bekræfter omvendt, at det er svært for ældre huse at opnå besparelser ved natsenkning. De køler simpelthen for langsomt. Se tabel 6.

Tabel 6. Den gennemsnitlige besparelse blandt de huse, der havde natsenkning den 28. januar. De største besparelser ved natsenkning opnås i nyere huse opført i lette materialer

	før 1950	1950-1961	1962-1973	1974-1985	Alle huse
Alle forsyninger	3,2 %	2,4 %	9,1 %	11,5 %	6,2 %
Fjernvarme	0,7 %	2,9 %	6,9 %	5,6 %	3,1 %
Naturgas	7,1 %	-0,2 %	13,1 %	12,5 %	10,0 %

Smart-grid

Smart-grid er en terminologi, der anvendes om el- og fjernvarmenet, som er i stand til at balancere produktion og efterspørgsel kontinuerligt og videreflytte efterspørgslen til perioder med overskudskapacitet og billig tilgang til effekt primært fra fluktuerende produktion af vedvarende energi.

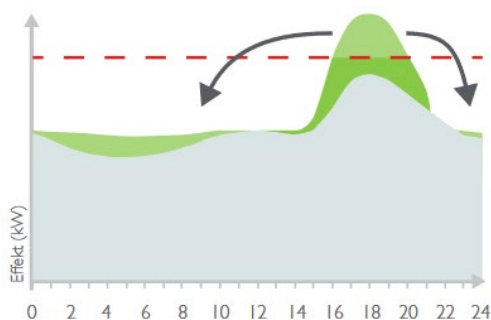
Smart el-net

I el-nettet er det netvirksomhedernes opgave at sikre en jævn og tilstrækkelig strøm af el fra transmissionsnettet til forbrugerne, dvs. konstant belastning over tid. Med den øgede elektrificering bliver distributionsnettet imidlertid mere følsomt for fluktuationer i nettet. Den øgede elektrificering vil på forbrugssiden ske i takt med, at der kommer flere elbiler, og ved at flere forbrugere lægger varmforsyningen om fra brug af olie- og naturgas til varmepumper. På produktionssiden vil dette blive modsvaret af en større produktion overvejende baseret på vedvarende energikilder, enten vindmøller eller solcelleanlæg.

Begge dele øger chancerne for fluktuationer, nogle mere forudsigelige end andre. Fluktuationer på forbrugssiden vil opstå på tidspunkter, hvor alle bruger strøm i husholdningen eller lader el-bilen op. En stort efterspørgsel på el vil også indtræffe på kolde vinterdage med stille vejr. Den slags hændelser er til at forudse.

Anderledes på produktionssiden. Her kan skiftende vindstyre i kombination med veks-lende sol føre til kraftige vind før det kraftige udfald i produktionen.

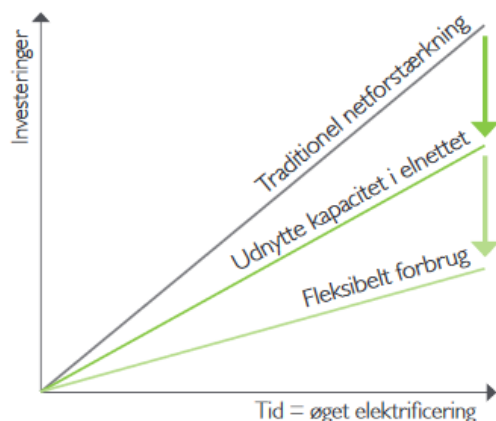
Alt i alt øges behovet for at kunne "flytte" rundt på forbruget, især i tidsrum på døgnet, hvor der er et forholdsvist stort eller lille forbrug. I de mange husholdninger gælder det fx den såkaldte kogespids omkring kl. 18. Hvis noget af det forbrug, der ligger her kan flyttes til tider på døgnet, hvor forbruget er lavere, er der meget vundet med hensyn til generelt at kunne balancere produktion og forbrug, se figur 1.



Figur 1 Den typiske kogespids i el-nettet mellem kl. 17 og 21 vist med pile. Dette illustrerer behovet for at kunne flytte toppen af kogespidsen til tider på døgnet, hvor forbruget er lavere. Den typiske døgnvariation er i figuren markeret med det grå område, mens den røde stiplede linje viser grænsen for overbelastning. Kilde: Energistyrelsen (2013).

På sigt, hvor nettet udbygges, og hvor de tekniske muligheder for at flytte strømforbrug med relativt kort varsel, fx forud for storm eller vindstille, opnås, vil også dette kunne bidrage til at balancere forbrug og produktion.

Der indgår to grundlæggende elementer i en smart-grid-omstilling af nettet. Det ene element består i, at netvirksomhederne sættes i stand til at udnytte den eksisterende kapacitet i distributionsnettet bedre ved at intensivere overvågningen af nettet og følge belastningen tæt, så udnyttelsesgraden kan optimeres. Det andet element består i at mindske belastningen af distributionsnettet ved at fremme et fleksibelt forbrug. På den måde kan netvirksomhederne sikre sig en belastningsreduktion i de hårdest belastede driftssituationer, se figur 2.



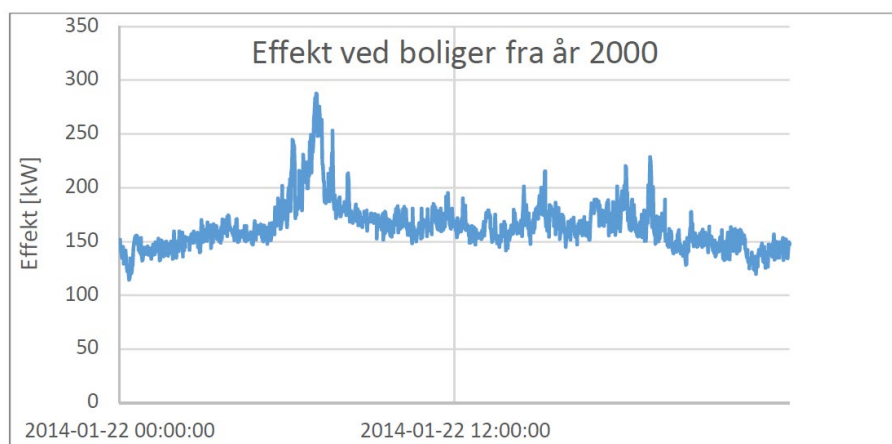
Figur 2. De to strategier, som netvirksomheden kan anvende ved smart-grid-omstilling af elnettet.

Fleksibelt forbrug kræver inddragelse af forbrugerne, enten ved at de indgår aftaler med netvirksomheden om i perioder, fx om natten, at nedsætte forbruget, eller ved at forbrugerne sættes i stand til at reagere på et signal (pris eller andet) fra netvirksomheden.

Det sidste kan fx ske gennem tariffer, der varierer med udbud og efterspørgsel eller med CO₂-belastningen i nettet. Dette kan igen ske ved, at prisen for el forhøjes fx i kogespidsen og sænkes uden for denne, eller ved, at elprisen følger den aktuelle CO₂-belastning i el-nettet. Variable tariffer vil forstærke prissignalet over for forbrugerne, da nettariiffen og dermed elprisen vil stige i takt med belastningen af nettet, og omvendt.

Smart fjernvarmenet

Der er i princippet ingen forskel på et smart el-net og et smart fjernvarmenet, bortset fra at fjernvarmenettet har to spidser, en stor om morgenen og en mindre om aftenen. Den store efterspørgsel om morgenen er udtryk for en samtidig efterspørgsel efter fjernvarme til opvarmning af bygninger og fremstilling af varmt brugsvand. Den knap så store efterspørgsel om aftenen er udtryk for en efterspørgsel efter varme til rumopvarmning og varme til fremstilling af varmt vand opvask og rengøring.



Figur 3. Diagrammet viser, hvordan efterspørgslen efter fjernvarme typisk veksler hen over et døgn i et fjernvarmeområde; i dette eksempel der tale om et fjernvarmeområde med boliger opført i år 2000. Kilde: Niras (2018).

Hvor netvirksomhederne har ansvaret for sikre en jævn strøm af el fra transmissionsnettet til el-forbrugerne, har fjernvarmeværkerne ansvaret for en jævn strøm af varme til varme-forbrugerne. Derfor er fjernvarmeværker på samme måde som elværker følsomme over for store og pludselige ændringer af belastningen. For fjernvarmeværkerne opstår den situation først og fremmest ved pludselige vejrskift, da behovet for rumopvarmning her stiger proportionalt med forskellen mellem ude- og indetemperatur. Vejrprognoser kan hjælpe fjernvarmeværkerne med at balancere nettet, men bedre er det, hvis man som i el-nettet kan flytte forbrug fra perioder med spidser til perioder med mindre forbrug af varmt vand.

Som noget nyt for fjernvarmenettet forventes det, at mange store varmepumper i nær fremtid vil blive koblet på varmenettet. På den måde vil el-nettet og fjernvarmenettet komme til at ligne hinanden, men også komme til at understøtte hinanden. Anderledes udtrykt vil der også i fjernvarmenettet blive behov for i mange perioder at kunne flytte effekt væk fra perioder med høj efterspørgsel til perioder med lav efterspørgsel.

Som for el-nettet kræver et fleksibelt forbrug i fjernvarmenettet inddragelse af forbrugerne. Og på samme måde som for el-nettet vil det kunne foregå ved, at brugerne indgår aftaler om, at efterspørgslen i bestemte perioder kan nedsættes, eller ved, at forbrugerne sættes i stand til at reagere på et signal (pris eller andet) fra fjernvarmeselskabet.

På den måde vil også fjernvarmenettet få karakter af et smart-grid.



TIDSKONSTANTER OG FLEKSIBILITET I ET SMART-GRID

TIDSKONSTANTER OG FLEKSIBILITET I ET SMART-GRID

Interessen for en bygnings tidskonstanter er vokset i takt med et øget behovet for fleksibilitet i varmforsyningsnettet. Det får med andre ord stadig større betydning for energiforsyningen, at bygninger i mindre grad efterspørger varme i de såkaldte morgen- og aften-spids (peaks). Her kan især bygninger med store tidskonstanter bidrage, da store tidskonstanter er ensbetydende med, at de er lang tid om at køle, dvs. tabe energi til omgivelserne, så det kan mærkes på komforttemperaturen.

I dette kapitel redegøres der for bygningers afkølingskurver og den form for analyse, der anvendes, når man vil afdække den eller de tidskonstanter, der skjuler sig i en bygnings måde at afkøle på. Teorien om afkøling og uddragning af tidskonstanter er foretaget for en serie af bygninger i Middelfart, som har været med SEIH-projektet, og hvis indetemperatur er blevet registreret og logget hver time gennem 2½ år.

Temperaturlogningerne i SEIH-projektet er unikke i den forstand, at SEIH-projektet gik ud på at logge temperaturen i bygninger, der var udrustet med automatisk natsænkning. Dette betyder, at disse bygninger fik afbrudt varmetilførslen om aftenen for først at blive tilsluttet igen på det tidspunkt om natten, hvor automatikken kunne "forudse", at det skulle ske for at bringe huset tilbage på komforttemperatur på et valgt tidspunkt om morgenen.

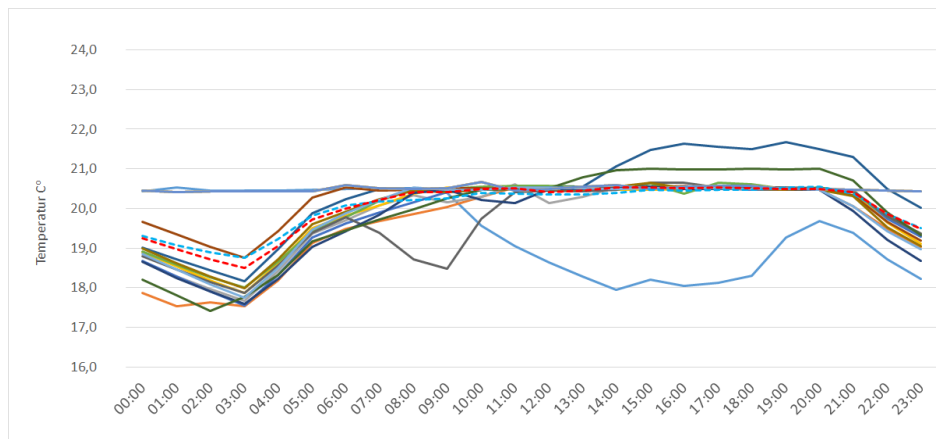
Den analysemetode, der er anvendt for at finde frem til den enkelte bygnings måde at køle af på, bliver betegnet autoregressiv analyse. Metoden kan bruges til at finde såvel 1. 2. og 3. ordens tidskonstanter afhængig af, hvor mange tidskonstanter, man forsøger at finde frem til. I analysen af afkølingsforløb for huse i SEIH-projektet har det i de fleste tilfælde været muligt at finde to tidskonstanter; en kort, der siger noget om husets lette inventar, tæthed og ventilation, og en lang, der siger noget om husets termiske masse, dvs. indhold af tunge byggematerialer såsom tegl og beton.

Ud fra de fundne tidskonstanter er det forklaret, hvordan man i teorien kan nå frem til det enkelte hus' fleksibilitet. Med andre ord man med kendskab til det enkelte hus' afkølingskurve udregne et hus' fleksibilitetsindeks og fx sige noget om, hvor meget energi, der kan flyttes væk fra spidslastperioder.

Afkølingskurver og tidskonstanter

Når varmetilførslen afbrydes i en bygning, fx i en bolig, vil temperaturen falde over tid. Måden, det sker på, kan man afbilde i en afkølingskurve. For et stor del af husene i SEIH-projektet blev der etableret automatisk natsænkning, for at undersøge, om der herved kunne opnås energibesparelser (Jensen, 2016).

I figur 4 ses et eksempel på, hvordan afkølingskurverne ser ud for et tilfældigt udvalgt hus, hvis varmesystem har haft automatisk natsænkning. Som det fremgår af figuren, bliver temperaturen i det pågældende tilfælde sænket ca. 3 grader, inden automatikken sørger for, at temperaturen vender tilbage til almindelige komforttemperatur omkring kl. 7. På trods af, at der er tale om et ældre hus fra 1953, tager det altså 6 timer for temperaturen at falde 3 grader. Se figur 4.



Figur 4 Temperaturkurver for et murstenshus opført i 1954. Med teknologien var det også muligt at bede om dagsnævning for på den måde at opnå ekstra energibesparelser. Den blå kurve kan være udtryk for noget sådant.

Inden for bygningsdynamik har man valgt at beskrive den måde, hvorpå en bygning afgiver og optager varme, ved begrebet tidskonstant (Jakobsen & Kolarik, 2018).

Tidskonstanten kan udledes af teorien om varmelagring i bygninger. Tidskonstanten giver et tilnærmet udtryk for temperaturfaldet afhængig af udetemperaturen. Tidskonstanten τ defineres som:

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

hvor C er varmekapaciteten i bygningen og H er det specifikke varmetab. Da H også kan udtrykkes ved $1/R$, og R er bygningens termiske modstand, kan tidskonstanten videre udtrykkes ved:

$$\tau = C \cdot R \quad (2)$$

Temperaturen i bygningen (T_i) ved stop af varmetilførslen kan følgelig udtrykkes ved

$$T_i = (T_{i0} - T_o) \cdot e^{-t/\tau} + T_o \quad (3)$$

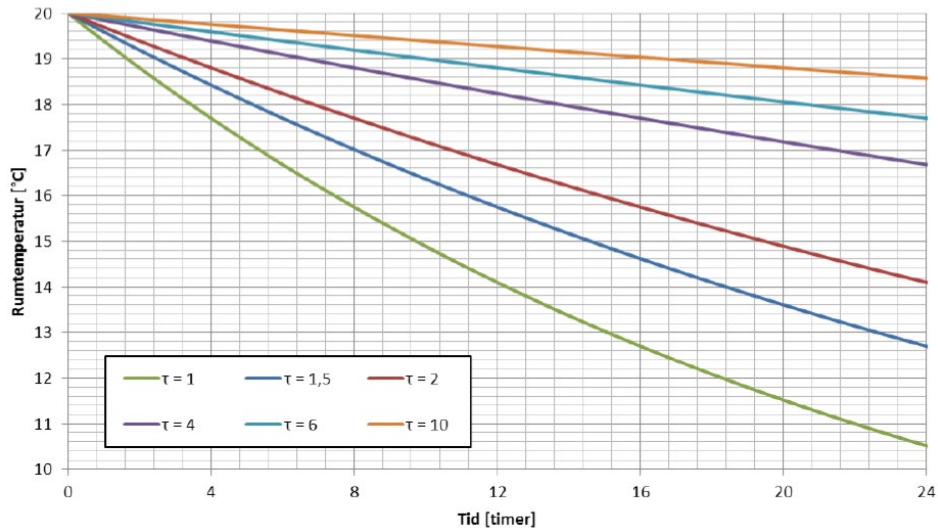
hvor T_{i0} er starttemperaturen, T_o er omgivelsernes temperatur, dvs. udetemperaturen, og t er tiden efter stoppet af varmetilførsel (Poulsen et.al., 2015, p33).

Tidskonstanten opgøres i sekunder og karakteriserer et systems respons på en påvirkning over tid - i dette tilfælde en bygning. I praksis er tidskonstanten den tid, det tager en bygning at opnå et fald i temperaturen på $1/e$, hvor e er den naturlige logaritmes grunddal ($e \approx 2,7$).

