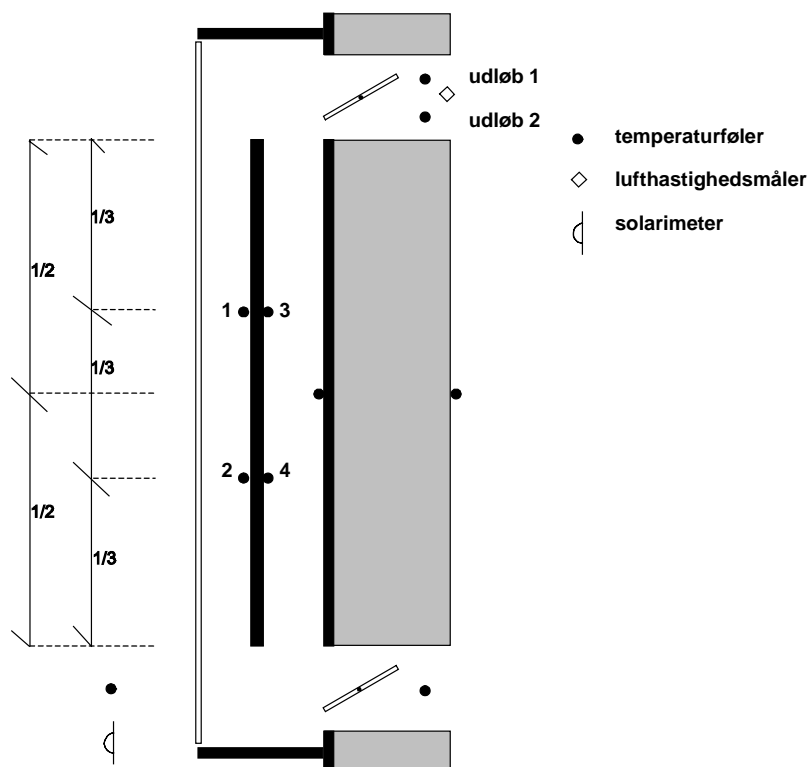


4. Målesystem

Der er kun målt på den ene af de to solvægge i Thermologica-huset, idet de er identiske. Det blev valgt at måle på solvæggen monteret udfor lejligheden på 2. sal, tv. Da hver af de to solvægge yderligere består af 2 uafhængige og identiske halvdele, blev der kun målt på den ene halvdel.

Målepunkter

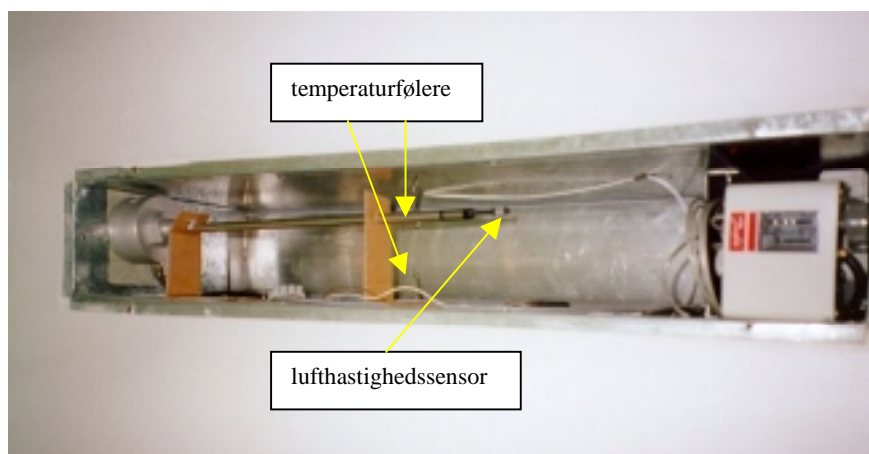
En principskitse af solvæggene med angivelse af målepunkter er vist i figur 11. Som det ses af figuren, indeholdt målesystemet 12 målepunkter. 5 temperaturer på metalpladerne, 3 lufttemperaturer i ind- og udløb fra stuen, en lufthastighedssensor, en lufttemperatur i stuen bag solvæggen samt udeluft og solindfald på solvæggen.



Figur 11. Principskitse af solvæggen med målepunkter.

Figur 12 viser et billede af de to lufttemperaturfølere og lufthastighedsføleren i udløbet fra solvæggen til stuen. Temperaturfølerne er placeret horisontalt midt i kanalen og vertikalt i det øverste og nederste fjerdedelspunkt. Lufthastighedsmåleren er placeret vertikalt midt kanalen.

Figur 13 viser placeringen af udelufttemperaturføleren og solarimetret. For at afskærme temperaturføleren fra solens opvarmning var denne placeret i en standardafskærmning bestående af to rør med kun ringe termisk kontakt mellem føler og det inderste rør og mellem de to rør. Det inderste rør var på indersiden sort og på ydersiden blank, mens det yderste rør var sort på indersiden og hvid på ydersiden.



Figur 12. *Placeringen af lufttemperaturfølere og lufthastighedsmåler i den øverst kanal.*



Figur 13. *Placeringen af udelufttemperaturføler og solarimeter.*

4.1. Anvendte måleinstrumenter

Temperaturfølere på absorber og bagvæg

Termoelementer Alle temperaturer på absorberen og på bagvæggen (væggens udvendige stålplade) er blevet målt med termoelementer type T. Følerne på absorberen er placeret i tredjedelspunkterne som vist på figur 11, mens temperaturen på bagvæggen er målt midt på væggen.

Lufttemperaturfølerne i solvæggens ind- og udløb

PT100-følere De to temperaturer i den øverste kanal og temperaturen i den nederste kanal blev målt med PT100 klasse A følere.

Stratifikation Der er anvendt to følere i den øverste kanal for at undersøge, om der er temperaturstratifikation i kanalen som følge af den todelte luftstrøm - på hver side af absorberen. Hvis varmen kun langsomt forplanter sig gennem den tykke absorber, vil temperaturstigningen for luften på bagsiden blive mindre end på forsiden. Dette modvirkes dog af, at luftstrømmen på forsiden har et varmetab gennem solvæggens dæklag. En forskel i temperaturstigning vil lede til en forskel i volumenstrøm på de to sider af absorberen, som der skal tages hensyn til ved beregning af solvæggens ydelse, idet lufthastigheden kun måles i et punkt.

Måling af lufthastighed/volumenstrøm af luft

Vanskelig måling Det er vanskeligt at måle volumenstrømme i anlæg med selvcirkulation. Der er kun et lille tryktab over anlæggene, hvilket umuliggør måling ved hjælp af et kalibreret tryktab. Måling af volumenstrømmen ved hjælp af hastighedsmålinger er også vanskeligt, fordi måleinstrument kan forstyrre strømmingen, på grund af hastighedsprofilen, der kræver flere målinger på tværs af strømmingen, samt at lufthastigheden er lav. I nærværende tilfælde blev det besluttet at kalibrere én hastighedsmåling i solvæggens øverste åbning. På baggrund af samhörende værdier for hastighed og volumenstrøm (målt med en måletragt – se senere) blev der opstillet et udtryk, således at den målte hastighed kunne omsættes til en volumenstrøm.

Sensor Lufthastigheden i den øverste kanal blev målt med en flowsensor (Schmidt SS 20.502). Føleren er blevet kalibreret i DTI Energi's prøvestand til kalibrering af lufthastighedsmålere.

Kalibrering Ved hjælp af en måletragt blev der en solrig dag fundet en sammenhæng mellem lufthastighed i den øverste kanal og volumenstrøm ud af solvæggen. Til denne kalibrering blev anvendt en måletragt (AM-1200 fra Wallace), der passede med kanalåbningen i væggen i kombination med en kalibreret lufthastighedssensor (Brüel & Kjær, Thermal Comfort Meter Type 1213). Måletragten introducerede kun et minimalt trykfald i forhold til trykfaldet over solvæggen. Den påvirkede derfor ikke kalibreringen, hvilket blev testet ved at sammenligne lufthastigheden (målt med flowsensoren i kanalen) med og uden måletragt.

Repræsentativ Som det ses af figur 12, er der en del måleudstyr i den øverste kanal i den ene halvdel af solvæggen. Ved hjælp af måletragten blev det undersøgt, om disse følere gav anledning til en reduktion af volumenstrømmen. Der kunne ikke konstateres en forskel i volumenstrømmen gennem de to halvdele af solvæggen. Det konkluderes derfor, at følerne ingen nævneværdig indflydelse har på solvæggens ydelse. De opnåede måledata er derfor også repræsentative for solvæggen uden måleudstyr.

Rumtemperatur

PT100-følere Rumtemperaturen blev målt med en standard, skærmet PT100 klasse B rumtemperaturføler.

Udelufttemperatur

PT100-følere Udelufttemperaturen blev målt med en PT100 klasse B føler placeret afskærmet fra solen – som beskrevet i forbindelse med figur 12 – for at hindre solens indflydelse på den målte udelufttemperatur.

Solindfald

Pyranometer Det totale solindfald på en flade i plan med solvæggen blev målt med et kalibreret solarimeter (Silkeborg Pyranometer 80-HD).

4.2. Opsamling af data

Hardware Alle målepunkter blev koblet til en datalogger med moduler fra Analog Devices. Målepunkterne blev scannet hvert 10. sekund og midlet i 10 minutsværdier på en PC's harddisk.

Software Dataloggen blev styret af PC'en via softwaret Labtech Control. På PC'ens skærm blev løbende vist øjebliksværdier for samtlige målepunkter.

4.3. Behandling af data

Ved hjælp af dataloggersystemet/PC'en blev de målte værdier omsat til forståelige fysiske størrelser.

Omsætning af signaler Signalerne fra temperaturfølerne blev omsat til temperaturer og signalet fra solarimeteret til solindfald. Lufthastighedsmålerens signal blev ved hjælp af kalibreringskurven fundet i laboratorium omsat i måle-PC'en til en hastighed.

Beregnete værdier På baggrund af de målte værdier er lufthastigheden ved den senere behandling af måledataene omsat til en volumenstrøm af luft, ligesom ydelsen er fundet på baggrund af de målte temperaturer og den beregnede volumenstrøm af luft.

5. Målinger

Måleperiode

Der er blevet målt på solvæggen i over et år. Her vil dog kun målingerne for ét år – april, 1997 – marts 1998 – blive behandlet.

I nærværende kapitel bliver der første vist eksempler på målte værdier for at illustrere, hvordan solvæggen har virket. Derefter er solvæggens effektivitet udledt, og til sidst vil solvæggens ydelse blive beregnet og diskuteret.

