Solassisteret ventilation

– målinger på PVT-anlæg hos Roskilde Bank



SEC-R-19

August 2001



Teknologisk Institut SolEnergiCentret

Solassisteret ventilation

- målinger på PVT-anlæg hos Roskilde Bank

SEC-R-19

August 2001

Trine Dalsgaard Jacobsen Søren Østergaard Jensen

Solassisteret Ventilation – målinger på PVT-anlæg hos Roskilde Bank SEC-R-19 1.udgave, 1. oplag 2001 © Teknologisk Institut, 2001 Energidivisionen

ISBN: 87-7756-631-9 ISSN: 1600-3780

Forord

Denne rapport beskriver SolEnergiCentrets arbejde i forbindelse med projektet "Solassisteret ventilation ved brug af solenergi-ventilationstårne til kontorbyggeri", journal nr. 731327/98-0274, der er finansieret af Energistyrelsens CO₂-program. Følgende firmaer har været involveret i projektet:

Cenergia Energy Consultants (projektleder) SolEnergiCentret, Teknologisk Institut (måleprojekt) Roskilde Bank A/S (bygherre) Gaia solar A/S (solcelleleverandør) Tage Nielsens Tegnestue A/S (arkitekt) PRO Ventilation A/S (leverandør, ventilationsanlæg) Niels Haarups Eftf. A/S (rådgiver) Broconsult (rådgiver) O. G. Consult (rådgiver) Højgaard & Schultz (byggeledelse) SolarVent (rådgiver, udformning af solcelle-ventilationskasser)

Denne rapport beskriver resultater fra målinger foretaget af SolEnergiCentret i perioden februar 2001 til juli 2001. Målingerne har haft til formål at dokumentere virkemåde og effektivitet af de to solenergi-ventilationskasser, der er opført hos Roskilde Bank.

Følgende fra SolEnergiCentret har medvirket i projektet:

Trine Dalsgaard Jacobsen, civ. ing. Søren Østergaard Jensen, civ. ing. William Otto, laboratorietekniker Ole Larsen, laboratorietekniker Lars Bo Molnit, ing. studerende

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	3
1.1	Baggrund	3
1.2	Udvikling af konceptet til erhvervsformål	3
1.3	Projektets formål	4
1.4	Beskrivelse af bygningen	4
2	Beskrivelse af systemet	7
2.1	Ventilationsanlæg	7
2.2	Solcellekasser	7
2.3	Solcellepaneler	12
2.4	Overslag over forventet ydelse fra panelerne	12
2.5	Andre solcelleudnyttelser i forbindelse med byggeriet	13
3	Målenrogram	15
J. 3 1	Målenunkter	15
3.1	Måling af veirdata	16
33	Samlet oversjøt over målenunkter	17
		17
4.	Måleresultater	19
4.1	Vejret i måleperioden	19
4.2	UI-målinger	20
4.3	Elektrisk ydelse og systemfaktor	22
4.4	Køling af solcellepanelerne	24
4.5	Solfangereffektivitet	33
4.6	Termisk ydelse.	34
4.7	Bemærkninger til målingerne	39
5.	Konklusion	40
6.	Referenceliste	42

1. Indledning

1.1 Baggrund

Udgangspunktet for det betragtede ventilationskoncept blev oprindeligt udviklet gennem et samarbejde mellem firmaerne Cenergia ApS, SolarVent, EBO Consult og det tyske specialist-firma EBÖK. Ventilationskonceptets formål var at kombinere et solassisteret ventilations-system med varmegenvinding, så det samlede anlæg ville have et kraftigt reduceret energi-forbrug, samtidig med at der sikres et forbedret indeklima.

Ventilationstårnskonceptet blev udviklet med specielt henblik på renovering af ældre etageejendomme, hvor det kan være svært i praksis at indpasse gode ventilationssystemer, f.eks. fordi det kan være svært at finde plads til de nødvendige ventilationskanaler. Ideen var at placere et ventilationstårn uden på bygningen på en arkitektonisk attraktiv måde og indbygge frisklufts- og afkastkanaler i denne tårnløsning, samtidig med at tårnets overflade kan benyttes til udnyttelse af solenergi.