Et fald i temperaturen på $1/e$ svarer til et fald på 37 %. Tilsvarende kan tidskonstanten bruges til at give udtryk for den tid, det tager indendørstemperaturen at opnå en stigning på $1-1/e$, hvilket i procent giver en stigning på 63 %.

I bygninger er den termiske modstand (R) typisk defineret ved den konstante varmetilførsel, der kræves for at opretholde en temperaturdifferens mellem inde og ude på en grad Kelvin. Referencetemperaturen for tidskonstanten er derfor omgivelsestemperaturen T_o , dvs. udetemperaturen. Det er typisk den, der ændrer sig henover døgnet og dermed bestemmer den mængde energi, der skal tilføres, eller som måtte blive afgivet ved en given temperaturdifferens.

For at tegne et billede af tidskonstanternes størrelse og deres indflydelse på rumtemperaturen er der i figur vist seks eksempler på tidskonstanter (τ) varierende fra 1 til 10 døgn. Indetemperaturen er til start sat til $20\text{ }^\circ\text{C}$ og udetemperaturen til $5\text{ }^\circ\text{C}$.



Figur 5. Eksempler på afkølingskurver knyttet til forskellige tidskonstanter (τ). Figuren viser rumtemperaturens fald henover 24 døgn fra en starttemperatur på 20 °C. Udetemperaturen er sat til 5 °C. Kilde: Poulsen et.al. (2015, p34).

Autoregressiv analyse

Hvis man behandler en bygning som en termisk enhed og antager, at den kun har en tidskonstant, kan man modellere sig frem til en indendørstemperatur ved at benytte formel (3). Udtrykt som en funktion af tid vil den se således ud:

$$T^i(t) = e^{-t/\tau} T_0^i \quad (4)$$

Dette betyder, at vi har med en funktion at gøre, som for hvert tidsstep fra $t=0$ til $t=i$ beregner indendørstemperaturen.

Ud fra formel (4) er det nu muligt at opstille en statistisk model, som igen gør det muligt at ekstrahere tidskonstanten fra en serie af temperaturmålinger. Med andre ord vil man ud fra et afkølingsforløb for en konkret bygning kunne finde denne bygnings tidskonstant og dermed genskabe bygningens ideelle afkølingskurve.

For at modellen kan fungere for ekstrahering af en tidskonstant, kræver det imidlertid, at temperaturlogningerne foregår med tilstrækkeligt korte intervaller, dvs. tidsstep på en time eller mindre. Er dette tilfældet gælder formlen:

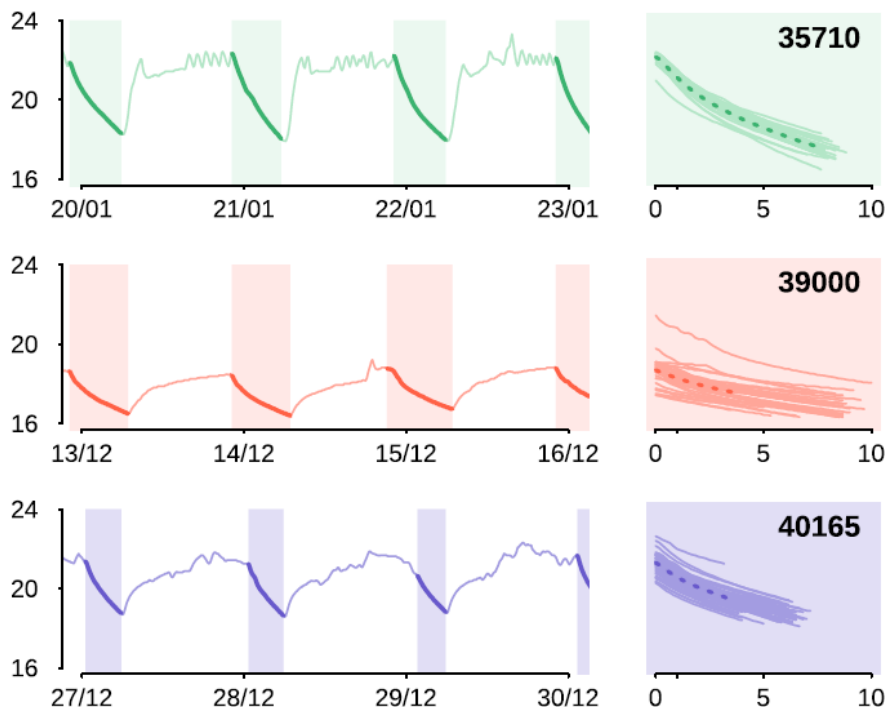
$$T_t^i = \phi T_{t-1}^i \quad (5)$$

hvor t repræsenterer en serie af diskrete tidstrin og ϕ er en modelparameter for identifikation af tidskonstanten τ . Man betegner denne model som en første ordens auto-regressiv model, eller kort AR(1) (Bacher og Madsen, 2011).

Analyse af bygninger med natsænkning

For mange bygninger viser det sig imidlertid, at dynamikken ikke kan beskrives fuldstændigt med kun en tidskonstant. For at finde frem til eventuelle sekundære tidskonstanter kan AR-modellen udvides til en model af højere orden. En sådan model kaldes for en auto-regressiv model: AR(p) af p 'te orden, hvor p svarer til antallet af tidskonstanter, der søges identificeret i systemet (Bacher og Madsen, 2011) (Norli, 2018) (Palmer et.al. 2020).

Det er et velkendt fænomen, at dynamikken for lufttemperaturen i et hus styres af to processer: en proces med hurtig respons grundet varmeudveksling mellem indeluften og bygningens termiske masse og en proces med langsom respons grundet energiudveksling mellem bygningens termiske masse og udetemperaturen. I figur 6 kan man se de to dynamikker i afkølingskurverne, som stammer fra tre bygninger i SEIH-materialet.



Figur 6. Temperaturkurver for tre huse i Middelfart baseret på temperatur-logninger vinteren 2013 og 2014. Temperaturudviklingen er beskrevet over 4 døgn med natsænkning (De kraftige kurver). Her skimter man flere steder et knæk, som kan indikere, at mindst to afkølingsprocesser med hver sin tidskonstant (τ) er i spil samtidig. Figurerne til højre opsamlere natsænkingskurver for tre måneder i træk, og det ses, at de tre huse har helt forskellige afkølingsforløb. Den lodrette akse viser temperaturen, mens de vandrette refererer til datoer (Palmer et al., 2020).

Hvor en 1. ordens AR-model følger formel (5), vil en 2. ordensmodel bygge på følgende formel:

$$T_t^i = \phi_1 T_{t-1}^i + \phi_2 T_{t-2}^i \quad (6)$$

Idet ϕ_1 og ϕ_2 er modelparametre for identifikation af tidskonstanterne τ_1 og τ_2 .

I en analyse udført af DTU (Jaume, 2019) er tre AR-modeller testet for at finde frem til den simpleste model til bestemmelse af to tidskonstanter.

Hvor den første model, A, bygger på formel (6), bygger den anden model, B, på formel (7). I sidstnævnte formel er udetemperaturen taget med i betragtning:

$$\bar{T}_t^i = \phi_1 \bar{T}_{t-1}^i + \phi_2 \bar{T}_{t-2}^i \quad (7)$$

\bar{T}_t^i henviser for hvert tidsstep til temperaturforskellen mellem inde og ude.

Endelig er en tredje model, C, undersøgt. Her indføres et T^e , et eksternt output, som vil kunne tænkes at kunne påvirke temperaturforskellen på hvert tidsstep. Denne analyse bygger på følgende formeludtryk:

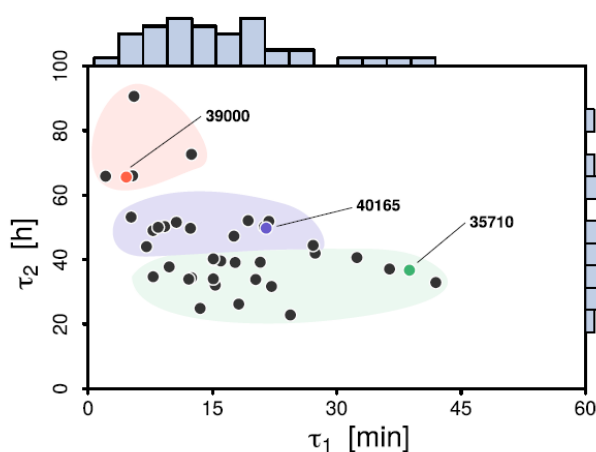
$$T_t^i = (1 + \phi_1) T_{t-1}^i + \phi_2 T_{t-2}^i - \phi_1 T_{t-1}^e - \phi_2 T_{t-2}^e \quad (8)$$

Herefter er temperaturlogninger fra i alt 39 huse som alle viser konsistete afkølingskurver blevet analyset i henhold til hver af modellerne, A, B og C. Analysen viser, at på det

foreliggende grundlag er model B den, der leverer det bedste bud på begge tidskonstanter, dvs. både en τ_1 og en τ_2 værdi. Model B er den model, der efterlader de færreste residualværdier, dvs. rester, der ikke kan bidrage til resultatet og samtidig integrerer udetemperaturen bedst.

Middelfarthusenes tidskonstanter

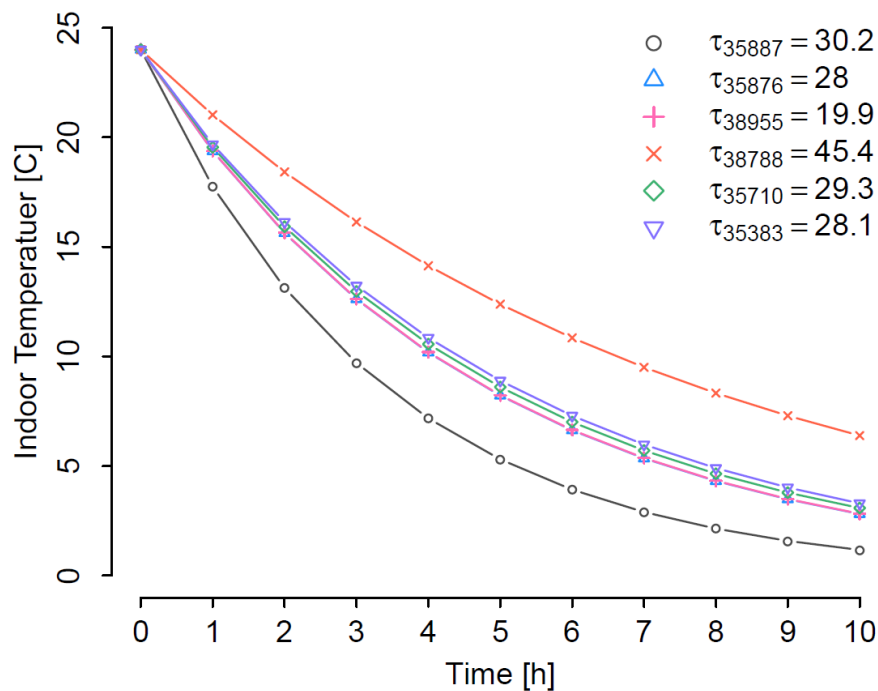
Ved brug af autoregressiv analyse, herunder model B, som medtager udetemperaturen er der fundet τ_1 og τ_2 værdier for i alt 39 huse i Middelfart. Disse huse har i perioder haft stabil natsækning, således at adskillige døgn's temperaturkurver kunne indgå i analysen.



Figur 7. Plot, som viser, hvordan 39 huse placerer sig i forhold til hinanden, når tidskonstanterne τ_1 og τ_2 lægges til grund. τ_1 er den korte tidskonstant på op til en time, mens τ_2 er den lange tidskonstant med værdier på mellem 20 og 40 timer. Bygningerne grupperer sig i tre områder med hver sit forhold mellem den korte og den lange tidskonstant. Bygningerne 39000, 40165 og 35710 er her udpeget som repræsentanter for de tre områder (Jaume et.al., 2020).

På x-aksen med de korte tidskonstanter τ_1 er i hvert fald to klynger spredt over hele akse. Det kan være udtryk for større usikkerhed i analysen, men også for, at der rent faktisk er forskel på bygningerne hvad angår de små tidskonstanter, dvs. forskelle, der hidrører fra en umiddelbar køling fx som følge af utætheder og stort luftskifte. På y-aksen med de lange tidskonstanter τ_2 finder der en skarpere opdeling sted, forstået på den måde at husene i den røde klynge køler langsomt ($60 < \tau_2 < 100$ timer), husene i den blå klynge køler hurtigere ($40 < \tau_2 < 60$ timer), og husene i den grønne klynge køler hurtigst ($20 < \tau_2 < 40$ timer). Den lange tidskonstant hidrører typisk fra bygningens termiske masse, hvilket igen betyder, at en bygning bestående af tunge materialer har en høj τ_2 værdi, således som det ses i den røde klynge.

Seks huse er i undersøgelsen udvalgt til nærmere undersøgelse. Det er huse hidrørende fra forskellige byggeperioder. Disse huse er undersøgt i marken, dvs. undersøgt mht. til alder og udformning, foretagne energireoveringer og evt. energimærke. Endelig er der kigget nærmere på de pågældende bygningers afkølingskurver, ligesom et stort antal afkølingskurver er lagt til grund for beregning af husenes lange tidskonstant τ_2 . Se diagram.



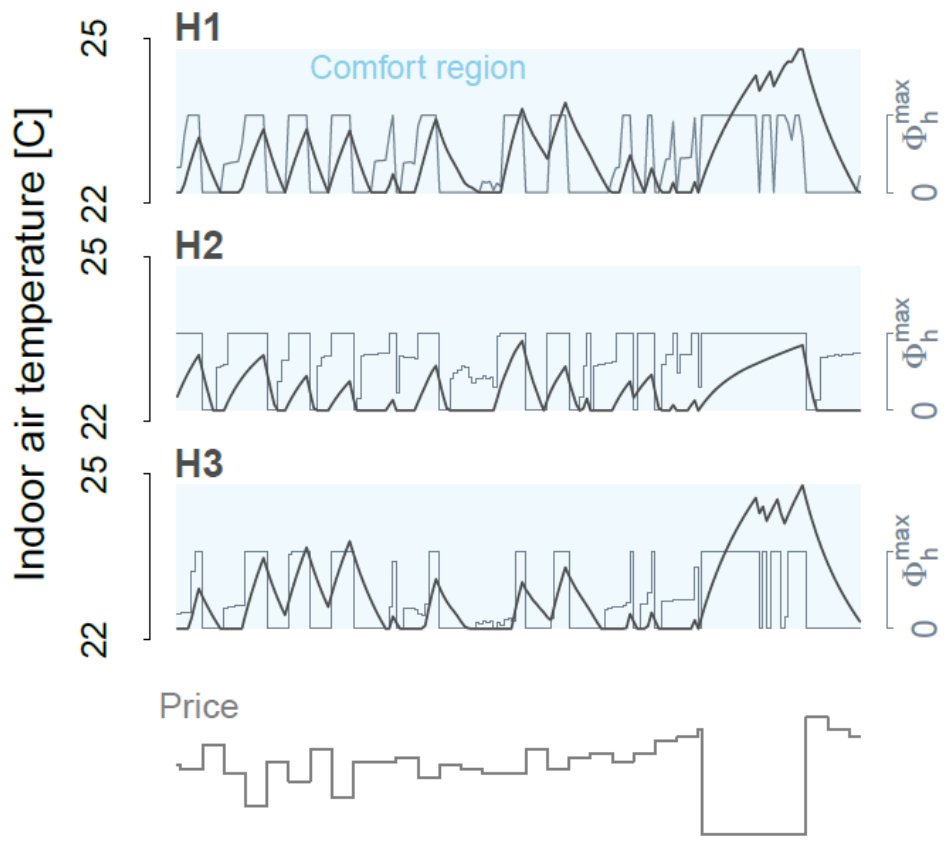
Figur 8. Tidskonstant for hver af de 6 huse, som bliver gennemgået nærmere i det efterfølgende kapitel

Signaler i nettet og fleksibilitet

Afdækningen af tidskonstanter kan være med til at tegne et præcist billede af en bygnings fleksibilitet i et smart-grid. Hermed menes et forsyningsnet med varierende signaler (pris eller andet) og bygninger, der kan tilpasses forbruget og bidrage med fleksibilitet i forhold til et givet signal. Dette kan fra bygnings ejerens synsvinkel minimere energiomkostningerne - i dette tilfælde omkostningerne til opvarmning. Fra forsyningsnettets synsvinkel kan det minimere omkostningerne med at sikre forsyningsikkerhed i spidsbelastningsperioder. En bygnings fleksibilitetspotentiale angives ved et fleksibilitetsindeks.