5.1. Målinger fra udvalgte uger

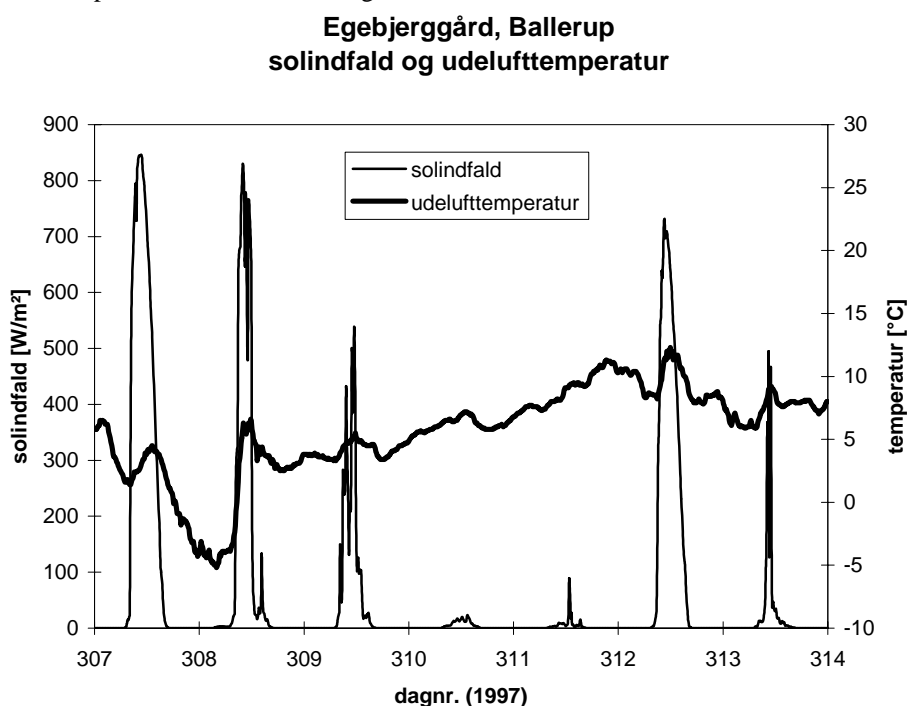
Målinger fra uge 45, 1997 – 3.-9. november

Begrundelse for periode

I det følgende er der vist målinger for en uge først i november 1997. Denne uge er valgt, fordi der dels var et rumopvarmningsbehov, dels fordi ugen bød på vekslende solindfald med deraf følgende varierende funktion af solvæggen. Målingerne fra denne uge illustrerer derfor et bredt spektrum af solvæggens funktioner.

Vejrforhold

Figur 14 viser solindfald og udelufttemperatur for perioden. Perioden var karakteriseret af vekslende solindfald – fra klar himmel, over skyet til helt overskyet. Udelufttemperaturen lå mellem -5 og 12°C .

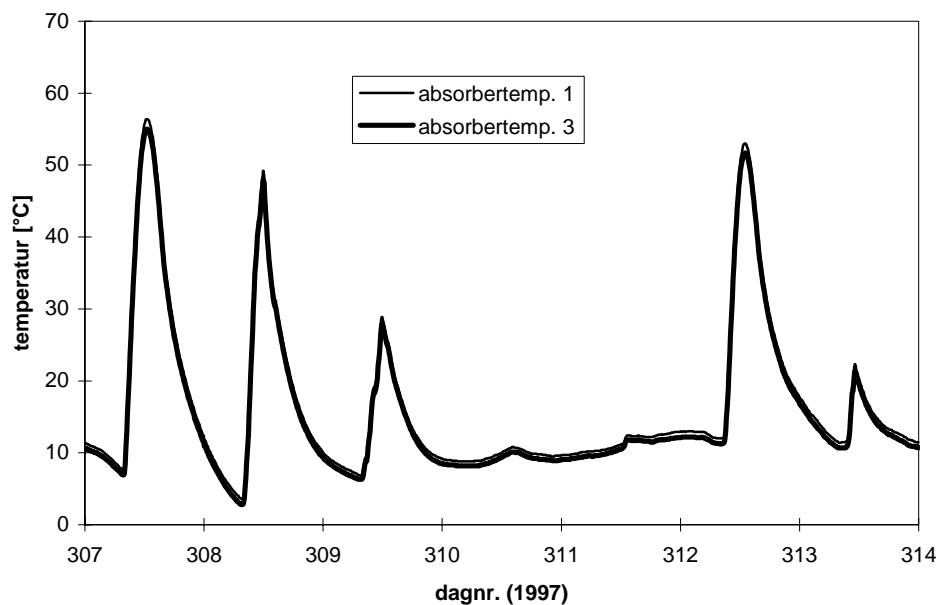


Figur 14. Solindfald og udelufttemperatur i perioden 3.-9. november 1997.

Absorbertyper

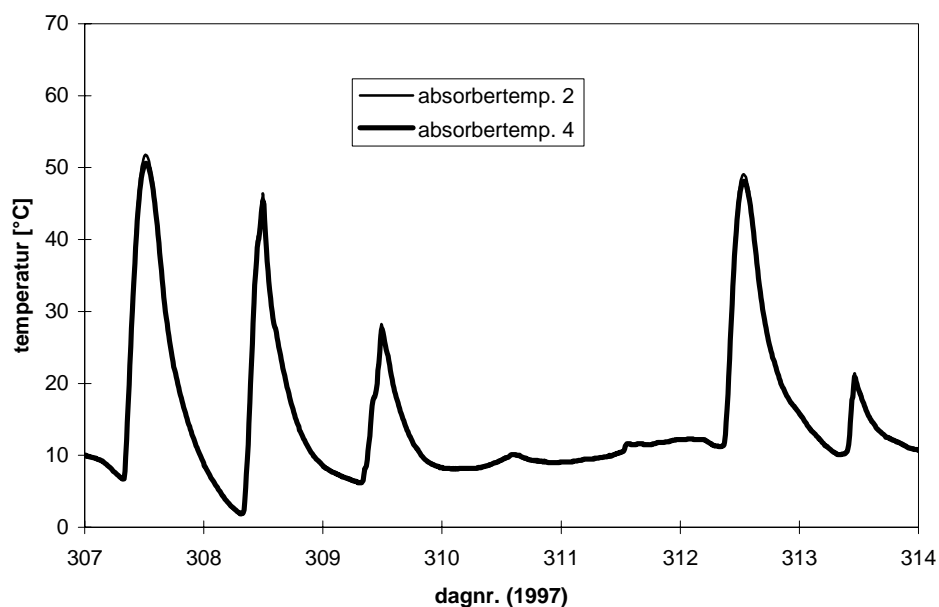
Figur 15 og 16 viser temperaturen på for- og bagsiden af absorbereren. Absorbertyper 1 og 3 er som vist i figur 1 placeret i det øverste tredjedelspunkt på absorbereren, mens 2 og 4 er placeret i det nederste tredjedelspunkt. Figurerne viser, at overflade temperaturen på for- og bagsiden af absorbereren stort set er ens – en forskel på op til 1-2 K.

Egebjerggård, Ballerup
temperaturer på solvæggens absorber



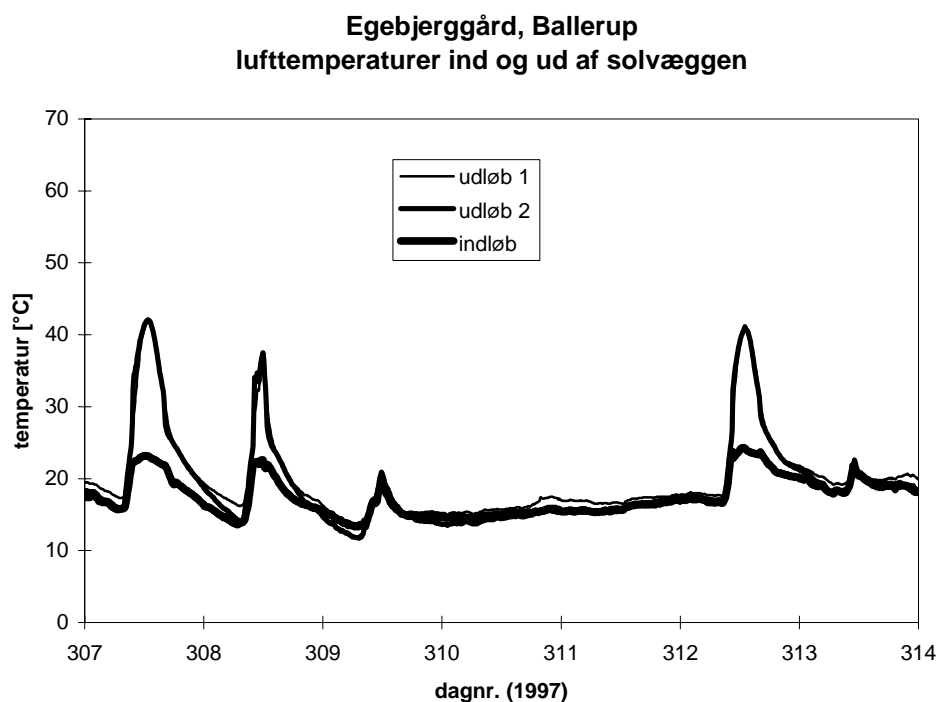
Figur 15. *Overfladetemperaturen foran og bagpå absorberen i det øverste tredjedelspunkt.*

Egebjerggård, Ballerup
temperaturer på solvæggens absorber



Figur 16. *Overfladetemperaturen foran og bagpå absorberen i det nederste tredjedelspunkt.*

Ind- og udløbstemperaturer Figur 17 viser udløbstemperaturerne og indløbstemperaturen til solvæggen. Figuren viser, at der ingen forskel er på de to udløbstemperaturer. Det kan derfor antages, at volumenstrømmen på begge sider af absorbereren er tilnærmelsesvis ens.



Figur 17. Ind- og udløbstemperaturerne mellem stue og solvæg.

Temperatur på ydervæg

Figur 18 viser temperaturen på ydersiden af væggen bag absorbereren sammen med rumtemperaturen og udelufttemperaturen. Temperaturen på ydersiden af væggen svinger selvfølgelig kraftigt med solindfaldet, men selv i perioder med kun diffust solindfald (overskyet) eller intet solindfald (om natten) er temperaturen på ydersiden højere end udelufttemperaturen. Solvæggen vil derfor ikke blot medføre en besparelse, fordi der blæses varm luft ind i bygningen, men også reducere varmetabet gennem den væg, solvæggen er placeret foran. Dette behandles nærmere i afsnit 3.3.

Volumenstrøm af luft

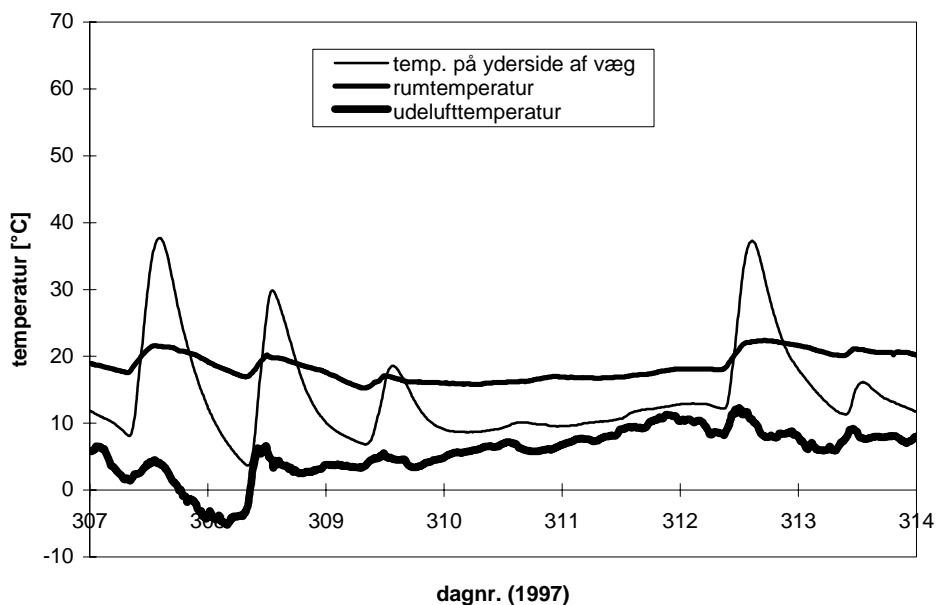
Figur 19 viser den målte lufthastighed, mens figur 20 viser den beregnede totale volumenstrøm af luft gennem begge halvdele af solvæggen, der i den viste periode nåede op over 80 m³/h. Den maksimale volumenstrøm på lige under 90 m³/h blev opnået flere gange i løbet af året.

