



Måling af den termiske funktion af en multifunktionel solcellegavl



SolEnergiCentret Teknologisk Institut

SEC-R-27

Måling af den termiske funktion af en multifunktionel solcellegavl

Søren Østergaard Jensen SolEnergiCentret Teknologisk Insisut

Maj 2002

Forord

Nærværende rapport afslutter SolEnergiCenter Danmarks del af projektet "Multifunktionel solcellegavl til forvarmning af friskluft", journal nr. 731327/98-0177 finansieret under Miljø & Energi Ministeriets ordning om "Statstilskud til energibesparelser m.v. i erhvervsvirksomheder". Solcellegavlen er desuden del af et EU-Thermie demonstrationsprojekt bevilliget i 1993 med titlen "Grid-PV in Valby", journal nr. SE/85/93/DK.

Denne rapport omhandler den termiske funktion af den multifunktionelle solcellegavl opsat på i Viktoriagade 10B. Målingerne på PV-panelernes elektriske funktion er afrapporteret i (Brændgaard, 2002). Solcellegavlen og ventilationssystemerne i forbindelse hermed er beskrevet i (Rasmussen et al, 2001)

Følgende har deltaget i nærværende projekt:

Søren Østergaard Jensen, civ.ing., SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut William Otto, laboratorieteknikker, SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut Ole Larsen, laboratorieteknikker, SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut Peder Vejsig Pedersen, Cenergia Energy Consultants

Forsinkelse

Solcellegavlen blev opført i efteråret 1998. Det var oprindelig tanken at opføre projektets ventilationsdel, som nærværende rapport bl.a. omhandler, lige efter montagen af solcellegavlen, men det var nødvendigt at gennemføre en række lange forhandlinger med bygningsejeren, desuden er gavlmuren en gammel brandvæg placeret i skel. Det sidste betyder, at solcellerne faktisk befinder sig på et andet matrikel. Det medførte, at selve sagsbehandlingen af etableringen af ventilationsanlæggene trak ud. Resultatet var, at de ventilationsløsninger, der skulle måles på, først kunne etableres i sommeren 2001. På dette tidspunkt var den oprindelige afslutningsfrist for projektet forlængst overskredet. Der var givet forlængelse således, at ventilationsanlæggene kunne etableres, men det var ikke muligt at måle på anlæggene indenfor den nye tidsfrist. For en nærmere redegørelse se venligst (Rasmussen, 2001). På grund at forskellige problemer – herunder regeringsskiftet i november 2001, blev der først i januar 2002 bevilget en forlængelse af projektets måledel til udgangen af maj 2002. På grund af vanskeligheder med at skaffe adgang til det rum, hvor målecomputeren var opsat (låsen var i mellemtiden skiftet ud), kunne egentlige målinger på anlægget først påbegyndes sidst i marts. Dette har betydet, at nærværende rapport hovedsagelig bygger på omkring to måneders målinger i foråret 2002.

Måling af termisk funktion af multifunktionel solcellegavl 1. udgave, 1. oplag 2002 © Teknologisk Institut 2002 Energidivisionen

ISBN: 87-7756-665-3 ISSN: 1600-3780

Indholdsfortegnelse

	Summary	3
1.	Introduktion	4
1.1.	Ventilationsanlæg på tredje sal	9
1.2.	Ventilationsanlæg på fjerde sal	10
2.	Målesystem	15
2.1.	Måling af lufttemperaturer i solcellegavlen	15
2.2.	Måling af vejrforhold	16
2.3.	Måling af temperaturer og volumenstrømme af luft i ventilationssystemerne	16
2.3.1.	Naturlig ventilation	19
2.4.	Opsamling af data	22
2.5.	Behandling af data	22
3.	Målinger	23
3.1.	Måledata for udvalgte uger	23
3.1.1.	Måledata for ventilationssystemet på tredje sal samt venstre solcellefelt	23
3.1.2.	Måledata for ventilationssystemet på fjerde sal samt højre solcellefelt	37
3.1.3.	Passive forvarmning af friskluften via friskluftventiler	50
3.2.	Generelle betragtninger på basis af målingerne	53
3.2.1	Karakterisering af de to solcellefelter	53
3.2.1.1.	Solcellefelterne som luftsolfanger	53
3.2.1.2.	Solcellefelterne som bufferzone	57
3.2.2.	Check af karakteriseringen af de to solcellefelter	60
3.2.2.1.	Det venstre solcellefelt	60
3.2.2.2.	Det højre solcellefelt	60
3.3.	Brugerkommentarer	63
4.	Beregninger	64
4.1.	Simuleringsmodel	64
4.1.1.	Indblæsningssystem på tredje sal	65
4.1.2.	Det balancerede ventilationssystem på fjerde sal	65
4.1.3.	Forvarmning af friskluft via friskluftventiler	65
4.1.4.	Sparet varmetab gennem gavlen	65
4.2.	Årlige ydelser	66
4.2.1.	Indblæsningssystem på tredje sal	66
4.2.2.	Det balancerede ventilationssystem på fjerde sal	67
4.2.3.	Forvarmning af friskluft via friskluftventiler	69
4.2.4.	Sparet varmetab gennem gavlen	70
4.3.	Samlet termisk besparelse	72
4.3.1	Eksempel 1	72
4.3.1.	Eksempel 2	72
4.4.	Elforbrug til ventilatorer	73
5.	Konklusion	74
6.	Referencer	75

Summary

A 75 m² multifunctional PV-gable has been erected on a building at Viktoriagade 10B close to the centre of Copenhagen. The PV-gable serves several purposes except for producing electricity to the grid. There is an air gap between the PV-panels and the existing wall. This air gap acts as a combination of a bufferezone and solar air collector. The air gap further cools the backside of the PV-panels in order to increase the performance of the PV-panels.

The bufferzone decreases the heat loss through the gable. Thermostat controlled fresh air intakes are located at each floor of the 5 story building in order to let in buoyancy driven preheated fresh air to the building. The PV-gable further preheats the fresh air to two mechanical ventilation systems: a fresh air intake system on the third floor and a balanced ventilation system with heat recovery on the fourth floor.

The present report deals only with the thermal performance of the PV-gable. Based on measurements on the multifunctional PV-gable and simulations with a simple computer model developed based on the measurements the following conclusions have been obtained.

- the efficiency of the PV-gable as solar air collector is at least as could be expected.
- the top of the PV-gable has the same insulating effect as traditional additional insulation with 100 mm mineral wool while the bottom of the PV-gable is half as good.
- the efficiency of the heat exchanger on the fourth floor is as high as expected: at identical volume flow rates on each side of the heat exchanger the efficiency is between 75 and 83 %. In the actual case where the flow rate of exhaust air is higher than the flow rate of fresh air the efficiency was found to be 70 %.
- based on simulations the thermal performance of the PV-gable is estimated to lay between the savings of traditional additional insulation of 100 mm mineral wool and four times the savings of traditional additional insulation depending on the chosen setpoints and volume flow rates in the system.
- it is estimated that the air gap is able to reduce the temperature of the PV-cells at the top of the PV-gable with about 20 K, which will lead to an increased performance of the PV-panels.

1. Introduktion

Den multifunktionelle solcellegavl er opsat på den sydvendte gavl af et 5 etagers baghus i Viktoriagade 10(B). Gavlen vender 22,5° væk fra syd mod øst. Figur 1.1 viser en situationsplan for en del af karreen, hvor baghuset er placeret. Figur 1.2 viser solcellefeltet på den sydvendte gavl samt resten af bygningen Viktoriagade 10B.



Figur 1.1. Situationsplan for karreen indeholdende Viktoriagade 10B (Miljøministeriet, 1986). Ikke alle bygninger i gårdrummet eksisterer i dag.



Figur 1.2. Den multifunktionelle solcellegavl samt selve bygningen i Viktoriagade 10B.

Figur 1.3 viser en tegning af bygning og solcellefelt. Som det fremgår af figur 1.3 består solcellefeltet af i alt 86 PV-paneler opsat i et asymmetrisk mønster udfra et arkitektonisk hensyn. Solcellefelter er på i alt 75 m². PV-panelerne består af monokrystalinske solceller fra Gaia Solar type SE 100 med sort baggrund. PV-panelernes nominelle ydelse er 100 W_p – dvs. en samlet nominel ydelse på 8,6 kW_p. PV-panelerne er via fem invertere i kælderen tilsluttet det offentlige el-net. Den elektriske funktion af solcellegavlen er nærmere undersøgt i (Brændgaard, 2002). Her vil kun den termiske funktion blive undersøgt.



Figur 1.3. Placeringen af de enkelte PV-paneler i solcellefeltet samt indløbsåbninger til bygning bag solcellefeltet.

Solcellefeltet er som vist med den røde lodrette streg i figur 1.3 opdelt i to separate termiske felter. Feltet til højre på ca. 17,5 m² i figur 1.3 forsyner det mekaniske ventilationssystem på fjerde sal med forvarmet friskluft – indtaget på fjerde sal er vist med den runde røde ring. Feltet på ca. 57,5 m² til venstre i figur 1.3 forsyner første-femte sal med forvarmet frisk luft gennem passive friskluftventiler. Placeringen af friskluftventilerne er i figur 1.3 angivet med fire små sorte ringe udfor første-fjerde sal samt tre ringe udfor femte sal. Desuden forsyner feltet til venstre det mekaniske ventilations system på tredje sal med forvarmet friskluft – indtaget på tredje sal er også her vist med en rund rød ring.

Den friske luft suges ind i bunden af solcellefeltet som antydet med små pile i figur 1.3. Figur 1.4 viser en del af indløbsåbningen i bunden af den multifunktionelle solcellegavl. Der er placeret et grovmasket net i indløbet for at forhinder fugle og større objekter som f.eks. blade i at komme ind i luftspalten bag PV-panelerne.



Figur 1.4. Indløbet til luftspalten bag PV-panelerne.

Kun en del af solens stråler bliver af PV-panelerne omdannet til elektricitet. Den resterende del af solindfaldet bliver omdannet til varme i solcellerne. Når den friske luft til bygningen passerer bag PV-panelerne, køles PV-panelerne, og luften opvarmes. Når den opvarmede luft anvendes som friskluft i bygningen, reduceres bygningens opvarmningsbehov. Solcellers ydelse falder med temperaturen af solcellerne – omkring 0.4% pr. K. Det er derfor fordelagtigt at køle PV-panelerne for at holde deres ydelse oppe. Etableringen af en luftstrøm bag PVpanelerne tjener derfor to formål: solcellernes ydelse stiger, og opvarmningsbehovet falder. Desuden erstatter solcellefeltet en ellers tiltrængt udvendig efterisolering af gavlen – solcellefeltet reducerer varmetabet gennem gavlen ved at etablere en bufferzone, som begrænser varmetabet i perioder med ingen eller ringe solindfald, og giver et energitilskud til bygning i perioder, hvor luften bag PV-panelerne er varmere end rumluften i bygningen, hvilket sker i perioder med højt solindfald på gavlen.

Solcellernes ydelse øges, når de køles af luftstrømmen bag PV-panelerne. Men udenfor fyringssæsonen er der ikke behov for en forvarmning af luften til bygning, hvorfor der ikke vil være en luftstrøm bag PV-panelerne. Derfor er der blevet etableret udluftning i toppen af solcellefeltet som vist i figur 1.5. Der er her placeret ventiler fra Orbesen Teknik, der åbner, når temperaturen i toppen af spalten bag PV-panelerne når en ønsket sætværdi. Herved kan der etableres naturlig ventilation af luftspalten bag PV-panelerne, som vil køle PV-panelerne.



Figur 1.5. Toppen af solcellefeltet med Orbesen-ventiler til udluftning af spalten bag PVpanelerne, når lufttemperaturen her bliver for høj.

Figur 1.6 viser to af indløbene fra spalten bag PV-panelerne til bygningen bag solcellefeltet.



Figur 1.6. To af indløbene fra spalten bag PV-panelerne gennem gavlen til den bagvedliggende bygning.