Man kan ikke umiddelbart beregne fleksibilitetsindekset ud fra tidskonstanterne. Tværtimod må man gå indirekte til værks og opstille en valideringsramme, hvor tidsserier analyseret ved anvendelse af en såkaldt grå boksmodel gør det muligt (Bacher og Madsen, 2011). Som eksempel beregner Jaume et. Al (2020) et fleksibilitetsindeks for et repræsentativt hus for hver af de tre klynger af huse, der er vist i figur 7. Her kender vi husenes tidskonstanter, der sammen med tre sæt ideelle afkølingskurver er stillet op over for et pris-signal med et repræsentativt forløb. Ved at benytte to forskellige kontrolstrategier, dvs. to principper for varmestyring for hvert af de repræsentative huse H1, H2 og H3, kan der opstilles en fleksibilitetsfunktion og på det grundlag udregnes et fleksibilitetsindeks,

Resultaterne af den kontrollerede simulering for de tre repræsentative huse er vist i figur 9. Det ses, at når prisen er lav, bliver varmforsyningen tilsluttet, mens den, når prisen stiger, afbrydes, indtil temperaturen nærmer sig den nedre grænse af komfortbåndet. Bemærk at opvarmningen i H3 kunne afbrydes i længere tid takket være bygningens højere fleksibilitet, som igen beror på en høj værdi af den lange tidskonstant. Den indendørs (luft-)temperatur i bygning H2 nåede aldrig den øvre grænse af komfortbåndet, da varmetabet i denne bygning simpelthen er for stort.



Figur 9. Simulering af et kontrolforløb for tre standardhuse H1, H2 og H3. Indetemperaturen følger den valgte forsyningsstrategi bestemt af prissignalet vist nederst. Det ses, hvordan hus H3 på grund af dets termiske egenskaber er bedst i stand til at holde indetemperaturen inden for komfortbåndet (vist med blå) med varmesystemet kørende i kortere tid sammenlignet med andre to huse Tilslutning af varmetilførslen er vist med tynde kantede streger. (Jaume et.al.,2020).



UDVALGTE HUSE

UDVALGTE HUSE

Husene, som indgår i Middelfart-undersøgelsen, er i det oprindelige SEIH-projekt udvalgt nøje, så alle aldersgrupper af enfamiliehuse er repræsenteret. I alt 174 huse indgår i SEIH-projektet. Af disse foreligger der valide måledata fra 146 huse. Her er der en overvægt af huse opført før 1950 og en overvægt af huse opført i perioden 1961-1972. Dette afspejler, at det oprindelige udvalg af huse er repræsentativt for Middelfart Kommune. Ingen huse opført i perioden 1999-2003 indgår i materialet.

En analyse af de udførte datalogninger, viser, at i så godt som alle huse valgte man at udnytte muligheden for natsenkning og i noget mindre grad at benytte sig af dagsenkning. Næsten ingen steder er der konstateret temperatursenkning i flere på hinanden følgende døgn, jf. muligheden for at gennemføre såkaldt feriensenkning. Se tabel 7

Tabel 7. Stikprøver fra udvalgte døgn viser, hvor aktive brugerne har været med hensyn til at vælge nat- og dagsenkning samt eventuel feriensenkning (Jensen, 2016)

	Antal huse	Nat-senkning (konstant)	Dag-senkning (konstant)	Ferie-senkning (konstant)	Ingen senkning
28.01.2014	110	99	57	0	7
19.02.2014 (vinterferie)	109	98	58	0	4
11.02.2015 (vinterferie)	93	93	41	4	13
22.03.2015	92	92	24	3	9

En analyse af de huse, hvor der har været foretaget natsenkning, har ført til udvælgelse af 39 huse, hvor der har været foretaget systematisk natsenkning, således at temperaturlogninger herfra har kunnet anvendes til analyse af husenes dynamiske egenskaber, herunder udtagning af afkølingskurver til bestemmelse af tidskonstanter. En kontrol af disse huse viser, at der uden undtagelse er tale om natsenkning.



Figur 10. Diagram, der viser på hvilket tidspunkt af døgnet, hvor de største temperaturfald har fundet sted. De steder, hvor temperaturen falder hurtigst, er vist med mørkegrå felter, mens langsom køling er vist med lysegrå felter (Jaume et al., 2020).

Diagrammet, figur 10 viser, at der er forskel på hvor hurtigt, det enkelte hus køler ned fra det tidspunkt, hvor natsænkningen slås til, og hvor længe, der går, til natsænkningen slås fra igen, for at huset den følgende morgen kan vende tilbage til en ønsket komforttemperatur

Af diagrammet fremgår også, at de huse der køler kraftigst (mørkegrå felter), også er de huse, hvor natsænkningen er slået til i de færreste timer. Allerede her får vi med andre ord en indikation på de enkelte huses dynamiske egenskaber.

Arketype-fordeling

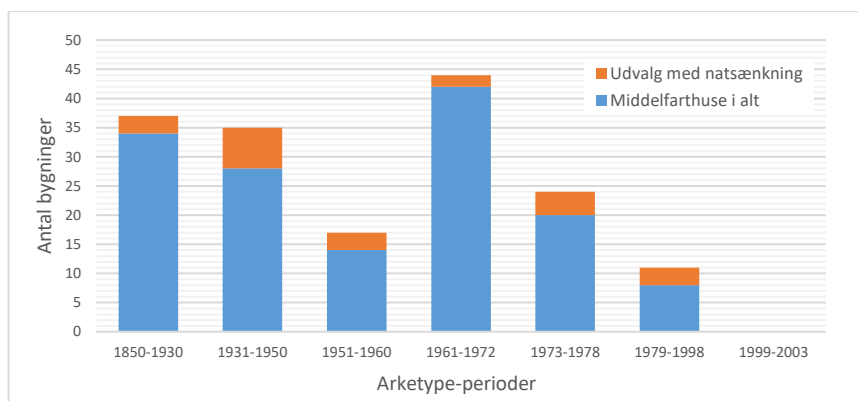
Periodiseringen, som den fremgår af figur 11, bygger på det såkaldte arketype-princip, dvs. byggeperioder, inden for hvilke konstruktionerne anses for ens og tidstypiske. De tidlige perioder er defineret ud fra skift i byggetradition, mens de seneste defineret ud fra ændringer i kravene til varmeisolerings i skiftende bygningsreglementer (Wittchen, et al., 2017).

I alt er der udtaget 8 perioder, der repræsenterer hovedparten af danske enfamiliehuse.

Disse er:

1. før 1930
2. 1931 – 1950
3. 1951 – 1960
4. 1961 – 1972
5. 1973 – 1978
6. 1979 – 1998
7. 1999 – 2006
8. efter 2006

En fordeling af de 100 huse i SEIH-materialet, hvor der har været skabt mulighed for natsænkning, viser, at alle perioder er repræsenteret. Dog er der en overvægt af huse opført før 1950 og huse opført i perioden 1961-1972.



Figur 11. Alle huse i SEIH-materialet fordelt på arketypeperioder. Ud af disse er 39 fundet egnet for videre analyse (orange).

Kriteriet for at udvælge de 39 huse har været valide logninger over et stort antal døgn med natsænkning. Dette har datamæssigt skabt grundlag for at gennemføre en såkaldt autoregressiv analyse af de pågældende huses tidskonstanter (se side 22). I alt 22 huse er fundet egnede til yderligere analyse. Disse fordeler sig som vist i figur 11, og som det fremgår af figuren, er mindst et hus inden for hver arketype fundet egnet.

En yderligere gennemgang af de udvalgte huse har ledt frem til identifikation af et hus fra hver arketype. Disse huse bliver her beskrevet ved byggeår, boligareal, antal etager, varme-

forsyning og energimærke, hvor dette måtte foreligge. Alle huse er fritliggende enfamilie-huse, bortset fra et stuehus i en landejendom. I de fleste tilfælde er husene blevet moderniseret. Kun for huset, der repræsenterer arketype 2, foreligger der dokumentation for efterisolering.

Tabel 8 Oversigt over de seks huse, der er udvalgt som eksempler på arketype-huse. Tabellen fortæller, hvornår huser er opført, hvilken type, der er tale om, boligareal ifølge BBR-registret, antal etager, varmekilde, oplysning om efterisolering og energimærke.

Arke-type	Byg-geår	Boligtype	Bolig-areal	Antal eta-ger	Varmekilde	Efter-isoleret	Energi-mærke
1	1907	Stuehus	130	2	Naturgas	Nej	-
2	1932	Enfamiliehus	119	2	Naturgas	Ja	F
3	1953	Enfamiliehus	115	2	Fjernvarme	Nej	C
4	1966	Enfamiliehus	160	1	Fjernvarme	Nej	-
5	1977	Enfamiliehus	220	2	Naturgas	Nej	C
6	1979	Enfamiliehus	152	1	Naturgas	Nej	C

I det følgende gennemgås de udvalgte huse, et fra hver af arketyperne 1-6. Ud over en kort beskrivelse gives der eksempel på afkølingskurver samt de tidskonstanter, der har kunnet udledes af et stort antal temperaturlogninger.

Stuehus på landet 1907

For de ældste huse tilhørende arketype 1, varierer afkølingsgraden og dermed tidskonstanten en del. Dette hænger sammen med, at denne aldersklasse af huse ofte kan have været udsat for relativt markante renoveringer, herunder efterisolering over tid.

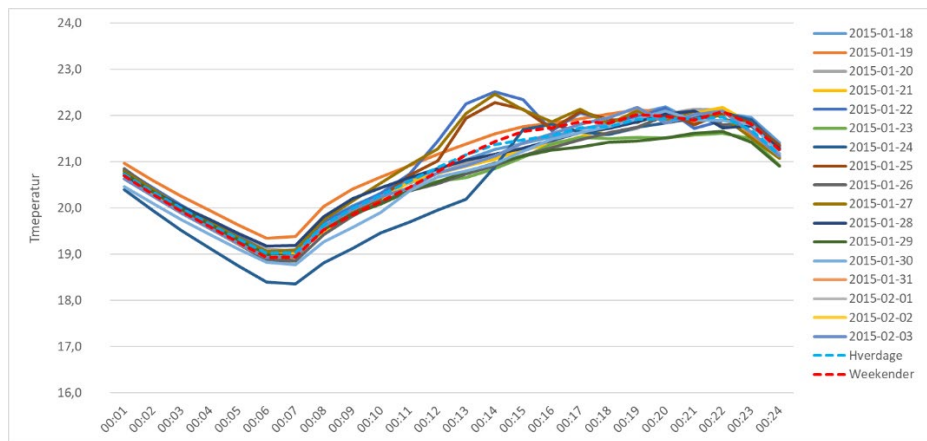
Som eksempelhus er valgt et stuehuse til en landejendom. Der er tale om et pudset hus med teglsten, altså helt typisk for perioden. Huset er ikke blevet renoveret nævneværdigt siden sin opførelse i 1907.



Figur 12. Stuehus til landejendom, nærmere betegnet firlænget gård. Huset er opført i 1907.

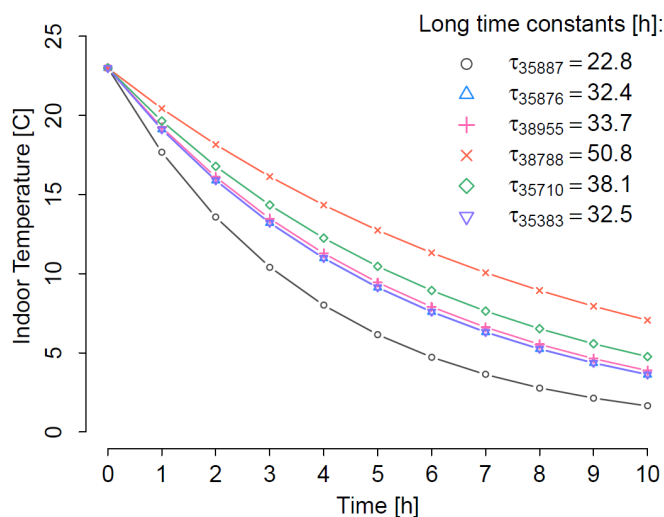
Natsænkingskurverne for dette hus viser, at den typiske natsænkning ligger på 2,5 grader.

Der er for dette hus ikke stor forskel på hverdage og weekender. Interessant for huset er en jævnt stigende temperatur fra kl. 7 morgen til kl. 16 eftermiddag. Dette kan være udtryk for, at effekten af varmeanlægget ikke står mål med varmebehovet. Tre dage med et høj rumtemperatur midt på dagen tyder på solindstråling. Se figur 13.



Figur 13. Temperaturkurver for stuehus til landejendom opført i 1907. Af kurverne kan man se, at stuetemperaturen når at falde små 4 grader, inden automatikken slår varmetilførslen til igen. Den ønskede komforttemperatur er tydeligvis sat til 22 °C. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer refererer til gennemsnit for weekender

En nærmere analyse af husets temperatur og afkølingskurver viser, at det som ventet køler hurtigt. Med en lille tidskonstant på kun 22,8 er det et godt bevis på, at huset er dårligt isoleret. Så her hjælper det ikke, at væggene består af tunge materialer. Der bliver hurtigt koldt, når varmetilførslen afbrydes



Figur 14. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det akutelle hus, et stuehus på landet, har en tidskonstant på 22,8. Se nederste sorte kurve.

Enfamiliehus fra 1932

For huse opført i 1930'erne og 1940'erne, tilhørende arketype 2, vil afkølingsgraden og dermed tidskonstanten være forskellig fra hus til hus. Husene er opført før, der for alvor blev stillet krav til isolering, men vil i de fleste tilfælde være efterisoleret efterfølgende.

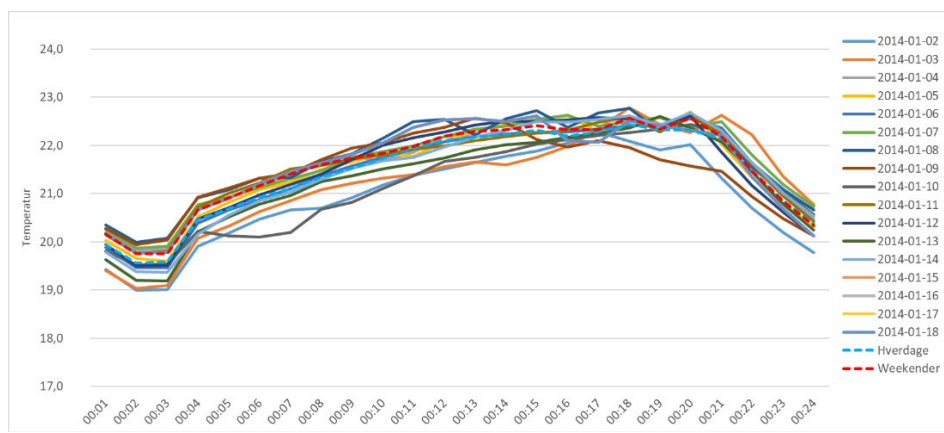
I SEIH-materialet optræder tre huse opført i perioden 1850-1930, hvor data har en sådan kvalitet, at de kan anvendes til studier af afkøling. Det ældste hus er fra 1932 og det yngste fra 1937. Alle huse er fritliggende enfamiliehus, bortset fra et enkelt rækkehus.

Som eksempelhus er valgt et nyt istandsat enfamiliehus fra 1932. Både facade og tag er efterisoleret i 2010, ligesom huset har fået nye vinduer. Se figur 15.

Natsænkingskurverne for dette hus viser, at der har fundet natsænkning sted på mellem 3 og 4 °C. For dette hus er der ikke stor forskel på hverdage og weekender. Stuetemperaturen i dagtimerne ligger omkring 22,5 °C, og der sker, efter at natsænkningen er hørt op, en jævn øgning af temperaturen helt frem til midt på dagen. Dette kan være udtryk for, at varmebehovet er større end, husets varmeanlæg kan honorere.



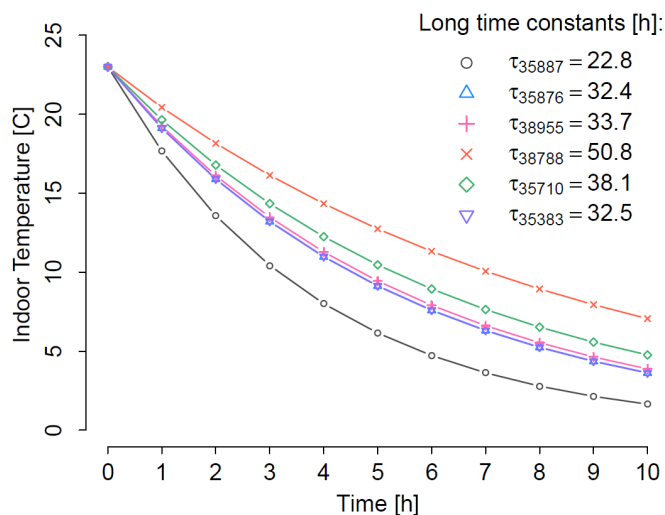
Figur 15. Klassisk enfamiliehus fra 1932, arketype 2. Dette hus er renoveret i 2010 og i den forbindelse efterisoleret. (Foto: Boliga)



Figur 16. Temperaturkurver for enfamiliehus fra 1932, arketype 2. Af kurverne kan man se, at stuetemperaturen når at falde ca. 2,5 grader, inden automatikken slår varmetilførslen til igen. Den ønskede komforttemperatur er tydeligvis sat til 22,5 °C. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer referer til gennemsnit for weekender

En nærmere analyse af husets temperatur og afkølingskurver viser, at det på trods af sin alder har en relativ pæn tidskonstant 32,4. Det er godt bevis på, at huset er blevet efterisoleret. Ud over tagsolering har huset fået en udvendig isolering, hvilket er med til at forklare, at huset afkølingsmæssigt ligger på niveau med huse opført langt senere.

En nærmere analyse af husets temperatur og afkølingskurver viser, at husets afkøling er bestemt af to afkølingskurver.



Figur 17. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det aktuelle hus, har en tidskonstant på 32,4. Det giver en placering midt i feltet. Se blå kurve med trekantspids opad. Kurven er sammenfaldende med kurven for et hus opført langt senere (trekantspids nedad), og viser, at det aktuelle hus fra 1932 er efterisoleret.

