Aalborg Universitet

Energineutralt Byggeri

Tekniske løsninger

Wittchen, Kim Bjarne; Østergaard Jensen, Søren; Brand, Marek; Christensen, Christian Holm; Galiotto, Nicolas; Heiselberg, Per; Iqbal, Ahsan; Østergaard Jensen, Søren; Johnsen, Kjeld; Katic, Ivan; Lauritsen, Diana; Dreau, Jerome Le; Liu, Mingzhe; Lund, Henrik; Marszal, Anna Joanna; Milan, Christian; Mortensen, Andrea; Nielsen, Steffen; Pavlov, Georgi Krasimiroy; Tahersima, Fatemeh; Winther, Frederik Vilbrad; Wittchen, Kim Bjarne

Publication date:
2014

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Wittchen, K. B. (red.), Østergaard Jensen, S. (red.), Brand, M., Christensen, C. H., Galiotto, N., Heiselberg, P., Iqbal, A., Østergaard Jensen, S., Johnsen, K., Katic, I., Lauritsen, D., Dreau, J. L., Liu, M., Lund, H., Marszal, A. J., Milan, C., Mortensen, A., Nielsen, S., Pavlov, G. K., ... Wittchen, K. B. (2014). *Energineutralt Byggeri: Tekniske løsninger*. (1. udgave udg.) SBI forlag.

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.

Downloaded from vbn.aau.dk on: August 23, 2025

ENERGINEUTRALT BYGGERI

TEKNISKE LØSNINGER

strategisk forskningscenter for
ENERGINEUTRALT BYGGERI

Det
Strategiske
Forskningsråd

TITEL	Energineutralt Byggeri - Tekniske løsninger
UDGAVE	1. Udgave
UDGIVELSESÅR	2014
FORFATTERE	Brand, Christensen, Galiotto, Heiselberg, Iqbal, Jensen, Johnsen, Katic, Lauritsen, Le Dréau, Liu, Lund, Marszal, Milan, Mortensen, Nielsen, Pavlov, Tohersima, Winther, Wittchen
REDAKTION	Søren Østergaard Jensen og Kim B. Wittchen
REVIEW	Ove Mørck, cand.scient., lic. techn. Cenergia
SPROG	Dansk
SIDETAL	68
ISBN	978-87-563-1615-6
LAYOUT	Louise Kragelund, Novagraf A/S
TRYK	Novagraf A/S
UDGIVER	Statens Byggeforskningsinstitut Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

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

Layout og trykning af denne publikation er gjort mulig med ALECTIA Prisen 2010, der blev tildelt Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri af ALECTIA Fonden.

Tak til forskere og ph.d. studerende i det Strategiske forskningscenter for energineutralt byggeri (ZEB), hvis viden inden for energineutralt byggeri har bidraget til denne publikation. De fulde bidrag kan findes i det publicerede materiale på www.zeb.aau.dk.

Tak til centrets Advisory Board for input og kommentarer.

Publikationen er udarbejdet under Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri (www.zeb.aau.dk). Centret består af et forskningssamarbejde mellem forskningsinstitutioner og private virksomheder. Blandt forskningsaktiviteterne er 17 ph.d. projekter. Forskningscentret er etableret med støtte fra Det Strategiske Forskningsråd, Programkomiteen for Bæredygtig Energi og Miljø.

Det Strategiske Forskningsråd

CENTRETS PARTNERE ER:
Aalborg Universitet (AAU)
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Teknologisk Institut (TI)
Statens Byggeforskningsinstitut (SBi)
Danfoss A/S
VELUX A/S
Saint-Gobain ISOVER A/S
Affald VarmeAarhus
Dansk Byggeri, Alufacadesektionen

CENTRETS STYREGRUPPE:
Per Heiselberg, AAU (Centerleder)
Mary-Ann Knudstrup (AAU)
Anna Marszal (AAU)
Svend Svendsen, DTU
Søren Østergaard Jensen, TI
Kim Wittchen/Søren Aggerholm, SBi
Peter Andersen, Danfoss
Karsten Duer, VELUX
Susanne Højholdt/Erling Jessen, ISOVER
Mette Rude, Affald VarmeAarhus
Carsten Pedersen, Dansk Byggeri

FORORD

Nærværende publikation er en booklet, der indgår i en række af publikationer, der er udgivet af Strategisk Forskningscenter for Energineutralt byggeri. Der er udgivet tre booklets:

- Energineutralt byggeri
  - Definition og fremtidig rolle i samfundet
- Energineutralt byggeri
  - Designprincipper og byggede eksempler for enfamiliehuse
- Energineutralt byggeri
  - Tekniske løsninger

Fokus for Booklet 3 er Forskningscentrets arbejde vedrørende udvikling af tekniske løsninger for energineutralt byggeri. Publikationen opdeler udviklingen af energineutralt byggeri i tre trin:

1) nedbringelse af energibehovet gennem passive foranstaltninger (fokus på klimaskærm, naturlig ventilation og køling samt afskærmning mod solen),
2) brug af effektive energitekniske installationer (opvarmning, ventilation og køling) og
3) vedvarende energiforsyning, som udnytter både lokale og centrale vedvarende energikilder for at udfase brugen af fossile brændstoffer.

Denne publikation er reviewet af Ove Mørck, cand.scient., lic. techn., Cenergia.

Per Heiselberg, centerleder. Prof. Aalborg Universitet
Søren Østergaard Jensen, seniorkonsulent. Teknologisk Institut
Kim B. Wittchen, seniorforsker. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet

INFORMATION TIL LÆSEREN

LÆSEVEJLEDNING

Formålet med denne publikation er at præsentere den forskning, som er gennemført af Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri vedrørende energitekniske løsninger for energineutralt byggeri. Alle publikationer fra forskningscentret, inklusive ph.d.-afhandlingerne, er tilgængelige på forskningscentrets hjemmeside www.zeb.aau.dk. Henvisningerne hertil angives i det følgende primært lige under overskriften i det tilhørende afsnit. Henvisninger til standarder og lovtekster (fx Bygningsreglement 2010 - BR10 og Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) er ikke anført i listen over henvisninger.

Videnskabelige artikler og ph.d.-afhandlinger kan ofte være vanskelige at læse. Formålet med denne publikation er at præsentere appetitvækkere på forskningscentrets arbejde, og derved give læseren et indblik i indholdet af de forskellige afhandlinger og rapporter. Vi håber, det vil være med til at skabe øget interesse for forskningsresultaterne og bidrage til en bredere formidling inden for bygningsområdet.

Det Strategiske Forskningscenters forskning er opdelt i tre hovedområder: Koncepter (som er beskrevet i publikationerne: Definition og fremtidig rolle (Svendsen, Heiselberg og Lund, 2014), Designprincipper og byggede eksempler på enfamiliehuse (Bejder, Knudstrup, Jensen og Katic, 2014)) samt systemer og komponenter. Nærværende publikation beskæftiger sig med de to sidstnævnte områder. Selvom formålet er at præsentere forskningsresultaterne på en sammenhængende måde, dækker forskningen ikke alle aspekter af energitekniske løsninger for energineutralt byggeri. De forskningsområder, som omtales, beskæftiger sig dog med vigtige emner til udvikling af energitekniske løsninger for energineutralt byggeri.

For at sikre, at publikationen bliver så homogen som muligt, er yderligere emner, som ligger uden for forskningscentrets område, dækket af forskere fra centrets forskningsteam. Der er tale om følgende områder: Smart grid/energi, solafskærmning, mekanisk ventilation og køling, solceller, solvarme, commissioning og drift.

For at skabe overblik er indholdet i denne publikation opdelt i følgende hovedkapitler:

- Udfordringer og Net ZEB løsninger
- Reduktion af energibehovet
- Energitekniske installationer
- Energiforsyningssystemer
- Commissioning, drift og facility management

I det følgende benyttes forkortelsen Net ZEB, der står for nettilsluttet energineutralt byggeri, dvs. byggeri, som udveksler energi med det omgivende energinet, men som ikke forbruger mere (primær) energi hen over året, end det producerer.

Publikationen beskæftiger sig med det arbejde i forskningscentret, som fokuserer på udviklingen af energitekniske løsninger for Net ZEB. Net ZEB kan opnås på mange forskellige måder, men de vigtigste redskaber er en reduktion i varmebehovet gennem passive foranstaltninger (fokus på klimaskærm, naturlig ventilation, køling og solafskærmning), brug af energieffektive energitekniske installationer (opvarmning, ventilation og køling) samt vedvarende energiforsyning, som anvender både centrale og decentrale vedvarende energikilder for at udfase brugen af fossile brændstoffer.

Der findes således ikke en enkeltstående løsningsmodel til at opnå Net ZEB, men der er tale om en kombination af flere forskellige teknikker for klimaskærm, energitekniske installationer og vedvarende energiforsyning tilsammen. Den optimale løsningsmodel vil være forskellig fra byggeri til byggeri. Da antallet af mulige Net ZEB løsningsmodeller er stort set ubegrænset, og da forskellige bygninger kræver forskellige løsningsmodeller, har det ikke været Forskningscentrets mål at udvikle standardløsningsmodeller. I stedet har forskningen fokuseret på vigtige kerneområder til udvikling af Net ZEB.

INTERNATIONALT SAMARBEJDE

Udover den forskning, som Forskningscentret har gennemført, har en del af forskerne i forskningscentret deltaget i IEA SHC task 40 / EBC Annex 52 – Towards Net Zero Energy Solar Buildings (IEA SHC Task 40, 2013). Formålet med dette arbejde var at undersøge eksisterende Net ZEB, næsten Net ZEB og byggeri med meget lavt energiforbrug, samt at udvikle fælles forståelse, metoder, værktøjer, innovative løsningsmodeller og retningslinjer for industrien (i tråd med Forskningscentret s arbejde). Målet var at dokumentere og præsentere praktiske Net ZEB-projekter af overbevisende arkitektonisk kvalitet. De primære resultater fra IEA SHC Task 40 / EBC Annex 52 er tre bøger:

Net Zero Energy Buildings (redaktører: Voss og Musall, 2011). Denne publikation indeholder en omfattende metode til balancering af energi, terminologi for energineutralt byggeri og eksempler på energineutralt og plus-energi byggerier.

Modeling, design and optimization of Net ZEBs (redaktører: Athienitis og O´Brian, 2013). Retningslinjer for tekniske løsningsmodeller baseret på teoretiske følsomhedsanalyser foretaget på fire eksempelbygninger.

Solution Sets for Net Zero Energy Buildings – Feedback from 30 NZEBs worldwide (redaktører: Garde og Donn, 2014). Denne publikation indeholder beskrivelser af løsningsmodeller for Net ZEB med faktuelle oplysninger for 30 byggede og monitorerede bygninger.

INDHOLD

INTRODUKTION
- Introduktion 8
- Energineutralt byggeri 9

UDFORDRINGER OG NET ZEB-LØSNINGER
- Udfordringer ved 2020 byggeri 12
- Indeklima 16
- Net ZEB i det lokale energiforsyningssystem 18
- Mulige Net ZEB-løsninger 20

REDUKTION AF ENERGIBEHOVET
- Reduktion af energibehovet 24
- Klimaskærmen 25
- Naturlig ventilation 26
- Naturlig køling 28
- Solafskærmning 30

ENERGITEKNISKE INSTALLATIONER
- Energitekniske installationer 36
- Opvarmningssystemer 37
- Mekanisk ventilation 42
- Mekanisk køling 43

ENERGIFORSYNINGSSYSTEMER
- Energiforsyningssystemer 46
- Vedvarende energisystemer på matriklen 47
- Lokale eller centrale vedvarende energisystemer 51
- Fremtidige bæredygtige energisystemer 55

COMMISSIONING, DRIFT OG FACILITY MANAGEMENT
- Commissioning 58
- Drift af energineutralt byggeri 59
- Facility management 60

LITTERATURLISTE 64

INTRODUKTION

INTRODUKTION

Danmarks målsætning er i følge Regeringens klimaplan fra 2013 at være et samfund uafhængig af fossile brændstoffer efter 2050. Det kalder på betydelig energieffektivisering og forøgelse af den vedvarende energiproduktion. Byggeriet udgør, jf Energistyrelsens energistatistik, 35 % af det samlede energiforbrug i Danmark og en forbedring af bygningers energieffektivitet er derfor afgørende. Udvikling af energineutrale bygninger er et vigtigt skridt i denne retning.

Denne publikation er en del af det arbejde, der er foretaget i Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri og omhandler den forskning, som er gennemført af forskningscentret vedrørende energitekniske løsninger for energineutralt byggeri.

Energineutrale bygninger skal som udgangspunkt designes med et meget lavt energiforbrug og anvende vedvarende energikilder til at opveje det lave energibehov. Betingelserne for hvordan en bygning kan gøres energineutral vil ændre sig over tid, eftersom den kollektive energiforsyning i stigende grad vil blive baseret på vedvarende energikilder (figur 1). Ligeledes vil de "nære betingelser" for den enkelte bygning (som stedets forsyningsmuligheder, grundens placering og topografi, sol-, skygge- og vindforhold samt brugerbehov og adfærd) være forskellig fra projekt til projekt. Disse variable har stor betydning for den energineutrale boligs performance, og det givne projekt må derfor designes ud fra dets specifikke forudsætninger og/eller med øje for tilpasningsmulighederne.

DEFINITION FOR ENERGINEUTRALT BYGGERI

Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri har lavet følgende definition: *"Zero energy buildings, ZEB, are buildings designed for a very low energy demand, and are using zero fossil energy based on an optimal combination of energy savings and supply of renewable energy from electrical and thermal network or from on site."*

BETINGELSERNE FOR DEN ENERGINEUTRALE BOLIG OVER TID

Bygningen er som udgangspunkt designet med et meget lavt energibehov

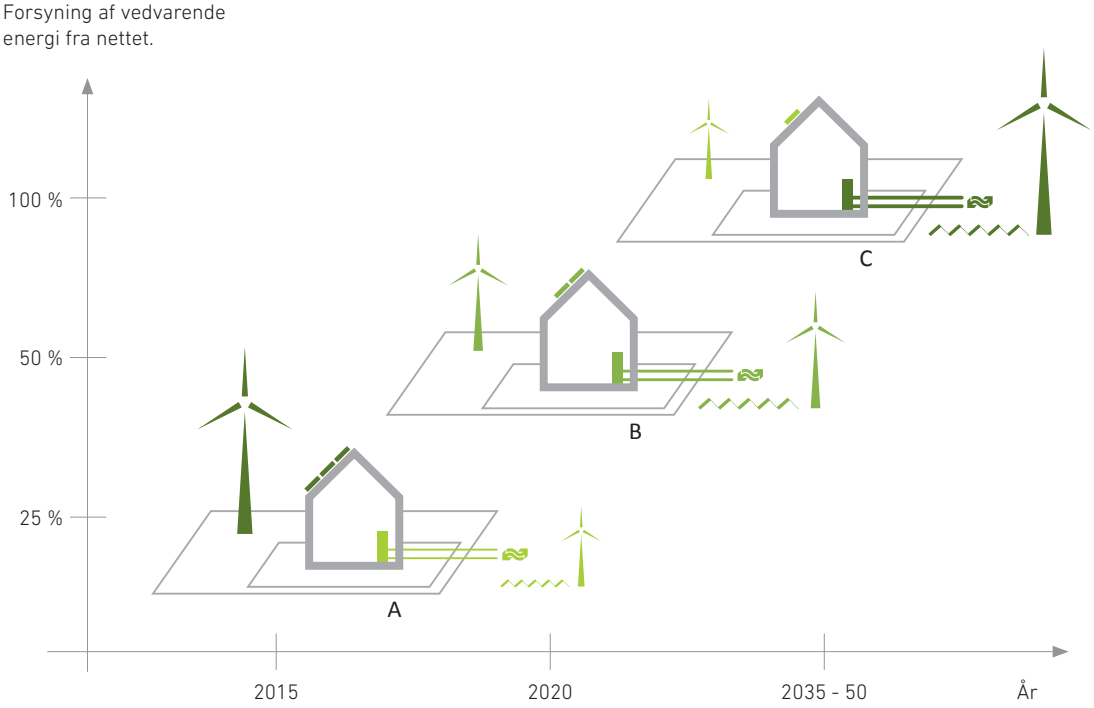


Fig. 1

A I 2015 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet begrænset. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen eller på matriklen.

B I 2020 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet større. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen/matriklen eller ved produktion af energi i lokalområdets ejerlav.

C I 2035 forventes det, at bygningsmassens energibehov kan dækkes ved vedvarende energi fra nettet. Desuden kan der suppleres med egenproduktion (el og varme).

ENERGINEUTRALT BYGGERI

Energineutralt byggeri (ZEB) er bygninger, som er designet med et meget lavt energibehov, hvor det resterende energibehov dækkes af vedvarende energi. Det er således en kombination af energibesparelser og tilførsel af vedvarende energi fra elektriske, termiske og/eller biogasbaserede ledningsnet eller fra et vedvarende energiforsyningssystem på matriklen.

Energineutralt byggeri karakteriseres yderligere ved et godt indeklima, hvad angår temperatur, luftkvalitet, dagslys og akustik, samt en høj arkitektonisk kvalitet, der lægger vægt på respekten for brugeren af bygningen.

Målet er at fjerne de problemer, der er forbundet med brugen af fossil energi ved at skifte til et fossilfrit energiforsyningssystem. Der bør hovedsageligt udvikles langsigtede løsninger, men i processen bør der også tages højde for overgangen fra det nuværende til det fremtidige energiforsyningssystem. Den optimale løsning vil afhænge af den givne sammenhæng.

DET ENERGINEUTRALE BYGGERI I HOVEDTRÆK

Et energineutralt byggeri er forbundet til et eller flere energiforsyningsnet og balancerer sit fossilbaserede primærenergiforbrug med disse. Den vedvarende energiproduktion, der tilføres forsyningsnettet fra bygningen, er mindst af samme kvalitet og anvendelighed som den ikke-vedvarende primærenergi, der hentes fra forsyningsnettene.

En årlig fossilbaseret primærenergibalance tæt på 0 kWh/m^2 pr. år vil typisk føre til, at en stor del af den vedvarende energiproduktion, som foregår på matriklen, vil blive udvekslet med nettet. Derfor producerer det energineutrale byggeri energi, når betingelserne er til stede, mens det bruger energi fra nettet den øvrige del af tiden.

Det energineutrale byggeri bør altid have et meget lavt energibehov. Energibehovet kan inddeles i følgende kategorier:

- **Bygningens drift,** dvs. til opvarmning, køling, ventilation, pumper, ventilatorer og andre tekniske installationer.
- **Brugerrelateret,** dvs. til madlavning, varmt brugsvand, belysning, husholdningsmaskiner, underholdning, kontormaskiner osv.
- **Opførelse og vedligehold,** dvs. energiforbrug ifm. nye og udskiftede bygningsmaterialer og installationer over en bygnings levetid, såvel som energiforbrug ved renovering og nedbrydning af en bygning.

På baggrund af erfaringer fra nyere forskningsaktiviteter i Danmark og internationalt vil en rimelig ramme for energibehovet i energineutralt byggeri være:

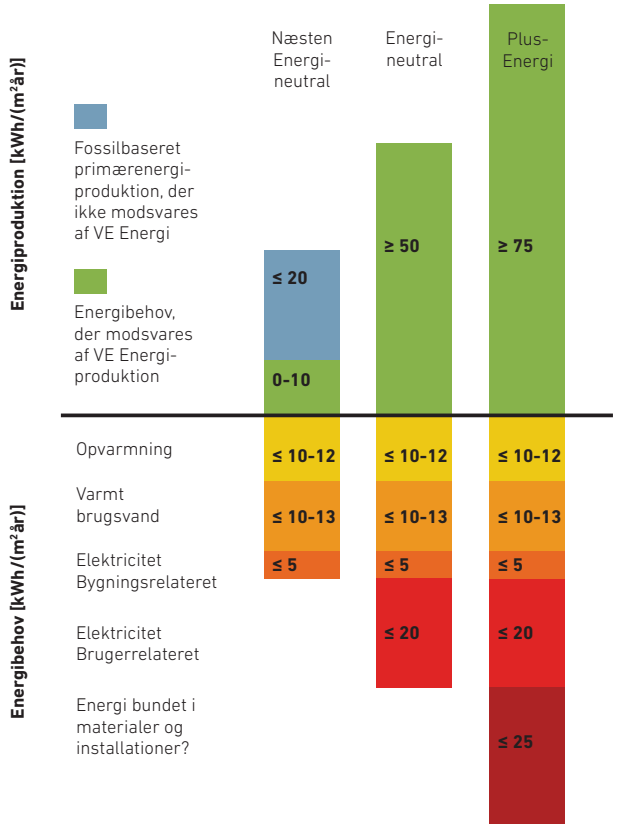
BYGNINGENS DRIFT (BOLIG)
- Opvarmning 10-12 kWh/m^2 pr. år
- Varmt brugsvand 10-13 kWh/m^2 pr. år
- Elektricitet 5 kWh/m^2 pr. år

BYGNINGENS DRIFT (KONTOR)
- Opvarmning 4-5 kWh/m^2 pr. år
- DHW 4-5 kWh/m^2 pr. år
- Elektricitet 20 kWh/m^2 pr. år

BRUGERRELATERET
- Elektricitet (bolig) 20 kWh/m^2 pr. år
- Elektricitet (kontor) 20 kWh/m^2 pr. år

OPFØRELSE OG VEDLIGEHOLD
- Indlejret energi til nyopførelse, vedligehold, renovering og nedbrydning 25 kWh/m^2 pr. år [Berggren, 2013]

Der findes i øjeblikket ingen standarddefinition på energineutralt byggeri. Figur 2 viser et lille antal eksempler på typiske definitioner, som pt er i brug.



Figur 2. Eksempler på energibalancer for næsten energineutralt byggeri, energineutralt byggeri og plus-energi byggeri.

Foto: Adam Mørk,
Copyright VELUX A/S

UDFORDRINGER OG
NET ZEB-LØSNINGER

UDFORDRINGER VED 2020 BYGGERI

Energineutralt byggeri (ZEB) er fremtidens byggeri og bør derfor også kunne imødekomme forventede udfordringer til nye bygninger. Ifølge EU-direktivet om bygningers energimæssige ydeevne (DIRECTIVE 2010/31/EU) er alle EU's medlemslande forpligtet til at fastsætte regler for næsten energineutralt byggeri (nearly zero energy buildings), så disse kan blive standard for alt nybyggeri efter 2020 (efter 2018 for offentligt nybyggeri). Ifølge direktivet skal en betydelig andel af det resterende energibehov dækkes af vedvarende energikilder. Der er således tale om et europæisk skridt imod Net ZEB og dermed mod de minimumskrav, som det energineutrale byggeri skal opfylde. I det danske bygningsreglement, er Bygningsklasse 2020 allerede blevet indført som mindstekrav til næsten energineutralt byggeri fra 2020. Byggede eksempler (se afsnittet Mulige Net ZEB-løsninger) har vist, at energineutralt byggeri som minimum skal opfylde kravene for Bygningsklasse 2020 uden produktion af vedvarende energi. Derfor vil Bygningsklasse 2020 kort blive beskrevet i det følgende.

Energineutralt byggeri bør generelt ikke betragtes eller anvendes på anden måde end traditionelt byggeri. Det betyder, at fremtidigt Net ZEB-byggeri ikke bør kræve en særlig uddannelse af ejeren eller brugeren, for at denne kan betjene bygningen. Indeklimaet bør være lige så godt som eller bedre end i traditionelt byggeri.

NYBYGGERI

I 2020 skal alt nybyggeri opfylde kravene for Bygningsklasse 2020, som er specificeret i Bygningsreglement 2010 (BR10). For at opfylde energikravene for Bygningsklasse 2020 må en bolig ikke have et beregnet primærenergibehov – den såkaldte energiramme - der overstiger 20 kWh/m^2 pr. år[1]. Energirammen for ikke-boliger er fastsat til 25 kWh/m^2 pr. år. I dansk sammenhæng anses dette for at være næsten nulenergi byggeri (nearly zero energy buildings).

Overgangen fra næsten nulenergi byggeri (nearly zero energy buildings) til rent Net ZEB betyder at bygningernes energibehov skal dækkes af vedvarende energi. Behovet for vedvarende energi kan begrænses ved at reducere bygningernes energibehov yderligere i forhold til Bygningsklasse 2020. Endvidere skal bygningerne på årsbasis (i samspil med el-nettet) kunne dække el-behovet til apparater og kunstig belysning. Det vil derfor ofte være nødvendigt at nå et endnu lavere energibehov end kravet i energirammen ved hjælp af passive foranstaltninger og effektive energitekniske installationer, før bygningen forsynes med vedvarende energisystemer (BOLIG+, 2013). Dette kan blive en udfordring, da der kun er et begrænset tag- og facadeareal til rådighed for produktion af vedvarende energi. Dette gælder især for etagebyggeri, når andelen af vedvarende energi i energinettet er begrænset i perioden frem til 2050.

Udover energirammen skal nybyggeri opfylde kravene om, at det dimensionerende varmetab[2] gennem de faste dele af klimaskærmen ikke må overskride værdierne i tabel 1. Dette skal sikre, at byggeriet har en god isoleringsmæssig kvalitet.

For at opfylde ovenstående krav, sammen med behovet for produktion af varmt brugsvand, vil varmebehovet i et byggeri, som overholder specifikationerne for Bygningsklasse 2020, være i størrelsesordenen 10-12 kWh/m^2 pr. år.

Bygningsreglementets energirammer er baseret på standardforudsætninger, hvor bl.a. alle komponenter og installationer er udført korrekt. Selv mindre fejl og unøjagtigheder samt en brug af bygningen, der afviger fra standardforudsætningerne, vil resulterer i store procentvise afvigelser, på det absolut set lille energibehov i Net ZEB (se fx afsnit om Lavtemperaturfjernvarme).

Etager	Dimensionerende transmissionstab (W/m^2)	Tilsvarende isolationstykkelse1) (cm)
1	3,7	32
2	4,7	27
3	5,7	22

1) Isoleringsklasse 0,036 W/mK

Tabel 1: Det maksimalt tilladte dimensionerende transmissionstab gennem klimaskærmens faste dele for nyt dansk byggeri i 2020. Den tilsvarende isolationstykkelse er angivet for et ubrudt lag isoleringsmateriale.

EKSISTERENDE BYGGERI

De fleste af de bygninger, som findes i 2050, er allerede bygget, og derfor er det af stor betydning at finde løsninger til energioptimering af denne del af bygningsmassen. Fokus for denne publikation er nybyggeri, men mange af løsningsforslagene, som beskrives, er også anvendelige i eksisterende byggeri.

Ifølge Bygningsreglement 2010, skal eksisterende byggeri energimæssigt opgraderes i forbindelse med renoverings- og ombygningsarbejder; men dog kun, hvis det er økonomisk rentabelt. Bygningskomponenter, som udskiftes, skal opfylde visse minimumskrav, uanset om det er økonomisk rentabelt eller ej. Renovering af den samlede klimaskærm i et eksisterende byggeri vil typisk bringe det beregnede primærenergibehov (med primærenergifaktorer 2010) ned på omkring 75-100 kWh/m^2 pr. år. Det forventes ikke, at det vil være økonomisk rentabelt at opgradere eksisterende byggeri til det samme energiniveau

[1] *Bygningens samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, varmt brugsvand, elektricitet til bygningens drift, elektricitet for lys (ikke-boliger), systemeffektivitet, rørtab, fradrag for produktion fra vedvarende kilder, mulig straf for overophedning (+26 °C).*

[2] *ΔT = 32 °C.*

som nybyggeri. Reduktion af energibehovet i de eksisterende bygninger er dog af afgørende betydning for at muliggøre overgangen til et energisystem udelukkende baseret på vedvarende energikilder.

I Energistyrelsens forudsigelser antages, at den totalt set billigste måde, hvorpå der kan opnås et fossilfrit samfund i 2050, er ved at nedbringe energiforbruget i den eksisterende bygningsmasse med 50-60 %. Dette mål virker måske beskedent sammenlignet med energiforbruget i nybyggeriet, men er dog vanskeligt at nå. Mange energibesparende tiltag er ikke i sig selv økonomisk rentable for bygningsejerne, hvis de iværksættes alene med det formål at spare energi. Hvis de derimod iværksættes i sammenhæng med andre planlagte renoverings- eller ombygningsarbejder, kan de ekstra udgifter til energibesparende tiltag vise sig at blive økonomisk rentable. I de fleste tilfælde vil energibesparelser desuden føre til forbedringer af det termiske og atmosfæriske indeklima, ejendomsværdien osv., og vil således medføre en række ikke-energimæssige fordele for ejendommen. Dette er i forskningscentret blevet analyseret i to ph.d. projekter. I et tredje ph.d. projekt er det desuden undersøgt, hvordan bygningskonstruktioners levetid kan forlænges, eksemplificeret ved renoveringen af et fladt tag.

