

SBi-notat

Dynamiske facader

Energi og indeklima ved brug af Energy Frames



Dynamiske facader

Energi og indeklima ved brug af Energy Frames

Kjeld Johnsen
Frederik Vildbrad Winther
Bjørn Stegger
Henrik Søgaard Pedersen

Projektet er støttet af
EUDP, Energiteknologisk udvikling og demonstration, Energistyrelsen, projekt nr. 64010-0008
Elforsk, Dansk Energis forsknings- og udviklingsprogram PSO, projekt nr. 343-044

Titel Dynamiske facader
Undertitel Energi og indeklime ved brug af Energy Frames
Serietitel SBI 2014 – uden for serierne
Udgave 1. udgave
Udgivelsesår 2014
Forfattere Kjeld Johnsen, Frederik Vildbrad Winther, Bjørn Stegger, Henrik Søgaard Pedersen
Sidetal 62
Litteratur-

Emneord Dynamiske facader, Intelligente facader, Energieffektivitet, indeklime, dagslys, energiramme, solafskærmning, Bygningsreglement 2015, Bygningsreglement 2020.

Omslag Forfatterne

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.

Indhold

Indhold.....	5
Forord.....	6
Indledning.....	7
Fra idé til konceptudvikling.....	8
Den grundlæggende idé bag Dynamiske Facader.....	8
Kravspecifikation til systemet.....	10
Funktion og arkitektonisk udtryk.....	11
Funktionsafprøvning i laboratoriet.....	13
Motor, gear og træksystem.....	14
Visuelle observationer.....	15
Test af Energy Frames ventilationselement.....	19
Energy Frames isoleringselement.....	24
Dynamisk U-værdi – Analyse af energibalancen.....	24
Test af ventilationselementets tæthed.....	29
Regulering af Energy Frames.....	33
Generelle principper.....	33
Simuleringer.....	37
Sammenfattende konklusioner.....	41
Diskussion.....	42
Demonstrationsprojekter.....	43
Enfamiliehus i Nibe.....	43
Pavillonbygning ved Rigshospitalet, København.....	51
GreenTech Center Vejle.....	52
Bilag 1: Spørgeskema til brugeranalyse.....	53
Introduktion.....	53

Forord

De kommende skærpede krav i Bygningsreglementet vedrørende energirammen for bygninger i henholdsvis 2015 og 2020 vil stille meget store krav til energioptimering af bygningers klimaskærm og installationer. Allerede med kravene i 2015 vil det være meget vanskeligt at opfylde energikravene uden særlige tiltag, fx i form af supplerende energiforsyning fra vedvarende energikilder (fx solceller) eller andre foranstaltninger. Klimaskærmen spiller en helt afgørende rolle for bygningens energibalancé, og derfor stilles der også skærpede minimumkrav til klimaskærmens komponenter (vinduer, døre og konstruktioner) samt til bygningens tæthed. Men de skærpede krav medfører, at de modsætningsfyldte ønsker, der ligger i på den ene side at udnytte dagslyset og den passive solvarme maksimalt (store vinduer), og på den anden side at holde på varmen om vinteren og undgå overtemperaturer om sommeren (små vinduer), øges voldsomt. Dette gælder for den kendte, passive facade, som den typisk udføres på nybyggeriet i dag. Det gælder derimod ikke for den dynamiske facade, som til enhver tid kan tilpasse sig efter de aktuelle behov. Behovene ændrer sig ikke blot med årstiden, men ændrer sig også hurtigt hen over døgnet, fra formiddag til eftermiddag og fra brugstid til ikke-brugstid. Det må derfor forudses, at der bliver en stigende efterspørgsmål efter dynamiske / intelligente facader som kan tilpasse sig behovene.

Energy Frames er et bud på, hvordan den dynamiske facade kan udformes. Det har været grundlæggende for udviklingsprojektet at tage udgangspunkt i dansk arkitekturs særkende med enkle, elegante løsninger og de ofte foretrukne smalle vinduesprofiler. Rapporten beskriver hele udviklingsforløbet, hvor der især har været fokuseret på rammelementer, der kan kontrollere sol- og dagslysindfald, kan forøge klimaskærmens isole-ring i opvarmningssæsonen samt kan bidrage til bygningens naturlige ventilation, ved at forvarme indtagsluften og forlænge den periode af året, hvor naturlig ventilation kan erstatte eller supplere mekanisk ventilation.

Rapporten henvender sig til projekterende arkitekter og ingeniører samt til vindues- og facadevirksomheder, som vil kunne drage fordel af at udnytte Energy Frames til opfyldelsen af kommende energibestemmelser. Men rapporten henvender sig også til byggemyndigheder, idet den peger på nye muligheder for at reducere bygningens energibehov yderligere, fremfor at klare energirammekravene gennem investeringer i kostbare solcelleanlæg og lokal energiproduktion.

Udviklingsprojekterne og slutrapport er gennemført med støtte fra Energistyrelsen gennem EUDP, Energiteknologisk udvikling og demonstration, projekt nr. 64010-0008 og fra Elforsk, Dansk Energis forsknings- og udviklingsprogram, gennem PSO-projekt nr. 343-044.

Tak til Kim Jønsson og Mikkel Vindelev for at stille rapporten fra deres masterprojekt *Dynamiske facader* ved Aalborg Universitet til rådighed for nærværende projekt.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København
Energi og Miljø
November 2014

Kjeld Johnsen

Indledning

Det er kun i teorien, at de mange kontorbygninger i glas, der er blevet opført de seneste årtier, opfylder energikravene i bygningsreglementet. I praksis viser det sig, at energiforbruget til opvarmning, ventilation, køling og belysning bliver langt større end forudset, og det endda samtidig med at indeklimaet slet ikke lever op til forventningerne. Med de kommende stramninger af energikravene vil det blive indlysende, at en glasandel af facaden på mere end 35-40 %, uundgåeligt vil føre til overskridelse af energirammen, med mindre der samtidig investeres i anlæg, der kan forsyne bygningen med vedvarende energi, eller der designs særlige facader i form af dobbeltfacader eller dynamiske facader, som bedre kan tilpasses bygningens og brugernes skiftende behov. Glas er et helt enestående materiale, med egenskaber som giver gode muligheder for at forene krav om energieffektivitet med skrappe krav til termisk og visuelt indeklima. Disse egenskaber ved glasset kan udnyttes maksimalt, hvis det optræder som den vigtigste del af en dynamisk facade, der kan justeres efter, om bygningen er i brug eller står tom, om der er et opvarmningsbehov eller et kølebehov, om vejret er til naturlig ventilation eller kræver mekanisk ventilation. Energy Frames er et dynamisk facadesystem, som kan tilpasse sig det aktuelle behov, og vil således være medvirkende til at glasset kan bevare sin vigtige rolle i arkitekturen, både efter 2015 og efter 2020.

Denne rapport beskriver hele udviklingsforløbet af Energy Frames, fra den helt tidlige idéfase, over opstilling af kravspecifikationer, til fremstilling og laboratorietest af prototype elementer, og til endelig afprøvning i virkelige bygninger. Ideen til Energy Frames er ikke kommet ud af den blå luft, men baserer sig på mange års erfaringer hos virksomheden Art Andersen med at udvikle skræddersyede løsninger til specifikke, ofte meget sofistikerede, facadeløsninger og -funktioner til bygninger over det meste af verden. Energy Frames er derfor baseret på en række patenter, som i dette udviklingsforløb er søgt overført til industrielt fremstillede facaderammer, som i princippet kan 'klikkes' direkte på nye eller eksisterende glasfacader eller vinduesbånd som led i en renoveringsproces eller en opgradering af bygningens ydeevne i forhold til indeklima og energieffektivitet.

I udviklingen har en række forskellige elementtyper været afprøvet dels i SBI's Dagslyslaboratorium i Hørsholm og dels i Aalborg Universitets laboratorier i Aalborg. Men laboratorieafprøvninger af enkeltelementer siger ikke så meget om, hvilken indflydelse det vil have på en bygnings indeklima og energiforbrug, hvis bygningen bliver forsynet med forskellige typer af elementer på alle facader. Derfor har resultaterne af laboratorietestene været brugt som grundlag for en række bygningssimuleringer med programpakken BSim, der både kan analysere indeklima- og energiforhold time for time over et helt år. Simuleringerne er gennemført for en kontorbygning på 875 m², som er bygget efter kravene i Bygningsreglement 2008.

Både målinger og simuleringer dokumenterer, at Energy Frames kan medføre markante energibesparelser i forhold til, hvad der kan opnås ved passive facader. Sammenlignet med den mest udbredte facadeløsning i byggeriet med solafskærmende ruder suppleret med indvendige gardiner, vil Energy Frames medføre meget store besparelser til opvarmning, ventilation og belysning.

Ved udgivelsen af denne rapport er de første få bygninger forsynet med Energy Frames, og disse afprøvninger vil vise, om de teoretiske resultater fundet ved laboratorieafprøvninger og gennem simuleringer også kan opnås i praksis.

Fra idé til konceptudvikling

Den grundlæggende idé bag Dynamiske Facader

Dynamiske Facader er et nyudviklet industrielt facadesystem, der bygger på erfaringer fra en række specielt designede løsninger til markante enkeltbyggerier. Firmaet Art Andersen har i samarbejde med ledende danske arkitekter i en årrække designet bygningsspecifikke facadeløsninger og står bag de designmæssige idéer. Imidlertid har specialløsningerne ofte været relativt kostbare, fordi de kun har været anvendt til det specifikke byggeri.

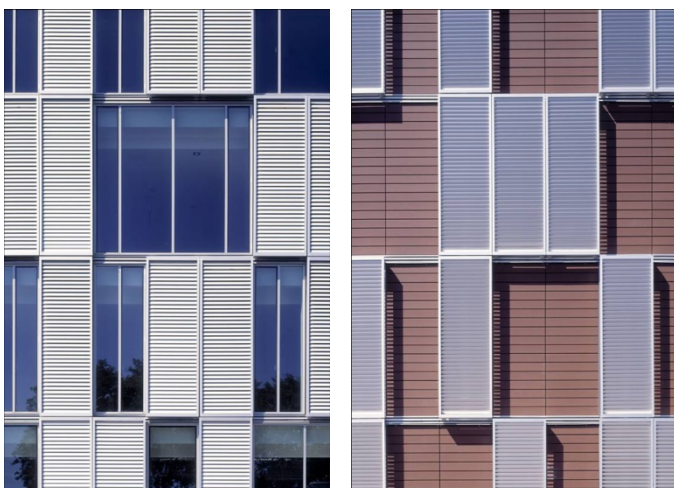


Figur 1. Manuelt bevægelige tekstilrammer som solafskærmning på altanen i almenyttige etageboliger Sejllhuset.



Figur 2. Manuelt bevægelige teakrammer med drejelige lameller på privat bolig.

Det nye industrielle system kombinerer æstetiske kvaliteter - bl.a. muligheden for forskellige arkitektoniske udtryk - med fordelene ved industriel produktion. Industrialiseringen medfører især økonomiske, kvalitetsmæssige og godkendelsesmæssige fordele, baseret på den gennemtestede standard for deløsningerne og konceptvarianterne.



Figur 3. Udvendige, motordrevne lamelskoder med drejelige lameller. En motor styrer begge funktioner.

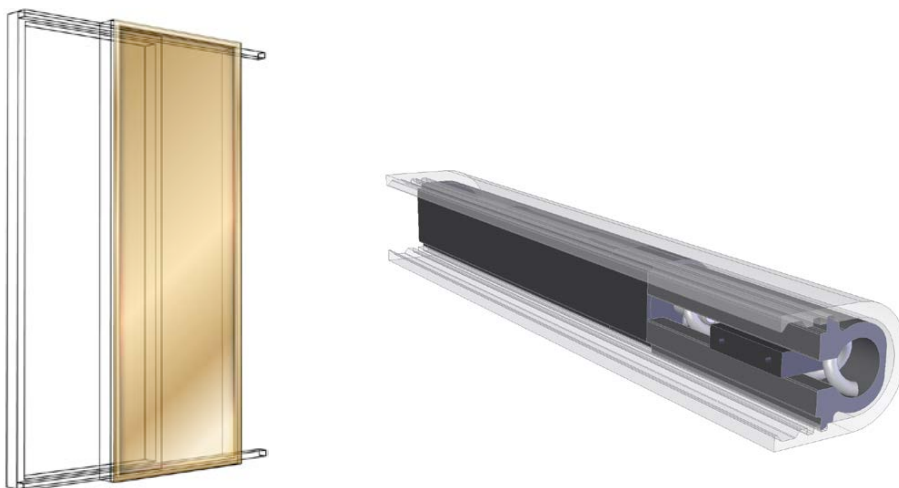


Figur 4. Motoriserede udvendige skodder, udført med stålrammer og perforerede aluminiumsplader.



Figur 5. Manuelt bevægelige tekstilrammer i Swiss Re, London,

En industriel produktion giver lavere produktpriser, herunder en mere enkel og ensartet installation. Det giver også et færdigt resultat og en leveranceproces, der er lettere at overskue for køberne. Et industrielt produkt giver et nyt og større potentiale for udbredelse - også på eksportmarkederne - end den individuelt designede løsning. Dette potentiale forstærkes ved, at konceptet gøres attraktivt for flere aktører i værdikæden, bl.a. arkitekter, der arbejder med renovering samt leverandører af nøglefærdige byggerier.



Figur 6. Illustration af principperne i Energy Frames. Til venstre rammeelementet, der kører uden på glasfacaden, til højre træksystemet bestående af en spiral, der trækker elementet, når motoren drejer spiralen.

Grundelementerne i systemet er bevægelige, "dynamiske", energibesparende og indeklimaforbedrende vinduesafskærmningselementer - "rammer", som kan bevæge sig vandret hen over vinduet. Vinduesafskærmningssystemet anvendes i direkte kombination med – enten integreret i eller koblet på - lavenergivinduer og vinduesrammer. Der kan være tale om nye vinduer eller eksisterende vinduer, og systemet vil hovedsageligt findes anvendelse til kontorbygninger, virksomhedsdomiciler og institutionelle bygninger, men kan også anvendes til alle former for boligbyggeri.

Projektet er efter fælles overvejelser og beslutninger relativt tidligt i projektføreløbet baseret på et "spiral-princip" med en "trækstation", dvs. motoren er fræset ind i den indvendige vindueskarm og kraftoverførslen sker via små planetgear og små vinkelgear ud til "spiraler", som løber i trækprofiler, og som via små tappe og små vogne trækker Energy Frames rammer med tekstil, plader eller bevægelige lameller. Trækprincippet kan principielt også benyttes således at rammerne kan bevæge sig lodret, hvilket dog først tænkes tilbudt kunderne på et senere tidspunkt.

Kravspecifikation til systemet

De grundlæggende funktioner i rammesystemet giver mulighed for at udvikle en lang række forskellige elementtyper. Men fra starten af udviklingsforløbet har der været fokuseret på følgende fire grundlæggende funktioner (basissystem).

- Kontrol af solindfald: Solindfald minimeres, når det er uønsket (minimering af kølebehov) og maksimeres, når det er ønskeligt (bidrag til passiv opvarmning)
- Kontrol af dagslys: Maksimal udnyttelse, men samtidig beskyttelse mod blænding
- Varmeisolering: Natisolering primært uden for brugstid og ved varmebehov, men også mulighed for at begrænse solindfald, primært uden for brugstiden i varme sommerperioder
- Naturlig ventilation: Luftindtag og forvarmning af udeluft gennem elementet, primært i overgangsperioder, forår og efterår

De samlede kravspecifikationer blev beskrevet som vist i tabel 1.

Tabel 1. Oversigt over kravspecifikationer, som de blev defineret tidligt i udviklingsforløbet.

Krav/specifikationer	Egenskaber	Bemærkninger
Konstruktion		
Færdig løsning skal kunne integreres med ProTec energivinduer.		
Systemet skal være modulært og bestå af flg. <u>basis-elementer</u> :	Mulighed for eftermontering på andre vindues-typer som f.eks. Velfac's systemer og ældre systemer af forskellige fabrikater er et must – evt. med et supplerende montage-system.	
1. Bevægelige basis "frame"-elementer.		
2. Trækstation for bevægelse af frame-elementer.	Lydløs og elegant bevægelse af elementerne.	
3. Solafskærmende, (nat)isolerende, lyddæmpende, (og ventilationsskabende) additions-elementer til montering på frame-elementer.		
4. Montagesystem til integration i vindueselementer og montage på facade.	Varianter til forskellig arkitektur og stil – med forskellig æstetik/ arkitektur/udtryk/materialer/farver.	
5. Styresystem til regulering af systemets funktioner.		
Systemet skal kunne anvendes på:		
1. Glasfacader.	Let opdatering/at give nyt "look".	
2. Facadebånd.		
3. Vinduesnicher.		
Systemet skal have flg. <u>basisfunktioner</u> :		
1. Kontrol af sol og dagslys.		
2. (Nat)isolering.		
Systemet skal kunne udbygges med flg. funktioner (<u>PLUS-system</u>):		
1. Naturlig ventilation.		
2. Lyddæmpning.		
3. Skabe energi til bygningen: Solceller, fotosyntese, faseskiftende materialer mm.		
4. Reducere forurening: Partikelfilter.		
Det færdige basissystem skal kunne leveres til slutbrugeren til en pris på under 2000 DKK/m ² ekskl. montage og moms.	Systemet skal ikke nødvendigvis være det billigste på markedet. Men det skal være indlysende god value for money – og have et meget bredt markedsappet - så det kan opnå en betydelig markedsandel.	
Systemet skal kunne tilbydes med 5 års garanti.		Opmærksomhed på:
Systemet udvikles med henblik på international markedsføring – evt. med licensproduktion/ distribution udover Nordeuropa.	Robusthed overfor vind og vejr.	De typiske forekommende vejrtyper i Europa.
Basissystemet skal kunne monteres på facademoduler på op til 3 x 3 meter.		Normer/standarder i Europa.
Systemet skal kunne anvendes på vinduer større end 1 x 1 meter.		Længere henne i projektet analyseres, om systemet/projektet kan tilpasses facade- og bygningsforhold i Nordamerika, Mellemøsten osv.
Systemet skal kunne anvendes på facader vendt mod alle verdenshjørner (nord-syd-øst-vest).		

Produktion

PRO TEC skal efter endt projekt forestå produktion af systemet.

Systemet skal være let at montere, uanset om det foregår i produktionsfaciliteter eller på en eksisterende facade.

Brug/Brugsproces

Det færdige system skal kunne betjenes af alle.

Systemet skal ikke nødvendigvis kunne lukke helt for lyset. Alle funktioner inkl. (nat)isolering skal kunne fungere med en vis translucens.

Vinduer osv. skal kunne udad eller indad.

Systemet skal være nemt at rengøre og det må ikke besværliggøre rengøring af vinduer bag systemet.

Systemet skal være robust i normal brug.

Minimalt vedligeholdelsesbehov.

Vedligeholdelse af systemet skal være nem/enkel.

Opfylde brand/flugtvejskrav – dvs. indbygget automatik m.m.

Mulighed for varianter med semi-transparente materialer (translucens).

Normal brug vil sige *normal tilsigtet* betjening af systemet, den nødvendige rengøring af systemets elementer og den nødvendige rengøring af vinduesfacaden bag elementerne.

Mørklægning som ekstraudstyr

Miljøfaktorer

Systemet skal kunne adskilles, så vidt som muligt genbruges - og resten destrueres uden problemer for miljøet.

Max. genanvendelighed af komponenterne (CTC).

Marked

Målgrupperne er:

Erhvervsbyggerier, offentlige bygninger og boligblokke.

Nybyggeri og eksisterende bygninger.

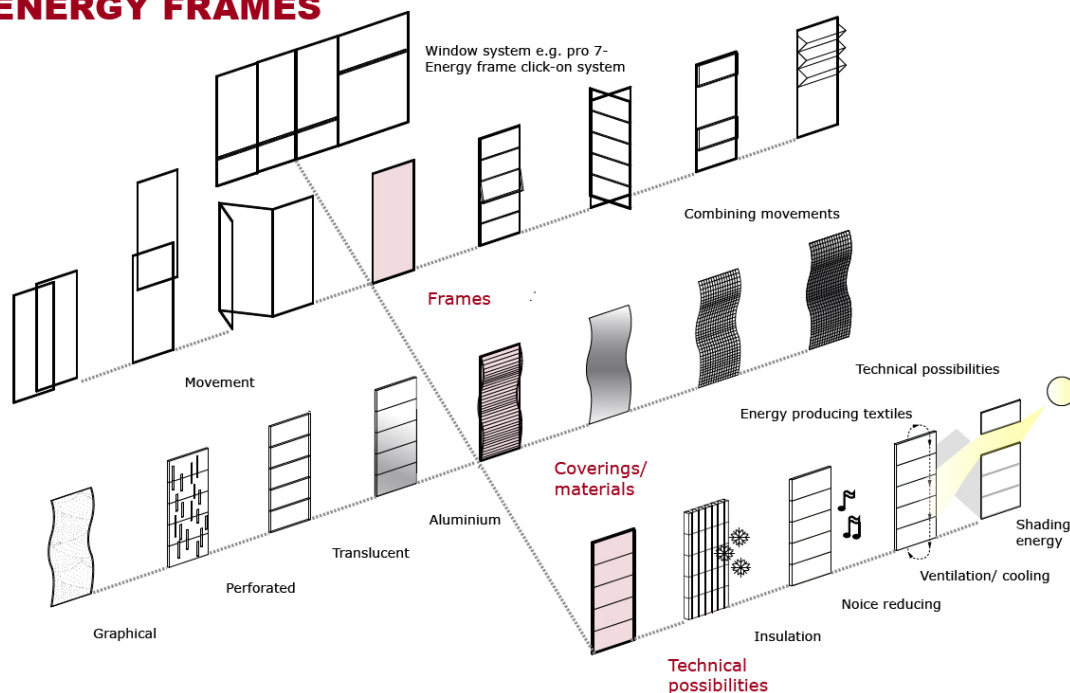
Funktion og arkitektonisk udtryk

Energy Frames er et modulært, rammebaseret facadesystem, der klikkes på ydersiden af vinduesrammerne. Det kan klikkes på vinduer, uanset om de åbner udad eller indad. Facadesystemet kan bevæges horisontalt over vinduet ved hjælp af et endendørs trækssystem.

Systemet er egnet både for nye og eksisterende bygninger, og løser via forskellige moduler forskellige opgaver: solafskærmning, dagslyskontrol, varm/kold (nat)-isolering, naturlig ventilation samt støjreduktion. Modulerne er flade rammer, der løber i smalle trækprofiler, der som nævnt klikkes på vinduerne/facaderne.

Flere af løsningsprincipperne er beskyttet af en række patenter. Patentansøgningen er indsendt til den europæiske patentmyndighed (EPO) i juni 2011. De funktionelle formål har været energibesparelse, indeklimaforbedring, inkl. støjisolering. Figur 1 til figur 6 viser eksempler på nogle af de individuelle løsninger, hvor forskellige dele af konceptet har været anvendt. Det skal bemærkes, at ingen af disse løsninger er industrielle; men eksemplerne viser bl.a. det internationale potentiale i konceptet samt den interesse, som konceptet har kunnet skabe blandt arkitekter og ingeniører. Figur 7 viser skitse-mæssigt de mange kombinationsmuligheder af funktioner og materialer for Energy Frames. Selvom *lysisolation* ikke er en del af den primære udvikling, vil dette også være en funktion for flere elementtyper.