I figur 1.6 anses bagenden af de Zachomatic-ventiler, der åbner og lukker friskluftventilerne i rummet bag gavlen. Zachomatic-ventilerne består af en tallerkenventil som vist i figur 1.7, der åbnes og lukkes af en voksmotor. I voksmotoren er placeret et lille varmelegeme tilsluttet to termostater, hvis sætpunkt kan ændres af lejerne på de enkelt etager. Intentionen med Zachomatic-ventilerne er at hindre komfortproblemer i form af træk og overophedning. Ventilerne åbner således først, når luften bag PV-panelerne opnår en vis temperature og lukker igen, når luften overstiger en vis anden temperatur og omvendt, når temperaturen bag PV-panelerne falder. Figur 1.7 viser nogle at friskluftventilerne set inde fra bygningen, mens figur 1.8 viser termostaterne, der kontrollere sætpunkterne for ventilernes åbning og lukning.



Figur 1.7. Tre af friskluftventilerne på fjerde sal – før installation af det mekaniske ventilationsanlæg.



Figur 1.8. Termostater til styring af åbning og lukning af friskluftventilerne.

Bygningen har delvist indgået i en omfattende renovering af boligmassen på Vesterbro, men da bygningen indeholder erhvervslejemål og ikke boliger, var der ingen krav til renovering af netop denne bygning. Derfor er der kun udført arbejder omkring den multifunktionelle solcelle gavl, opsætning af et nyt elevatortårn, som det fremgår af figur 1.2, samt overgang til fjernvarme. Der er ikke gennemført en indvendig renovering af bygningen herunder nye vinduer og ventilationsanlæg.

Det var oprindelig tanken at installere afkastventilation i lejlighederne, således at det undertryk, afkastventilationen ville skabe, ville suge luft ind fra spalten bag PV-panelerne. Men da der ikke samtidigt blev udskiftet vinduer blev det frygtet, at det ikke ville være muligt at skabe det fornødne undertryk til at drive luftstrømmen mellem solcellegavl og bygning. Derfor blev det i stedet besluttet at afprøve to typer af ventilationsanlæg på henholdsvis tredje og fjerde sal. På tredje sal blev der installeret et indblæsningsanlæg for friskluft, mens der på fjerde sal blev installeret et balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding. De to anlæg vil blive beskrevet i det følgende.

1.1. Ventilationsanlæg på tredje sal

Figur 1.9 viser en plan over lejligheden på tredje sal herunder en tegning af ventilationsanlægget installeret her, mens figur 1.10 viser et billede af ventilationsanlægget.



Figur 1.9. Plan over tredje sal med ventilationsanlæg.



Figur 1.10. Ventilationsanlæg på tredje sal.

Ventilationsanlægget er et indblæsningsanlæg. Dvs. der blæses kun frisk luft ind i lejligheden. Den brugte luft bliver presset ud af lejligheden gennem revner og sprækker i klimaskærmen. Det kan være uheldig, hvis fugtig luft herved kondenserer inde i klimaskærmens konstruktioner. Der blæses dog kun frisk luft ind, når temperaturen i luftspalten er højere end sætpunktet for termostaten, der starter og stopper ventilatoren – se figur 1.11. Det der derfor kun en mindre del af året, hvor anlægget skaber overtryk i lejligheden. Ventilationsanlægget er udstyret med et røgspjæld for at hindre spredning af røg via ventilationsanlægget og solcellegavlen

Figur 1.11 viser kontrolpanelerne for indblæsningsanlægget. Termostaten sørger for, at ventilatoren først går i gang, når temperaturen i luftspalten bag PV-panelerne når sætværdien – under målingerne ca. 20°C. Via kontrolpanelet for volumenstrøm kan volumenstrømmen af friskluft indstilles mellem fire niveauer: 0, minimum, normal og maksimum. Disse fire værdier er ved målinger fastlagt til 0, 80, 150 og 200 m³/h.

1.2. Ventilationsanlæg på fjerde sal

Ventilationsanlægget på fjerde sal er et balanceret anlæg med både ind- og udsugning samt varmegenvinding mellem friskluft og afkastluft fra lejligheden. Figur 1.12 viser en plan over lejligheden på fjerde sal med ventilationsanlæg. Figur 1.13 og 1.14 viser billeder af ventilationsanlægget.

Afkastluften suges fra toilet og arbejdsrum, mens friskluften tilføres arbejdsrummet ca. ³/₄ inde og langt væk fra udsugningen i samme rum. Ventilationsanlægget fødes med friskluft enten fra spalten bag PV-panelerne eller direkte udefra. Det sidste for at hindre overophedning, når temperaturen bag PV-panelerne er for høj til, at luften kan anvendes som friskluft. Ventilationsanlægget har som vist i figur 1.13 også et røgspjæld ved intaget fra solcellegavlen.



Figur 1.11. Styringen for indblæsningsanlægget på tredje sal.



Figur 1.12. Plan over fjerde sal med ventilationsanlæg.



røgspjæld spjæld til valg mellem friskluft fra bag PV-panelerne og det fri Figur 1.13. Ventilationssystemet på fjerde sal.



Figur 1.14. Ventilationssystemet på fjerde sal.

Volumenstrømmene af friskluft og afkastluft styres af samme type kontrolpanel som på tredje sal. Kontrolpanelet er vist i figur 1.15. Volumenstrømmene kan som på tredje sal indstilles til fire niveauer: 0, minimum, normal og maksimum. Desuden kan anlægget køres som udelukkende afkastventilation, når der udenfor fyringssæsonen ikke er behov for forvarmning af friskluften i varmeveksleren. Tabel 1.1 viser målte ca. volumenstrømme for de fire indstillinger.



Figur 1.15. Styringen for det balancerede ventilationssystem på fjerde sal.

Indstilling	friskluft	afkast
	m³/h	m³/h
0	0	0
minimum	45	48
normal	105	125
maksimum	153	190

Tabel 1.1. Ca. volumenstrøm af luft ved de fire indstillinger af ventilationsanlægget på fjerde sal.

Intentionen var, at volumenstrømmen af friskluft skulle være 90% af volumenstrømmen af afkastluft for at skabe et mindre undertryk i lejligheden for at hindre fugtig luft i at blive presset ud i klimaskærmens konstruktioner. Balanceringen er næsten lykkedes. Ved minimum, normal og maksimum er udgør volumenstrømmen af friskluft henholdsvis 94, 84 og 81% af volumenstrømmen af afkastluft.

Varmeveksler (JoVex H300) og ventilatorer er fra firmaet AirVex. Disse er for varmevekslerens vedkommende karakteriseret ved en høj effektivitet – omkring 80% og ventilatorerne er dc-ventilatorer med lavt strømforbrug. Begge dele blev udviklet i forbindelse med EUforskningsprojektet PV-VENT. For yderligere information om disse komponenter se (Jensen, 2001a og 2001b).

2. Målesystem

Målesystemet, der beskrives i det følgende, er udelukkende anvendt til måling af de termisk forhold i solcellegavlen.

Den multifunktionelle solcellegavl er som vist i figur 1.3 lodret opdelt i to separate termiske systemer: Det største felt forsyner alle etage med forvarmet friskluft via naturlig ventilation og forvarmet friskluft til ventilationsanlægget på tredje sal, mens det mindre felt forsyner det mekaniske ventilationssystem på fjerde sal med forvarmet friskluft. Der er udført målinger på begge solcellefelter, dog er der kun målt detaljeret på ventilationssystemerne på tredje og fjerde sal.

2.1. Måling af lufttemperaturer i solcellegavlen

Figur 2.1 viser placeringen af lufttemperatursensorene i luftspalten mellem PV-panelerne og den eksisterende mur, samt placeringen af solarimetret og udelufttemperaturføleren.



Figur 2.1. Placeringen af lufttemperatursensorer bag PV-panelerne samt placeringen af solarimeter og udeluftføler.

Der er placeret lufttemperatursensorer i niveau med indløbene til alle etager (T2-T7) samt et forneden i indløbet til solcellegavlen (T1). Alle lufttemperatursensorer er PT100 klasse A følere.

Lufttemperatursensorerne er placeret midt i luftspalten mellem PV-panelerne og bagvæggen på små vinkler skruet på bagmuren som vist i figur 2.2.



Figur 2.2. Placeringen af lufttemperatursensorerne i luftmellemrummet bag PV-panelerne. Følerne fastholdes af små vinkler skruet på bagmuren. Som det ses, sidder følerne i niveau med indløbene til etagerne bag solcellegavlen.

2.2. Måling af vejrforhold

Der er anvendt et kalibreret Silkeborg Pyranometer 80-HD til måling af det totale solindfald på en flade parallel med solcellegavlen – se figur 2.1 og 2.3.

Til måling af udelufttemperaturen blev anvendt en skærmet PT100 klasse A sensor – se figur 2.1 og 2.4. For at skærme temperaturføleren fra solens opvarmning var denne placeret i en standardafskærmning bestående af to koncentriske rør med kun ringe termisk kontakt mellem føleren og det inderste rør og mellem de to rør. Det inderste rør var på indersiden sort og på ydersiden blank, mens det yderste rør også var sort på indersiden, men hvid på ydersiden.

2.3. Måling af temperaturer og volumenstrømme af luft i ventilationssystemerne

Figur 2.5 og 2.6 viser ventilationssystemerne med placeringen af målepunkter på henholdsvis 3. og 4. sal.

Som allerede nævnt blev indløbstemperaturen af den friske luft til etagerne målt i luftmellemrummet bag PV-panelerne. Herudover blev der på tredje sal – som vist i figur 2.5 - målt lufttemperaturen i rummet bag solcellegavlen. Dette blev gjort med en skærmet PT100 klasse B temperaturføler. Figur 2.7 viser placeringen af rumtemperaturføleren.



Figur 2.3. Pyranometeret – se figur 2.1 for placeringen.



Figur 2.3. Skærmet udelufttemperaturføler – se figur 2.1 for placeringen.



Figur 2.5. Ventilationssystemet på tredje sal inkl. målepunkter.



Figur 2.6. Ventilationssystemet på fjerde sal inkl. målepunkter.



Figur 2.7. Placeringen af rumtemperaturføleren i rummet på tredje sal, hvor den friske luft fra solcellegavlen bliver blæst ind (også angivet).

Volumenstrømmen af friskluft til 3. sal blev målt med en kalibreret lufthastighedsføler af typen Ventcaptor. Denne føler blev kalibreret på stedet for at opnå så høj målenøjagtighed som muligt, da det som det fremgår af figur 2.8 ikke var muligt at placerer lufthastighedsføleren et sted med veludviklet strømningsforhold. Temperaturen lige før lufthastighedsføleren blev ligeledes målt – med en klasse A PT100-temperaturføler.

På fjerde sal blev der udover indløbstemperaturen af friskluft i solcellegavlen målt temperaturer omkring ventilationssystemets varmeveksler – som vist i figur 2.6. Disse temperaturer blev målt med PT100 klasse A temperaturfølere.

På fjerde sal blev volumenstrømmen af luft ligesom på tredje sal bestemt ved hjælp af lufthastighedsfølere af typen Vencaptor – placeringen er vist i figur 2.6. Disse følere blev ligesom på tredje sal kalibreret på stedet for at opnå så høj målenøjagtighed som muligt, da det som det fremgår af figur 2.6 og 2.9-10 kun var muligt at placerer den ene lufthastighedsføler et sted med veludviklet strømningsforhold.

2.3.1. Naturlig ventilation

Luftstrømningerne bag det store solcellefelt forgår som naturlig ventilation drevet af opvarmningen af luften i spalten bag PV-panelerne. Dette er også tilfældet i det lille felt om sommeren. Det er dog desværre ikke muligt at fastlægge disse luftstrømninger ved hjælp af så relativt simpelt måludstyr, som der her er tale om. Dels er lufthastighederne relativt små - under 1 m/s, dels er luftstrømningerne meget turbulente, på grund at tværliggende træ- og aluminiumsprosser som vist i figur 2.11. PV-panelerne ligger hele vejen rundt an mod sprosser som det ses i figur 2.11-12. Der er placeret tætningsbånd mellem PV-paneler og sprosser som vist i figur 2.12 for at gøre solcellefeltet tæt.



Figur 2.8. Placeringen af lufthastighedsføleren i ventilationssystemet på tredje sal.



Figur 2.9. Placeringen af lufthastighedsføleren i afkastdelen i ventilationssystemet på fjerde sal.



Figur 2.10. Placeringen af lufthastighedsføleren i friskluftdelen i ventilationssystemet på fjerde sal.