BOLIGEJERES LYST TIL AT INVESTERE I ENERGIBESPARELSE REFERENCE: (MORTENSEN, 2014)

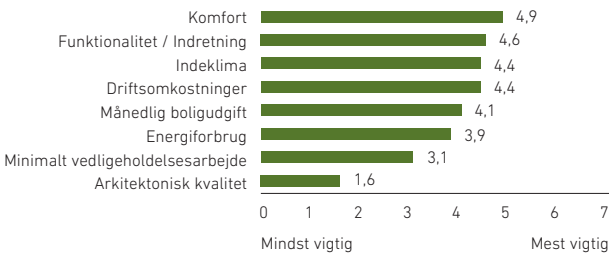
En undersøgelse af boligejeres vilje til at investere i energibesparende tiltag peger på forskellige faktorer, som er motiverende for beslutningen. Undersøgelsen viser også, at forhold som køn, alder, husholdningens sammensætning, adresse, ejerforholdets varighed, uddannelse, beskæftigelse og indkomst har indflydelse på, hvilke faktorer husejerne finder motiverende.

Nogle husejere kan motiveres af flere forskellige faktorer; det gælder fx husejere med hjemmeboende børn, husejere under 50 år, og husejere, som har boet i huset i mindre end et år. Andre kan kun motiveres af et lavere energiforbrug. Der er dog to klare tendenser: jo længere boligejere har boet i huset, jo færre faktorer kan motivere dem, og husejere med hjemmeboende børn er lettere at motivere end husejere uden hjemmeboende børn.

Til trods for at energibesparelser vil medføre økonomiske besparelser for husejeren, har en spørgeskemaundersøgelse vist, at der er andre faktorer, der vægtes højere end at spare penge. Komfort, funktionalitet og indeklima er de vigtigste faktorer for boligejere (figur 3). Dette fremgår både, når faktorerne evalueres individuelt, og når de stilles op mod hinanden. Energiforbrug ligger i undersøgelsen på sjettepladsen ud af 8 faktorer.

Flertallet af boligejerne er villige til at renovere deres boliger, og grundene hertil er, som forventet tæt relateret til økonomiske fordele. 45 % er dog ikke villige til at renovere, fordi de er tilfredse med deres hus, som det er. Viljen til at renovere stiger i takt med, at renoveringen medfører forbedringer i komfort, indeklima og arkitektur. Cirka en tredjedel af husejerne er villige til at betale op til 1000 kr. mere hver måned, hvis de kan opnå forbedringer i komfort, indeklima og arkitektur. En tredjedel vil betale op til 500 kr. ekstra pr. måned for forbedringer. Viljen til at betale for komfort og indeklima er større end viljen til at betale for forbedringer af arkitekturen. At renoveringen er synlig er ikke vigtig, når det drejer sig om små investeringer. Hvis der er tale om større investeringer, kræver en tredjedel af boligejerne et synligt resultat.

Hvordan vægter du vigtigheden af nedenstående parametre i din bolig.



Figur 3. Motiverende faktorer for investering i energibesparelser målt i forhold til hinanden og i forhold til deres betydning for respondenterne.

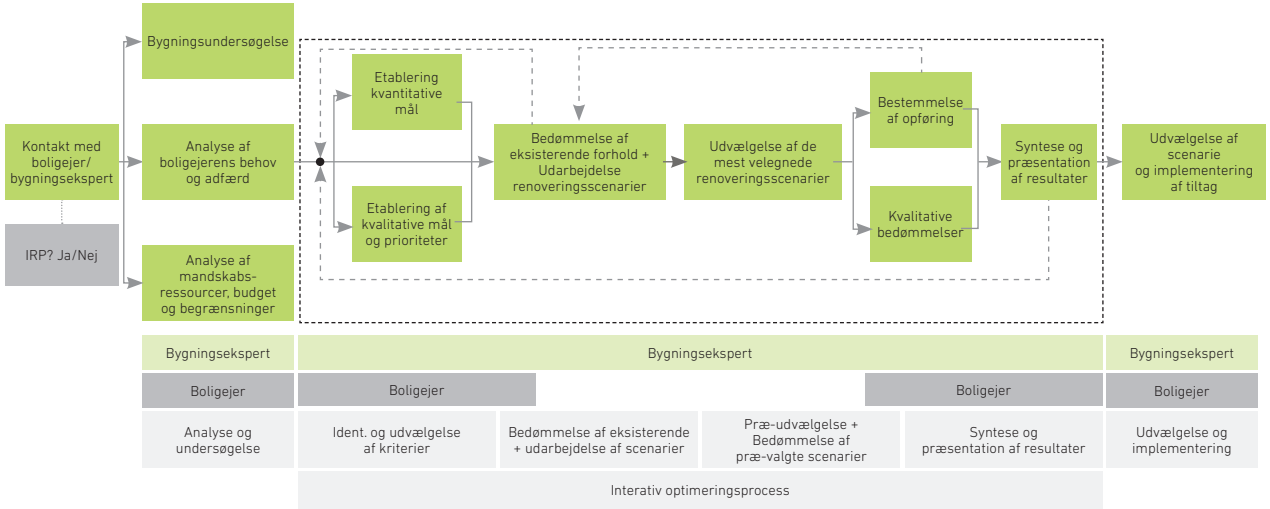
INTEGRERET RENOVERING HEN MOD NET ZEB REFERENCE: (GALIOTTO, 2014)

Da boligejere er villige til at renovere ud fra andre grunde end energi- og udgiftsbesparelser, er det vigtigt at anlægge en holistisk synsvinkel samt integrere beboernes adfærd i processen for at medtage alle faktorer, som direkte kan påvirke deres beslutning om at renovere på en bæredygtig måde.

Der er udviklet en ny brugertilpasset integreret renoveringsproces baseret på konstruktivistiske og interaktive beslutningsmetoder, som tager højde for flere forskellige kriterier. Metoden støtter, oplyser og styrker husejere i at træffe beslutninger om bæredygtig renovering af deres hus, samtidig med at de får de tilhørende fordele. De får derfor et hus, som er bedre tilpasset til deres livsstil. Metoden hjælper samtidig bygningseksperterne til at blive mere effektive i deres kvantitative analyser og i udarbejdelsen af renoveringsscenarier. Herved frigives mere tid til udgiftsoptimering og kvalitativ analyse af husejernes behov, ønsker og adfærd.

Den iterative proces er sammensat af følgende aktiviteter (figur 4): analyse af husejerens behov, ønsker og adfærd, undersøgelse af bygningen, identificering og udvælgelse af kriterier for renoveringen, generering af et antal renoveringsscenarier, udvælgelse af de mest egnede scenarier, evaluering af renoveringsscenarierne sammen med husejer og bygningsekspert på baggrund af de opstillede kriterier, sammenfatning og præsentation af resultaterne, og endelig udvælgelse af det mest fordelagtige renoveringsscenarie samt udførelse af arbejdet.

To eksempler viste, at den integrerede renoveringsproces undervejs forsynede husejerne med ny viden om, hvad de kunne forvente af et hus af høj kvalitet. Det bidrog til deres forståelse af faktiske behov og ønsker. Som følge af den konstruktivistiske og interaktive tilgang viste husejerne stor interesse i forskellige fagområder, som blev bragt op i løbet af processen. Husejerne fik den nødvendige information og vejledning, så de kunne føle sig mere sikre i deres beslutninger vedrørende strategien for den forestående renovering. De fik et klarere overblik over forventelige udgifter, såvel som over hvilke økonomiske fordele renoveringen ville medføre. I de to eksempler blev husejerne klar over, at de skulle anvende en trinvis renoveringsstrategi for at nå deres endelige mål. Denne brugertilpassede tilgang, som tog højde for husejernes sociale og psykologiske værdier, imødekom deres ønske om at få et nyt hjem, der passede til deres livsstil, adfærd og behov.



Figur 4. Den integrerede renoveringsproces (IRP).

I de to ovennævnte eksempler var en trinvis renoveringsstrategi den mest velegnede, mens en et-trins renovering (alle renoveringstiltag gennemføres på én gang) i andre tilfælde kan være mere velegnet.

LIVSCYKLUSPRISER FOR BYGNINGSKONSTRUKTIONER REFERENCE: (LAURITSEN, 2014)

Når der er behov for at reparere eller udskifte komponenter i eksisterende byggeri, er det vigtigt at overveje alternative løsningsmodeller bl.a. med indbygget mulighed for fejlfinding for at forlænge levetiden af den renoverede bygningskomponent. Herved kan livscyklusprisen på det pågældende element i langt de fleste tilfælde nedbringes, fordi fejl kan opdages og udbedres i tide, og inden de gør større skade. Et eksempel herpå er et fladt tag, som har problemer på grund af utilstrækkelig taghældning og nedsivning af fugt i tagkonstruktionen. Den korrekte og energieffektive løsning vil være en højtydende isolering af taget, enten ved udvendig isolering eller ved fjernelse af den gamle konstruktion ned til betondækket og opbygning af en ny tagkonstruktion. Ved at opbygge en ny tagkonstruktion er det muligt at anvende en konstruktion der er "forberedt for reparation" ved at integrere luftkanaler i top og bund af isoleringen samt et fugtregistreringssystem i toppen – se figur 11. Hvis der i fremtiden sker fugtnedsivning, vil det være muligt hurtigt at finde fejlen og udbedre den for derefter at affugte/udtørre konstruktionen, så energiforbruget forbliver det samme som oprindeligt. Ved at benytte en løsningsmodel der er "forberedt for reparation", med en U-værdi på 0,07 W/m^{2}K, vil det samlede beløb over en periode på 100 år blive 6.500 kr./m^2. Til sammenligning vil det koste 11.500 kr./m^2 at udføre konstruktionen på traditionel vis, også set over en periode på 100 år. Eksemplet viser, at det her betaler sig at indarbejde konceptet "forberedt for reparation" i udvikling af bygningskomponenter.

NETVÆRK FOR ENERGIRENOVERING

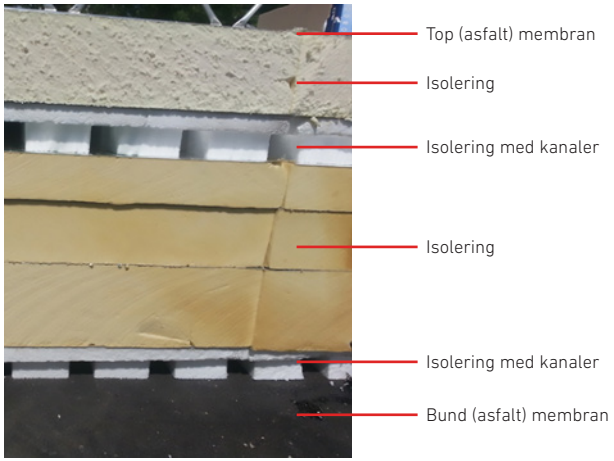
Energistyrelsen har etableret et tværgående netværk for byggeindustrien, som arbejder for at afdække de mest lovende tiltag, der skal til for at nå målene om energibesparelser i den eksisterende bygningsmasse. Baggrundsrapporter for netværkets analyser og anbefalinger er tilgængelige fra Energistyrelsen (2013). Af særlig interesse for arbejdet med Net ZEB er rapporten (Rose og Mortensen, 2013), som analyserer de mulige fremtidige krav til bygningskomponenter i forbindelse med renovering. Formålet med rapporten var at analysere igangværende og forventet fremtidig udvikling af komponenter og tekniske installationer til bygningsrenovering.

I netværkets rapport hedder det: "I dag omhandler bygningsreglementets energikrav til eksisterende byggeri, komponentkrav i forbindelse med udskiftninger eller krav til klimaskærm ved ombygning og udskiftning. I forhold til producent- og leverandørsiden er disse krav med til at drive en udvikling, men på

bygherre- og rådgiversiden skaber det ikke nødvendigvis de mest energioptimerede helhedsløsninger. Der skal derfor sættes fokus på, hvordan der i højere grad kan stilles krav til energirenovering gennem funktionskrav."

Netværket anbefaler, at der fokuseres på strammere krav for eksisterende byggeri, og at disse implementeres på følgende områder:

- Nye og strammere krav til energieffektivitet og indeklima
- Indførsel af nye komponentbestemmelser
- Krav om individuel måling af varme-, elektricitets- og vandforbrug i flerfamiliehuse



Figur 11. Tværsnit af ny tagkonstruktion, som er "forberedt for reparation" ved hjælp af små kanaler i isoleringen, igennem hvilke fugt kan opdages og udtørres.

INDEKLIMA

En af de vigtigste grunde til energianvendelse i bygninger er behovet for et bestemt indeklima. I Bygningsreglement 2010 står der, at "bygninger skal opføres, så der under den tilsigtede brug af bygningerne i de rum, hvor personer opholder sig i længere tid, kan opretholdes et sundheds og sikkerhedsmæssigt tilfredsstillende indeklima".

Det virker dog ofte, som om ovenstående prioritering til en vis grad bliver glemt i bestræbelserne på at opnå en specifik energiramme for den aktuelle bygning. Termisk komfort opnås fx ikke nødvendigvis ved, at en Be10 (Aggerholm og Grau, 2011) beregning ikke giver en straf for "overtemperatur i rum". Desuden er indeklima andet og mere end det termiske indeklima. Det er derfor vigtigt at have forståelse for hvilke forhold der har betydning for et godt indeklima ved design af en bygning. De vigtigste forhold behandles kort i det følgende.

KRITERIER FOR ET GODT INDEKLIMA

Indeklimaet består af forskellige forhold, der påvirker menneskekroppen:

- Termisk indeklima.
- Luftkvalitet.
- Støj og akustik.
- Visuelt indeklima, lysforhold og udsigt.

Kriterierne for et godt indeklima fremgår af flere internationale standarder og Bygningsreglement 2010, især for Bygningsklasse 2020. De standarder, der normalt refereres til, er EN 15251, EN ISO 7730 og CR 1752. Kriterierne i disse standarder gælder for alle typer af byggerier, hvor opvarmning, køling og ventilation anvendes til at sikre sundheds- og komfortmæssigt tilfredsstillende forhold.

For at øge overskueligheden over de forskellige parametre, der anvendes til beskrivelse af indeklima, har forskningscentret samlet de mest brugte kriterier i én publikation (Olesen et al, 2013). I det følgende vil dele heraf blive gengivet.

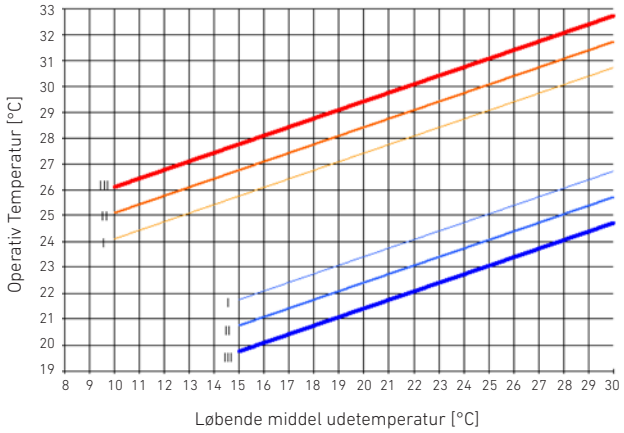
TERMISK INDEKLIMA

Kriterierne for termisk komfort afhænger for en stor del af det menneskelige aktivitets- og påklædningsniveau. Tabel 2 viser fire komfortklasser ved et forholdsvis stillesiddende aktivitetsniveau (1,2 met) og to påklædningsniveauer: 1,0 clo om vinteren og 0,5 clo om sommeren. Tabel 2 viser temperaturintervallerne for mekanisk ventilerede bygninger. Klasse II anbefales normalt ved design og dimensionering.

Klasse	Intervaller for den operative temperatur, °C	
	Vinter 1,0 clo/1,2 met	Sommer 0,5 clo/1,2 met
I	21,0-23,0	23,5-25,5
II	20,0-24,0	23,0-26,0
III	19,0-25,0	22,0-27,0
IV	<19,0, >25,0	<22,0, >27,0

Tabel 2. Eksempler på kriterier for den operative temperatur for stillesiddende aktivitet i mekanisk ventilerede bygninger eller bygninger med aircondition – EN 15251.

Sammenhængende værdier for PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) og PMV (Predicted Mean Vote) – indikatorer på kvaliteten af det termiske indeklima – findes i (Olesen et al, 2013). I naturligt ventilerede bygninger uden mekanisk køling har brugerne af bygningen ofte en anden forventning til rumtemperaturen om sommeren end angivet i tabel 2. Her giver EN15251 en sammenhæng mellem de fire temperaturklasser og udetemperaturen, se figur 7.



Figur 7. Designværdier for den operative temperatur i bygninger uden mekaniske køling vist som funktion af den eksponentielt vægtede løbende middelværdi af udetemperaturen (forklaret i (Olesen et al, 2013)) – EN 15251.

Andre kriterier, som anvendes til at bestemme termisk komfort, er overfladetemperaturer, strålingsasymmetri og lufthastighed. Manuel regulering af indeklimaet, fx vinduer der kan åbnes, spiller dog også en vigtig rolle for opfattelsen af indeklimaet. Relaterede værdier for PPD og PMV er tilgængelige i (Olesen et al, 2013).

LUFTKVALITET

Luften i en bygning forurenes af menneskelig aktivitet og de materialer, som er i bygningen. Kilderne til forurening er bioeffluenter fra mennesker, fugt, partikler, fibre, VOC osv. Afhængig af bygningens brug er en vis gennemstrømning af luft udefra derfor nødvendig for at opretholde en god luftkvalitet. Da mange af forureningskilderne er svære at måle, anvendes CO_2 og fugt ofte som indikatorer for den forurening, der genereres af mennesker – og til at opstille kriterier for luftens kvalitet. For CO_2 opstiller EN 15251 klasserne i tabel 3. CO_2 niveauet bør dog være lavere i forurenede lokaler og højere i mindre forurenede

lokaler. Rygeforbud i de fleste kontorbygninger har kraftigt nedbragt forureningen og derved det nødvendige luftskifte.

Klasse	CO_2 over udeluften ppm
I	0-350
II	350-500
III	500-800
IV	>800

Tabel 3. Eksempler på anbefalede CO_2-koncentrationer over koncentrationer i udeluften på ca. 400 ppm – EN 15251

STØJ OG AKUSTIK

Klimaskærmen skal i størst muligt omfang forhindre støj udefra. Energineutralt byggeri med tykke mure, trelags vinduer og uden ventilationsåbninger direkte til omgivelserne har typisk en effektiv støjbarriere mod udefrakommende støj. Men når støj udefra reduceres, vil intern støj fra fx ventilationsanlæg blive tydeligere og mere generende. Det gælder også for den støj, som kommer fra andre rum gennem interne vægge eller gennem ventilationsanlægget. Denne støj bør reduceres. EN 15251 anbefaler, at lydniveauet højst bør være 32 dBA i opholdsrum og 26 dBA i soveværelser. Værdierne for andre typer rum fremgår af (Olesen et al, 2013). Samtidig bør efterklangstiden højst være 0,5 sekund.

VISUEL KOMFORT

Visuel komfort består af flere forskellige elementer: belysningsstyrke, luminans, kontraster, blænding, farver osv., men også af udsigten fra lokalet og indkik udefra.

Bejder, Knudstrup, Jensen og Katic (2014) beskæftiger sig specielt med principperne for dagslys. Da dagslys er meget vigtigt for brugernes velbefindende og helbred, er der også anbefalede værdier for dagslysmængden (tabel 4) og for antal timer med direkte dagslys. Men da direkte sollys kan være meget generende specielt i kontorbygninger, findes der også klasser vedr. muligheden for beskyttelse mod direkte sollys.

DOKUMENTATION AF INDEKLIMA

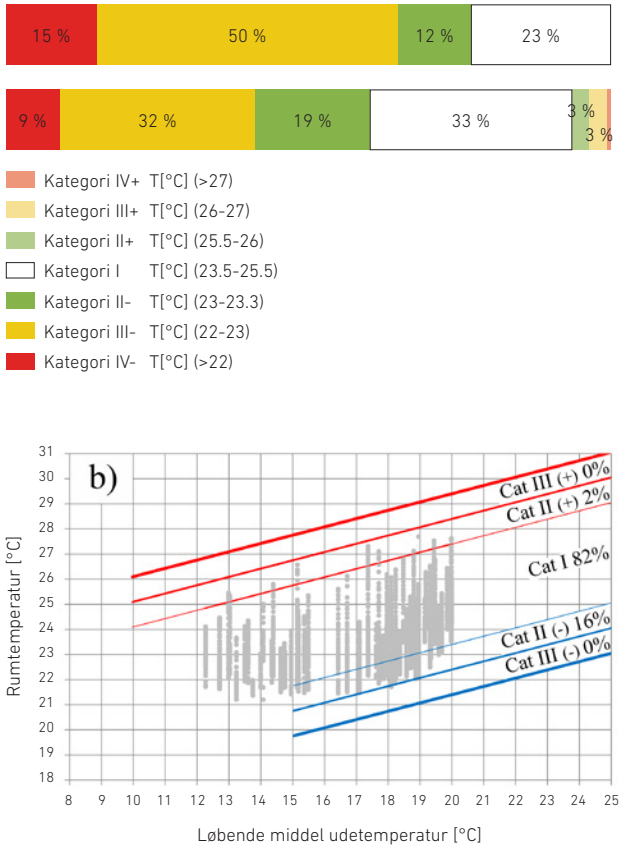
I designfasen vil det oftest være nødvendigt at opstille en dynamisk simuleringsmodel for kritiske lokaler: lokaler med risiko for overophedning, kolde rum, lokaler med specielle ventilationsbehov, lokaler med ringe eller høj grad af dagslys osv. Be10 er normalt ikke et hensigtsmæssigt værktøj til disse undersøgelser. Olesen et al (2013) beskriver kort spot- og langtidsmålinger i opførte bygninger med henblik på dokumentation af det faktiske indeklima. Kravene i EN ISO 7726 til instrumentering og målepositioner bør følges. Olesen et al (2013) giver endvidere eksempler på spørgeskemaer: et spørgeskema med mere generelle spørgsmål vedr. indeklimaet og et spørgeskema, der giver et øjebliksbillede af indeklimaet. Desuden er spørgeskemaet anvendt i forbindelse med Komforthusene også vist.

Klasse	Gennemsnitlig dagslysfaktor
I	>5
II	3-5
III	2-3
IV	<2

Tabel 4. Gennemsnitlig dagslysfaktor i et lokale (Olesen et al, 2013).

PRÆSENTATION AF DET MÅLTE INDEKLIMA

Olesen et al (2013) giver flere eksempler på, hvordan resultaterne fra måling af indeklima kan præsenteres. Figur 8 viser to muligheder for visning af temperaturfordelingen over en periode i et kontormiljø.



Figur 8. To eksempler på præsentation af målte rumtemperaturer (Olesen et al, 2013).

NET ZEB I DET **LOKALE ENERGIFORSYNINGSSYSTEM**

I Danmark er alle bygninger koblet til el-nettet og i mange tilfælde også til et fjernvarmenet eller naturgasnettet. Selvforsynende bygninger er meget sjældne, så denne type energineutrale bygninger vil ikke blive behandlet her.

Det er vigtigt at se på den energiudveksling der sker mellem Net ZEB og de lokale energinet. Den energi, som leveres til nettet fra en Net ZEB, skal være af mindst samme kvalitet og anvendelighed som den energi, der importeres til bygningen fra nettet. Derfor er det problematisk, hvis der importeres varme i perioder af året, hvor der er behov for opvarmning, mens der eksporteres varme tilbage til nettet i perioder, hvor behovet for varme her er lavt eller endda ikke eksisterende. Det lokale net bør som mindstekrav undersøges nøje for at fastslå, at en sådan situation er fordelagtig for nettet, og at den tilførte varme rent faktisk kan bruges andre steder i nettet.

Ved etablering af energineutralt byggeri er det derfor vigtigt, at kvaliteten og brugbarheden af den energi, der udveksles med nettet, nøje vurderes. I dansk sammenhæng er det i øjeblikket fint at bruge varmeenergi fra fjernvarmenettet om vinteren, da de fleste fjernvarmeværker (stadig) er kraftvarmeværker. Derimod er det ikke acceptabelt at levere varmeenergi tilbage til fjernvarmenettet om sommeren, da der normalt vil være et overflod af varme, hvilket desuden også fører til vanskeligheder med at køle returvandet.

Men hvis en bygnings import af varme i opvarmningssæsonen modsvares af eksport af elektricitet fra PV-anlæg om sommeren, er kriterierne for både energikvalitet og anvendelighed opfyldt.

TILSLUTNING TIL ENERGINET

Energikravene i BR10 med primærenergifaktorer på 2,5 for elektricitet og 1 for andre energikilder begunstiger varmepumper. Fra 2015 (Lavenergiklasse 2015) vil primærfaktorerne for fjernvarme være 0,8, hvilket vil medføre, at fjernvarme bliver lige så fordelagtig som varmepumper. Med primærenergifaktorer i Bygningsklasse 2020 på 1,8 for elektricitet og 0,6 for fjernvarme kan ingen andre energikilder konkurrere med varmepumper og fjernvarme.

Det logiske valg for Net ZEB er derfor fjernvarme, når det gælder bygninger i og tæt på et eksisterende fjernvarmenet og varmepumper i alle øvrige bygninger. Dette er i overensstemmelse med den gældende energipolitiske dagsorden i Danmark.

Fjernvarme er en meget fleksibel energibærer, idet mange forskellige energikilder kan producere den nødvendige varme: overskudselektricitet fra vindmøller (direkte eller ved hjælp af varmepumper), solenergi, biomasse, biogas, spildvarme fra industriprocesser, forbrænding og geotermi. Hertil kommer, at lagre let kan integreres i fjernvarmesystemer, hvilket gør det muligt at lagre overskudsenergi til dage med energiunderskud. De gældende tarifstrukturer for fjernvarme er dog problematiske. Der er tale om en fast betaling pr. MWh året rundt. Desuden er energiregningen ofte delt op i en høj fast årlig kvadratmeterafhængig afgift for tilslutningen og en lav pris for selve energiforbruget. Derfor er fjernvarme mindre attraktiv i en privatøkonomisk sammenhæng, når det gælder Net ZEB, da energiregningen reduceres med et relativt beskedent beløb sammenlignet med energiregningen for ikke-Net ZEB. Denne problemstilling behandles yderligere i afsnittet om BOLIG+.

Definitionen på Net ZEB ændrer sig over tid – se figuren på side 8. I 2015 vil der fortsat være en positiv effekt af decentral vedvarende energiproduktion på bygningerne. Fra 2020 til 2035 vil energisammensætningen i energinettene i stadig stigende grad blive baseret på vedvarende energikilder. Hermed reduceres den positive effekt af lokal vedvarende energiproduktion, med mindre denne energiproduktion kan eksporteres med en bedre kvalitet og anvendelighed end den energi, som findes i energinettet. Men for at kunne tage højde for en stor og fluktuerende mængde vedvarende energi i el-nettet uden en betydelig forstærkning af nettet er det nødvendigt, at energibehovet for bygninger bliver fleksibelt, så bygninger kan virke stabiliserende på el-nettet.

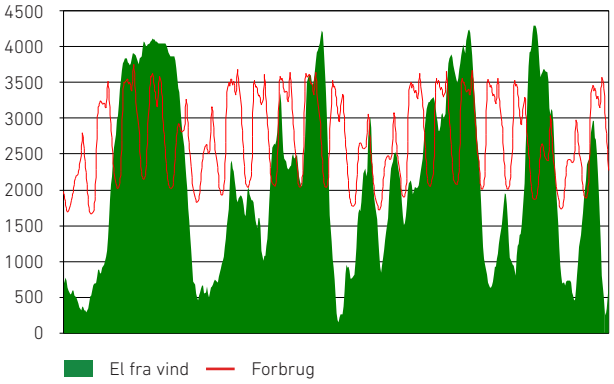
Central og decentral vedvarende energi behandles senere i kapitlet om Energiforsyningssystemer.

SMART GRID/ENERGI

Den danske regering har besluttet, at mindst 50 % af Danmarks elektricitet i 2020 skal komme fra vindenergi, at behovet for energi til opvarmningsformål og elektricitet i 2035 udelukkende vil være baseret på vedvarende energi, og at hele energisystemet i 2050 skal baseres på vedvarende energi. Der er dog brug for, at energikilder som vind- og solenergi balanceres i energisystemet. Hvis det ikke sker, kan stabiliteten i energinettet blive alvorligt påvirket, når disse energikilder udgør en stor andel af den totale energiproduktion.