ENERGY FRAMES



Figur 7. Illustration af de mange kombinationsmuligheder i konceptet for Energy Frames.

Materialer

I konceptet vil der kunne vælges mellem 3 typer basisrammer og et udvalg af materialer, farver og overfladekombinationer, jf. figur 7. Dette vil understøtte en variation af tekniske og miljømæssige løsninger og arkitektoniske udtryk. Det vil gøre Dynamiske Facader let at tilpasse til forskellige bygningsforhold, og designmæssig stil og smag. Tabel 2 viser en oversigt over ydeevne af Energy Frames ved forskellige materialevalg.

Tabel 2. Vurdering af Energy Frames funktion/ydeevne ved valg af forskellige materialer.

Funktion	Materiale	Plade			Lamel		Tekstil	
		25mm PVC	Isole-ring	Glas	Alu	Træ	Åben	Lukket
Lys: Hvor god er løsningen til at styre/kontrollere lyset fra solen		Med	Lav	Lav	Høj	Høj	Lav	Med
Varme: Hvor god er løsningen til at styre/kontrollere varmepåvirkningen fra solen		Høj	Høj	Høj	Høj		Lav	Med
Energi: Optimering af energiforbruget			Høj		Med		Lav	
Lyd: Hvor godt dæmper den støjen udefra			Høj		Med		Lav	
Ventilation: Hvor god er den til at ventilere			√		N.A.		N.A.	
Sikkerhed/tryghed			Høj		Høj		Lav	
Vedligehold: Hvor let er den at vedligeholde (og mængden)			Lav		Lav	Høj	Lav	
Montage			√		√		√	
Rengøring Skodde: Hvor let er den at rengøre			Mindre god		God		Mindre god	
Rengøring glas: Hvor stor forskel gør løsningen i forhold til rengøring			Uændret		Uændret		Uændret	
Pris		Lav	Med	Med	Høj	Høj	Lav	Lav

OBS: Rengøring af plader udefra medfører ekstra omkostninger da arealet stiger, men frekvensen kan være uændret.

Funktionsafprøvning i laboratoriet

De vigtigste elementtyper var monteret på SBI's Dagslyslaboratorium i perioden 1. juni - 6. september 2011. Figur 8 viser de afprøvede elementer i lukkede positioner og figur 9 viser elementerne i halvt åbne positioner. Formålet med forsøgene var primært at undersøge og dokumentere funktionen af de enkelte elementer i Energy Frames systemet, dels med hensyn til deres fysiske egenskaber/ funktion og dels med hensyn til deres energi- og indeklimatevne. Undersøgelserne blev gennemført ved simple funktions-test og visuel/ subjektiv vurdering af mockup elementernes konstruktion i åben, lukket og bevægelses-tilstand. Herudover er der gjort subjektive vurderinger af, hvordan systemet og de enkelte elementer opleves af brugerne i lokalet med hensyn til dagslysforhold, blænding og udsyn samt støj fra de bevægelige dele. De subjektive vurderinger er baseret på evalueringer af SBI's lysforskere samt udtalelser fra personer, som har besøgt Dagslyslaboratoriet i forsøgsperioden. Der er således tale om øjebliks-iagttagelser, som i nogle tilfælde er stærkt afhængige af de aktuelle vejrforhold og det aktuelle indeklima.



Figur 8. Foto af Energy Frames elementerne monteret på Dagslyslaboratoriet, her vist i lukkede positioner.



Figur 9. Foto af Energy Frames elementerne monteret på Dagslyslaboratoriet, her med de bevægelige rammer i halvt åbne positioner.

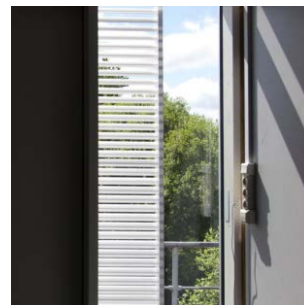
Motor, gear og træksystem

Afprøvningerne gav en del problemer med de bevægelige systemer, hvilket er beskrevet i et selvstændigt notat udarbejdet af Art Andersen. De følgende iagttagelser er derfor baseret på de perioder, hvor systemerne fungerede og forudsætter, at de konstaterede problemer vil kunne løses i de kommende prototyper og den endelige produktion. Alle mindre eller større problemer ved afprøvningerne har indgået i den videre udvikling af de forskellige elementtyper, og har ført til justering af flere af systemets.

Bevægelse

Rammer

Ramme-elementerne bevæger sig elegant uden generende mekanisk støj. Bevægelsen opleves dog for langsom, især på de brede elementer, hvor gangtiden er størst. Der er tale om en balance mellem ønsket om en hurtig indstilling, og ønsket om en elegant, glidende overgang. Krav og ønsker er ikke nødvendigvis ens ved automatisk og manuel regulering.



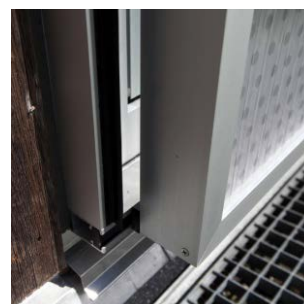
Lameller

Bevægelsen af de drejelige lameller sker for hurtigt, så det er vanskeligt at indstille i en ønsket vinkel. Der bør laves en form for udveksling, så drejningshastigheden nedsættes til højst det halve, eventuelt i en form for stepvis regulering i 6-8 trin, så brugeren oplever at have fuld kontrol. Det ville være ønskeligt, at de øverste lameller (øverste 1/3-del) og de nederste lameller kunne drejes uafhængigt af hinanden, således at der kan skærmes for solstråling (nederst) og samtidig lukke en del dagslys ind (øverst).



Støj fra motor og gear

Der forekommer ingen generende støj fra motoren eller transmissionskomponenterne. Lyden er hørbar, men er på et meget lavt niveau, der falder sammen med almindelig baggrundsstøj. Ved de ændringer i systemet, som skal ændre på bevægelseshastigheder, bør man derfor være opmærksom på ikke at tilføje nye støjkilder. Det lave støjniveau er lidt overraskende i betragtning af, at motoren sidder 'løst' og ubeskyttet i rammeudfræsningen, hvor der i den endelige udformning vil være mulighed for yderligere dæmpning.



Træksystem

Grundsystemet opleves meget enkelt og elegant både indefra og udefra. Aluminiumsskinnerne falder fint sammen med vinduesprofilerne, næsten så man ikke bemærker, at der er tale om et ekstra system, som er monteret uden på vinduesrammerne. Undersøgelserne har ikke inkluderet analyser eller vurderinger af risiko for blokering af skinnerne på grund af tilsmudsning eller is og sne.



Visuelle observationer

Screendug

To typer screendug blev afprøvet, en lys grå/hvid og en mørk blå, begge af fabrikat Ferrari Soltis og med en åbningsgrad (OF) på 8 %. Det er markant forskel på udsynet gennem de to typer screendug, idet baggrunden tydeligt ses gennem den mørke dug, mens dette næsten er umuligt gennem den lyse.



Figur 10. Energy Frames element med lys screendug, som diffuserer det lys der passerer, hvorved udsynet næsten blokeres helt.

Dette skyldes, at det diffuse lys som passerer den lyse dug giver for stor kontrast til baggrunden. Af hensyn til udsynet bør der altså ikke vælges en lys screendug. Tabel 3 nedenfor viser egenskaber for typiske screenduge med forskellig farve og forskellig åbningsgrad (openess-factor, OF). Til sammenligning viser tabellen desuden egenskaber for traditionelle persienner og lamelskodder.

Tabel 3. Typiske egenskaber for de afprøvede afskærmningsprincipper.

Afskærmningsfaktor interval	Afskærmningstype	Variant	Total g-værdi med energirude ¹⁾ , g _{tot} sommer ²⁾ vinter ²⁾	T _v tot %	Dagslys	Regulerbarhed	Udsyn	Blænding	Pri-vathed ⁴⁾	
Udvendige afskærmninger										
0 – 0,1	Persienne, vandrette lameller, grå	lukket	0,02	0,02	≈ 0	☹	☺☺☺☺	☹	☺☺☺☺	☺☺☺☺
		45°	0,15	0,2	≈ 30	☺	☺☺☺☺	☺☺	☺☺	☺
		0°	0,27	0,5	≈ 45	☺	☺☺☺☺	☺☺☺☺	☺☺	☺
0 – 0,1	Lamelskodde, flytbar	faste	0,15	0,2	≈ 30	☹	☹	☹	☺	☺
		drejelige	0,02	0,02	≈ 45	☺	☺☺	☺	☺	☺☺☺☺
		kørt væk	0,61	0,61	≈ 80	☺	☺☺☺☺	☺☺☺☺	☹	☹
0,1 – 0,2	Screen, hvid (white)	OF = 10 %	0,17	0,17	20	☹	☹	☹	☹	☹
	Screen, lys (snow)	OF = 4 %	0,14	0,14	16	☹	☺	☹	☹	☹
	Screen, mørk (dark blue)	OF = 3 %	0,13	0,14	5	☹	☺	☹	☹	☹
	Screen, grå (poplar)	OF = 10 %	0,17	0,18	17	☹	☺	☹	☹	☹
	Screen, grå-sort	OF = 10 %	0,09	0,10	8	☹	☺	☹	☹	☹
	Screen, grå-sort (grey-black)	OF = 3 %	0,07	0,07	4	☹	☺	☹	☺	☹

Element med drejelige lameller

Med de afprøvede lameller er der et fint udsyn, også når persienne-elementet er kørt for. De bedste *solafskærmende ruder* (målt på lystransmittans) reducerer lysindfaldet med mindst 12 % i forhold til en standard energirude, mens en lamelafskærmning, som ikke kan trækkes fra (fx en hvid persienne med hvide lameller), reducerer lysindfaldet med mindst 50 %. Derfor bør lamelafskæmnings altid kunne køres helt fra.



Figur 11. Energy Frames element med indbygget lamelafskærmning (persienne).

I nye bygninger vil lamel-skodden typisk finde anvendelse i stedet for solafskærmende ruder plus et gardin. Derfor kan man sige, at i forhold til typiske løsninger fra nyere byggeri, kan lysindfaldet med det nye koncept øges med mindst 12 %, og helt op til 60 %, hvis der sammenlignes med solafskærmende ruder med lav lystransmittans. En realistisk forøgelse af dagslystilgangen på blot 20 % svarer til, at dagslysets dækningsgrad (den tid af arbejdsdagen, hvor dagslyset dækker lysbehovet) øges med 8-10 %, eller at *dagslyset reducerer elforbruget til kunstlys med 15-20 %*.

I forhold til typiske løsninger i dag med kombination af solafskærmende ruder og en indvendig solafskærmning, kan solvarmebelastningen reduceres med mindst 50 % på solrige sommerdage, typisk svarende til 40 - 80 W/m² rude eller 10 - 30 W/m² gulvareal. *Her ved fjernes den altdominerende varmebelastning af bygningen, således at ventilations- og kølebehov reduceres markant, og i mange tilfælde kan behovet for mekanisk køling elimineres helt.*

En god regulering af Energy Frames elementerne er afgørende for, at der kan opnås en markant energibesparelse, samtidig med at indeklimaet forbedres. Ved anvendelse af lamelafskærmningen vil der være tidspunkter på året, hvor sollyset generer brugerne (pga. blænding), samtidig med at der er behov for opvarmning af bygningen. Derfor bør der arbejdes med at udvikle et element, hvor lamellerne i den øverste del af afskærmningen (i 'dagslysvinduet') kan have en anden hældning end den nederste del (i 'udsynsvinduet').

Varmeisolerende element

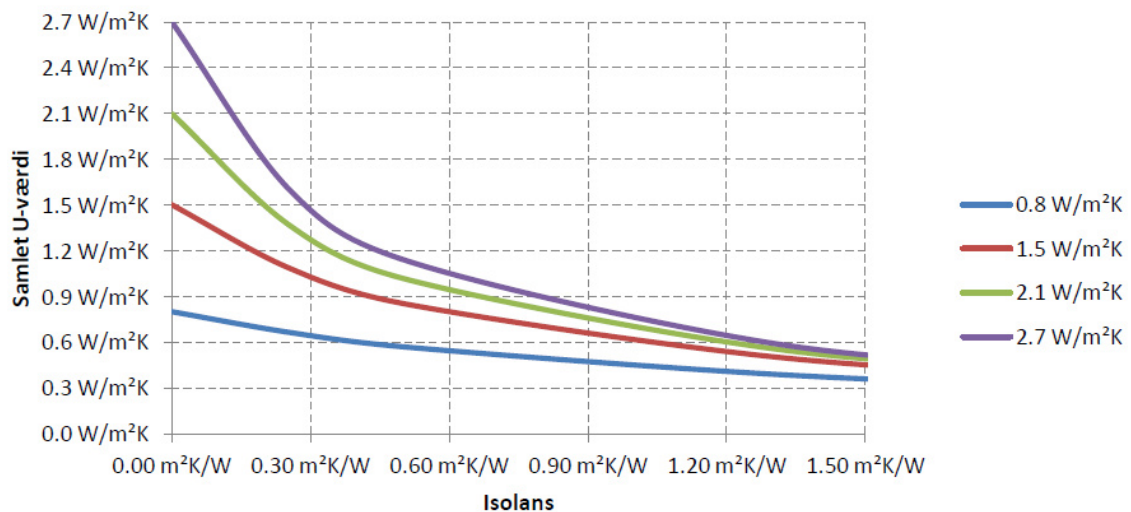


Figur 12. Energy Frames element, der både varmeisolerer og tillader dagslyset at passere.

Reduktion i U-værdi

Der er foretaget beregninger af, hvor meget skodden kan forbedre U-værdien for vinduet/ruden. Figur 13 viser resultaterne i kurveform, således at man direkte kan aflæse den resulterende U-værdi for rude plus isolerende element for forskellige rudetyper og for forskellige værdier af isoleringsevne for elementet.

Den samlede effekt af at anvende et isolerende element over hele året er vurderet gennem simuleringer med BSim, og resultaterne heraf fremgår af afsnittet *Simuleringer* på side 37 .



Figur 13. Beregnede værdier af den samlede isoleringsevne for et isolerende Energy Frames element som funktion af rudens U-værdi (de farvede kurver) og elementets egen varmemodstand (x-aksen).

Ventilationselement

Der blev afprøvet en simpel form for ventilationselement, opbygget med hulprofiler foroven og forneden, som tillader udeluft at passere. Elementet er indrettet sådan, at hullerne både foroven og forneden kan forskydes, således at åbningen kan justeres på en simpel måde.



Figur 14. Energy Frames ventilationselementet med forskydelige hulprofiler indbygget foroven og forneden, således at åbningerne kan reguleres.

Det er endvidere tanken på et tidspunkt at undersøge muligheden for at integrere en simpel form for varmegenvinder i ventilationselementet. Der findes allerede et par systemer på markedet (Windowmaster, og et system udviklet med heat-pipes på TI), og flere er under udvikling. Øget anvendelse af naturlig ventilation kan reducere energiforbruget væsentligt og vil i alle tilfælde være en del af svaret på fremtidens energieffektive byggeri.

Test af Energy Frames ventilationselement

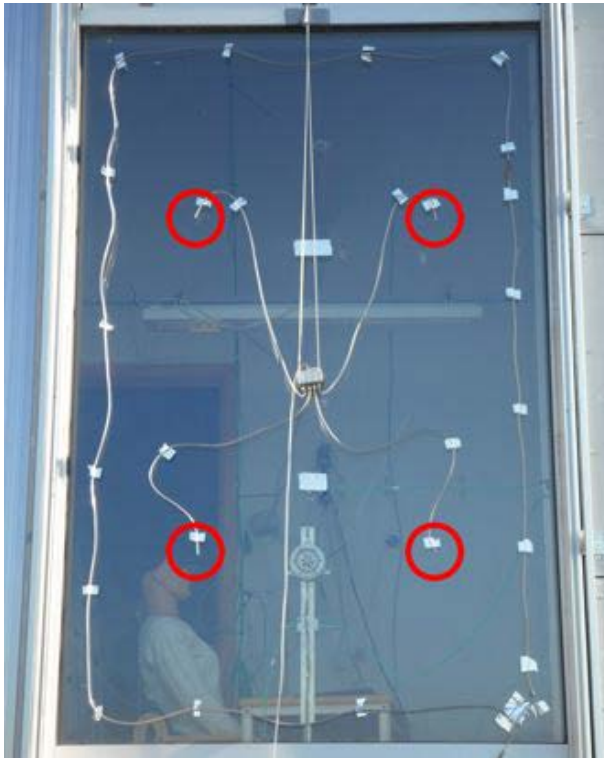
I dette kapitel præsenteres resultaterne fra de udførte forsøg med Energy Frames i forbindelse med ønsket om at undersøge den naturlige ventilation ved åbning af sprækkerne i bunden og toppen af Energy Frames. Ligeledes undersøges temperaturstigningen på luften i hulrummet mellem Energy Frames og vinduet for at kunne klarlægge hvilke potentialer, der er i at forlænge anvendelsesperioden af den naturlige ventilation. Forsøgene er udført i sommerhalvåret, hvorfor det er temperaturforskellen, der er interessant og ikke den faktiske temperatur. Resultaterne viser, at luftmængden som følge af højdeforskellen mellem top og bund opnår et maksimum på omkring en 3,3 l/s pr. m. Denne luftmængde synes lav og skyldes primært et stort tryktab over åbningerne. Ved denne luftmængde må det ligeledes forventes, at systemet er følsomt overfor trykforskelle mellem inde og ude. Forsøgene med forvarmning af luften som følge af solindfaldet på Energy Frames viser, at der er store potentialer i at forvarme luften ved solindfald på fladen. Temperaturforøgelsen er i tæt sammenhæng med luftmængden, hvorfor det er forventeligt, at temperaturforskellen mindskes ved større luftmængde.

Indledning

I relation til undersøgelsen af potentialet af Energy Frames, ønskes det belyst, hvilket potentiale der ligger i anvendelsen af Energy Frames i relation til naturlig ventilation af rummet bag systemet, samt hvor meget forvarmning af luften der kan forventes i relation til forlængelse af perioden med naturlig ventilation. Gennem anvendelse af fuldskalaforsøg foretaget den 5. juli 2012 er der blevet foretaget målinger af den naturlige luftmængde gennem systemet ved temperaturforskelle mellem inde og ude på omkring 10 °C svarende til et forårsscenarie. Solindfaldet har været højt i denne periode og svarer derfor passende til behovet for analysen af forvarmning samt belysning af den maksimalt forventede luftmængde. Forsøgene lægger op til at analysere potentialet ved andre forhold, hvor eksempelvis luftmængden kontrolleres, eller forvarmningen kontrolleres. Som supplement til forsøgsresultaterne vedlægges derfor en analytisk betragtning af energibalancen for vinduessystemet. Dermed kan andre sammensætninger analyseres.

Forsøgsopstilling

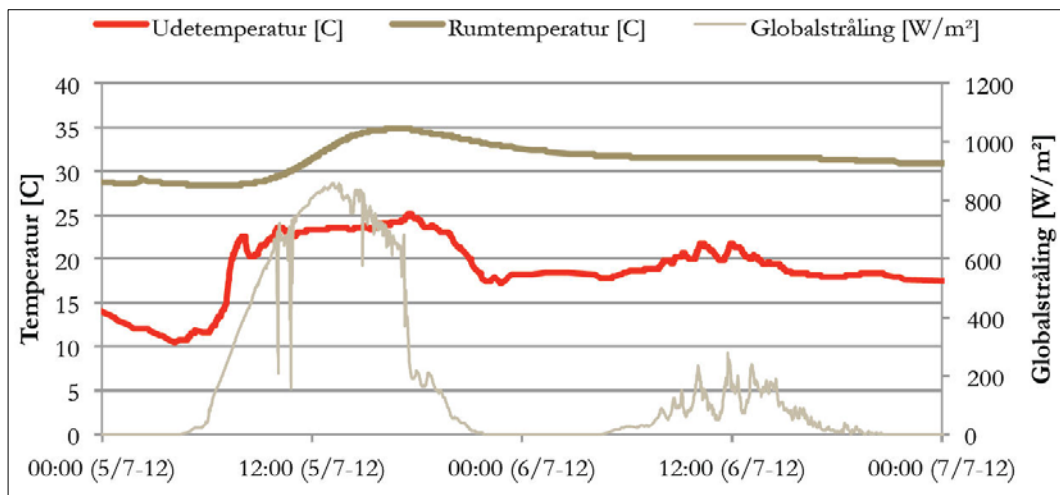
Ved måling af luftmængden bruges sporgasmålinger til måling af CO₂ koncentrationen i hulrummet i forhold til CO₂ koncentrationen i udeluften. Dermed opnås indsigt i den samlede luftmængde, der kan transporteres ved en højdeforskel på 3,2 m. Der tilføres en konstant luftmængde sporegas svarende til 0,84 l/min CO₂. Sporegassen tilføres i bunden af Energy Frames. Målepunkterne til koncentrationsmålingerne der anvendes er vist i figur 1 markeret med de røde cirkler. Temperaturgradienten i hulrummet måles ved tre vertikalt jævnt fordelte centralt placerede ventilator med supplerede termoelementer for at kunne måle luftens temperatur uden at være påvirket af strålingen fra de omkringliggende overflader. De lodrette sider af Energy Frames er tætnet med gafatape for at sikre, at der ikke sker unødigt infiltration fra udeluften via de lodrette sider.



Figur 15. Målepunkter for sporgasmålingerne i hulrummet mellem Energy Frames og vinduet.

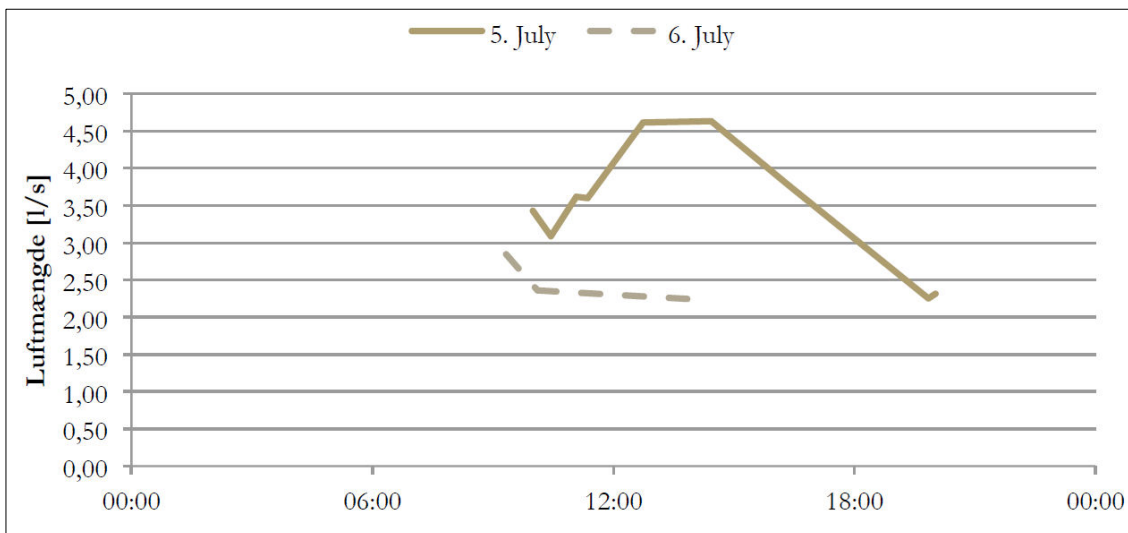
Forsøgsresultater

I perioden hvor forsøgene blev foretaget, var der både højt solindfald og lavt solindfald. Ligeledes var temperaturen relativt stabil og høj. Det medførte et behov for forøget temperatur i forsøgsrummet for at skabe en tilfredsstillende temperaturforskel mellem inde og ude. Udetemperatur og global solstråling for perioden er vist i figur 16.