Enfamiliehus fra 1953

Inden for kategorien af huse tilhørende hørende arketype 3, kan der som for andre ældre huse være stor forskel på afkølingsgraden og dermed tidskonstanten. Dette hænger sammen med, at huse fra den periode kan være mere eller mindre renoveret og i større eller mindre grad efterisoleret.

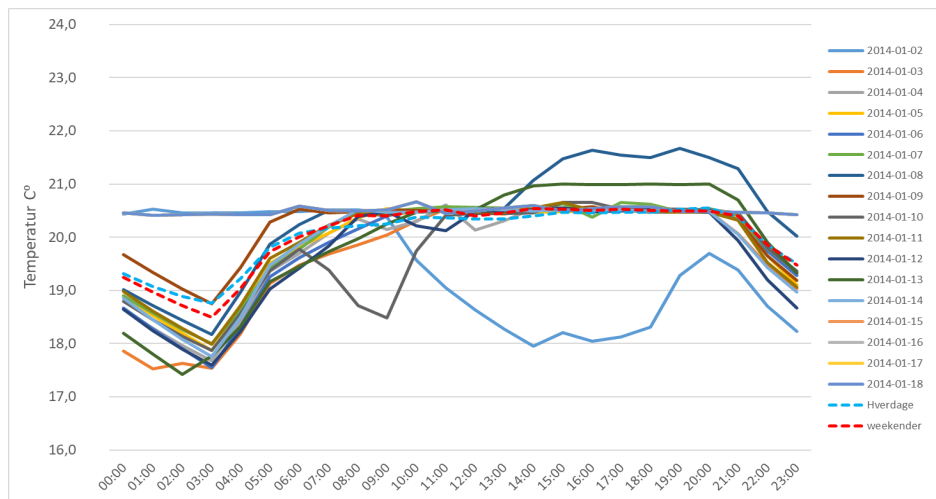
I SEIH-materialet er tre huse opført i perioden 1961-1972 med et datagrundlag af en kvalitet, som gør, at de kan anvendes til studier af afkøling. Husene er fra henholdsvis 1952, 1953 og 1954. Der er i alle tilfælde tale om enfamiliehuse, to forsynet med fjernvarme og et med naturgas.

Som eksempelhus er valgt huset fra 1953 forsynet med fjernvarme. Dette hus er efterisoleret på loftet i forbindelse med udskiftning af tag i 2006. Ydermuren er på samme tidspunkt hulmursisoleret. Se figur 18.

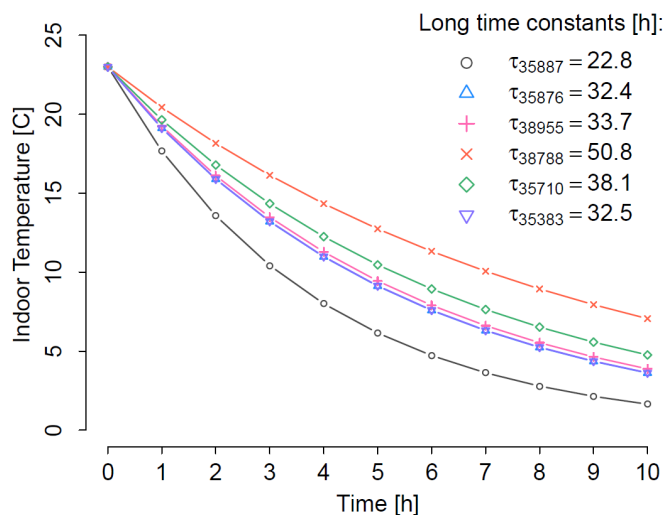


Figur 18. typisk murstenshus fra 1953, arketype 3. (Foto Boliga)

Natsænkningsskurverne for dette hus viser, at der typisk finder en natsænkning sted på 2,5 °C. Den automatiske natsænkning bliver typisk afbrudt kl. 3 om natten, for at temperaturen i opholdsrum kan være tilbage ved komforttemperaturen kl. 7. Stuetemperaturen i de enkelte kurver vidner om forsøg på dagsænkning, lige som enkelte kurver kan tyde på, at der bliver skruet ekstraordinært op for varmen i visse dagtimer. Dette skal ses i lyset af, at stuetemperaturen i dagtimerne ligger på kun ca. 20,5 °C.



Figur 19. Temperaturkurver for det aktuelle hus opført i 1953. Ved natsænkning falder temperaturen ca. 2 grader. Der er gjort enkelte forsøg på dagsænkning, ligesom to dage er karakteriseret ved højere temperaturer. Dette skal ses i lyset af, at den ønskede komforttemperatur er sat så lav som 20,5 °C. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer refererer til gennemsnit for weekender.



Figur 20. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det aktuelle hus, har en tidskonstant på 33,7. Det giver en placering midt i feltet. Se rød kurve med vertikale kryds. Kurven er næsten sammenfaldende med de to blå kurver. Det viser at det aktuelle hus fra 1952 er godt efterisoleret.

Enfamiliehus fra 1966

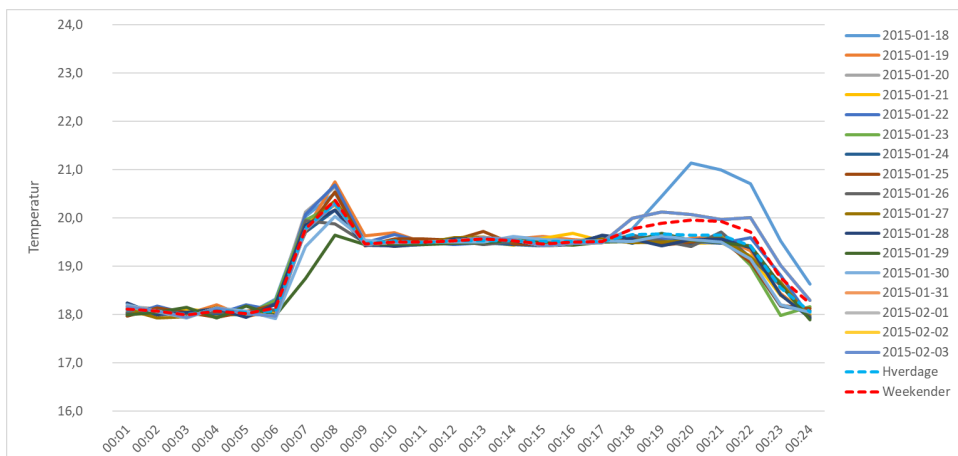
Inden for kategorien af huse tilhørende hørende arketype 4, 1961-1972, findes der i SEIH-materialet to huse med så mange valide temperaturlogninger, at de kan anvendes til studier af afkøling. Husene er fra henholdsvis 1966 og 1970. Der er i det ene tilfælde tale om et enfamiliehus, i det andet et rækkehus. Begge huse bliver forsynet med fjernvarme.

Som eksempelhus er valgt enfamiliehuset fra 1966. Dette hus er kun i mindre grad efterisoleret i 2006. Først og fremmest er huset blevet hulmursisoleret. Se figur 21.

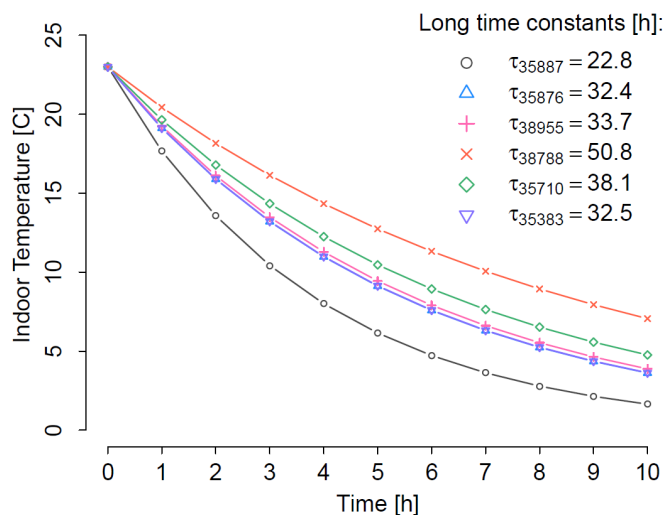


Figur 21 Typisk parcelhus fra 1966, arketype 4. (Foto: Google Street Map).

Natsænkningsskurverne for dette hus viser, at der typisk finder en natsænkning sted på ca. 2,5 grad. Nattemperaturen bliver sænket til 18 °C, og frem mod kl. 8 hæver den til lidt over 20 °C. For dette hus er der i ikke stor forskel på hverdage og weekender. Bemærkelsesværdigt for husets temperaturkurver er, at det har en morgen- og aften "peak", som tyder på, at der også har været etableret dagsænkning.



Figur 22. Temperaturkurver for parcelhus opført i 1966. Spidserne morgen og aften tyder på, at styringen også har været programmeret til dagsænkning. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer referer til gennemsnit for weekender.



Figur 23. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det akutelle hus har en tidskonstant på 50,8. Det betyder, at dette hus, er det, der køler langsomst. Se rød kurve med skrå kryds. Det tyder på et velisoleret og tæt hus.

Enfamiliehus fra 1977

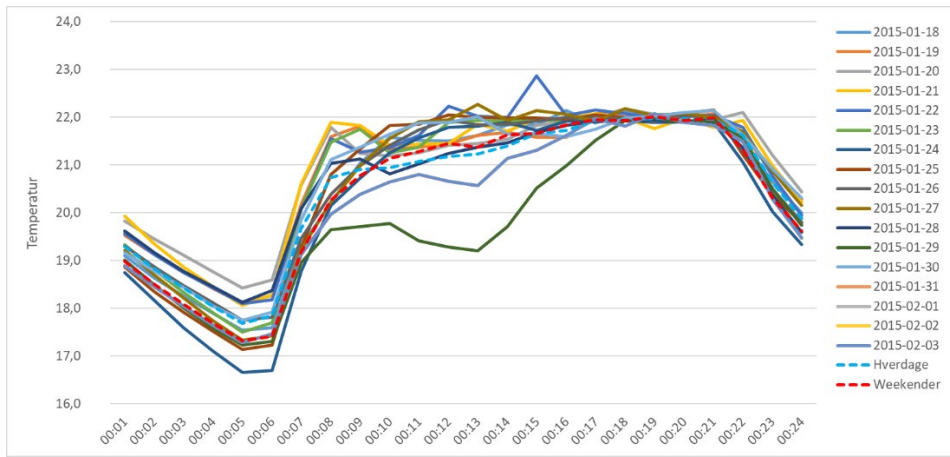
Inden for kategorien af huse tilhørende hørende arketype 5, 1972-1979 findes der i SEIH-materialet fire huse med logningsdata, der kan sige noget om husenes afkøling. Alle bliver forsynet med naturgas. Der er i alle tilfælde tale om traditionelle parcelhuse fra perioden. For alle huse er der opsamlet temperaturdata, der vidner om systematisk natsænkning, og som har en kvalitet, som gør dem anvendelige til en nærmere analyse af afkøling. Husene er alle opført i 1977.

Som eksempelhus er valgt et hus i udkanten af Middelfart. Dette hus har ifølge ejer fået efterisoleret taget. Se figur 24.

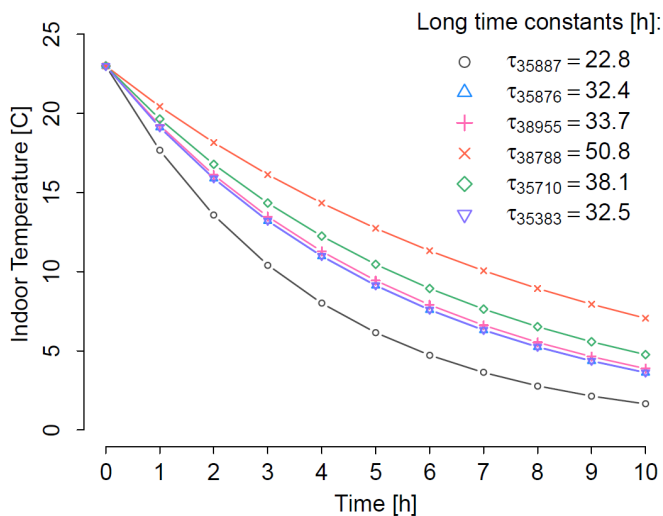


Figur 24. Det valgte parcelhus fra 1977, arketype 5. Huset har høj rejsning og udnyttet 1. sal. (Foto: Boliga)

Natsænkingskurverne for dette hus viser, at der har fundet en systematisk natsænkning sted med en relativ hurtig afkøling. Den automatiske natsænkning er dog blevet afbrudt allerede kl. 4 om morgenen for at kunne sikre en ønsket komforttemperatur kl. 7. Først på natten når temperaturen at falde ca. 2 grader. Stuetemperaturen i dagtimerne ligger på mellem 21 og 22 °C, se figur 25.



Figur 25. Temperaturkurver for parcelhus opført i 1977. Kun enkelte dage er dagtemperaturen forsøgt sænket. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer refererer til gennemsnit for weekender



Figur 26. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det akutelle hus har en tidskonstant på 38,1. Dette vidner om, at huset er af nyere dato og derfor også kølere langsommere end ældre huse. Se grøn kurve med røde-markering.

Enfamiliehus fra 1979

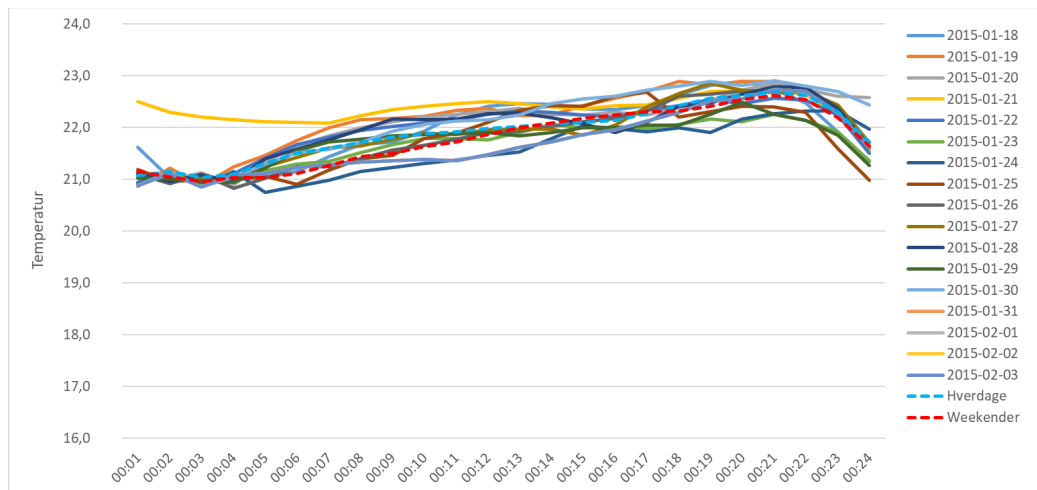
Inden for kategorien af huse tilhørende hørende arketype 6, 1972-1979, findes der i SEIH-materialet tre huse, alle forsynet med naturgas. Der er tale om traditionelle parcelhuse fra perioden. I et enkelt hus er der opsamlet temperaturdata, der vidner om systematisk natsænkning, og som har en kvalitet, som gør data anvendelige til en nærmere analyse af afkøling. Husene er alle opført i 1979 og 1980.

Som eksempelhus er valgt et hus fra 1980, beliggende i en større parcelhusudstyknng fra denne periode. Det udvalgte hus har ifølge ejer fået efterisoleret taget. Se figur 27.

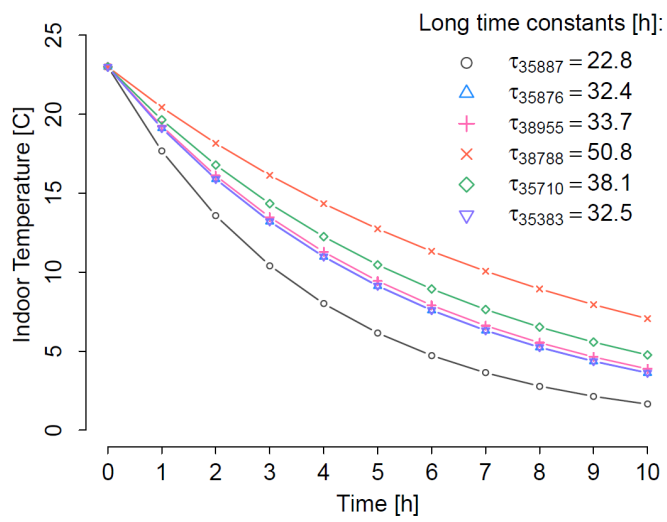


Figur 27. Luffoto (Google Maps) af det valgte parcelhus fra 1979, arketype 6.

Natsænkingskurverne for dette hus viser, at der har fundet en blandet natsænkning sted. Afkølingen er på kun ca. halvanden grad, startende fra ca. 22,5 °C til ca. 21 °C. Både på hverdage og i weekender er der en jævnt stigende temperatur hen over dagen. Dette kan skyldes et varmeanlæg, der ikke helt står mål med varmebehovet. Alternativt er der tale om en mindre dagsænkning, som så nogle dage kompenseres af solindstråling, se figur 28.



Figur 28. Temperaturkurver for parcelhus opført i 1979. De røde punkterede streger refererer til gennemsnit for hverdage, mens blå punkterede linjer referer til gennemsnit for weekender.