Figur 5 viser den forventede elektricitetsproduktion fra vindmøller i januar måned i den vestlige del af Danmark i 2020, sammen med el-forbruget i 2008. Allerede hvis 50 % af det årlige elektricitetsbehov dækkes af vindenergi, vil der opstå lange perioder med overskudsproduktion, mens der også vil være perioder med stort underskud, selv i et system, hvor det årlige energiforbrug er 100 % baseret på vedvarende energi. Derfor forudsætter en fremtidig overgang til udelukkende fluktuerende vedvarende energikilder, at der sker en ændring fra "produktion efter behov" til "forbrug efter produktion" for at kunne modsvare den øjeblikkelige energiproduktion, hvilket i praksis betyder, at forbruget nødvendigvis skal gøres mere fleksibelt.

I dag dimensioneres distributionsnettet ofte på basis af, at bygninger opvarmes med andre energiformer end elektricitet, fx olie og gas. Overgangen til et rent vedvarende energisystem vil dog i mange områder gøre det nødvendigt at skifte til elektrisk



Figur 5. Den forventelige produktion af vindenergi i januar 2020 i den vestlige del af Danmark, baseret på vindforhold i 2008. Den røde graf viser det målte el-behovet i 2008 i det samme område (Energinet.dk).

opvarmning fx ved hjælp af varmepumper. Det betyder enten, at mange eksisterende distributionsnet skal forstærkes, eller at der indføres en mere intelligent måde at bruge elektricitet på, som vist i figur 6.

Bygninger kan reducere behovet for en forstærkning af distributionsnettet på to måder: 1) ved reduktion af energibehovet i bygningen og 2) ved indførsel af fleksibelt el-forbrug. Det Strategiske Forskningscenter beskæftiger sig med mulighed nr. 1.

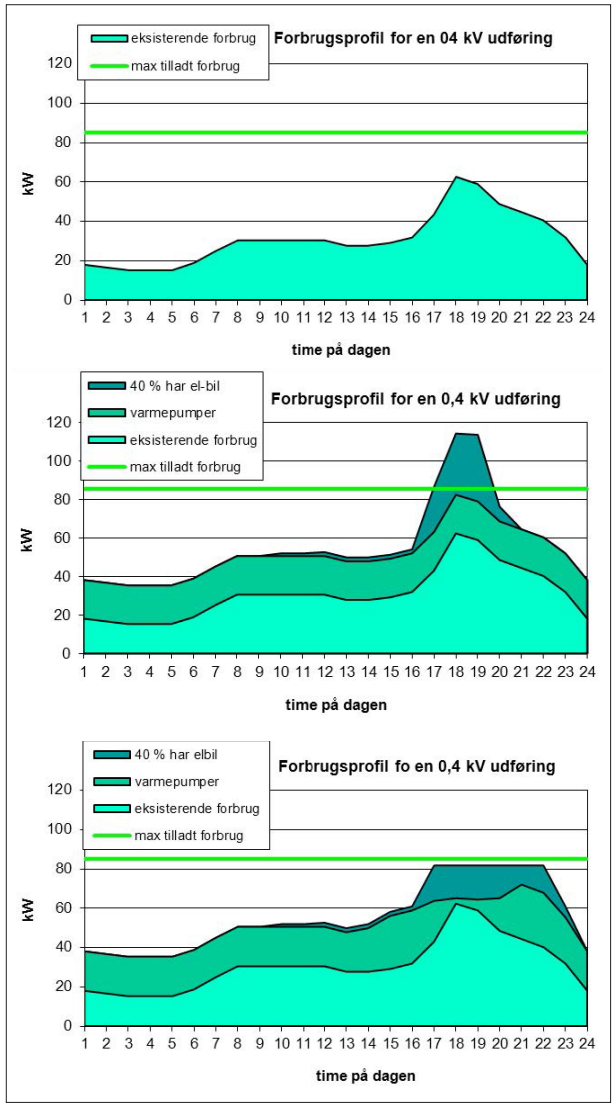
Option 2 er mulig, da alle bygninger er født med en vis mængde termisk masse i konstruktionerne, hvor der kan lagres en vis mængde varme. Afhængig af størrelsen af den termiske masse er det muligt at udskyde opvarmning eller køling i et vist stykke tid uden at kompromitere komforten i bygningen. Hvis bygningen ydermere forud for stop af varme/køling bliver opvarmet/kølet mere end nødvendigt dog inden for komfortområdet, er det muligt at forlænge perioden uden opvarmning/køling. Bygningens tidskonstant ligger – afhængig af den termiske masses størrelse, varmetabet, den interne varmelast og de aktuelle klimaforhold – typisk mellem en time og adskillige dage og vil derfor muliggøre "c"-eksemplet i figur 6.

I mange bygninger er der desuden en form for lagring af vand, som kan øge bygningens fleksibilitet. Et eksempel er bygningers varmtvandsbeholder. Denne beholder kan forud for en situation med lav energiproduktion varmes op til en højere temperatur end nødvendigt. Den overskydende varme kan så bruges til rumopvarmning eller til hårde hvidevarer som opvaskemaskiner, vaskemaskiner og tørretumblere for at nedbringe deres behov for elektricitet til opvarmning af vand eller tøj.

Udsving i energiproduktion kan dog håndteres på flere forskellige måder. I byer med fjernvarme kan overskydende vind-el bruges til opvarmning i fjernvarmeværker. For at kunne lagre tilstrækkeligt med varme kan den termiske masse i de bygninger, der er koblet til fjernvarmenettet, bruges på samme måde som i bygninger med varmepumper. Udsvingene i energiproduktion kan også håndteres ved at kombinere flere forskellige vedvarende energikilder udover elektricitet fra vind og sol, såsom biomasse, biogas, geotermi osv. Så udover det elektricitetsrelaterede udtryk Smart Grid bruges også den bredere term Smart Energi.

Figur 6. Graferne viser eksempler på indførelse af varmepumper og el-biler i en 0,4 kV udføring/radial.

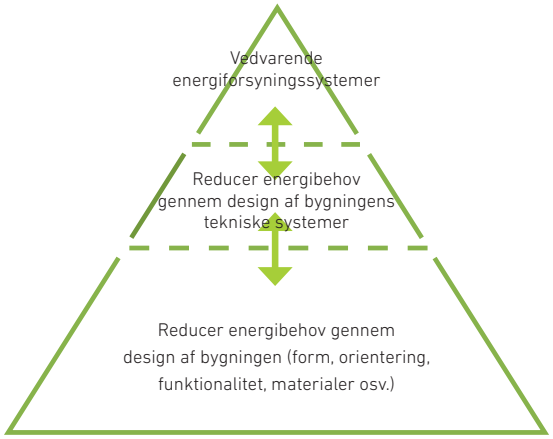
a) Den nuværende situation
b) Business as usual hvor varmepumper og el-biler i systemet kræver en forstærkning af nettet, idet forbruget overstiger den maksimalt tilladte belastning.
c) En Smart Grid-løsning, hvor bygninger forud for kogespidsen (17.00-20.00) varmes mere op end nødvindigt dog inden for komfortområdet. Bygningerne har derfor kun brug for lidt energi til opvarmning under kogespidsen, men har efterfølgende behov for ekstra varme. Opladning af el-biler styres intelligent for at holde det samlede el-forbrug under den maksimalt tilladte belastning.



MULIGE **NET ZEB-LØSNINGER**

Et sæt Net ZEB-løsninger er en kombination af bygningskomponenter og energitekniske installationer, der indbyrdes samarbejder og tilsammen udgør et energineutralt byggeri. Listen over Net ZEB-løsninger er lang - nogle eksempler vises på den følgende side. Forskningscentret har ikke arbejdet med at udvikle komplette Net ZEB-løsninger (med undtagelse af retningslinjerne for design af Net ZEB gengivet i (Bejder, Knudstrup, Jensen og Katic, 2014), men på at udvikle delelementer, som er vigtige for samlede Net ZEB-løsninger. En Net ZEB-løsning, som fungerer godt i én sammenhæng, kan fungere mindre godt i en anden sammenhæng.

Udgangspunktet for design af Net ZEB er at reducere energibehovet mest muligt ved hjælp af en effektiv klimaskærm. Dernæst skal der anvendes højeffektive energitekniske installationer til opvarmning, køling, ventilation, varmt brugsvand, osv. Og endelig skal det resterende energibehov dækkes ved hjælp af vedvarende energikilder. Figuren herunder illustrerer denne tilgang til processen. Størrelsen af de tre trin indikerer prioriteten af de enkelte trin.



Der findes mange forskellige kombinationer af de tre kategorier i figuren til at udvikle Net ZEB. Den optimale løsning kan desuden variere i forhold til geografisk placering og være afhængig af den lokale kontekst (arkitektur, orientering, det lokale forsyningsnet osv.).

Resten af denne publikation er inddelt i afsnit baseret på denne inddeling:

- Reduktion af energibehovet
- Effektive energitekniske installationer
- Vedvarende energiforsyning.

Forskningscentrets målsætning har ikke været at skabe generiske Net ZEB-løsninger. Som tidligere nævnt er forskningen for størstedelens vedkommende gennemført som ph.d.-projekter. Disse har typisk et ret smalt forskningsfelt, idet de undersøger et enkelt emne meget grundigt. Resultaterne af et ph.d.-projekt er derfor ikke fuldt udviklede Net ZEB-løsninger men brikker, som kan bruges i integrerede Net ZEB-løsninger.

Undersøgelser af tekniske løsninger, som er gennemført i forskningscentret, vil i det følgende blive grupperet og præsenteret kort. Håbet er, at denne præsentation af de forskellige forskningsprojekter vil inspirere læserne til at dykke ned i forskningscentrets publikationer.

DANSKE NET ZEB-EKSEMPLER

For at kunne etablere Net ZEB er det nødvendigt at reducere bygningens energibehov, så der er tilstrækkelig plads på byggeriets tag og facader eller andre steder på matriklen, til at der kan produceres en tilstrækkelig mængde vedvarende energi til at dække det resterende energibehov. Et højt isoleringsniveau kombineret med effektive energitekniske installationer og brug af passiv solenergi er derfor et nødvendigt første skridt på vejen frem mod etablering af Net ZEB.

Reduktion af de interne belastninger er også essentiel for udviklingen af Net ZEB. Byggeriets isoleringsniveau vil uden tvivl føre til uacceptable indetemperaturer, hvis et højt solindfald falder sammen med store interne belastninger fra mennesker, belysning og apparater i bygningen. Det er derfor meget vigtigt, at disse energistrømme reguleres og optimeres i forhold til hinanden.

Tabellen til højre viser konfigurationen i tre forskellige Net ZEB-byggerier og et Passivhus. I alle eksemplerne er isolationsstandarden betydeligt højere end de minimumskrav for nybyggeri, som fremgår af BR10. På de fleste områder er bygningerne bedre end kravene til Bygningsklasse 2020.

De fire eksempelbygninger har alle et meget højt isoleringsniveau og tre lag lavenergiglas i de fleste vinduer. Endvidere er de opført med ekstra fokus på en lufttæt klimaskærm, og de har mekanisk ventilation med meget effektiv varmegenvinding. Om sommeren har nogle af bygningerne naturlig ventilation for at undgå brug af elektricitet til ventilatorer, og for at reducere risikoen for overophedning. På grund af de primærenergifaktorer, som blev anvendt i byggeriets designfase har alle bygningerne varmepumper. I Bygningsreglement 2010 er primærenergifaktorerne for fjernvarme og el ændret for bygninger, som opfylder kravene til Bygningsklasse 2020, så fjernvarme er beregningsmæssigt lige så fordelagtig som varmepumper.

	EnergyFlex house	Bolig for livet	Komforthus Stenagervænget 43	BOLIG+
		Foto: Adam Mørk, Copyright VELUX A/S		
Type	Energineutralt hus	Aktivt hus	Passivt hus	Energineutral boligblok
Areal	216 m^2	190 m^2	214 m^2	7000 m^2
Vinduer	Velfac helo og Velux ovenlysvinduer U=0,73-0,90 W/m^2K	Velfac helo and Velux ovenlysvinduer U=0.73-0,90 W/m^2K	Häussler Passiv Therm U_{gns}=0,76 W/m^2K	U_{gns}= 0,9 W/m^2K
Ydervæg	480 mm isolering (U=0,08 W/m^2K)	395 mm isolering (U=0,10 W/m^2K)	400 mm isolering (U=0,09 W/m^2K)	U = 0,10 W/m^2K
Tag	500 mm isolering (U=0,09 W/m^2K)	540 mm isolering (U=0,07 W/m^2K)	600 mm isolering (U=0,06 W/m^2K)	U = 0,07 W/m^2K
Gulv	400 mm isolering (U=0,11 W/m^2K)	500 mm isolering (U=0,07 W/m^2K)	400 mm isolering (U=0,09 W/m^2K)	U = 0,08 W/m^2K
Infiltration	0,076 l/s pr. m^2	0,129 l/s pr. m^2	0,068 l/s pr. m^2	0,064 l/s pr. m^2
Ventilation	Behovsstyret mekanisk ventilation med varmegenvinding (76 %) og naturlig ventilation om sommeren	Behovsstyret ventilation med varmegenvinding (76 %) og naturlig ventilation om sommeren	Mekanisk ventilation med varmegenvinding (88 %)	Individuelt reguleret mekanisk ventilation med varmegenvinding (85 %) og naturlig ventilation om sommeren
Opvarmning	Jordvarmepumpe	Jordvarmepumpe	Jordvarmepumpe	Kombination af solvarme og luftvarmepumpe (alternativt grundvand)
Vedvarende energi	4,8 m^2 solvarme 60 m^2 PV, 10,5 kWp	6,7 m^2 solvarme 50 m^2 PV, 6,8 kWp	Ingen	800 m^2 PV på taget, heraf 200 m^2 PVT, og 900 m^2 på altanbrystninger. Totalt: 236 kWp
Link	teknologisk.dk/projekter/energyflexhouse	activehouse.info/cases/home-life	komforthusene.dk	boligplus.org

REDUKTION AF ENERGIBEHOVET

REDUKTION AF ENERGIBEHOVET

Den normale fremgangsmåde for at opnå Net ZEB er først at reducere energibehovet i selve bygningen. Det gøres ved at optimere klimaskærmen for at reducere varmetabet i opvarmningssæsonen og samtidig forhindre overophedning om sommeren. Det er derfor nødvendigt at fokusere på et højt isoleringsniveau i kombination med udnyttelse af passiv solvarme gennem klimaskærmens transparente dele. Samtidig bør det forhindres, at bygningen tilføres så meget solvarme, at den overophedes. Når klimaskærmen er optimeret, skal bygningens energitekniske installationer optimeres, så de kan sikre et godt indeklima på den mest energieffektive måde. Sidst dækkes det resterende energibehov ved hjælp af vedvarende energi.

Med hensyn til optimering af klimaskærmens isoleringsmæssige egenskaber er der generel enighed om, at behovet for rumopvarmning i en Net ZEB bør være så lavt som muligt. Behovet bør ligge omkring 7-10 kWh/m^2 opvarmet gulvareal pr. år uden tilførsel af energi fra vedvarende energikilder – dvs. lavere end angivet i afsnittet Energineutralt byggeri. Det er afgørende at stræbe efter dette ekstremt lave energibehov, da dette skal sikre, at der er tilstrækkelig plads på bygningens klimaskærm eller på matriklen for at kunne dække det resterende energibehov ved hjælp af vedvarende energi. I hvert fald indtil det samlede energisystem er 100 % fri for fossile brændsler.

Udover bygningskroppens isoleringsevne er det vigtigt at kunne håndtere fluktuationer i udeklimaet, i interne belastninger og på sigt i forsyningssystemet. Det kan opnås ved varmelagring i konstruktionerne eller i særlige lagringsmedier (fx vandtank, PCM, is-lager). Bygningskonstruktionernes lagerkapacitet kan øges gennem brug af tunge byggematerialer, som eksponeres for rumluften, hvilket vil medføre temperatursvingninger i konstruktionerne. En anden mulighed er at benytte faseskiftende materialer (PCM) i bygningskonstruktionerne for herved at øge konstruktionernes varmekapacitet. Herved kan temperaturudsvingene i rumluften nedbringes, fx udsving der forekommer på daglig basis.

En klimaskærm med en høj isoleringsstandard og udnyttelse af bygningens termiske masse er ikke i sig selv tilstrækkelig til at skabe en energieffektiv bygning. Lufttæthed er også vigtig, da utætheder er skyld i en stadigt stigende andel af byggeriets samlede energitab i takt med at klimaskærmens isoleringsniveau stiger. En lufttæt klimaskærm vil sikre, at ukontrolleret tilførsel af udeluft reduceres til et minimum. Det vil medføre, at det nødvendige luftskifte kan kontrolleres – ofte mekanisk, i det mindste i opvarmningssæsonen – og varmetabet ved ventilation kan reduceres ved effektiv varmegenvinding.

Klimaskærmens passive egenskaber er allerede behandlet i et stort antal publikationer gennem de seneste årtier og anerkendes som et vigtigt middel til udvikling af byggeri med lavt energiforbrug. Tidligere blev et kompakt bygningsdesign anset for at være kendetegnende for energieffektivt byggeri. Men brugen af store isoleringstykkelser og højeffektive ruder i klimaskærmen, foruden behovet for et godt og sundt indeklima, har bevist, at dette er en sandhed med modifikationer. Ved kompakt byggedesign kan der opstå risiko for, at dagslysniveauet i bygningen falder, hvilket medfører et øget behov for kunstig belysning og dermed en potentiel risiko for, at køling bliver nødvendig som følge af øget varmelast.

Forskningscentret har ikke beskæftiget sig med klimaskærmen generelt, men fokuseret på dynamiske facader. Dvs. facader, som muliggør en dynamisk regulering af transporten af varme, dagslys og luft gennem facaderne (hen over dagen og året). Dette er primært interessant i byggeri, der ikke anvendes som boliger, og hvor de interne belastninger ellers kan medføre et behov for mekanisk køling.

DYNAMISKE FACADER

REFERENCE: (WINTHER, 2012), (LIU, 2014)

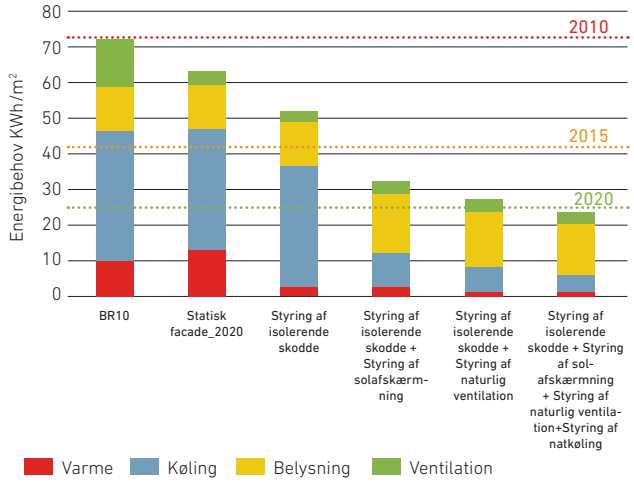
Styringsstrategier for facadekomponenter med glas, solafskærmning, isolerende skodder, ventilation osv. er nødvendige for at minimere energibehovet og optimere indeklimaet i Net ZEB. Ved brug af dynamiske facader er det muligt at beskytte brugerne mod uønskede påvirkninger fra udeklimaet med minimalt energiforbrug. Følgende funktioner af facaden er undersøgt:

- Afskærmning mod solen og naturlig køling til forbedring af den termiske komfort og opnåelse af bedre lysforhold, primært ved brug af dagslys.
- Reduktion af varmetab ved bevægelig natisolering.
- God luftkvalitet og reduktion af varmebelastningen ved brug af naturlig ventilation og ved at bruge facaden som et aktivt element til styring af luftskiftet.
- Udnyttelse af passiv solvarme og reduktion af varmebehovet ved flytbar isolering.
- Muligheden for at forbedre indeklimaet for at opnå øget sundhed, komfort og effektivitet hos brugerne.

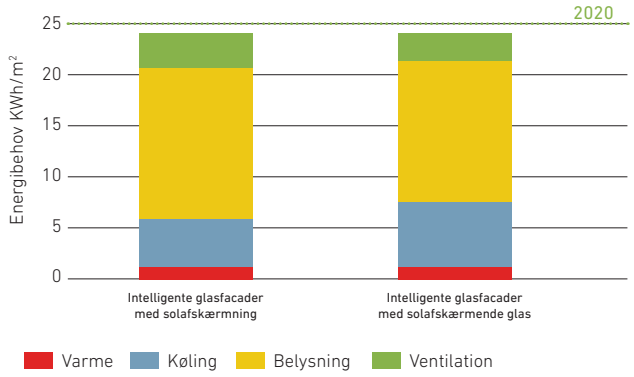
Beregninger (figur 9) viser, at energiforbruget i et kontorlokale kan reduceres markant ved at udnytte intelligente glasfacader med en optimal kombination af styringsstrategier. Ved hjælp af forskellige styringsstrategier kan energibehovet i en kontorbygning eksempelvis reduceres fra 63 til 24 kWh/m^2 pr. år. Ved udnyttelse af optimal styring af dynamiske facader er det muligt, med den samme isoleringsstandard for facaden, at reducere energibehovet fra et niveau lige under mindstekravet til BR10 byggeri til et niveau svarende til Bygningsklasse 2020. Dynamisk styring af isolering, solafskærmning og ventilation kan således markant reducere energiforbruget til opvarmning og køling. Det er også muligt at reducere energiforbruget til ventilation, hvis naturlig ventilation gennem vinduesåbninger helt eller delvist kan dække behovet for ventilation i lokalet.

Bevægelige dele i facaden er ofte en dyr løsning, og derfor er denne løsning sammenlignet med løsninger uden bevægelige dele. Undersøgelsen viste at intelligente glasfacader med fast solafskærmning eller solafskærmende glas ofte kan anbefales frem for bevægelig solafskærmning på grund af de lavere vedligeholdelsesomkostninger og det rimelige energiforbrug, der kan opnås med disse metoder – se figur 10.

Normalt er solafskærmende glas kun en acceptabel løsning i bygninger, der ikke benyttes til boligformål, og som har behov for køling en stor del af året. Fast solafskærmning eller solafskærmende glas i boliger, vil medføre et forøget opvarmningsbehov om vinteren da det ikke er muligt at fjerne afskærmningen på denne tid af året.



Figur 9. Energiforbrug i kontorbygning med forskellige styringsstrategier. Kravet til nye kontorbygninger opført i henhold til Bygningsreglement 2010, Lavenergiklasse 2015 eller Bygningsklasse 2020 er vist som vandrette linjer.



Figur 10. Sammenligning mellem facader med bevægelig solafskærmning og solafskærmende glas.

NATURLIG VENTILATION

Det er ofte muligt ved hjælp af naturlig ventilation at opretholde en acceptabel luftkvalitet i en bygning. Drivkraften ved naturlig ventilation er forskelle i tryk mellem ude og inde. Denne forskel opstår på grund af forskelle i termisk opdrift og/eller ekstern vindpåvirkning på bygningen. Om naturlig ventilation er effektiv nok til at give en acceptabel luftkvalitet, afhænger af mikroklimaet (lokal vindstyrke, temperatur, luftfugtighed, forurening, omgivende topografi) omkring bygingen og af selve byggeriet (størrelse og orientering, antal bygninger og antal åbninger samt bygningernes størrelse og placering).

Naturlig ventilation kan anvendes til at køle en bygning, når udeluftens temperatur er lavere end rumluftens. Udeluft kan fx også køle bygningens termiske masse om natten, hvor udetemperaturen typisk er lavere end rumtemperaturen. Især kan naturlig ventilation bruges til hurtig forbedring af indeklimaet ved, at vinduer åbnes. Når udeforholdene er fordelagtige, kan energiforbruget ved denne type ventilation nedbringes til nul, hvis bygningen er opført i overensstemmelse med de betingelser, som gælder for naturlig ventilation. Naturlig ventilation gør det også muligt for brugeren selv at regulere indeklimaet. Naturlig ventilation kan i lande med et mildt klima anvendes til at køle bygningen om sommeren. Derfor er naturlig ventilation et åbenlyst valg til ventilation af Net ZEB uden for opvarmningssæsonen.

Forskningscentret har gennemført fire undersøgelser på dette område:

- Beregningsmetoder for naturlig ventilation gennem tagvinduer
- Naturlig ventilation ved hjælp af dynamiske facader (to projekter)
- Naturlig ventilation om sommeren i enfamiliehuse.

I det følgende bliver resultaterne af de fire undersøgelser kort beskrevet. For yderligere information henvises der til referencerne i teksten.

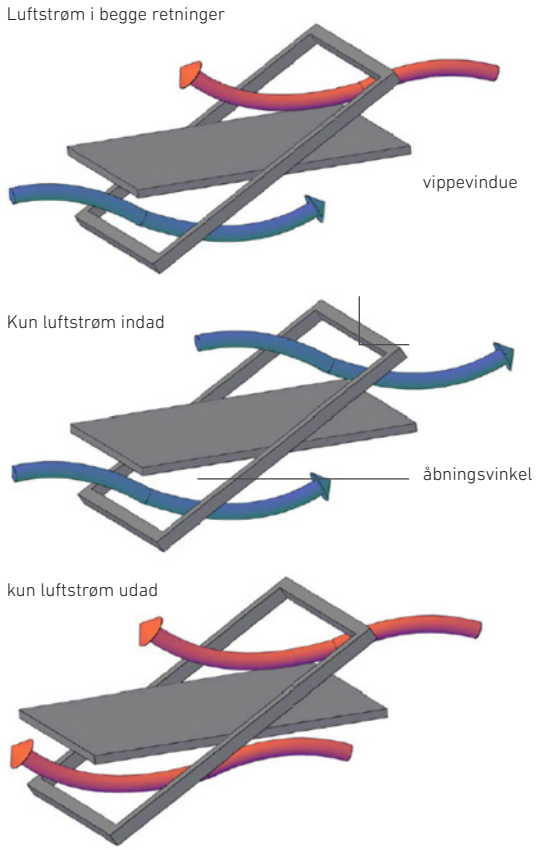
NATURLIG VENTILATION GENNEM TAGVINDUER

REFERENCE: (IQBAL, 2013)

Luftstrømmen gennem åbninger og vinduer i klimaskærmen afhænger af trykforskellen over dem, deres geometriske udformning og tryktab i strømningsretningen. I praksis defineres volumenstrømmen ved hjælp af trykfaldet over åbningen, åbningens frie gennemstrømningsareal samt en empirisk bestemt udstrømningskoefficient. Typiske (konservative) værdier for udstrømningskoefficienten kan findes i faglitteraturen, men ønskes en større nøjagtighed er det nødvendigt at undersøge de særlige karakteristika for forskellige typer af åbninger og vinduer. Detaljeret kendskab til disse karakteristika er - generelt for vinduer og i særdeleshed for tagvinduer - begrænset.

Dette gælder også for vippevinduer (der vipper om en vandret midterakse – se figur 12), som er den mest anvendte type tagvinduer i boligbyggeriet i Danmark. Ph.d.-projektet har derfor fokuseret på at fastlægge strømningstekniske karakteristika for denne vinduestype. De gennemførte undersøgelser har vist, at den lokale trykfordeling på tagfladen påvirkes meget, når vinduet åbnes. Vinduets udstrømningskoefficient falder således proportionelt med åbningsvinklen og er ikke en konstant værdi. Undersøgelserne konkluderede, at udstrømningskoefficienten er en funktion af vinduets udformning, åbningsvinklen og taghældningen.

Projektets resultater har givet øget viden om luftstrømmen gennem åbne vippevinduer. Viden som er vigtig for udformning og forståelse af naturlige ventilationssystemer og dermed også for design af Net ZEB. Projektet har vist, at luftstrømmen ind gennem et vippevindue i traditionelle beregninger kan være underestimeret med 30-76%. I traditionelle beregninger vil strømningen ud gennem et vippevindue være overestimeret ved små åbningsvinkler, og underestimeret for store åbningsvinkler.



Figur 12. Luftstrøm gennem vippevinduer

NATURLIG VENTILATION GENNEM INTELLIGENTE FACADER

REFERENCE: (WINTHER, 2012) OG (LIU, 2014)

Intelligente glasfacader (beskrevet under Klimaskærmen) kan bidrage til styring af naturlig ventilation, ved at åbninger i facaden styres. Åbninger i facaden og luftstrømmen i det mekaniske ventilationssystem bør styres synkront for at sikre, at kravene til indeklima og termisk komfort opfyldes med det mindst mulige energiforbrug.