Stop og start

Figur 21 viser udløbstemperaturerne fra solvæggen sammen med volumenstrømmen af luft for d. 3. november, 1997. De lodrette streger viser henholdsvis stop og start – dvs. åbning og lukning af spjældene. Som det ses af figur 18, er rumtemperaturen i perioden altid under 25°C, hvilket vil sige, at spjældene udelukkende åbner og lukker på den øverste termostat, som i denne periode var sat til 30°C. Figur 21 viser, at spjældene rent faktisk åbnede og lukkede ved denne temperatur. Figur 23 i næste afsnit viser en tilsvarende situation som figur 21 blot for en varm og solrig dag i september, hvor spjældene om eftermiddagen lukkes, fordi temperaturen i stuen bliver for høj. Figur 23 viser, at spjældene åbner ved en temperatur på lidt under 30°C, men lukker ikke som designet ved 25°C. De lukker i stedet for ved 27°C, hvilket må

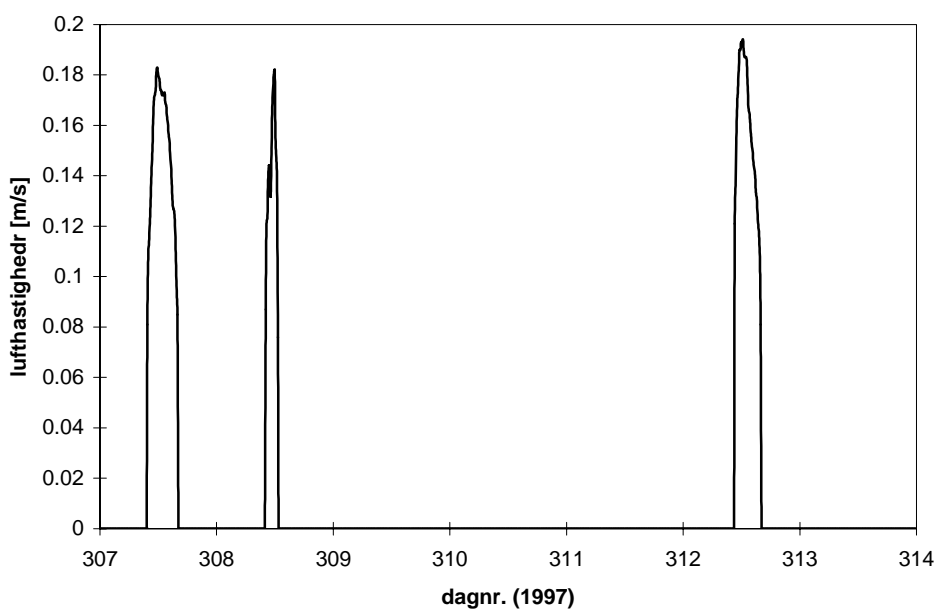
tilskrives en sætpointsforskydning mellem indstillingsskala og faktisk aktuatortemperatur.

Egebjerggård, Ballerup
rum- og udelufttemp. samt temp. på yderside af væg



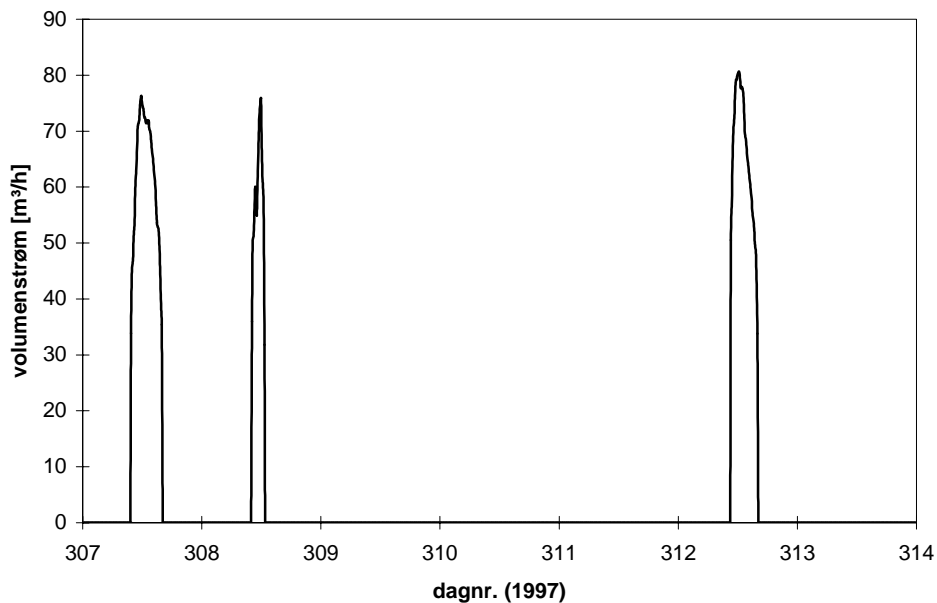
Figur 18. Temperaturen på ydersiden af væggen (dvs. ydersiden af stålpladen bag absorberen) samt rum- og udelufttemperaturen.

Egebjerggård, Ballerup
luft hastighed ud af solvæg



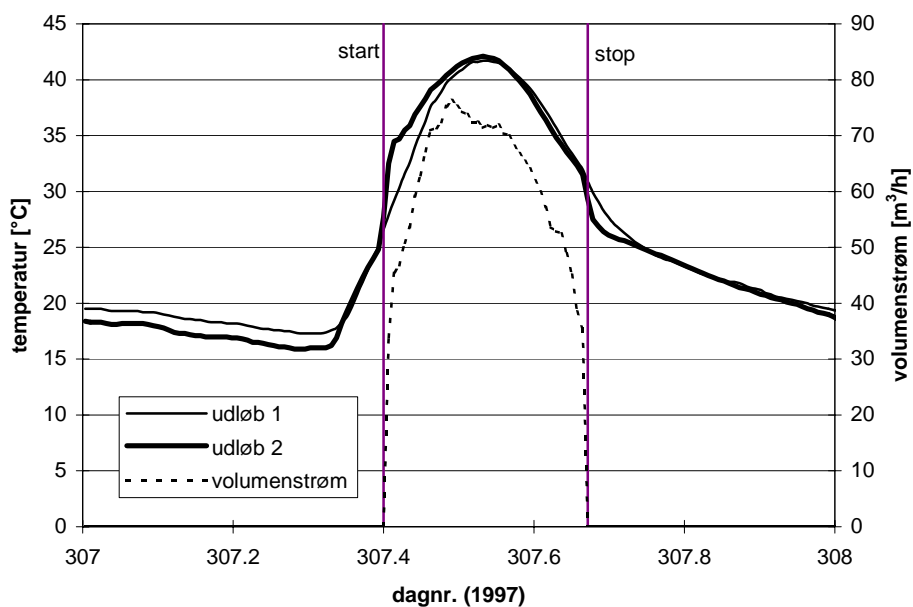
Figur 19. Hastigheden af luften ud af solvæggen.

Egebjerggård, Ballerup volumenstrøm af luft gennem solvæggen



Figur 20. Volumenstrømmen af luft gennem solvæggen.

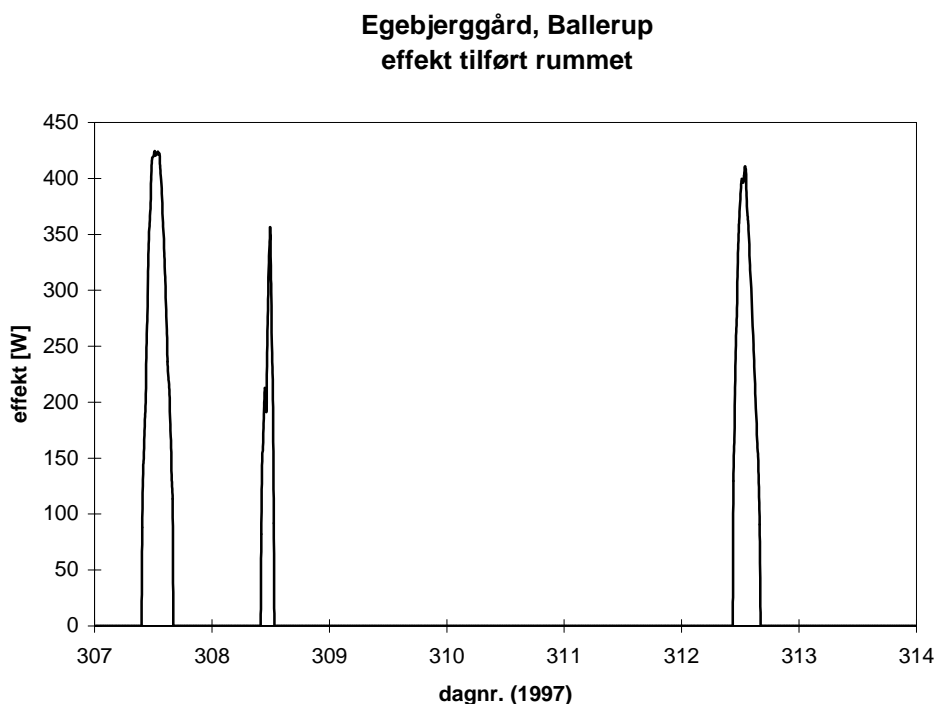
Egebjerggård, Ballerup åbning og lukning af spjæld i solvæggen



Figur 21. Sætpunkt for åbning og lukning af spjældene i solvæggen.

Tilført effekt

Figur 22 viser den effekt, der blev tilført stuen med luftstrømmen. Den maksimale effekt i figur 22 er 450 W. Den maksimale effekt var i det målte år 650 W og forekom d. 17. marts 1997.



Figur 22. Den tilførte effekt fra solvæggen til stuen.

Målinger fra d. 27. september, 1997

Sætpunkt for stop

Figur 23 viser som før nævnt tidspunkterne for åbning og lukning af spjældene d. 27. september. Denne dag var varm og solrig, som det fremgår af figur 24. Denne figur viser desuden, at der i virkeligheden intet rumopvarmningsbehov var denne dag, hvilket er grunden til, at spjældene lukkes efter kun ca. halvanden time, idet indløbstemperaturen når op over sætpunktet på 27°C. 27°C var det virkelige sætpunkt selvom termostaten var stillet på 25°C.

At temperaturen i udløbet fra solvæggen fortsætter med at stige, efter spjældene er lukket, skyldes, at absorbertemperaturen den dag nåede op på mellem 75 og 80°C. At der er stor forskel på de to udløbstemperaturer bag det lukkede spjæld skyldes temperaturlagdeling i kanalen.