Figur 2.11. Billedet viser de vandrette træ- og aluminiumsprosser som udgør befæstelsen for PV-panelerne. Der findes tilsvarende lodrette sprosser – se figur 2.12.

Det var ønskeligt at kunne måle, hvor stor en luft- og energimængde der bliver tilført lejlighederne fra det store solcellefelt som følge af naturlig ventilation. Det har desværre ikke været muligt, idet det er så små volumestrømme og trykdifferencer, der er tale om, og at usikkerheden på målingerne vil være i samme størrelsesorden som de målte værdier.



Figur 2.12. Vandrette og lodrette sprosser til montage af PV-panelerne.

2.4. Opsamling af data

Alle målepunkter blev koblet til en datalogger med moduler fra Analog Devices. Målepunkterne blev scannet hvert 5. sekund og midlet i 5 minutværdier på en PC's harddisk.

Dataloggeren blev styret af PC'en via software't Labteck Control. På PC'ens skærm blev løbende vist øjebliksværdier for samtlige målepunkter.

2.3. Behandlig af data

Ved hjælp af dataloggersystemet/PC'en blev de fleste af de målte værdier omsat til forståelige fysiske størrelser som temperaturer og solindfald.

Ved hjælp af kalibreringsudtrykkene er de målte værdier fra lufthastighedsfølerne senere blevet omsat til volumenstrømme af luft, ligesom den termiske ydelse for solcellegavlen og ventilationssystemerne er fundet på baggrund af de målte temperaturer og de beregnede volumenstrømme af luft.

3. Målinger

Målinger af solindfald, udelufttemperatur og temperaturer i luftspalten bag PV-panelerne blev påbegyndt i september 1998. Men dataloggersystemet var placeret i kælderen, hvor også bygningens varmesystem var placeret. Dette skulle udskiftes kort tid efter opstarten af målingerne, hvilket betød, at skabet med dataloggersystemet blev rykket rundt. Strømmen til dataloggerudstyret blev derfor tit afbrudt. Derfor er der kun målinger fra d. 10. september til d. 25. oktober, 1998. Herefter er der kun målinger fra perioderne 12.-17. november og 20.-21. december. Da ventilationssystemerne på tredje og fjerde sal lod vente på sig som forklaret i rapportens forord, og i lyset af måleprojektets begrænsede budget, blev det besluttet at udskyde de efterfølgende målinger til efter at ventilationssystemerne var blevet installeret.

Målingerne på den multifunktionelle solcellegavl blev som beskrevet i rapportens forord genoptaget i marts 2002. Egentlige målinger blev påbegyndt d. 21 marts, 2002. Da slutrapporten skulle være færdig med udgangen af maj 2002, har det kun været muligt at behandle måledata indtil 17. maj, 2002.

På grund af uheldige omstændigheder er det derfor et relativt begrænset antal måledata, der ligger til grund for rapportens konklusioner. Det vurderes dog, at selv om konklusionerne er behæftet med nogen usikkerhed på grund af det begrænsede antal måledata, giver de et realistisk billede af systemets funktion.

I nærværende kapitel behandles de opsamlede måledata. I første afsnit gives eksempler på systemernes funktion ved hjælp af måledata for udvalgte uger. I det efterfølgende afsnit konkluderes mere bredt på funktionen af systemerne ved hjælp af samtlige måledata.

3.1. Måledata for udvalgte uger

I det følgende behandles måledata for ventilationssystemet på tredje sal samt venstre solcellefelt i første afsnit, mens måledata for ventilationssystemet på fjerde sal samt højre solcellefelt behandles i det efterfølgende afsnit. Dette er gjort, fordi der ikke på de samme tidspunkter forekommer interessante målinger for de to systemer. Til sidst behandles forvarmning af friskluft til lejlighederne via friskluftventilerne.

3.1.1. Måledata for ventilationssystemet på tredje sal samt venstre solcellefelt

I det følgende vises måledata for indblæsningssystemet på tredje sal samt for det venstre solcellefelt for uge 13 og 14, 2002 (25. marts 7. april).

Figur 3.1-2 viser vejrforholdene i de to uger i form af totalt solindfald på solcellefeltet samt udelufttemperaturen foran solcellefeltet – se figur 2.3-4. De to uger var karakteriseret ved godt vejr med meget solindfald og udelufttemperaturer mellem 0 og 20°C. Specielt var uge 13 god, mens uge 14 fremviste lidt mere vekslende skydække.

Figur 3.3-4 viser lufttemperaturerne i det venstre solcellefelt. Placeringen af følerne kan ses i figur 2.1. Figur 3.5-6 viser opvarmningen af luften bag solcellefeltet – dvs. temperaturene fra figur 3.3-4 minus T1. Som det fremgår af figur 3.3, kom temperaturen øverst bag solcellefeltet sidst i marts op over 40°C. Figur 3.5-6 viser temperaturstigninger på over 25 K. Figur 3.3-

4 viser desuden, at lufttemperaturerne bag PV-panelerne altid er stratificeret – også om natten. Dette skyldes varmetabet fra bygningen til luftspalten bag PV-panelerne – se senere.



Figur 3.1. Vejrforhold i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.2. Vejrforhold i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.3. Lufttemperaturerne i luftspalten bag solcellefeltet til venstre i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Viktoriagade, København temperaturer i gavlen

Figur 3.4. Lufttemperaturerne i luftspalten bag solcellefeltet til venstre i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).

Viktoriagade, København temperaturstigninger i gavlen 30 T2-T1 25 T3-T1 T4-T1 T5-T1 temperaturstigning [K] 20 T6-T1 15 10 5 0 84 85 86 87 88 89 90 91 tid [dagnummer, 2002]

Figur 3.5. Temperaturstigning i luftspalten bag solcellefeltet til venstre i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Viktoriagade, København temperaturstigninger i gavlen

Figur 3.6. Temperaturstigning i luftspalten bag solcellefeltet til venstre i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).

Figur 3.7-8 viser forskellen mellem den målte udelufttemperatur og indløbstemperaturen til solcellefeltet. Figurerne viser, at temperaturen i bunden af solcellefeltet for det meste er højere end udelufttemperaturen – dels fordi den sidder mere skærmet bag de nederste PV-paneler, dels fordi luften her kommer nede fra gårdrumme og ikke oppe i 10-15 meters højde som er tilfældet med udelufttemperatursensoren – se figur 2.1.

I figur 3.9-3.10 er forskellen mellem lufttemperaturene bag PV-panelerne fra figur 3.3-4 og udelufttemperaturen vist for uge 13 som funktion af det udnyttelige solindfald på solcellefeltet. Det udnyttelige solindfald er det totale solindfald, der rammer solcellefeltet minus den del af solindfaldet, der reflekteres i PV-panelernes glas, når indfaldsvinklen for solstrålerne ikke er 0° .

Det totale solindfald er omregnet til udnytteligt solindfald ved at tage hensyn til reflektionen af både direkte og diffust solindfald. For at kunne gøre det, at det nødvendigt at splitte det målte totale solindfald op i direkte og diffust solindfald, hvilket er gjort ved at anvende ligningerne i (Duffie and Beckman, 1991). Der er anvendt følgende ligning til beregning af korrektionen for reflektioner:

$$k = 1 - \tan^a(\theta/2) \tag{3.1}$$

hvor θ er indfaldsvinklen for solstrålingen – den aktuelle indfaldsvinkel for det direkte solindfald og 60° for det diffuse solindfald,

a er 3,7 for et dæklag med ét lag glas (Nielsen, 1995)

k multipliceres med det beregnede direkte og diffuse solindfald før disse adderes for at opnå det udnyttelige solindfald.

I figur 3.9-10 viser hver tre temperaturforskelle for at lettere at kunne differentiere mellem de enkelte temperaturforskelle - desuden vises temperaturforskellene kun for uge 13 - temperaturforskellene for uge 14 er meget lig figur 3.9-10. I figur 3.9-10 er desuden vist regressionslinier for de enkelte temperaturforskelle. Som det ses af figur 3.9-10, ligger værdierne meget spredt omkring regressionslinierne – specielt for de høje temperaturforskelle. Dette skyldes først og fremmest varmekapaciteten i den multifunktionelle solcellegavl – både den termiske kapacitet af solcellefeltet og den termisk kapacitet af den eksisterende murstensvæg, som solcellefeltet er monteret på - se figur 2.11-12. Ved stigende solindfald bruges en del af solenergien til at varme materialerne op, mens varme frigives fra materialerne til luften ved faldende solindfald. Dette er vist i figur 3.11, som viser temperaturforskellen mellem lufttemperaturen i toppen og udelufttemperaturen hen over dag 94 (4. april, 2002) som funktion af det udnyttelige solindfald. Figur 3.9-11 viser således, hvordan den multifunktionelle solcelle gavl dynamisk opføre sig som funktion af solindfaldet. En yderligere spredning over året opstår som følge af vindpåvirkning, idet solen afsættes i PV-panelerne, som er i direkte kontakt med udeluften. Varmetabet fra solcellefeltet er derfor afhængig af vindhastigheden foran solcellefeltet. Figur 3.9-10 viser desuden, at temperaturen af luften bag PV-panelerne (bortset fra i indløbet) altid er højere end udelufttemperaturen. Dette skyldes som før nævnt varmetabet gennem den eksisterende væg.



Figur 3.7. Udelufttemperatur og indløbstemperatur til solcellefeltet til venstre i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Viktoriagade, København udelufttemperatures

Figur 3.8. Udelufttemperatur og indløbstemperatur til solcellefeltet til venstre i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.9. Temperaturforskelle mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



udnytteligt solindfald [W/m²]

Figur 3.10. Temperaturforskelle mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.11. Temperaturforskel mellem luften i toppen bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre i dag 94, 2002 (4. april). Pilene viser forløbet over dagen.

Figur 3.12-13 viser volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal. Volumenstrømmen lå i begge uger omkring 80 m³/h, hvilket vil sige, at anlægget har været indstillet til "minimum" – se afsnit 1.2.

Ved at sammenholde figur 3.12-13 med figurerne 3.3-4 er det muligt at bestemme, ved hvilken temperatur anlægget starter og stopper. Det er gjort i figur 3.14-15, hvor volumenstrømmen af luft er vist afhængig af temperaturen af luften ved indløbet til lejligheden fra gavlen. Figur 3.14-15 viser, at anlægget starter og stopper ved en temperatur på mellem 16 og 19°C. Dette er vist tydeligere i figur 3.16, hvor kun dag 94, 2002 (4. april) er vist. Her startede anlægget ved 19°C og slukkede igen ved 17-18°C. Termostaten – se figur 1.11 – var sat til ca. 20°C, så det er tilfredsstillende.

Figur 3.17-18 viser frisklufttemperaturen til tredje sal henholdsvis i luftspalten bag PVpanelerne og i kanalen inde i lejligheden - se figur 2.5. Når der ingen volumenstrøm er igennem systemet antaget luften i kanalen næsten samme temperatur som rumluften (se også figur 3.19-20), mens denne temperatur skulle være identisk med lufttemperaturen bag PVpanelerne, når der er volumenstrøm gennem systemet. Dette passer næsten også, dog er der en lille forskel mellem de to temperaturer ved volumenstrøm. Dette kan skyldes måleusikkerhed, men mere sandsynligt, at lufttemperaturen bag PV-panelerne ikke måles lige ud for indsugningen til tredje sal, som det ses ved at sammenligne figur 1.3 og 2.1. Forskellen er dog så lille, at der ikke tages hensyn til dette i det følgende.



Figur 3.12. Volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.13. Volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.14. Volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal som funktion af frisklufttemperaturen i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.15. Volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal som funktion af frisklufttemperaturen i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.16. Volumenstrømmen/massestrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal som funktion af frisklufttemperaturen for dag 94, 2002 (4. april). Pilene viser forløbet over dagen.

Figur 3.19-20 viser volumenstrømmen af luft og frisklufttemperaturen til tredje sal samt rumtemperaturen på tredje sal. Figurerne viser, at forvarmningen af den friske luft får rumtemperaturen til at stige lidt. Rumtemperaturen falder igen, når temperaturen af indblæsningsluften på grund af termostatens hysterese falder til under rumtemperaturen. Friskluft-temperturen falder dog ikke så meget, at det vil lede til komfortproblemer.