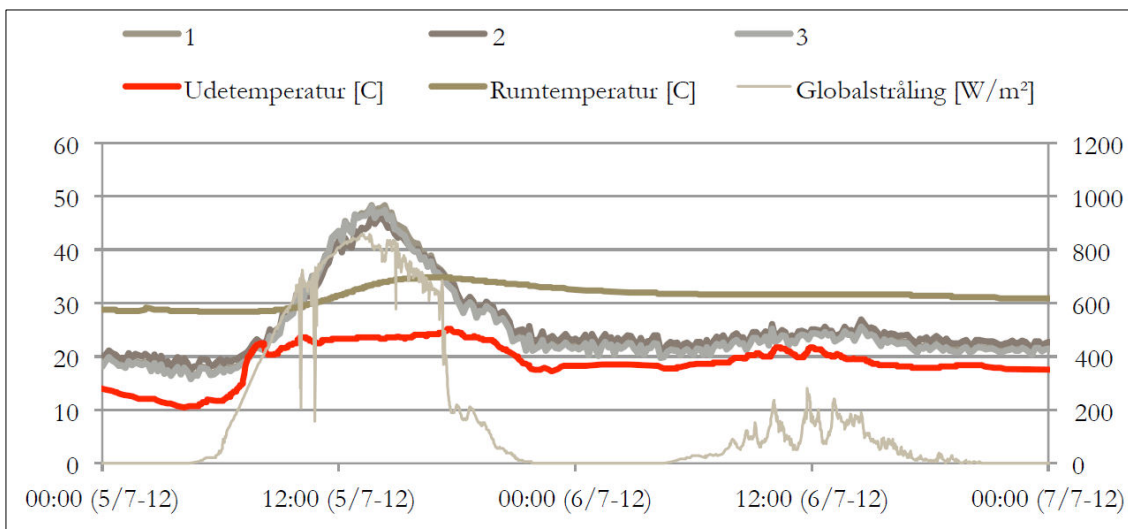
Figur 16. Ude og inde temperatur samt globalstråling for de to forsøgsdage.

Resultaterne af den samlede luftmængde i måleperioden er vist i figur 17 for de to dage. Det ses tydeligt, at solindfaldet har stor betydning for den samlede luftmængde. Ved lavt solindfald reduceres luftmængden til udelukkende at være drevet af den beskedne temperaturforskel mellem hulrum og udeklima samt højdeforskellen mellem top og bund.



Figur 17. Luftmængde målinger for den 5/7 kl. 9-21 og for den 6/7 kl. 9-14:30.

Ses der på forvarmningen af luften i hulrummet, viser målingerne en betydelig forøgelse af lufttemperaturen som følge af absorptionen af Energy Frames og absorptionen af det yderste lag glas i vinduessystemet. Det ses, at på en dag med reduceret solindfald øges temperaturen i hulrummet med nogle få grader, svarende til isoleringsevnen af Energy Frames. I perioden med højt solindfald ses en markant forøgelse af lufttemperaturen i hulrummet fra en udetemperatur på ca. 24 °C til en lufttemperatur på op til 47 °C, eller en forøgelse på 23 °C ved en luftmængde svarende til ca. 4,5 l/s.



Figur 18. Udeklima og indeklima i relation til lufttemperaturmålinger i hulrummet mellem Energy Frames og vinduet. 1, 2 og 3 udgør de tre termoelementer placeret i hulrummet.

Numerisk analyse

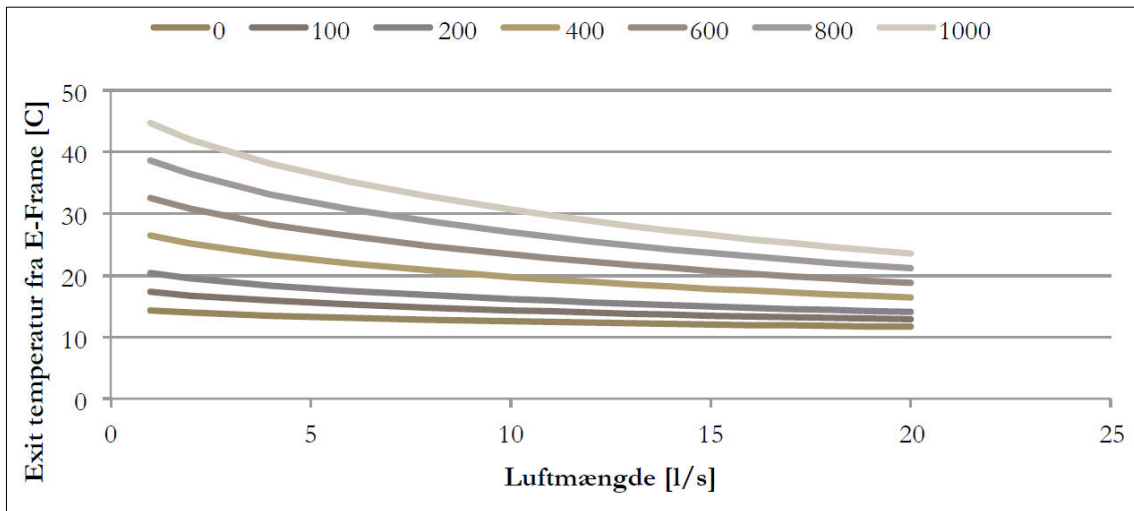
For at kunne beskrive de fysiske forhold, der foregår i denne forsøgsopstilling betragtes energibalancen over systemet. Da systemet består af termisk lette materialer, kan der i denne analyse ses på systemet som et periodestationært system. Energibalancen kan således opstilles og løses for vinduessystemet. Dermed findes de gennemsnitlige overfladetemperaturer af glas og Energy Frames, der vender mod hulrummet, og som bruges til beregning af temperaturændringen over længden af Energy Frames.

Beregningen af temperaturændringen beregnes ved formel (1) der udledes til formel (2).

$$(1) \sum_i U_i dL_n (t - t_i) = -q_m c_p dt$$

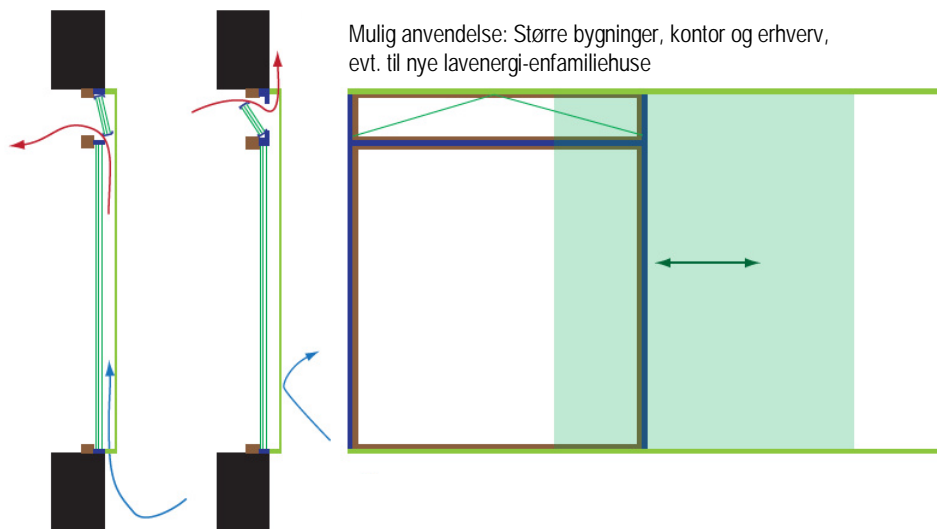
$$(2) t_{n+1} = \frac{t_n \sum_i U_i - \sum_i U_i t_i}{\exp\left(\frac{dL_n \sum_i U_i}{q_m c_p}\right)} + \frac{\sum_i U_i t_i}{\sum_i U_i}$$

Dermed kan forvarmningen af luften for det anvendte system i forsøgene beregnes og giver dermed følgende resultater ved en given luftmængde og et givet solindfald, som vist i figur 5. Beregningen er vist ved en rumtemperatur på 20 °C og en udetemperatur på 10 °C.



Figur 19. Indblæsningstemperatur som funktion af solindfald og luftmængde ved en udetemperatur på 10 °C og rumtemperatur på 20 °C.

Figur 20 illustrerer et princip for, hvordan ventilationselementet kan fungere med luftåbninger i bund og top af elementet, som i kombination med et ventilationsvindue kan trække luft ind eller ud af det bagvedliggende rum.



Figur 20. Skitse af et af flere principper for, hvordan Energy Frames kan fungere som ventilationselement. EF-rammen dækker hele vinduet, og den forvarmede luft kan ledes ind via ventilationsvinduet foroven. Ventilationsvinduet kan også benyttes som fraluftsventil ved almindelig tværv ventilation af bygningen.

Konklusion

Ud fra forsøgene ses, at systemet har et relativt stort tryktab over hullerne. Dette resulterer i, at luftmængden bliver forholdsvis lav. Systemet bør som minimum levere omkring 10 l/s for at kunne anvendes til opnåelse af atmosfærisk komfort i enkeltmandskontorer. I modsætning til den lave luftmængde ses det, at der opnås høje temperaturer i hulrummet mellem Energy Frames og vinduet. Dermed er der et potentiale for at udnytte denne forvarmning til at øge anvendelsesperioden af den naturlige ventilation. En numerisk analyse af dette potentiale ved andre luftmængder er vist i figur 5 og viser, at der kan forventes en temperaturforøgelse på 10 °C ved 10 l/s og 400 W/m², hvilket må betragtes som værende et godt udgangspunkt for forlængelse af anvendelsesperioden af den naturlige ventilation. Det må ydermere forventes - ved implementering af dette system i praksis - at trykforskellene mellem inde og ude, samt rummene indbyrdes, skaber ustabile situationer for den naturlige ventilation i hulrummet, og dermed ændrer på effektiviteten af systemet. En nærmere analyse af, hvorledes trykforholdene kan stabiliseres samt kontrolleres, bør foretages. Anvendelsen af små ventilatorer kan ligeledes anvendes til at stabilisere luftmængden i hulrummet.

Energy Frames isoleringselement

Dynamisk U-værdi – Analyse af energibalancen

I forbindelse med implementering af dynamisk U-værdi facade løsninger, ønskes der belyst, hvilke krav der stilles til tætheden af en sådan teknologi, for at denne kan være effektiv i at nedbringe varmetabet fra facadeelementet hvor denne implementeres. For at kunne belyse dette punkt, opstilles varmebalancen for det yderste lag af vindueelementet.

$$\begin{aligned}\Phi &= \alpha_{conv} A(t_{surf} - t_{amb}) + \varepsilon_{surf} \sigma_s A \Psi_{sky} (T_{surf}^4 - T_{sky}^4) \\ &\approx \alpha_{conv} A(t_{surf} - t_{amb}) + \varepsilon_{surf} \sigma_s A \Psi_{sky} (4T_{ref}^3)(t_{surf} - t_{sky})\end{aligned}$$

Dette er det generelle varmetab for vinduets yderste lag. Når den dynamiske U-værdi teknologi implementeres ændres varmebalancen for det yderste lag til følgende. Der optræder dermed behovet for at kunne beregne temperaturen i hulrummet ud fra nedenstående energibalancer, som kan løses ved at løse de enkelte energibalancer for knudepunkterne beskrevet i ligningerne nedenfor.

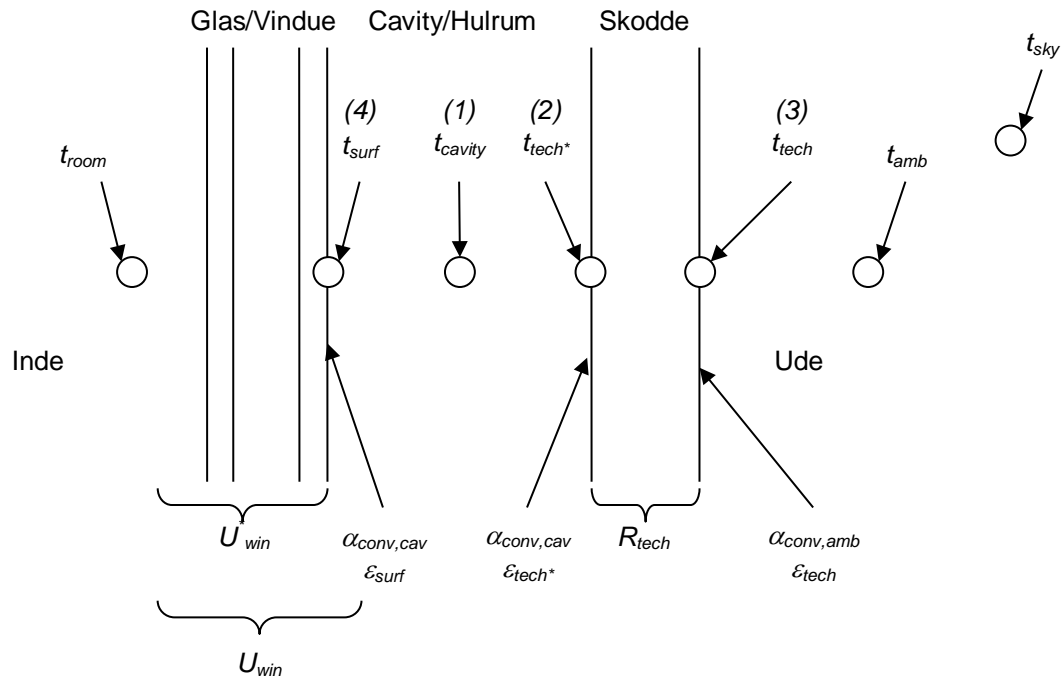
$$\Phi_{total} = U_{win}^* A(t_{room} - t_{surf})$$

$$U_{win}^* = \frac{1}{U_{win}^{-1} - 0,04} \quad | \quad R_{tech} = \frac{e_{tech}}{\lambda_{tech}} \quad | \quad T_{ref} = E \left(\frac{T_{surf} + T_{tech^*}}{2} \right)$$

$$\left[\begin{array}{l} (1): 0 = \alpha_{conv,cav} A(t_{cavity} - t_{surf}) + \alpha_{conv,cav} A(t_{cavity} - t_{tech^*}) + Q \rho_{cavity} c_p (t_{cavity} - t_{amb}) \\ (2): 0 = \varepsilon_{surf} \varepsilon_{tech} \sigma_s A \Psi_{tech-surf} (4T_{ref}^3)(t_{tech^*} - t_{surf}) + \alpha_{conv,cav} A(t_{tech^*} - t_{amb}) + \frac{1}{R_{tech}} A(t_{tech^*} - t_{tech}) \\ (3): 0 = \varepsilon_{tech} \sigma_s A \Psi_{sky} (4T_{ref}^3)(t_{tech} - t_{sky}) + \alpha_{conv,amb} A(t_{tech} - t_{amb}) + \frac{1}{R_{tech}} A(t_{tech^*} - t_{tech}) \\ (4): 0 = U_{win}^* A(t_{surf} - t_{room}) + \alpha_{conv,cav} A(t_{surf} - t_{cavity}) + \varepsilon_{surf} \varepsilon_{tech} \sigma_s A \Psi_{surf-tech} (4T_{ref}^3)(t_{surf} - t_{tech^*}) \end{array} \right]$$

$$U_{total,eff} = \frac{\Phi_{total}}{A(t_{room} - t_{amb})} \quad | \quad R_{tech,eff} = \frac{1}{U_{total,eff}} - \frac{1}{U_{win}}$$

Dermed bliver t_{surf} , t_{cavity} , t_{tech^*} og t_{tech} beregnet ved løsning af ligningerne ovenfor, alternativt ved iteration og kontrol af varmebalancerne markeret i skarp parentes.



Figur 21. Opbygning af beregningsmodel for evaluering af dynamisk U-værdi facade koncept.

Analyse

Der foretages følgende analyse af den dynamiske U-værdi ydeevne ved variation af tætheden, Q , U-værdien af vinduet, U_{win} , samt isolansen, R_{tech} , af den isolerende skodde.

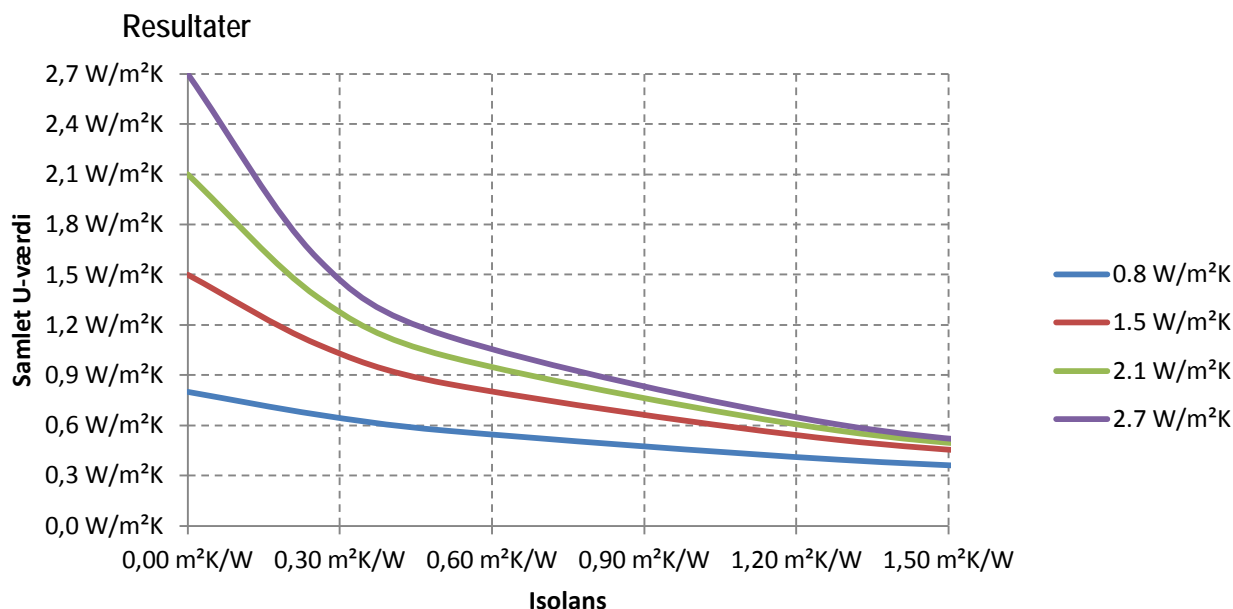
1. Q varieres i intervallet 0-10 l/s pr. m^2
2. U_{win} varieres i intervallet 0,8-2,7 W/m^2K
3. ϵ_{tech} varieres i intervallet 0,01-0,10 m ved λ_{tech} på 0,039 W/mK

Randbetingelser

Som randbetingelser anvendes følgende:

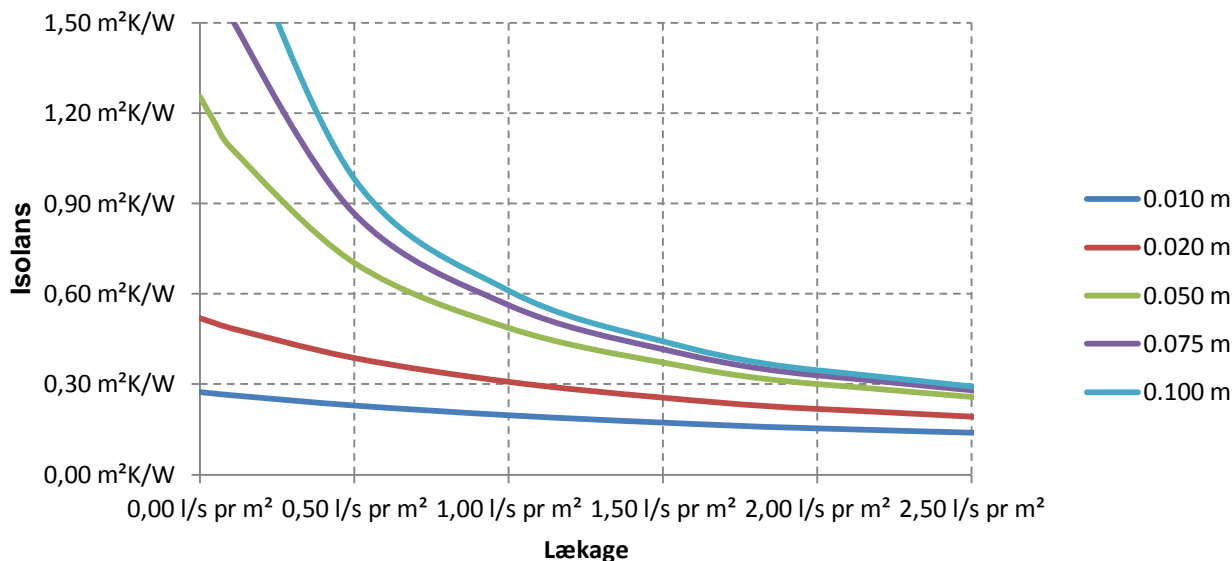
1. Rumtemperatur, t_{room} , på 20 °C
2. Udetemperatur, t_{amb} , på -12 °C
3. Himmelterperatur, t_{sky} , på -34 °C
4. Vinkelforhold til himmelen, Ψ_{sky} , på 0,4.
5. Vinkelforholdet mellem det isolerende element og vinduet, $\Psi_{tech-surf}$, er 1
6. Emissionsforhold af isolerende element, ϵ_{tech} og ϵ_{tech^*} , på 0,8
7. Indvendig og udvendig overgangsisolans på 0,13 m^2K/W og 0,04 m^2K/W

Idet strømningsforholdene i hulrummet er ukendte, antages en lav overgangsisolans mellem hulrummet og hhv. vinduesoverfladen og det isolerende element svarende til 0,04 m^2K/W .