Figur 29. Afkølingskurver for de seks udvalgte huse. Det akutelle hus har en tidskonstant på 32,5. Dette vidner om, at huset er af nyere dato og derfor også kølere langsommere end ældre huse. Se blå kurve med trekant-markering med spidsen nedad.



SIMULERING AF VARMEBEHOV OG INDEKLIMA

SIMULERING AF VARMEBEHOV OG INDEKLIMA

For at kunne opnå viden om de termiske egenskaber, der karakteriserer de såkaldte arketyper, herunder afkølingsrater og varmelageregenskaber, er der foretaget simuleringer af varmebehov og indeklima for hver enkelt arketype. Som nævnt tidligere afspejler opdelingen i arketyper byggeperioder, inden for hvilke konstruktionerne anses for ens og tidstypiske. De tidlige perioder er defineret ud fra skift i byggetradition, mens de seneste defineret ud fra ændringer i kravene til varmeisolering i skiftende bygningsreglementer (Wittchen, 2004).

Simuleringerne udføres med simuleringsprogrammet BSim, der er udviklet af BUILD (Wittchen et al., 2000-2019). Programmet er indrettet, så det ud fra kendskab til en konkret bygnings størrelse, termofysiske egenskaber og tekniske installationer kan simulere varmebehov og indeklima med små tidsstep. Grundlaget for simuleringerne er derudover det såkaldte design reference-år DRY (Wang et al., 2013).

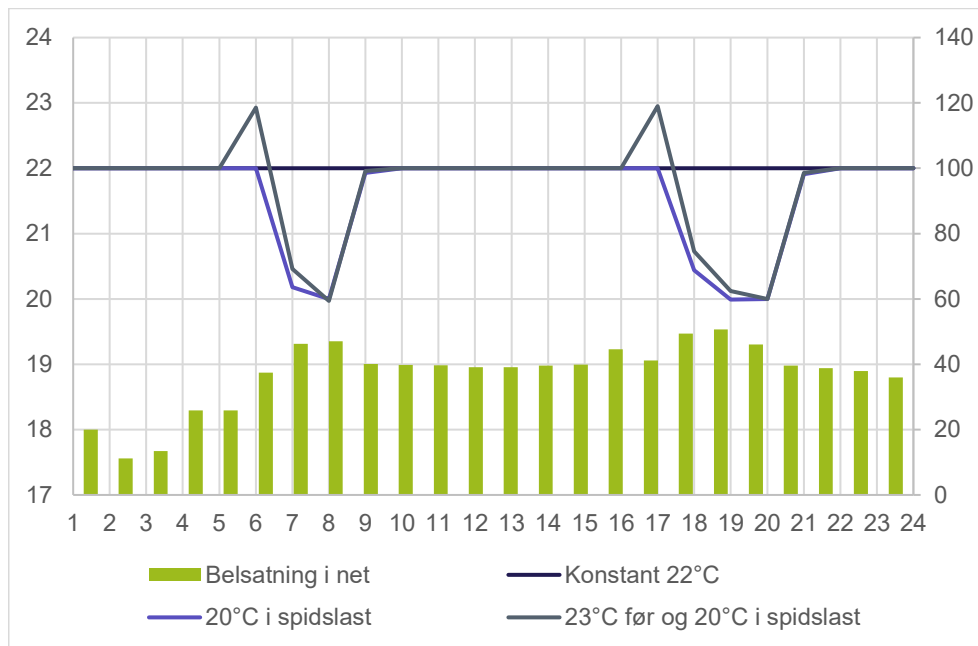
I det aktuelle tilfælde er varmebehovet simuleret for seks arketyper, der tilsammen dækker perioden fra 1850 til 1998.

Årsagen til, at der ikke er foretaget simuleringer af nyere huse, er, at de ikke indgår i undersøgelsen. De er typisk yderligere opbygget af lette materialer og desuden så velisoleerede, at deres totale kapacitet med hensyn til at optage varme er begrænset. Der finder med andre ord kun et lille energioptag sted, når de opvarmes.

Simulering af arketype huse

Husenes evne som varmelager i et smart-grid vil uvilkårligt afhænge af de byggematerialer og den byggeteknik, der er anvendt. Således sker der over tid et skift fra brug af tunge til brug af lettere skille vægge og indermure, hvilket reducerer varmekapaciteten og forringer muligheden for at lagre varme. Omvendt er huse blevet mere tætte over tid, hvilket øger varmelagringsevnen.

I figur 30 ses en temperaturkurve for et ældre gennemsnitshus i tre situationer. 1. konstant indetemperatur, 2. varmen afbrydes under spidslast og 3. forvarmning af huset inden spidslast, hvorefter varmen afbrydes under spidslast. I alle tilfælde bliver forløbet sammenholdt med et typisk belastningsprofil (prissignal) for el-nettet.



Figur 30. Indetemperatur ved styring efter 22°C konstant temperatur, afkøling mod 20°C under spidslast, forvarmning mod 23°C før spidslast og afkøling mod 20°C under spidslast sammenholdt med et typisk belastningsprofil (prissignal) i el-nettet.

For at få overblik over, hvad der sker i skiftende byggeperioder, er der foretaget simple simuleringer af en række standardhuse opført i forskellige byggeperioder. I projektet er der valgt seks huse, der er typiske for de enkelte tidsperioder i dansk byggeri, jf. de nævnte arketyper.

Med det udgangspunkt kan den eksisterende bygningsbestand opdeles i en række tidstypiske byggeperioder. Se tabel 9.

Tabel 9. Oversigt over simulerede arketyper.

Arketypeperioder	Opvarmet areal	Antal etager	Bagmur og skillevægge
1850-1930	72+72 m ²	2	tung
1931-1950	94+60 m ²	2	tung
1951-1960	106,0 m ²	1	tung
1961-1972	180,1 m ²	1	let
1973-1978	137,3 m ²	1	let
1979-1998	143,1 m ²	1	let

For bygninger opført efter bygningsreglementet gældende fra 1998 og senere vil der som nævnt ikke blive gennemført simuleringer.

For alle simuleringer er det danske standard-vejrdataåret DRY benyttet som udeklimareferenc. For det enkelte arketype-hus er der valgt et boligareal, et antal etager og konstruktions typer, der er repræsentative for perioden.

Der gennemføres således 3 simuleringer af hver arketype:

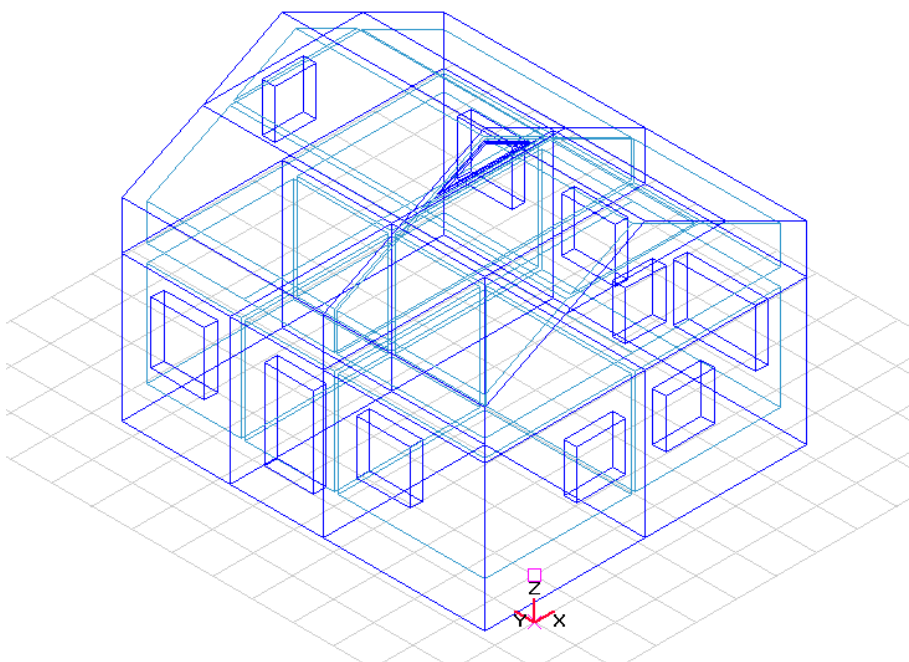
1. Konstant indetemperatur på 22 °C (typisk termostatstyringen i mange huse),
2. Sænkning af temperaturen for opvarmningen under morgen- og aftenspidslast mod 20 °C (time 7-8 (kl. 06:00-07:59) og time 18-20 (kl. 17:00-19:59),
3. Forvarmning, dvs. ekstra "opladning" af husets termiske lager (masse) med start 1 time før spidslast op til en rumtemperatur på 23 °C og derefter sænkning af temperaturen tilbage mod 20 °C under spidslast.

I tre arketyper er 2 timers forvarmning inden spidslastperioderne yderligere analyseret med henblik på at reducere antallet af timer, hvor opvarmning til 20 °C er nødvendig under spidslast.

Bidraget til opvarmningen af husene fra udstyr (belysning, madlavning, mv.) er antaget størst i spidslastperioderne. Dette modvirker i nogen grad afkølingen af husene som følge af det sænkede set-punkt for opvarmning i disse perioder. Det samlede effektoptag fra apparater og udstyr svarer til gennemsnittet for et dansk parcelhus (3650 kWh pr år¹).

Der regnes med, at vinduerne i alle tilfælde har en U-værdi, der svarer til et traditionelt 2-lags termovindue, dvs. et vindue med en samlet U-værdi på lige under 3 W/m²K. Der vil naturligvis forekomme huse i alle aldersklasser, som har vinduer, der er markant bedre (udskiftet på et senere tidspunkt), men også nogle som er dårligere (endnu ikke udskiftet). Det lægges med andre ord til grund, at det i gennemsnit for bygningsbestanden gælder, at vinduer har en U-værdi på ca. 3 W/m²K.

Arketype 1850-1930



Figur 31. BSim-model af arketype 1850-1930.

Dette hus har ved en konstant indetemperatur på 22 °C et årligt netto opvarmningsbehov på 17.161 kWh og et maksimalt effektbehov på 6,4 kW. Ved sænkning af temperaturen til 20 °C under alle spidslast-perioder (hver dag, hele året) falder det årlige opvarmningsbehov til 16.837 kWh. Til gengæld stiger det maksimale effektbehov til 7,6 kW på grund af den efterfølgende genopvarmning. Med forvarmning af huset til 23 °C fra én time før spidslast, øges det årlige opvarmningsbehov til 17.003 kWh og maksimale effektbehov til 8,2 kW. Se tabel 10.

¹ Typisk elforbrug i 100 m² parcelhus med 2 voksne og 1 barn jf. <https://sparenergi.dk/forbruger/el/dit-elforbrug>.

Tabel 10. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur (22 °C), sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22 °C	17.161	6,4
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	16.845	7,5
Forvarmning og sænket temperatur for opvarmning under spidslast	17.003	8,2

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er opvarmningsbehovet som angivet i tabel 11. Heraf fremgår det tydeligt, at reduktionen i opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over hele året (tabel 10). For den aktuelle arketype er det således muligt at flytte 44 % (1460 kWh) af det årlige opvarmningsbehov væk fra spidslastperioderne.

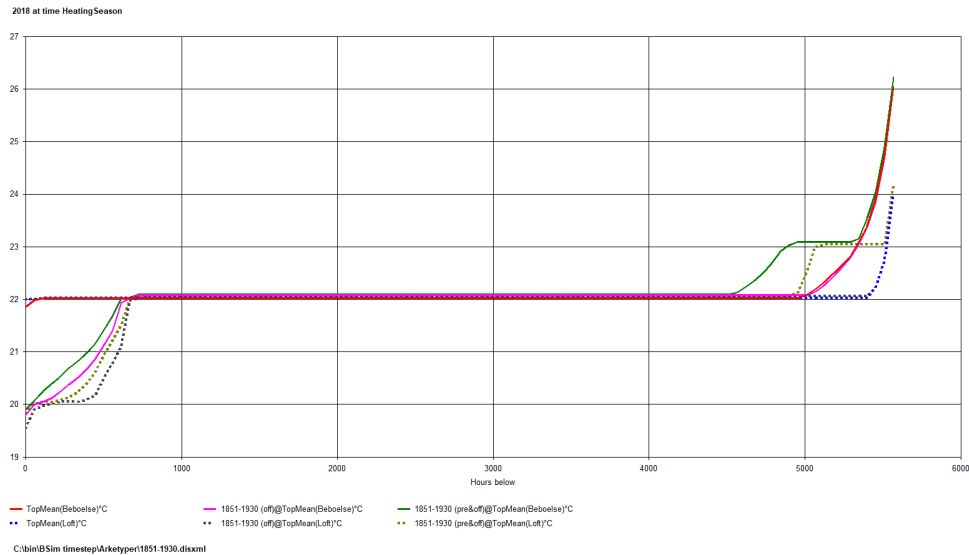
Tabel 11. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22°C	3.292	
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	2.126	35 %
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1.832	44 %

I tidsrummet under spidslast er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) med en faktor 3, resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 32, stiger antallet af timer med en indetemperatur under 20 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer falder mest på 1. sal (stiplede linjer), hvor der ikke er et ekstra tilskud af varme fra apparater (køkken er placeret i stueetagen). Bemærk, at antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C ikke falder markant ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne. Se tabel 12.

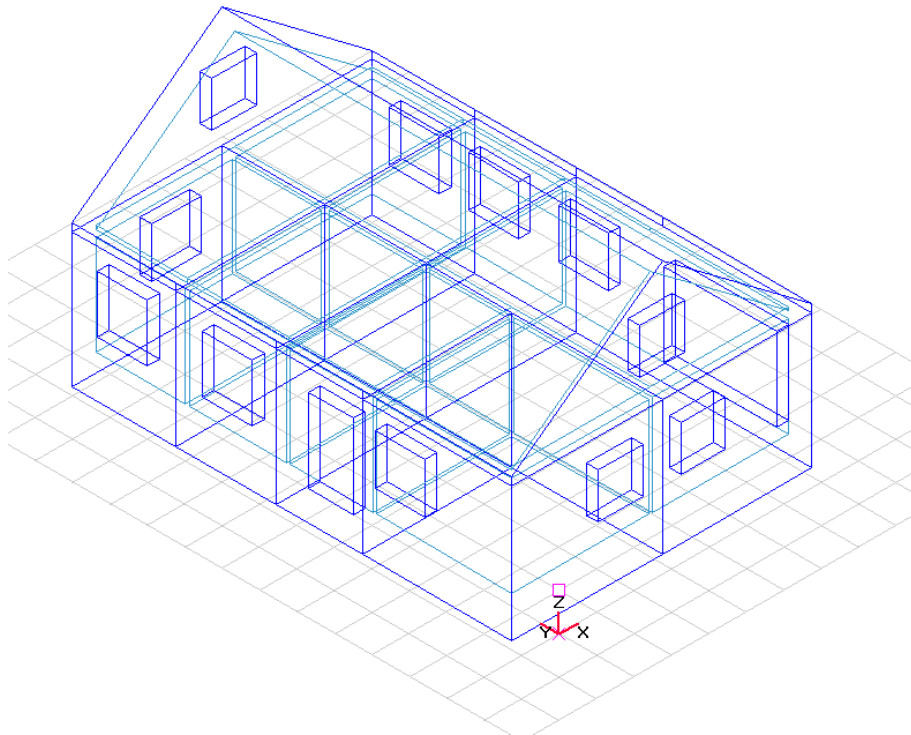
Tabel 12. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 3 styringsstrategier.

Antal timer < 22°C	Stue	1. sal
Konstant indetemperatur, 22 °C	31	0
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	640	669
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	622	666



Figur 32. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) i henholdsvis stueetagen (fuldt optrukne linjer) og på 1. sal (stiplede linjer) opgjort i opvarmningssæsonen.

Arketype 1931-1950



Figur 33. BSim-model af arketype 1931-1950.

For et gennemsnitshus opført i perioden 1931-1950 viser en simulering, at der ved konstant indetemperatur på 22 °C er et årligt opvarmingsbehov på 21.181 kWh og et maksimalt effektbehov på 9,2 kW. Ved ændring af opvarmningen til 20 °C i perioder med spidslast falder det årlige opvarmingsbehov til 20.646 kWh. Samtidig stiger det maksimale effektbehov til 11,2 kW som følge af behovet for genopvarmning. Med forvarmning af huset til 23 °C én time før alle spidslastperioder øges det årlige opvarmingsbehov til 20.823 kWh og det maksimale effektbehov til 12,2 kW. Se tabel 13.

Tabel 13. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur, sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22 °C	21 181	9,2
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	20 646	11,2
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	20 823	12,2

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er opvarmningsbehovet som angivet i tabel 14. Det fremgår tydeligt, at reduktionen i opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over hele året (tabel 13). For den aktuelle arketype er det således muligt at flytte 88 % (3.797 kWh) af opvarmningsbehovet væk fra spidslastperioder.