På baggrund af værdierne i figur 3.19-20 samt udelufttemperaturen er det muligt at beregne energitilførslen til rummet som følge af forvarmningen af friskluften. Dette er gjort i figur 3.21-22, hvor effekten i friskluften er beregnet på to måder: enten som hele opvarmningen fra udelufttemperaturen eller udelukkende som forskellen mellem frisklufttemperaturen og rumtemperaturen – i det sidste tilfælde antages det således, at anlægge kun virker som opvarmningsanlæg. Energitilførslen i de to uger er vist i tabel 3.1.

Energi	uge 13	uge 14
Tilført friskluften	18,1 kW/h	13,2 kW/h
Hævning af rumtemperaturen	2,9 kW/h	1,3 kW/h

Tabel 3.1. Energi tilført bygningen.

Tabel 3.1 viser helt klart, at anlægget skal anvendes til forvarmning af friskluft og ikke som et rumopvarmningssystem. Hvor stort et besparelsespotentiale, der er tale om, vil blive behandlet i det efterfølgende kapitel.



Figur 3.17. Frisklufttemperaturen til tredje sal målt i luftspalten bag PV-panelerne og i kanalen inde i lejligheden i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Viktoriagade, København temperaturer på 3. sal

Figur 3.18. Frisklufttemperaturen til tredje sal målt i luftspalten bag PV-panelerne og i kanalen inde i lejligheden i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).


Figur 3.19. Volumenstrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal samt friskluft- og rumtemperaturen i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.20. Volumenstrømmen af luft gennem indblæsningssystemet på tredje sal samt friskluft- og rumtemperaturen i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.21. Effekttilførslen til tredje sal beregnet på to forskellige måder - uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.22. Effekttilførslen til tredje sal beregnet på to forskellige måder - uge 14, 2002 (2. april – 7. april).

På baggrund af energitilførslen til friskluften i den multifunktionelle gavl fra figur 3.21-22 og det udnyttelige solindfald beregnet med ligning (3.1) er det muligt at finde effektiviteten af solcellefeltet som luftsolfanger ved hjælp af følgende udtryk:

$$\eta = Q/(E_{udnyttelig} \cdot A)$$
(3.2)

hvor Q er effektitilførslen til friskluften fra solcellefeltet,

E_{udnyttelig} er det udnyttelige solindfald,

A er arealet af solcellefeltet tilknyttet det aktuelle ventilationsanlæg: 57,5 m² for det venstre solcellefelt og 17,5 m² for det højre solcellefelt.

Ved hjælp af (3.2) er figur 3.23-34 genereret. Figurerne viser de højeste effektiviteter lige før ventilationsanlægget på tredje sal stopper, men en meget lille effektivitet midt på dagen. Om eftermiddagen er PV-paneler og den eksisterende væg blevet varmet op af solen, således at der er en overtemperatur, når solindfaldet bliver lille, hvilket leder til højere effektiviteter. Midt på dagen ved stabilt solindfald ses den "stationære" effektivitet af solcellefeltet som luftsolfanger. Denne effektivitet er meget lav på grund af solcellefeltets størrelse – 57,5 m², hvilket leder til en beskeden normaliseret volumenstrøm af luft gennem solcellefeltet: 80 m³/h / 57,5 m² = 1,3 m³/hm², hvilket er meget lavet. Normalt siger man, at volumenstrømmen gennem en luftsolfanger bør være 50 m³/hm² eller mere for at opnå en rimelig effektivitet. Effektiviteten af det venstre solcellefelt som luftsolfanger er yderligere behandlet i det efterfølgende afsnit 3.2.

Der er som vist i figur 1.5 installeret Orbesen ventiler i toppen af solcellefeltet for at sikre mod overophedning af PV-panelerne. Det har ikke været muligt direkte at måle på deres funktion. Med udfra måling af lufttemperaturen i toppen af solcellefeltet (T6 i figur 2.1) er det alligevel muligt at udtale sig om deres funktion. Figur 3.25-26 viser solindfaldet på solcellefeltet, udelufttemperturen samt lufttemperaturene bag PV-panelerne for dag 87 (28. marts) en dag med høje temperature bag PV-panelerne. Som det ses falder T6 brat lige efter kl. 12:00 uden at der sker en tilsvarende brat ændring i solindfaldet eller udelufttemperaturen. Det antages derfor, at det, der ses, er et resultat af, at Orbesen ventilerne er blevet åbnet. Kort efter det bratte fald stige T6 igen, og det formodes derfor, at Orbesen ventilerne igen er blevet lukket. Dvs. ventilerne åbner ved en temperatur på ca. 40°C og lukker igen ved ca. 37°C. Faldet i T6 forplanter sig en smule ned igennem solcellefeltet, men ikke udpræget. Et knapt så tydeligt fald ses dagen efter, hvor T6 når op på 42,5° (se figur 3.3), før der sker noget. Figurerne antyder, at det sandsynligvis er muligt at holde temperaturen bag PV-panelerne på under 45°C. Med en udelufttemperatur på 20°C betyder det, at temperaturen inde i en solcelle vil være i størrelsesordenen 55°C for de øverste PV-paneler (King et al, 1998), hvilket er rimeligt i forhold til de 70-80°C, uventilerede bygningsintegrerede solceller kan opnå i Danmark.

3.1.2. Måledata for ventilationssystemet på fjerde sal samt højre solcellefelt

I det følgende vises måledata for indblæsningssystemet på fjerde sal samt for det højre solcellefelt for uge 16 og 19/20, 2002 (15.-21. april og 8.-14. maj). Disse to "uger" er valgt, fordi ventilationssystemet på fjerde sal her har kørt med to forskellige volumenstrømme gennem anlægget.

Figur 3.27-28 viser vejrforholdene i de to uger i form at totalt solindfald på solcellefeltet samt udelufttemperaturen foran solcellefeltet – se figur 2.3-4. Den første uge var karakteriseret ved dårligt vejr med lave udelufttemperaturer og lille solindfald de første fem dage skiftende til

godt vejr med høje dagtemperaturer og meget solindfald de sidste to dage. Vejret i "uge" 19/20 var godt med høje udelufttemperaturer og meget solindfald.



Viktoriasgade, København effektivitet af venstre PV-felt som solfanger

Figur 3.23. Effektiviteten af det venstre solcellefelt i uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Viktoriagade, København effektivitet af venstre PV-felt som solfanger

Figur 3.24. Effektiviteten af det venstre solcellefelt i uge 14, 2002 (2. april – 7. april).



Figur 3.25. Solindfald og udelufttemperatur for dag 87, 2002 (28. marts).



Figur 3.26. Lufttemperaturer bag PV-panelerne for dag 87, 2002 (28. marts).



Figur 3.27. Vejrforhold i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.28. Vejrforhold i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Figur 3.29-30 viser temperaturen bag PV-panelerne ved indløbet fra gavlen til ventilationsanlægget på fjerde sal – T7 i figur 2.1. Denne temperatur er i figurerne sammenlignet med temperaturen i den tilsvarende højde bag det venstre solcellefelt (T5 i figur 2.1). Som det ses af figur 3.29-30 er T7 og T5 identiske ved solindfald, mens T7 er lidt lavere end T5 om natten og i perioder med lidt solindfald. Dette skyldes dels, at der kun suges luft fra bag det højre solcellefelt i disse perioder, samt at det venstre solcellefelt er placeret udfor bygningens bagtrappe, hvor der typisk er en lavere rumtemperatur end i lejlighederne – denne del af væggen er desuden ikke blevet indvendigt efterisoleret. Væggen mod lejlighederne er indvendigt efterisoleret med 50 mm mineraluld med en 13 mm gipsplade mod rummene. Forskellen mellem de to temperaturer er dog så lille, at der ikke vil blive taget hensyn til dette i det følgende.

Figur 3.31-32 viser volumenstrømmen af luft til og fra lejligheden på fjerde sal, mens figur 3.33-34 viser massestrømmene. I uge 16 har anlægget hovedsagelig været kørt med laveste volumestrømme, mens anlægget har kørt med "normale" volumenstrømme i uge 19/20 – se også tabel 1.1.

Figur 3.35-36 viser temperaturene til og fra varmeveksleren i systemet. Figur 3.35 viser for perioden med beskedent solindfald og relativt lave udelufttemperaturer at varmeveksleren er effektiv. Der er ikke behov for efteropvarmning af friskluften af komforthensyn, da frisklufttemperaturen efter veksleren er højere end 17°C. Ved solindfald og høje temperaturer bag solcellefeltet reducerer varmeveksleren overophedningsproblemerne, idet afkastluften køler friskluften, således at selv om friskluften til varmeveksleren er 38°C dag 133 er frisklufttemperaturen efter veksleren "kun" 30°C. Dette er dog stadig en for høj temperatur, som vil skabe overophedningsproblemer. Ved at sammenligne figur 3.30 med 3.36 for dag 133 ses det, at temperaturen af den friske luft til varmeveksleren er identisk med temperaturen af luften ude bag solcellefeltet. Der er ellers installeret en trevejsventil i indløbet (se figur 1.13), der skulle sørge for, at der tages friskluft direkte ude fra, når temperaturen bag solcellefeltet er for høj. Det vides ikke, hvad termostaten for denne trevejsventil er sat til, men det må konkluderes, at enten er termostaten sat for højt eller også virker denne sikring mod overophedning ikke.

Da alle temperature omkring varmeveksleren samt begge volumenstrømme måles, at det muligt at checke, hvor præcise målingerne på systemet egentlig er. Den varme, der er overført mellem den friske luft og afkastluften kan beregnes på to måder: enten ved hjælp af volumenstrøm og temperaturer i friskluften eller ved hjælp af volumenstrøm og temperaturer i afkastluften. De to beregnede varmestrømme skal være ens. Hvis der er en forskel, beskriver forskellen måleusikkerheden. Figur 3.37-38 viser den overførte effekt beregnet på de to ovenfornævnte måder for de to uger. Som det ses af figurerne, er der en forbavsende god overensstemmelse mellem de to måder at beregne effektioverførelsen i varmeveksleren – specielt når man tager i betragtning, hvor svært det er at måle præcist på luft og de relativt vanskelige måleforhold, der har været i dette projekt – se afsnit 2.3. Det kan derfor konkluderes, at målingerne på fjerde sal er gennemført med en meget lille måleusikkerhed. Da resten af målingerne i projektet er gennemført med samme type udstyr, montage og databehandling, antages det yderligere, at alle målingerne i nærværende projekt er meget præcise.

Med baggrund i figur 3.37-38 er det muligt at bestemme varmevekslerens effektivitet ved at dividere værdierne i figur 3.37-38 med den samlede effekt i afkastluften beregnet på basis af udsugningstemperaturen fra lejligheden og frisklufttemperaturen til varmeveksleren. Dette er vist i figur 3.39-40. I figur 3.39-40 er varmevekslerens effektivitet vist i de perioder, hvor afkasttemperaturen fra rummet er højere end frisklufttemperaturen til varmeveksleren. Der skal desuden ses bort fra de perioder, hvor en eller begge volumenstrømme har være nul eller meget lille.



Figur 3.29. Lufttemperaturerne i luftspalten bag PV-panelerne i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.30. Lufttemperaturerne i luftspalten bag PV-panelerne i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).