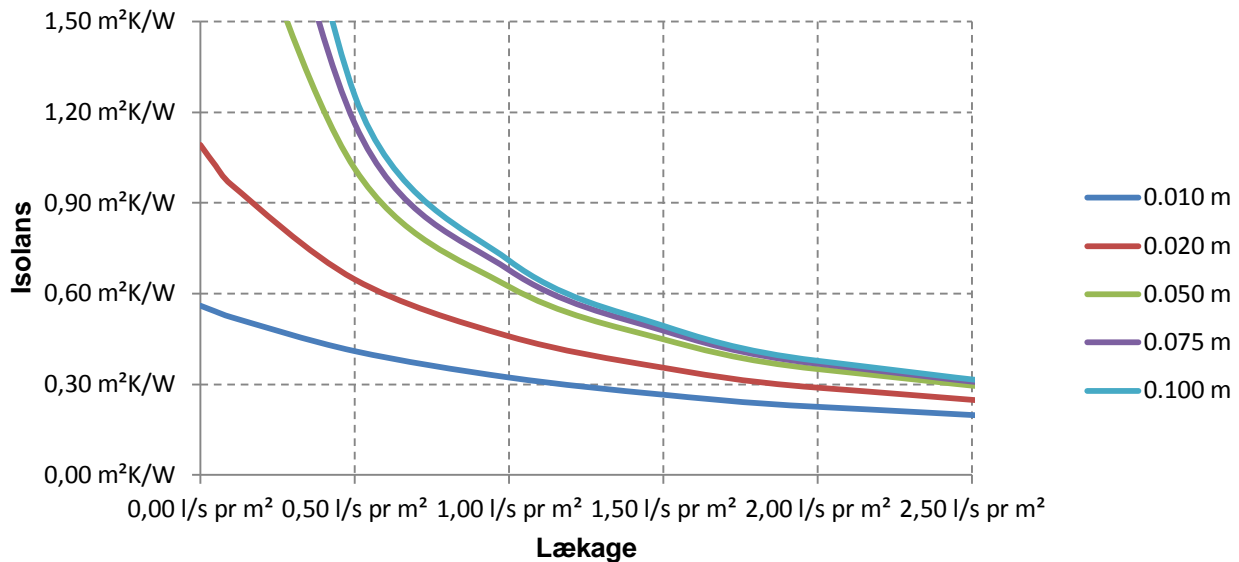
Figur 22. Samlet U-værdi af vindue som funktion af isolans ved forskellige vindues U-værdier.

Ud fra figur 22 kan det ses, at der opnås størst ændring af den samlede U-værdi ved vinduer med højest U-værdi. Tages udgangspunkt i vinduer med en U-værdi på $1,5 W/m^2K$ ses, at den samlede U-værdi kan reduceres til $0,6 W/m^2K$ svarende til en reduktion af varmetabet på 60 % ved at tilføje et system med en isolans på $0,9 m^2K/W$. Forøges isolansen til $2,5 m^2K/W$ reduceres den samlede U-værdi til $0,3 W/m^2K$, svarende til en reduktion af varmetabet på 80 % ved en U-værdi af vinduet på $1,5 W/m^2K$.



Figur 23. Isolans som funktion af lækagen ved forskellige tykkelser af det isolerende element.

Som det ses af figur 22 og figur 23, har lækagen stor betydning for den samlede isolans af den isolerende skodde. Ud fra ovenstående kan det ses, at opnåelse af større isolans end $1,5 m^2K/W$ af den isolerende skodde, ikke kan opnås med mindre der tættes yderligere. For at kunne opnå en større isolans skal varmelednings-evnen af det valgte materiale reduceres, eksempelvis ved at anvende aerogel med en varmeledningsevne på $0,018 W/mK$.



Figur 24. Isolans som funktion af lækagen af elementet ved forskellige tykkelser af det isolerende element, hvor det isolerende materiale har reduceret varmeledningsevne fra 0.039 W/mK til 0.018 W/mK.

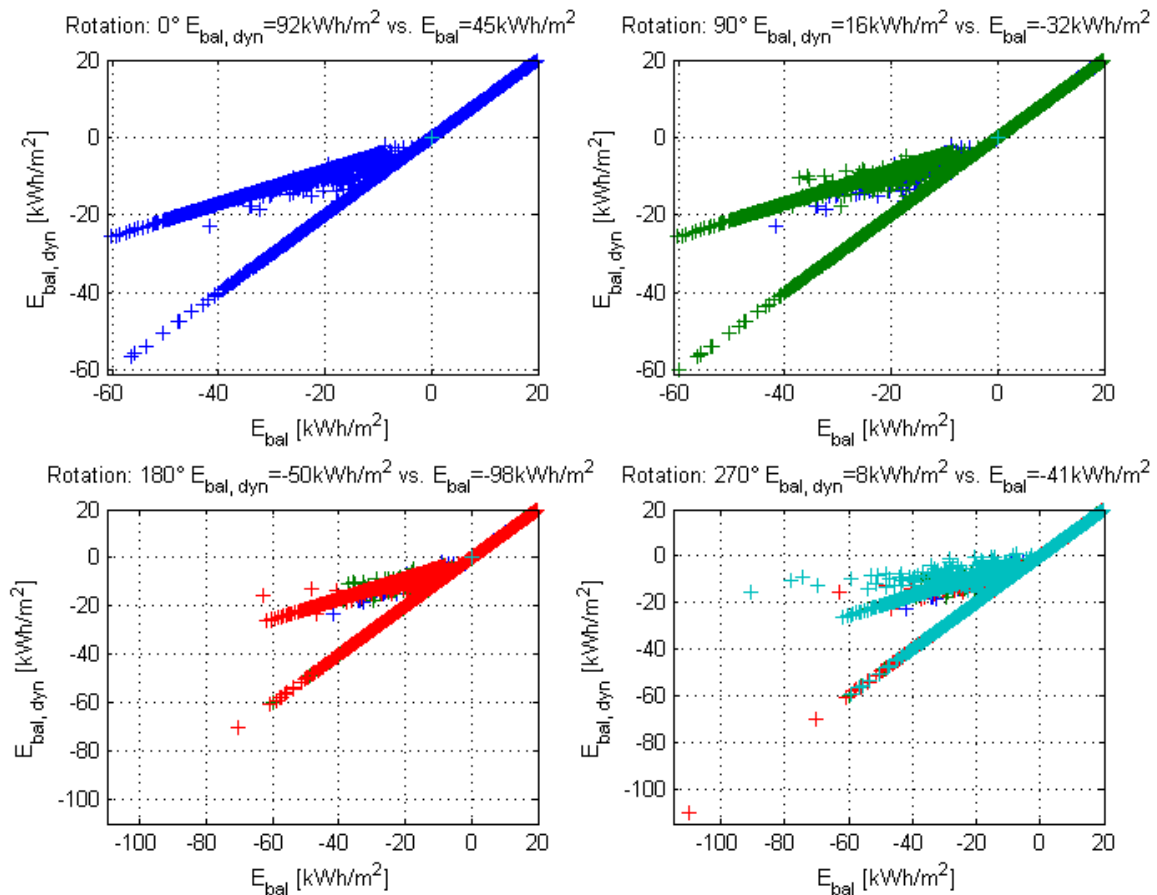
For at opnå en isolans på 0,9 m²K/W påkræves en lækage på 0,25 l/s pr m² ved en isoleringstykkelse på 50 mm med en gennemsnitlig varmeledningsevne på 0,039 W/mK. Ved en reduktion af varmeledningsevnen til 0,018 W/mK og ønskes en isolans på 0,9 W/m²K kan lækagen øges til ca. 0,5 l/s pr. m² ved 50 mm tykt element.

Energi balance for vinduet

Beregnes energibalancen for vinduet med det dynamiske isolerende element, $E_{bal,dyn}$, i opvarmningssæsonen defineret til perioden fra 24. september til 13. maj for 4 forskellige orienteringer henholdsvis nord (180°), syd (0°), øst (270°) og vest (90°), kan denne sammenlignes med energibalancen for vinduet, E_{bal} , uden det isolerende element. Det isolerende element sættes til at styres således at det er trukket for, så længe $E_{bal,dyn} > E_{bal}$ og når tiden er under 7:00 og over 17:00. I perioder, hvor det isolerende element er trukket for, sættes g_{win} til 0, mens den i perioder, hvor det isolerende element er trukket fra, sættes g_{win} til 0,51. Nedenfor er vist beregningsmetodikken for energibalancen for vinduet. I den efterfølgende beregning antages en isolans på 0,9 m²K/W og en U-værdi af vinduet på 1,5 W/m²K.

$$E_{bal} = I_{sol} g_{win} - U_{win} \sum_{i=24.sept...13.maj} (t_{room} - t_i)$$

$$E_{bal,dyn} = \sum_{i=24.sept...13.maj} (I_{sol,i} g_{win,i} - U_{win,i} (t_{room} - t_i))$$



Figur 25. Energibalancen for de fire vinduer med det dynamiske isolerende element i forhold til deres respektive referencvinduer med tilsvarende orientering.

Tabel 4. Samlet energibalance for vinduerne med dynamisk isolerende element i forhold til referencvinduerne

Orientering	E_{bal} kWh/m ²	$E_{bal, dyn}$ kWh/m ²	Energibesparelse kWh/m ²
Nord	-98	-50	48
Syd	45	92	47
Øst	-41	8	49
Vest	-32	16	48

Som det ses af tabel 4, opnås der forøgelse af energibalancen i omegnen omkring 50 kWh/m² uanset orientering, og stemmer dermed godt overens med reduktionerne i varmetabet.

Anbefaling

På baggrund af analysen af energibalancen for den dynamiske facadeløsning, vurderes det, at der er et stort potentiale i at anvende isolerende facadeelementer. Det påkræves, at der fokuseres på tæthed af facadeelementerne, og at denne ikke overskrider 0,25 l/s pr. m². Ligeledes vil en samlet isolans af skoddeelementet på 1,28 m²K/W svarende til en tykkelse på 50 mm isolering med en gennemsnitlig varmeledningsevne på 0,039 W/mK, således at der kan opnås væsentlige reduktioner af varmetabet gennem facadeelementet, når dette kombineres med den korrekte styringsstrategi.

Test af ventilationselementets tæthed

For at det isolerende element i Energy Frames kan fungere optimalt, er det helt afgørende, at elementet kan slutte tæt til vinduet eller facaden, som det sidder på. Tætheden søges sikret med et specielt gummiprofil, der er robust nok til, at det kan tåle de belastninger der opstår, når elementet kører på bæringsprofilerne og samtidig er blødt nok til, at det kan lukke tæt mod vinduet. I forbindelse med undersøgelse af tætheden af Energy Frames er der blevet foretaget tryk- og sug-tests af systemet samt efterfølgende blevet tætnet steder på Energy Frames, hvor dette har været enten oplagt eller nødvendigt som følge af resultaterne fra røgforsøg og de enkelte tests. Figur 26 viser fotos af forsøgsopstillingen.



Figur 26. Fotos af opstillingen til undersøgelse af isoleringselementets tæthed i lukket tilstand.

Trykprøvning af Energy Frames, Aalborg Universitet december 2011

Prøverne er blevet foretaget ved forskellige trykforskelle for dernæst at kunne omregne denne til en faktor som kan bruges til at vurdere tætheden på årsbasis. Til denne vurdering bruges samme tilgang som i SBI-anvisning 213 for omregning af luftmængden fra 50 Pa, jf. nedenstående formel.

$$q = 0,06 \cdot q_{50Pa}$$

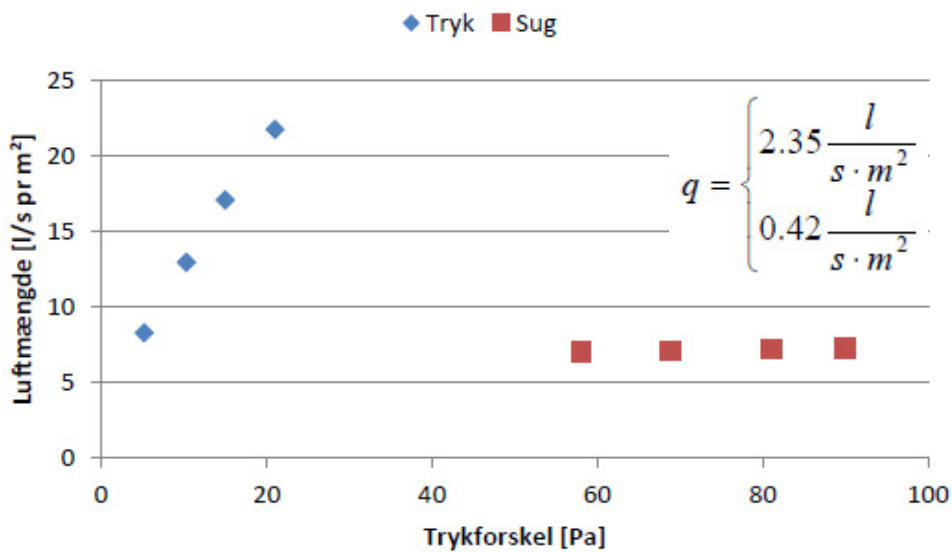
Der er udført følgende tests:

1. Energy Frames uden tætning af siderne
2. Energy Frames tætning af siderne
3. Energy Frames tætning af siderne og toppen
4. Energy Frames tætning af siderne, toppen og bunden

Resultaterne fra disse tests er beskrevet på de følgende sider.

Energy Frames uden tætning af siderne

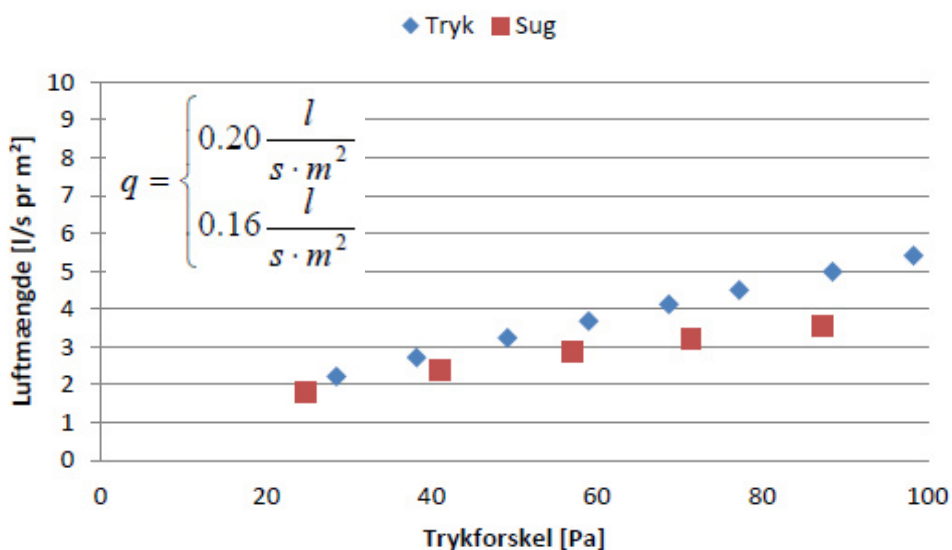
Ved det første forsøg er det tydeligt, at ved overtryk presses Energy Frames elementet fra vinduet, så spalten mellem element og vindue øges, jo større trykket er, ligesom luftstrømmen øges tilsvarende. Modsat, når der er undertryk i mellemrummet, suges Energy Frames elementet til vinduet, så luftgennemgangen begrænses. Figur 27 viser forskellen i overtryk (tryk) og undertryk (sug).



Figur 27. Luftmængdemålinger på det isolerende Energy Frames element, uden tætning langs kanterne. Resultaterne viser markant forskel ved overtryk og undertryk. Formlerne angiver den beregnede luftstrøm, ved omregning fra et over- eller undertryk på 50 Pa: $q = 0,06 \cdot q_{50Pa}$. Det bemærkes, at luftstrømmen her angives i forhold til facadeareal og ikke i forhold til opvarmet etageareal.

Energy Frames med tætning af siderne

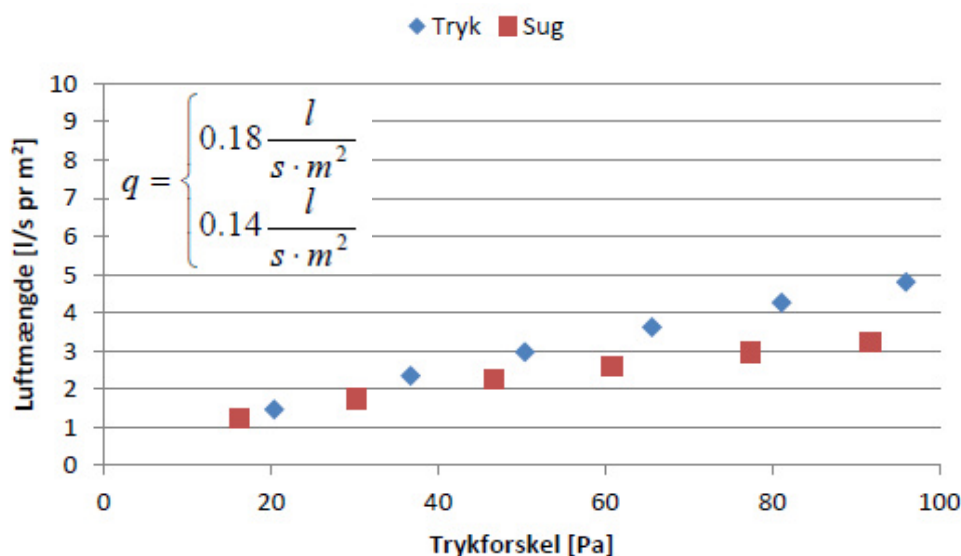
Forsøget med tætning langs Energy Frames elementets sider viser et meget markant fald i luftmængderne, specielt ved overtryk, hvor luftmængden nu kun er 8 % i forhold til første forsøg. Det ses også, at overtrykket fortsat er i stand til at trykke Energy Frames elementet fra, så luftmængden øges, jo større trykket er.



Figur 28. Luftmængdemålinger på det isolerende Energy Frames element, med tætning langs siderne af elementet. Resultaterne viser, at der kun er en lille forskel ved overtryk og undertryk, svarende til 25 % større luftmængde ved overtryk i forhold til undertryk.

Energy Frames med tætning af siderne og toppen

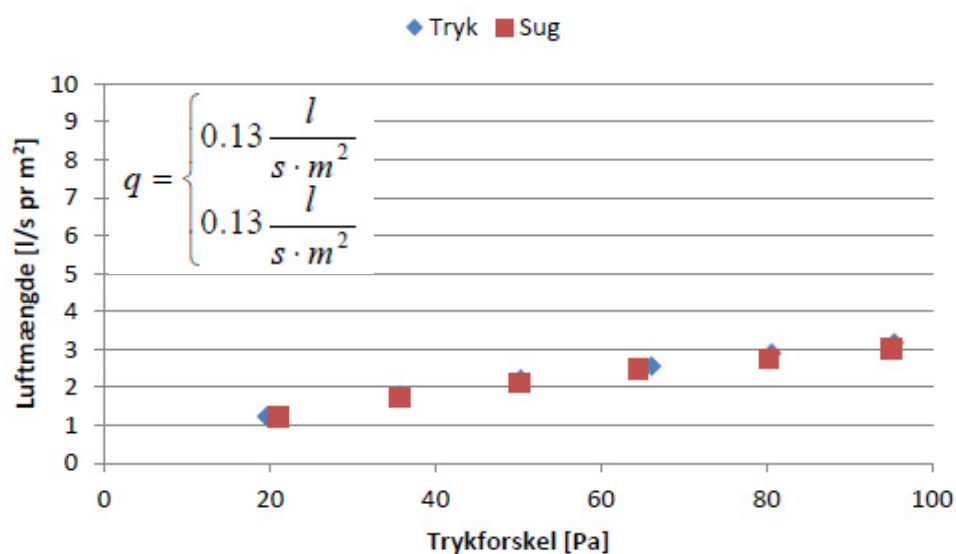
I det tredje forsøg er der yderligere tætnet i toppen af Energy Frames elementet. Betydningen heraf viser sig at være forholdsvis begrænset, som det ses ved sammenligning af figur 27 og figur 28. At forskellen er begrænset, skyldes bl.a., at længden af toppen (og dermed åbningsarealet) er betydeligt mindre end længden af de to sider. Reduktionen i luftstrøm bliver derfor kun ca. 10 %.



Figur 29. Luftmængdemålinger på det isolerende Energy Frames element, med tætning langs siderne af elementet og i toppen. Resultaterne viser, at der sker en yderligere reduktion på ca. 10 % af luftstrømmene.

Energy Frames med tætning af siderne, toppen og bunden

Ved det sidste forsøg er der tætnet langs alle kanter af Energy Frames elementet. Det ses tydeligt, at elementet nu er 'tæt', idet luftstrømmene ved overtryk og undertryk er ens, og igen markant mindre end ved det tredje forsøg (28 % i ved overtryk), hvor der ikke var tætnet i bunden. Resultaterne viser, at det er meget vigtigt, at Energy Frames elementet kan slutte helt tæt langs alle kanter, hvis den ekstra varmeisolering af elementet skal udnyttes fuldt ud.



Figur 30. Luftmængdemålinger på det isolerende Energy Frames element, med tætning langs alle elementets sider. Luftmængderne er nu lige store ved overtryk og undertryk, som udtryk for, at elementet nu er 'tæt'.

Sammenfatning

Disse forsøg viser, at jo tættere Energy Frames systemet gøres, desto mindre afvigelse kommer der mellem sug- og tryk-forsøgene. Forsøgene viser ligeledes, at luftmængden på årsbasis kan holdes under de tidligere anbefalede 0.25 l/s pr. m². Ved tætning af siderne kan den anbefalede luftmængde overholdes ved sug- og tryk-prøvningen. For at isolansen kan øges yderligere er der derfor behov for at tætnes yderligere, men på nuværende tidspunkt er der gode muligheder for at systemet kan blive opgraderet til at have en markant indflydelse på reducere varmetabet af vinduessystemer. Det ses, at der opnås størst forøgelse af isolansen ved at ændre tykkelsen af materialet eller materialets varmeledningsevne.

Tabel 5. Luftmængde ved omregning fra 50 Pa trykprøvning til års vurdering for henholdsvis tryk og sug, samt middelværdien og spredningen. Enhederne er i l/s pr. m².

Tætning	Tryk	Sug	Spredning	Middel
Energy Frames, uden tætning	2,35	0,42	1,36	1,38
Energy Frames, tætning sider	0,20	0,16	0,03	0,18
Energy Frames, tætning sider & top	0,18	0,14	0,03	0,16
Energy Frames, tætning sider & top & bund	0,13	0,13	0,00	0,13

Som det ses, er der relativ stor variation mellem tryk og sug på de enkelte tests bortset for tætningen af siderne, top og bund. Mindskes variationen, øges robustheden af systemet. Den samlede vurdering er dermed, at tætheden godt kan opnås ved relativt simple tiltag af tætningen af siderne, og at systemet dermed kan få den tilsigtede effektivitet.