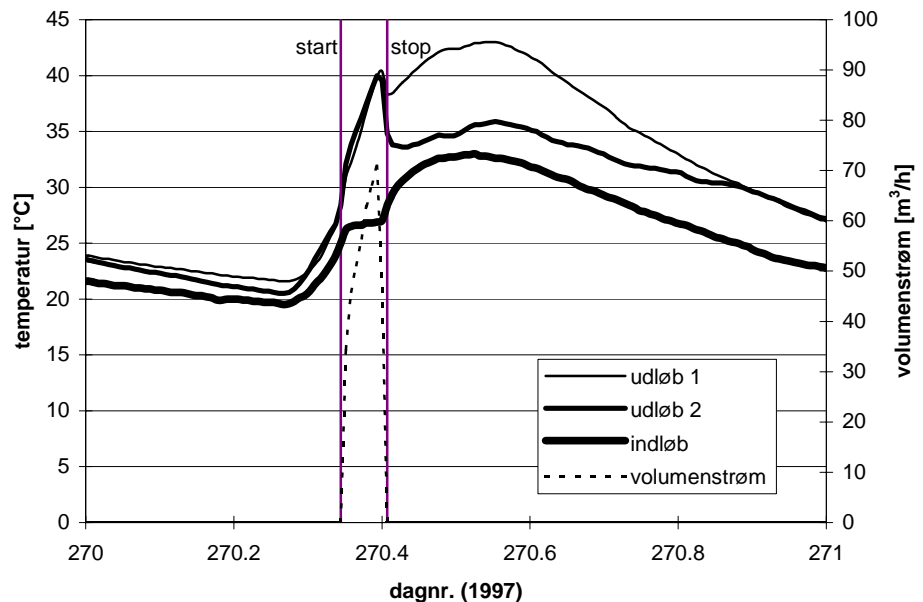
Målinger fra uge 30 – 21.-27. juli, 1997

Højeste temperaturer

De højeste temperaturer i solvæggen blev registreret i slutningen af juli 1997. Figur 25 viser vejrforholdene i denne uge, mens figur 26 viser absorbertemperaturerne. Temperaturen af solvæggen nåede d. 22. juli en temperatur på tæt ved 80°C ved en udelufttemperatur på 30°C. At solvæggen ikke opnåede en højere temperatur, skyldes den store termiske masse i solvæggen – de to tykke stålplader, samt at der er udluftningshuller i top og bund.

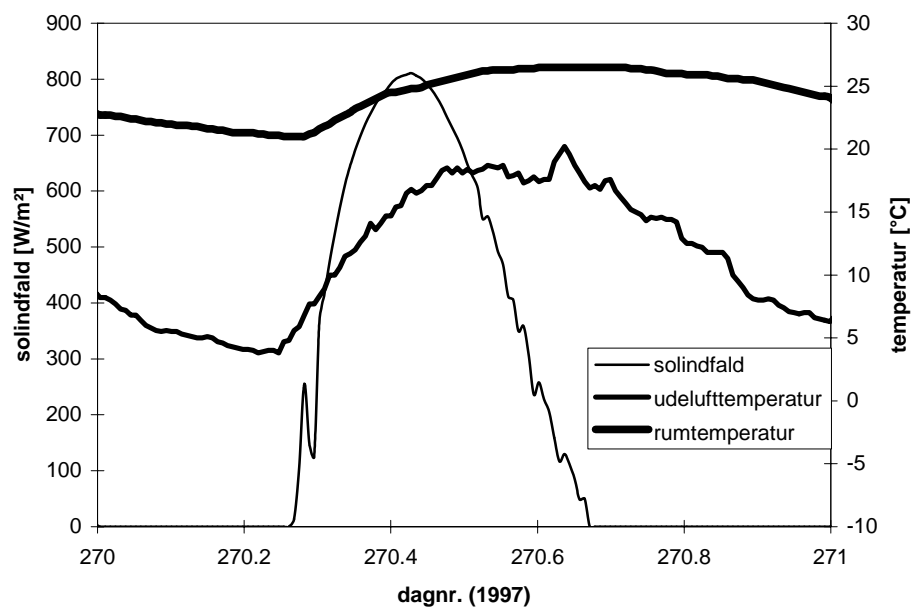
Den store termiske masse influerer ikke blot på solvæggens stagnationstemperatur, men i høj grad også på solvæggens effektivitet, som behandles i næste afsnit.

Egebjerggård, Ballerup solindfald og lufttemperaturer ud af solvæggen

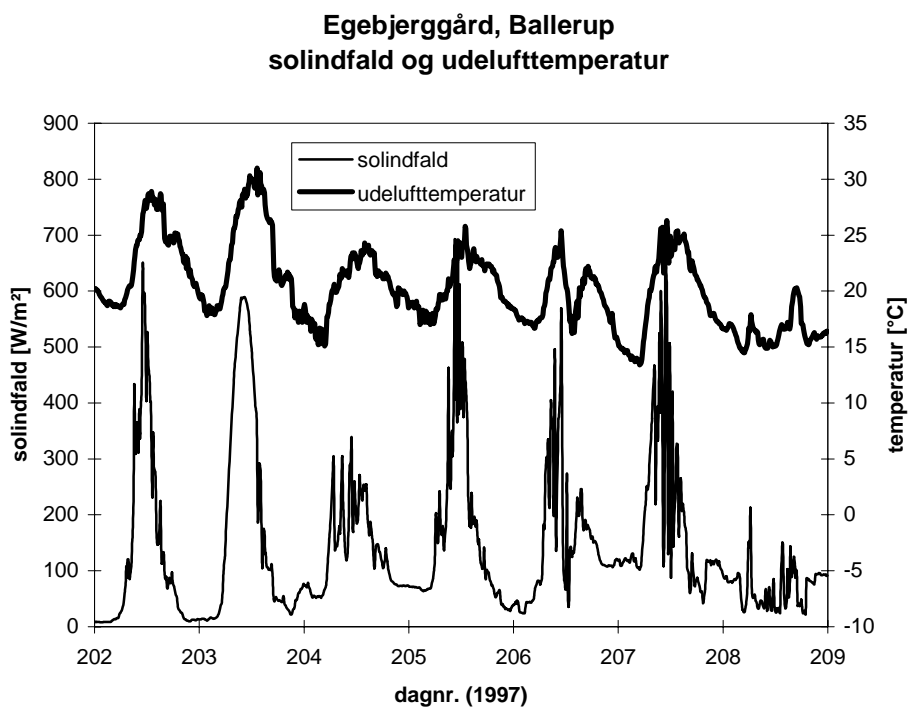


Figur 23. Sætpunkt for åbning og lukning af spjældene i solvæggen – 27. september 1997

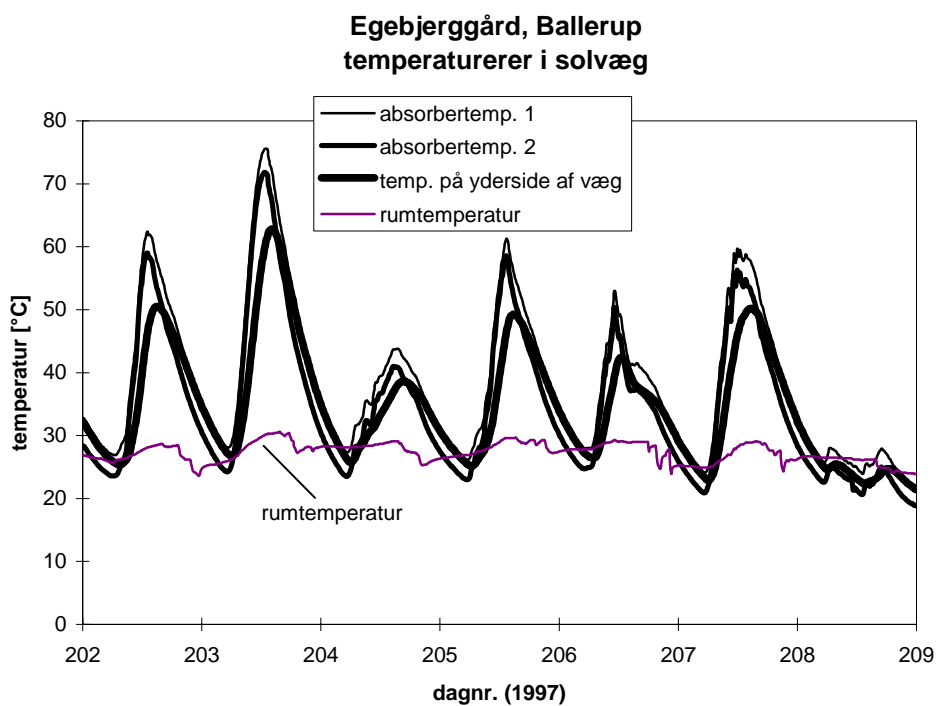
Egebjerggård, Ballerup solindfald og udelufttemperatur



Figur 24. Solindfald og udelufttemperatur d. 27. september 1997.



Figur 25. Solindfald og udelufttemperatur uge 30, 1997 – 21.-27. juli.



Figur 26. Temperaturer i solvæggen og rumtemperaturen uge 30, 1997 – 21.-27. juli, hvor de højeste temperaturer i solvæggen forekom.

5.2. Effektivitet

Fastlæggelse af effektivitet Effektiviteten af solfangere fastlægges traditionelt som en funktion af temperaturdifferensen mellem middeltemperaturen af fluiden i solfangeren og udelufttemperaturen divideret med solindfaldet vinkelret på solfangerens dæklag.

Effektiviteten af solvæggen vil her blive fastlagt på samme måde, idet solvæggen ved solindfald fungerer som en luftsolfanger, der opvarmer rumluft.

Problemet med fastlæggelse af effektiviteten af solfangere in-situ er, at det dels er svært at opnå stationære forhold, dels at solindfaldet på solfangeren sker under varierende indfaldsvinkler, samt at en stor del af solindfaldet ofte er diffust (der traditionelt behandles som havende en konstant indfaldsvinkel på 60°C).

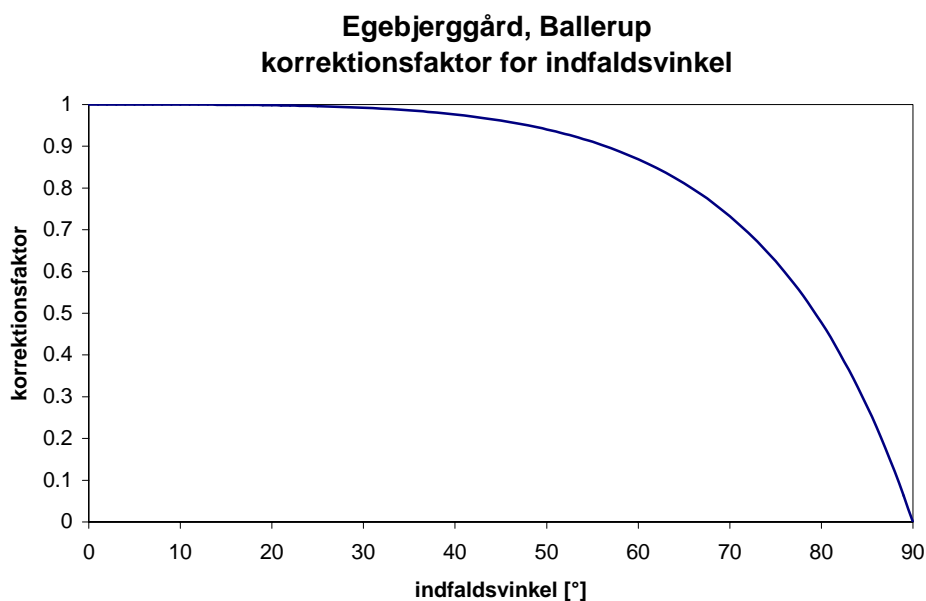
I nærværende projekt er der kun målt totalindstråling på solfangeren. Det er derfor nødvendigt først at splitte totalindstrålingen op i direkte og diffust solindfald og derefter at omregne solindfaldet til et ækvivalent solindfald med en indfaldsvinkel på 0°.