Figur 3.31. Volumenstrømmene af luft til og fra lejligheden på fjerde sal i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.32. Volumenstrømmene af luft til og fra lejligheden på fjerde sal i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Viktoriagade, København massestrømme af luft



Figur 3.33. Massestrømmene af luft til og fra lejligheden på fjerde sal i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.34. Massestrømmene af luft til og fra lejligheden på fjerde sal i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Viktoriagade, København temperaturer omkring varmeveksleren på 4. sal



Figur 3.35. Temperaturen af luft til og fra varmeveksleren på fjerde sal i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Viktoriagade, København temperaturer omkring varmeveksleren på 4. sal

Figur 3.36. Temperaturen af luft til og fra varmeveksleren på fjerde sal i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Viktoriagade, København effektoverførelse i varmeveksleren



Figur 3.37. Den overførte effekt i varmeveksleren på fjerde sal beregnet udfra henholdsvis friskluft- og afkastsiden i uge 16, 2002 (15. – 21. april).





tid [dagnummer, 2002]

Figur 3.38. Den overførte effekt i varmeveksleren på fjerde sal beregnet udfra henholdsvis friskluft- og afkastsiden i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Viktoriasgade, København effektivitet af varmeveksleren



Figur 3.39. Effektiviteten af varmeveksleren på fjerde sal i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.40. Effektiviteten af varmeveksleren på fjerde sal i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

Figur 3.39-40 viser, at varmevekslerens effektivitet ved begge indstillinger af volumenstrømmene ligger omkring 70 %, hvilket er rimeligt, men dog ikke specielt højt. Desuden for langt fra de forventede 80 %. Nu er effektiviteten i figur 3.39-40 ikke den effektivitet, man normalt opgiver for varmevekslere. Effektiviteten opgives normalt for en situation, hvor de to volumenstrømme er identiske, hvilket ikke er tilfældet, som det ses af figur 3.33-34. Det er dog muligt at finde denne normaliserede effektivitet. I (Hansen, Kjerulf-Jensen og Stampe, 1997) er det vist, at den normaliserede effektivitet, hvor begge volumenstrømme er lig den mindste volumenstrøm, er lig temperatureffektiviteten:

$$\eta_{1t} = (T_{1u} - T_{1i}) / (T_{2i} - T_{1i})$$
(3.3)

hvor η_{1t} er temperatureffektiviteten ved den mindste volumenstrøm,

T_{1u} er udløbstemperaturen fra varmeveksleren af den mindste volumenstrøm,

T_{1i} er indløbstemperaturen til varmeveksleren af den mindste volumenstrøm,

T_{2i} er indløbstemperaturen til varmeveksleren af den største volumenstrøm.

Den normaliserede effektivitet beregnet på basis af (3.3) er vist i figur 3.41-42. Ved at sammenligne figur 3.41-42 med figur 3.31-32 kan følgende sammenhænge mellem volumenstrøm og effektivitet:

Volumenstrøm	effektivitet
45 m³/h	83 %
115 m³/h	75 %

Tabel 3.1. Sammenhæng mellem volumenstrøm og normaliseret effektivitet for varmeveksleren.

Som det ses af tabel 3.1 opfylder varmeveksleren nogenlunde forventningen til den. I (Jensen, 2001b) er der målt på varmevekslere magen til den her anvendte. De normaliserede effektiviteter som funktion af volumenstrømmen af luft fra dette projekt er vist i figur 3.43, hvor værdierne fra tabel 3.1 også er vist. Som det ses af figur 3.43, har varmeveksleren i Viktoriagade sammen effektivitet som varmeveksleren anvendt i Lundebjerg-bebyggelsen.

Figur 3.44-45 viser den effekt, der blev tilført varmeveksleren med friskluften fra gavlen. Som det ses, sker der en ikke uvæsentlig opvarmning af luften, også når der ikke er solindfald, hvilket skyldes varmetabet gennem den eksisterende væg som forklaret i forbindelse med figur 3.9-10. Effekten tilført fra gavlen er selvfølgelig højest ved høje volumenstrømme af friskluft.

På samme måde som for det venstre solcellefelt kan effektiviteten af det højre solcellefelt som luftsolfanger også findes. Det er gjort i figur 3.46-47: Figurerne viser meget høje effektiviteter om morgenen og om eftermiddagen, men en meget lille effektivitet midt på dagen. Den høje effektivitet først på dagen skyldes, at luften bag PV-panelerne om morgenen ved lavt solindfald er højere end udeluftemperaturen på grund af varmetabet gennem den eksisterende væg. Om eftermiddagen er PV-paneler og den eksisterende væg blevet varmet op af solen, således at der er en overtemperatur, også når solindfaldet bliver meget lille. Midt på dagen ved stabilt solindfald ses den "stationære" effektivitet af solcellefeltet som luftsolfanger. Denne effektivitet er meget lav på grund af den beskedne normaliserede volumenstrøm 55 / 17,3 = 3.1 m³/h og 115 / 17,5 = 6.6 m³/h. Effektiviteten af det højre solcellefelt er yderligere behandlet i det efterfølgende afsnit 3.2.



Viktoriasgade, København effektivitet af varmeveksleren

Figur 3.41. Den normaliserede effektivitet af varmeveksleren på fjerde sal i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Viktoriagade, København effektivitet af varmeveksleren

Figur 3.42. Den normaliserede effektivitet af varmeveksleren på fjerde sal i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).



Figur 3.43. Normaliserede effektiviteter af varmeveksleren på fjerde sal Viktoriagade sammenlignet med normaliserede effektiviter på to tilsvarende varmevekslere i Lundebjerg (Jensen, 200b).

3.1.3. Passive forvarmning af friskluften via friskluftventiler

Det var som omtalt i første kapitel intentionen, at friskluft til lejlighederne ved naturlig ventilation skulle forvarmes bag solcellefeltet og ledes ind i lejlighederne på første til femte sal via termostatstyrede friskluftventiler som vist i figur 1.7.

Der er som allerede nævnt problemer med dette koncept, da der i lejlighederne på første, anden og femte sal ikke er installeret mekanisk ventilation, der kan forøge drivtrykket over solcellegavlen. På tredje sal er der installeret et indblæsningssystem, der skaber et overtryk i lejligheden. Luft vil derfor højst sandsynligt blive presset fra lejligheden ud i solcellegavlen i stedet for omvendt. På fjerde sal er der installeret balanceret ventilation, hvilket betyder, at undertrykket i denne lejlighed ikke er særligt stort.

Energibesparelsen som følge af dette system forventes derfor ikke at være særlig stor. Dette bliver behandlet i næste kapitel.

En nærmere inspektion af systemet samt interviews med lejerne på første-fjerde sal har yderligere sandsynliggjort, at systemet aldrig har været i funktion. Der er ikke lys i dioderne i systemets kontrolbokse – se figur 1.8 og lejerne har aldrig bemærket, at friskluftventilerne har været åbne.

Måledata for dette system vil derfor ikke blive gennemgået her, der henvises i stedet til figur 3.3-6, der viser lufttemperaturerne bag PV-panelerne.



Figur 3.44. Effekten tilført fjerde sal fra gavlen i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.45. Effekten tilført fjerde sal fra gavlen i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).



Figur 3.46. Effektiviteten af det højre solcellefelt i uge 16, 2002 (15. – 21. april).



Figur 3.47. Effektiviteten af det højre solcellefelt i uge 19/20, 2002 (8.-14. maj).

3.2. Generelle betragtninger på basis af målingerne

Da der kun forefindes målinger på det komplette system for perioden 21. marts – 17 maj, 2002 er det ikke muligt på baggrund af målingerne at udtale sig om den årlige termisk ydelse af den multifunktionelle solcellegavl. Det er derfor nødvendigt på baggrund i målingerne at udvikle en model af systemerne, som kan anvendes til at simulere den årlige ydelse. Men for at kunne gøre dette, er det nødvendigt at karakterisere de enkelte delkomponenter i systemet på en sådan måde, at karakteristikken kan anvendes i simuleringsværktøjet.

De to hovedkomponenter, som det er nødvendigt at karakterisere, er solcellefelternes funktion som luftsolfanger/bufferzone og varmevekslerens funktion. Funktionen af varmeveksleren er allerede fastlagt i form af figur 3.39-42 og tabel 3.1. Yderligere karakterisering af denne komponent er ikke nødvendig. Men det er ikke muligt direkte på baggrund af afsnit 3.1 at simulere funktionen af de to solcellefelter. De to solcellefelter vil derfor blive karakteriseret i det følgende.

3.2.1. Karakterisering af de to solcellefelter

Det drejer sig om en multifunktionel solcellegavl, hvor solcellefelterne tjener flere formål ud over at producere elektricitet: solcellefelterne forvarmer dels friskluften til bygningen – både aktivt og passivt (det sidste var i hvert fald intentionen), dels reducerer solcellefelterne varmetabet gennem den ydervæg, hvor de er monteret. Solcellefelterne skal således både karakteriseres som luftsolfanger og som bufferzone, hvor der i det sidste tilfælder er stor forskel på funktionen i perioder med og uden solindfald. I den følgende karakterisering er benytte samtlige måledata.

3.2.1.1. Solcellefelterne som luftsolfanger

I (Jensen, 1999) blev der udviklet en simpel metode til bestemmelse af den stationære effektivitet af luftsolfangere. Denne metode er senere valideret i (Jensen og Bosanac, 2002). Metoden går i alt sin enkelthed ud på at afbilde værdierne i figur 3.23-24 og 3.46-47 som funktion af det udnyttelige solindfald for dage med klart solskin i stedet for som en tidsserie. I en luftsolfanger vil øjeblikseffektiviteten være for høj om formiddagen ved stigende solindfald på grund af, at en del af varmen fra solen anvendes til at varme solfangeren op – omvendt om eftermiddagen med faldende solindfald, her vil varme lagret i solfangeren afgives til luftstrømmen og derved øges effektiviteten af solfangeren. Midt på dagen vil temperaturen i solfangeren være stabil, som det ses af figur 3.26. Dette vil i luftsolfangere uden meget termisk masse næsten være sammenfaldende med et tilsvarende stabilt maksimum i solindfaldet. Dette er dog ikke tilfældet i nærværende tilfælde, som figur 3.25-26 viser. Metoden vil dog alligevel blive anvendt her til at karakterisere solcellefelterne som luftsolfangere. Figur 3.48-49 viser et eksempel på fastlæggelse af effektiviteten for én dag for ét solfangerfelt, hvor volumenstrømme/massestrømmen også er vist som funktion af det udnyttelige solindfald. Den valgte dag er dag 130 (10. Maj) for det højre solcellefelt på 17,5 m². Den stationære effektivitet er vist med den blå pil i figur 3.48.

På baggrund af en gennemgang af effektiviteterne for de to solcellefelter er sammenhængen mellem volumenstrøm/massestrøm og effektivitet i tabel 3.2 fremkommet. Som det ses af tabel 3.2 samt 3.23-24 og 3.46-47 er der nogen forskel på effektiviteterne for de enkelte dage. Dette er vist med to tal udfor de enkelte volumenstrømme/massestrømme i tabel 3.2.

effektivitet [%] udnyttelig solindfald [W/m²]

Viktoriagade, København effektivitet af højre PV-felt som solfanger

Figur 3.48. Effektiviteten af det højre solcellefelt dag 130, 2002 (10. maj) som funktion af det udnyttelig solindfald.



Viktoriagade, København lufttrømme af luft til 4. sal

Figur 3.49. Total volumenstrøm/massestrøm gennem det højre solcellefelt dag 130, 2002 (10. maj) som funktion af det udnyttelig solindfald.

Solcellefelt	Volumenstrøm	Massestrøm	Effektivitet	
	m³/hm²	kg/hm²	%	
Venstre	1,3	1,6	1,1-1,5	
Højre	3,1	3,6	2,6	
Højre	6,6	7,7	5,1-7,4	

 Tabel 3.2
 Effektiviteten af solcellefelterne som luftsolfanger som funktion af volumenstrømmen/massestrømmen.

Umiddelbart ser solcellefelterne ikke ud til at være særligt effektive. Det skyldes som før nævnt, at volumenstrøm af luft gennem solcellefelterne er meget lille, som tabel 3.2 også viser. Men hvordan er effektiviteten i forhold til andre tilsvarende solcellefelter, som også fungerer som luftsolfangere. Effektiviteten af solcellefelter, der også fungerer som luftsolfangere, blev bestemt i (Jensen, 2001b) for nogle såkaldte solventilationsskorstene i Lundebjerbebyggelsen – se figur 3.50. Effektiviteten af disse felter er vist i figur 3.51 sammen med værdierne fra tabel 3.2. Kurven for Lunderbjerg er fundet for volumenstrømme over 30 m³/hm². Kurven er derfor ekstrapoleret til 0,0. Figur 3.51 antyder, at solcellefelterne i Viktoriagade er mere effektive end solventilationsskorstenene i Lundebjerg. Det skal dog erindres, at solventilationsskorstenene i Lunderbjerg er direkte eksponeret for vind, mens solcellefelterne i Viktoriagade er beliggende i en gård midt i byen og derfor mindre eksponeret for vind og bliver derfor udsat for en mindre afkøling end solventilationsskorstenene i Lundebjerg.