Regulering af Energy Frames

Generelle principper

Da hele ideen i Energy Frames er, at forskellige elementtyper hele tiden skal reguleres optimalt i forhold til indeklima og energiforbrug, bør der udvikles en form for integreret regulering eller styring af elementerne i samspil med hinanden. Det betyder, at der både skal reguleres efter solindfald, lysindfald, indetemperatur, luftkvalitet og udsyn. Men reguleringen skal ikke 'bare regulere'. I det enkelte øjeblik er det ikke tilstrækkeligt at se på værdien af de regulerede størrelser, da flere tiltag kan have samme virkning. Er indetemperaturen fx for høj, kan varmebelastningen reduceres ved at lukke solafskærmningen mere i, men den samme virkning kan i nogle tilfælde opnås ved at øge ventilationen (afhængigt af forskellen mellem inde- og udetemperatur). Den optimale strategi afhænger altså af flere forhold, i dette eksempel fx også af, om der vil være tilstrækkeligt dagslys, når afskærmningen lukkes mere i. Ved udvikling af en egentlig integreret reguleringssystem for Energy Frames, må det besluttes, om reguleringen også skal omfatte fx belysning, ventilation og opvarmning. Dette kan måske blive aktuelt på længere sigt, men i det følgende beskrives forslag til et simpelt reguleringssystem, der forsøger at opretholde alle indeklima-setpunkter i brugstiden.

Simpel regulering

Tabel 1 giver et overblik over de forskellige reguleringssituationer, der forekommer hen over året og henholdsvis inden for og udenfor brugstiden. Hvis der er tale om regulering for et enkelt rum, må der grundlæggende skelnes mellem den situation, hvor der er personer til stede i rummet og den situation, hvor der ikke er. I den første reguleres der i komfort-mode, og i den anden i energi-mode. Tabellen giver også eksempler på mulige setpunkter samt værdier for reguleringskriterier. Disse må i praksis fastsættes i det konkrete tilfælde.

Tabel 6. Reguleringstilfælde i en simpel regulering.

Setpunkt	Reguleringstilfælde					
	varmebehov		neutral		kølebehov	
	brugstid	ikke-brugstid	brugstid	ikke-brugstid	brugstid	ikke-brugstid
CO ₂	1000	800	1000	800	1000	800
Indetemp. °C	21	17	23	23	23	21
Belysningsstyrke i referencepkt. lux	200	-	200	-	200	-
Occ	1	0	1	0	1	0
Max belysningsstyrke på facade, lux	16.000	-	16.000	16.000	16.000	10.000
Min belysningsstyrke på facade, lux	12.000	-	12.000	12.000	12.000	10.000

Hvis der benyttes en CO₂ regulering, vil denne altid have første prioritet i brugstiden, som fx i en skole. Det betyder, at uanset alle andre parametre, så skal der ventileres ekstra, når grænseværdien for CO₂ overskrides. Tages der derefter udgangspunkt i regulering af solafskærmningen, viser tabel 1, at når den udvendige belysningsstyrke overskrider 16.000 lux inden for brugstiden (når Occ = 1), skal solafskærmningen lukke mere i. Der er mange forskellige måder at regulere på. For en afskærmning med lameller, vil en typisk regulering være cutt-off strategi, hvor lamellerne drejer nøjagtig så meget, at direkte sollys udelukkes. Cutt-off vinklen β_c kan beregnes ud fra solens position, eller solens profilvinkel θ og forholdet mellem lamelbredde og lamelafstand d:

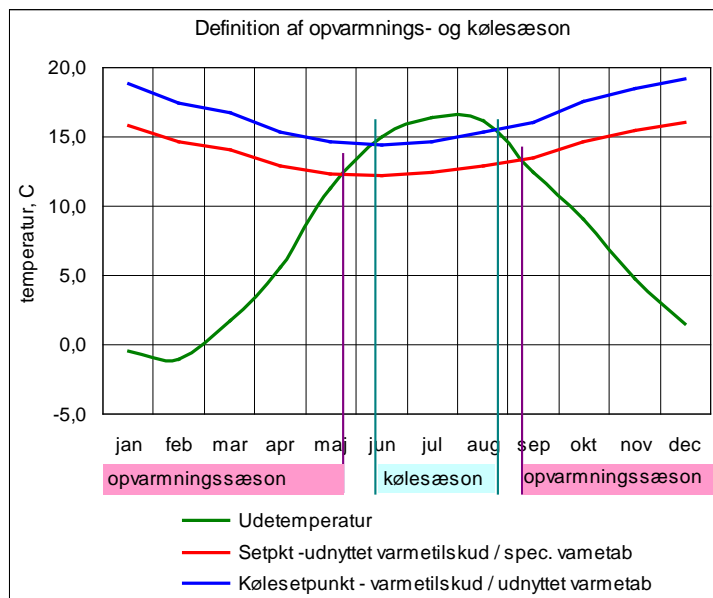
$$\beta_c = \arctan\left\{\frac{\tan\theta \pm d \cdot \sqrt{1 + \tan^2\theta - d^2}}{d^2 - 1}\right\}$$

For at afskærmningen ikke skal forblive lukket, skal der også vælges et kriterium for, hvornår den åbner igen, hvilket fx kan være ved 12.000 lux. For at reguleringen også bliver acceptabel for brugerne, skal det forhindres, at afskærmningen åbner og lukker for mange gange i delvist skyet vejr. Dette kan gøres ved at indsætte en forsinkelse på åbningskriteriet.

Uden for brugstiden, når $Occ = 0$, reguleres der i energi-mode. Om vinteren, når der er opvarmningsbehov, er men interesseret i at udnytte den passive solvarme maksimalt, og vil derfor åbne afskærmningen maksimalt. Modsat om sommeren, når der er et vist kølebehov, ønsker man uden for brugstiden at udelukke mest muligt af solvarmen for at holde indetemperaturen nede.

I overgangsperioderne forår og efterår er situationen lidt vanskeligere, fordi der både kan være et varmebehov og et kølebehov. Her bør indlægges kriterier for hvordan de to situationer defineres. I figur 1 er illustreret temperaturforløb i en eksisterende bygning (ikke højisoleret). I dette eksempel kunne man definere grænseværdierne for udetemperaturen til henholdsvis 13 °C om foråret og 15 °C om efteråret. Reguleringen på disse tidspunkter kan sofistikeres ved også at benytte den aktuelle værdi for indetemperaturen og måske endda benytte prognoseværdier for den forventede udvikling i vejret.

Parallelt med regulering af solafskærmningen efter solindfaldet kan der reguleres efter indetemperaturen, især om sommeren. Her kan man fx sætte en grænseværdi for indetemperaturen i kombination med et vist solindfald, sådan at afskærmningen lukker delvist, når temperaturgrænsen overskrides, dog kun, hvis samtidig solindfaldet/belysningsstyrken har en vis værdi. Disse grænser kunne fx være 23 °C og 12.000 lux.



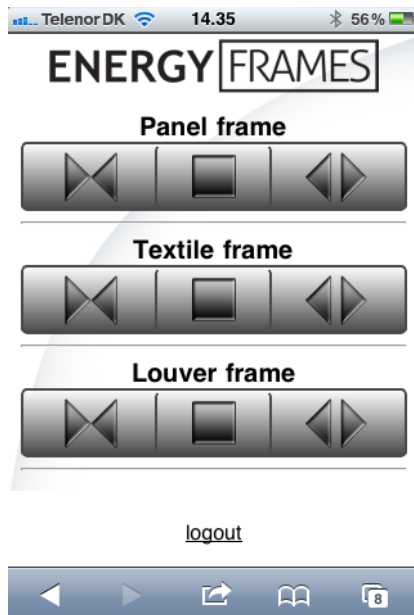
Figur 31. Eksempel på temperaturforløb og forskelle mellem setpunkter, varmetilskud og varmetab, som definerer opvarmnings- og kølesæson. Kurverne er principielle, og vil i praksis afhænge meget af den konkrete bygning.

Parametre i en integreret regulering

I nedestående tabel gives en oversigt over parametre, som kan tænkes at indgå i en integreret regulering. Afhængigt af den aktuelle reguleringsstrategi vil det være nødvendig også at definere nogle reguleringstider, stigeramper (hvis lysstyring indgår), dødbånd, ventetid mellem manual-mode og auto-mode, m.fl. Listen er gjort generel i den forstand, at den benyttes på alle bredde- og længdegrader og for alle Energy Frames elementtyper, men den er sikkert ikke dækkende.

Status-variable	Forklaring	Benyttes til	Enhed
<i>Tidszone</i>	CET	Tidsangivelse	
<i>Long</i>	Længdegrad	Stedbestemmelse	-180-180°
<i>Lat</i>	Breddegrad	Stedbestemmelse	-90-90°
<i>Time</i>	Klokkeslæt (tid på dagen)	Beregning af solens azimut, højdevinkel og profilvinkel samt bestemmelse af opvarmnings- eller køletilfælde	hh.mm
<i>Dag nr.</i>	Dag nummer i året		1-365
<i>Sommertid</i>	Adderer en time til Time	Omstilling til sommertid	+/- 1
<i>Ugedag</i>	Alm. ugedag mandag-søndag	For tidsmæssig indstilling af automatisk regulering indeklima- / energi-mode	1-7
<i>Fridag</i>	Dage, hvor der reguleres i energi-mode	For tidsmæssig indstilling af automatisk indstilling i energi-mode	0
<hr/>			
<i>Rum orientering</i>	Azimut, orientering af aktuel (dominerende) facade	Solberegninger	0-360°
<hr/>			
<i>Solaz</i>	Solens azimuthvinkel, beregnet		0-360°
<i>Solh</i>	Solens højdevinkel, beregnet		-90-90°
<i>Profilvinkel</i>	Solens højdevinkel projiceret på vinduets normalplan	Afgør fx om direkte sol kan passere en persienne	0-90°
<i>Cutt-off vinkel</i>	Lamelhældning på persienne, der lige akkurat afskærer direkte solstråling	Udelukke direkte solstråling	0-90°
<hr/>			
Udeklima-variable	Forklaring	Benyttes til	Enhed
t_e	Aktuel udetemperatur	Sammen med <i>time</i> og <i>indetemperatur</i> til at bestemme opvarmnings- eller køletilfælde	°C
$I_{v,e}$	Udvendig solindstråling på lodret (på facaden)	Kun to solparametre er nødvendige, så direkte og diffus stråling kan adskilles. Bruges til beregning af forventet transmission af solvarme og lys ved en aktuel position af afskærmningen	W/m ²
$I_{h,e}$	Udvendig globalstråling på vandret		W/m ²
$I_{h,e}$	Udvendig diffus stråling på vandret		W/m ²
W_s	Vindhastighed		m/s
W_d	Vindretning		0-360°
<hr/>			
<i>Is / frost</i>	Registrerer fugt/temperatur og risiko for isdannelse	Hvis nødvendigt: Sætter Energy Frames i 'beskyttelsesmode'	0 / 1
<i>Regn</i>	Registrerer nedbør/regn	Hvis nødvendigt: Sætter Energy Frames i 'regn-mode', fx lukke for vindue/ventilationsåbning	0 / 1
<i>Prog</i>	Vejrprognose, kan være sammensat af temperatur og solprognose	Parameter for beslutning om persienne-position efter arbejdstid	

Indeklima-variabel	Forklaring	Benyttes til	Enhed
Occ	Occupancy. Tilstedeværelsesparameter, der har værdien 1, når der er personer i det aktuelle rum, og 0 når der ikke er.	Bestemmelse af om der skal reguleres i komfort-mode eller i energi-mode	0 / 1
t_i	Aktuel indetemperatur, bør om muligt være operativ temperatur ved arbejdsplads	Som ovenfor samt til at bestemme, om temperaturen er inden for toleranceområdet	°C
$E_{h,i}$	Lyssensor: Belysningsstyrke på arbejdsplan	Bestemmelse af sandsynlighed for visuel diskomfort på grund af lav belysningsstyrke på arbejdsbord, <i>VDPL</i>	lux / cd/m ²
$E_{v,eye}$	Belysningsstyrke på lodret plan ved brugerens øje. Kan omregnes fra belysningsstyrken målt på vertikalt plan foran brugeren, fx sidevæg i et kontor	Bestemmelse af sandsynlighed for visuel diskomfort på grund af blænding, <i>VDPG</i>	lux / cd/m ²
CO_2	CO_2 -sensor til måling af 'luftkvalitet'	Til at afgøre behov for ekstra (naturlig) ventilation	ppm
Set-punkter	Forklaring	Benyttes til	Enhed
$t_{i,set}$	Ønsket værdi for indetemperaturen (den operative)	At afgøre reguleringsbehov	°C
$E_{h,set}$	Ønsket belysningsstyrke i referencepunkt	At afgøre reguleringsbehov	lux
$CO_{2,set}$	Max værdi for luftens CO_2 indhold	At afgøre reguleringsbehov	ppm
Output variable	Forklaring	Benyttes til	Enhed
<i>Manual override</i>	Skal vide, om aut. styring er overstyret af bruger		0/1
<i>Override time</i>	Tidspunkt for override, går fx tilbage til Auto-mode efter 60 eller 120 min.	Skal kendes for at tilbagestille til Auto-mode	hh.mm
B_{pos}	Blind position. Afskærmningens aktuelle indstilling, det kan være nødvendigt at definere flere parametre til at beskrive indstillingen, for en persienne fx de to nedenstående.	Indgår i reguleringsenhedens 'opslagstabel' for sammenhæng mellem position og g-værdi samt LT-værdi/lysreduktion	-
a	Åbningsgrad, 0 = lukket; 1 = åben	Parametre til beskrivelse af afskærmnings position afhænger af typen. Benyttes som beskrevet ovenfor	0-1
b	Lamelhældning, -90 = lukket opad, 0=åben vandret, åben; 90 = lodret nedad		-90-90°
Win	Vindue status: Åbent eller lukket, evt. position	Nødvendig at kende ved udadgående vinduer	0/1



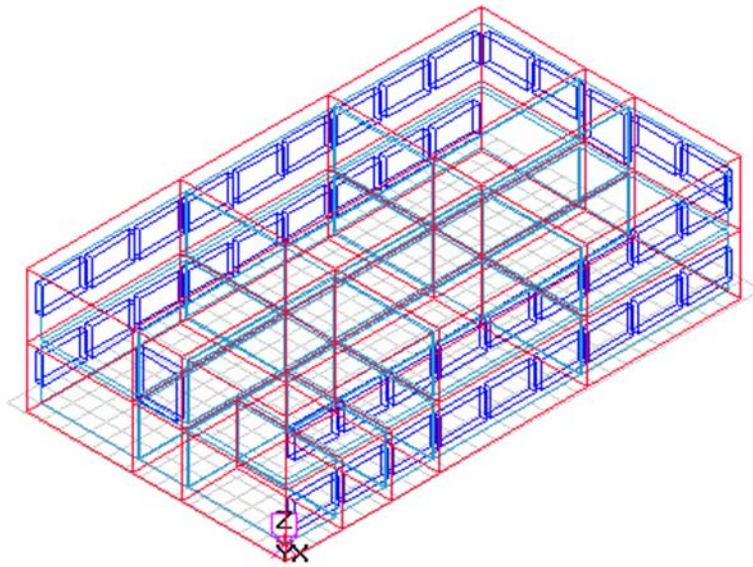
Figur 32. En enkel og intuitiv regulering er afgørende for at brugerne vil være i stand til at overstyre den automatiske regulering. Allerede tidligt i udviklingsforløbet blev der udviklet en app til smart telefoner, som gør det nemt for brugerne selv at foretage reguleringer.

Simuleringer

For at vurdere de energimæssige virkninger af Energy Frames elementerne og den tilhørende styring er der gennemført beregninger med BSim på en model af en simpel kontorbygning, som illustreret i figur 32. I bygningen indgår ingen specialfunktioner som fx køkken, kantine eller lignende, og bygningen har en isoleringsstandard, som ligger lidt under BR10-kravene. Beregningerne er foretaget med realistiske antagelser vedr. interne varmebelastninger, personlast, og frem for alt realistiske indetemperaturforhold. Variationer i de gennemregnede scenarier fremgår af tabel 7, der beskriver den trinvis justering af modellen ved ændringerne i forhold til ovenstående model.

Tabel 7. Oversigt over scenarier, der er gennemregnet med BSim. Tomme felter betyder samme forhold som ovenfor.

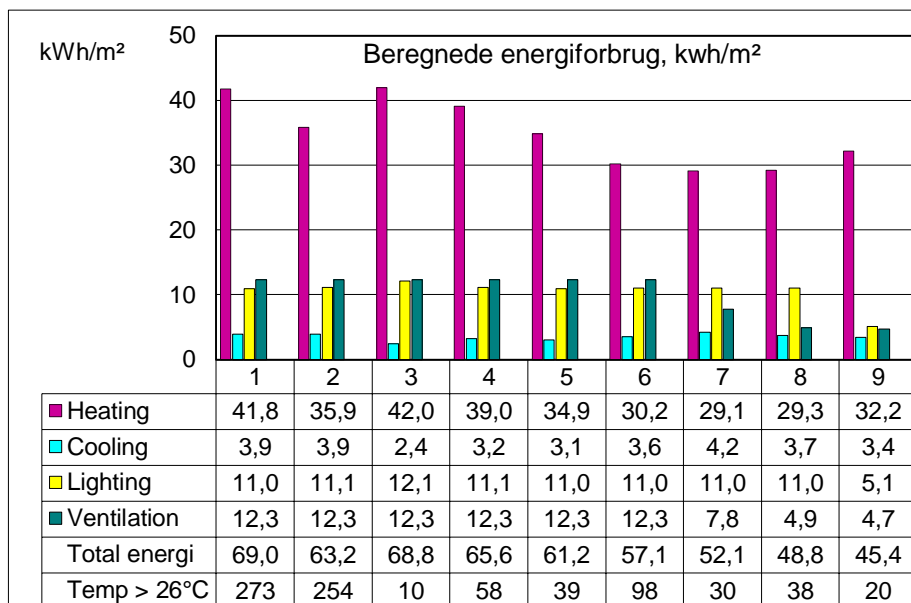
Nr.	Beskrivelse	Vinduer	Solafskærmning	Skodde	Ventilation
1	Model uden solafskærmning	2-lags energirude 1,1/63/79 U = 1,28 W/m ² K	ingen	ingen	3h ⁻¹ (0,4/0,4/1,0 m ³ /s) 21,9 /24 / 17-28 °C ma-fr: 6-16
2	Model uden solafskærmning	3-lags energirude 0,7/59/71 U = 0,98 W/m ² K	ingen	ingen	
3	Model med solafskærmende ruder	3-lags solafs. rude 0,6/24/45 U = 0,88 W/m ² K	'ingen'	ingen	
4	Model med 3-lags energiruder og solafskærmning	3-lags energirude 0,7/59/71 U = 0,98 W/m ² K	SC = 0,2 / SF4 = 0,03/ 150 - 50 W/m ² / 25°C on-off / ma-fr: 6-16	ingen	
5	Model med Energy Frames isolerende skodder og solafskærmning	2-lags energirude 1,1/63/79 U = 1,28 W/m ² K	SC = 0,2 / SF4 = 0,03/ 150 - 50 W/m ² / 25°C on-off / ma-fr: 6-16	R = 1,0 12°C okt-apr, ma-sø: 18-7	
6	Model med Energy Frames isolerende skodder og solafskærmning	3-lags energirude 0,7/59/71 U = 0,98 W/m ² K	SC = 0,2 / SF4 = 0,03/ 140 - 10 W/m ² / 25°C cont. / ma-fr: 6-16	R = 1,0 12 °C, okt-apr, ma-sø: 18-7 13C, dec-feb, lø-sø: 1-24	
7	Model med Energy Frames isolerende skodder, solafskærmning og ventilations-element	3-lags energirude 0,7/59/71 U = 0,98 W/m ² K	SC = 0,2 / SF4 = 0,03/ 140 - 10 W/m ² / 25°C cont. / ma-fr: 6-16 maj-sep, ma-fre: 1-24		VAV x3 (1-3 h ⁻¹), 21,9 /24 / 16-22 °C may-aug, ma-fr: 6-16 CAV 2h-1 sep-apr, ma-fre 6-16
8	Model med Energy Frames isolerende skodder, solafskærmning og ventilations-element				VAV x3 (1-3 h ⁻¹), 21,9 /24 / 16-22 °C may-aug, ma-fr: 6-16 CAV 2h-1 sep-apr, ma-fre 6-16 SEL 1,5 kW/m ³
9	Model med Energy Frames isolerende skodder, solafskærmning og ventilations-element 'Fremtidens belysning'				



Figur 33. Kontormodel anvendt ved simuleringer af Energy Frames elementer.

Resultater: Forskellige rudetyper

De første tre scenarier er at betragte som referencetilfælde, idet der i disse tilfælde ikke er en solafskærmning, som kan beskytte mod blænding. Resultaterne i figur 33 viser, at ved at anvende en 3-lags energirude (case 2) i stedet for en 2-lags (case 1), reduceres energiforbruget til opvarmning med ca. 14 %, svarende til et fald i det samlede energiforbrug på godt 8 %. Sidste linje i figuren viser, hvor mange timer inden for arbejdstiden indetemperaturen overskrider 26 °C. Dette tal bør ikke overskride ca. 100 timer, og det ses, at på grund af den manglende solafskærmning, overskrides grænsen meget voldsomt i de to første scenarier (mere end 250 timer i begge tilfælde). Ved anvendelse af 3-lags solafskærmende ruder med to energibelægninger overskrides 26 °C kun i 10 timer af arbejdstiden, altså en klar forbedring af det termiske indeklima. Til gengæld koster den permanente reduktion i sol- og lysindfald både på opvarmning og belysning. Den solafskærmende belægning medfører et ekstra varmekonsum på 17 % og et ekstra lysforbrug på 9 %, og det samlede energiforbrug er lige så højt som ved anvendelse af 2-lags energiruder.



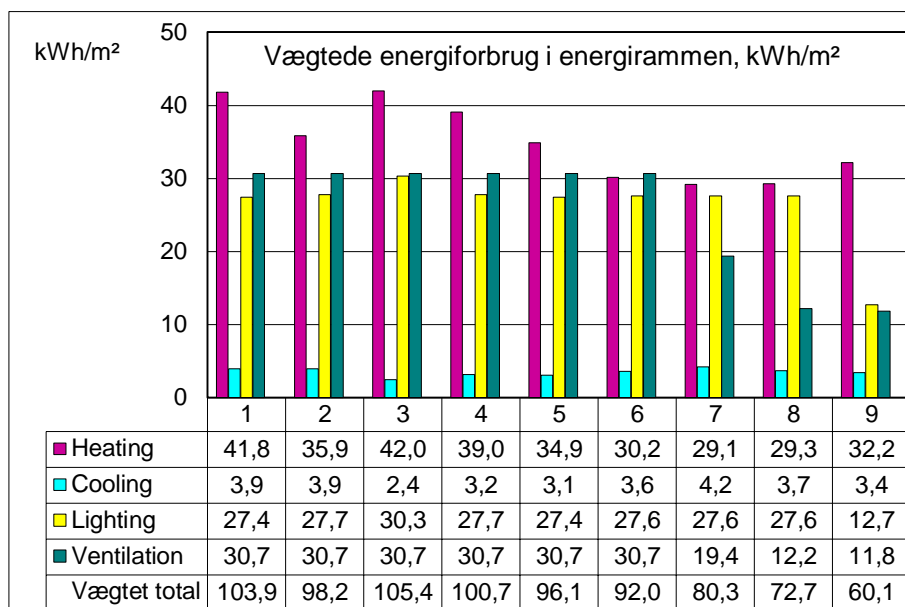
Figur 34. Beregnede energiforbrug vægtet svarende til energirammeberegningen i BR10.