Ventilationskonceptet skal give mulighed for:

- varmegenvinding vinter
- naturlig ventilation sommer
- energibesparelser, lavt elforbrug, varmegenvinding
- udnyttelse af solenergi
- bedre indeklima
- mindre konstruktion
- muligheder for brug af forskellige typer dæklag, f.eks. solceller

Ventilationstårnene er i samarbejde med Frederiksberg Boligfond opsat i de to bebyggelser Lineagården og Trekanten på Frederiksberg. I bebyggelsen Trekanten med i alt 90 lejligheder er der opsat to tårne i forbindelse med et EU-Thermie solcelle projekt "Innopex" (Innopex, 1998). I bebyggelsen Lineagården med 167 lejligheder er der opført yderligere 30 ventilationstårne i forbindelse med et EU-Thermie projekt "SunVent" (SunVent, 1998).

1.2 Udvikling af konceptet til erhvervsformål

Med dette projekt er det forsøgt at videreudvikle konceptet til erhvervsformål, hovedsageligt med ventilation af kontorbyggeri i tankerne. Ideen med ventilationskonceptet var, at det skulle kunne anvendes til alle typer kontorbyggeri, både med mekanisk ventilation med varmegenvinding og med naturlig ventilation, og såvel til nyopførte bygninger som til renoveringsopgaver.

Oprindeligt skulle ventilationstårnene opføres og afprøves i forbindelse med en kontorbygning i Kompagnistræde i København. Her kunne konceptet fra beboelserne i Lineagården og Trekanten overføres uden de store ændringer i design og virkemåde. Undervejs i projektet blev denne placering dog opgivet, og der blev fundet en ny bygherre – Roskilde Bank. Det var her nødvendigt at ændre designet, således at det arkitektonisk og funktionelt kunne indpasses i et byggeri med fladt tag. Ventilationstårnene blev derfor ændret til ventilationskasser, hvor kassens sydvendte "tagflade" består af en metalhulplade med solcellepaneler monteret udenpå. Metalhulpladen fungerer som luftsolfanger, der opvarmer ventilationsluft med varme fra solcellerne.

1.3 Projektets formål

Det overordende formål med projektet er at udvikle og demonstrere et ventilationskoncept med udnyttelse af solenergi, som skaber et bedre indeklima i danske kontorer samtidig med at energiforbruget mindskes. Ventilationskonceptet skal kunne anvendes i alle typer kontorbyggeri, såvel nybyggeri som renoveringsopgaver, og til både mekanisk og naturlig ventilation.

I dette projekt er ventilationskonceptet udformet som et PV-T anlæg, dvs. et anlæg, hvor et termisk luftsolvarmeanlæg kombineres med et solcelleanlæg med det formål at opnå maksimal mulig solenergiudnyttelse.

Denne rapport beskriver SolEnergiCentrets del af projektet, som har til formål at dokumentere hhv. den elektriske og termiske ydelse og virkemåde af ventilationskonceptet. Ydermere har målingerne til formål at undersøge, hvorvidt det valgte design er hensigtsmæssigt med hensyn til køling af solcellerne og dermed optimering af den samlede ydelse (elektrisk og termisk).

1.4 Beskrivelse af bygningen

Roskilde Bank er en lokalbank med i alt 17 filialer fordelt i området Roskilde – Ringsted – Køge. Banken har 318 ansatte, en årlig omsætning på ca. 5 mia. kr. og ejes af ca. 16000 aktionærer. Banken har hovedsæde på Algade/Hersegade i Roskilde (Roskilde Bank, 2001).

I forlængelse af hovedkontoret blev der i perioden 1999-2000 opført en tilbygning på 2000 m² kontorareal plus ca. 700 m² butiksareal. Butiksarealet i stueetagen anvendes hovedsageligt til andre forretninger end banken. De 2000 m² kontorareal er indrettet med åbne storrumskontorer, der anvendes af Roskilde Bank. Kontorerne anvendes i første omgang til ca. 100 arbejdspladser, men der er plads til i alt 150 medarbejdere (Radisch N, 2001).