Ved at anvende en kombination af naturlig ventilation og decentral mekanisk ventilation gennem facaden kan behovet for el til ventilation reduceres markant, dels på grund af det lavere tryktab i disse komponenter, og dels fordi ventilatorerne kan standses i perioder hvor der er mulighed for udelukkende at benytte naturlig ventilation. Et eksempel viser en reduktion i el-forbruget til ventilatorerne fra 25 til 6 kWh/m^2 pr. år ved at benytte denne strategi.

For at udnytte mulighederne for styring af naturlig ventilation gennem en dynamisk facade, er det nødvendigt at designe facaden, så større eller mindre arealer i facaden kan åbnes under hensyn til minimering af risikoen for træk. Det er desuden vigtigt at, styringen af facadens åbninger sker på en måde som, ikke giver støjgener for brugerne af bygningen og som manuelt kan overstyres af hensyn til den gennerelle accept af systemet.

NATURLIG VENTILATION OM SOMMEREN I ENFAMILIEHUSE

REFERENCE: (JENSEN, 2014).

Flere undersøgelser af eksisterende lavenergibygninger (Larsen, 2011) viser, at der kan være problemer med indeklimaet – for lavt luftskifte og for høje temperaturer. Disse problemer findes dog også i eksisterende byggeri.

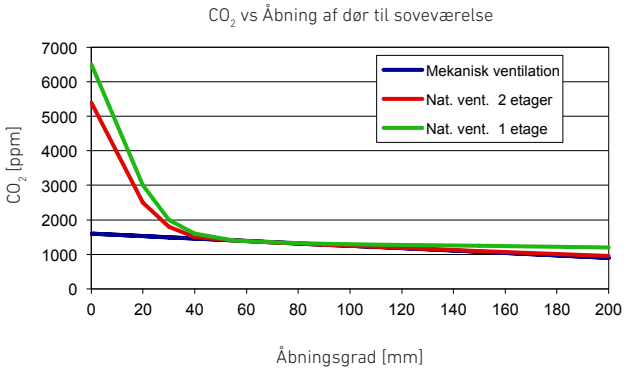
En undersøgelse af, hvordan naturlig ventilation i sommermånederne kan løse disse problemer i enfamiliehuse, blev gennemført af forskningscentret i (EnergyFlexHouse, 2013) på Teknologisk Institut. EnergyFlexHouse er et hus i to etager, som kan deles horisontalt i to separate lejligheder. Det er muligt at styre åbning/lukning af tagvinduer, vinduer i hver ende af gangen samt friskluftventiler til de fire soveværelser i stueetagen. Styringen kan ske på baggrund af en vilkårlig kombination af målt temperatur, fugt og CO_2 i de enkelte rum.

Forskellige ventilationsstrategier og reguleringsmetoder blev sammenlignet med et kompakt mekanisk ventilationssystem. Sammenligningen blev muliggjort af, at husets beboere var kunstige i form af tønder, som afgav varme, fugt og CO_2 på kontrolleret vis – se figur 13. En fast tidsplan for "beboerne" inkl. brusebade blev anvendt gennem hele undersøgelsen.

Undersøgelsen viste følgende:

- Kompakte mekaniske ventilationssystemer med effektiv varmegenvinding, men uden bypass, fører til overophedning i sommerperioden. Denne type ventilationsanlæg bør kun anvendes i kombination med (kontrolleret) naturlig ventilation.
- Mekanisk ventilation med volumenstrømme der overholder BR10 vil føre til høje CO_2-koncentrationer om natten i soveværelser med lukkede døre.
- Naturlig ventilation (og solafskærmning) kan i de fleste tilfælde modvirke problemer med overophedning, når omgivelsestemperaturerne ligger nogle grader under komfortgrænsen; fx kan komfortklasse II opretholdes ved en udetemperatur under 26°C.
- Det er lettere at skabe et tilstrækkeligt luftskifte ved naturlig ventilation i toetages byggeri end i enetages byggeri.
- Det er vanskeligt at opretholde komfortklasse II for både temperatur og CO_2–især om natten, hvor temperaturen i huset kan falde til under 20 °C i visse rum.
- Døre til soveværelset bør stå på klem om natten med en sprække på ca. 100 mm for at nedbringe CO_2-niveauet. Dette gælder både ved naturlig ventilation og balanceret mekanisk ventilation, se figur 14.
- Fugt var ikke noget problem ved de anvendte ventilationsstrategier.

Figur 13. Tønde som simulerer mennesker.



Figur 14. CO_2-niveauet i et topersoners soveværelse afhængig af, hvor meget døren er åben.

NATURLIG KØLING

Forskningscentret har ikke arbejdet systematisk med naturlige kølesystemer (defineret ved, at de ikke anvender en kølingsmaskine fx i form af en kompressor). Centret har fokuseret på at nedbringe kølebehovet ved hjælp af solafskærmning, ventilation med udeluft (naturlig ventilation og natkøling) og ved brug af termisk masse til at udjævne effekten af varmebelastning. Der er gennemført tre undersøgelser på dette område:

- Reduktion i kølebehovet ved hjælp af intelligente facader.
- Reduktion af overophedning i enfamiliehuse.
- Termisk aktive loftspaneler med faseskiftende materialer (PCM).

Resultaterne af de tre undersøgelser bliver kort beskrevet i det følgende. For yderligere information henvises til referencerne i teksten.

REDUKTION AF KØLEBEHOV VED HJÆLP AF INTELLIGENTE FACADER

REFERENCE: (WINTHER, 2012) OG (LIU, 2014)

Intelligente glasfacader (beskrevet under Klimaskærmen) kan bidrage til energibesparelser i form af reduktion af behovet for køling ved styring af naturlig ventilation og solafskærmning. Solafskærmning kan styres i forhold til rum- og udetemperaturer samt solstråling for at opretholde et passende termisk komfortniveau under hensyn til behovet for adgang til dagslys. Køling ved hjælp af naturlig ventilation kan anvendes, når udetemperaturen er lavere end rumtemperaturen. Naturlig ventilation kan desuden bruges til køling af bygningens konstruktioner om natten, hvilket vil medføre en lavere starttemperatur i bygningen om morgenen, som dog skal være inden for komfortområdet. På denne måde er det muligt at reducere behovet for mekanisk køling den følgende dag idet konstruktionerne bruges som kuldelager.

Installation af komponenter til reduktion af kølebehovet i bygninger ved hjælp af intelligente facader er i sig selv ikke nok til at sikre et lavt energiforbrug eller en optimal komfort. Det er nødvendigt også at implementere en styring som tager hensyn til bygningen og brugen af bygningen. Solafskærmning er fx et kompromis mellem behovet for at få dagslys ind i bygningen og kravet om at holde indetemperaturen på et passende niveau. En for effektiv solafskærmning vil medføre risiko for øget elforbrug til kunstig belysning, med deraf følgende varmeafgivelse inde i bygningen. Tilsvarende er det nødvendigt at styre tilstrømningen af naturlig ventilation, dels for at imødegå træk når bygningen er i brug, og dels for at sikre en passende indetemperatur om morgenen, når den naturlige ventilation bruges til natkøling. Det kan dog i nogle tilfælde være mest energibesparende at underkøle bygningskonstruktionerne (specielt i tilfælde med stor termisk masse) og opvarme rumluften og de indvendige overflader for at opnå en god termisk komfort om morgenen, men stadig have køling gemt i konstruktionerne til senere på dagen.

I et beregnet eksempel blev kølebehovet i et kontorrum reduceret fra 10 til 1 kWh/m^2 pr. år pr. år blot ved montering af udvendig solafskærmning og optimeret styring af afskærmningen.

REDUKTION AF OVEROPHEDNING I ENFAMILIEHUSE

REFERENCE: (JENSEN, 2013)

Reduktion af overophedning i sommermånederne i enfamiliehuse ved hjælp naturlig ventilation er allerede beskrevet under Naturlig ventilation. Ved at kombinere solafskærmning og naturlig ventilation er det muligt at forebygge overophedning i hovedparten af sommerperioden og i ydersæsonerne. Problemer forekommer i perioder, hvor udetemperaturen ligger i nærheden af eller over max. niveauet for termisk komfort - fx 26 °C for komfortklasse II.

TERMISK AKTIVE LOFTSPANELER MED PCM

REFERENCE: (PAVLOV, 2014)

Loftsmonterede paneler, som indeholder faseskiftende materiale (PCM), er en lovende løsning til at øge den termiske masse i nyt, let byggeri og ved renovering af eksisterende byggeri. Virkningen - i form af termisk komfort og kølebehov - af PCM-gipsplader i loftet i en kontorbygning er blevet undersøgt ved forsøg med PCM-plader med forskellige smeltepunktstemperaturer og et antal forskellige køleprincipper.

TERMISK MASSE I BYGNINGER

Anvendelse af termisk masse i bygningens bærende konstruktioner er et energieffektivt koncept for erhvervs- og kontorbyggeri. Den termiske masse i en bygning kan køles om natten for at flytte og reducere spidsbelastningen for kølebehovet den følgende dag og derved reducere energiforbruget til køling.

Udnyttelse af bygningers termiske masse (via naturlig, hybrid eller mekanisk natventilation) og termisk aktive byggesystemer (TABS - hvor kølingen sker inde i konstruktionen) er velkendte principper. I begge tilfælde anvendes konstruktionernes termiske masse til lagring og bliver derved en del af bygningens samlede energisystem. Overskudsvarme i løbet af dagen lagres i massive gulve, lofter og vægge, som afkøles om natten ved hjælp af ventilation eller et indstøbt rørsystem.

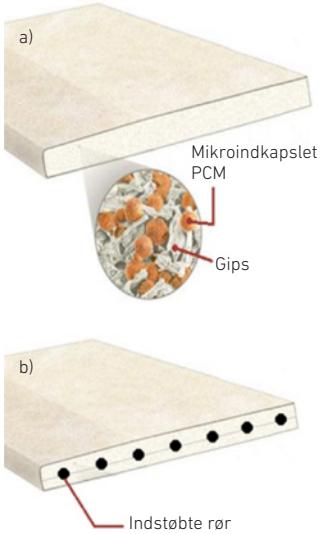
Konventionelle passive og aktive koncepter for aktivering af den termiske masse kan ikke anvendes i let byggeri med en meget lille indvendig termisk masse. I tungt byggeri har bygningsmaterialerne den nødvendige termiske masse. Der er derimod brug for alternative løsninger til let byggeri. Det er ikke enkelt at tilføre yderligere termisk masse til et eksisterende byggeri, fordi let byggeri ofte ikke kan bære den ekstra vægt. Desuden er det problematisk at indstøbe rør i betondæk som led i et ombygningsarbejde.

LOFTPANELER MED PCM

Faseændrende materialer (PCM) kan lagre meget større mængder termisk energi pr. masse- eller volumenenhed end konventionelle byggematerialer som mursten og beton, idet energien hovedsagelig lagres som latent varme i PCM. Med udviklingen af PCM-mikroindkapsling er der opnået et betydningsfuldt gennembrud mht. inkorporering af PCM i byggekomponenter som fx gipsplader.

Gipsplader er det mest anvendte materiale til væg- og loftsbeklædning i let byggeri. Loftspaneler af gips kombineret med mikroindkapslet paraffinvoks er illustreret skematisk i figur 15.

Både passive loftspaneler kombineret med naturlig natventilation og aktive loftspaneler med indstøbte rør til natkøling kan overvejes. De to muligheder vises i figur 15 og 16.



Figur 15. Loftspaneler af gips med mikroindkapslet PCM.
a) passivt panel, b) aktivt panel.

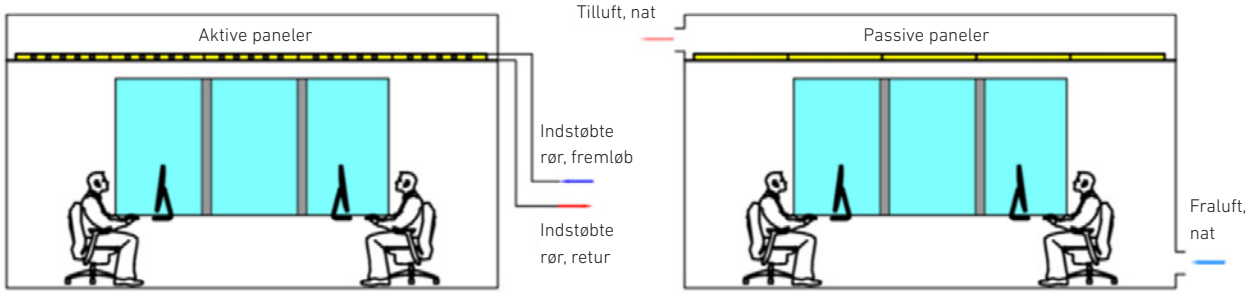
Resultater fra studiet viser, at en effektiv natkøling er vigtig for nedkøling og størkning af PCM-materialet i loftspanelerne, så det kan optage overskydende varme den følgende dag. Natkøling ved ventilation, som er afhængig af lokale klimaforhold, er ikke så effektiv for afgivelse af den lagrede varme pga. PCM's ringe varmeledende egenskaber. Brug af indstøbte rør til natkøling giver en mere effektiv udnyttelse af den termiske masse i PCM-paneler, uafhængigt af det lokale udeklima.

Resultaterne fra undersøgelsen antyder, at PCM-plader med en smeltepunktstemperatur i nærheden af den ønskede middeltemperatur i lokalet er mest fordelagtige mht. temperaturregulering. Den højeste rumtemperatur i løbet af dagen blev nedbragt med 2-3 °C, og overophedning blev undgået. Det fører til en reduktion og forskydning af spidsbelastningsperioderne for køling. Der blev opnået en belastningsforskydning fra dag til nat på op mod 78 % og en reduktion i den maksimale kølebelastning på op til 50 %.

Uanset disse fordele skal det nøje overvejes, hvilke betingelser der skal være opfyldt, for at en forøgelse af den termiske masse vil medføre en betydelig energi- og udgiftbesparelse. Fx er det vigtigt at der sker hyppige (helst dagligt) passager af smeltepunktet for PCM'en for at opnå den maksimale besparelse.

Belastningsforskydning fra dag til nat er mest fordelagtig, hvis der kan anvendes naturlig natventilation til køling, eller der er forskellige takster for el-forbrug i dag- og nattimer. Belastningsforskydning kan desuden være en effektiv metode til at reducere størrelsen af et køleanlæg.

På grund af de høje priser på mikroindkapslede PCM-plader skal anvendelsen af disse baseres på en detaljeret udgiftsanalyse. Besparelser pga. el-forbrug uden for perioder med spidbelastning, reduktion i størrelsen på køleanlæg og den plads, der spares i et byggeri på grund af et mindre køleanlæg, kan kompensere for de høje investeringsudgifter ved brug af PCM-materialer.



Figur16. To metoder til udnyttelse af loftspaneler med mikroindkapslet PCM i bygninger

SOLAFSKÆRMNING

SOLAFSKÆRMNING

REFERENCE: (JOHNSEN, 2014)

Som navnet siger, er det en vigtig funktion ved en solafskærmning, at den er i stand til at afskærme for solstrålingen. Helst skal solafskærmningen kunne udelukke så meget af solvarmen, at der ikke opstår generende høje temperaturer i lokalet, og således, at der ikke bliver et stort kølebehov. Men afskærmningen har mange andre funktioner, end 'blot' det, at holde solen ude.

Faktisk spiller afskærmningen en helt afgørende rolle, både for det resulterende energiforbrug og for det termiske og visuelle miljø i rummet bag ved afskærmningen. Mange af de funktioner, som afskærmningen skal opfylde, er modsætningsfyldte, og derfor bliver den endelige løsning ofte et kompromis, hvor behov og ønsker fra brugere, bygherre og arkitekt må afvejes imod hinanden, for at tilgodese flest mulige hensyn i den enkelte bygning. Solafskærmningens tre vigtigste funktioner, specielt for Net ZEB, er at:

- Reducere solvarmen
- Tillade udnyttelse af passiv solvarme
- Give god adgang for dagslys.

Hertil kommer to vigtige krav for oplevelsen af det visuelle miljø, nemlig:

- Beskytte mod blænding
- Bevarelse af udsynet.

Disse funktioner beskrives i det følgende.

REDUKTION AF SOLVARME

I praksis har mange lavenergibygninger haft problemer med overophedning om sommeren på grund af store rudearealer med utilstrækkelig solafskærmning. Det har været en udbredt misforståelse, at man kan bygge bæredygtige bygninger med rene glasfacader. Mange erfaringer viser, at en glasandel af facaden på mere end 50 % resulterer i dårligt indeklima og et

Figur 17. Bygning med fast afskærmning og udhæng.

stort energiforbrug. Andelen af glas bør derfor begrænses, og som tommelfingerregel kan man regne med, at hvis glasset udgør mere end 30-35 % af facaden (målt indvendigt), bør vinduerne forsynes med en udvendig afskærmning.

UDNYTTELSE AF PASSIV SOLVARME

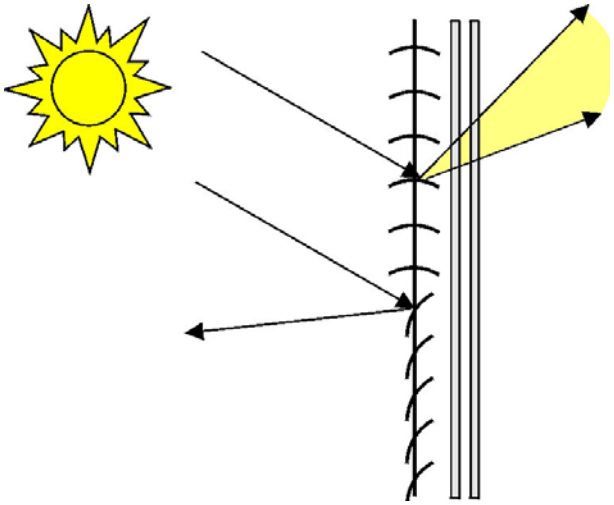
Selv om afskærmningens evne til at reducere solindfaldet ofte betragtes som den vigtigste egenskab, er det energimæssigt lige så vigtigt, at afskærmningen også kan tillade solvarmen at passere, når der ikke er et afskærmningsbehov. I nyere glasdominerede byggerier har der været meget fokus på problemet med overophedning om sommeren. Dette skyldes dels, at problemet er meget mærkbart for brugerne og dels, at der ofte er stillet specifikke krav vedrørende temperaturforholdene om sommeren, fx som angivet i DS 474: Norm for specifikation af termisk indeklima. Ud fra et energimæssigt synspunkt bør der også være fokus på, i hvilken grad en bygning er i stand til at udnytte den passive solvarme. Faste afskærmninger og afskærmninger, som ikke kan trækkes helt bort fra vinduerne (figur 17), kan øge energiforbruget til opvarmning betydeligt ved at reducere den gratis solvarme. For nye bygninger, som opfylder BR10, udgør energiforbruget til opvarmning i større bygninger typisk 25-35 % af det samlede energiforbrug. Transmissionsvarmetabet sker hovedsageligt gennem vinduerne, og jo større vinduesareal, jo større varmebehov. Men en ganske betydelig del af varmebehovet kan dækkes af solvarmetilskuddet gennem ruderne, og derfor er det vigtigt, at afskærmningen er regulerbar og kan trækkes helt fra, i den meget store del af vinterhalvåret, hvor solen ikke medfører behov for afskærmning.

ADGANG FOR DAGSLYS

Alle solafskærmninger vil reducere dagslyset som tilføres rummet. For at opnå en høj dagslystilførsel bør man vælge en solafskærmning, som kan trækkes helt fra i overskyet vejr. Hvis afskærmningen skal beskytte mod blænding uden at lukke for meget dagslys ude, bør den være udformet, så det blokerede sollys reflekteres via loftet og dybere ind i rummet, se figur 18.

For ruder angives lystransmittansen ved stråling vinkelret på ruden. Rudens reduktion af lyset har samme reducerende virkning på belysningsstyrken ind gennem hele lokalet. For solafskærmninger er forholdene mere komplicerede, idet afskærmningen har stor indflydelse på lysfordelingen. Et ud-

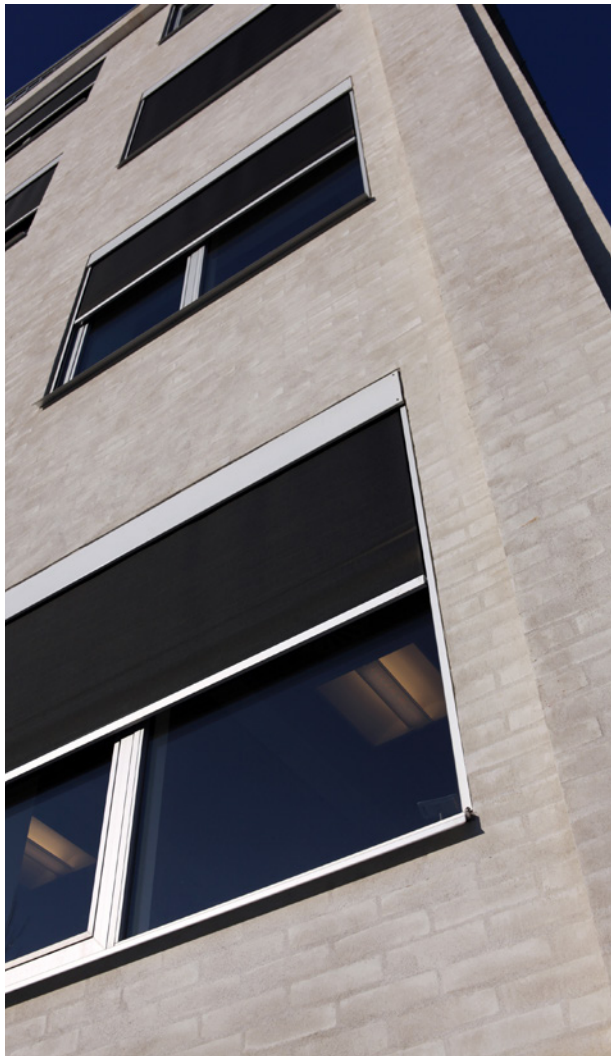
hæng eller en persienne reducerer belysningsstyrken meget mere i vindueszonen end længere inde i lokalet. Med et enkelt tal kan man angive en "virkningsgrad" for afskærmningen, dvs. forholdet mellem den lysstrøm der transmitteres gennem ruden med afskærmningen og lysstrømmen gennem den samme rude uden afskærmning. Men virkningsgraden siger intet om, hvordan afskærmningen ændrer lysfordelingen i lokalet. Ofte vil det være gunstigt, at solafskærmningen udjævner uligheden mellem belysningsstyrkerne ved vinduet og bagerst i rummet, men det er samtidig vigtigt, at afskærmningen ikke udelukker så meget dagslys, at det er nødvendigt at tænde for den kunstige belysning.



Figur 18. Eksempel på persienner der skærmer for solen, men samtidig leder en del af dagslyset dybere ind i rummet via loftet.

BESKYTTELSE MOD BLÆNDING

Flere undersøgelser viser, at brugerne primært anvender solafskærmningen, fordi de er generet af sollyset, og altså ikke som det ofte antages, når de er generet af for høje temperaturer. Derfor er det vigtigt, at afskærmningen faktisk opfylder den funktion: at kunne beskytte mod generende sollys og blænding fra vinduesfladen. En afskærmning, der er god til at reducere solindfaldet, er ikke nødvendigvis god til at beskytte mod blænding. For eksempel vil en udvendig afskærmning med en direkte transmittans (varme og lys) på 0,1 reducere den direkte stråling med 90 %, men de 10 % lys, som transmitteres igennem afskærmningen, vil kunne medføre stærkt generende blænding. Et mål for solafskærmningens evne til at beskytte mod blænding vil typisk være, at den kan reducere den direkte stråling inden for den enkelte brugers synsfelt til ca. 4-5 % eller mindre (lidt afhængigt af vævningen og den aktuelle retning af sollyset). Det betyder fx, at en screendug (figur 19) med en åbningsgrad på 5 % ikke i sig selv vil kunne beskytte tilstrækkeligt mod blænding ved direkte solbestråling. Solafskærmningens egen luminans kan også blive så stor, at den giver anledning til blænding og forhindrer udsyn. Et hvidt gardin, en screendug eller en translucent flade, der spreder det direkte sollys diffust, kan give en luminans, der er højere end himlens. Gardindugens tæthed i vævningen og farven er bestemmende for gardinets luminans.



Figur 19. Eksempel solafskærmning med screendug.

BEVARELSE AF UDSYNET

Lamelbaserede afskærmninger, som fx en persienne, giver som regel de bedste muligheder for at bevare udsynet, selv om der skærmes af for blænding fra vinduet. Lamelhældningen tilpasses efter solens aktuelle solposition, således at det er muligt at optimere balancen mellem ønsket om at bevare udsynet, og behovet for at skærme af for blændingen fra sollyset. Hvis man vælger en screendug som solafskærmning, står man i praksis over for et valg mellem blændingsreduktion og udsyn. For at beskytte mod blænding fra direkte sollys skal åbningsgraden være mindre end ca. 4 %, men for at bevare et acceptabelt udsyn gennem screendugen, skal åbningsgraden være større end ca. 5 %. Ved høje vinduer kan det være en fordel at opdele facaden i et dagslysvindue og et udsynsvindue, se figur 20. Solafskærmningen kan da med fordel opdeles tilsvarende, således at det er muligt at lukke af for direkte sollys, når det generer, og på andre tidspunkter lade dagslyset passere gennem det højt placerede dagslysvindue, mens der skærmes af for blænding gennem udsigtsvinduet. Opdelingen af facaden giver således en stor fleksibilitet, med mulighed for at optimere den visuelle komfort i forhold til den aktuelle situation.

REGULERING

Helt generelt kan man sige, at regulerbare afskærmninger fungerer bedre end faste afskærmninger, fx faste udhæng eller faste lameller. Kravene om, at afskærmningen skal kunne afskærme tilstrækkeligt for solen, og samtidig ikke reducere solvarmetilskuddet for meget, når der er opvarmningsbehov, kan kun opfyldes med regulerbare afskærmninger. Kravene til afskærmningens funktion skifter så hyppigt hen over året og over den enkelte dag, at en helt optimal regulering vil være meget kompleks. For større bygninger vil en automatisk regulering være nødvendig, ikke mindst for Net ZEB. Grundlæggende skal afskærmningen i et rum reguleres ud fra et signal, der siger, om der er personer til stede (bevægelsesmelder), og ud fra et signal, der siger, om der på et givet tidspunkt er et varme- eller

Figur 20. Eksempel på opdeling af facaden i et udsigtsvindue og et dagslys-vindue.

kølebehov (dag på året og tid på dagen, udetemperatur samt indetemperatur). Hertil kommer ønsket om at udnytte dagslyset optimalt i forhold til det aktuelle lys i rummet og årstiden (varmebehov/kølebehov). Når der er personer til stede, reguleres i 'komfortmode', mens der uden for brugstiden reguleres i 'energimode', og disse to reguleringstilstande vil normalt køre efter helt forskellige strategier. Inden for brugstiden bør afskærmningen ikke ændre indstilling alt for hyppigt, da dette kan virke forstyrrende. Brugerne er ofte utilfredse med indstillingen valgt af automatikken, hvilket i nogle tilfælde vil medføre, at de saboterer eller blokerer for den automatiske styring. I brugstiden bør automatisk styring derfor primært ske på strategiske tidspunkter (fx i frokostpausen), så brugerne vænner sig til det og bliver mindst muligt generet. Erfaringsmæssigt bør automatikken ikke ændre solafskærmningens indstilling mere end 5-6 gange i løbet af arbejdsdagen. Brugeren bør til enhver tid kunne gribe ind i den automatiske styring, som derefter først overtager reguleringen efter en periode (typisk ca. 1 time). På den anden side viser undersøgelser også, at manuelt betjente solafskærmninger kun reguleres nogle få gange i løbet af dagen, mens motoriserede betjeninger benyttes ca. 3 gange oftere end de manuelle.

VALG AF AFSKÆRMNING

Valget af afskærmning må ske ud fra en vægtning af de nævnte funktionskrav i forhold til det aktuelle byggeri. I praksis spiller anlægsudgift, drift- og vedligeholdelsesomkostninger samt æstetik naturligvis også en stor rolle. Til glasdominerede facader bør vælges en udvendig regulerbar og automatisk styret solafskærmning. Anlægsomkostningerne til udvendige bevægelige afskærmninger er store, men skal sammenholdes med de totale driftsomkostninger til ventilation, indeklima og belysning samt et produktivt arbejdsmiljø. I planlægningen af et byggeri skal man være opmærksom på, at kvaliteten af solafskærmningen og dens regulering ofte er helt afgørende for indeklimaet (termisk og visuelt) og for det resulterende energiforbrug. Derfor bør man være forsigtig med at gå på kompromis her, og ikke lade en overskridelse af anlægsbudgettet gå ud over solafskærmningen.