Resultater: Solafskærmning og skodde

I case 4 anvendes en 'manuelt betjent' solafskærmning med få reguleringer i løbet af dagen. I forhold til case 3 med solafskærmende ruder, udnyttes den passive solvarme og lyset bedre, så energiforbrugene til opvarmning og belysning falder med henholdsvis 7 % og 8 %, og det samlede forbrug falder med knap 5 %.

I case 5 anvendes 2-lags energiruder, solafskærmning og isolerende skodde. Skodderne lukkes for i månederne oktober-april, når udetemperaturen er under 12 °C i time 19. Skodden er da lukket fra kl. 18 til kl. 7 (13 timer). Selv om der nu anvendes 2-lags ruder, reduceres energiforbrug til opvarmning med godt 10 %, svarende til en reduktion i det samlede forbrug på 6 %.

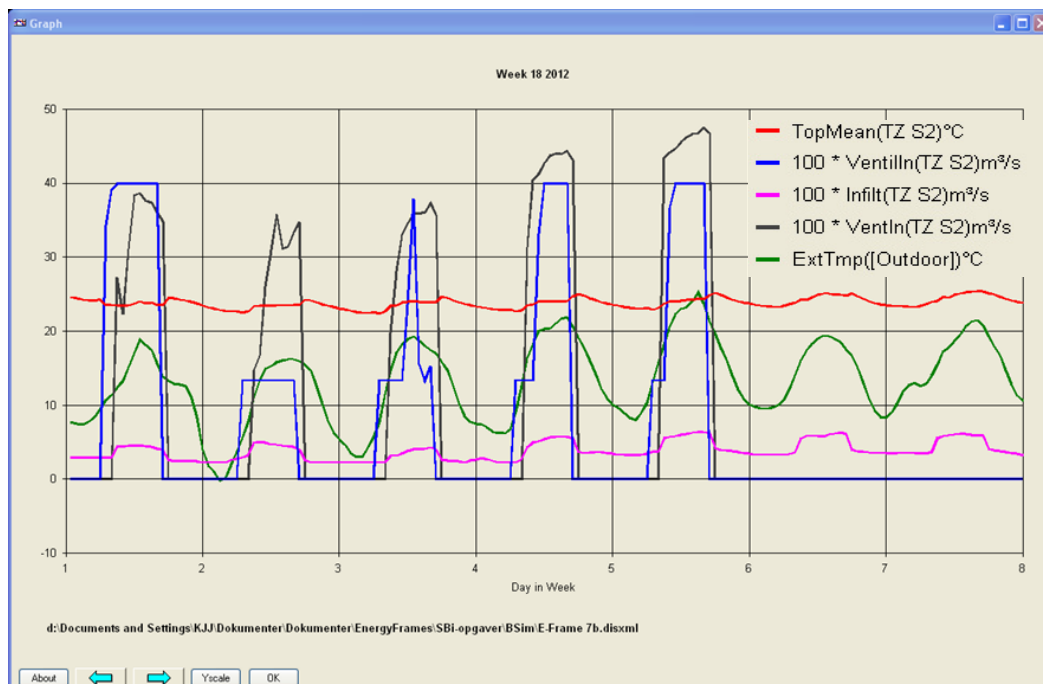
I case 6 anvendes 3-lags energiruder, og skodderne lukkes helt i vinterweekends (dec.-feb.). Desuden er reguleringen af solafskærmningen optimeret, hvilket betyder hyppigere reguleringer for at tilpasse til det aktuelle behov. Case 6 er udtryk for hvor meget energiforbruget kan reduceres ved brug af isolerende skodder kombineret med en god solafskærmning, hvor der også tages hensyn til høj udnyttelse af dagslyset. Figur 34 viser energiforbrugene, som de vægtes ved beregning af energirammen. Det ses, at ved anvendelse af den isolerende skodde, bliver de vægtede forbrug til opvarmning, belysning og ventilation omtrent lige store.



Figur 35. Beregnede energiforbrug i de 9 varianter af BSIm-modellen.

Ventilationselement

I case 7 anvendes et kombineret isolerings- og ventilationselement. I dette tilfælde forudsættes det, at en del af ventilationsbehovet fra forår til efterår kan dækkes ved naturlig ventilation i kombination med den mekaniske ventilation. Dette gælder ikke månederne dec.-feb., hvor der kun er mekanisk ventilation. Ventilationen er i højere grad behovsstyret, hvilket betyder at ventilationsluftskiftet reduceres med totalt ca. 15 % for hele året. Der er regnet med en vis (realistisk) forvarmning af luften som passerer gennem ventilationselementet. Varmeforbruget reduceres en smule, men dette vil i praksis afhænge af, i hvilken grad den naturlige ventilationsluft kan forvarmes. Derimod er der en markant reduktion i elforbruget til ventilation, som reduceres med 38 %, hvilket (sammen med de andre små ændringer) resulterer i en samlet reduktion i det vægtede energiforbrug på 13 %, jf. figur 34.



Figur 36. BSim udskrift af variationer i ventilationsbidrag i en forårsuge (uge 18) fra naturlig ventilation (Vent-In, sort kurve), mekanisk ventilation (Ventil-In, blå kurve) og infiltration (Infilt, lys rød kurve). Den røde kurve viser indetemperaturen, mens den grønne er udetemperaturen.

Figur 35 viser, hvordan luftmængderne varierer for de forskellige bidrag til ventilationen, afhængigt af udeklimaet og de skiftende belastninger i zonen. Den blå kurve viser luftmængden ved mekanisk ventilation, og det ses, at luftmængden og dermed elforbruget til ventilation i store dele af døgnet og ugen kan reduceres helt ned til 1/3, hvilket er sat som en nedre grænse (luftmængden reduceres fra den nominelle luftmængde på $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ til $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$). Den samlede ventilationsluftmængde i den viste periode er lidt større end tilfældet med ren mekanisk ventilation (case 1-6), så luftkvaliteten kan normalt antages at være lige så god. Forudsætningen for at den naturlige ventilation kan erstatte den mekaniske er dog, at den naturlige ventilationsluft kan opvarmes fra udelufttemperatur til en acceptabel indtagstemperatur. I den viste uge fra ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ til måske $16 \text{ }^\circ\text{C}$, altså max. ca. 6 grader.

Da energibesparelsen ved reduceret brug af den mekaniske ventilation især skyldes reduceret el-effekt til ventilatorerne (på grund af mindre luftmængdebehov), tæller besparelsen med en faktor 2,5 i energirammeberegningen. For det samlede energiforbrug vil det derfor have stor betydning, at den naturlige ventilation kan erstatte så stor en del som muligt af ventilationsbehovet. Ventilationselementet er altså et vigtigt led i den samlede løsning med Energy Frames.

Tilfælde 7 kan siges at repræsentere den mest energi effektive situation, der kan opnås med Energy Frames i forhold til traditionelle løsninger. Yderligere besparelser vil kunne opnås ved specialudformning af afskærmningselementet samt, ved udvikling af et mere avanceret ventilationselement samt ved en endnu mere optimeret regulering. Se mere om disse muligheder i diskussionsafsnittet nedenfor.

Andre tiltag

For at reducere energiforbruget yderligere, vil det være afgørende, at der anvendes energieffektiv belysning og ventilation (lav SEL-værdi) samtidig med at der er en effektiv styring. Disse tiltag har ikke direkte noget at gøre med Energy Frames systemet, udover at afskærmnings- og dagslyselementet i nogle tilfælde vil kunne forøge dagslysudnyttelsen i forhold til andre løsninger. Til illustration heraf viser tilfælde 8 resultatet ved ventilation med en SEL-værdi svarende til BR 2020 krav, hvorved energiforbruget til ventilation reduceres med 37 %. Desuden viser tilfælde 9, hvorledes forbruget til belysning kan reduceres, fx ved anvendelse af fremtidens LED-teknologi, hvor den installerede effekt kan ca. halveres (til 4 W/m^2), sammen med et mere effektivt regulering reduceres belysningsforbruget herved med 54 %.

Sammenfattende konklusioner

Der er foretages simuleringer på en model af en nyere kontorbygning, som energimæssigt svarer til kravene i BR 2008. Simuleringerne er foretaget ud fra realistiske forudsætninger med hensyn til brugsmønster, indetemperatur m.v., og derfor kan de beregnede del-energiforbrug i de enkelte cases forventes at svare til, hvad man ville opleve i praksis, og specielt kan *forskelle* i forbrug anses for realistiske. Ud fra simuleringer kan der drages følgende konklusioner:

Solafskærmende ruder (tilfælde 3)

Tilfældet med 3-lags solafskærmende ruder har det største energiforbrug af alle, altså større end både med en almindelig 2-lags energirude og en 3-lags energirude. Tilfældet med solafskærmende ruder opnår de færreste timer over 26 °C, men ruderne yder ikke tilstrækkelig beskyttelse mod blænding og vil i praksis skulle suppleres med anden afskærmning, hvorved energiforbruget vil øges yderligere (opvarmning og lys).

Energy Frames eller 3-lags solafskærmende ruder? (tilfælde 6 mod 3)

I forhold til tilfældet med solafskærmende 3-lags energiruder vil Energy Frames

reducere varmekonsumet med 31 %

lyskonsumet med 9 % og

ventilationskonsumet med 37 %

Energy Frames eller 3-lags energiruder med god udvendig afskærmning (tilfælde 6 mod 4)

I forhold til tilfældet med 3-lags energiruder og en god solafskærmning, fx en udvendig persienne, vil Energy Frames

reducere i varmekonsumet med 23 %

Energy Frames foran eksisterende 2-lags rude eller ny 3-lags rude? (tilfælde 5 mod 4)

Ved valget mellem at skifte vinduerne til 3-lags energiruder eller at montere Energy Frames foran eksisterende 2-lags ruder, vil Energy Frames medføre

et varmekonsum, der er 11 % lavere end hvad der kan opnås med 3-lags energiruder

Energy Frames ventilationselement eller 3-lags energiruder med god udvendig afskærmning (tilfælde 7 mod 4)

Ved kombination af alle tre funktionerne som ekstraisolering, solafskærmning og ventilation (forvarmning af luft) vil Energy Frames

give en samlet reduktion på 20 % i det vægtede energiforbrug (energirammen) sammenlignet med dagens bedste standard (3-lags energirude og god udvendig afskærmning).

Den store reduktion i energiforbrug til ventilation opnås ved at reducerede luftmængden i den mekaniske ventilation og i størstedelen af tiden at erstatte denne med naturlig ventilation. Samlet set er luftmængden kun reduceret med ca. 15 %, men el-besparelsen til ventilation er på hele 37 %. Forudsætningen for dette er, at der kan ske en vis forvarmning af ventilationsluften i ventilationselementet (en forøgelse af udeluftens temperatur med op til ca. 6 °C).

Simuleringerne har ikke kunnet angive reduktioner i elforbrug til belysning (bortset fra sammenligningen med 3-lags solafskærmende ruder), da der i de alternative tilfælde også er regnet med en god solafskærmning. I praksis vil Energy Frames kunne forbedre dagslysudnyttelsen og nedsætte elforbruget til belysning i forhold til traditionelle løsninger, fordi afskærmningen i modsætning til de fleste andre kan trækkes helt bort fra vinduet. Mulighederne er nærmere uddybet i diskussionsafsnittet nedenfor.

Diskussion

Passiv solvarmeudnyttelse og varmekonsum

Når man beskriver varmebalancen for et vindue, benytter man en simpel beregningsmetode, hvor man trækker den udnyttede del af solvarmetilskuddet fra et fiktivt beregnet varmetransmissionstab i fyringssæsonen. Beregningen er baseret på månedsmiddelværdier af udetemperatur og solindfald, og varmetilskud og transmissionstab er beregnet for et simpelt enfamiliehus med en given fordeling af vinduerne i forhold til verdenshjørnerne. For større bygninger med store glaspartier vil varmebalancen være helt anderledes, og en facade med Energy Frames vil kunne gøres langt mere energieffektiv end en passiv facade. Facadens egenskaber kan tilpasses det øjeblikkelige behov med hensyn til at begrænse varmetabet eller øge varmetilskuddet og dagslysudnyttelsen, så energiforbruget til opvarmning, ventilation og belysning reduceres, og samtidig vil en god regulering reducere solvarmebelastningen om sommeren. Det betyder i praksis, at både fyringssæsonen og kølesæsonen bliver kortere med Energy Frames, samtidig med at komforten kan optimeres langt bedre.

Ventilationselement og reduktion i elforbrug til ventilation

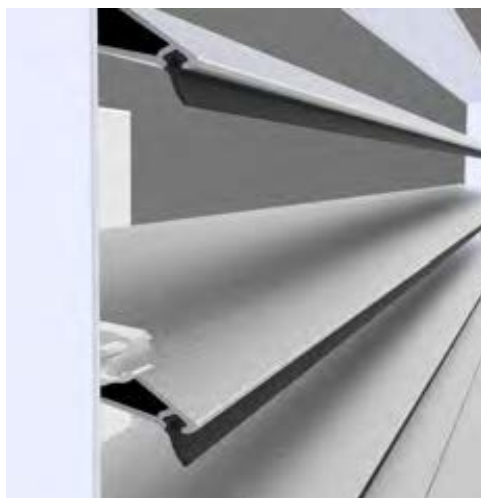
Beregningen af energibesparelsen ved anvendelse af ventilationselementet er baseret på en forudsætning om, at en del af den mekaniske ventilation kan erstattes af naturlig ventilation. Denne forudsætning kan opfyldes både med Energy Frames og med andre facadeløsninger i de 4-5 varmeste måneder af året, og på tidspunkter hvor udetemperaturen er så høj, at den ikke føles som træk i luftindtaget ved naturlig ventilation. Med Energy Frames skønnes det, at den tid af året, hvor naturlig ventilation vil fungere, kan udvides til 7-8 måneder, altså ca. 3 måneder ekstra. Forudsætningen for dette er, at udeluften kan forvarmes 3-6 °C via ventilationselementet, inden den føres ind i rummet. Hvor meget perioden med naturlig ventilation kan forlænges afhænger af, hvordan forvarmningen sker, og om der kan etableres en vis varmeakkumulering og dermed tidsforskydning af udnyttet solvarme.

Dagslysudnyttelse og elforbrug til belysning

En bedre udnyttelse af dagslys vil kunne opnås, hvis lamelafskærmningen i Energy Frames udføres sådan, at fx den øverste tredjedel af lamellerne kan justeres individuelt i forhold til de øvrige. Specielt i forbindelse med lavtstående sol (vinterhalvåret eller mod øst og vest) vil det være muligt at tillade mere dagslys at passere samtidig med, at der skærmes af for blænding. Dette vil også medføre en reduktion i varmekonsumet i perioder af opvarmningssæsonen, hvor direkte solindfald giver gener.

Reguleringsfunktionen betydning for energireduktionen

Resultaterne af de foretagne simuleringer forudsætter, at elementerne reguleres efter det aktuelle behov. Der er ikke tale om en superoptimeret regulering, hvor elementerne justeres time for time, men en realistisk regulering, hvor reguleringen kan tage hensyn til årstid, tid på døgnet, aktuell indetemperatur og udetemperatur samt solindfald på bygningens facader. Der er altså tale om en realistisk regulering, hvor der også er plads til, at brugerne en gang imellem vil overstyre den automatiske regulering. Men det er vigtigt at understrege, at en god regulering er absolut nødvendig for at de beregnede besparelser kan realiseres.



Demonstrationsprojekter

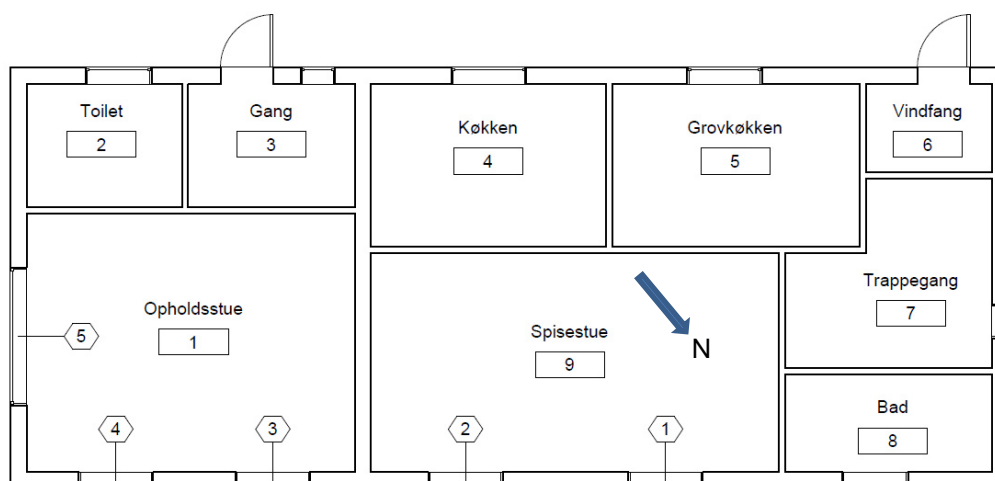
Forskellige typer af Energy Frames elementer har været afprøvet siden starten af 2014. Inden for nærværende projekt har der kun været foretaget målinger på et enkelt projekt, et ældre enfamiliehus i Nibe. I det følgende gives en kort beskrivelse af projektet, de gennemførte indeklima- og energimålinger samt brugernes anvendelse af Energy Frames elementerne. Sidst i kapitlet gives en kort introduktion til to andre demonstrationsprojekter, hvor resultater af målinger og brugervurderinger endnu ikke er bearbejdet.

Enfamiliehus i Nibe

Det første sted det isolerende Energy Frames element blev afprøvet var på et enfamiliehus i Nibe. Huset er beliggende på Hobrovej ved Nibe. Det er opført i 1973 og har et grundplanareal på 131 m², se figur 36 og figur 37. Projektet kan således betragtes som en afprøvning af Energy Frames i renoveringssammenhæng, hvilket betragtes som et væsentligt markedspotentiale for elementerne. Der er opsat isolerende Energy Frames elementer på fem af vinduerne, inklusive et dobbelt dørparti. Elementerne er opsat på vinduerne markeret med tallene 1-5 på figur 37, dvs. henholdsvis nordøst-facaden og sydøst-gavlen.



Figur 37. Fotos af enfamiliehuset i Nibe. Der er tale om et hus i 1½ plan fra 1973 med et grundplanareal på 131 m² og et samlet boligareal på 220 m².



Figur 38. Plan af stueetagen i enfamiliehuset. Der blev monteret isolerende Energy Frames elementer i stueetagen på nordøst-facaden og på sydøst-gavlen, på vinduerne nummereret fra 1 til 5.

Alle undersøgelserne i huset er gennemført som led i et masterprojekt gennemført ved Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet (Kim Jønsson og Mikkel Vindelev: *Dynamiske facader, Energimæssigt potentiale af Energy Frames*, 1.9.2013 til 16.6.2014). Masterprojektet bestod dels af en praktisk del, målinger og registreringer i huset, og dels en teoretisk del, simuleringer og teoretiske analyser af elementernes funktion, inklusive forskellige reguleringsstrategier. Formålet med projektet var

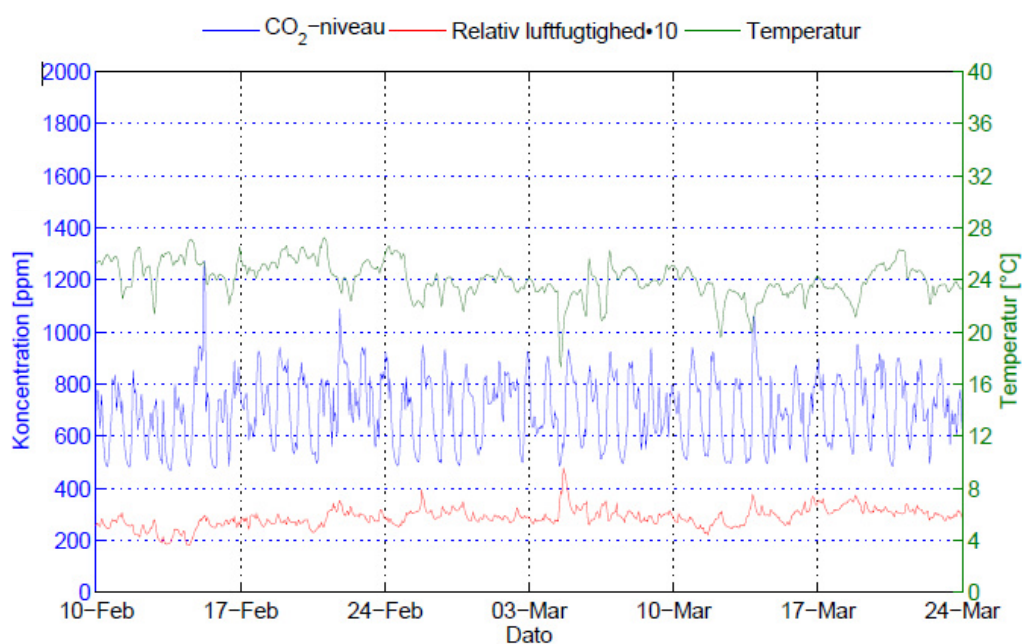
- at kortlægge, hvordan elementerne blev brugt i praksis
- at kortlægge brugernes adfærd i forhold til anvendelse af de isolerende elementer
- at måle og beregne mulige energibesparelser ved anvendelse af Energy Frames
- at måle indeklimaforhold ved anvendelse af Energy Frames

Indeklima uden Energy Frames

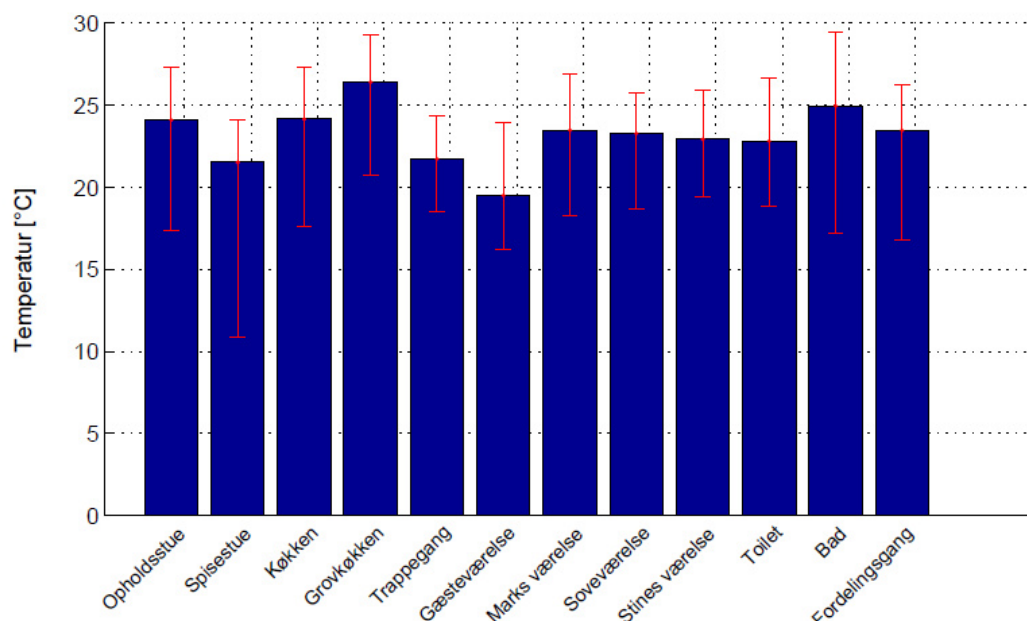
Målinger foretages i alle rum i stueetagen, undtagen gang og vindfang. Tabel 8 viser måleparametrene i disse rum, mens Figur 38 viser resultater af målinger i stuen for perioden 10. februar - 24. marts 2014. Det ses, at temperaturen holdes ret højt i denne vinterperiode, med en gennemsnitsværdi omkring 24 °C. Figur 39 viser, at temperaturerne i alle huset rum generelt ligger ret højt.