Figur 3.50. Solventilationsskorstene i Lundebjerg for hvilke effektiviteten vist i figur 3.51 af solcellefelterne som luftsolfangere er fundet for.

I figur 4.52 er der genereret et regressionsudtryk for værdierne i tabel 3.2. Det bedste regressionsudtryk er et opadkrum andengrads-polynomium. Dette er dog mod den fysiske karakter af luftsolfanger som har en kurve, der flader ud med stigende volumenstrøm som vist i figur 3.51 for Lundebjerg. Der er dog for få data for Viktoriagade til at kunne undersøge dette mere i detaljer. Derfor er der valgt at anvende en førstegrads-ligning som approksimation i figur 3.52. På grund af de tætte x-værdier er en ret linie en rimelig approksimation.



Figur 3.51. Effektiviteten af solventilationsskorstene i Lundebjerg samt værdierne fra tabel 3.2.



Viktoriagade, København effektivitet af solcellefelterne som luftsolfangere

Figur 3.52. Effektiviteten af solcellefelterne i Viktoriagade.

3.2.1.2. Solcellefelterne som bufferzone

Figur 3.9-10 viser funktionen af det venstre solcellefelt som bufferzone i uge 13. Figurerne viser lufttemperaturerne bag PV-panelerne som funktion af det udnyttelige solindfald. Figurerne viser samtlige målte lufttemperaturer – både med og uden solindfald. Men som det vises i det følgende, er der stor forskel på funktionen af solcellefelterne om dagen og om natten.

Solcellefelterne som bufferzone om natten

Figur 3.53-54 viser temperaturstigningerne bag PV-panelerne uden solindfald for perioden 21. marts-25. april, 2002. Tilsvarende grafer er genereret for måledataene fra 1998. Temperturstigningen er de målte lufttemperaturer T2-T6 minus udelufttemperaturen. Temperaturstigningerne er vist som funktion af udelufttemperaturen. I figur 3.53-54 er der indtegnet regressionslinier for de enkelte temperaturstigninger. Værdierne bliver ikke forbavsende mere spredte, jo højere oppe temperaturstigningen er målt bag solcellefeltet. Det skyldes den termiske masse af specielt den eksisterende murstensmur. Temperaturstigningen falder også som forventet med stigende udelufttemperatur.

På baggrund af figur 3.53-54 og de tilsvarende regressionsudtryk for 1998 er følgende sammenhæng mellem temperaturstigning og udelufttemperatur fundet:

$11 - 1_{ude} - 2, 3 - 0, 041 \cdot 1_{ude}$ (3.4)	$T1-T_{ude} = 2,3 - 0,041 \cdot T_{ude}$	(3.4)
--	--	-------

 $T2-T_{ude} = 4, 1 - 0,089 \cdot T_{ude}$ (3.5)

$T_3 - T_{max} = 5.1 - 0.089 \cdot T_{max}$	(3.6)
15 I u de = 5, I = 0,005 I u de	(5.0)

 $T4-T_{ude} = 5.8 - 0.095 \cdot T_{ude} \tag{3.7}$

$$T5-T_{ude} = 7, 2 - 0, 162 \cdot T_{ude}$$
(3.8)

$$T6-T_{ude} = 7,5 - 0,170 \cdot T_{ude}$$
(3.9)

Solcellefelterne som bufferzone om dagen

Figur 3.55-56 viser temperaturstigningerne bag PV-panelerne ved solindfald større end 10 W/m^2 . Som for om natten er der ved hjælp af figur 5.55-56 og de tilsvarende grafer for 1998 fundet en sammenhæng mellem temperaturstingningerne, men her afhængig af det udnyttelige solindfald:

$11^{-1} ude = 1, 7 = 0,0017^{-1} Ludnyttelig$ (3.10)	$T1-T_{ude} = 1,7-0,0017 \cdot E_{udnyttelig}$	(3.10)
---	--	--------

 $T2-T_{ude} = 3,3 - 0,0024 \cdot E_{udnyttelig}$ (3.11)

 $T3-T_{ude} = 4,8 - 0,0112 \cdot E_{udnyttelig}$ (3.12)

 $T4-T_{ude} = 5,3 - 0,0157 \cdot E_{udnyttelig}$ (3.13)

 $T5-T_{ude} = 6, 1 - 0,0193 \cdot E_{udnyttelig}$ (3.14)



Figur 3.53. Temperaturforskellen om natten mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre for perioden 21. marts-25. april, 2002.



Viktoriagade, København temperaturstigning i gavlen

Figur 3.54. Temperaturforskellen om natten mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre for perioden 21. marts-25. april, 2002.

Viktoriagade, København temperaturstigning i gavlen



Figur 3.55. Temperaturforskellen om dagen mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre for perioden 21. marts-25. april, 2002.



Viktoriagade, København

udnutteligt solindfald [W/m²]

Figur 3.56. Temperaturforskellen om dagen mellem luften bag PV-panelerne og udeluften for solcellefeltet til venstre for perioden 21. marts-25. april, 2002.

3.2.2. Check af karakteriseringen af de to solcellefelter

I det foregående er solcellefelterne karakteriseret som henholdsvis luftsolfanger og som bufferzone. Den fundne effektivitet som luftsolfanger er dog den stationære effektivitet, der ikke tager hensyn til den termiske masse, mens udtrykkene for temperaturstigningerne er fundet ved regression indenfor værdier med en stor spredning. Det er derfor ikke givet, at de fundne udtryk rent faktisk giver et korrekt billede af funktionen af solcellefelterne. Dette er derfor undersøgt i det følgende.

3.2.2.1. Det venstre solcellefelt

Den målte, tilførte effekt til lejligheden på tredje sal er vist i figur 3.21-22. I figur 3.57-58 er den samme målte effekt vist sammen med to måder at beregne denne effekt på:

beregnet 1:	her er anvendt effektivitetsligningen fra figur 3.52
beregnet 2:	her er anvendt ligning (3.13) til bestemmelse af indløbstemperaturen til lejligheden. Effekten er herefter beregnet ved hjælp af massestrømmen og udelufttemperaturen fra figur 3.12-13 og 3.1-2.

Som det ses af figurerne, er der en rimelig overensstemmelse mellem de to beregningsmetoder og målingerne. Dog falder den beregnede effekttilførsel for hurtigt om eftermiddagen ved beregningsmetode 1, hvilket skyldes den manglende hensyntagen til den termiske masse i gavlen. Da det i modellen er nødvendigt ved hjælp af effektivitetsudtrykket at beregne temperaturen i gavlen for at kunne bestemme, hvornår termostaten vil starte ventilationsanlægget, vil beregningsmetode 1 lede til, at ventilationsanlægget stopper for tidligt med deraf reduceret beregnet effekttilførelse til lejligheden. Derfor anvendes beregningsmetode 2 ved beregningen af den årlige ydelse i næste kapitel.

3.2.2.2. Det højre solcellefelt

Den målte, tilførte effekt til lejligheden på fjerde sal er vist i figur 3.44-45. I figur 3.59-60 er lige som for lejligheden på tredje sal vist den målte effekt sammen med de to ovenfor nævnte to måder at beregne denne effekt på i dagtimerne – dog anvendes ligning (3.14) i stedet for (3.13) i "beregnet 2". Men der suges i modsætning til tredje sal også friskluft til lejligheden på fjerde sal om natten som figur 3.31-32 viser. Derfor er effekttilførslen til lejligheden på fjerde sal også vist ved følgende beregningsmåde

```
beregnet – nat: her er anvendt ligning (3.8) til bestemmelse af indløbstemperaturen til lejligheden. Effekten er herefter beregnet ved hjælp af massestrømmen og udelufttemperaturen fra figur 3.33-34 og 3.27-28.
```

Effekttilførslen i uge 16 er kun vist for de to sidste dage, da de er de mest interessante.

De to metoder til beregning af effekttilførslen i dagtimerne viser en knap så god overensstemmelse med den målte effekttilførsel i figur 3.44-45 som i figur 3.57-58, men alligevel god nok til at kunne anvendes i de efterfølgende simuleringer. I perioder uden solindfald (når beregnet 1 giver nul) er der heller ikke perfekt overensstemmelse mellem målt effektitilførsel og effekttilførslen beregnet ved hjælp af "beregnet – nat", men ikke dog ikke helt ved siden af. Det skal desuden erindres, at "beregnet – nat" hovedsagelig er baseret på målinger fra koldere perioder – 10. september-21. december, 1998 og 21. marts-25. april, 2002. Det må derfor formodes, at overensstemmelsen i de senere beregning (næste kapitel), der omhandler fyringssæsonen, er bedre for perioderne uden solindfald, end figur 3.59-60 viser.



Figur 3.57. Målt og beregnet effekttilførsel til tredje sal - uge 13, 2002 (25. marts – 1. april).



Figur 3.58. Målt og beregnet effekttilførsel til tredje sal - uge 14, 2002 (2. april – 7. april).

Viktoriagade, København effekt fra gavlen til 4. sal



Figur 3.59. Målt og beregnet effekttilførsel til fjerde sal – to dage i uge 16, 2002 (31. marts – 1. april).



Viktoriagade, København effekt fra gavlen til 4. sal

Figur 3.60. Målt og beregnet effekttilførsel til fjerde sal - uge 19/20, 2002 (8.-14- maj).

3.3. Brugerkommentarer

I forbindelse med opsætningen og senere check af måleudstyr på tredje og fjerde sal, er lejerne på disse etager blevet spurgt om deres erfaringer med ventilationsanlæggene. Lejerne på først og anden sal er desuden blevet besøgt en enkelt gang.

Det generelle indtryk er, at lejerne ikke er blevet sat ind i funktionen af den multifunktionelle solcellegavl med tilhørende ventilationsanlæg. De viste ikke, hvordan systemerne fungerede, og hvad de kunne forvente af dem. Ved første kontakt i februar 2002 fortalte lejerne på tredje og fjerde sal samstemmende, at systemerne ikke fungerede. Lejeren på fjerde sal havde slukket for systemet, fordi han syntes at det kølede lejligheden for meget ned.

Da lejerne ikke er blevet informeret om funktionen af friskluftventilerne og det tilhørende kontrolpanel, har de ikke været i stand til at opdage, at dette system sandsynligvis ikke har været i funktion.

Lejeren på tredje sal ville egentlig hellere have, at anlægget sugede luft ud end blæste forvarmet luft ind, idet han synes, at der mere er behov for køling end opvarmning i lejligheden. Lejerne på tredje og fjerde sal siger desuden, at de synes lejlighederne er godt isoleret, samt at opvarmningsbehovet er lavt.

Lejeren på anden sal er utilfreds med ikke at have fået det ventilationsanlæg, han oprindelig var blevet lovet, og at han ikke er blevet informeret om, at projektet blev ændret til kun at indeholde ventilationsanlæg på tredje og fjerde sal.

4. Beregninger

Det er som allerede nævnt ikke muligt direkte ud fra målingerne at bestemme den årlige termiske ydelse for den multifunktionelle solcellegavl på grund af det begrænsede tidsrum, hvor der er gennemført målinger på systemet. I stedet er der på baggrund af karakteriseringen i afsnit 3.2 udviklet en simuleringsmodel, med hvilket det er muligt at beregne den årlige ydelse af de enkelte delsystemer i den multifunktionelle solcellegavl.