Ved planlægningen af byggeriet er der bevidst arbejdet på mindskelse af energiforbruget, samt på at opnå et godt indeklima i de nye kontorer. Der er installeret balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding og køling i bygningen. Derudover er der installeret kølelofter i kontorerne. Kølebehovet er forsøgt minimeret ved hjælp af en række tiltag:

- lavenergibelysning med PIR og lysniveaustyring
- konsekvent brug af fladskærmscomputere
- placering af andre varmeafgivende kontorudstyr i "glasbure"
- udvendig solafskærmning (Blendex gardiner)
- vinduer med høj afskærmningsfaktor overfor solenergi

Opsætning af solcellepaneler og udnyttelse af overskudsvarme fra disse til forvarmning af ventilationsluft, passer dermed godt ind i Roskilde Banks strategi for den nye tilbygning.

Figur 1.1 til 1.3 viser billeder af bygningen.



Figur 1.1 Roskilde Bank – facade af den gamle bygning set fra gågaden (Algade)



Figur 1.2 Roskilde Bank – facade set fra Hersegade (den nye bygning)



Figur 1.3 Roskilde Bank – den nye bygning set fra gården. Solcellekasserne kan anes på taget

2. Beskrivelse af systemet

2.1 Ventilationsanlæg

Bygningens ventilationsanlæg fungerer ved balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding. Det er oplyst, at anlægget er dimensioneret til et luftskifte på 2,5 h⁻¹, hvilket giver en samlet luftmængde på ca. 10.000 m³/time. Indblæsningsluften køles – hvis det er nødvendigt – til 21°C.

2.2 Solcellekasser

Solcellekasserne er opbygget som en isoleret kile med en perforeret aluminiumsplade som luftsolfanger på den skrå overside. Oversiden har en hældning på ca. 15°. Solcellepanelerne er placeret udenpå denne hulplade med et luftmellemrum på ca. 5 cm. Der er i alt 24 solcellepaneler på hver solcellekasse. Hulpladen modtager varme fra solcellerne ved en kombination af konvektion pga. luftstrømninger og strålingsudveksling mellem fladerne.

Når ventilationsanlægget er aktivt, suges udeluft ind langs med kanten af solcellepanelerne og gennem de mange små huller (ca. 1,5 mm i diameter) i pladerne, hvorved der sikres en god varmeovergang mellem plade og luft. Der tages således luft ind over hele overfladen.

Opbygningen af solcellekasserne er vist i en tegning i figur 2.1 og et billede af en af kasserne er vist i figur 2.2.



Figur 2.1 Principskitse af solcellekasse



Figur 2.2 Billede af solcellekasse

I vinterperioden sørger bygningens ventilationsanlæg for at suge luft gennem solcellekasserne, hvorved solcellerne bliver kølet og friskluften forvarmet. Anlægget er dimensioneret, så kan suges i alt ca. 10.000 m³/time fra de to kasser tilsammen. Kasserne skal fungere som trykkamre med undertryk på grund af suget fra ventilationsanlægget. Dette undertryk skal bevirke, at luft suges jævnt ind gennem hulpladen. Luften skal dog udenom solcellemodulerne for at komme ned til hulpladen. Køleprincippet er vist i figur 2.3 øverst, hvor luften bevæger sig ind mellem solcellemodulerne og fordeler sig i hulrummet mellem moduler og hulpladen, hvorefter den bliver suget ind gennem hulpladen.

Hvis luften skal bevæge sig ind i kassen helt jævnt bag solcellemodulerne vil et volumenflow på ca. 5.000 m³/time fra hver kasse kun bevirke en lufthastighed på ca. 0,06 m/s bag ved solcellerne. Dette er meget lavt med henblik på en ensartet køling af modulerne, til gengæld betyder det også, at tryktabet i lufthulrummet er meget lille. Det lave tryktab i hulrummet i forhold til et større trykfald over hulpladen er medvirkede til, at luften vil fordele sig jævnt over hulpladen. Det er dog usikkert, hvorvidt luften vil kunne køle solcellerne jævnt på grund af den lave hastighed i hulrummet.