Opsplitning af solindfald Totalindstrålingen er blevet opsplittet i direkte og diffust solindfald ved hjælp af ligningerne i (Duffie og Beckman, 1991). Herefter er indflydelsen af indfaldsvinklen (refleksion i dæklagets overflade og øget absorption igennem dæklaget) behandlet ved at multiplicere med korrektionsfaktoren:

Vinkelafhængighed

$$k = 1 - \tan^a(\theta/2) \quad \text{hvor } \theta \text{ er indfaldsvinklen for solstrålingen og } a \text{ er } 3,7 \text{ for et dæklag med ét lag glas (Nielsen, 1995).}$$

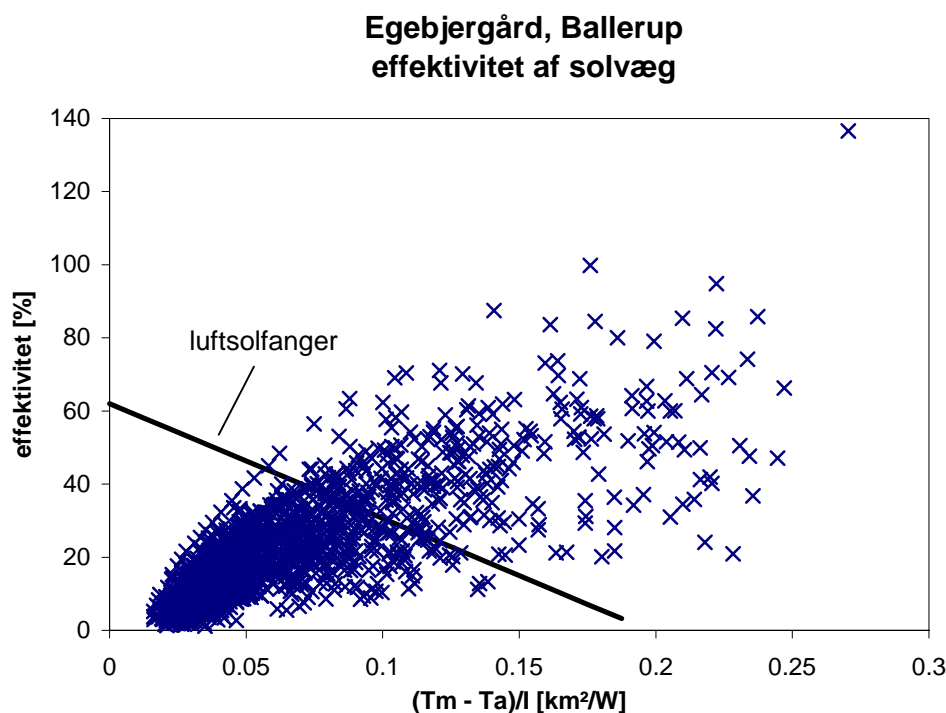
Korrektionsfaktoren er vist grafisk i figur 27. Korrektionsfaktoren multipliceres med solindfaldet – med den aktuelle indfaldsvinkel for det direkte solindfald og med en indfaldsvinkel på 60° for det diffuse solindfald.



Figur 27. *Korrektionsfaktor for indfaldsvinklen af solens stråler på solvæggens dæklag.*

Effektivitet

Figur 28 viser solvæggens effektivitet afhængig af temperaturdifferencen mellem luften i solvæggen og udeluften divideret med solindfaldet korrigeret som beskrevet ovenfor. Effektiviteten er her defineret som effekttilførelsen til stuen divideret med det korrigerede solindfald. I samme figur er vist effektiviteten for en traditionel luftsolfanger (Bosanac og Jensen, 1997). Som det ses stemmer effektiviteten overhovedet ikke overens med den traditionelle opfattelse af, hvordan effektiviteten for en luftsolfanger bør bære.



Figur 28. Solvæggens effektivitet vist på den traditionelle måde til præsentation af solfangeres effektivitet. Til sammenligning er også vist effektivitetskurven for en luftsolfanger (Bosanac og Jensen, 1997).

T_m er luftens middeltemperatur,

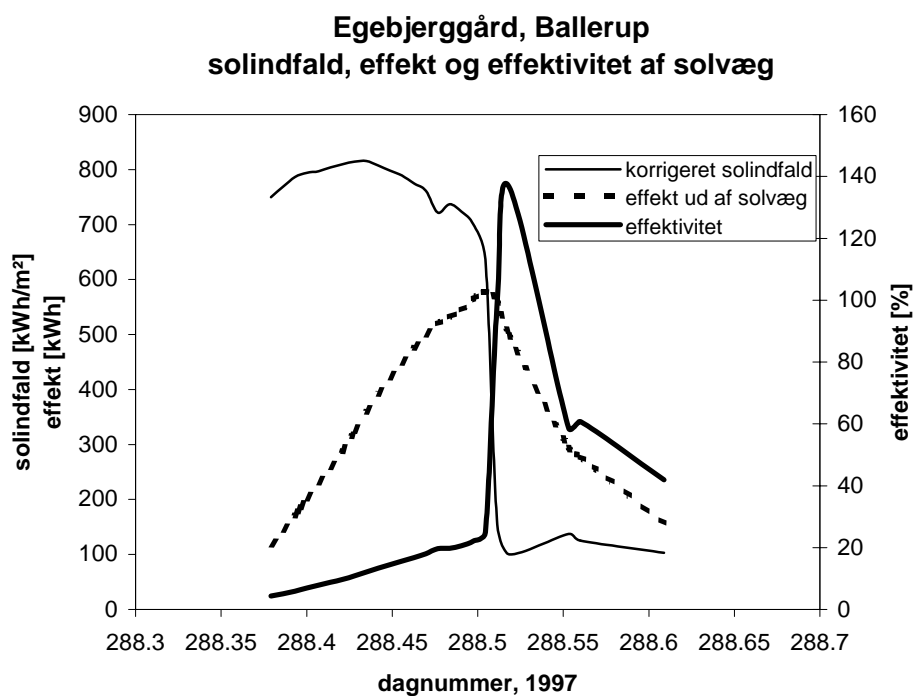
T_a er udelufttemperaturen og

I er det korrigerede solindfald.

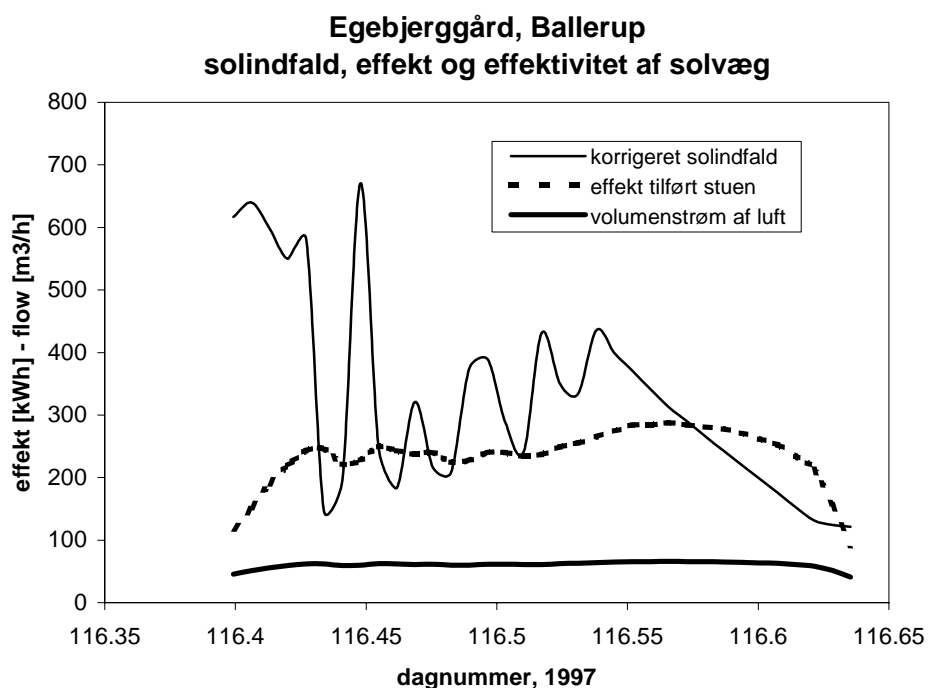
Stor termisk masse

Det noget besynderlige resultat vist i figur 28 – f.eks. en effektivitet på 140% – skyldes den store termiske masse i solvæggen. Dette er vist i figur 29, hvor det korrigerede solindfald på solvæggen er vist sammen med effekttilførelsen til stuen og solvæggens effektivitet – der er kun vist værdier for det tidsrum, hvor solvæggens spjæld var åbne. Figuren viser d. 16. oktober, 1997, hvor det var klart solskin indtil ca. kl. 12:00, hvorefter det blev overskyet. Figuren viser, at effekten og effektiviteten om formiddagen med næsten solindfald konstant stiger efterhånden, som de to stålplader bliver varmet op. Da det bliver overskyet, begynder effekttilførelsen til stuen at falde, men langsommere end det lille solindfald berettiger til. Det skyldes, at den akkumulerede varme i stålpladerne, da blev overført til luften. Da solen reduceres, stiger effektiviteten eksplosivt, idet solindfaldet hurtigt blev reduceret, mens den overførte effekt fra stålpladerne til luften kun langsomt bliver reduceret.

Figur 30 viser en situation med fluktuerede solindfald – d. 26. april 1997.



Figur 29. *Korrigeret solindfald, effekt tilført stuen og solvæggens effektivitet for d. 16. oktober 1997.*



Figur 30. *Korrigeret solindfald, effekt tilført stuen og volumenstrømmen af luft gennem solvæggen for d. 26. april 1997.*

- Udjævning** Figur 30 viser, at den termiske masse i solvæggen ved fluktuerede solindfald udjævner solens fluktuationer, således at effektilførslen til stuen og volumenstrømmen af luft næsten er konstant. Effektiviteten, som ikke er vist på figur 30, svinger i takt med solindfaldet, da effektilførslen er konstant.
- Vurdering af effektiviteten** Den gennemsnitlige effektivitet for solvæggen var 21% ved en gennemsnitlig værdi af $(T_m - T_a)/I = 0,062 \text{ Km}^2/\text{W}$ og en gennemsnitlig volumenstrøm af luft på $62,6 \text{ m}^3/\text{h}$. I stedet for den gennemsnitlige effektivitet vil det være mere rigtigt at anvende en vægtet effektivitet – vægtet på baggrund af effektilførslen til stuen. Ved denne middelværdi vil effektiviteter ved store effektilførsler få en større indflydelse end effektiviteter ved små effektilførsler. Den vægtede gennemsnitlige effektivitet for solvæggen var 24% ved en gennemsnitlig værdi af $(T_m - T_a)/I = 0,061 \text{ Km}^2/\text{W}$ og en gennemsnitlig volumenstrøm af luft på $67,6 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Sammenligning** Ved samme $(T_m - T_a)/I (= 0,061 \text{ Km}^2/\text{W})$ er effektiviteten af luftsolfangeren vist i figur 28 43%, dvs. næsten dobbelt så effektiv som solvæggen. Det skyldes hovedsagelig, at volumenstrømmen af luft gennem luftsolfangeren var $74 \text{ m}^3/\text{h}$, mens den kun var $(67,6/3,5 \approx) 18 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ i solvæggen. Effektiviteten af luftsolfangere er i modsætning til væskesolfangere meget afhængig af volumenstrømmen gennem solfangeren. Beregninger med en solfangermodel (Morhenne og Lagensiepen, 1997) i simuleringsprogrammet TRNSYS (Beckman et al, 1994) viser, at forskellen i volumenstrømmen mellem solvæggen og luftsolfangeren i figur 28 alene kan tilskrives 70% af forskellen i effektiviteten. De resterende 30% skyldes primært, at en del af luften i solvæggen cirkulerer lige bag dæklaget, hvilket giver et øget varmetab. Desuden har solvæggen et større randtab, da stålpladen bag absorbereren er i direkte kontakt med resten af væggen. Yderligere er den selektive belægning på absorbereren i luftsolfangeren, mens den er på indersiden af dæklaget i solvæggen. Det sidste betyder en nedgang i ydelsen på 10-15%, idet selektive belægnings på glas er mindre effektive end på metal samtidigt med, at den selektive belægning på glasset mindsker transmittancen af sollys gennem glasset. Desuden er absorbereren ikke sort men rusten. Dette vurderes dog i det konkrete tilfælde kun at betyde en ubetydelig forringelse af ydelsen.
- På baggrund af ovenstående kan det konkluderes, at solvæggens effektivitet efter forholdene er tilfredsstillende, og som den kunne forventes at være.
- Akkumulering af varme** Forskellen mellem luftsolfangere og solvægge er traditionelt størrelsen af den termiske masse i solfangeren/solvæggen. Solvægge består ofte af et dæklag foran en eksisterende sortmalet væg, hvor den yderste del af væggen er termisk tung i form af beton eller teglsten. I ventilerede solvægge er formålet ikke blot at opvarme luft til bygningen, men også at mindske varmetabet gennem væggen bag solvæggen ved at bibeholde en højere temperatur foran væggen ved at akkumulere solvarme fra dag til nat i væggen.
- Den her beskrevne solvæg gemmer varme fra dag til nat i væggens yderside som vist på figur 18. Hvor stor en besparelse, det giver anledning til, bliver diskuteret i næste afsnit.