4.1. Simuleringsmodel

Det har ikke været muligt i projektet at opbygget en detaljeret model af bygning, ventilationssystemer og den multifunktionelle solcellegavl, hvor der tages hensyn til alle termiske processer i bygning og systemer herunder varmekapacitet i solcellegavlen og bygningens opvarmningsbehov. Simuleringsmodellen bygger i stedet på karakteriseringen af solcellefeltet som luftsolfanger/bufferzone og den fundne effektivitet for varmeveksleren på fjerde sal fra kapitel 3. Ydelsen for de nedenstående enkeltsystemer simuleres time for time, hvor vejrdata for det Dansk referenceår TRY (SBI, 1982) anvendes som inddata. Det er desuden muligt at ændre forskellige parametre for de enkelte delsystemer – f.eks. volumenstrømme af luft og temperatur-sætpunkter. Simuleringsmodellen kan regne på følgende delsystemer:

- indblæsningssystemet på tredje sal inkl. forvarmning bag solcellefeltet
- det balancerede ventilationssystem på fjerde sal inkl. varmegenvinding og forvarmning bag solcellefeltet
- forvarmning af friskluften til alle etager gennem friskluftventilerne i gavlen som følge af naturlig ventilation
- reduktionen af varmetabet genne gavlen som følge af solcellefeltet

For at muliggøre beregning af systemernes ydelse er det nødvendigt at gøre nogle simple antagelser vedr. solcellegavlen og bygningen:

- det antages, at solcellegavlen er et uendeligt varmereservoir, hvilket betyder, at det antages, at temperaturen af luften bag PV-panelerne er uafhængig af den volumenstrøm af luft, der suges fra solcellegavlen. Dette er en rimelig antagelse, så længe den samlede volumenstrøm er lille (<10 m³/hm²), hvilket er tilfældet i de fleste af de følgende beregninger.
- bygningens opvarmningsbehov beregnes ikke. I stedet beregnes systemernes ydelse kun for fyringssæsonen, som går fra d. 24. september til d. 8. maj. For yderligere at reducere ydelsen for perioder med potentielle overophedningsproblemer, udelukkes ydelser, når udelufttemperaturen er højere end 17°C, som er den udelufttemperatur, hvor danske bygninger normalt ikke har et opvarmningsbehov. Der er ikke vinduer i gavlen, så energitilførslen fra gavlen er i mindre konflikt med det direkte solindfald gennem bygningens vinduer.

I det følgende beskrives antagelserne for de enkelte delsystemer.

4.1.1. Indblæsningssystemet på tredje sal

Ydelsen for indblæsningssystemet på tredje sal er modelleret ved hjælp af ligning (3.13), når systemet kører om dagen og ligning (3.7), hvis systemet også kører om natten. I skiftet mellem dag og nat anvendes den højeste temperatur. Temperaturen fundet med de to udtryk sammenlignes med sætpunktet for anlægget. Hvis den beregnede temperatur er højere end sætpunktet, startes anlægget og energitilførslen til lejligheden beregnes. Hvis den beregnede temperatur er lavere end sætpunktet, startes anlægget ikke og energitilførslen til lejligheden sættes til 0.

Energitelførslen til lejligheden beregnes også med effektivitetsudtrykket fra figur 3.52, for at muliggøre en sammenligning mellem de to måder at beregne energitilførslen på.

4.1.2. Det balancerede ventilationssystem på fjerde sal

Ydelsen fra solcellefeltet beregnes på samme måde som for anlægget på tredje sal – dog med anvendesle af ligning (3.8) og (3.14). Herudover modeleres funktionen af varmeveksleren ved at anvende effektiviteten fundet i figur 3.39-40, hvilket vil sige 0,7 for både min. og normal volumenstrømme. De normaliserede effektiviteter fra tabel 3.1 anvendes ikke, da der er forskel mellem de to volumenstrømme. Ydelsen af ventilationsanlægget beregnes for to tilfælde:

- luften forvarmes bag solcellefeltet beregnet som beskrevet ovenfor og
- luften forvarmes ikke bag solcellefeltet her anvendes udelufttemperaturen som indløbstemperatur til varmeveksleren.

Ved at subtrahere de to måder at beregne ventilationsanlæggets ydelse på, er det muligt at fastlægge, hvor stor en del af forvarmningen bag solcellefeltet der reelt udnyttes, idet forvarmningen af luften før varmeveksleren reducere varmevekslerens ydelse.

4.1.3. Forvarmning af friskluft via friskluftventiler

Temperaturen bag PV-panelerne ud for de enkelte lejligheder beregnes i dagtimerne ved hjælp af udtrykkene (3.5)-(3.9) og om natten ved hjælp af (3.11)-(3.15). Modellen indeholder to sætpunkter for start og stop af frisklufttilførslen til lejlighederne. Når temperaturen er mellem de to sætpunkter tilføres forvarmet friskluft til lejlighederne. Volumenstrømmen af luft til lejlighederne kan varieres.

4.1.4. Sparet varmetab gennem gavlen

Temperaturen bag PV-panelerne ud for de enkelte lejligheder beregnes som beskrevet i det forrige afsnit.

Det er antaget, at den eksisterende gavlvæg er en fuldstensmur med en gennemsnitlig tykkelse på 500 mm. Det antages desuden af varmeledningsevnen for væggen er 0,7 W/Km. Væggen er indvendig mod lejlighederne efterisoleret med 50 mm mineraluld med en 13 mm gipsplade indvendigt. Dette giver en samlet U-værdi for væggen på 0,5 W/Km². Der regnes ikke med væggens varmekapacitet.

Der er kun regnet sparet varmetab gennem gavlen med det venstre solcellefelt, idet det højre solcellefelt er placeret ud for bygningens bagtrappe, hvor besparelsen derfor er meget mindre.

Udfra figur 2.1 antages det, at T2-T4 hver repræsentere lufttemperaturen bag 14 PV-paneler, T5 20 PV-paneler og T6 4 PV-paneler. Hvert panel har et areal på 0,872 m².

Besparelsen i varmetabet gennem gavlen som følge af solcellefeltet er sammenlignet med en traditionel efterisolering af gavlen med 100 mm mineraluld. Dette vil reducere gavlens Uværdi til 0,24 W/Km². Til beregning af varmetabet anvendes her udelufttemperaturen.

4.2. Årlige ydelser

I det følgende er de årlige ydelser under forskellige forudsætninger beregnet for de enkelte delsystemer.

4.2.1. Indblæsningssystemet på tredje sal

Under målingerne har anlægget været indstillet til at starte og stoppe ved ca. 20°C og volumenstrømmen af luft har være stillet på min.: 80 m³/h. I det følgende beregnes den årlige ydelse dels for denne situation dels for de to andre volumenstrømme af luft: 150 og 200 m3/h og sætpunktstemperaturen har være varieret i spring på 5 K ned til -5°C. Resultatet af disse beregninger er vist i figur 4.1. Energitilførslen til lejligheden stiger som ventet kraftigt med mindsket sætpunkt indtil 5°C og også med øget volumenstrøm. I det givne system uden eftervarmning af friskluften, vil man nok ikke anvende et lavere sætpunkt end 17°C, da der ellers kan opstå komfortproblemer i form af træk. Ved dette sætpunkt er ydelsen for de tre volumenstrømme: 290, 545 og 725 kWh/år. En eftervarmeflade i systemet vil muliggøre et lavere sætpunkt og dermed en højere ydelse for anlægget.



Viktoriagade, København

Figur 4.1. Den årlige energitilførsel til tredje sal som funktion af sætpunkt og volumenstrøm af frisk luft.

Ventilationstabet i fyringssæsonen ved udelufttemperaturer under 17°C er 2485, 4660 og 6210 kWh/år for de tre volumenstrømme af luft: 80, 150 og 200 m³/h, når det antages, at rumtemperaturen er 21°C. Figur 4.1 kan derfor omformes til figur 4.2, hvor de tre kurver bliver sammenfaldende på grund af antagelsen om, at solcellefeltet er et uendeligt reservoir. Grunden til den meget store dækningsgrad ved lave sætpunktstemperaturer i figur 4.2 er den relativt store opvarmning af luften om natten som følge af varmetabet gennem væggen.



Figur 4.2. Den årlige dækning af ventilationstabet på tredje sal som funktion af temperatursætpunkt.

Energitilførslen ved solindfald er som beskrevet i afsnit 4.1.1 beregnet på to måder: med effektivitetsudtrykket som luftsolfanger og med lufttemperaturen som bufferzone. Resultaterne i figur 4.1-2 er beregnet på den sidste måde, da figur 3.57-58 viste, at anlægget ville køre i for kort tid ved den første metode. Ved et sætpunkt på 20°C giver den første metode en ydelse, der er ca. 40% lavere end den sidste metode.

4.2.2. Det balancerede ventilationssystem på fjerde sal

Under målingerne har anlægget været indstillet til at køre både minimum og normalt luftskifte – se tabel 1.1, men ikke maximum luftskifte. Det antages i det følgende, at vekslereffektiviteten også her kan sættes til 0.7. Resultaterne af kørsler med modellen for de tre volumenstrømme er vist i tabel 4.1. Følgende resultater er vist i tabellen:

fra solfangerfelt: *ved sol:* energitilførsel når lufttemperaturen fra gavlen er højere ved brug af ligning (3.14) end ligning (3.8), *ikke sol:* omvendt af "ved sol", *i alt:* værdierne fra "ved sol" og "ikke sol" summeret.

i alt genvundet	uden: her forvarmes den friske luft til varmeveksleren ikke,
i systemet:	med: her forvarmes den friske luft til varmeveksleren - ydelsen er der-
	for den samlede ydelse af varmeveksler og solcellefelt,
	forskel: forskellen mellem "med" og "uden". Værdierne i parenteser
	er "forskel" divideret med "i alt" fra "fra solfangerfelt" og multiplice-
	ret med 100 - dvs. den procentvise udnyttelse af energitilførslen fra
	solcellegavlen
	soleenegavien

udsuget: den udsugede energimængde med afkastluften i fyringssæsonen minus perioder, hvor udelufttemperaturen er højere end 17°C.

Indstil- ling	fra solcellefelt kWh			i alt genvundet i systemet kWh			udsuget kWh
	ved sol	ikke sol	i alt	uden	med	forskel	
min	350	400	750	1045	1245	200(27)	1490
normal	815	935	1750	2720	3050	330(19)	3880
max	1185	1365	2550	4130	4540	410(16)	5900

Tabel 4.1. Beregnede ydelser for ventilationsanlæg inkl. solcellegavl på fjerde sal

Figur 4.3 viser, hvor stor en del af den solenergi, der tilføres fra gavlen, som rent faktisk bliver udnyttet. Figur 4.3 viser desuden den samlede genvindingsgrad som solcellegavl og varmeveksler giver anledning til.



Figur 4.3. Udnyttelsesgrad af solvarmen fra solcellegavlen samt total genvindingsgrad.

Middel-volumenstrømmen i figur 4.3 er gennemsnittet mellem den ind- og udsugede volumenstrøm i tabel 1.1. Figur 4.3 viser at mellem 16 og 27% af solvarmen fra solcellegavlen nyttiggøres. Figuren viser samtidigt, at genvindingsgraden er mellem 77 og 83%, hvoraf varmeveksleren alene står for de 70 procentpoint.

Figur 4.4 viser hvor stor en del af den tilførte solenergi fra gavlen, der udnyttes – både absolut og procentuelt som funktion af varmevekslerens effektivitet. Figuren viser kun situationen for "normal" volumenstrøm – se tabel 1.1. Figur 4.4 viser ikke overraskende, at al solenergien kan udnyttes, når der ingen veksler er i systemet, mens udnytteligheden af solenergien går mod nul ved stigende effektivitet af varmeveksleren.



Viktoriagade, København årlig soludnyttelse til 4. sal

Figur 4.4. Absolut og procentuel udnyttelse af solenergien fra gavlen som funktion af varmevekslerens effektivitet.

Værdierne i tabel 4.1 er beregnet med ligning (3.8) og (3.14). Hvis energitilførslen fra gavlen ved solindfald i stedet bliver beregnet med effektivitetsudtrykket i figur 3.52, vil energitilførslen under solindfald blive reduceret, men energitilførslen resten af døgnet vil stige næsten tilsvarende. Den tilførte solvarme vil kun blive reduceret med 10% i forhold til tabel 4.1. Tilsvarende vil reduktionen i den udnyttede solenergi "forskel" i tabel 4.1 kun blive reduceret med omkring 8%, mens forskellen i den totale besparelse "med" i tabel 4.1 kun er ca. 1 %.