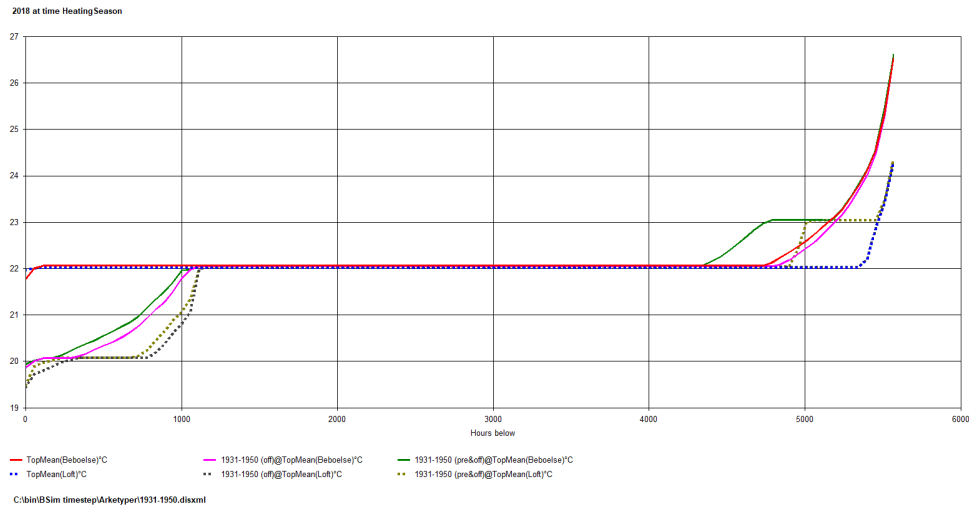
Tabel 14. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22°C	4 326	-
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	706	84
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	529	88

I tidsrummet under spidslast er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) på en faktor 3 resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 34, stiger antallet af timer med en indetemperatur på under 20 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer falder mest på 1. sal (stiplede linjer), hvor der ikke er et ekstra tilskud af varme fra apparater (køkkenet er placeret i stueetagen). Antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C falder ikke markant ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne, hvor set-punktet for indetemperaturen sænkes til 20 °C. Se tabel 15.

Tabel 15. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 3 styringsstrategier.

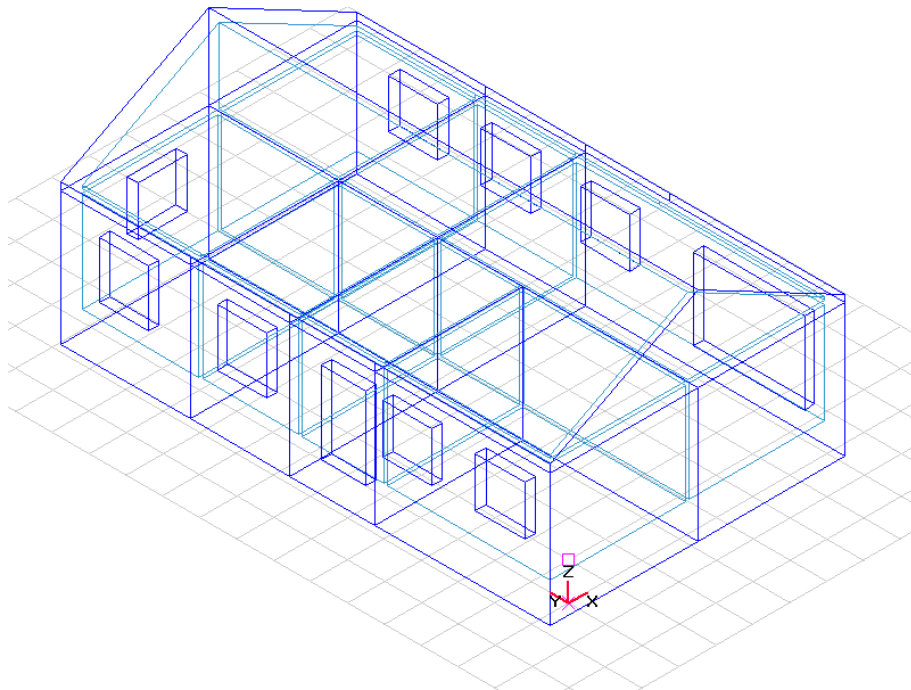
Antal timer < 22 °C	Stue	1. sal
Konstant indetemperatur, 22°C	30	3
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	1262	1129
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1150	1116



Figur 34. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) på stueetagen (fuldt optrukne linjer) hhv. 1. sal (stiplede linjer) i opvarmingsæsonen.

Arketype 1951-1960

For et hus tilhørende denne arketype er der alene beboelse i én etage, og bidraget fra husets udstyr bliver således ikke fordelt på 2 zoner. Dette kompenserer i en vis udstrækning for den simulerede temperatursænkning under spidslast.



Figur 35. BSim-model af arketype 1951-1960.

Der er et årligt opvarmingsbehov ved konstant indetemperatur på 13.861 kWh og et maksimalt effektbehov på 6,4 kW. Ved ændring af opvarmningen til 20 °C under spidslast reduceres det årlige opvarmingsbehov til 13.486 kWh, men samtidig stiger det maksimale effektbehov til 8,1 kW på grund af genopvarmningen. Med forvarmning af huset til 23 °C én time før spidslast er det årlige opvarmingsbehov 13.614 kWh og det maksimale effektbehov 8,5 kW. Se tabel 16.

Tabel 16. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur, sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22°C	13 861	6,4
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	13 489	8,1
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	13 614	8,5

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er opvarmningsbehovet som angivet i tabel 17. Heraf fremgår det tydeligt, at reduktionen i det årlige opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over hele året (tabel 16). Det er således muligt for denne arketype at flytte op til 95 % (2.554 kWh) af det årlige opvarmningsbehov væk fra spidslastperioderne.

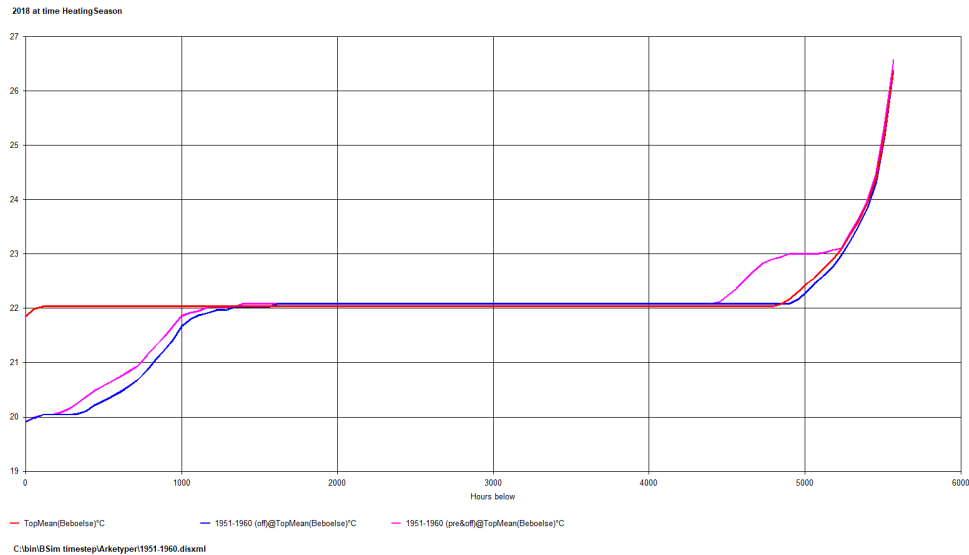
Tabel 17. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22°C	2 684	-
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	255	90
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	130	95

Under spidslasttiden er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) på en faktor 3, resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 36, stiger antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C falder ikke markant (tabel 18) ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne hvor set-punktet for indetemperaturen sænkes til 20 °C.

Tabel 18. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 3 styringsstrategier.

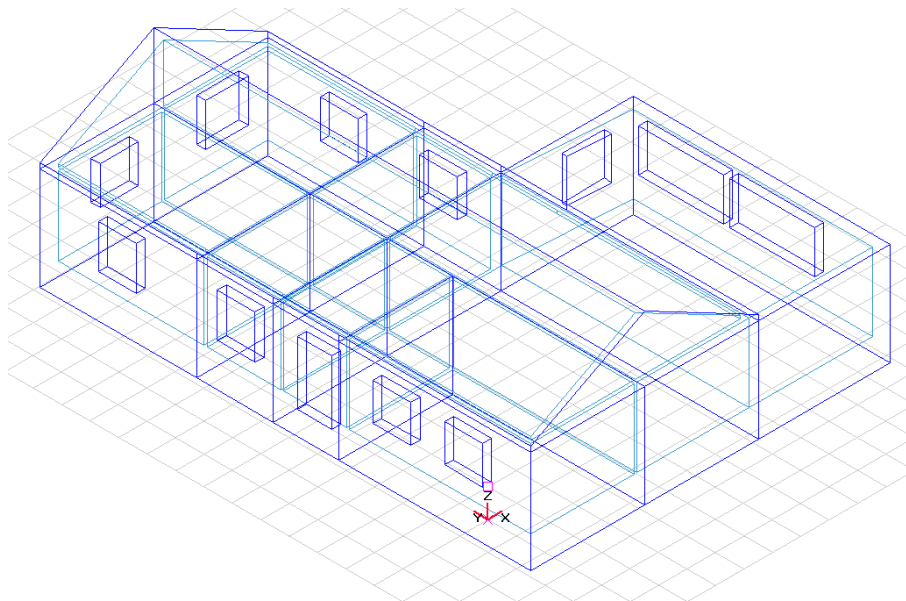
Anal timer < 22°C	Beboelse
Konstant indetemperatur, 22°C	29
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	1580
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1399



Figur 36. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) i opvarmningssæsonen for de 3 scenarier.

Arketype 1961-1972

I denne arketype er der alene beboelse i én etage, og bidraget fra husets udstyr bliver således ikke fordelt på 2 zoner. Dette kompenserer i en vis udstrækning for sænkningen af indetemperaturen under spidslast. Til gengæld er huset det største af de 6 arketyper, og den interne belastning fra udstyr skal derfor fordeles på det største areal.



Figur 37. BSim-model af arketype 1961-1972.

Der er et årligt opvarmingsbehov ved konstant indetemperatur på 26.729 kWh og et maksimalt effektbehov på 10,7 kW. Ved at afbryde opvarmningen og tillade en sænkning mod 20 °C under spidslast falder det årlige opvarmingsbehov til 26.140 kWh men samtidig stiger det maksimale effektbehov til 14,4 kW på grund af genopvarmningen. Med forvarmning af huset til 23 °C én time før spidslast er det årlige opvarmingsbehov 26.322 kWh og det maksimale effektbehov 14,4 kW. Se tabel 19.

Tabel 19. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur, sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22 °C	26 729	10,7
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	26 140	14,4
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	26 322	14,4
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	26 633	14,4

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er det årlige opvarmningsbehov som angivet i tabel 20. Heraf fremgår det tydeligt, at reduktionen i opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over hele året (tabel 19). Det er således muligt for denne arketype at flytte op til 99 % (5.480 kWh) af det årlige opvarmningsbehov væk fra spidslastperioderne.

Tabel 20. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22 °C	5 514	-
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	86	98
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	34	99
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	34	99

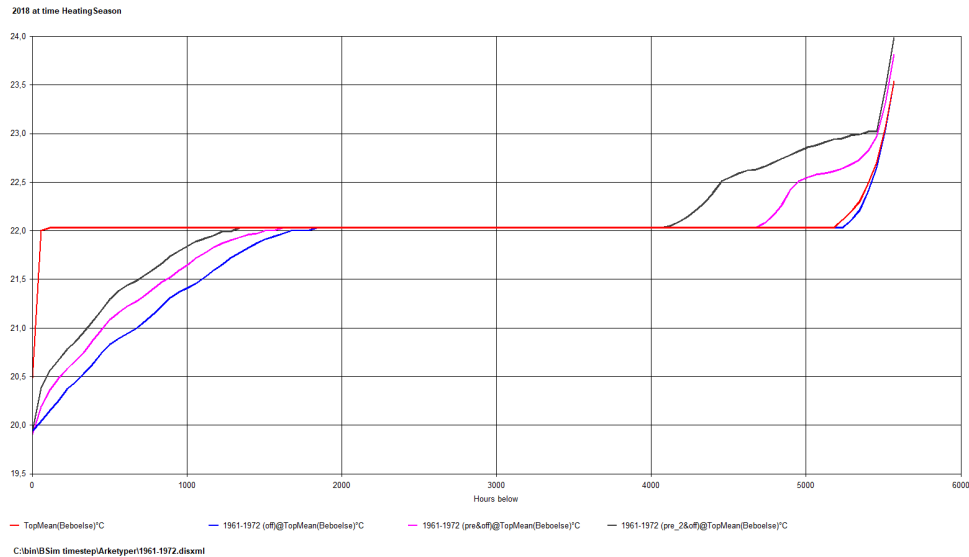
Under spidslasttiden er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) på en faktor 3 resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 38, stiger antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C falder ikke markant (tabel 21) ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne, hvor set-punktet for indetemperaturen sænkes til 20 °C.

Selv med 1 times forvarmning af huset inden sænkning af set-punktet i spidslastperioderne bliver antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C meget højt. Indflydelsen af to timers forvarmning af huset er derfor undersøgt for denne arketype med henblik på at vurdere effekten af en større opladning af husets termiske lager. Det viser sig, at dette har meget lille effekt på opvarmningsbehov og effektbehov (tabel 19 og tabel 20), men stor indflydelse på antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C (tabel 21).

Tabel 21. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 3 styringsstrategier.

Antal timer < 22 °C	Beboelse
Konstant indetemperatur, 22 °C	190
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	3.508
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	3.058
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1 904

Selv med styring efter en konstant indetemperatur på 22 °C er der nogle få timer i løbet af fyringssæsonen, hvor en indetemperatur på 22 °C ikke kan opretholdes (figur 38).

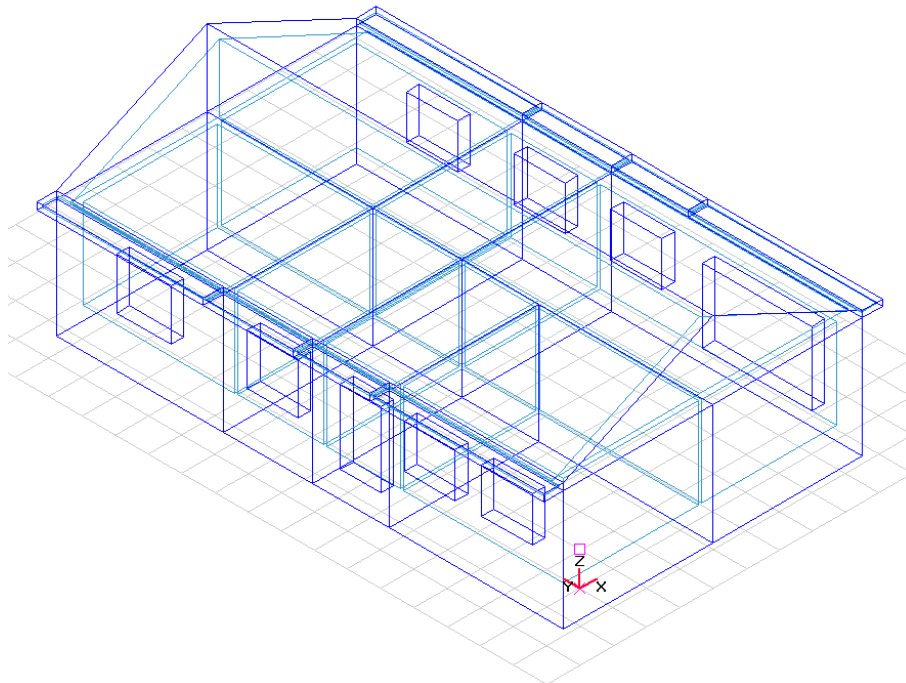


Figur 38. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) i opvarmningssæsonen for de 4 scenarier: konstant indetemperatur, sænket indetemperatur under spidslast samt 1 hhv. 2 timers forvarmning af huset til 23°C inden sænkning af indetemperaturen under spidslastperioderne.

Arketype 1973-1978

For det typiske hus tilhørende denne arketype er det opvarmede boligareal blevet mindre end den foregående type, men også bedre isoleret. Derfor er den absolutte mulighed for at flytte energibehov over tid reduceret i forhold til de tidligere arketyper.

Denne arketype viser mange timer med en indetemperatur under 22 °C, hvorfor den, ligesom den foregående arketype, er analyseret for både en og to timers forvarmning af husets konstruktioner.



Figur 39. BSim-model af arketype 1973-1978.

Der er et opvarmingsbehov ved konstant indetemperatur på 14810 kWh og et effektbehov på 6,8 kW. Ved at afbryde opvarmningen og tillade en sænkning af temperaturen mod 20 °C under spidslast falder det årlige opvarmingsbehov til 14404 kWh, men samtidig stiger det maksimale effektbehov til 8,5 kW på grund af genopvarmningen. Med forvarmning af huset

til 23 °C én time før spidslast er det årlige opvarmningsbehov 14534 kWh og det maksimale effektbehov 9,0 kW. To timers forvarmning af husets konstruktioner har ikke meget effekt på det samlede årlige opvarmningsbehov eller det maksimale effektoptag, som nu bliver 14659 kWh hhv. 9,0 kW (tabel 22).

Tabel 22. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur, sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22 °C	14 810	6.8
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	14 404	8.5
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	14 534	9.0
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	14 659	9.0

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er det årlige opvarmningsbehov som angivet i tabel 23. Heraf fremgår tydeligt, at reduktionen i årligt opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over helt året (tabel 22). Det er således muligt for den denne arketype at flytte op til 96 % (2.798 kWh) af opvarmningsbehovet væk fra spidslastperioderne.