ENERGITEKNISKE
INSTALLATIONER

ENERGITEKNISKE **INSTALLATIONER**

Det næste trin til opnåelse af Net ZEB-byggeri er anvendelse af effektive energitekniske installationer, ofte betegnet HVAC-systemer (varme-, ventilation- og køleanlæg), og brug af energieffektiv kunstig belysning.

Brug af energitekniske installationer med lav effektivitet eller i forkerte kombinationer kan let gå ud over de fordele, der blev opnået i processens trin 1: reduktion af energibehovet.

I den danske energipolitik er fjernvarme og varmepumper udpeget til stort set at dække det fremtidige opvarmningsbehov i bygninger. Dette understreges af reduktionen i primærenergifaktorerne i Bygningsklasse 2020 for fjernvarme fra 1 til 0,6 og for elektricitet fra 2,5 til 1,8. Primærenergifaktoren for elektricitet er dog stadig så høj, at den tilskynder til reduktion af elektricitetsbehovet i bygninger.

Anvendes varmepumpe, skal der vælges en varmepumpe med høj effektivitet (COP). Hvis varmepumpen imidlertid anvendes i et varmeanlæg med varmeafgivere, der kræver en høj fremløbstemperatur, kan den resulterende årseffektivitet i det kombinerede system blive lav. Det er derfor meget vigtigt at varmeanlægget er designet til lave systemtemperaturer.

Det er også vigtigt med lavtemperatur-varmeanlæg, når opvarmning er baseret på fjernvarme. Det er derved muligt at anvende flere varmekilder ved lavere temperaturer, og desuden reduceres varmetabet i fjernvarmenettet betydeligt.

Forskningscentrets fokus i forbindelse med varmeanlæg har været i tråd med ovenstående:

- Lavtemperaturfjernvarme.
- Regulering af varmepumper.
- Gulvvarme i kombination med varmepumper.

Forskningscentret har ikke direkte beskæftiget sig med mekanisk ventilation. Men da mekanisk ventilation med varmegenvinding er et meget vigtigt element i de fleste Net ZEB-løsninger, er nogle vigtige forhold beskrevet i afsnittet Mekanisk ventilation. For at sænke ventilationssystemernes el-forbrug er det vigtigt at anvende effektive ventilatorer og reducere tryktabet i systemerne. Ventilationssystemernes el-forbrug kan yderligere reduceres ved brug af en kombination af mekanisk og naturlig ventilation, hvor naturlig ventilation kan anvendes uden for opvarmningssæsonen - se kapitlet om Naturlig ventilation. Det har yderligere den fordel, at det gør det muligt at øge luftskiftet i varme perioder og derved reducere en mulig risiko for overophedning.

Med hensyn til mekanisk køling, har forskningscentret hovedsageligt beskæftiget sig med reduktion af kølingsbelastningen i bygninger – se afsnittet om Naturlig køling. Men i kontorbyggeri kan det fortsat være nødvendigt med mekanisk komfortkøling på grund af den høje interne varmebelastning og solstråling. Derfor gives der i afsnittet Mekanisk køling eksempler på nogle vigtige områder inden for mekanisk køling, ligesom også resultaterne fra et ph.d.-projekt om strålekøling beskrives.

Forskningscentret har ikke beskæftiget sig med effektiv kunstig belysning og elektriske apparater, selvom disse er vigtige for opnåelse af Net ZEB, hvis totale energiforbrug imødekommes af vedvarende energi. Dette område er også vigtigt for at reducere en potentiel overophedningsrisiko som følge af intern varmebelastning. I kontorbyggeri vil brugen af ikke-energieffektiv belysning og elektriske apparater ofte føre til et øget behov for køling, hvilket vil øge kølesystemets el-forbrug.

OPVARMNINGSSYSTEMER

Som tidligere nævnt er der i forskningscentret blevet foretaget tre undersøgelser af opvarmningssystemer:

- Lavtemperaturfjernvarmefordelingsanlæg for enfamiliehuse.
- Optimering af gulvvarmesystemer i kombination med varmepumper.
- Optimeret regulering af varmepumper.

Resultaterne af de tre undersøgelser beskrives kort i det følgende. For yderligere information henvises til referencerne i teksten.

LAVTEMPERATURFJERNVARME

REFERENCE: (BRAND, 2014)

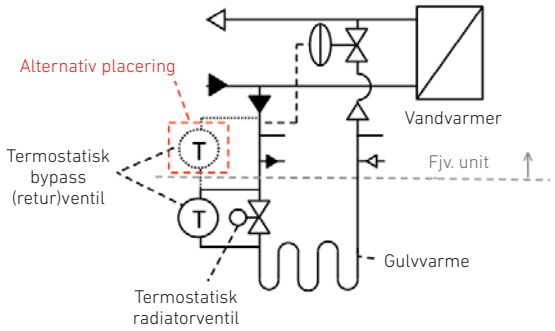
Fjernvarme betragtes som et vigtigt middel til opnåelse af 100 % fossilfri varmeforsyning til bygninger inden udgangen af 2035, fordi fjernvarme muliggør hurtig og økonomisk integration af vedvarende energikilder. Imidlertid bevirker et reduceret varmebehov i lavenergibyggeri og i det renoverede eksisterende byggeri, at traditionel fjernvarme med fremløbs- og returtemperaturer på hhv. 80 °C og 40 °C bliver mindre effektive relativt set, pga. varmetabene fra fjernvarmenettet. Varmetabene kan reduceres ved at sænke fremløbstemperaturen til 50-60 °C, samtidig med at der indføres bedre isolering af fjernvarmerørene i forbindelse med renovering og udbygning af nettet. Disse to tiltag er hjørnestenene i et nyt fjernvarmekoncept kaldet lavtemperaturfjernvarme.

Men en sænkning af fremløbstemperaturen giver udfordringer i relation til udformningen af systemer til forsyning af varmt brugsvand og rumopvarmning, både fra et brugerperspektiv og i forhold til fjernvarmeværkerne.

VARMT BRUGSVAND

Brugsvandsanlæg i Net ZEB skal kunne levere varmt brugsvand med den ønskede temperatur og på det ønskede tidspunkt uden risiko for bakterievækst. Brug af varmevekslere, som er særligt udviklet med henblik på lavtemperaturfjernvarme, muliggør opvarmning af varmt brugsvand til den ønskede temperatur på 45 °C ved hjælp af fjernvarmevand på blot 50 °C. Øget risiko for legionella undgås ved brug af brugsvandssystemer med et samlet vandindhold på mindre end tre liter. Disse mængdebegrænsninger gør, at tappestederne må anlægges tæt på vandvarmeren, og at der normalt ikke kan anvendes cirkulationsledning til det varme brugsvand. Hvis der er behov for lagringskapacitet til brugsvand, må kapaciteten installeres på fjernvarmesiden. Sådanne fjernvarmebeholderløsninger lagrer varmt fjernvarmevand i stedet for varmt brugsvand. For nyt og gennemrenoveret etagebyggeri anbefales en løsning med en gennemstrømningsvandvarmer og et kompakt fordelingsanlæg til varmt brugsvand i hver enkelt lejlighed. For ikke-renoveret etagebyggeri med traditionelle vertikale rørstammer foreslås, at risikoen for legionella fra varmt brugsvand ved lavere temperaturer afhjælpes ved installering af et steriliseringssystem, som fx designes, så de med jævne mellemrum hæver temperaturniveauet kortvarigt, eller med installering af UV-lamper til bekæmpelse af eventuelle bakterier i det varme brugsvand.

Uden for opvarmningssæsonen sikres hurtig forsyning og tilførsel af varmt brugsvand ved brug af termostatstyret omløb, som holder fjernvarmestikledningerne til vandvarmeren varme og klar til brug. Uden for opvarmningssæsonen kan omløbsvandet anvendes til at opvarme gulvet i badeværelset, hvilket vil medføre en reduktion i returvandstemperaturen og dermed reducere varmetabet og øge kapaciteten i fjernvarmenettet. I et eksempel med lavtemperaturfjernvarme blev varmetabet i fjernvarmenettet uden for opvarmningssæsonen reduceret med 13 %, hvilket svarede til ca. 40 % af varmebehovet til opvarmning af badeværelsesgulvet uden for opvarmningssæsonen (Brand et al, 2012).



Figur 21. Brug af omløbsvand til opvarmning af badeværelsesgulv uden for opvarmningssæsonen.

RUMOPVARMNING

For nyt lavenergibyggeri udgør en reduktion i fremløbstemperaturen ikke noget alvorligt problem, da disse bygningers lave energibehov muliggør design af rumopvarmningssystemer med lave fremløbs- og returtemperaturer på 50/25 °C. Lavenergibyggeri udgør imidlertid (og vil fortsat gøre det i lang tid) kun en lille del af bygningsmassen, mens 85-90 % består af ældre byggeri med betydeligt større energibehov og med radiatoranlæg, som er designet til en fremløbstemperatur på 70 °C eller derover. En reduktion af fremløbstemperaturen i fjernvarmesystemet til 50 °C vil ikke kunne opretholde den termiske komfort for bygningernes beboere og vil medføre en uønsket høj returtemperatur og volumenstrøm tilbage til fjernvarmenettet. For at tage højde for denne situation bør fjernvarme-fremløbstemperaturen i opvarmningssæsonen holdes højere i områder med eksisterende byggeri - dog løbende tilpasset de renoveringsarbejder udført i bygningerne, som kan muliggøre yderligere sænkning af fremløbstemperaturen. Figur 22 viser behov og varighed ved en fremløbstemperatur for fjernvarme på over 50 °C i opvarmningssæsonen for et typisk dansk enfamiliehus fra 1970'erne i forskellige stadier af energirenovering og ved

forskellige krav til rumtemperatur. Der tages udgangspunkt i husets oprindelige tilstand og sluttes med situationen efter energirenovering med isolering og lavenergivinduer.

Jo mere huset energirenoveres, des mere kan fremløbstemperaturen sænkes, og des kortere bliver de perioder, hvor der er behov for en høj fremløbstemperatur.

Det er således vigtigt at anvende realistiske data for det forventede varmebehov. De værdier for rumtemperatur og internt varmebidrag, som anvendes i Be10 til standardiseret beregning af energiforbrug, repræsenterer ikke nødvendigvis byggeriernes virkelige drift og forbrug.

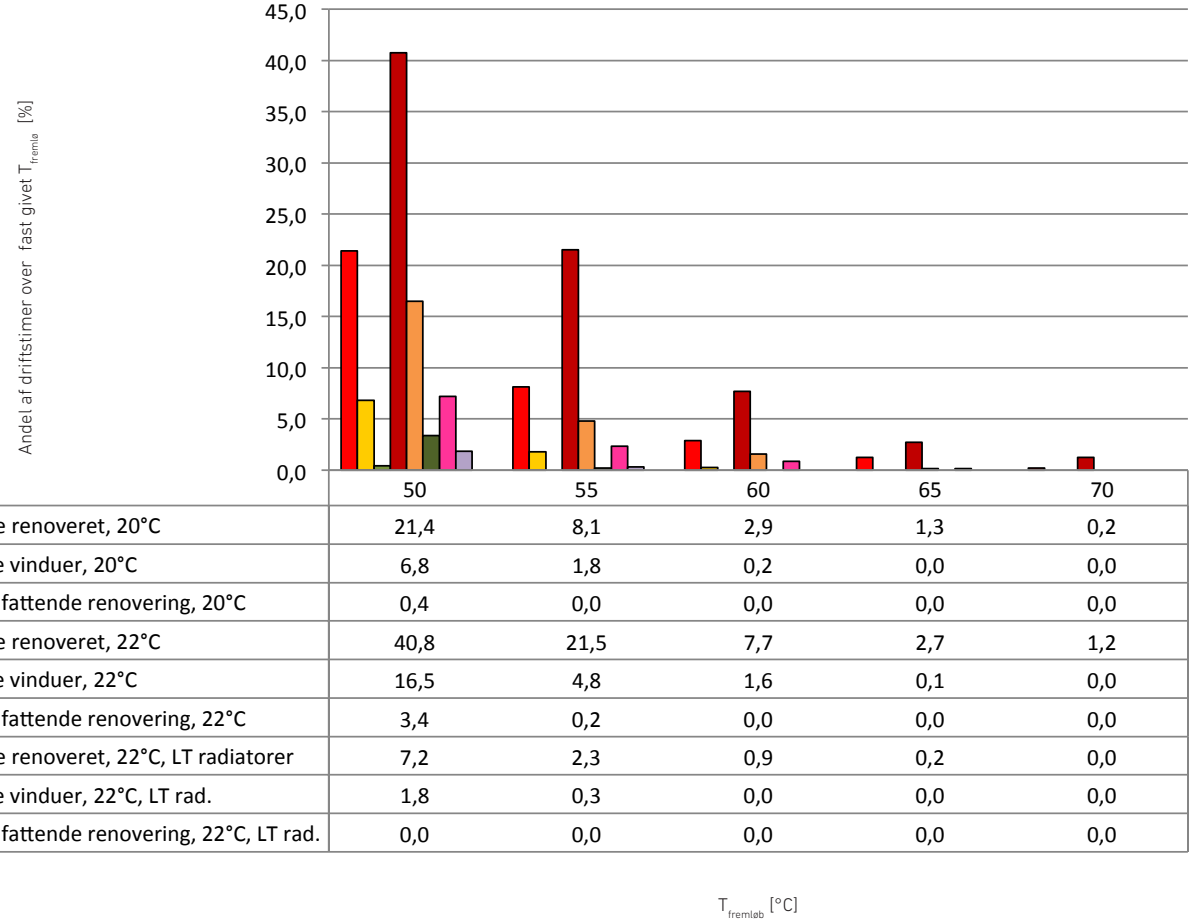
Ved at anvende den mere realistiske rumtemperatur på 22 °C i stedet for 20 °C og et internt varmebidrag på 4,2 W/m² i stedet for 5 W/m², som opnås ved brug af mere effektivt udstyr, fås for et eksempel, som opfylder kravene i Bygningsklasse 2020, en stigning på 56 % af det beregnede varmebehov. Det er meget vigtigt at tage dette i betragtning, ikke blot set i forhold til kundernes varmeregning, men også når der skal designes nye fjernvarmenet.

OPTIMERING AF GULVVARMESYSTEMER I KOMBINATION MED VARMEPUMPER

REFERENCE: (JENSEN ET AL, 2014)

Gulvvarmesystemer anvendes ofte i kombination med varmepumper. En årsag hertil er, at fremløbstemperaturen til gulvvarmesystemer typisk er lavere end til radiatorer. En lav fremløbstemperatur til den varmeafgivende enhed øger varmepumpens effektivitet.

Undersøgelser har imidlertid vist, at retningslinjerne for traditionelt design oftere end forventet fører til højere fremløbstemperatur til gulvvarmesystemet, og dermed til et højere elforbrug for varmepumpen.



	50	55	60	65	70
Ikke renoveret, 20°C	21,4	8,1	2,9	1,3	0,2
Nye vinduer, 20°C	6,8	1,8	0,2	0,0	0,0
Omfattende renovering, 20°C	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Ikke renoveret, 22°C	40,8	21,5	7,7	2,7	1,2
Nye vinduer, 22°C	16,5	4,8	1,6	0,1	0,0
Omfattende renovering, 22°C	3,4	0,2	0,0	0,0	0,0
Ikke renoveret, 22°C, LT radiatorer	7,2	2,3	0,9	0,2	0,0
Nye vinduer, 22°C, LT rad.	1,8	0,3	0,0	0,0	0,0
Omfattende renovering, 22°C, LT rad.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figur 22. Procentdel af timer i året med forsyningstemperaturer over 50, 55, 65 og 70 °C, afhængig af renoveringsniveau for et typisk parcelhus fra 1970'erne. LT: lavtemperatur, rad.: radiatorer.

Traditionelt er opvarmningssystemer designet til en indetemperatur på 20 °C, men hovedparten af den danske befolkning foretrækker en temperatur på 22 °C i opvarmningssæsonen. En stigning på 1 °C i indetemperaturen fører til en reduktion i opvarmningskapaciteten for gulvopvarmning på mellem 5 og 20 %, afhængig af varmebehovet og temperaturniveauet. For at opretholde gulvets opvarmningsevne skal fremløbstemperaturen hæves med 1 °C. En sådan stigning nedsætter en veldimensioneret varmepumpes effektivitet med 2-3 %. Hvis varmepumpens elektriske varmelegeme skal tændes, for at varmepumpen skal kunne levere den højere fremløbstemperatur, vil reduktionen i varmepumpens effektivitet forøges markant.

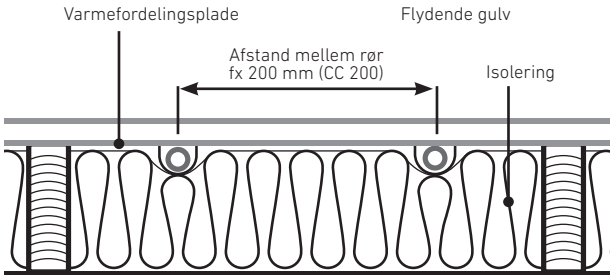
LETTE GULVARMESYSTEMER

Der er flere varmemodstande mellem væske og rumluft i forbindelse med lette gulvvarmesystemer (se figur 23):

- Mellem rør og varmefordelerplader
- Mellem varmefordelerplader og det flydende gulv
- Gennem det flydende gulv
- Mellem gulvoverfladen og rummet

Varmeafgivelsen fra et let gulvvarmesystem opgives ofte for en perfekt, laboratorietestet installation. Hvis systemet ikke testes i et laboratorium, er det nødvendigt at foretage en korrekt beregning af modstandene: væske-rør, rør-varmefordelerplader, gennem gulv samt mellem gulv og rumluft. Til bestemmelse af varmeafgivelsen bør EN1264 anvendes ved test og EN ISO 11855 ved beregning. For andre typer gulvvarme (rør indstøbt i beton), er risikoen for fejl mindre.

Hvis beregningerne ikke udføres korrekt, og der ikke tages højde for, at der evt. skal tæppe på gulvet, samt at gulvvarmen i den virkelige installation ikke dækker hele gulvarealet (figur 24), kan ydelsen fra et gulvvarmesystem blive markant lavere end forventet. I praksis vil det medføre et behov for en højere



Figur 23. Eksempel på let gulvvarmesystem.

Figur 24. Eksempel på gulv, som kun er delvist dækket af gulvvarme.

fremløbstemperatur og dermed en mindre effektiv varmepumpe. I ét eksempel er den virkelige ydelse for et let gulvvarmesystem 38 % lavere end ydelsen ville være under optimale forhold. Og et gulvtæppe vil yderligere reducere ydelsen. Hvis fremløbstemperaturen under optimale forhold er 35 °C for en kapacitet på 30 W/m^2, er der for gulvet med reduceret ydelse på 38 % behov for en fremløbstemperatur på 45 °C. Det fører til en stigning i varmepumpens el-behov på 20-30 %.

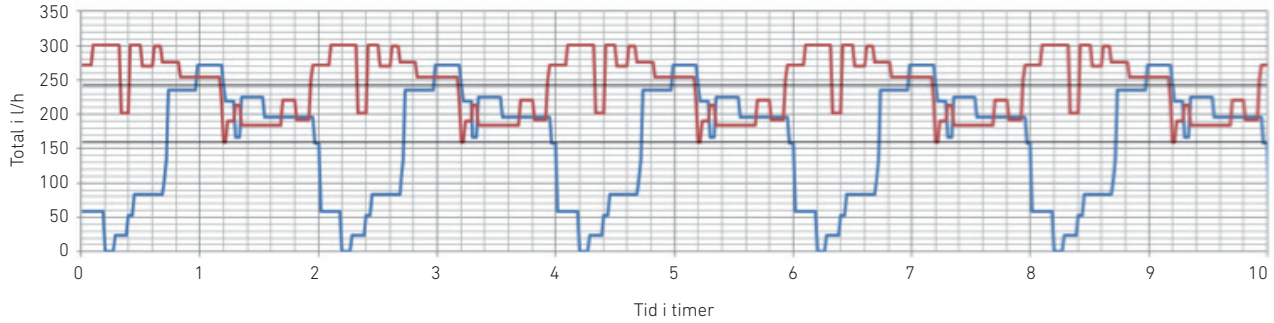
Et andet eksempel viser, at hvis centerafstanden i et gulvvarmesystem øges fra 200 mm (CC 200) til 300 mm mellem rørene (figur 23), skal fremløbstemperaturen hæves med 6,5 °C (ved lav varmeydelse: 20 W/m^2), hvilket i dette tilfælde fører til en stigning i varmepumpens el-behov på mindst 15 %.

BETYDNINGEN AF FLUKTUERENDE VOLUMENSTRØM

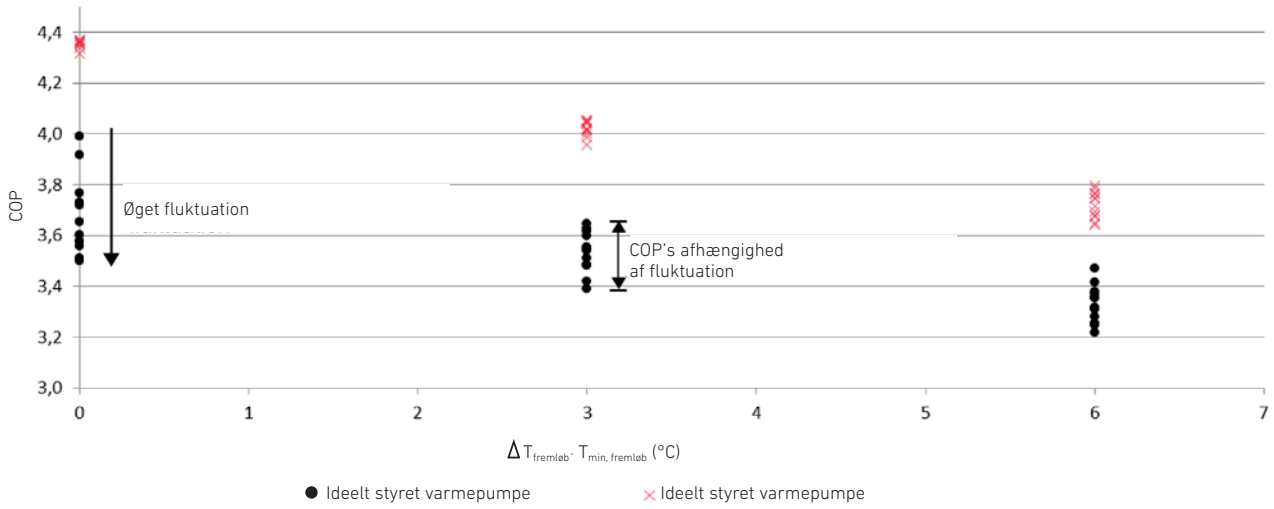
Ventilerne i et gulvvarmesystem styres separat afhængig af en temperaturmåling i de enkelte rum. Dette fører til et stokastisk varierende mønster for volumenstrømmen gennem gulvvarmesystemet - figur 25 viser eksempler på sådanne strømningsmønstre.

Det er i forskningscentret undersøgt, hvilken indflydelse et fluktuerende strømningsmønster har på effektiviteten af en varmepumpe.

Undersøgelserne viser, at strømningsmønstret gennem gulvvarmesystemet i høj grad afhænger af, hvor godt den faktiske fremløbstemperatur er reguleret i forhold til den lavest mulige fremløbstemperatur. Den lavest mulige fremløbstemperatur er den laveste fremløbstemperatur til det rum, der har brug for den højeste fremløbstemperatur. Det betyder, at ventilen til det rum, der har brug for den højeste fremløbstemperatur, er åben i næsten 100 % af tiden. COP's afhængighed af fluktuationen øges,når forskellen mellem den laveste krævede fremløbstemperatur og den faktiske fremløbstemperatur stiger - som vist i figur 25.



Figur 25. Eksempler på fluktuerende volumenstrøm gennem gulvvarmesystemet, hvor fremløbstemperaturen til systemet er den laveste mulige (rød kurve) eller 6 °C højere end den laveste mulige fremløbstemperatur (blå kurve). Strømningsmønstret gentages her for hver anden time – dette er ikke tilfældet i virkeligheden. Middelvolumenstrømmen (sorte vandrette linjer) er højere ved den laveste mulige fremløbstemperatur, fordi der kræves en højere volumenstrøm som følge af lavere ΔT, sammenlignet med eksemplet med en 6 °C højere fremløbstemperatur.



Figur 26. Eksempel på strømningsmønstrets indflydelse på en varmepumpes effektivitet (COP), når den enten er ideelt styret i hele kapacitetsområdet (røde x) eller kun ideelt styret over 30 % af sin kapacitet, mens den on/off-styres i området under 30 % af kapaciteten (sorte prikker).

Undersøgelserne viser desuden, at et fluktuerende strømningsmønster reducerer en varmepumpes effektivitet. Figur 26 viser et konkret eksempel for et enfamiliehus opført i henhold til Bygningsklasse 2020 med to forskellige varmepumper: en, der styres ideelt i hele kapacitetsområdet (leverer altid præcist den varme, der er brug for), og en anden, som styres ideelt inden for 30-70 %, og som on/off-reguleres i det laveste 0-30 % område (typisk forekommende). Tolv forskellige strømningsmønstre (med forskellige niveau af fluktuation af volumenstrømmen) er undersøgt for hver varmepumpe og hver fremløbstemperatur. Figur 26 viser, at effektiviteten for en varmepumpe ikke overraskende falder med stigende fremløbstemperatur til opvarmningssystemet. Desuden viser figur 26, at for den ideelt styrede varmepumpe øges COP'ens afhængighed af volumenstrømmens fluktuation ved stigende ΔT – hvor ΔT er forskellen mellem den faktiske og den laveste mulige fremløbstemperatur. Der ses en reduktion i COP på op til 15 %.

For den delvist on/off-styrede varmepumpe er den maksimale reduktion i COP som følge af fluktuation af volumenstrømmen i det undersøgte eksempel 10-15 %. I det viste tilfælde højest, når fremløbstemperaturen til opvarmningssystemet er så lav som muligt. For yderligere oplysninger se (Jensen et al, 2014). Undersøgelserne er stadig foreløbige og udført med simple simuleringsmodeller. Resultaterne antyder dog, at der kan opnås ret store besparelser, hvis volumenstrømmen gennem et opvarmningssystem, der er forbundet med en varmepumpe, styres så store fluktuationer i volumenstrømmen undgås. Yderligere undersøgelser og eksperimenter bør dog gennemføres for at fastlægge volumenstrømmens indflydelse på COP, og for at beregne de mulige besparelser under forskellige forhold.

KONKLUSIONER

Fremløbstemperaturen skal holdes så lav som muligt for at sikre en høj effektivitet af varmepumpen. Det betyder bl.a., at man skal være omhyggelig ved dimensionering og installation af

gulvvarmesystemer for at opnå den planlagte varmeafgivelse. Fremløbstemperaturen til gulvvarmesystemerne bør reguleres i forhold til det rum, som kræver den højeste fremløbstemperatur. Desuden viser undersøgelserne, at der er potentiale for yderligere besparelser ved at reducere fluktuationerne af volumenstrømmen i systemet.

OPTIMERET REGULERING AF VARMEPUMPER

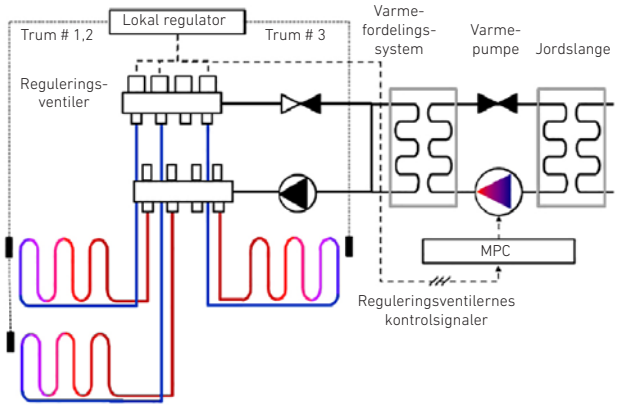
REFERENCE: (TAHERSIMA, 2012)

Et jordvarmeanlæg kombineret med et opvarmningssystem (gulvvarme- eller radiatorsystem) er blevet undersøgt med henblik på at udvikle en optimal styring til minimering af energiforbruget.