4.3.3. Forvarmning af friskluft via friskluftventiler

Det vurderes som før nævnt, at denne facilitet af den multifunktionelle solcellegavl ikke har været i funktion. Det har derfor ikke været muligt at kalibrere modellen på baggrund af målinger. De efterfølgende beregninger er derfor behæftet med en relativ stor usikkerhed. I de efterfølgende beregninger er det antaget, at friskluftventilerne er åbne, når temperaturen af luften bag PV-panelerne er mellem 17 og 24°C for at hindre diskomfort i form af for lave og for høje frisklufttemperaturer. Desuden er volumenstrømmen af luft til lejlighederne varieret i spring på 10 m³/h fra 0 m³/h til 50 m³/h. Ud fra målinger på en solcellegavl med tilsvarende friskluftventiler i Lundebjerg-bebyggelsen (se figur 3.50), hvor der var afkastventilation i lejlighederne og dermed undertryk, vurderes det, at frisklufttilførslen gennem friskluftventilerne ikke vil overstige 50 m³/h. Da det termisk drivtryk stiger med højden af solcellefeltet, vil volumenstrømmen af luft være mindst på første sal og størst på femte sal.

Figur 4.5 viser resultatet af beregningerne. Som det ses af figuren, er det en meget lille besparelse, der er tale om – specielt for de nederste lejligheder. Hvis friskluftventilerne i stedet var åbne mellem 0 og 24°C, er besparelsen af en helt anden størrelsesorden, som figur 4.6 viser. Dette vil dog højst sandsynlig give komfortproblemer i form at træk, når frisklufttemperaturen er lav. Luften vil da falde ned mod gulvet og resultere i fodkulde langs gulvet – dog afhængig af størrelsen af den indstrømne luftmængde. Ved små volumenstrømme kan friskluften måske nå at blive mikset med rumluften, før den når gulvet og dermed ikke give komfortproblemer.



Viktoriagade, København

Figur 4.5. Årlig beregnet forvarmning af friskluft gennem friskluftventiler, hvor friskluftventilerne er åbne ved en lufttemperatur bag PV-panelerne på mellem 17 og 24°C.

4.3.4. Sparet varmetab gennem gavlen

Tabel 4.2 viser resultatet af det beregnede, sparede varmetab gennem gavlen som følge af solcellefeltet og som følge af en alternativ efterisolering med 100 mm mineraluld. Tabellen angiver det samlede sparede varmetab for hver af temperaturen T2-T6, arealet ud for hver temperatur og besparelsen pr. m². Det samme er gjort for den traditionelle efterisolering.


Viktoriagade, København passive forvarmning via friskluftventiler

Figur 4.6. Årlig beregnet forvarmning af friskluft gennem friskluftventiler, hvor friskluftventilerne er åbne ved en lufttemperatur bag PV-panelerne på mellem 0 og 24°C.

Felt	sparet varmetab kWh pr. år	areal af felt m ²	samlet varmetab kWh/m² pr. år
T2	129	12,2	10,6
T3	189	12,2	15,5
T4	219	12,2	17,9
T5	376	17,4	21,6
T6	81	3,5	23,2
Traditionel isolering	1387	57,5	24,1

Tabel 4.2. Sparet varmetab gennem gavlen som følge af solcellefeltet og traditionel isolering.

Besparelsen pr. m² stiger som ventet op gennem solcellefeltet. I toppen af solcellefeltet er besparelsen i samme størrelsesorden som traditionel efterisolering – 23 mod 24 kWh/m². Besparelsen for hele feltet er 994 kWh/år, hvilket er en del mindre end de 1387 kWh/år, som kan opnås med traditionel efterisolering. I forbindelse med en traditionel efterisolering ville man desuden dække hele gavlen og ikke kun det felt, solcellefeltet dækker. Arealet af gavlen ud for lejlighederne er ca. 10 m² større end solcellefeltet. Det betyder, at besparelsen med traditionel efterisolering ville vær 1630 kWh/år eller 64% højere end den besparelse solcellefeltet giver anledning til. Nu må denne besparelse ikke ses isoleret, da det drejer sig om en multifunktionel solcellegavl med flere termisk funktioner ud over elproduktionen. Dette behandles nærmere i næste afsnit.

4.3 Samlet termisk besparelse

Det er svært at skaffe et overblik over den samlede termiske besparelse for den multifunktionelle solcellegavl. I det følgende vil blive givet et par eksempler, hvor det skal erindres, at elproduktionen fra solcellerne, som er i størrelsesordenen 4000 kWh/år, skal lægges til:

4.3.1. Eksempel 1

Delsystem	Forudsætninger	Besparelse
3. sal:4. sal:Friskluftventiler:Sparet varmetab	80 m ³ /h, sætpunkt 17°C 45/48 m ³ /h 20 m ² /h, sætpunkter 17/24°C	290 kWh/år 200/1243 kWh/år* 171 kWh/år 994 kWh/år
Sparet i alt		1655/2698 kWh/år*

*henholdsvis kun udnyttet solvarme og både udnyttet solvarme og varmegenvinding.

I ovenstående eksempel, som må betegnes som et minimumseksempel, er den rene termiske besparelse som følge af solcellefeltet lig med besparelsen ved en traditionel efterisolering med 100 mm mineraluld, og totredjedele højere hvis besparelsen i varmeveksleren på fjerde sal inkluderes.

4.3.1. Eksempel 2

Delsystem	Forudsætninger	Besparelse
3. sal:	150 m ³ /h, sætpunkt 0°C	2109 kWh/år 408/4520 kWh/år*
4. sal: Friskluftventiler:	$50 \text{ m}^2/\text{h}$. sætpunkter $0/24^{\circ}\text{C}$	408/4339 KWII/ar* 1572 kWh/år**
Sparet varmetab		994 kWh/år

Sparet i alt

* henholdsvis kun udnyttet solvarme og både udnyttet solvarme og varmegenvinding.

** der er her ikke regnet med forvarmning via friskluftventilerne til tredje og fjerde sal, da disse har et højt luftskifte som følge af ventilationsanlæggene.

I ovenstående eksempel, som må betegnes som et maksimumseksempel, er den rene termiske besparelse som følge af solcellefeltet tre gange så høj som besparelsen ved en traditionel efterisolering med 100 mm mineraluld, og mere end fire gange højere hvis besparelsen i varmeveksleren på fjerde sal inkluderes. Her er belastningen af solcellegavlen dog så høj, at den samlede besparelse ikke er lig summen af de enkelte besparelser fundet i afsnit 4.2, idet temperaturstigningerne på grund af den store belastning vil være lavere end vist i figur 3.53-56.

^{5083/7651} kWh/år*

4.4. Elforbrug til ventilatorer

Der er som vist i figur 1.11 og 1.15 opsat elmålere til registrering af ventilatorernes elforbrug, men noget egentlig logning af effektforbruget har ikke været gennemført. Målerne blev aflæst den 7. maj 2002 – altså et lille år efter opsætningen af ventilationsanlæggene. Måleren på tredje sal viste et elforbrug på 6,8 kWh, mens måleren på fjerde sal viste 20,3 kWh, hvilket ikke er meget.

I forbindelse med målingerne på Lundebjerg-bebyggelsen (Jensen, 2001b) blev der som før nævnt målt på ventilationsanlæg magen til anlægget på fjerde sal i Viktoriagade. For et af anlæggene blev effektforbruget til ventilatorerne også målt. Figur 4.7 viser effektforbruget afhængig af den samlede volumenstrøm af både frisk- og afkastluft. De lodrette streger viser den samlede volumenstrøm for henholdsvis tredje og fjerde sal. Ved normal volumenstrøm: 150 m³/h for tredje sal og 230 m³/h for fjerde sal er effektiforbruget til ventilatorerne i følge figur 4.7 henholdsvis 23 og 36 W. Effektforbruget i figur 4.7 er ikke nul ved ingen volumenstrøm, da ventilatorerne har dc-motorer, hvor transformeren har et tomgangstab.



Figur 4.7. Effektforbruget for ventilatorerne i Lundebjerg (Jensen, 2001b) afhængig af den samlede volumenstrøm af luft.

Et effektforbug for ventilatorerne på 36 W på fjerde sal er væsentlig lavere end det maksimale effektforbrug på 87 W som bygningsreglementet som bygningsreglementet foreskriver (dog for boliger).

For de to eksempler i det foregående afsnit vil elforbruget til ventilatorerne på tredje og fjerde sal ved brug af figur 4.7 være: Eksempel 1: tredje sal 12 kWh/år og fjerde sal 80 kWh/år. Eksempel 2: tredje sal 122 kWh/år og fjerde sal 329 kWh/år. Dette svare til henholdsvis 3-6 % og 6-9 % af den termiske besparelse i de to eksempler, afhængig om man kikker på solbesparelsen alene eller den totale besparelse inkl. besparelsen som følge af varmeveksleren.

5. Konklusion

Den 75 m² multifunktionelle solcellegavl i Viktoriagade 10B blev opført i efteråret 1998. På grund af forskellige problemer og forsinkelser blev de tilhørende ventilationsanlæg først installeret i sommeren 2001. På dette tidspunkt var afslutningstidspunktet for det oprindelige projekt overskredet. Der blev først bevilget en forlængelse af projektets måledel i januar 2002 med ny afslutning 1. juni 2002. Herefter skulle de sidste følere i målesystemet først installeres. Det har derfor kun været muligt at måle på det komplette system i ca. 2 måneder i foråret 2002. Der er desuden målt på solcellegavlen alene i efteråret 1998.

Det er dog på baggrund af den beskedne mængde måledata været muligt at karakterisere de enkelte komponenter i systemet på en sådan måde, at det har været muligt at opbygge en simpel simuleringsmodel af den multifunktionelle solcellegavl.

Følgende kan konkluderes på baggrund af målinger, karakteriseringen og simuleringerne med modellen:

- solcellefeltets funktion som luftsolfanger er mindst så god som forventet.
- toppen af solcellefeltet har samme isoleringsværdi som traditionel efterisolering med 100 mm mineraluld, mens bunden er halvt så god.
- effektiviteten af varmeveksleren på fjerde sal er som forventet høj: ved samme volumenstrøm på begge sider: 75-83 % - i det aktuelle tilfælde med højere afkast end frisklufttilførsel: 70 %.
- den termiske ydelse for den multifunktionelle solcellegavl vurderes på baggrund af beregningerne at ligge et sted mellem i samme størrelsesorden og fire gange højere end traditionel efterisolering med 100 mineraluld afhængig af temperatursætpunkter og volumenstrømme af luft.
- den ventilerede luftspalte bag PV-panelerne vurderes at kunne reducere solcelletemperaturen i toppen af feltet med omkring 20 K, hvilket vil øge solcellefeltets ydelse.
- den passive forvarmning via termostatstyrede friskluftventiler har højst sandsynlig aldrig fungeret.
- trevejsventilen på fjerde sal til hindring af overophedning fungerer enten ikke, eller sætpunktet er sat for højt.
- lejerne er ikke blevet informeret tilstrækkeligt om funktionen af systemerne.

6. Referencer

- Brændgaard, T., 2002. Målerapport for elektrisk ydelse af solcelleanlæg, Vektoriagade 10 B. Københavns Energi.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons. New York. ISBN 0-47-05066-0.
- Hansen, H.E., Kjerulf, P. og Stampr, O.B. (ed), 1997. Varme og klimateknik grundbog. Danvak Aps. ISBN 87-982652-8-8.
- Jensen, S.Ø., 1999. Solar Shutter a movable solar panel. Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute. ISBN 87-7756-549-5.
- Jensen, S.Ø., 2001a. Results from measurements on the PV-VENT systems at Sundevedsgade/Tøndergade. Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute. SEC-R-15. ISBN 87-7756-614-9.
- Jensen, 2001b. Results from measurements on the PV-VENT systems at Lundebjerg. Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute. SEC-R-14. ISBN 87-7756-611-0.
- Jensen, S.Ø. and Bosanac. M., 2002. Connectable solar air collectors. Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute. ISBN 87-7756-656-4.
- King, D.L., et al, 1998. Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays. In proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Concervation. July 6-10, 1998, Vienna, Austria.
- Miljøstyrelsen, 1986. Vesterbro En forstadsbebyggelse i København II. ISBN 87-503-6102-3.
- Nielsen, J.E., 1995. Brugervejledning til KVIKSOL et program til simulering af solvarmeanlæg. Verseion 5.2. Prøvestationen for Solenergi, DTI Energi
- Rasmussen, D. et al, 2001. Multifunktionel solcellegavl til forvarmning af friskluft. Ceneria Energy Consultants og SolEnergiCentret, Teknologisk Institut Energi. ISBN 87-90314-25-5.
- SBI, 1982. Vejrdata for VVS og energi Dansk referenceår TRY. SBI rapport nr. 135.