Tabel 23. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

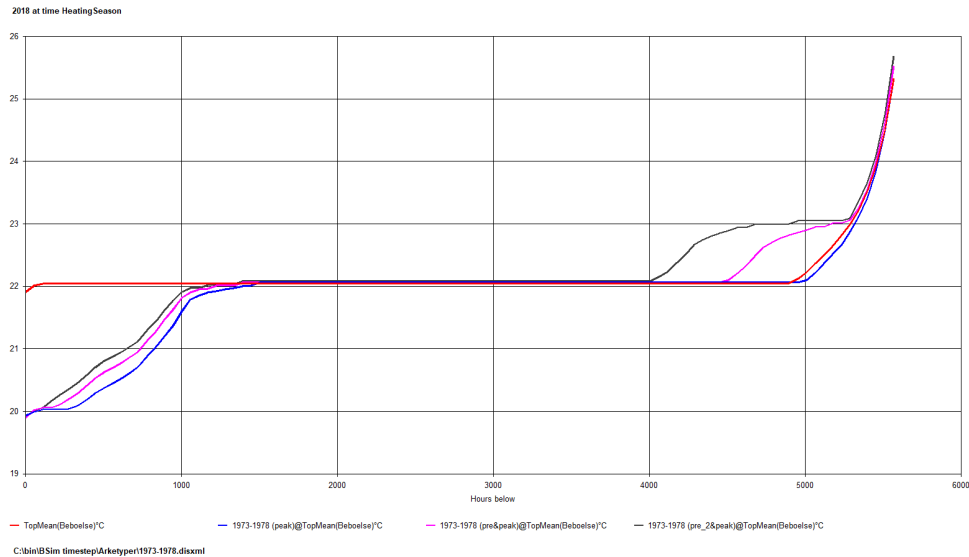
	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22 °C	2 911	-
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	228	92
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	113	96
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	113	96

Under spidslasttiden er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) på en faktor 3 resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 40, stiger antallet af timer med en indetemperatur på under 22 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C falder ikke markant (tabel 24) ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne, hvor set-punktet for indetemperaturen sænkes til 20 °C.

Selv med 1 times forvarmning af huset inden sænkning af set-punktet i spidslastperioderne bliver antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C meget højt. Indflydelsen af to timers forvarmning af huset er derfor undersøgt for denne arketype med henblik på at vurdere effekten af en større grad af opladning af husets termiske lager. Det viser sig, at dette har meget lille effekt på opvarmningsbehov og effektbehov (tabel 22 og tabel 23), men nogen indflydelse på antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C (tabel 24). Den relativt mindre indflydelse af 2 timers forvarmning i denne arketype i forhold til den foregående skyldes primært den mindre kapacitet af varmeanlægget, som igen bunder i den bedre isoleringsevne af huset.

Tabel 24. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 4 styringsstrategier.

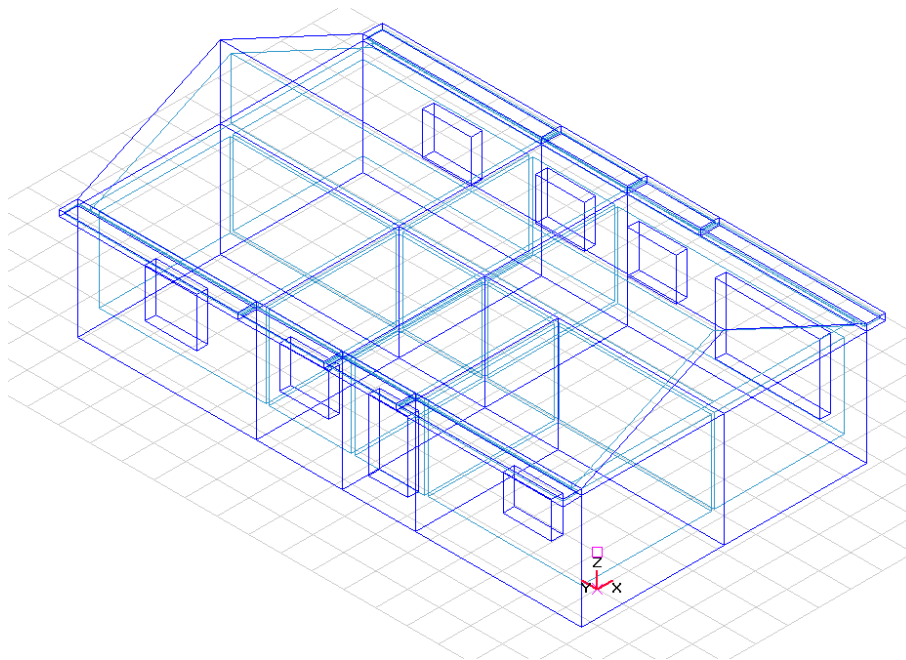
Antal timer < 22 °C	Beboelse
Konstant indetemperatur, 22 °C	34
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	1.548
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1.388
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1.289



Figur 40. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) i opvarmningssæsonen for de 4 scenarier: konstant indetemperatur, sænket indetemperatur under spidslast samt 1 hhv. 2 timers forvarmning af huset til 23°C inden sænkning af indetemperaturen under spidslastperioderne.

Arketype 1979-1998

For denne arketype gælder, at den generelle isoleringsstandard er steget og varmeanlægget sat ned i størrelse, da der ikke er behov for så stor kapacitet til at holde en konstant indetemperatur. Derfor er denne arketype ligeledes analyseret for to timers forvarmning.



Figur 41. BSim-model af arketype 1979-1998.

Der er et opvarmingsbehov ved konstant indetemperatur på 5184 kWh og et effektbehov på 5,9 kW. Ved ændring af opvarmningen til 20 °C under spidslast falder det årlige opvarmingsbehov til 5044 kWh, men samtidig stiger det maksimale effektbehov til 8,0 kW på grund af genopvarmningen. Med forvarmning af huset til 23 °C én time før spidslast er det årlige opvarmingsbehov 5100 kWh og det maksimale effektbehov 7,8 kW. To timers forvarmning af husets konstruktioner har ikke meget effekt på det samlede årlige opvarmingsbehov eller det maksimale effektoptag, som bliver 5151 kWh hhv. 7,8 kW (tabel 25).

Tabel 25. Årligt opvarmningsbehov og maksimalt effektbehov ved konstant temperatur, sænket temperatur (20 °C) under spidslast hhv. forvarmning (23 °C) og sænket temperatur (20 °C) under spidslast.

	Opv. behov kWh	Max. effekt kW
Konstant indetemperatur, 22 °C	5 184	5,9
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	5 044	8,0
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	5 100	7,8
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	5 151	7,8

Summeres der alene over de timer, som ligger i spidsbelastningen, er det årlige opvarmningsbehov som angivet i tabel 26. Heraf fremgår tydeligt, at reduktionen i det årlige opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne er markant højere, end hvis der summeres over helt året (tabel 25). For denne arketype er det er således muligt at flytte op til 99 % (1.467 kWh) af det årlige opvarmningsbehov væk i spidslastperioderne.

Tabel 26. Opvarmningsbehov inden for spidslastperioderne.

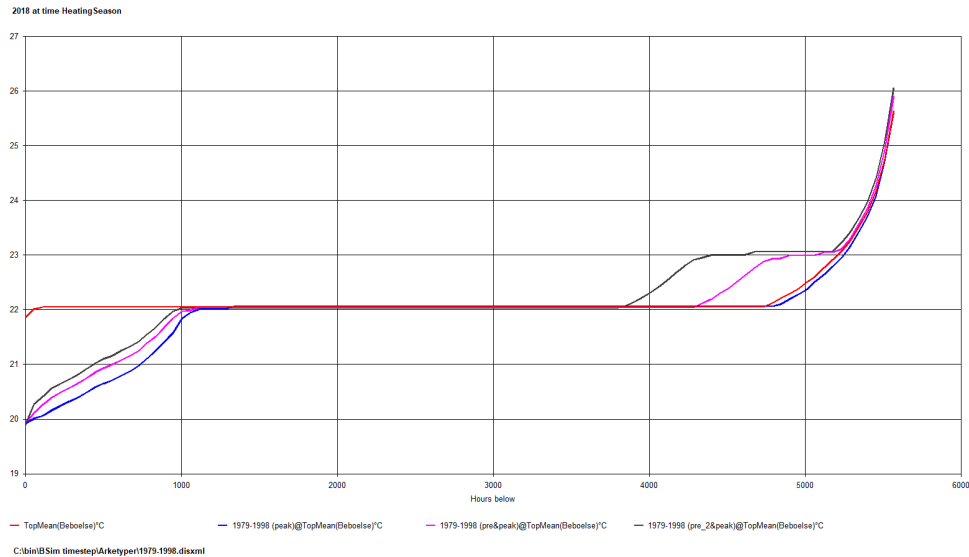
	Opv. behov kWh	Reduktion %
Konstant indetemperatur, 22 °C	1 473	-
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	27	98
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	6	99
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	6	99

Under spidslasttiden er set-punktet for indetemperaturen sat til 20 °C, hvilket på trods af en stigning i effektoptaget i apparater (fx komfur) på en faktor 3 resulterer i et fald i indetemperaturen. Som det fremgår af figur 42, stiger antallet af timer med en indetemperatur på under 22 °C, når set-punktet for indetemperaturen sættes ned i spidslastperioderne morgen og aften. Antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C falder ikke markant (tabel 27) ved forvarmning af huset til 23 °C én time forud for spidslastperioderne, hvor set-punktet for indetemperaturen sænkes til 20 °C.

Selv med 1 times forvarmning af huset inden sænkning af set-punktet i spidslastperioderne bliver antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C meget højt. Indflydelsen af to timers forvarmning af huset er derfor undersøgt for denne arketype med henblik på at vurdere effekten af en større grad af opladning af husets termiske lager. Det viser sig, at dette har meget lille effekt på opvarmningsbehov og effektbehov (tabel 25 og tabel 26), men nogen indflydelse på antallet af timer med en indetemperatur under 22 °C (tabel 27). Den relativt mindre indflydelse af 2 timers forvarmning i denne arketype i forhold til den foregående skyldes primært den mindre kapacitet af varmeanlægget, som igen hænger sammen den bedre isoleringsevne af huset.

Tabel 27. Antal timer med en indetemperatur under 22 °C for de 4 styringsstrategier.

Timer < 22 °C	Beboelse
Konstant indetemperatur, 22 °C	34
Sænket temperatur for opvarmning under spidslast	1.548
Forvarmning 1 time før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1.388
Forvarmning 2 timer før spidslast og sænket temperatur under spidslast	1.289



Figur 42. Fordeling af indetemperaturen (sorteret i stigende orden) i opvarmningssæsonen for de 4 scenarier: konstant indetemperatur, sænket indetemperatur under spidslast samt 1 hhv. 2 timers forvarmning af huset til 23°C inden sænkning af indetemperaturen under spidslastperioderne.

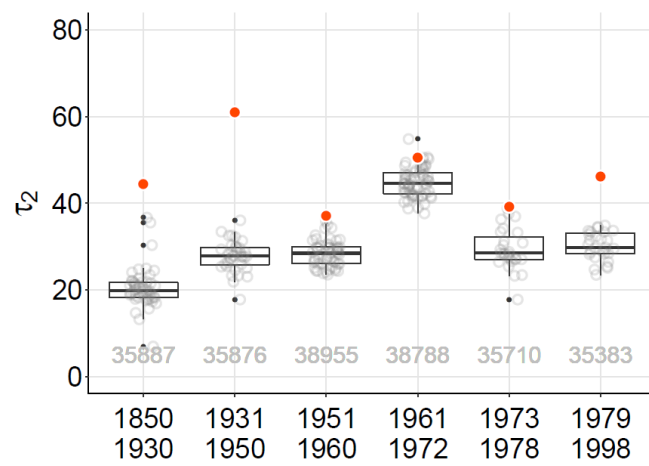
Sammenfatning fra simuleringer

Der er muligt at flytte endog meget store andele (44-99 %) af det årlige opvarmingsbehov i spidslastperioderne væk fra disse perioder (tabel 28), uden at indetemperaturen falder til et uacceptabelt niveau. Dette gælder alle arketyper. Hvis arketyperne antages opvarmet med varmepumpe med en gennemsnitlig COP på 3, svarer flytningen til et samlet elforbrug på mellem 485 og 1825 kWh, eller op til ca. 50 % af elforbruget i et varmepumpeopvarmet hus, der ikke er opvarmet med varmepumpe. I tabel 28 ses, hvor store reduktioner et hus, inden for de enkelte arketyper, kan bidrage med.

Tabel 28. Energibehov i de seks arketyper ved fire forskellige reguleringsstrategier for varmeforsyningen.

Arketype	Konst. 22 °C kWh	Forvarmning og 20 °C v. spidslast		Forvarmning i 2 timer og 20 °C v. spidslast		Relativ reduktion %
		20 °C v. spidslast kWh	kWh	kWh	kWh	
1850-1930	3.292	2.126	1.832	na	1.460	44,3
1931-1950	4.326	706	529	na	3.797	87,8
1951-1960	2.684	255	130	na	2.554	95,2
1961-1972	5.514	86	34	34	5.480	99,4
1973-1978	2.911	228	113	113	2.798	96,1
1979-1998	1.473	27	6	6	1.467	99,6

Figur 43 viser de beregnede tidskonstanter baseret på målingerne af temperaturfaldet under natsænkning i Middelfarthusene samt simulering af arketyperne. For de fleste arketyper vedkommende er der god sammenhæng til de tidskonstanter der er fundet ud fra måleresultaterne. For de ældre arketyper vedkommende er tidskonstanten længere for arketyperne, hvilket kan skyldes en overvurdering af husenes lufttæthed samt, at den termiske masse kan være delvist inaktiveret på grund af tæpper og møbler.



Figur 43. Tidkonstanter udregnet dels på grundlag af aktuelle temperaturlogninger, dels på grundlag af simuleringer (røde markeringer).



**POTENTIAL ET FOR
SAMLET
VARMELAGER I
DANSKE
PARCELHUSE**

POTENTIALT FOR SAMLET VARMELAGER I DANSKE PARCELHUSE

Med udgangspunkt i de gennemførte simuleringer og dermed de udførte beregninger af varmebehov for udbredte parcelhustyper i Danmark har det været muligt at foretage en samlet vurdering af potentialet for energilagring i den danske bygningsmasse og videre at se på hvilke indgreb i form af efterisolering, tætning og forøget masse, der i et lagringsperspektiv er de mest lovende for de enkelte bygningstyper.

Varmelager i danske huse

Hvis det antages, at alle parcelhuse placeret uden for fjernvarmeområder i fremtiden bliver opvarmet via en varmepumpe, kan den samlede fleksibilitet for alle danske huse af denne type estimeres. Det forudsættes, at den gennemsnitlige COP for varmepumpen er 3 og arketypernes beregnede fleksibilitet ved sænkning af indetemperaturen til 20 °C under spidslast og forvarmning til 23 °C en time før spidslastperioderne er normgivende. I tabel 29 vises en opskalering af fleksibiliteten i arketyperne svarende til de arketype-huse, der pt. er placeret uden for fjernvarmeområderne eller ikke allerede er forsynet med fjernvarme².

Tabel 29. Opskalering af årlig fleksibilitet fra arketyper til parcelhuse, der ikke er forsynet med fjernvarme og dermed potentielt kunne opvarmes via en varmepumpe (COP=3) og dermed bidrage med fleksibilitet i el-nettet.

	Fleksibilitet pr. hus kWh	Enheder i BBR ²⁾ -	Samlet fleksibilitet GWh
1850-1930	487	110.596	53,82
1931-1950	1266	68.739	87,00
1951-1960	851	50.356	42,87
1961-1972	1827	142.275	259,89
1973-1978	933	73.940	68,96
1979-1998	489	65.402	31,98
I alt			544,53

² Kilde: www.statistikbanken.dk

The background of the page is a white canvas with a pattern of thin, dark blue, wavy lines. These lines are arranged in a way that creates a sense of movement and depth, resembling a stylized topographical map or a series of concentric, undulating waves. The lines are most prominent in the corners and along the sides, framing the central text.

ØGET FLEKSIBILITET

ØGET FLEKSIBILITET

For at undersøge effekten af diverse indgreb såsom efterisolering, tætning og brug af flere tunge materialer for bygningernes egenskaber som varmelager er der foretaget en række simuleringer inden for hver arketype, som skal vise, hvilken effekt et givet indgreb har på bygninger tilhørende de forskellige byggetyper, og som dermed er relevant for de enkelte arketyper af bygninger. Når det gælder effekten af flere tunge materialer, er der foretaget simuleringer, der dels viser effekten af flere tunge byggematerialer (gulvvarme, tunge inder-vægge og masseovn), dels viser effekten af en forøgelse af varmtvandsbeholderen. Effekten af diverse indgreb såsom efterisolering, tætning og brug flere tunge materialer for bygningernes egenskaber som varmelager er vurderet i det følgende.