Hovedparten af styringer til varmesystemer er baseret på en vejrkompenseringskurve, hvor fremløbstemperaturen tilpasses efter udetemperaturen. Standardhældning og offset for kurven kan, af montøren, indstilles i styringen, således at de afspejler bygningens faktiske varmebehov. Denne indstilling er dog ofte konservativ og medfører højere fremløbstemperaturer end nødvendigt, hvorved varmepumpens effektivitet (COP) også reduceres, som beskrevet i det tidligere afsnit.

Undersøgelsens hypotese var, at den optimale fremløbstemperatur opnås, når mindst én termoaktuator (reguleringsventil for ét rum) kører for fuld kapacitet – dvs. er åben næsten hele tiden. En hierarkisk styring med to niveauer blev foreslået, se figur 27. På højeste niveau sørger en Model Predictive Controller (MPC) for at opnå den optimale fremløbstemperatur. På det lavere niveau i hierarkiet, bruges lokale PI-regulatorer til at nå den ønskede rumtemperatur. Simuleringsresultater for et hus med flere rum viser store energibesparelser sammenlignet med varmepumpens traditionelle reguleringssystem.

En anden del af undersøgelsen beskæftigede sig med den økonomisk set mest optimale styring, idet der blev taget højde for a priori-viden om vejrudsigt og priser på elektricitet. I dette tilfælde bestemmer MPC'en på højeste niveau også de faktiske temperatur-setpunkter i rummene ved at afvige fra de brugerdefinerede indstillinger. Herved er det muligt at anvende bygningens varmekapacitet og flytte varmepumpens elforbrug til de tidspunkter, der er økonomisk mest rentabelt for slutbrugeren. Denne type styringer kan spille en vigtig rolle i Smart Grids, hvor varmepumper i parcelhuse forventes at bidrage til at opretholde stabiliteten i el-nettet.



Figur 27. Den foreslåede styring med to hierarkiske niveauer, som kan opretholde den laveste mulige fremløbstemperatur til opvarmningssystemet.

MEKANISK **VENTILATION**

Forskningscentret har ikke direkte beskæftiget sig med forskning i eller udvikling af konventionel mekanisk ventilation. Det er dog velkendt, at for at opnå det meget lave energiforbrug i Net ZEB, er det nødvendigt med varmegenvinding på ventilationsluften i opvarmningssæsonen. Opvarmningssæsonen varierer fra bygning til bygning, afhængig af isoleringsniveau, intern varmelast og passivt solvarmebidrag. I boliger er det typisk nødvendigt med opvarmning ved højere udetemperaturer end i kontorbygninger med høj intern varmelast.

VARMEGENVINDING

I BR10 foreskrives at effektiviteten af varmegenvindingen i mekaniske ventilationsanlæg skal være minimum 70 %. I enfamiliehuse dog minimum 80 %. Det er allerede i dag muligt at opnå en genvindingsgrad på 85 %, og dette forventes at blive obligatorisk i fremtiden.

Effektive varmevekslere kan dog medføre problemer med isdannelse, når udetemperaturen falder til under frysepunktet. Fugten i den varme afkastluft vil kondensere i varmeveksleren og fryse til is. Herved nedsættes varmevekslerens effektivitet, og tryktabet på afkastsiden stiger som følge af isdannelsen. Dette vil enten betyde en lavere lufthastighed for afkastluften og dermed en mindre effektiv ventilation eller - hvis lufthastigheden holdes konstant - en stigning i elforbruget til afkastventilatoren. Isdannelse kan fx forebygges ved, med jævne mellemrum, at lede udeluften uden om varmeveksleren, hvorved afkastluften smelter isen. Alternativt kan indblæsningsluften opvarmes til over frysepunktet, inden den når varmeveksleren. Begge metoder vil dog reducere effektiviteten af varmevekslingen og kan derfor øge bygningens varmebehov.

Varmeveksleren bør udstyres med et by-pass for at sikre, at udeluften ikke opvarmes uden for opvarmningssæsonen, da dette kan bidrage til overophedningsproblemer og reducere potentialet for brug af udeluft til køling af bygningen – se afsnittet Naturlig ventilation og køling.

SFP

SFP (eller SEL-faktor) er det specifikke elforbrug for at flytte 1 m^3 luft gennem et ventilationsanlæg. BR10 angiver, at SFP maksimalt må være 1000 J/m^3 i et balanceret mekanisk ventilationssystem til enfamiliehuse, mens værdien for andet byggeri er 1800 J/m^3 for anlæg med konstant volumenstrøm, (CAV) og maks. 2100 J/m^3 for anlæg med variabel volumenstrøm (VAV). Det forventes, at SFP i kommende bygningsreglementer vil blive reduceret til 800 og 1500 J/m^3 for henholdsvis enfamiliehuse og CAV-systemer i andre bygninger. En lav SFP faktor kræver veldimensionerede anlæg, der installeres og drives korrekt.

I BOLIG+-konkurrencen (BOLIG+, 2013) brugte det vindende hold individuelle balancerede mekaniske ventilationsanlæg i et byggeri med 60 lejligheder. De anførte, at skønt denne løsning er dyrere end et centralt ventilationsanlæg, er det den billigste måde til at opnå energineutralitet, da dyrt PV-areal spares. Dog kan det betyde, at filtre ikke udskiftes regelmæssigt, hvis beboerne selv skal sørge for dette.

BEHOVSSTYRING

Energiforbruget for et ventilationsanlæg afhænger af brugstiden, og om det er muligt at tilpasse volumenstrømmen til det faktiske behov.

BR10 stiller specifikke krav til luftskiftet i boliger og institutioner. I boliger skal volumenstrømmen af frisk luft hele døgnet være mindst 0,3 l/s pr. m^2 bruttoetageareal, mens ventilationsanlæg i andet byggeri kan slukkes, når bygningerne ikke er i brug. I kontorbygninger kan luftskiftet således styres efter det aktuelle behov. Lavere volumenstrømme/stop af anlægget medfører både el-besparelser for ventilatorer og en reduktion af bygningens varmebehov. Retningslinjer for luftskiftet i forskellige typer bygninger findes i DS 1752 og EN 15251.

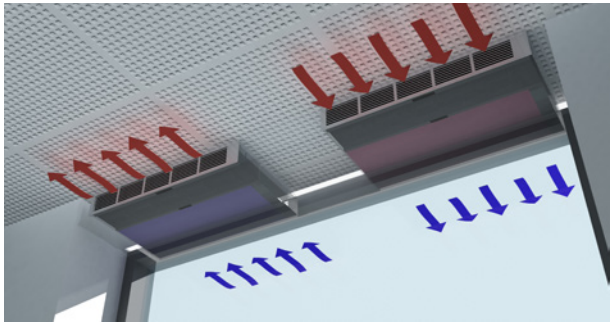
NATURLIG VENTILATION

I perioder uden opvarmningsbehov bør det være muligt at anvende naturlig ventilation i stedet for mekanisk ventilation. Herved reduceres den årlige middel-SPF og eventuelt også kølebehovet – se afsnittene om Naturlig ventilation og køling.

ENERGIRENOVERING

Selvom det kræver omtanke at designe og installere balanceret mekanisk ventilation i nybyggeri, er det dog nemmere og billigere end i eksisterende bygninger, hvor der er naturlig ventilation eller mekanisk udsugning.

Installeringsudgiften for et centralt ventilationsanlæg er ofte ret høj. En alternativ løsning er små integrerede ventilationsenheder med termisk masse, der fungerer som varmegenvinding som vist i figur 28. Hvert minut skifter luftstrømmen retning gennem de to enheder – fra afkast til indblæsning – og omvendt. Den varme, som lagres i den termisk masse under afkast, overføres til den friske luft under indblæsning. For disse enheder angives en genvindingseffektivitet større end 85 % og en SFP på 300 J/m^3.



Figur 28. Decentral ventilationsenhed (InVentilate).

Forskningscentret har ikke direkte beskæftiget sig med mekaniske kølesystemer. I forhold til køling har centret hovedsageligt fokuseret på at nedbringe kølebehovet, specielt ved naturlig ventilation – se afsnittene om Naturlig ventilation og køling. Der er dog foretaget en enkelt undersøgelse vedrørende køling i form af strålingskøling. Resultaterne af denne undersøgelse er kort beskrevet nedenfor – efter en mere generel indledning om mekanisk køling.

MEKANISKE KØLEANLÆG

Før et køleanlæg designes, er det vigtigt først at reducere bygningens kølebehov ved hjælp af både passive og aktive metoder: reduktion af den interne varmelast fra el-forbrugende udstyr og installationer, reduktion af solindfald og udnyttelse af naturlig og/eller mekanisk ventilation. Natkøling bør også overvejes. I Danmark kan boliger designes, så der ikke er brug for mekanisk køling.

Køleanlægget bør designes, så det passer til kølebehovet i veldefinerede zoner – hen over dagen (og året), og ikke ved at se bygningen som blot én zone. Det er derfor nødvendigt med en detaljeret simulering af termisk komfort og kølebehov. Ved design af bygningen og dens styring skal det undgås, at der opstår zoner med samtidigt behov for opvarmning og køling.

Et køleanlæg kan opbygges på mange måder, men den består først og fremmest af en kompressor, en fordamper (kold side med lavt tryk), en kondensator (varm side med højt tryk) samt en ventil mellem de to trykniveauer. Køleanlæggets effektivitet (EER) afhænger af mange forhold: systemets design, komponenternes effektivitet, om anlægget er on/off-styret eller kapacitetsreguleret (frekvensreguleret) osv. I drift afhænger effektiviteten af kølebehovet og temperaturforskellen mellem den kolde og den varme side. EER stiger med faldende temperaturforskel mellem den kolde og den varme side. Det betyder, at varmen bør afgives ved en så lav temperatur som muligt – typisk så tæt på udetemperaturen som muligt, mens fordampertemperaturen bør være så høj som muligt. Der er derfor behov for meget effektive kondensatorer og fordamperer. Det betyder, at kølefladerne til eller inde i rummene skal være så store, at de kan dække kølebehovet ved en temperatur, der er tæt på rumtemperaturen. Det sidste er undersøgt i et ph.d.-projekt, som beskrives i det følgende.

Effektiviteten for kølesystemer, der findes på markedet, kan findes på www.eurovent-certification.com. Mekaniske køleanlæg bør dog altid altid designes og installeres af eksperter.

STRÅLINGSKØLING

REFERENCE: (LE DRÉAU, 2014)

Simuleringer og fuldskalaforsøg har været anvendt til at undersøge fordele og ulemper ved kølesystemer baseret på anvendelse af henholdsvis strålende og konvektive terminaler (kølegivere). Undersøgelserne har fokuseret på systemernes effektivitet målt som forbrugt energi ved opretholdelse af et ensartet termisk komfortniveau.

Effektiviteten af fire forskellige køleterminaler (indblæsning af kold luft, stråling fra køligt gulv og vægge samt køleloft) er blevet sammenlignet for et typisk kontorlokale. Forskellen mellem strålende og konvektive terminalers effektivitet er hovedsagelig afhængig af rummets luftskifte. Ved et lavt luftskifte (under 0,5 h^{-1}), har de omtrent samme energiforbrug. Ved højere luftskifte vil energiforbruget ved anvendelse af strålende terminaler være lavere end ved anvendelse af konvektive terminaler. Det skyldes til dels, at ventilationstabene er større ved anvendelse af strålende terminaler pga. en højere udsugningstemperatur - det giver mere køling ved samme luftstrøm. For eksempel er kølebehovet ved strålende gulv 15 % lavere end ved indblæsning af kold luft ved et luftskifte på 2 h^{-1}. Der kan derfor opnås en stor energibesparelse ved brug af strålende køleterminaler i bygninger med højt luftskifte (fx i butikker, på togstationer og i industrielle lagerbygninger). Det er desuden vist, at effektiviteten ved indblæsning med kold luft helt afhænger af, hvilken type luftstrøm, der kan skabes i rummet, dvs. af indblæsningssystemets udformning. Hvis klimaanlægget skaber kolde flader, fungerer det delvist som et kølesystem med strålende terminaler og bliver derved mere effektivt.

Lodrette temperaturgradienter i rummet har stor indflydelse på kølebehovet. Ved et luftskifte på 2 h^{-1} falder kølebehovet med 15 %, hvis der er en temperaturdifferens på 4 °C mellem gulv og loft. Problemet er blot at opnå en sådan temperaturdifferens. Ved fortrængningsventilation i forbindelse med strålingsgulv eller strålingsvægge er det formentlig muligt, mens det er mindre sandsynligt at kunne opnå med et køleloft eller ved indblæsning af kold luft.

Hvis der er stående personer i rummet, har de tre systemer med strålende terminaler (gulv, væg og loft) nogenlunde samme effektivitet. Hvis personerne sidder ned, vil det store vinkelforhold mellem personerne og gulvet lede til en reduktion af energibehovet for kølesystemer med koldt gulv. Hvis der er solindfald til rummet (normalt mest på gulvet), er det muligt direkte at fjerne denne varmebelastning via gulvkøling inden den bliver til gene i rummet.

ENERGIFORSYNINGS-SYSTEMER

ENERGIFORSYNINGSSYSTEMER

Det tredje trin til opnåelse af Net ZEB er udnyttelse af vedvarende energikilder. I overensstemmelse med Net ZEB-konceptet, som ses i figuren til højre, kan produktion af vedvarende energi foregå på matriklen, i umiddelbar nærhed eller fjernt fra byggeriet. I sidstnævnte tilfælde tilføres den vedvarende energi fra el- eller fjernvarmenettet. Med tiden forventes det, at en stigende del af den vedvarende energiproduktion, der er brug for i Net ZEB, vil finde sted fjernt fra bygningen, idet el- og fjernvarmeproduktionen vil bevæge sig mod 100 % forsyning fra vedvarende energikilder. Indtil da, vil der stadig være behov for lokale systemer. Lokale vedvarende energisystemer omfatter:

- Solceller (PV)
- Solvarme
- Vindmøller
- Mikro-kraftvarme (CHP)

Forskningscentret har fokuseret på tre områder:

- Optimering af lokale vedvarende energikilder.
- Undersøgelse af BOLIG+ konceptet med forskellige typer af lokal/central vedvarende energiforsyning.
- Optimering af fremtidens danske energisystem.

Forskningscentret har ikke beskæftiget sig med mikro-vindmøller. Produktionen fra denne type vindmøller vil både være tidsmæssigt sammenfaldende med og dyrere end elektricitet produceret af store centrale vindmøller.

Inden resultaterne af forskningscentrets forskning beskrives, gennemgås den seneste udvikling på PV-området (solceller) og kombinationen af solvarme og varmepumper, da begge disse teknologier er vigtige for opnåelsen af Net ZEB.

BETINGELSERNE FOR DEN ENERGINEUTRALE BOLIG OVER TID

Bygningen er som udgangspunkt designet med et meget lavt energibehov

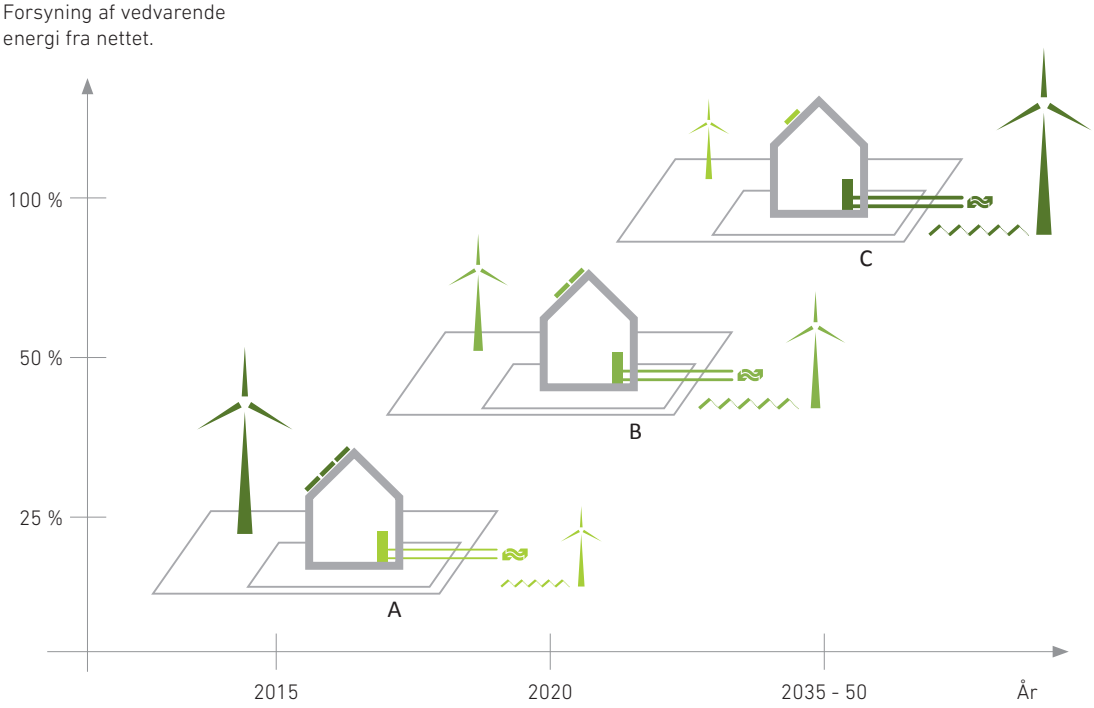


Fig. 1

A I 2015 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet begrænset. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen eller på matriklen.

B I 2020 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet større. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen/matriklen eller ved produktion af energi i lokalområdets ejerlav.

C I 2035 forventes det, at bygningsmassens energibehov kan dækkes ved vedvarende energi fra nettet. Desuden kan der suppleres med egenproduktion (el og varme).

SOLCELLEANLÆG

Solceller eller PV-anlæg forbundet med nettet er en velafprøvet teknologi og udgør i dag en naturlig del af mange koncepter for lavenergibyggeri. Et velinstalleret og -designet solcelleanlæg vil levere el med en fast ydelse gennem hele sin levetid på 25-30 år.

I de fleste tilfælde er solcelleanlæg ganske enkelt tilsluttet hovedtavlen som en "negativ forbruger", så beboerne i et hus direkte kan anvende den leverede strøm til deres elektriske installationer eller eksportere et eventuelt overskud til lavspændingsnettet.

Indtil for nylig var det gratis at benytte det danske net til sæsonbestemt lagring af PV-elektricitet (overskudselektricitet eksporteret om sommeren kunne gratis flyttes til import af elektricitet i perioder uden PV-produktion), og derfor var batterier og andre lokale lagringsmedier uaktuelle. Imidlertid begrænser de nye timebaserede målingsordninger for lokalt produceret elektricitet værdien af denne mulighed. Den timebaserede nettomålingsordning er meget mindre forudsigelig end årsmodellen hvad angår beregning af tilbagebetalingstid for PV-anlæg.

SENESTE UDVIKLING INDEN FOR SOLCELLEANLÆG

Den teknologiske udvikling i solcellebranchen styres af det internationale marked, og især det tyske. Til trods for en stor indsats på forsknings- og udviklingsområdet for at udvikle alternative solcelletyper er det stadig mono- og polykrystallinsk silicium, der dominerer PV-markedet på grund af dette materiales medfødte stabilitet, pålidelighed og (indtil for nylig) stadigt faldende priser.

Kommercielt tilgængelige PV-modulers effektivitet har passeret 20 % og er i stadig stigning. Der findes nye lovende teknologier som CIS (Kobber-Indium-Selen) og "stakkede" solceller baseret på tynde substratbelægninger. Disse solcelletyper er på grund af deres ensartede fremtoning meget anvendelige til arkitektonisk integration i klimaskærmen. Tabel 5 og figur 29 viser de typiske ydelsesværdier for forskellige solcelletyper.

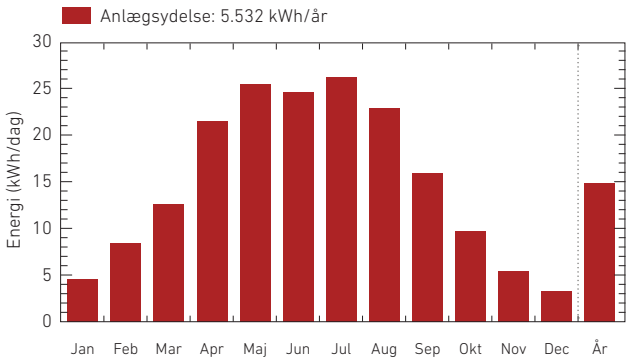
En anden interessant nyskabelse er de såkaldte PV-T-paneler, hvor hvert PV-modul er monteret på et væskebaseret kølesystem. Hvis dette er forbundet til en varmepumpe, er det muligt at hæve el-ydelsen fra solcellerne og samtidig bruge solcellerne som varmekilde. Denne type solcelle/solfanger er specielt interessant for byggeri med et lille anlægsareal i forhold til energibehovet.

Den nye generation af PV-invertere er blevet "intelligente", idet strømtilførslen til nettet nu kan kontrolleres af den netansvarlige eller en anden aktør på markedet, hvis spændingen i nettet bliver for høj. De mest avancerede typer kan endda kommunikere med husholdningsmaskiner som vaskemaskiner eller batteriladere til elbiler. Denne egenskab gør det muligt at hæve egetforbruget af sol-el, hvorved det undgås at sælge strøm til en lav tarif. Det typiske egetforbrug ligger på 30-40 % for en husholdning.

Det er også en ny trend at tilføje batterier til nettilsluttede PV-anlæg – som vist i figur 30 – for at hæve egetforbrugsdelen endnu mere. Men generelt er denne løsning endnu ikke økonomisk attraktiv på grund af den høje pris og den begrænsede levetid for lokal batterilagring. Prisen på lagring af elektricitet i kommercielle PV-batteripakker er i øjeblikket mindst 2 kr./kWh. I fremtiden vil meget fleksible takster på forbrugerniveau sammen med bedre batterier gøre sådanne lagringssystemer mere konkurrencedygtige, hvilket kan medføre en stigning i PV-egetforbruget til 60-70 %.

Typiske værdier for markedsførte anlæg	Areal for 1 kW_p installeret	Årlig ydelse kWh/m^2
Monokrystalinske	5-7	140-190
Polykrystalinske	6-9	120-150
Forskellige tyndfilm	8-16	50-110

Tabel 5. Typiske ydelsesværdier for forskellige solcelletyper.



Figur 29. Typisk produktionsprofil for et $6kW_p$ PV-anlæg (sydvendt og med en hældning på 30 °)

BYGNINGSINTEGRERERE SOLCELLER

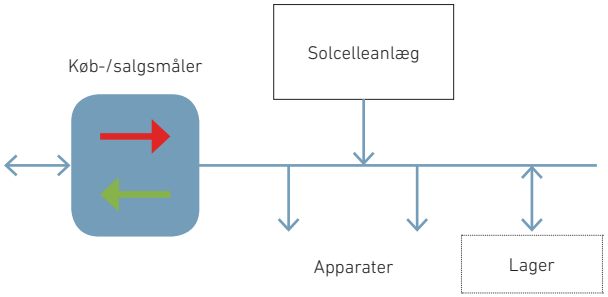
Fra et arkitekturmæssigt synspunkt kan PV-moduler integreres på to måder: Byggeriet designes, så dets dimensioner tilpasses til gældende standard-PV-modulstørrelse, typisk enheder på ca. 1 m x 1,6 m, eller der anvendes særlige PV-moduler, som passer til standardiserede tagsystemer. På det danske marked findes der kun et ret begrænset antal tagsystemer, som inkluderer PV i sortimentet.

Et typisk energineutralt enfamiliehus med en passende tagflade til solceller på 50 m^2 kan producere op til 8.000 kWh/år, hvis der anvendes effektive komponenter, og placeringen er fri for skygge. Derved er det muligt at opnå 100 % kompensation for hele energiforbruget på årsbasis. Det direkte egetforbrug ligger typisk under 30 %, hvis der ikke forefindes regulerings- eller lagringssystemer – se figur 31.

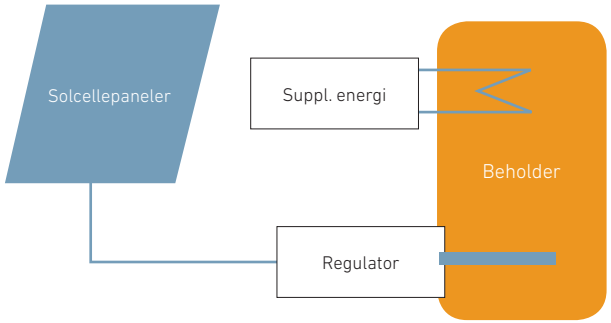
Egetforbruget pr. time kan hæves noget ved at styre en varmepumpe efter solen eller ved hjælp af en elektrisk vandvarmer med passende volumen - se figur 32. Herved kan PV-anlægget fungere som et virtuelt solvarmeanlæg.

Der findes allerede løsninger på markedet, der ikke er nettilsluttet, og som udelukkende bruger PV-anlægget til opvarmning. Denne løsning er dog kun interessant, hvis afgiften for tilslutning af solcelleanlæg til nettet stiger betydeligt, eller hvis salgstariffen falder til et niveau, der er lavere end varmeprisen baseret på andre energiformer.

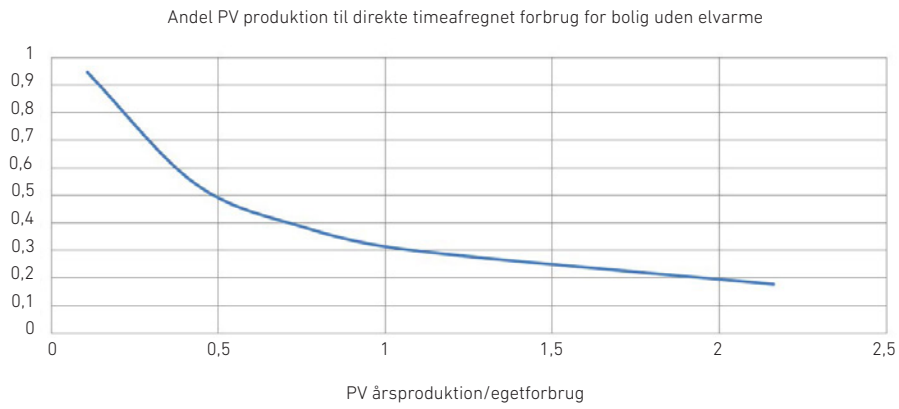
Beregning af den timebaserede energibalance viser, at egetforbruget i høj grad afhænger af størrelsen af PV-anlægget i forhold til el-behovet - se figur 31. Den økonomisk optimale størrelse afhænger af de faktiske fremtidige priser på el, samt af afgifter og skatter, som pålægges systemet. Det er relativt enkelt at tilpasse størrelsen på en eksisterende PV-installation, for eksempel ved at tilføje et delsystem på en garagebygning eller på jorden.



Figur 30. Nettilslutning af solcelleanlæg, lagring som fremtidig mulighed



Figur 32. Lavspændings-DC-system til direkte opvarmning i stedet for et traditionelt solvarmesystem. Hovedsageligt brugbart i små husholdninger.



Figur 31. Egetforbrug som en funktion af anlæggets størrelse

LEVETID, SERVICE OG VEDLIGEHOLDELSE

Det er dokumenteret, at solcelleanlæg kan holde mange år uden megen vedligeholdelse. Den mest sårbare komponent er inverteren, hvor effektelektronikken kan blive overophedet. Det anbefales derfor at installere inverteren på et køligt sted. Det bør nævnes, at effekttabet fra inverteren kan være på flere hundrede watt i en typisk PV-installation. For at modvirke overophedning af lavenergihuset om sommeren er det derfor vigtigt med passende ventilation omkring inverteren. En inverters levetid kan i gennemsnit anslås til 10 år, og PV-modulerne og monteringssystemet til 25 år. Forringelsen i modulernes ydeevne kan variere fra produkt til produkt, men generelt bør en reduktion på 0,5 % pr. år ikke overskrides.

Regelmæssig rengøring af PV-panelerne er kun nødvendig i forurenede områder, eller hvis PV-modulets hældningsvinkel er under 10 °.