Tabel 8. Oversigt over indeklimamålinger i stueetagen i enfamiliehuset.

Rum nr.	Rum navn	Temperatur	Relativ luftfugtighed	CO ₂ -niveau
1	Opholdsstue	x	x	x
2	Toilet	x	x	
3	Gang			
4	Køkken	x	x	x
5	Grovkøkken	x	x	x
6	Vindfang			
7	Trappegang	x	x	x
8	Bad	x	x	
9	Spisestue	x	x	x



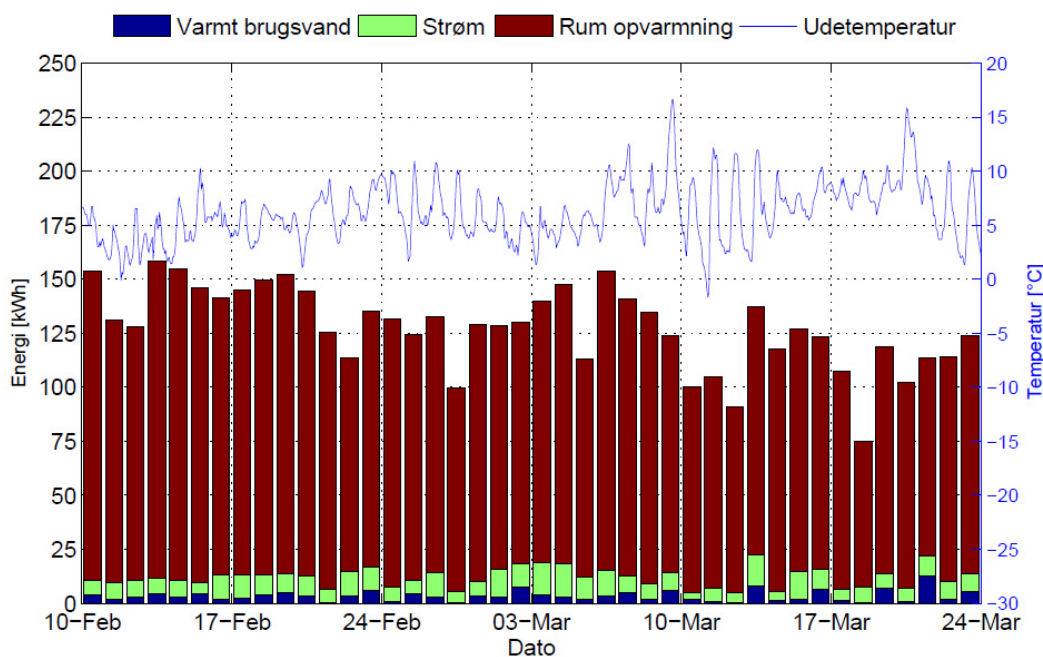
Figur 39. Målinger af indetemperatur, CO₂ og relativ fugtighed i opholdsstuen i perioden 10. februar – 24. marts 2014, før montering af Energy Frames. For hele perioden ligger gennemsnitstemperaturen omkring 24 °C. Figur 39 viser, at temperaturerne i alle huset rum generelt ligger ret højt. Udetemperaturen lå i perioden mellem 2 og ca. 10 °C, med en midelværdi på ca. 6 °C, se figur 40.



Figur 40. Temperaturmålinger i enfamiliehuset i perioden den 10. februar – 24. marts 2014. Søjlerne angiver middelværdien for perioden, mens maksimum og minimum angives ved de røde streger. Middelttemperaturen i de fleste opholdsrum ligger mellem 23 og 24 °C, mens den er 26,7 i grovkøkken (fyrrum) og 25,0 i badeværelset. Udetemperaturen lå i perioden mellem 2 og 10 °C, med en middelværdi på ca. 6 °C.

Energimålinger uden Energy Frames

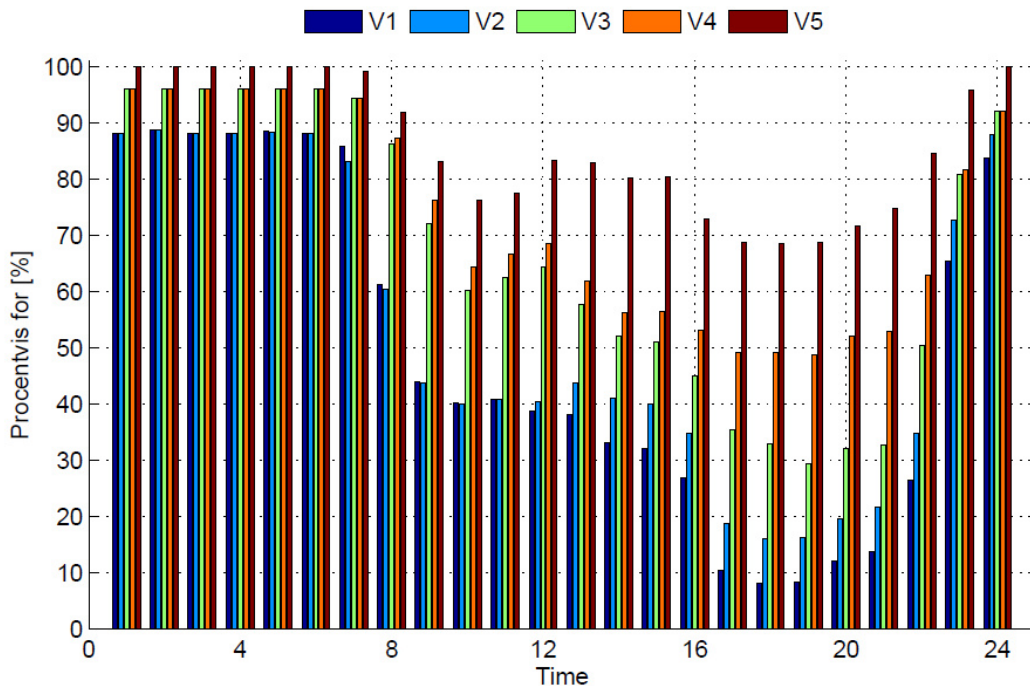
I hele måleperioden blev energiforbruget registreret, opdelt på opvarmning, varmt brugsvand og elektricitet. Målingerne viser, at opvarmningsforbruget er kraftigt dominerende, se figur 40, og forbrugstallene viser at forbruget falder med stigende udetemperatur, ligesom der kan iagttages den klare sammenhæng at varmekonsumet falder på solrige dage, se specielt perioden 10. – 17. marts, hvor den svingende udetemperatur indikerer klar himmel med en del sol.



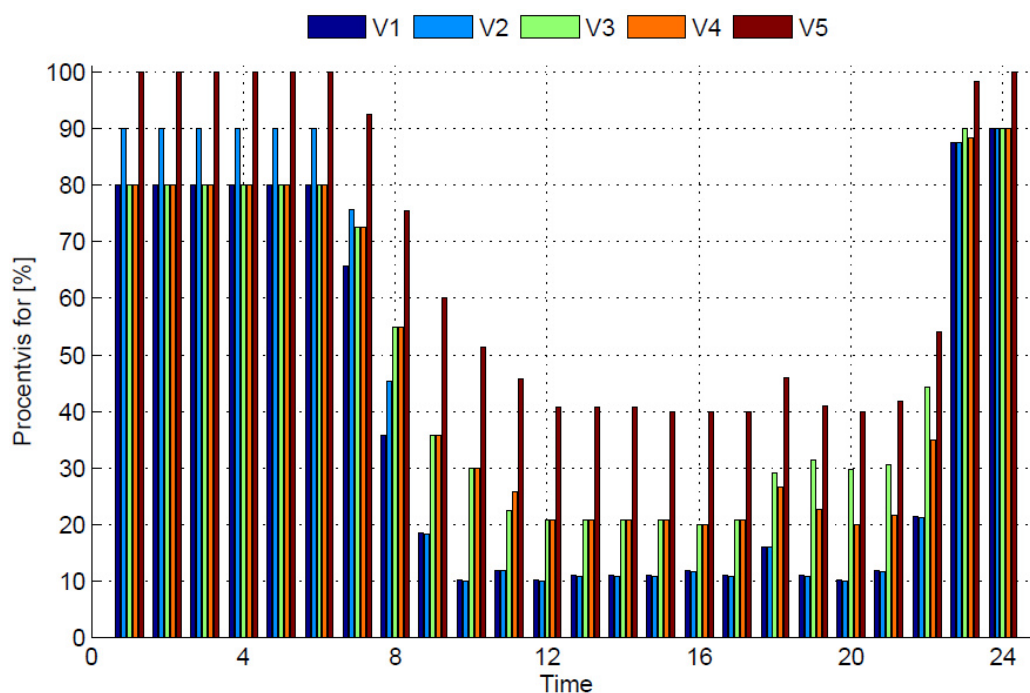
Figur 41. Energiforbrug målt i den milde vinterperiode 10. februar – 24. marts 2014. Forbruget til opvarmning er kraftigt dominerende, for perioden udgør det 4973 kWh (90,8 %), mens forbruget til varmt brugsvand er 145 kWh (2,6 %) og forbruget af elektricitet er 361 kWh (6,6 %), i alt 5479 kWh for perioden.

Anvendelsen af Energy Frames

I starten af april blev der monteret Energy Frames elementer på fire af vinduerne på nordøst-facaden (V1 – V4) og på dørpartiet i sydøst-gavlen (V5). For at kortlægge anvendelsen af Energy Frames, blev rammernes placering registreret igennem hele måleperioden, 21. april - 26. maj (fem uger). Eksempler på disse registreringer er vist i figur 41, der viser den procentvise lukningsgrad på hverdage, og figur 42 der viser den procentvise lukningsgrad i weekender. Farverne angiver de fem vinduer med Energy Frames V1 - V5, og graferne viser, at alle skodderne stort set er trukket for i tidsrummet kl. 23 - 7. Det er særlig bemærkelsesværdigt, at skodden på dørpartiet i stuen altid er trukket for i dette tidsrum, men også en meget stor del af dagtimerne. Der ses en tydelig forskel i anvendelsen af Energy Frames i dagtimerne på hverdage og i weekender: På hverdage er skodderne kørt for i mellem 40 og 80 % af tiden, mens de kun er kørt for i 20 % af tiden i weekender.



Figur 42. Procentvis lukningsgrad af de fem Energy Frames på hverdage i perioden 21. april – 26. maj 2014.



Figur 43. Procentvis lukningsgrad af de fem Energy Frames i weekender i perioden 21. april – 26. maj 2014.

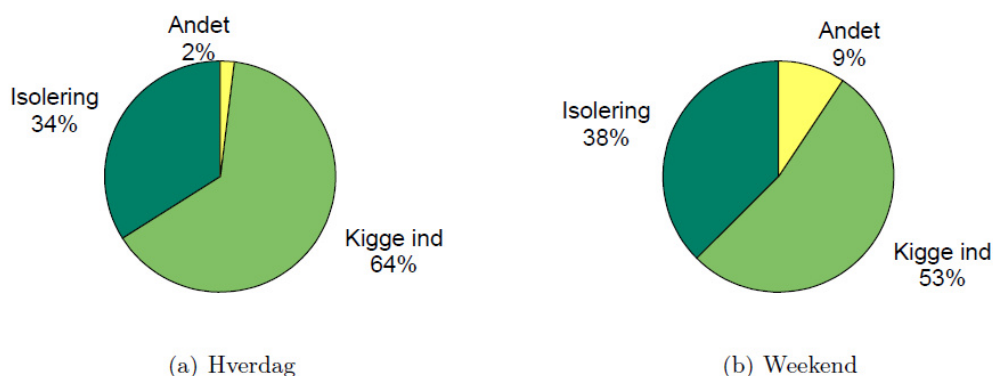
Brugerens motiver for at køre Energy Frames for eller fra

Styringen af de fem isolerende skodder foregår manuelt, men er motordrevet. For at af-dække, hvorfor beboerne kører skodderne for eller fra, blev de bedt om at udfylde et afkrydsningsskema, hver gang de aktiverede skodderne. For at gøre det meget enkelt, var der kun givet få svarmuligheder, som vist i tabel 9.

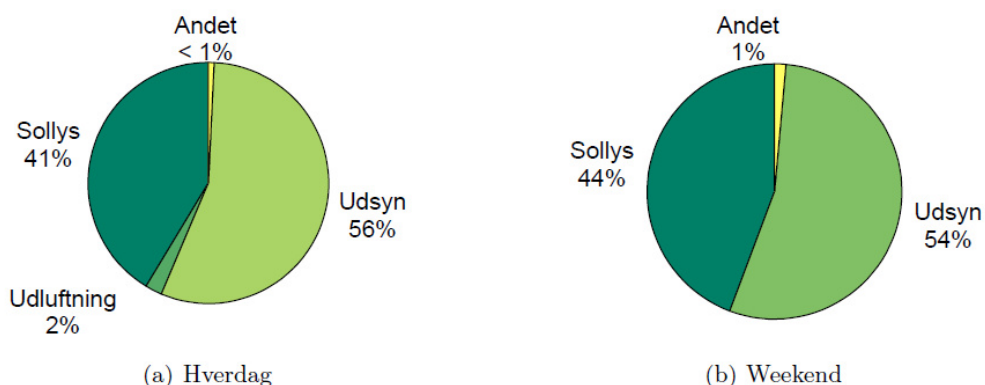
Tabel 9. Afkrydsningsskema for registrering af årsager til regulering af de isolerende Energy Frames.

Køre skodde for	Køre skodde fra
Dagslys	Dagslys
Isolering	Solvarme
Kigge ind	Udluftning
Andet	Udsyn
	Andet

Beboernes begrundelse for at køre skodderne for vinduerne eller køre dem fra fremgår af figur 43 og figur 44, der viser disse begrundelser for hverdage, henholdsvis weekends. Beboernes svar viser, at den væsentligste årsag til, at de kørte skodderne for vinduerne var, at de ville beskytte sig mod generende indblik, eller med andre ord ønskede mere privathed.



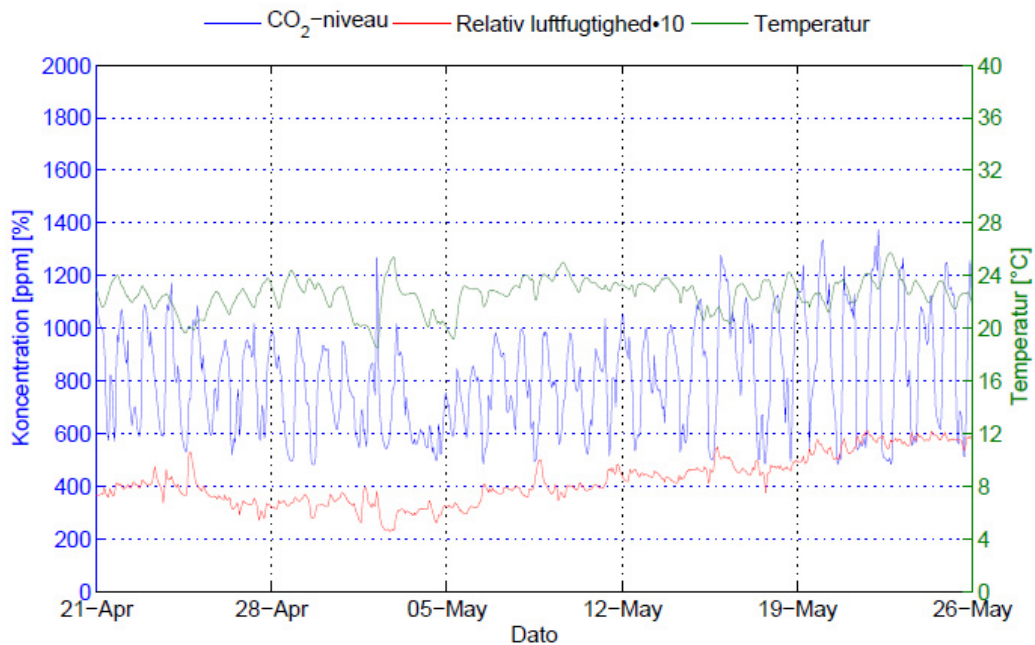
Figur 44. Beboernes begrundelse for at køre skodderne for på hverdage og i weekends. Selvom hovedideen i projektet var at skodderne skulle lukkes for at spare energi, er den væsentligste årsag i dette tilfælde, at man ønsker at beskytte sig mod generende indkig.



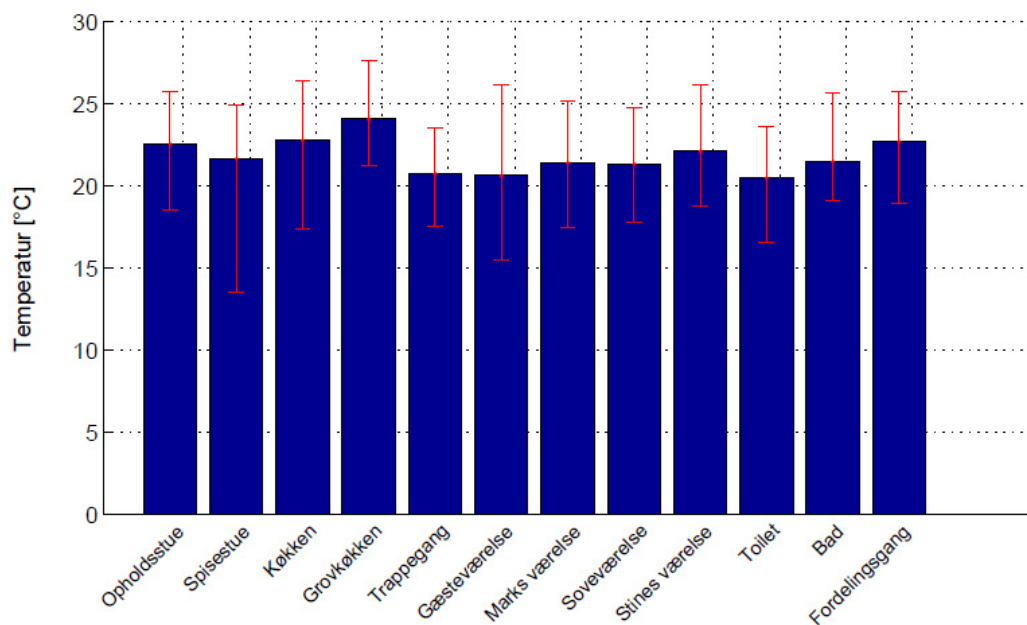
Figur 45. Beboernes begrundelse for at køre skodderne fra på hverdage og i weekends. Den væsentligste grund til at køre skodderne fra, er at beboerne ønsker at kunne se ud, men næsten lige så vigtigt er det, at de ønsker at lukke (sol-)lys ind.

Indeklimamålinger med Energy Frames

Efter at der var monteret Energy Frames på de fem vinduer, blev der registreret de samme indeklimaparametre, som før de var monteret, jf. tabel 8. Måleresultaterne for temperatur, CO₂ og relativ fugtighed i stuen i perioden 21.4.2014 - 26.5.2014 er vist i figur 45. Figur 46 viser middel-, maksimum- og minimum temperaturerne i forsøgsperioden i alle boligens rum. Generelt ligger middeltemperaturen i rummene 1 – 1½ grad lavere end i perioden før de isolerende skodder blev monteret.



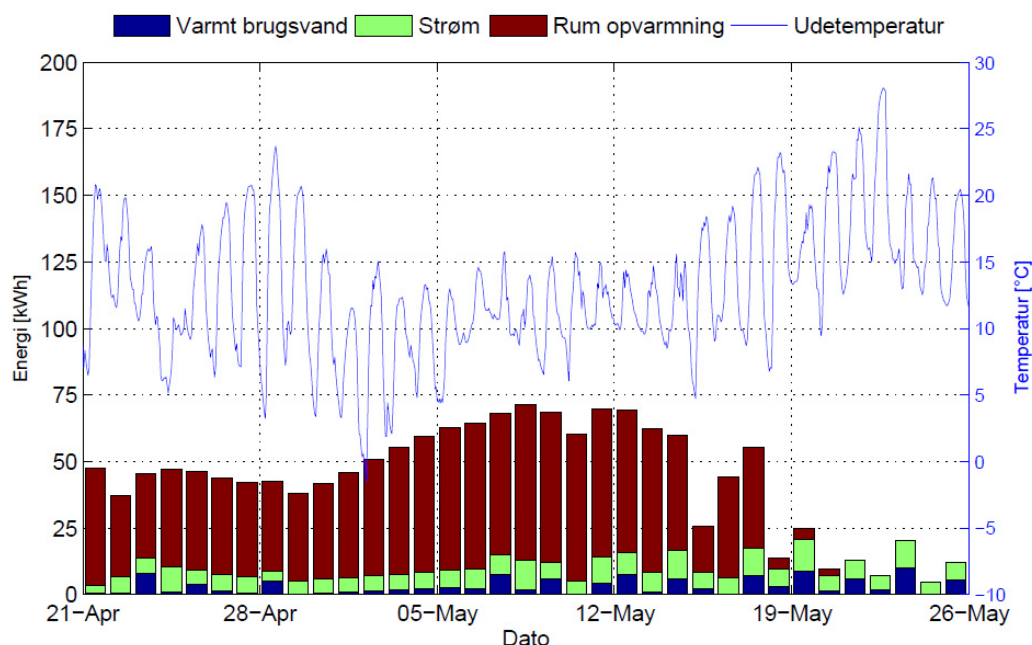
Figur 46. Målinger af indetemperatur, CO₂ og relativ fugtighed i opholdsstuen i perioden 21.4.2014 - 26.5.2014, efter montering af Energy Frames. For hele perioden ligger gennemsnitstemperaturen omkring 23 °C. Figur 46 viser, at temperaturerne i alle huset rum generelt ligger lidt lavere end i perioden før monteringen af de isolerende skodder. Udetemperaturen svingede kraftigt i perioden, med en middelværdi på ca. 14 °C, se figur 47, dvs. den lå betydeligt højere end i den første periode.