5.3. Ydelser

- Årlig ydelser** Den årlige ydelse for solvæggen er fundet ved at summere de daglige ydelser – f.eks. vist i figur 22. Som vist i figur 23, vil solvæggen vedblive med at tilføre varme til stuen indtil indløbstemperaturen til solvæggen når ca. 27°C . Dvs. en del af den

målte tilførte varme fra solvæggen til stuen dækker ikke et rumopvarmningsbehov. Den årlige ydelse for solvæggen er derfor fundet ved forskellige kriterier som vist i tabel 1.

I tabel 1 er den årlige ydelse fundet for følgende forskellige kriterier: Den tilførte energi til stuen summeres kun, hvis rumtemperaturen er under 20, 21, 22, 23, 24 og 25°C i det øjeblik, varmen blev leveret, og hvis varmen blev leveret i løbet af den traditionelle danske opvarmningssæson – 22. september til 8. maj. I den sidste søjle (benævnt 27°C da spjældene lukker ved 27°C) er al varmen fra solvæggen til stuen summeret indenfor opvarmningssæsonen.

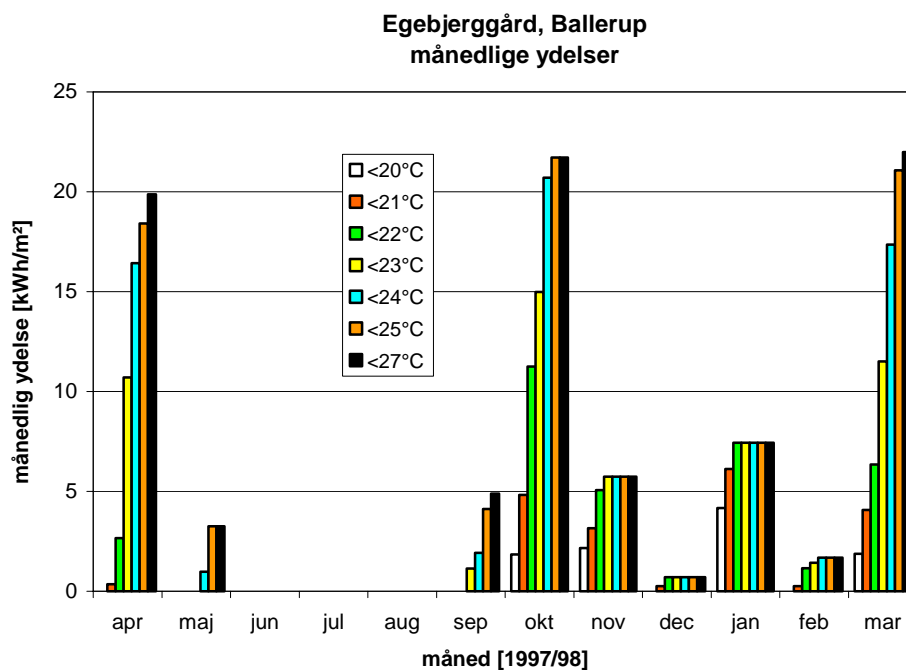
	Afskæring						
	<20°C	<21°C	<22°C	<23°C	<24°C	<25°C	<27°C
Årlig ydelse kWh/m ²	10	19	35	54	73	84	87

Tabel 1. *Årlige ydelser for solvæggen afhængig af ved hvilken rumtemperatur den leverede varme antages at være nyttig.*

Solvæggen er orienteret 28° mod øst. En orientering direkte mod syd vil erfaringsmæssigt føre til en forøgelse af ydelsen med 5-10%.

Månedlige ydelser

Figur 31 viser måned for måned de målte ydelser afhængig af ved hvilken rumtemperatur, den tilførte varme anses for værende nyttig.



Figur 31. *Månedlige ydelser for solvæggen afhængig af ved hvilken rumtemperatur den leverede varme antages at være nyttig.*

Vurdering af ydelser Figur 31 viser ikke overraskende, at der er indsamlet mest varme i marts, april og oktober. Men hvis varmen ved en rumtemperatur over 20°C er uønsket, sker den største varmeopsamling i januar, hvilket skyldes, at solvæggene er monteret i lavenergibyggeri, hvor der kun er et lille rumopvarmningsbehov udenfor månederne november til februar. At der kun er indsamlet lidt varme i februar skyldes, at udelufttemperaturen i denne måned var forbavsende høj, som det vises senere i figur 33.

Tabel 1 viser, at ydelsen af solvæggen er meget afhængig af ved hvilket temperatur-niveau, varmen fra solvæggen ikke længere anses for værende nyttig – ved hvilket temperaturniveau den tilførte varme kun bidrager til overophedningsproblemer. I stedet for at tale om temperaturniveau kunne man også tale om opvarmningsbehov, hvor temperaturniveauerne i stedet for står for forskellige opvarmningsbehov for stuen/lejligheden bag solvæggen. Lavenergibyggeri repræsenteres her af <20-21°C, mens dårligt isoleret byggeri repræsenteres af <25-27°C.

Som det ses, har solvæggen kun en ringe ydelse i forbindelse med lavenergibyggeri – mindre end 20 kWh/m² pr. år, hvilket skyldes, at der er et lavt energiforbrug samtidigt med, at det direkte solindfald gennem bygningens vinduer det meste af året i dagtimerne kan dække opvarmningsbehovet, når solen skinner. I bygninger med et stort opvarmningsbehov vil solvæggen have en ydelse på over 80 kWh/m² pr. år.

Reel ydelse Ydelsen/besparelsen af solvæggen er her større end de målte 10-20 kWh/m² pr år, da en stor del af varmen, der samles oppe under det buede loft, suges ud ved hjælp af ventilationsanlægget. Varmen udnyttes her til forvarmning af friskluft – ikke kun til stuen, men til hele lejligheden, hvilket gør, at varmen fra solvæggen udnyttes af alle lejlighedens rum. Desuden anvendes overskudsvarmen i udsugningsluften til forvarmning af brugsvand. Det er ikke muligt at udtale sig præcist om størrelsen af den reelle ydelse for solvæggen, da der ikke er målt på ventilations- og brugsvandssystemet, men det formodes, at størstedelen af den tilførte varme fra solvæggen nyttiggøres, svarende til en årlig ydelse på måske helt op til 80 kWh/m².

Tung vs. let bygning Thermologica-bygningen er termisk let. Vægge og loft består indvendigt af gipsplader direkte uden på isoleringen. Der er desuden trægulve. Hvis bygningen i stedet havde været termisk tung (vægge af tegl og klinkegulv), ville den direkte ydelse fra solvæggene (de 10-20 kWh/m²) sandsynligvis kunne fordobles (Olsen, 1984), da der så kan gemmes varme fra dag til aften i vægge og gulv.

Sparet varmetab

Sparet varmetab I solvæggens ydelse/besparelse indgår også det sparede varmetab gennem den yder-væg, solvæggen er placeret foran. Denne besparelse er beregnet ud fra målingerne af temperaturen på ydersiden af væggen bag solvæggens absorber. Beregningen af det sparede varmetab er foretaget som en ren statisk beregning, hvor differencen mellem det statiske varmetab med og uden solvæg er beregnet og summeret over opvarmningssæsonen. De to varmetab er fundet som $U \cdot \Delta T$, hvor U er væggens varmetabskoefficient og ΔT er temperaturdifferencen mellem henholdsvis rumtemperaturen og udelufttemperaturen, og rumtemperaturen og temperaturen på ydersiden af væggen. Der er således ikke tale om en transient beregning, der medtager lagring af varme i væggen og dermed væggens tidskonstant. Men da væggen hovedsagelig består af isolering, og det eneste akkumulerende lag er den yderste stålplade, hvor temperaturen kendes, vurderes det, at en statisk beregning giver et rimeligt billede af den reelle besparelse i varmetabet som følge af solvæggen.

Tabel 2 viser resultatet af ovenstående beregninger for: En væg som i Thermologica (U-værdi = 0.1 W/m²K), en let BR82-væg (U-værdi = 0.3 W/m²K) og en typisk beton-elementvæg fra 1960-70'erne (U-værdi = 0.6 W/m²K (BR61-72)). Som ved beregning af ydelsen er varmetabet beregnet for forskellige temperaturniveauer – her to temperaturniveauer - <20 og <21°C, idet dette er det normalt tilstræbte temperaturniveau i danske bygninger. Besparelsen i forbindelse med lavenergi-byggeri er som forventet beskedent, mens den i forbindelse med traditionelt ældre byggeri er af en rimelig størrelse.

U-værdi W/m ² K	Årlig ydelse kWh/m ²	
	<20°C	<21°C
0,1 (Thermologica)	6.7	9.1
0,3 (BR82)	20.1	27.3
0,6 (BR61-72)	40.1	54.6

Tabel 2. *Årlige sparede varmetab gennem solvæggen afhængig af U-værdien for den bagvedliggende væg, samt ved hvilken rumtemperatur det sparede varmetab stadig antages at være en reel besparelse.*

I værdierne i tabel 2 er der ikke medtaget det forøgede varmetab, som solvæggens spjæld medfører. Spjældene har en højere U-værdi end væggen. Hvis spjældene desuden er utætte, vil dette især forøge varmetabet, da rumluft da kan cirkulere ud i solvæggen og afkøles der. Der er i dag ikke den store viden om det øgede varmetab, spjæld introducerer i solvægge. Det er intentionen af udvikle en simpel metode til vurdering af indflydelsen af varmetabet fra spjæld på ydelsen fra solvægge i et ansøgt projekt til Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi.

Samlet besparelse

Samlet besparelse

Den samlede årlige besparelse (varme tilført med luft + sparet varmetab (øget varmetab fra spjældene er ikke medregnet)) vil således for et lavenergi-byggeri være 17-28 kWh/m², mens det i en boligblok fra 1960-70'erne (<22-23°C) ud fra målingerne vurderes at ligge mellem 75 og 110 kWh/m².

tsbi3-beregninger

Det har ikke indenfor rammerne af projektet været muligt at opbygge og validere en model af solvæggen. I stedet sammenlignes der med tsbi3-beregninger i (Gramkow et al, 1998). tsbi3 kan ikke direkte regne på nærværende type solvæg med en luftstrøm både foran og bag absorbereren, men ud fra beregningerne er det alligevel muligt at opnå et indtryk af den forventede ydelse. Ud fra beregningerne i (Gramkow et al, 1998) forventes det, at solvæggen vil lede til en besparelse i opvarmningsbehovet på i størrelsesordenen 80-90 kWh/m² pr. år i en boligblok fra 1960-70'erne. Der er således en rimelig overensstemmelse mellem målt og forventet besparelse.