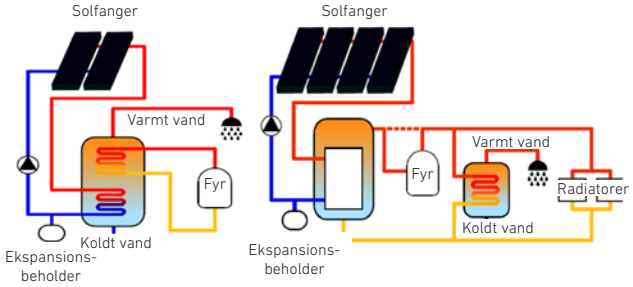
KOMBINATION AF SOLVARME OG VARMEPUMPER

I mange lavenergibyggerier er en elektrisk varmepumpe med et vandbaseret varmesystem det foretrukne varmeanlæg. Varmepumpen kan kombineres med en varmtvandstank til forsyning af varmt brugsvand. Varmt brugsvand kan dog også leveres af en separat varmepumpe. Da kapaciteten for varmepumper til lavenergibyggeri typisk er lav (< 6 kW pr. bolig), er der behov for en relativt stor varmtvandstank (mindst 150+ liter) for at kunne forsyne en typisk husholdning med den ønskede mængde varmt vand. Varmepumpesystemer kan være meget effektive, men der er stadig et betydeligt potentiale for forbedringer af teknologien.

Varmepumper kan kombineres med solenergi for at reducere elforbruget yderligere – i Nordeuropa vil der altid være brug for en backup-varmekilde til solenergi. Grundlæggende findes der to typer solvarmesystemer: et system, som kun leverer varme til opvarmning af brugsvand, og et system der leverer varme til både varmt brugsvand og til rumopvarmning, se figur 33. På markedet findes der mange forskellige løsninger, der kombinerer solvarme og varmepumpe, heriblandt løsninger som bruger solvarme til forvarmning af væsken (brinen) til varmepumpen, og løsninger der inkluderer lagring af solvarmen i jorden.

I (IEA SHC Task 44, 2013) er et antal forskellige løsningsmodeller undersøgt. Nogle af konklusionerne heraf er:

- Supplering med solvarme direkte til varmepumpen vil typisk forbedre pumpens årseffektivitet med 15-20 %.
- Det er ikke særlig effektivt at lagre solvarme i jorden.
- Den generelle årseffektivitet for et kombineret system afhænger primært af dækningsgraden for solvarmen.
- Mange systemer er for komplekse og for investeringstunge i forhold til udbyttet.



Figur 33. Til venstre: system til varmt brugsvand - typisk 4-5 m² pr. bolig. Til højre: system til varmt brugsvand og rumopvarmning - typisk 7-12 m² pr. bolig. Hældningen på solfangeren bør være størst i sidstnævnte tilfælde.

Som tommelfingerregel kræver et veldesignet solvarmesystem 50 liter lagringsvolumen pr. m² solpanel. Det betyder, at en typisk lagertank for solenergi i boliger er i størrelsesordenen 250 liter for et system til varmt brugsvand og op til 1200 liter for et system, som leverer både varmt brugsvand og rumopvarmning. I et fremtidigt Smart Grid system er der behov for at afstemme energiforbruget i bygninger i forhold til den aktuelle elproduktion fra vind, PV, osv. i forsyningsnettet. Denne tilpasning af forbruget kan ske ved at lagre varme fra en varmepumpe i fx en solvarmebeholder. I et forskningsprojekt (Furbo et al, 2013) blev forskellige kombinationer af avancerede lagertanke, solpaneler og varmepumper reguleret af et "smart"-system, baseret på prognoser for rumvarmebehov, solvarmeproduktion og pris på elektricitet. Hovedkonklusionerne var:

- Individuelle smart-solvarmesystemer med elektrisk varmelegeme/varmepumpe og variable priser på elektricitet er mere rentable end traditionelle solvarmesystemer.
- Individuelle smart-solvarmesystemer med elektrisk varmelegeme/varmepumpe kan medvirke til at sikre øget integration af vindenergi i energisystemet og bidrage til, at andelen af vedvarende energi i nettet kan øges.
- For huse med lavt varmebehov og et smart-solvarmesystem er et elektrisk varmelegeme økonomisk mere attraktiv end en varmepumpe.
- For huse med normalt eller højt varmebehov og et smart-solvarmesystem er en varmepumpe økonomisk mere attraktiv end et elektrisk varmelegeme.

Som modsætning til disse ret komplekse systemer blev et simpelt solvarmesystem, kombineret med et jordvarmeanlæg, til opvarmning af brugsvand i husholdninger testet i Energy-FlexHouse (2013). Da varmepumpen kræver en forholdsvis stor lagertank til varmt brugsvand, er ekstraudgifterne til en ekstra solvarmeveksler og ekstra lagringsvolumen begrænset. Den ekstra investering er til solfangere, pumpegruppe, kontrolboks, installation osv. Undersøgelsens hovedformål var at

måle varmepumpens effektivitet (COP) ved produktion af varmt brugsvand med og uden solvarme. Erfaringerne fra undersøgelsen er desuden blevet brugt til at udarbejde retningslinjer for kombinationen af solenergi og varmepumper (Christensen, 2014).

- Det er enkelt at installere og bruge en kombination af varmepumpe og solvarmesystemer til varmt brugsvand.
- Det er muligt at opnå COP-værdier over 3 for varmepumper til opvarmning af brugsvand i sommerperioden maj-september.
- Det er vigtigt at reducere elforbruget til cirkulationspumper.

Der er dog udfordringer mht. rentabiliteten af solvarme i energineutralt byggeri, men også et potentiale med hensyn til integration med Smart Grid og generel CO_2-reduktion. Diskussionen om, hvorvidt solvarme er rentabelt sammenlignet med andre vedvarende energikilder, er til en vis grad farvet af feed-in tarifferne for solceller samt andre takster, som skal tilskynde til brug af elektricitet, fx den refusionsordning for forbrug til el-opvarmning, som i øjeblikket er gældende i Danmark. Der er tale om en refusion på 0,52 kr. pr. kWh brugt til elektrisk opvarmning ved hjælp af fx en varmepumpe. Dette reducerer rentabiliteten af solvarme i forhold til varmepumper.

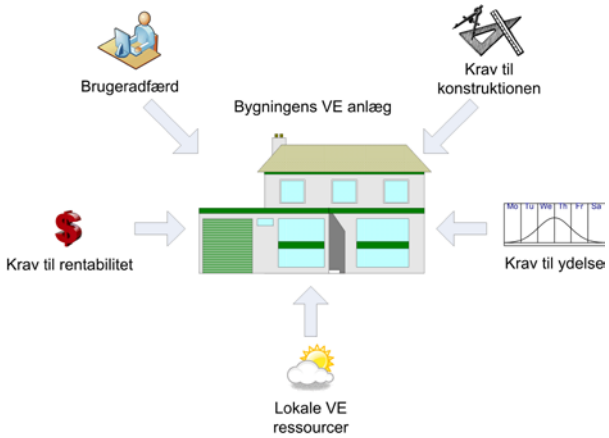
OPTIMERING AF VEDVARENDE ENERGI PÅ MATRIKLEN

REFERENCE: (MILAN, 2014)

Ved design af vedvarende energisystemer til energineutralt boligbyggeri skal der tages højde for adskillige restriktioner og krav. Figur 34 giver et overblik over de forskellige forhold, der skal tages hensyn til ved design og drift af forsyningssystemer udelukkende baseret på vedvarende energikilder. En realistisk vurdering af brugeradfærd og -præferencer, foruden den lokale forekomst af vedvarende energikilder som fx solindfald og vind spiller en vigtig rolle i planlægningsprocessen. Derudover skal der tages hensyn til adskillige krav vedrørende forsyningssystemet. Det skal også sikres, at visse designkriterier imødekommes, fx vedligeholdelsesintervaller, modularitet, såvel som den valgte teknologis nøjagtige ydelse og økonomiske rentabilitet.
Det er derfor nødvendigt med sted-specifikke løsninger for hvert enkelt byggeri. Der skal dog sikres en ensartet metodik, som åbner mulighed for optimale løsninger, baseret på de lokale forhold. De nuværende energianalysemodeller fokuserer hovedsagelig på regionale og nationale niveauer og udelukker derfor undersøgelse af det lokale forsyningssystem, eller de omfatter kun nogle specifikke teknologier og ikke et bredt udvalg. En anden vigtig pointe er, at energineutralt byggeri ofte har højere investeringsudgifter sammenlignet med standardbyggeri. Dette skyldes anvendelse af særlige byggematerialer og installation af et antal vedvarende energiteknologier.

Forskningscentrets arbejde på området forsøger at dække behovet for anvendelige modeller til optimering af vedvarende energisystemer til boligbyggeri. Der er udviklet et program, som sikrer identificering og analyse af den mest rentable kombination baseret på et stort udvalg af teknologier, og som tager højde for både fluktuerende produktion fra de vedvarende energisystemer og forbrugsadfærdsmønstre. Målet er at minimere forsyningssystemets samlede omkostninger, snarere end at optimere energieffektiviteten. Programmet anvender timeværdier for forbrugsprofiler sammen med vejrdata, og kan let kobles sammen med værktøjer til simulering af bygningen.

Input til programmet består hovedsageligt af vejr- og forbrugsdata samt restriktioner opsat for byggeriet eller fremsat af systemdesigneren. Programmet bruger timeværdier for lokale vejrdata og forbrugsprofiler. Programmets optimeringsrutine omfatter opstilling af balanceligninger for varme, elektricitet og primærenergiforbrug i kombination med funktioner, som repræsenterer de samlede udgifter for systemet. Den mest rentable kombination af teknologier og kapaciteten af disse bestemmes. Samtidig bestemmes de samlede systemomkostninger for investerings-, drifts- og afviklingsfasen. Ved beregning af den optimale kombination løses energibalancen time for time, og derved leverer programmet ydelsesdata for det optimerede system. Metoden er anvendt med succes på adskillige eksempler.



Figur 34. Betingelser for design af vedvarende energisystemer

LOKALE ELLER CENTRALE **VEDVARENDE ENERGISYSTEMER**

BOLIG+-KONCEPT MED FORSKELLIGE ENERGIFORSYNINGSSYSTEMER

REFERENCE: (MARSZAL, 2012)

BOLIG+ var det første danske projekt, der omhandlede et flere-etagers energineutralt boligbyggeri (BOLIG+, 2013). BOLIG+ konceptet blev initieret af EnergyCamp05, hvor repræsentanter fra forskellige dele af byggebranchen blev bedt om at løse opgaven: Hvordan kan vi udvikle energieffektivt boligbyggeri til verdens voksende befolkning. Vinderprojektet i den efterfølgende konkurrence var en bygning, som bestod af én sektion på seks etager og en anden på ti etager. Bygningens samlede bruttoetageareal var på 7.000 m^2, hvoraf beboelse udgjorde 6.790 m^2 (60 lejligheder til ca. 180 beboere), mens de resterende 210 m^2 kunne anvendes til andre formål.

En livscyklusanalyse af omkostningerne (LCC), er gennemført for BOLIG+-projektet, for at bestemme den mest rentable nul-energibalance, minimumskrav for energiforbrug og bygherrens valgmuligheder med hensyn til forsyning af vedvarende energi. Beregningen blev gennemført for tre energirammeniveauer BR10, BR15 og BR20; der afspejler de gældende regler for energiforbrug, Lavenergiklasse 2015 og Bygningsklasse 2020 som angivet i BR10, se tabel 6.

Undersøgelserne blev foretaget for ti vedvarende energiforsyningssystemer, lokale såvel som centrale. For Sys-1 til Sys-5 dimensioneres PV til at dække bygningens årlige primære energibehov:

	Enhed	BR10	BR15	BR20
Energiramme	kWh/m^2 pr år	52,7	30,1	20
U-værdi for ydervæg	W/m^{2}K	0,29	0,2	0,1
U-værdi for gulv	W/m^{2}K	0,19	0,13	0,08
U-værdi for tag	W/m^{2}K	0,19	0,13	0,07
U-værdi for vinduer	W/m^{2}K	1,78	1,4	1,0

Tabel 6. Energirammer og tilsvarende U-værdier.

SYS-1: Byggeri med lokale solcelleanlæg og jordvarmepumpe.

SYS-2: Byggeri med lokale solcellelæg og brændselsceller baseret på biogas til kombineret produktion af varme og el. Biogas tilføres gennem forsyningsselskabets rørsystem.

SYS-3: Byggeri med lokale solcelleanlæg og Sterling motor baseret på biomasse til kombineret produktion af varme og el. Biomasse transporteres til grunden.

SYS-4: Byggeri med lokale solcelleanlæg og brændselsceller baseret på brint til kombineret produktion af varme og el. Brint transporteres til grunden.

SYS-5: Byggeri med lokale solcelleanlæg og varme fra fjernvarmenettet.

SYS-6: Byggeri med jordvarmepumpe og central vindmølle (væk fra bygningen), dvs. en enkelt, middelstor vindmølle.

SYS-7: Byggeri med jordvarmepumpe, og som ejer en andel i en vindmøllepark, fx Anholt Havmøllepark.

SYS-8: Byggeri med jordvarmepumpe, og som er tilsluttet el-nettet, der forsynes 100 % fra vedvarende energikilder.

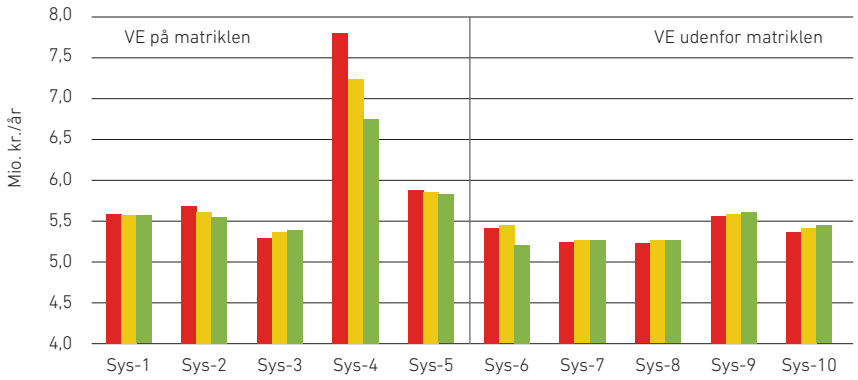
SYS-9: Byggeri med varme fra fjernvarmenettet, og som er tilsluttet en central vindmølle. Vindmøllen er dimensioneret til at balancere bygningens primære energiforbrug.

SYS-10: Byggeri med varme fra fjernvarmenettet, og som ejer en andel i en vindmøllepark. Andelen i vindmølleparken balancerer bygningens primære energiforbrug.

Den beregnede LCC (privatøkonomisk) antyder, at prisen for de centrale muligheder for energiforsyning er lavere end for de lokale alternativer, men anvendelse af de centrale muligheder vil ske på bekostning af energieffektiviteten, se figur 35. Det er billigere at købe vedvarende energi fra centrale systemer end at spare på energien i bygningen. Det betyder, at den mest rentable løsning for den private boligejer er i modstrid med den mest rentable løsning for samfundet, som prioriterer energieffektive løsninger. Figur 36 viser, at løsninger med køb at vedvarende energi fra centrale systemer er mere sårbare over for udsving i energipriserne, fordi en langt større andel af omkostningerne er direkte knyttet til energiregningen. Endvidere er de centrale løsninger normalt tilknyttet den individuelle ejer (eller lejer) snarere end selve bygningen, hvilket betyder, at bygningens status som energineutral kan ændres i forbindelse med ejerskifte (eller fraflytning).

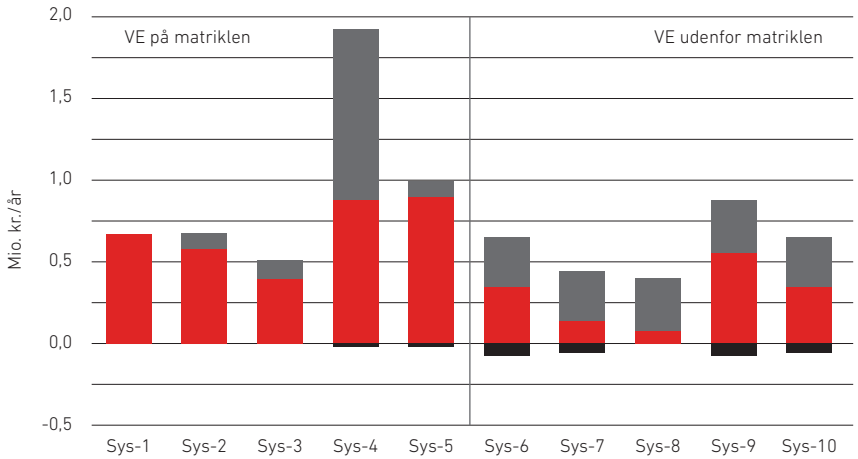
Resultaterne viser yderligere, at fjernvarme for den private ejer er mindre økonomisk attraktiv end en jordvarmepumpe, til trods for at denne løsning er den mest rentable set fra en samfundsmæssig synsvinkel.

Der er derfor behov for at ændre de økonomiske rammer (skatter, økonomiske incitamenter og energitariffer) for at sikre sammenhæng mellem de økonomisk mest rentable løsninger for samfundet og for den private ejer. Fjernvarme vil fx være konkurrencedygtig med individuelle varmepumper mht. at levere varme til fremtidens energineutrale byggeri, hvis den gældende tarifpraksis, som indebærer et højt fast årligt beløb og en månedlig betaling for forbruget af varme, blev ændret. Enten ved at reducere den faste årlige takst i forhold til det reducerede varmebehov i det energineutrale byggeri, eller ved at fastsætte en ny takst uden det faste beløb, men alene ved betaling af det faktiske forbrug. Konsekvenserne af sidstnævnte afregningsform ses i figur 37.



Figur 35. Årlige udgifter for ejerne over en 50-års LCC-beregningsperiode for de tre energirammer og ti vedvarende energiforsyningssystemer.

BR10
BR15
BR20



Figur 36. De årlige udgifter for ejerne ved BR20-niveauet og for de ti forskellige forsyningsformer uden at inkludere udgifterne til opførsel af bygningen (se tabel 7): Nettomålerordningen blev anvendt for lokale vedvarende energikilder og de faste takster for centrale vedvarende energikilder (Marszal, 2012). Teknologi: udgifter til VE-systemer. Energiregning: pris for brændstof, fjernvarme og elektricitet. Energiindkomst: indtægt fra eksport af el til nettet.

Teknologi
Energiregning
Energiindkomst

AFREGNING AF LOKALT PRODUCERET EL

Der er to metoder for afregning af el produceret på matriklen:

- Den første metode, der kaldes nettomålerordningen, hvor kunden kan bruge deres lokalt genererede overskudsenergi til modregning i deres fremtidige behov hen over faktureringsperioden ved at lade elmåleren køre baglæns i perioder med overskud. Nettet bruges således til gratis energilagring. I dette tilfælde svarer feed-in tariffen (den pris kunden får for el leveret til el-nettet) til købstariffen for el, inkl. skatter og afgifter. Denne metode bruges ofte som et incitament for at få private forbrugere til at investere i vedvarende energi.
- Metode nummer 2 kaldes en tarifaftale. Her er feed-in tariffen forskellig fra (normalt lavere) end købstariffen. Ved at justere på feed-in tariffen kan regeringen enten støtte eller hæmme udbredelsen af lokale vedvarende energikilder.

Nettomålerordningen bruges i forbindelse med anlæg til el-produktion på matriklen opført inden 20. november 2012. Alle anlæg opført efter denne dato falder under retningslinjerne for en tarifaftale, hvor beregningen af eksport/import foretages på timebasis.

I den oprindelige LCC-analyse (Marszal, 2012) blev eksport/import mellem byggeri og el-net foretaget ved brug af nettomålerordningen og tarifaftale for henholdsvis lokale og centrale vedvarende energikilder, se scenarie 0 i tabel 7 (side 60). For at dokumentere, hvordan ændringen i afregningsregler påvirker resultaterne, blev der foretaget en ny LCC-beregning ud fra reglerne gældende fra 20/11 2012, se scenarie 1-3 i tabel 7.

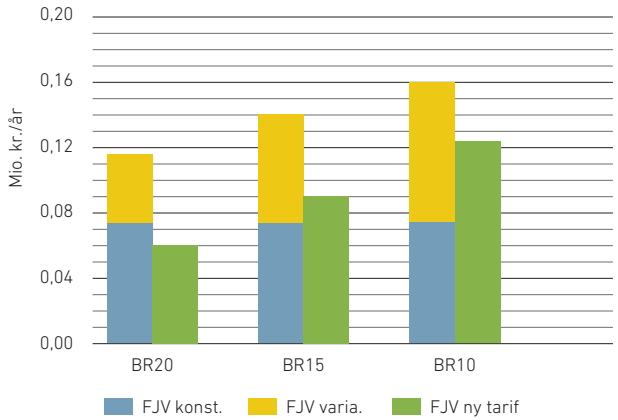
Som ventet forøger ændringen af eksport/import-afregningsmetoden fra nettomålerordningen til tarifaftale for el-produktion på matriklen energiregningen, se figur 38 (sammenlign med figur 36). Afhængig af installationsomkostningerne og afregningstype vil dette koste private kunder (her 60 lejligheder) yderligere op til 156.992 kr. pr. år (eller 2.167 kr. pr. år pr. lejlighed), se tabel 8. Konsekvensen af ændret afregningsmetode for eksport/import vil for mikro-kraftvarme-enheder på matriklen være mindre omkostningstung, fordi der her er bedre overensstemmelse mellem det lokale behov og produktionen.

Det betyder, at en tarifaftale skaber større prisforskelle mellem vedvarende energi på matriklen og centrale vedvarende energikilder, til fordel for sidstnævnte.

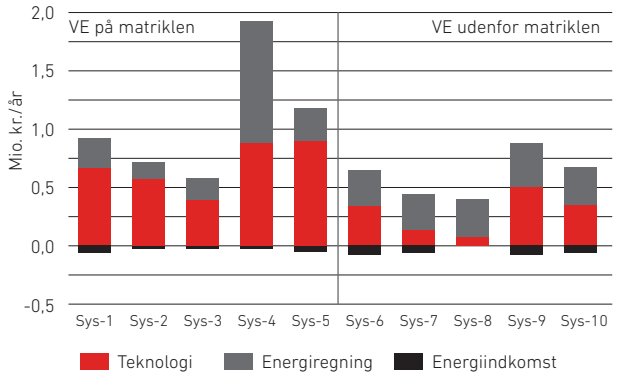
De nye regler for feed-in tarif kan på flere måder få indflydelse på udformningen af energineutralt byggeri:

- Det er mere økonomisk fordelagtigt for private at basere sig på centrale end lokale vedvarende teknologier. Herved favoriseres vedvarende energiproduktion i forhold til energieffektivisering.
- Bygherren vil være tilbøjelig til at installere mindre vedvarende energianlæg. Det vil reducere spidsbelastningerne i eksporten af el, hvilket er en fordel for driften af nettet.
- Lavere forbrug af elektricitet, da det ikke længere er rentabelt med en kunstigt skabt højere el-import alene for at opnå den årlige balance mellem import og eksport af elektricitet.
- Fokus på øget egetforbrug af solcellestrøm. Brug af fx lokale batterier for at maksimere samtidigheden mellem behov og strøm produceret af solceller og derved skabes mere uforudsigelige import-/eksportprofiler, som kan blive dyre at håndtere for el-nettet.

Scenarie 1-3 ændrer ikke tendensen vist i figur 35, hvor lokal vedvarende energi favoriserer energieffektivisering frem for vedvarende energikilder.



Figur 37. Ejernes årlige drifts- og vedligeholdelsesudgifter til fjernvarme med den gældende faktureringsmetode samt forslag til en alternativ metode. FJV konst.: fast årligt gebyr. FJV varia.: årligt variabelt gebyr. FJV ny tarif: årlig takst, som alene beror på forbruget af varme (Marszal, 2012).



Figur 38. Scenarie 1 fra tabel 7. De årlige udgifter for vedvarende energisystemer (teknologi), brændstof, fjernvarme og el (energiregninger) og den årlige indtægt fra eksport af el til nettet (energiindkomst) i BR20 byggeri og ti systemer med vedvarende energi. Systemerne med centrale vedvarende energikilder er uforandrede.

Scenarier	Produktion på matriklen	Produktion af central vedvarende energi
0 – reference (anlæg opført før 20.november 2012)	Nettomålerordningen Køb fra nettet = feed-in tarif = 1,78 kr./kWh (ekskl. moms) Hvis eksport af lokalt produceret strøm på årsbasis overstiger importen, bliver den overskydende elektricitet prissat som følger: 0,60 kr./kWh for perioden 0-10 år 0,40 kr./kWh for perioden 11-20 år 0,37 kr./kWh (gennemsnitlig markedspris i 2010) for perioden 21-50 år, hvilket giver en vægtet gennemsnitsværdi på 0,42 kr./kWh	Tarifaftale Køb fra nettet = 1,78 kr./kWh Feed-in tarif = 0,41 kr./kWh, udregnet som vægtet gennemsnit på basis af følgende antagelser: 0,60 kr./kWh for perioden 0-8 år 0,37 kr./kWh (gennemsnitlig markedspris i 2010) for perioden 9-50 år
1 – Feed-in tarif*	Timebaseret nettoafregning Køb fra el-nettet = 1,78 kr./kWh (ekskl. moms) feed-in tarif = 0,42 kr./kWh, udregnet som vægtet gennemsnit på basis af følgende antagelser: 0,60 kr./kWh for perioden 0-10 år 0,40 kr./kWh for perioden 11-20 år 0,37 kr./kWh (gennemsnitlig markedspris i 2010) for perioden 21-50 år	Som ovenfor
2 – Særlig tarifaftale: Den årligt tilgængelige 20 MW-pulje + maksimal kapacitet for lokal solcellestrøm må ikke overstige 6 kW/lejlighed*	Tariftale Køb fra el-nettet = 1,78 kr./kWh (ekskl. moms) Feed-in tarif = 0,56 kr./kWh, udregnet som vægtet gennemsnit på basis af følgende antagelser: 1,30 kr./kWh for perioden 0-10 år 0,37 kr./kWh (gennemsnitlig markedspris i 2010) for perioden 11-50 år	Som ovenfor
3 – Særlig takstaftale: Den årligt tilgængelige 20 MW-pulje + lokal solcellestrøm fra fællesanlæg*	Tarifaftale Køb fra el-nettet = 1,78 kr./kWh (ekskl. moms) Feed-in tarif = 0,59 kr./kWh, udregnet som vægtet gennemsnit på basis af følgende antagelser: 1,45 kr./kWh for perioden 0-10 år 0,37 kr./kWh (gennemsnitlig markedspris i 2010) for perioden 11-50 år	Som ovenfor

Tabel 7. Overblik over scenarier samt anvendte elpriser.
* http://www.energitjenesten.dk/nye-afregningspriser-pa-solcelle-el-leveret-til-nettet.html

	Enhed	Sys-1	Sys-2	Sys-3	Sys-4	Sys-5
Import/ eksport	MWh/år	116/116	32/32	46/46	16/85	73/133
S1 - S0	kr. /år	156.992	43.308	62.255	21.654	98.796
S2 - S0	kr. /år	141.448	39.020	56.091	10.264	80.974
S3 - S0	kr. /år	137.968	38.060	54.711	7.714	76.984

Tabel 8. Overblik over scenarier samt anvendte elpriser.

INTEGRATION AF ENERGINEUTRALT BYGGERI I FREMTIDENS BÆREDYGTIGE ENERGISYSTEM

REFERENCE: (LUND, ET AL, 2014)

En hensigtsmæssig realisering af energineutralt byggeri kan ikke ses isoleret fra resten af det fremtidige energisystem, som bygningerne forventes at skulle indgå i. Derfor har forskningscentrets analyser af dette spørgsmål taget udgangspunkt i en overordnet vision for fremtidens energiforsyning. Formålet har været at identificere og sætte tal på vigtige aspekter af det energineutrale byggeri i forhold til opfyldelsen af den danske regerings langsigtede mål om at etablere et fossilfrit energisystem i Danmark inden udgangen af 2050.

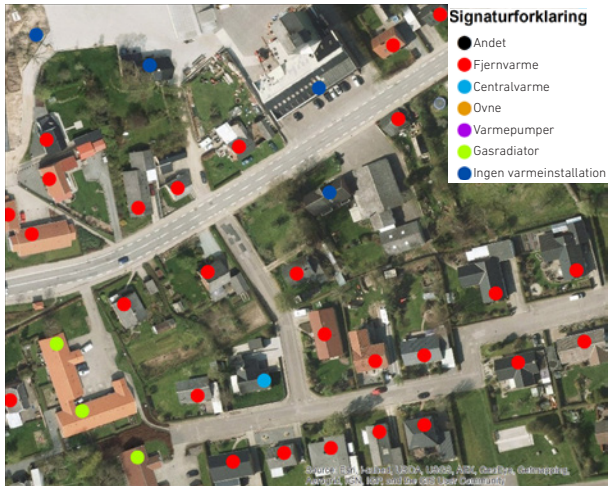
I analyserne er der taget udgangspunkt i et konkret forslag til, hvordan et dansk energisystem baseret på 100 % vedvarende energi kunne se ud i år 2050. Forslaget er et resultat af et tidligere projekt støttet af Det Strategiske Forskningsråd, nemlig CEESA-projektet (Lund, et al, 2011). Mht. energineutralt byggeri kommer analyserne frem til følgende resultater:

Energibehovet i både eksisterende og nyt byggeri skal reduceres i forhold til det nuværende niveau. Varmebesparelsestiltag i bygninger har været et gennemgående og vigtigt element i stort set alle forslag til, hvordan det nuværende energisystem baseret på fossile brændstoffer kan ændres til et energisystem baseret på 100 % vedvarende energi inden 2050. Forskningscentret konkluderer, at et passende mål for Danmark vil være at reducere bygningers varmebehov frem til 2050 med i gennemsnit 50 % i forhold til det nuværende niveau.