Figur 47. Temperaturmålinger i enfamiliehuset i perioden den 21.4.2014 - 26.5.2014. Søjlerne an giver middelværdien for perioden, mens maksimum og minimum angives ved de røde streger. Middeltemperaturen i de fleste opholdsrum ligger mellem 21,0 og 22,5 °C, mens den er 24,3 i grovkøkken (fyrrium) og 22,0 i badeværelset. Udetemperaturen svingede kraftigt i perioden, med en middelværdi på ca. 14 °C, se figur 47, dvs. den lå betydeligt højere end i den første periode.

Energimålinger med Energy Frames

Energiregistreringerne viser som ventet, at opvarmningsforbruget er væsentligt lavere i denne periode, hvor middeldifferensen mellem inde- og udetemperatur lå på ca. 7 °C imod ca. 17 °C i den første. Figur 47 viser energiforbrugene døgn for døgn i hele måleperioden med isolerende Energy Frames. Figuren viser at der har været lukket for rumopvarmningen i de sidste fire dage af perioden.



Figur 48. Energiforbrug målt i den milde vinterperiode 21.4.2014 - 26.5.2014. Forbruget til opvarmning er dominerende, men betydeligt lavere end i den første periode. For perioden udgør det 1176 kWh (74,0%), mens forbruget til varmt brugsvand er 137 kWh (8,6%) og forbruget af elektricitet er 277 kWh (17,4%), i alt 1589 kWh for perioden.

Energibesparelspotentiale med isolerende Energy Frames

De foretagne målinger af energiforbrug og indeklimaforhold er ikke tilstrækkelige til at kunne beregne, hvor meget energiforbruget til opvarmning kan reduceres ved at bruge de isolerende elementer. De to perioder er for korte (henholdsvis 6 og 5 uger), og udetemperaturen for forskellig i disse to perioder (middeltemperatur omkring 6 °C, henholdsvis 14 °C). Dertil kommer, at Energy Frames elementerne kun er monteret på 5 af husets vinduer, eller på ca. 1/3 af det totale vinduesareal. Tabel 10 viser det specifikke varmetab for alle dele af husets klimaskærm før montering af de fem Energy Frames elementer. Tabellen viser, at Energy Frames elementerne kun reducerer det samlede specifikke varmetab med 5 %.

Tabel 10. Konstruktioner, U-værdier og specifikke varmetab for de enkelte dele af husets klimaskærm.

Konstruktion	Areal, m ²	U-værdi, W/m ² K	Specifik Varmetab, W/K
Væg	114,44	0,43	49,21
Gulv	127,28	0,44	56,00
Tag	130,88	0,41	53,66
Vinduer	33,62	2,60	87,41
I alt	406,22		246,28
Forskel i vinduer med isolerende EF	11,43	-1,08	-12,34
Reduktion i forhold til total			5,0 %

En reduktion i det specifikke varmetab på 5 % lyder ikke af meget, men med kendskab til beboernes brug af Energy Frames og indetemperaturen i boligens rum, kan besparelsen i energi og i kroner beregnes. Antages en gennemsnitlig indetemperatur på 23 °C, vil der

være ca. 4.900 graddage eller 117.600 gradtimer. Hvis det antages at Energy Frames elementer er kørt for i alle timer, hvor der er (netto-)transmissionstab, er reduktionen i energibehovet:

$$Q_{bespar} = \frac{12,3 \cdot 117.600}{1000} = 1.446 \text{ kWh/år}$$

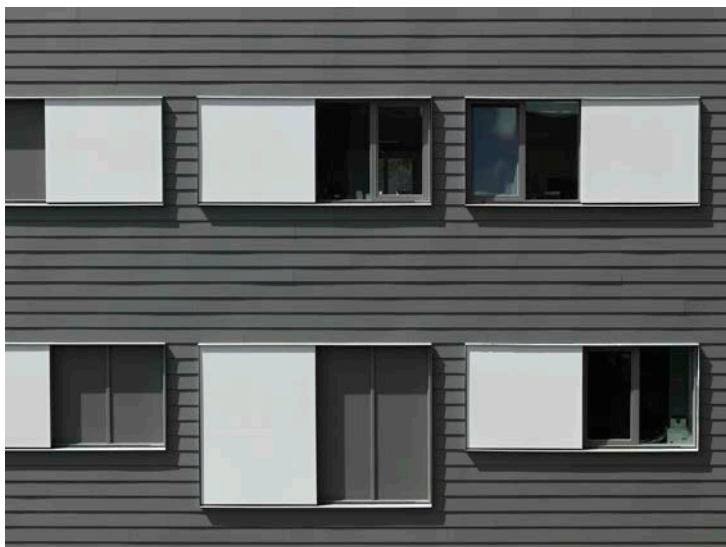
Enfamiliehuset opvarmes via et ældre oliefyr, og hvis der antages en virkningsgrad på 85 % samt en pris på fyringsolie på 1.100 kr. pr. 1.000 liter, og en brændværdi på 10 kWh/l, kan den økonomiske besparelse beregnes som:

$$\emptyset_{bespar} = \frac{1.446 \cdot 11}{0,85 \cdot 10} = 1.871 \text{ kr./år}$$

De beregnede potentielle besparelser er ikke realistiske i praksis, idet det må forventes, at Energy Frames rammerne er kørt fra i en del timer af dagen, hvor der er en negativ varmetransmission, fordi varmetransmissionen ud gennem vinduerne overstiger solvarmetilførslen ind gennem vinduerne. I det konkrete tilfælde kan det skønnes at en realistisk besparelse vil være ca. 80 % af ovenstående, svarende til 1150 kWh/år eller ca. 1500 kr./år.

Pavillonbygning ved Rigshospitalet, København

På en 6-etagers præfabrikeret pavillonbygning ved Rigshospitalet er der i foråret 2014 opsat 128 Energy Frames tekstilrammer med en hvid screendug. Rummene der er solafskærmet rækker lige fra patientstuer over kontorer til venterum, samtalerum og lagre. Der er flere rum af hver type.

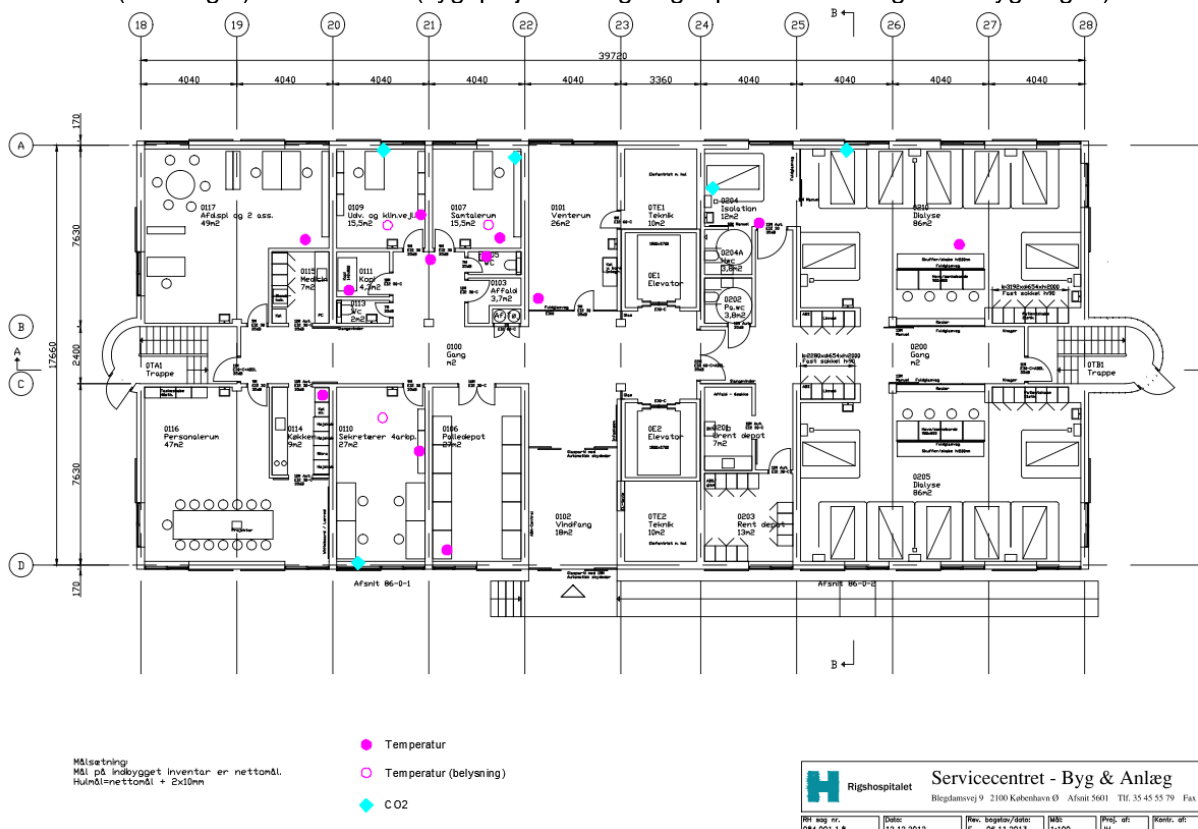


Figur 49. Foto af udsnit af facaden på pavillonbygningen på Rigshospitalet.

Løsningen består af motordrevne tekstilrammer med lokal betjening, og er således ikke koblet op til et CTS system. Da det hurtigt viste sig, at den hvide type screendug ikke afskærmede tilstrækkeligt og kunne medføre blænding ved direkte solskin, blev det i efteråret 2014 besluttet at skifte til en mørkeblå screendug på to af facaderne.

Målinger og spørgeskemaundersøgelse

Der gennemføres målinger i udvalgte rum på to afdelinger i bygninger. Figur 48 viser en oversigt over indeklimaparametre og målepunkter. Der udsendes elektronisk spørgeskema (se Bilag 1) til alle ansatte (sygeplejersker og læger på to af afdelingerne i bygningen).



Figur 50. Indeklimaparametre og målepunkter på en af afdelingerne i Rigshospitalets pavillonbygning.

GreenTech Center Vejle

På Green Tech Lab-bygningen i Green Tech Center Vejle er der i efteråret 2014 monteret 20 Energy Frames elementer. Green Tech Lab er et 1.200 m² stort laboratorium som rummer undervisningsfaciliteter, værksted, iværksætterlokaler samt et smart grid kontrolrum som samler alle energidata fra energiparken. Labbet er tænkt til energiparkens udstillere, iværksættere samt forskning og undervisning for at teste og demonstrere energiløsninger i teori og praktik. Herudover rummer labbet også et 150 m² stort test lejlighed hvor de nyeste smart grid produkter og løsninger udstilles og bruges til præsentationer og undervisning. Se mere information på: <http://www.greentechcenter.dk/dk.aspx> . Målinger og spørgeskemaundersøgelserne var endnu ikke påbegyndt ved dette projekts afslutning.



Figur 51. Arkitektens visualisering af Green Tech Lab bygningen i Green Tech Center Vejle.



Figur 52. Fotos af sydvestfacaden i Green Tech Lab bygningen kort efter den officielle indvielse i oktober 2014. Til højre set indefra et af lab-kontorerne i stueetagen med Energy Frames elementet kørt halvt for vinduet.

Bilag 1: Spørgeskema til brugeranalyse

Introduktion

Dette spørgeskema indgår som led i en større forskningsundersøgelse vedrørende vinduer og facader i bygninger, der gennemføres af Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Aalborg Universitet København.

Målet med forskningsprojektet er bl.a. at indsamle erfaringer med anvendelse af såkaldte dynamiske facader, hvor facaden kan tilpasse sig skiftende behov hen over dagen og året.

Undersøgelsen omhandler Pavillonbygningen (indgang 86) på Rigshospitalet. Den gennemføres ikke, fordi der er konstateret problemer med den hvide screendug, som anvendes i solafskærmningen, men spørgeskemabesvarelserne vil naturligvis være med til at afdække problemerne.

Instruktion

Du bedes besvare spørgsmålene ud fra forholdene i det rum, du opholder dig mest i i løbet af en typisk arbejdsdag. Hvis der ikke er ét rum, hvor du opholder dig mere i end andre, bedes du vælge et rum, som du typisk opholder dig en del i, og hvis forhold du kender godt. I spørgsmålene refereres der til dette rum som 'arbejdsrummet'.

Du bedes venligst besvare de stillede spørgsmål ud fra dine egne vurderinger. Det vil tage ca. 15 minutter at udfylde skemaet. Svarene vil blive behandlet fortroligt og anonymt, således at kun forskerne ved SBI kan identificere sammenhæng mellem din placering i bygningen og dine svar.

Hvis du har spørgsmål i forbindelse med undersøgelsen kontakt da venligst

Kjeld Johnsen
Statens Byggeforskningsinstitut,
Aalborg Universitet
E-mail: kjj@sbi.aau.dk

På forhånd tak for hjælpen!

Del 1: Generelt om dit arbejdsrum

I denne del af spørgeskemaet bliver du spurgt om, hvordan du bruger arbejdsrummet, og hvordan du oplever det generelt.

Hvilken type rum er det arbejdsrum, som du har valgt som grundlag for besvarelsen?

- Kontor
- Sengestue
- Andet _____

Hvor mange dage om ugen er du normalt på arbejdsrummet?

Dage

Hvor længe opholder du dig i arbejdsrummet på en normal arbejdsdag?

Timer

Evt. kommentar

Deler du kontor med andre?

- Ja
- Nej

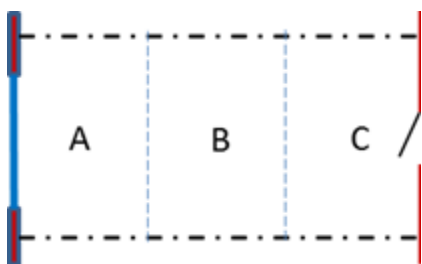
Kontoret er indrettet til i alt

antal personer:

I hvilket af de tre områder vist på figuren opholder du dig, når du sidder og arbejder?

A er nærmest vinduet, B er området mellem vindue og dør, og C er nærmest døren.

- A
- B
- C
- Andet _____



På hvilken etage ligger arbejdsrummet?

- Stueetagen
- Første sal
- Anden sal
- Tredje sal
- Fjerde sal
- Femte sal

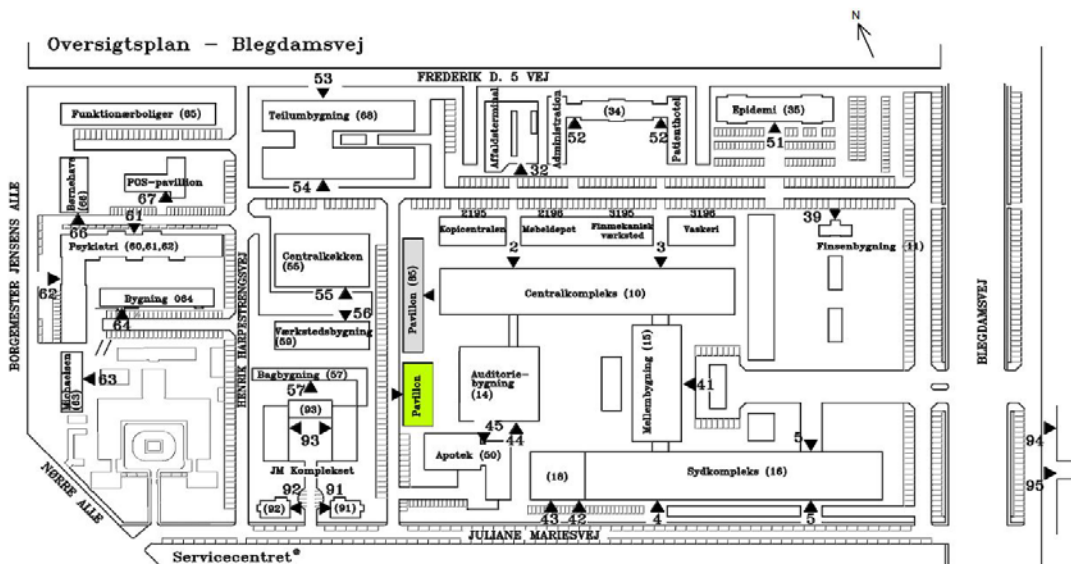
Hvilken vej vender vinduet/vinduerne i dit arbejdsrum?

Tegningen kan tages til hjælp.

Hvis rummet ligger i et hjørne, afkryds da de to retninger vinduerne vender mod.

- NØ - Mod Frederik d. 5. Vej og Fælledparken
- SØ - Mod Blegdamsvej/centrum
- SV - Mod Panum, Juliane Mariesvej og Tagensvej
- NV - Mod Borgmester Jensens Allé/bort fra centrum
- Ved ikke

Benyt pilen under tegningen for at komme videre i spørgeskemaet.



Angiv hvor tilfreds du er med indretningen af dit arbejdsrum.

	Meget utilfreds	Utilfreds	Hverken tilfreds eller utilfreds	Tilfreds	Meget tilfreds
Dit arbejdsrum generelt	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Pladsforhold	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Farver på vægge og loft	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Møbler	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Privathed i arbejdsrummet	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Evt. kommentar					

Angiv hvor tilfreds du er med følgende indeklimaforhold i dit arbejdsrum.

	Meget utilfreds	Utilfreds	Hverken tilfreds eller utilfreds	Tilfreds	Meget tilfreds
Temperaturforhold	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Træk	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Luftkvalitet	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Forhold vedrørende støv og snavs	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Elektrisk lys	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Lyd og støj	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Evt. kommentar					

Del 2: Vinduer og udsigt i dit arbejdsrum

I denne del af spørgeskemaet bliver du spurgt hvordan du oplever forskellige forhold i forbindelse med vinduerne i dit arbejdsrum.

Angiv hvor tilfreds du er med følgende forhold i forbindelse med vinduet (eller vinduerne) i dit arbejdsrum.

	Meget utilfreds	Utilfreds	Hverken tilfreds eller utilfreds	Tilfreds	Meget tilfreds
Udsigt gennem vindue(r)	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Udluftningsmuligheden	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Placering af arbejdsplads i forhold til vindue(r)	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Solafskærmningen	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>

Evt. kommentar

Hvilken betydning tillægger du udsigten gennem vinduet?

- Meget stor betydning
- Stor betydning
- Lille betydning
- Meget lille betydning

Hvad lægger du mærke til, når du ser ud?

Vælg gerne flere svar.

- Naturlandskab
- Himmel
- Høje bygninger
- Lave bygninger
- Byggeplads
- Trafik
- Parkeringsplads
- Gårdmiljø
- Træer og planter
- Solafskærmning
- Andet _____

Når du ser ud ad vinduet, oplever du da at udsynet er begrænset af et eller flere af følgende forhold?

	I høj grad	I nogen grad	I ringe grad	Slet ikke
Af vinduesstørrelsen	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>
Af solafskærmning	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>
Af de nære vinduesomgivelser (fremspring, søjler el.lign.)	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>
Af omgivelserne uden for vinduet	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>

Evt. kommentar

Hvilke af følgende udsagn tillægger du størst negativ betydning i forbindelse med vinduerne i dit arbejdsrum?

Gennemlæs venligst alle muligheder før du afkrydser højst tre.

- Slipper for meget sol ind
- Giver generende indkig
- Forårsager generende blænding
- Jeg kan ikke se jorden (fra arbejdspladsen)
- Jeg kan ikke se himlen (fra arbejdspladsen)
- Aktiviteter udenfor distraherer mig i mit arbejde
- Slipper for meget støj ind fra gaden
- Giver for meget træk om vinteren
- Reducerer muligheden for frit at møblere rummet
- Giver for lidt arbejdslys
- Solafskærmningen tager udsynet
- Andet _____

Del 3: Direkte sollys i dit arbejdsrum

Denne del af spørgeskemaet drejer sig om direkte sollys i dit arbejdsrum og på/ved din arbejdsplads. Der refereres til direkte sollys som det lys der kommer ind gennem vinduerne alene fra solen.

Er der tidspunkter i din arbejdstid hvor der kommer direkte sollys ind i dit arbejdsrum?

- Ja
- Nej
- Nej, men sollyset kommer ind via spejlinger fra bygninger uden for mit arbejdsrum

Evt. kommentar

Er der tidspunkter på året hvor du gerne vil have direkte sollys i dit arbejdsrum?

Vælg gerne flere svar.

- Ja, om vinteren
- Ja, om foråret
- Ja, om sommeren
- Ja, om efteråret
- Nej

Evt. kommentar

Hvor hyppigt er du generet af direkte sollys i dit arbejdsrum?

- Næsten altid, når solen skinner
- Ofte
- Af og til
- Aldrig

Angiv hvordan du er generet af direkte sollys.

	Meget generet	Lidt generet	Ikke generet
Generet af varme fra solen	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>
Generet af direkte sollys ved mit skrivebord	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>
Generet af direkte sollys ved/på min computerskærm	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>
Generet af sollys ved/på min computerskærm der er reflekteret af overflader i rummet	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>
Generet af ikke at kunne efterkomme patienters ønske om solafskærmning	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>

Evt. kommentar

Når direkte sollys generer mig, så medfører det at jeg:

Afkryds gerne flere svar.

- Afskærmer for det direkte lys
- Flytter mit arbejde til et andet sted
- Drejer min computerskærm for at undgå generende reflekser
- Undlader at afskærme, fordi glæden ved det direkte sollys er større end generne
- Accepterer det
- Andet _____

Evt. kommentar

I hvilken grad er du tilfreds med dine muligheder for solafskærmning?

- Meget utilfreds
- Utilfreds
- Hverken tilfreds eller utilfreds
- Tilfreds
- Meget tilfreds

Hvis du er utilfreds eller meget utilfreds med solafskærmningen, hvad er årsagen?

Afkryds gerne flere svar.

- Der er ingen afskærmning
- Afskærmningen lader for meget lys ind (den er ikke tæt nok)
- Afskærmningen forhindrer udsyn
- Afskærmningen blænder, når solen skinner
- Afskærmningen farver lyset
- Betjeningen er vanskelig
- Afskærmningen støjer når den trækkes for
- Afskærmningen bevæger sig for langsomt når den trækkes for
- Afskærmningen dækker kun en del af vinduet selv når den er trukket helt for
- Afskærmningen kan ikke trækkes helt fra
- Andet _____

Del 4: Dagslys i dit arbejdsrum

Denne del af spørgeskemaet drejer sig om dagslys i dit arbejdsrum og på/ved din arbejdsplads.

Der refereres til dagslys som det lys fra vinduerne, der ikke er direkte sollys.

Hvordan vurderer du dagslyset i dit arbejdsrum?

	Meget utilfreds	Utilfreds	Hverken tilfreds eller utilfreds	Tilfreds	Meget tilfreds
Dagslyset i arbejdsrummet generelt	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>
Dagslyset ved min arbejdsplads (skrivebord eller andet)	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>	(5) <input type="checkbox"/>

Evt. kommentar

Oplever du ubehageligt dunkle områder eller kontraster i arbejdsrummet?

	I høj grad	I nogen grad	I ringe grad	Slet ikke
Dunkle områder	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>
Kontraster (dunkle områder og meget lyse områder)	(1) <input type="checkbox"/>	(2) <input type="checkbox"/>	(3) <input type="checkbox"/>	(4) <input type="checkbox"/>

Evt. kommentar

Du har nu besvaret alle vores spørgsmål og må gerne trykke på krydset for at afslutte.

Tusind tak for hjælpen!