Aktuelt vejr vs. vejret et normalår

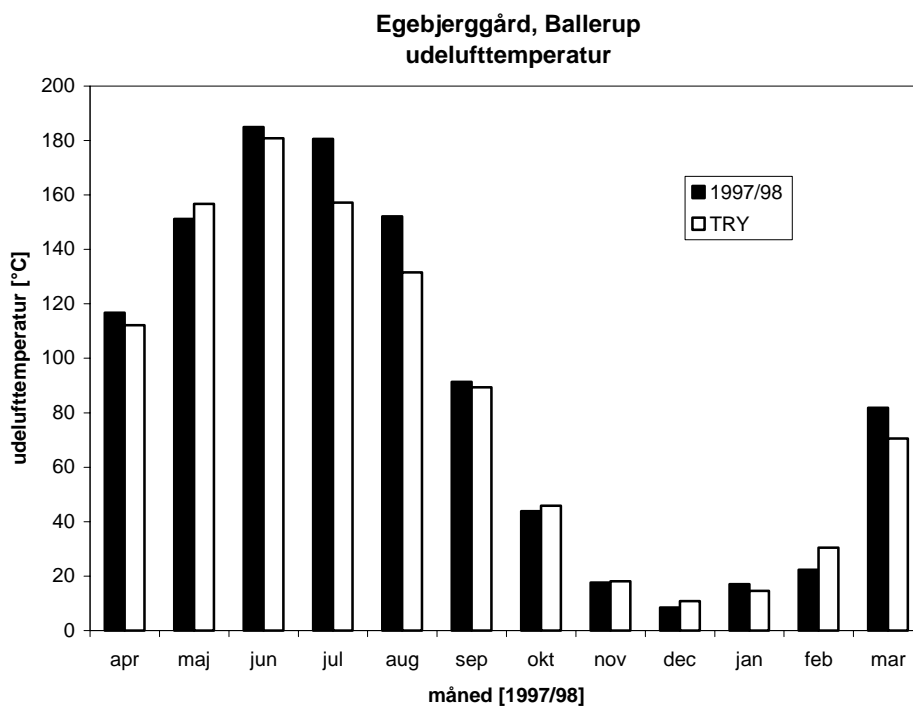
Aktuelt vejr vs. TRY

De ovenstående ydelser for solvæggen er fundet for de vejrforhold, der herskede i måleperioden. Det er derfor ikke sikkert, at de fundne ydelser er af generel karakter – dvs. at ydelserne vil være det samme for de vejrforhold, der hersker et typisk dansk år. I det følgende er det aktuelle vejr i måleperioden sammenlignet med vejret

for et normalår. Som normalår er her valgt det danske referenceår (Statens Byggeforskningsinstitut, 1982), som indeholder repræsentative vejrdata udvalgt fra 15 år.

Sammenligning

Figur 32 og 33 viser en sammenligning af det månedlige solindfald på vandret og den månedlige middel-udelufttemperaturen. Værdierne for 1997/98 stammer fra DMI's målinger på Sjælland (Energi- og Miljødata, 1998).



Figur 32. Månedlig globalt solindfald for måleperioden (1997/98) og for et normalår (TRY).

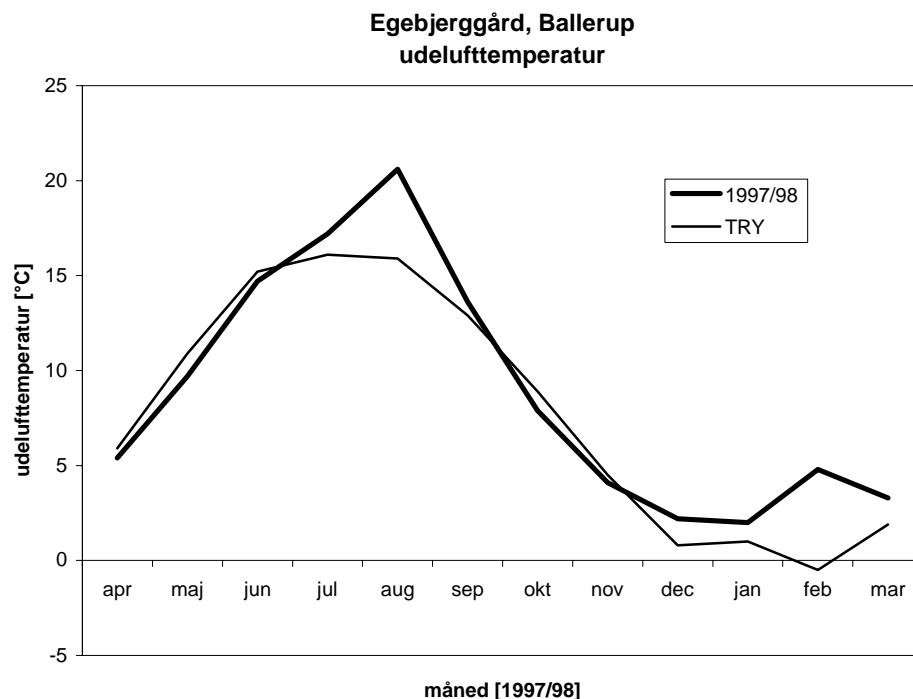
Figureerne viser en rimelig god overensstemmelse mellem det aktuelle vejr og vejret et normalår – specielt for månederne med størst ydelse (marts, april og oktober – se også figur 31). I tabel 3 er globalindstrålingen og middel-udelufttemperaturen sammenlignet dels for hele året og dels for september-maj.

	Globalt solindfald kWh/m ²		Middel-udelufttemperatur °C	
	1997/98	TRY	1997/98	TRY
Hele året	1068	1018	8.8	7.8
September - maj	550	549	5.9	5.1

Tabel 3. Globalt solindfald og middel-udelufttemperatur for måleperioden (1997/98) og for et normalår (TRY).

Repræsentativ

På baggrund af ovenstående konkluderes det, at vejret i måleperioden har været tilstrækkelig lig vejret i et normalår til, at de fundne ydelser for solvæggen er repræsentative.



Figur 33. Månedlig middel-udelufttemperatur for måleperioden (1997/98) og for et normaltår (TRY).

Sammenligning med direkte solindfald gennem vinduer

Franske døre

For at få en idé om samspillet med det direkte solindfald gennem vinduerne i stuen, sammenlignes solvæggens ydelse i det følgende med solindfaldet gennem vinduerne i den samme periode.

Direkte solindfald

Det direkte solindfald til stuen sker gennem to franske døre – en på hver side af solvæggen. Glasarealet i de franske døre udgør i alt 3,2 m². Ruderne er lavenergiruder med én lavemissiv belægning. Transmittancen af solvarme er opgivet til 0.48 (Heat Mirror med Krypton – U-værdi: 0.84 W/m²K).

Solindfaldet gennem de franske døre er fundet ved til hvert tidskridt (hvert 10. minut) at multiplicere transmittancen for solvarme med glasarealet og det udnyttelige solindfald på glasarealet. Det udnyttelige solindfald er beregnet på samme måde som det korrigerede solindfald i forbindelse med beregningen af effektiviteten – se side 28. Blot er a-værdien i tangensudtrykket på side 16 udskiftet med 3, idet der er tale om to lag glas (Nielsen, 1995). Solindfaldet gennem de franske døre er ikke korrigeret for skygeeffekten fra karm, ramme og omgivende mur. Solindfaldet er derfor specielt om morgenen og aftenen for højt.

Solindfaldet gennem de franske døre er summeret på samme måde som i forbindelse med varmen tilført stuen fra solvæggen: Dvs. kun summeret, hvis rumtemperaturen er under hensholdsvis 20, 21, 22, 23, 24, 25 og 27°C, og solindfaldet sker i fyringssæsonen. Yderligere er solindfaldet altid summeret (dog stadig under ovenstående begrænsninger) eller kun summeret i de perioder, hvor solvæggen også tilfører varme til stuen.

Sammenligning

Tabel 4 viser de beregnede solindfald gennem de franske døre sammen med varmen tilført stuen fra solvæggen. Bemærk at enheden er ændret fra kWh/m² til kWh, da solvæggen er 3.65 m², mens glasarealet i de franske døre er 3.2 m².

Årlig ydelse kWh	Afskæring						
	<20°C	<21°C	<22°C	<23°C	<24°C	<25°C	<27°C
Solvæg *	37	69	126	196	266	307	318
Franske døre **	112	196	335	473	595	659	670
Franske døre ***	894	1159	1453	1669	1822	1900	1972

Tabel 4. *Årlige ydelser for solvæggen og solindfaldet gennem de franske døre afhængig af ved hvilken rumtemperatur den leverede varme antages at være nyttig.*

* *Kun varme tilført med luften – ikke sparet varmetab.*

** *Kun solindfald, når solvæggen sender varm luft ind i stuen.*

*** *Al solindfald.*

Varmen tilført stuen fra solvæggen med den varme luft udgør 33-47 % af den del af det "udnyttelige" solindfald gennem de franske døre, der sker samtidigt med, at solvæggens spjæld er åbne. Mens den udgør 4-16 % af det totalt "udnyttelige" solindfald gennem de franske døre.

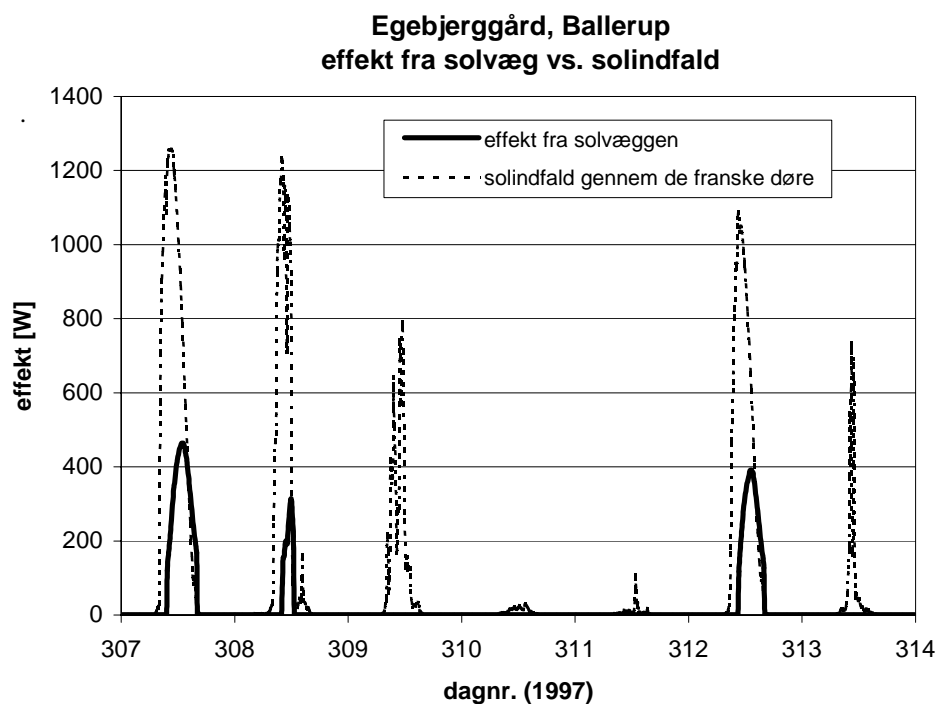
Varmetab

Solindfaldet gennem vinduerne er således væsentlig større en varmen tilført stuen fra solvæggen. I den modsatte retning trækker, at væggenes U-værdi på 0,1 W/m²K er lavere en vinduernes U-værdi på 0,84 W/m²K. En simpel beregning viser, at det årlige varmetab gennem væggen bag solvæggen vil være i størrelsesordenen 40 kWh (fratrasket det sparede varmetab fra tabel 2), mens varmetabet gennem vinduerne er omkring 240 kWh. Dvs. for at få et mere reelt billede, skal solvæggens ydelse tillægges 240-40 kWh = 200 kWh. Besparelsen udgør da 139-212% af den del af det "udnyttelige" solindfald gennem de franske døre, der sker samtidigt med, at solvæggens spjæld er åbne og rumtemperaturen er under 20-21°C. Mens den udgør 23-26 % af det totalt "udnyttelige" solindfald gennem de franske døre. I det lys giver solvæggen en ganske pæn besparelse.