Ekstra isolering

Efterisolering af eksisterende bygninger vil forlænge tidskonstanten for bygningen, men det er ikke ligegyldigt for fleksibiliteten, om isoleringen er placeret indvendigt eller udvendigt i forhold til den termiske masse. Efterisolering mindsker varmetabet fra bygningen og forøger dermed hvor lang tid, der går, inden indetemperaturen falder til et uacceptabelt niveau, og dette uanset om efterisoleringen er placeret indvendigt eller udvendigt. En indvendig efterisolering vil dog samtidig isolere den termiske masse i fx ydervæggene fra at kunne optage og afgive varme i forbindelse med temperaturvariationer i bygningen, hvorfor der kræves større variationer af indetemperaturen eller længerevarende ændringer for at kunne udnytte den lagrede energi i konstruktionerne. Samtidig vil en indvendig efterisolering gøre, at varmetabet fra den termiske masse i større omfang vil få retning ud af bygningen og vil dermed i mindre grad kunne medvirke til genopvarmning af bygningen.

Indvendig efterisolering flytter eksisterende bygninger i retning af moderne bygninger, som har et lille varmetab, og en lille varmekapacitet på grund af lette indvendige konstruktioner. Så godt nok har de en lang tidskonstant og kan dermed klare sig uden varme i længere tid, men samtidig kan de kun tilbyde en mindre effekt i form af fleksibilitet i forsyningsnettet.

Samlet set har en bygnings isolering stor betydning for bygningens mulighed for at tilbyde fleksibilitet til forsyningsnettet. Jo bedre isolering, jo større tidskonstant og jo længere er temperaturen om at falde, når varmetilførslen afbrydes. Men direkte forbindelse mellem indeluften og bygningens termiske masse er ikke desto mindre afgørende for bygningens mulighed for at kunne tilbyde ekstra fleksibilitet til forsyningsnettet. Derfor kan udvendig isolering både levere varmebesparelse og ekstra fleksibilitet, mens indvendig isolering kun kan levere varmebesparelse og i mindre grad fleksibilitet.

Tætning

Tætning af en eksisterende bygning i forbindelse med renovering, som fx udskiftning af vinduer, vil medvirke til at forøge den tid, som bygningen kan klare sig uden varme. Tætning af bygningen sker ofte i forbindelse med efterisolering, og der gælder derfor de samme bemærkninger som ved efterisolering.

Det er i denne forbindelse vigtigt at understrege, at tætning ikke må kompromittere luftskiftet og dermed kvaliteten af indeklimaet i bygningen. Der skal altid sikres et tilstrækkeligt luftskifte for at opretholde et godt indeklima og for at undgå fugtskader.

Etablering af mekanisk ventilation med varmegenvinding er, i forbindelse med tætning af bygningen, en effektiv metode til på en gang at sikre et godt indeklima og samtidig øge tidskonstanten for bygningen.

Samlet set har tætheden af en bygning stor betydning for en bygningens fleksibilitet, da en tæt bygning både har en længere korte og lang tidskonstant end en utæt bygning. Den korte tidskonstant øges, fordi det ikke "blæser" ind i et tæt hus. Den lange tidskonstant øges, fordi den varme, der måtte ligge lagt i tunge vægge, bevares i længere tid, når bygningen ikke er utæt. I alle tilfælde er det vigtigt, at man ved tætning af et hus sikrer et godt indeklima ved at installere et fornødent antal udeluftventiler mv., eller bedre, installerer mekanisk ventilation med varmegenvinding, da man på den måde yderligere øger både den korte og den lange tidskonstant og dermed bliver i stand til at øge bygningens fleksibilitet yderligere.

Flere tunge materialer

Tilføjelse af flere tunge byggematerialer, der er eksponeret for indetemperaturen, giver en mulighed for at øge den termiske masse af en bygning. Det er ikke en enkel opgave at tilføje tunge byggematerialer i en allerede eksisterende bygning, men ønsket om gulvvarme i renoverede huse er en af de mest oplagte muligheder. For at kunne udnytte denne fleksibilitet kræver det, naturligvis, at gulvarmen styres, så der slukkes i perioder med spidslast i forsyningsnettet. Forvarmning af tunge gulve er ret let med gulvvarme, idet varmen afsættes direkte i konstruktionen, og dermed kan en større tykkelse af materialet i gulvet aktiveres til varmelagring.

I forbindelse med nybyggeri kan det, af hensyn til den fleksibilitet, bygningerne kan tilbyde forsyningsnettet, være en fordel at benytte tunge materialer i indvendige vægge, inder siden af ydervæggene og gulvet. Dette vil samtidig gøre nye bygninger med tunge materialer mindre påvirkelige af problemer med overhedning om sommeren, idet de tunge materialer er medvirkende til at reducere indetemperaturen om sommeren. I øjeblikket er det problematikken omkring overhedning, der er det eneste incitament til at benytte tunge byggematerialer i nye bygninger. Økonomisk er det billigere at bygge med lette materialer. På sigt vil muligheden for at tilbyde fleksibilitet til energinettet måske kunne bidrage til at ændre dette forhold med en lavere udgift til klimatisering af bygningerne, som dermed kan indhente den øgede byggeudgift.

Flere tunge materialer inden for isoleringen i klimaskærmen øger ikke i sig selv bygningens isoleringsevne. Blot øges den lange tidskonstant, da tunge materialer med høj termisk masse vil lagre mere varme og dermed øge fleksibiliteten. Dertil kommer, at der takket være den større termiske masse kan gemmes mere varme og dermed mere energi over tid, hvorved fleksibiliteten vil kunne øges yderligere i et smart-grid.

Forøgelse af varmtvandsbeholder

De fleste huse er allerede forsynet med en beholder til varmt brugsvand. Denne kan imidlertid sammen med en ny bufferbeholder udnyttes til at forøge husets tidskonstant. Hvis en sådan beholder kan drænes for varme i perioder, hvor der er mangel på energi med lav CO₂-belastning i nettet, kan huset undlade eller reducere optaget af varme fra nettet i disse perioder. Kan disse perioder forudsiges, kan tanken oplades (opvarmes til en højere temperatur end normalt) på forhånd, og dermed kan perioden med afbrudt energioptag fra nettet forøges yderligere.

Uanset hvad, så vil styring af den eksisterende beholder til varmt brugsvand, så der ikke varmes vand under spidslast, med mindre beholderen er ved at være tømt for varmt vand, være hensigtsmæssig i forhold til flytning af energiforbrug væk fra perioder med spidslast.

En simpel udregning med en 10 °C temperaturændring af en lille 120 liters vandbeholder viser, at energiindholdet er ca. 1,37 kWh. Sammenholdes dette med muligheden for bare en daglig udnyttelse af lagertankens kapacitet, så er den årlige lagerkapacitet 500 kWh. Dette

svare til 10% af det årlige energibehov i arketypehuset fra perioden 1961-1972 inden for spidslastperioderne. En større beholder vil naturligvis forøge kapaciteten tilsvarende, dog vil varmetabet fra en større beholder også stige.

Samlet set giver det god mening at øge volumen af varmtvandsbeholderen, dvs. at etablere en egentlig buffertank. Det øger den lange tidskonstant, og dermed øges husets fleksibilitet. Med andre ord kan en ekstra varmebeholder udnyttes som buffer til et varmeanlæg og/eller en varmepumpe.

The background of the page is a white space filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines. These lines are arranged in concentric, curved bands that create a sense of movement and depth, resembling a stylized topographical map or a series of ripples. The lines are most dense in the upper and lower portions of the page, framing the central text.

SAMMENFATNING OG KONKLUSION

SAMMENFATNING OG KONKLUSION

I denne rapport er det blevet undersøgt, om danske enfamiliehuse kan fungere som energilager i et smart-grid og i givet fald hvor stort et lager, der er tale om, og dermed hvor meget fleksibilitet disse huse kan bidrage med i forsyningsnettet. Det er sket ved dels at se nærmere på en et stort antal enfamiliehuses afkølingskurver. Det er afkølingskurver, som stammer fra et forsøg (SEIH) med natsækning i enfamiliehuse i Middelfart Kommune. Forsøget fandt sted i årene 2013-15. Og dels ved dynamisk simulering af arketypehuse, som er repræsentative for danske enfamiliehuse opført i forskellige byggeperioder.

Ideen med at undersøge, om almindelige danske enfamiliehuse kunne fungere som varmelager i et smart-grid, opstod i forbindelse med afrapporteringen af SEIH-projektet. Her viste det sig nemlig, at der var meget mindre energi at spare ved at sænke de enkelte huses temperatur om natten, end det på forhånd var ventet. En analyse af den "hastighed", hvor med husene kølede om natten, viste, at de fleste huse tabte mindre end en halv grad i timen, selv om vinteren med stor forskel mellem inde- og udetemperatur. Dette betød, at der på årsbasis kun kunne opnås besparelser på mellem 3 og 9 % og i de fleste tilfælde mindre end 5 %.

Dette resultat var en klar indikation på, at husene over en bred kam fungerede som gode "termokander", og tanken indfandt sig, at almindelige danske huse kunne fungere som varmelager i et smart-grid. Her er langsom køling og god lagerkapacitet vigtige egenskaber at have i nettet, da energiforsyningen kan afbrydes, fx i perioder med spidslast, eller omvendt: Energi kan lages i perioder med billig energi, fx ved overskudskapacitet og dermed tilgængelighed af billig energi i nettet.

I dette projekt er der gjort forsøg på at vise, at det rent faktisk forholder sig sådan, at et bredt udsnit af danske huse kan fungere som varmelager, og at dette kan få betydning den dag, hvor mange huse bliver varmforsynet via varmepumper.

Dette er vist ved at finde frem til forskellige huses tidskonstant og derudfra beregne det årlige opvarmningsbehov samt effektbehøvet, hvis bygninger ikke forsynes i spidslastperioder eller omvendt forvarmes for at stå bedre rustet forud for en varmeafbrydelse. Tidskonstanten (τ) er et matematisk udtryk for, hvor hurtigt en bygning køler, og angives i timer.

I projektet er enfamiliehuses "evne" til at fungere som varmelager i et smart-grid undersøgt på to måder, dels ved en såkaldt autoregressiv analyse af afkølingskurver, dels ved dynamisk simulering af arketyper. En autoregressiv analyse er en slags statistisk analyse, som ved hjælp af stor antal temperaturlogninger kan finde frem til bygningens "sande" afkølingskurve og dermed tidskonstant. Ved simulering af arketyper er simuleringsprogrammet BSim benyttet til at simulere og fremstille en afkølingskurve for et gennemsnitligt parcelhus hidrørende fra seks arketypeperioder. Se tabel 30. Disse afkølingskurver er herefter analyseret ved autoregressiv analyse, jf. ovenfor.

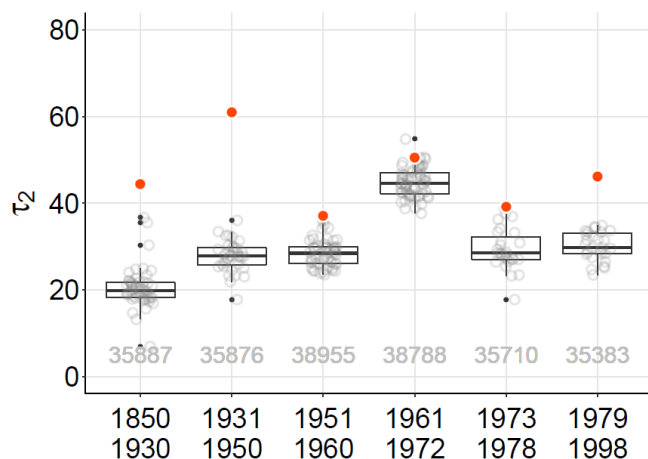
Tabel 30. Oversigt over simulerede arketyper jf. figur 9.

Arketypeperioder	Opvarmet areal	Antal etager	Bagmur og skillevægge	Tidskonstant ved autoregressiv analyse
1850-1930	72+72 m ²	2	tung	44
1931-1950	94+60 m ²	2	tung	
1951-1960	106,0 m ²	1	tung	38
1961-1972	180,1 m ²	1	let	50
1973-1978	137,3 m ²	1	let	40
1979-1998	143,1 m ²	1	let	46

Overført til den samlede bygningsmasse kan resultatet sige noget om omfanget af den fleksibilitet, som huse inden for bestemte opførelsesperioder kan levere - og skaleret op, hvor meget fleksibilitet en kategori af huse kan levere. Hvis det fx antages, at alle parcelhuse, som er placeret uden for fjernvareområder, bliver opvarmet via en varmepumpe, kan den samlede årlige fleksibilitet - og dermed "varmelagerets" størrelse - gøres op til 545 GWh.

Flytning af energiforbrug væk fra spidslastperioder vil i mange tilfælde medføre et større årligt energibehov. Der er derfor vigtigt, at denne nyttige effekt for forsyningsnettet ikke straffes i bygningens mulighed for at overholde energirammen. For fuld udnyttelse af bygningers fleksibilitet er der derfor behov for en form for "rabat" på energirammen til bygninger, der tilbyder fleksibilitet til forsyningsnettet (Eldenbros et al., 2015).

Resultatet af de to analyser af en bygnings tidskonstant er vist i figur 44. Heraf fremgår, at alle de valgte bygninger (kassediagram) sammen med de simulerede standardbygninger (røde markeringer) har tidskonstanter på 20 timer eller derover. Man ser endvidere, at der er god overensstemmelse mellem resultaterne af de to analyser, forstået på den måde, at de største tidskonstanter (langsomste afkøling) er fundet for huse opført byggeperioden 1961 til 1972 og de mindste tidskonstanter (hurtig afkøling) for huse opført i byggeperioden 1850-1930 til. For huse opført i de øvrige byggeperioder er der fundet tidskonstanter på mellem 30 og 40 timer.



Figur 44 Tidkonstanter udregnet dels på grundlag af aktuelle temperaturlogninger, dels på grundlag af simuleringer (røde markeringer).

The background of the page is a decorative pattern of thin, dark blue lines. These lines are arranged in a series of concentric, wavy bands that curve around the central text, creating a sense of movement and depth. The lines are most densely packed near the top and bottom edges, with more space between them in the middle.

REFERENCER

REFERENCER

- Bacher, P & H. Madsen (2011): Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43:1511–1522, 2011.
- Jakobsen A & Kolarik J. – red. (2018). *Bygningsdynamik i "Faglige discipliner og viden i relation til energi og indeklima i Bygningsdrift"*. Afsnit: Christensen, J. E. *Bygningsdynamik*. EnDrIn FM-Lærebog. PSO2016; 348-006.
- Edelenbos E. Tokeby M. & Wittchen K.B. (2015). *Implementation of Demand Side Flexibility from the perspective of Europe's Energy Directives*. Found at: www.ea-energianalyse.dk/reports/1351_implementation_demand_side_flexibility.pdf. (14. May 2020).
- Energistyrelsen (2013): *Smart-grid-Strategi - fremtidens intelligente energisystem*. Energistyrelsen, København.
- Jaume Palmer, Christoffer Rasmussen, Kenneth Leerbecka, Rongling Li, Ole Michael Jensen, Kim B. Wittchen, & Henrik Madsen (2020): Scalable strategies for characterizing the dynamics of the flexibility potential of residential buildings. Fremsendt til publicering i *Journal for Energy and Buildings*.
- Jensen, OM (2016): *Smart energi i hjemmet. Evaluering af forsøg med intelligent temperaturregulering i enfamiliehuse*. SBI-rapport: SBI 2016:15. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.
- Niras, Varmeforsyningerne i Hjørring, Brønderslev og Støvring, AffaldVarme Aarhus (2017): *Varmebehov i boliger og dimensionering af ledningsnet*. Udført for Dansk Fjernvarme. F&U Konto Rapport Nr: 2017-04. Dansk Fjernvarme, Kolding.
- Norli, Sigrun: *Statistical methods for optimizing renovation projects* (2018). M.Sc. Thesis. Department of Applied Mathematics and Computer Science, Technical University of Denmark, Lyngby.
- R. Gronborg Junker, A. Gashem Azar, R. Amaral Lopes, K. Byskov Lindberg, G. Reynders, R. Relan, & H. Madsen. *Characterizing the energy flexibility of buildings and districts*. *Applied energy*, 225:175–182, 2018.
- Poulsen S & Olsen L (2015): *Varmepumper – et aktiv i fremtidens energisystem*. Teknologisk Institut, Taastrup.
- Wang PG, Scharling M, Nielsen KP, Wittchen KB, & Kern-Hansen C. (2013). *2001–2010 Danish Design Reference Year - Reference Climate Dataset for Technical Dimensioning in Building, Construction and other Sectors*. Technical Report TR13-19. Danish Meteorological Institute, Copenhagen.
- Wittchen, KB, Johnsen, K & Grau, K (2000-2019). *Bsim – Brugervejledning*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.
- Wittchen, KB, Kragh, J & Aggerholm, S. (2017): *Varmebesparelse i eksisterende bygninger - Potentiale og økonomi*. SBI 2017:16. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.

Wittchen KB & Kragh J (2016). Danish building typologies and building stock analyses: Participation in the EPISCOPE project. SBI 2016:18. Danish Building Research Institute, Aalborg University, Copenhagen.

I denne rapport analyseres danske enfamiliehouses potenti-
ale for at tilbyde energifleksibilitet til forsyningsnettet.

Fleksibilitet er muligheden for at flytte forbrug væk fra pe-
rioder med spidslast eller lille andel af vedvarende energi i
forsyningen i nettets energimix. Der er alene fokuseret på
enfamiliehuse, der ikke har forbindelse til et fjernvarme-
eller naturgasnet. Det enkelte hus kan kun tilbyde en min-
dre fleksibilitet, men samlet set er det muligt tidsmæssigt
at flytte ret store energimængder ved hjælp af lagerkapaci-
teten i danske enfamiliehuse.



BUILD

AALBORG UNIVERSITET