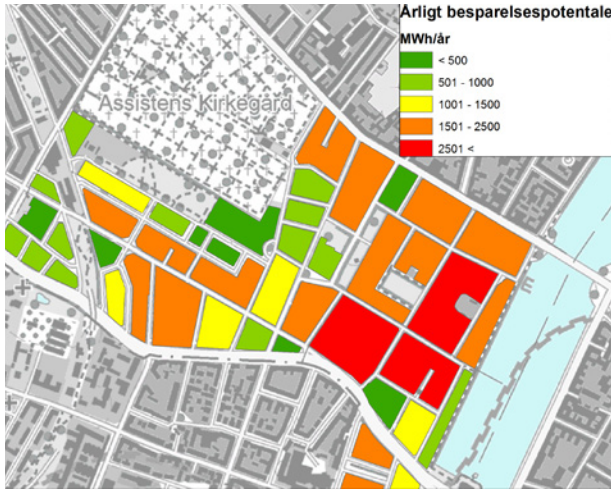
Det resterende varmebehov bør dækkes gennem en kombination af fjernvarmeforsyning i bymæssig bebyggelse og individuelle varmepumper i øvrige områder. I et langsigtet perspektiv vil både fjernvarme og varmepumper bidrage til en øget effektivitet i et overordnet system baseret 100 % på vedvarende energi. I forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger er varmepumper på omtrent samme niveau som fjernvarmeforsyning, men omkostningerne for fjernvarme afhænger dog af afstanden mellem bygningerne og fjernvarmesystemets ledningsnet. Her er konklusionen, at en optimal løsning vil være at dække ca. 2/3 af varmebehovet med fjernvarme og resten med individuelle varmepumper.

I analyser af varmeforsyningen er Geografiske Informationssystemværktøjer (GIS) et vigtigt redskab. Et af centrets ph.d.-projekter (Nielsen, 2014) omhandlede videreudvikling og anvendelse af en metode til at analysere varmebehovet i et byggeri, samt potentialet for besparelser og udgifter forbundet med gennemførelsen af disse besparelser. Metoden, som kaldes et varmeatlas, anvender oplysninger fra det danske Bygnings- og Boligregister (BBR) til beregning af varmeforbruget i et byggeri ud fra byggeriets type, alder og anvendelse. Figur 39 viser et eksempel fra varmeatlasset med angivelse af varmeinstallationerne i de enkelte huse. Figur 40 viser et eksempel på besparelsespotentialet å karreniveau i et område. For yderligere information henvises til (Nielsen, 2014).

I tilknytning til et andet ph.d.-projekt (Marszal 2012, Lund et al. 2011) er udvekslingen af elektricitet mellem el-nettet og det energineutrale byggeri blevet analyseret. Da der ikke er sammenfald mellem energineutrale bygningers elforbrug og el-produktion fra solceller og evt. vindmøller, vil der være behov for en forholdsmæssig stor udveksling med el-nettet. Set i forhold til det overordnede energisystem er denne udveksling imidlertid ikke nødvendigvis negativ. Generelt kan man sige, at solcelleenergi anvendt i bygninger skaber en positiv ubalance, mens vindenergi skaber en negativ ubalance. Desuden vil der ofte være både et element af udjævning af udvekslingen mellem de enkelte bygninger, samt et element af stordriftsfordele forbundet med denne udveksling. Af disse grunde bør ubalancer håndteres på systemniveau snarere end i den enkelte bygning.



Figur 39. Eksempel fra varmeatlas på varmeinstallationer i bygninger.



Figur 40. Eksempel på varmebesparelsespotentiale på karreniveau med 50% rumvarmebesparelse.

COMMISSIONING, DRIFT OG
FACILITY MANAGEMENT

COMMISSIONING

Det er almindeligt kendt, at nye bygninger ofte ikke fungerer som forventet. Dette kan skyldes:

1) at bygningen bruges til andre formål end forventet i designfasen (fx at der er 22 °C i lokalerne i stedet for 20 °C, behov for mere ventilation end forventet, et ændret behov for varmt brugsvand, osv.) eller
2) fejl i komponenter, forkert indregulerede systemer, dårligt styring osv.

Begge problemområder kan i vid udstrækning afhjælpes ved at anvende en anerkendt commissioningproces.

Commissioning går ud på at sikre, at alle systemer og komponenter i bygningen er designet, installeret, afprøvet, funktionstestet og vedligeholdt i overensstemmelse med de driftsbetingelser, som ejeren eller slutbrugeren har opstillet. Commissioningprocessen kan ikke kun anvendes i forbindelse med nye projekter men også i forbindelse med eksisterende byggeri og systemer, som skal ændres, forøges eller renoveres.

I praksis indbefatter commissioningprocessen en integreret anvendelse af et antal teknikker og procedurer, som skal tjekke, granske og teste projektets elementer i form af ikke blot konstruktioner og komponenter, men også komplekse systemer og hele funktionen af bygningen

Commissioningaktiviteter foregår derfor i alle projektets faser, fra den detaljerede og grundlæggende designfase over anskaffelses-, konstruktions- og montagefasen samt til den endelig overdragelse af byggeriet til ejeren. Hertil kommer assistance i indkøringsfasen (figur 40).

I 2013 blev der udformet en dansk standard for Commissioning: DS 3090 Commissioning-processen. Standarden guider læseren gennem commissioningprocessen.

Det anbefales, at DS3090 gøres obligatorisk i det fremtidige Bygningsreglement 2020.

IDÈ OG PROGRAM	PROJEKTFORSLAG	HOVEDPROJEKT	BYGGEFASE	DRIFT
OPSTILLING AF KRAV	PROJEKTBASIS	GRANSKNING	KRAV TIL TILSYN	TEST AF BELASTET BYGNING
PLANLÆGNING	GRANSKNING	VERIFICERING AF KRAV	KRAV TIL EGENKONTROLLER	SÆSONTESTS
ORGANISERING	VERIFICERING AF KRAV	OPDATERING AF PLAN OG LOG	BRUGERUNDERVISNING	OPDATERING AF LOG, SYSTEMMANUAL OG RAPPORT
OPRETTELSE AF LOG	OPDATERING AF PLAN OG LOG	ACCEPT FRA BYGHERRE	TEST	ERFARINGSOPSAMLING
ACCEPT FRA BYGHERRE	ACCEPT FRA BYGHERRE		SYSTEMMANUAL	FORTLØBENDE COMMISSIONING
			OPDATERING AF PLAN OG LOG	
			FORELØBIG RAPPORT	
			ACCEPT FRA BYGHERRE	

Figur 40. Commissioningprosessens aktiviteter (Grontmij).
Det er bygherrens målbare krav, som opstilles i starten, der er fundamentet for alle de efterfølgende aktiviteter.
Det er Commissioning-loggen, der er "den røde tråd" og huskelisten, der bringer observationer videre.
Byggesagens Commissioning-organisation bliver mere eller mindre erstattet af bygherrens driftsorganisation, når de sidste tests er afviklet, og det er typisk driftsorganisationen, der opretholder kvaliteten i henhold til bygherrens krav udi fremtiden ved fortløbende Commissioning.

DRIFT AF ENERGINEUTRALT BYGGERI

Traditionelt styres de tekniske installationer i bygninger individuelt for at optimere den enkelte tekniske installation: opvarmningsanlæg, køleanlæg, ventilationsanlæg, solafskærmning, naturlig ventilation og belysning. Desuden er styringen af fx varmeafgiver-systemet (radiatorer eller gulvarme) adskilt fra styringen af varmekilden, fx en varmepumpe. Ved design af en bygning antages det normalt, at styringen af de tekniske installationer fungerer optimalt, men det er langt fra altid tilfældet i virkeligheden. Styringen af forskellige tekniske installationer kan modarbejde hinanden, hvilket fører til et større energiforbrug og dårligere indeklima end antaget i designfasen.

Individuel styring er ikke nødvendigvis dårlig. Producenterne af fx varmepumper har stor indsigt i, hvordan driften af varmepumper optimeres. Men hvis styringen overlades til andre med mindre viden om varmepumper, kan det føre til beskadigelse af varmepumpen. Der er derfor behov for et overordnet kontrollag, som kan optimere den integrerede drift af bygningen som helhed.

I større byggerier findes dette kontrollag allerede i form af bygningens CTS-anlæg, men der er behov for yderligere intelligens i form af optimeringsalgoritmer, som på baggrund af sensor- og aktuatorsignaler fra hele bygningen kan optimere den samlede energieffektivitet og indeklima.

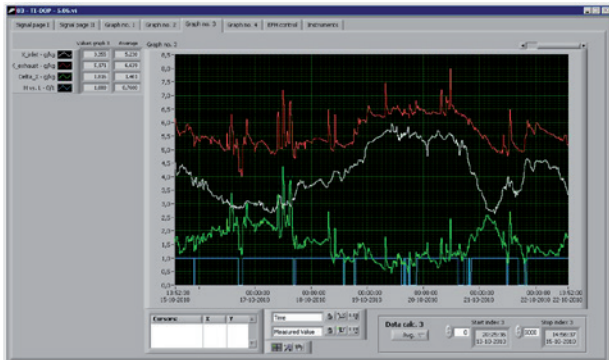
Enfamiliehuse har normalt ikke et kontrollag, som integrerer de forskellige tekniske installationer, da det er relativt dyrere at installere i små end i store bygninger. Hvis det imidlertid ifm. Smart Grid bliver nødvendigt at anvende fleksibiliteten i bygninger til at stabilisere el-nettet (se afsnittet om Smart Grid/Energi), er det nødvendigt at installere intelligent styring også i mindre huse. Denne styring vil så også kunne anvendes til integreret styring af de tekniske installationer for at opnå energibesparelser. Men på den anden side medfører Smart Grid yderligere optimeringskriterier, hvilket gør, at styringen bliver endnu mere kompleks.

Brugeren er en meget vigtig spiller i styringen af enfamiliehuse, da brugeren f.eks. kan blive irriteret over at blive underkendt af automatiske styringssystemer. Brugerens handlinger vil ofte føre til et øget energiforbrug (Christensen et al, 2012), og derfor er det vigtigt, at styringen passer til brugerens behov, og at brugeren bliver gjort opmærksom på konsekvenserne af sine handlinger, hvis denne underkender styringssystemet. Energiforbruget i to identiske huse kan variere med +/- 90 % (Andersen, 2012), fordi brugerne har forskellige behov og vaner. Det er således meget vigtigt at motivere brugerne til at agere miljøbevidst, da deres adfærd ellers kan ødelægge intentionerne bag Net ZEB. Selvom forskningscentret i adskillige af sine projekter har beskæftiget sig med styring af tekniske installationer, er der ikke blevet udviklet et samlet integreret styringssystem.

De styringsstrategier, der ligger tættest på integrerede styring, er de, der er udviklet i de to ph.d.-projekter om Dynamiske Facader (Winther, 2012) og (Liu, 2014), som beskæftiger sig med kombineret styring af solindfald, dagslys, varmetab og naturlig ventilation i forbindelse med dynamiske facader. Denne styring har indflydelse på styringen af andre tekniske installationer i bygningen, da opvarmnings-, kølings- og ventilationsbehovet reduceres. Integration af styringen af facader og tekniske installationer er derfor et oplagt næste skridt i processen.

Der er udviklet en styring, som reducerer fremløbstemperaturen fra en varmepumpe for at øge COP (Tahersima, 2012), og vigtigheden af at styre volumenstrømmen gennem gulvvarme for at opnå et mere stabilt strømningsmønster og derved øget COP for varmepumpen er beskrevet i (Jensen et al, 2014). Disse styringsstrategier er rettet mod delsystemer, men det vurderes, at de vil være værdifulde elementer i en integreret styring.

Så til trods for, at komplet integreret styring af bygninger ikke er blevet undersøgt i forskningscentret, vurderes det, at vigtige dele heraf er blevet undersøgt/udviklet.



FACILITY MANAGEMENT

Selv om design- og opførselsfasen ved et byggeri er udført med stor omhu, vil de fleste bygninger ikke fungere helt som planlagt fra første dag. Der vil normalt være behov for yderligere indregulering af specielt de tekniske installationer for at opnå det ønskede indeklima og det lave energiforbrug, som er projekteret. Denne proces tager ofte et år eller mere, da der typisk vil være brug for forskellig indregulering for de forskellige årstider.

Men funktionen af de tekniske installationer vil ændre sig over tid, hvis de overlades til sig selv og ikke efterses og justeres regelmæssigt: filtre i ventilationsanlæggene skal udskiftes med jævne mellemrum, ændringer i brugen af byggeriet kræver fx ændringer i sætpunkter, slid fører til behov for udskiftning af komponenter osv. Hvis de tekniske installationer ikke efterses med jævne mellemrum, vil det føre til øget energiforbrug og potentielt reduceret komfort i bygningen. Der er brug for effektiv facility management for at opretholde den ønskede funktion og effektivitet for de tekniske installationer.

Facility management i enfamiliehuse er forskellig fra facility management i større bygninger, som etageboliger, kontorbyggerier og institutioner.

ENFAMILIEHUSE

En husejer har normalt ikke den viden eller den interesse, der er nødvendig for at udføre facility management i forbindelse med husets tekniske installationer. Normalt vil husejeren antage, at systemerne kører som forventet, hvis blot radiatorerne bliver varme, luften i huset ikke lugter alt for dårligt, der ikke er alt for megen skimmelsvamp på overfladerne osv. Det betyder, at eventuelle fejl i de tekniske installationer ikke opdages, før systemet bryder sammen. Det fører til øget energiforbrug og som regel til reduceret komfort.

Der findes ikke mange lovmæssige krav til de tekniske installationer i private boliger. Indtil juli 2013 var der krav om årlig måling af oliefyrs udledning af CO_2. For varmepumper med mere end et kilo kølemiddel, skal der foretages eftersyn en gang om året, men effektiviteten (COP) tjekkes ikke. Mange varmepumper har i dag desværre en lav årlig COP (Pedersen og Jacobsen, 2012) på grund af dårlig installation og manglende indregulering. Så husejerne er overladt til sig selv, hvad angår sikring af effektive energitekniske installationer, med mindre de tegner et abonnement på regelmæssigt eftersyn, hvilket mange undlader at gøre.

En måde at løse problemet med husejernes manglende viden og engagement er ESCO (Energy Service Companies), som husejeren kan tegne kontrakt med om fx et temperaturniveau i værelserne på 22 °C og tilstrækkeligt med varmt brugsvand, mens det er ESCO virksomheden der servicerer husets tekniske installationer.

Husejeres viden og bevidsthed kan dog øges, hvis der er letlæselige manualer til anlæggene, letforståelige informationsdisplay og en automatisk detektering af systemfejl, som advarer husejeren, når der er tegn på problemer. Problemet med sidstnævnte er, at det er dyrt, men kan måske blive indført i forbindelse med den styring, der er nødvendig, når/hvis bygninger skal indgå aktivt i Smart Grid sammenhæng.

STORE BYGNINGER

Store bygninger har ofte et CTS-anlæg, som overvåger de tekniske installationer og bruger målingerne til styring af anlæggene. CTS-anlæg har typisk mange alarmfunktioner, men disse bliver ofte slået fra pga. for mange falske alarmer.

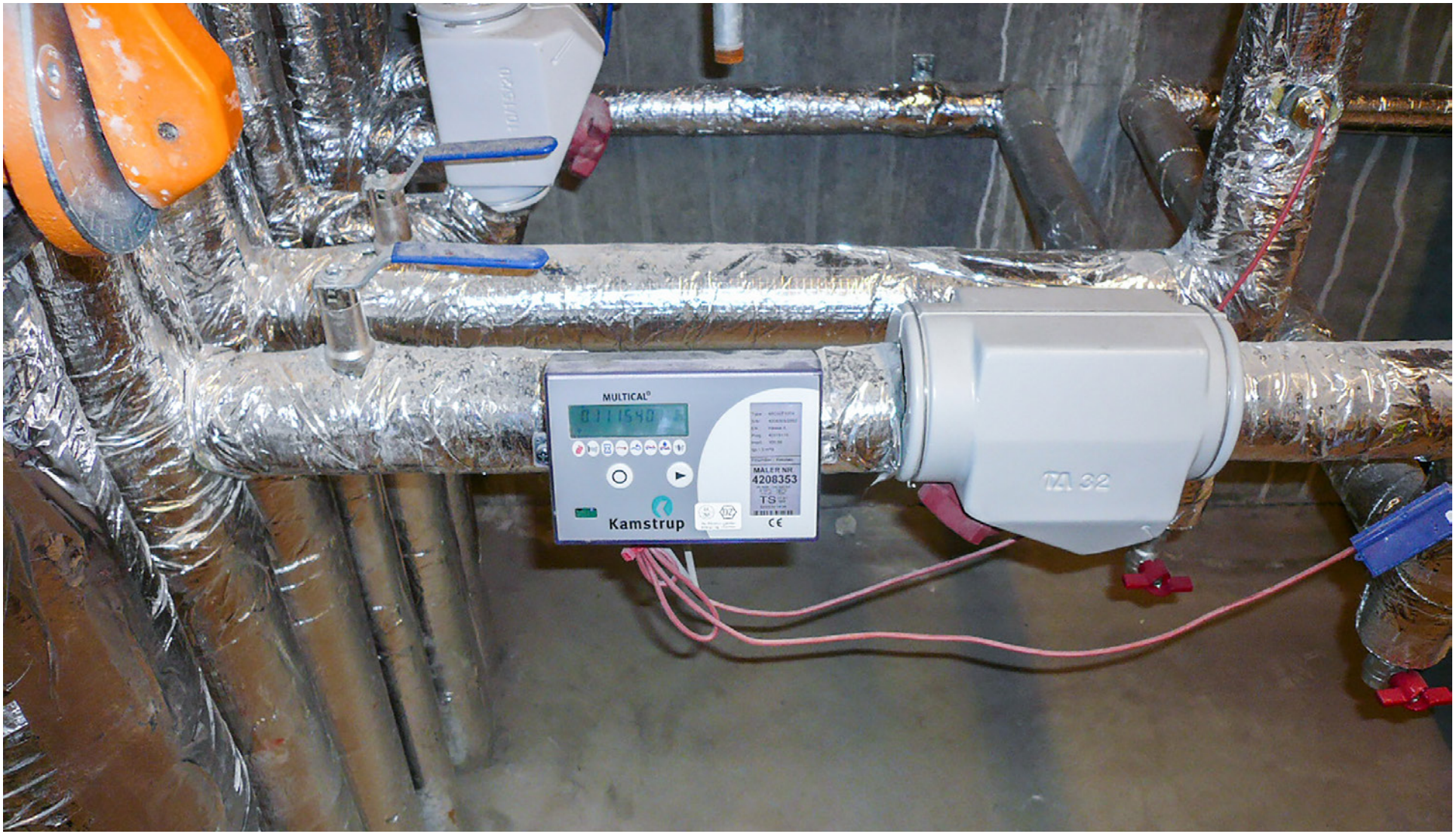
Hvis målingerne og aktuatorværdierne lagres, kan der udskrives grafer (tidsserier) og beregnes nøgletal, som viser udviklingen i forskellige vigtige parametre, der beskriver anlæggenes aktuelle tilstand. Tidsserier indeholder vigtig information om de tekniske installationers tilstand (Jensen et al, 2010). Alligevel lagrer CTS-anlæg typisk ikke de målte værdier. Det er muligt at få et indtryk af anlæggenes tilstand ved at kigge på registrerede værdier online på CTS-anlæggets skærme, men varmemesteren har sjældent tid til at sidde foran skærmen og gennemføre fejlfinding.

De energitekniske installationer justeres ofte for at nedbringe antallet af klager. Det betyder, at justeringerne har karakter af symptombehandling snarere end problemløsning. Symptombehandling har en tendens til at medføre en ubalance i systemerne, hvilket typisk medfører problemer i form af stigende energiforbrug og komfortproblemer andre steder i bygningen (Jensen et al, 2010).

En enkel, men ikke gennemgribende løsning er, at anvende metoden beskrevet i energistrategien EiSE (Dansk Energi, 2011). EiSE vejleder i, hvordan HVAC-anlæg kan bringes tilbage i balance, hvilket vil føre til en reduktion af energiforbruget og en øget komfort i bygningen.

En anden løsning på problemet er at øge varmemesterens viden om de energitekniske installationer og at udvikle et mere forfinet alarmsystem til CTS-anlæg. Dog skal det være alarmer, som ikke overbelaster varmemesteren, men som i en lettilgængelig form informerer om mulige kommende fejl, der kan føre til øget energiforbrug og reduceret komfort.

En mere avanceret løsning vil være at udvikle algoritmer baseret på avanceret statistik, som ikke alene kan advare om kommende fejl, men som også automatisk tuner systemerne i tilfælde af fx ændringer i brugen af bygningen.


MULTICAL®
Kamstrup
MÅLER NR
4208353
TS
TA 32

LITTERATURLISTE

LITTERATURLISTE

Litteraturkilderne er opdelt i tre grupper:

1) ph.d.-afhandlinger fra Forskningscentret
2) andre publikationer fra Forskningscentret
3) eksterne kilder

PH.D. AFHANDLINGER

Brand, M., 2014.
Heating and Domestic Hot Water Systems in Buildings Supplied by Low-Temperature District Heating. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Galiotto, N., 2014.
A Holistic Methodology for Sustainable Renovation towards Residential Net-Zero Energy Buildings. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Iqbal, A., 2014.
Calculation methods for natural ventilation through centrepivot roof windows. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet, København.

Lauritsen, D., 2014.
Durability of future energy efficient building components. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Le Dréau, J., 2014.
Energy flow and thermal comfort in buildings - Comparison of radiant and air-based heating & cooling systems. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Liu, M., 2014.
Modelling and control of intelligent glazed façade. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Marszal, A.J., 2012.
Life cycle cost optimization of a BOLIG+ zero energy building. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Milan, C., 2014.
Choosing the right technologies - a model for cost optimized design of a renewable supply system for residential zero energy buildings. Institut for Energiteknik. Aalborg Universitet.

Mortensen, A., 2014.
Energy renovation of Danish single-family houses – An investigation of barriers and motivation factors. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Nielsen, S., 2014.
Spatial Heat Planning and Heat Demand Reductions in Buildings. Institute for planlægning. Aalborg Universitet.

Pavlov, G., 2014.
Building Thermal Energy Storage. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Tahersima, F., 2012.
An integrated control system for heating and indoor climate applications. Institut for Elektroniske Systemer. Aalborg Universitet.

Winther, F.V., 2012.
Intelligent glazed facades - an experimental study. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

ANDRE PUBLIKATIONER FRA FORSKNINGSCENTRET

Bejder, A., Knudstrup, M., Jensen, R.L. og Katic, I., 2014.
Energineutralt byggeri - Designprincipper og byggede eksempler for enfamiliehuse. Institut for Arkitektur og Medieteknologi, Aalborg Universitet.

Brand, M. et al, 2012.
Optimal space heating system for low energy single-family house supplied by district heating, Proceedings PassivHus Norden, October 21-23, 2012, Trondheim, Norway.

Jensen, S.Ø., 2014.
Natural ventilation in single family house during the summer. Energi og Klima. Teknologisk Institut.

Jensen, S.Ø. et al, 2014.
Lette gulvarmesystemer og deres indflydelse på varmepumpers effektivitet. Energi og Klima. Teknologisk Institut.

Lund, H. et al, 2011.
Zero energy buildings and mismatch compensation factors. Energy and Buildings, 43 (2011) 1646-1654.

Lund, H. et al, 2014.
Heat Saving Strategies in Sustainable Smart Energy Systems. Aalborg Universitet, Institut for planlægning. Publication Series 2014-1.

Olesen, B.W. et al., 2003.
Definition of the indoor environmental quality. Strategisk Forskningscenter for energineutralt byggeri, Aalborg Universitet.

Svendsen, S.A., Heiselberg, P.K. og Lund, H., 2014.
Energineutralt byggeri - Definition og fremtidig rolle i samfundet. Strategisk Forskningscenter for energineutralt byggeri, Aalborg Universitet.

EKSTERNE KILDER

Aggerholm S og Grau K. 2011.
Bygningers energibehov - Beregningsvejledning.
SBi-anvisning 213, 2. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, Hørsholm.

Athienitis, A. og O´Brian, L. (red.), 2013.
Modeling, design and optimization of Net ZEBs. In press.

Andersen, R., 2012.
The influence of occupants' behavior on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments. 10th International Conference on Healthy Buildings, 8-12.07.12, Brisbane, Australia. www.orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:113412/datastreams/file_9903893/content

Berggren, B., et al, 2013.
LCE analysis of buildings - Taking the step towards Net Zero Energy Buildings. Energy and Buildings 62 (2013) 381–391.

BOLIG+, 2013.
www.boligplus.org.

Christensen, A., et al, 2012.
Intelligente energiydelser i lav-energiboliger baseret på brugerdreven innovation. Energi og Klima, Teknologisk Institut.

Christiansen, C.H., 2014.
Installationspakker til enfamilieboliger: Solvarme, varmeanlæg og ventilation. Energi og Klima, Teknologisk Institut.

Dansk Energi. EiSE, 2011.
Energi og indeklima strategi uden energifråds.
www.danskenergi.dk/~/media/Bogbutik_gratis_materiale/EISE_24s_Web.ashx.

Energistyrelsen, 2013.
www.ens.dk/byggeri/energirenoveringsnetvaerk

EnergyFlexHouse, 2013.
www.teknologisk.dk/projekter/energyflexhouse

Furbo et al, 2013.
Solar electric heating systems for the future energy system. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet. www.byg.dtu.dk/~/media/Institutter/Byg/publikationer/byg_rapporter/byg-r288.ashx

Garde, F. og Donn, M. (red.), 2014.
Solution Sets for Net Zero Energy Buildings - Feedback from 30 NZEBs world-wide. In press.

IEA SHC Task 40, 2013.
www.task40.iea-shc.org

IEA SHC Task 44, 2013.
www.task44.iea-shc.org

Jensen, S.Ø., et al, 2010.
Characterization and optimized control by means of multi parameter controllers. Energi og Klima, Teknologisk Institut. www.elforsk.dk/elforskProjects/339-032/339-032-slutrapport.pdf

Johnsen, K., 2014.
Solafskærmning. SBi-Anvisning. Statens Byggeforskningsinstitut, SBi-Aalborg Universitet København. In press.

Larsen, T.S., 2011.
Vurdering af indeklimaet i hidtidigt lavenergibyggeri - med henblik på forbedringer i fremtidens lavenergibyggeri. Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet. www.vbn.aau.dk/files/45541977/Vurdering_af_indeklimaet_i_hidtidigt_lavenergibyggeri.pdf

Lund, H., et al, 2011.
Coherent Energy and Environmental System Analysis. Aalborg Universitet. www.ceesa.plan.aau.dk/digitalAssets/32/32603_ceesa_final_report_samlet_02112011.pdf

Rose, J. og Mortensen, L.H., (2013).
Fremtidssikring af komponentkrav - Netværk for energirenovering. SBi 2013:03. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København. www.sbi.dk/miljo-og-energi/energibesparelser/fremtidssikring-af-komponentkrav.-netvaerk-for-energirenovering/fremtidssikring-af-komponentkrav-3.

Pedersen, S.V., og Jacobsen, E., 2013.
Godkendelse af tilskudsberettigede anlæg, måling, dataindsamling og formidling. Energi og Klima, Teknologisk Institut. www.ens.dk/sites/ens.dk/files/forbrug-besparelser/byggeriets-energiforbrug/varmepumper/maaleprogram-varmepumper/M%C3%A5leprogram%20Final%20Report%20-pdf.pdf

Voss, K. og Musall, E. (red.), 2011.
Net Zero Energy Buildings – International Projects of Carbon Neutrality in Buildings. Detail Green Books. ISBN: 978-3-0346-0780-3.

strategisk forskningscenter for
ENERGINEUTRALT BYGGERI

Det
Strategiske
Forskningsråd