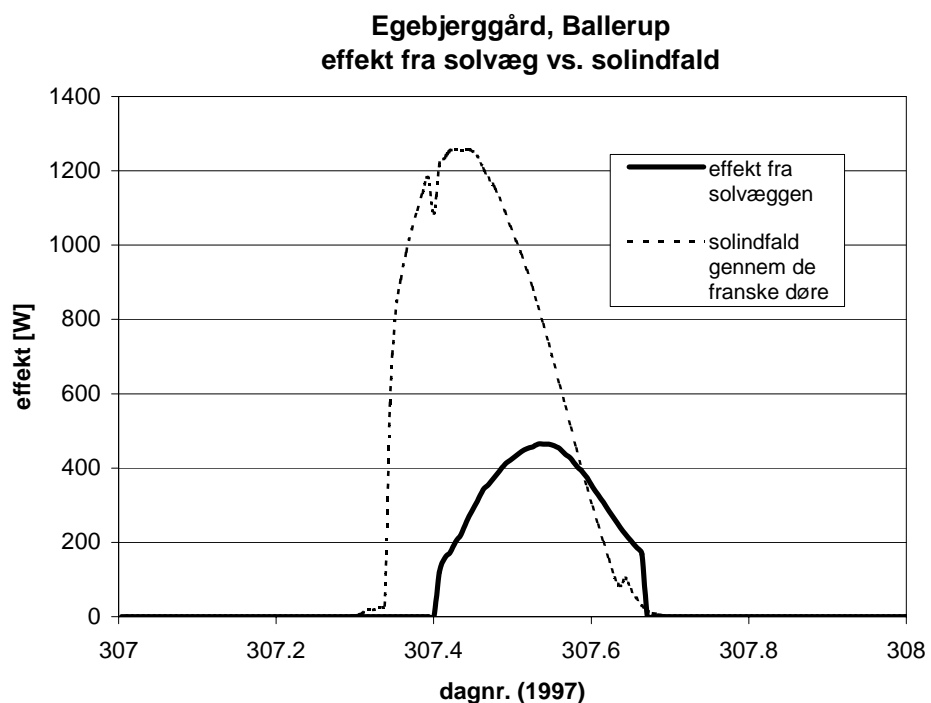
I figur 34 er solindfaldet gennem de franske døre sammenlignet med den effekt, der blev tilført fra solvæggen med den cirkulerende luft for uge 45 – 3.-9. november, 1997 (se også figur 22). Figur 35 viser d. 3. november 1997. Som det ses af specielt figur 35, er solindfaldet gennem de franske døre større end effekten tilført stuen fra solvæggen - indtil hen på eftermiddagen, hvor solindfaldet aftager, mens solvæggen på grund af den store termiske masse stadig er varm.

Tung vs. let solvæg

Hvis solvæggene ikke var termisk tunge, ville de starte med at levere varme næsten samtidig med vinduerne. Solvæggene ville således levere mere varme til bygningen med luftstrømningen, til gengæld ville der oftere opstå overophedningsproblemer i bygningen. Dvs. en mindre del af det direkte solindfald gennem vinduerne vil blive udnyttet. Forøgelsen af ydelsen fra solvæggene vil således modsvares af en tilsvarende (men dog mindre) nedgang i udnyttelsen af det direkte solindfald gennem vinduerne. Det præcise samspil er vanskelig at fastlægge - specielt ud fra målinger.



Figur 34. *Effekt tilført stuen fra solvæggen og som solindfald gennem de franske døre – d. 3.-9. november 1997.*



Figur 35. *Effekt tilført stuen fra solvæggen og som solindfald gennem de franske døre – d. 3. november 1997.*

5.4 Diskussion

Nærværende projekt er et måle- og demonstrationsprojekt. Der er ikke afsat midler til en dybere undersøgelse af solvæggens funktion med baggrund i de opnåede måleresultater.

Diskussionen af solvæggens funktion i dette afsnit vil derfor i høj grad bygge på eksisterende erfaringer.

Volumenstrøm af luft

Volumenstrømmen af luft gennem solvæggen var i gennemsnit $62 \text{ m}^3/\text{h}$, med peakværdier på op mod $90 \text{ m}^3/\text{h}$. Dette er en høj volumenstrøm. I (Gramkow et al, 1998) er en tilsvarende væg undersøgt ved hjælp af CFD (Computable Fluid Dynamic). Her når volumenstrømmen kun op på $52 \text{ m}^3/\text{h}$ en solrig dag. $90 \text{ m}^3/\text{h}$ opnås med en 5 m høj solvæg, mens dette i Thermologica-bygningen opnås med en 2.2 m høj solvæg.

Den høje volumenstrøm af luft gennem solvæggen skyldes den todelte luftstrøm på begge sider af absorberer, hvilket betydelig forøger det varmeoverførende areal i forhold til solvæggen i (Gramkow et al, 1998), der kun havde luftstrømmen foran absorberer.

Dæklag

I fremtidige projekter bør det undersøges, om dæklaget med lavemissiv belægning bør erstattes af to dæklag. Et ekstra dæklag vil reducere transmittancen af sollys, men vil til gengæld mindske varmetabet fra luftstrømmen foran absorberer. Ved to dæklag kan den lavemissive belægning, der i sig selv nedsætter transmittancen, undværes, hvilket betyder, at transmittancen kun forringes lidt i forhold til solvæggen i Egebjerggård. To dæklag uden lavemissiv belægning er dog dyrere end ét lag med lavemissiv belægning.

Max. temperaturer

En max. absorbertemperatur på under 80°C blev nået på en varm sommerdag ved en udelufttemperatur på 30°C . En overtemperatur på under 50 K er på ingen måde alarmerende. At temperaturen ikke var højere, skyldes den store termiske masse i solvæggen, samt ventilationshullerne i det øverste og nederste kantprofil.

Termisk masse

Den termiske masse bevirker, at solvæggen tilfører en mindre mængde varme med luften til stuen. Til gengæld reduceres varmetabet gennem væggen mere, idet varme gemmes i solvæggen til aftenen/natten, hvor der ofte er et opvarmningsbehov i stuen. I Thermologica er der i dagtimerne kun et beskedent varmebehov, der på dagen med solskin ofte kan dækkes af solindfaldet gennem vinduerne. Men på grund af den store isoleringstykkelse i væggen, er varmetabet gennem denne beskedent. Det har ikke været muligt at undersøge, hvordan ydelsen for solvæggen afhænger af størrelsen af den termiske masse i solvæggen. Udfra erfaringerne vurderes det, at dårligt isolerede vægge har størst gavn af en termisk masse, mens varmetabet fra godt isolerede vægge er så lille, at varmen gemt i den termiske masse vil være af minimal betydning.

Ydelse

Det er ikke muligt præcist at fastslå solvæggens ydelse i Thermologica-bygningen, idet overskudsenergien fra solvæggen er blevet brugt til forvarmning af friskluft til hele lejligheden samt til forvarmning af brugsvand, og der ikke er målt på disse systemer. Men ydelsen har været højere end de anslåede $17\text{-}28 \text{ kW}/\text{m}^2\text{år}$. Målingerne viser således, at hvis overskudsvarmen ikke udnyttes, bør solvægge til rumopvarmning overvejes nøje i lavenergibygninger. I Thermologica-bygningen blev størstedelen af overskudsvarmen fra solvæggene nyttiggjort, således at den reelle årlige ydelse sandsynligvis er op mod $80 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

Ydelsen for solvæggen (til rumopvarmning + sparet varmetab) er som forventet. For en lejlighed fra 1960-70 vil ydelsen være mellem 75 og 110 kWh/m²år.

6. Brugererfaringer

Interview	<p>Som afslutning på måleprojektet i Thermologica-huset blev beboerne i de to lejligheder (2. sal th. og tv.) med solvægge kontaktet og interviewet i juni 1998.</p> <p>Begge familier har beboet lejlighederne siden færdiggørelsen af bygningen i efteråret 1996, mens der har været nogen udskiftning i resten af bygningen.</p>
Fungerer som den skal	<p>Den ene familie gav udtryk for, at solvæggen i deres lejlighed havde fungeret, som den skulle. Dog var der en overgang problemer med spjældmotorerne, der støjede på tidspunkter, hvor spjældene ikke skulle åbne f.eks. om aftenen - uden at spjældene dog åbnede. Dette problem er gået i sig selv igen.</p>
For koldt og for varmt	<p>Den anden familie gav udtryk for at lejligheden var for kold om vinteren og for varm om sommeren, men mente dog nok, at det mere skyldes lejlighedskonceptet end solvæggen: At der ikke er radiatorer i lejligheden samt store vinduer. Denne familie er ikke blevet generet af støj fra spjældmotorerne. De registrerer, at spjældene åbner og lukker, men det er ikke generende.</p> <p>Fra andre projekter med ventilerede solvægge har der været støjproblemer (Gramkow et al, 1998). Luften i disse solvægge har i modsætning til solvæggene i Thermologica-huset været drevet af ventilatorer. Selvcirkulation i solvægge giver måske en lavere ydelse end tvungen cirkulation på grund af lavere lufthastigheder og dermed lavere varmeoverføringskoefficienter, men giver ikke anledning til støjproblemer, der kan være kraftigt generende for beboerne og derved give solvægge et dårligt ry.</p>
Ingen trækgener	<p>Ingen af familierne har registreret kuldenedfald fra solvæggens kanaler. Dette kunne ellers være tilfældet, da spjældene har en dårligere varmeisolerende evne end væggen og vinduerne.</p>

5. Referencer

- Beckman, W.A. et al, 1994. TRNSYS – A Transient System Simulation Program – Version 14.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, USA.
- Bosanac, M. og Jensen, S.Ø., 1997. In-Situ Solar Air Collector Array Test. Prøvestationen for Solenergi, DTI Energi. ISBN 87-7756-480-4.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-47-51056-4.
- Energi- og Miljødata, 1998. VE-databasen.
- Gramkow et al, 1998. 2. generations solvægge. COWI. Under udgivelse.
- Lilholm et al, 1991. Præfabrikerede ventilerede solvægge i boligbyggeriet. A/S Samfundsteknik, DTI Energi og Hvidbjerg Vinduet A/S.
- Morhenne, J. and Lagensiepen, B., 1997. Collector Modelling and Validation Report of the TRNSYS Collector Type used in TRNSAIR. Büro für Umweltverträgliche Energiesysteme. Wuppertal.
- Nielsen, J.E., 1995. Dokumentation af KVIKSOL- et program til simulering af solvarmeanlæg. Version 5.0. Prøvestationen for Solenergi, DTI Energi.
- Olsen, L., 1984. Solvarmeanlæg med bygningsintegreret varmelager. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet. Meddelelse nr. 168.
- Statens Byggeforskningsinstitut, 1982. Vejrdata for VVS og energi – Dansk referencetar TRY. SBI rapport nr. 135.