I sommerperioden er der ikke behov for forvarmning af friskluft til bygningen, og friskluft til bygningen hentes derfor gennem et bypass. Solcellekasserne skal i dette tilfælde køles naturligt ved hjælp af vindpåvirkninger og termiske forhold. Der er installeret udluftningsspjæld i kasserne til at øge ventilationen af disse i sommerperioden (figur 2.3 nederst).

Da luftspalten mellem solceller og hulplade er ca. 5 cm bred og forholdsvis åben ud til udeklimaet må det forventes, at vindforhold eller termisk opdrift vil kunne skabe andre luftstrømninger omkring solcellerne end de planlagte (f.eks. som vist i figur 2.3 midt). Figur 2.3 viser forskellige mulige strømninger omkring solcellemodulerne og i lufthulrummet over hulpladen. Det må forventes, at de resulterende luftbevægelser vil være blandinger af forskellige strømninger - både i vinter og sommersituationen.



Figur 2.3 Forskellige mulige luftstrømninger omkring solcellepaneler

Kasserne er desuden ikke lufttætte på de andre flader end hulpladen, og en del luft vil derfor kunne blive suget ind gennem disse utætheder i stedet for gennem hulpladen. Dette vil nedsætte både den termiske ydelse og kølingen af solcellemodulerne. Figur 2.4 viser et billede inde fra en af kasserne, hvor det bl.a. kan ses, at kassen ikke slutter tæt forneden.



Figur 2.4 Solcellekasse set indefra. Kassen er ikke lufttæt, hvilket bl.a. kan ses for neden af hulpladen. Luftindsuget til ventilationsanlægget ses til venstre.

De to solcellekasser er principielt opbygget ens, men der er på bagsiden af solcellepanelerne på den ene kasse monteret køleribber af aluminium. Køleribberne skal forøge varmeovergangen fra solceller til luft, hvorved såvel den termiske som den elektriske ydelse kan forøges. De to solcellekasser kaldes hhv. for panel A og panel B, hvor

- Panel A: med køleribber
- Panel B: uden køleribber

Køleribberne er skiftevis U-profiler og T-profiler, der er limet på bagsiden af solcellepanelet. Profilerne er 50 mm høje og er placeret med gennemsnitligt ca. 30 mm mellemrum. Et billede af bagsiden af et solcellepanel med køleribber er vist i figur 2.5.



Figur 2.5 Bagside af solcellepanel med pålimede køleribber

Solcellekasserne er placeret på bygningens flade tag, som vist på figur 2.6.



Figur 2.6 Placering af solcellekasserne, hhv. panel A og B på bankens tag

2.3 Solcellepaneler

Hver kasse har i alt 24 solcellepaneler bestående af polykrystallinske siliciumceller. Fabrikantopysninger for et enkelt solcellepanel er som følger, idet de elektriske egenskaber er gældende for standard testbetingelser (STC), dvs. en indstråling på 1000 W/m² og en celletemperatur på 25° C:

dimensioner:	1328 x 710 mm
max PP effekt:	98 W
max PP spænding:	34 V
max PP strøm:	2,9 A
tomgangsspænding:	43 V
kortslutningsstrøm:	3,1 A

Den nominelle effektivitet for et enkelt solcellepanel ved standard testbetingelser er dermed ca. 10%. Hvert modul er ca. 0,94 m², hvilket giver et samlet solcelleareal på 22,6 m² i hvert panel. Temperaturafhængigheden for et enkelt modul er af fabrikanten opgivet til -0,4%/°C.

Solcellepanelerne er nettilsluttede, og de to solcellekasser er tilsluttet hver sin vekselretter af typen ASP Top Class GRID (TC 2500 III).

2.4 Overslag over forventet ydelse fra panelerne

Der er foretaget en overslagsberegning for elektrisk ydelse pr. solcellepanel på baggrund af metoden angivet i (Ahm P. et al, 1999):

samlet areal af solceller i panel:	$22,6 \text{ m}^2$
peak effekt pr. modul:	98 W
samlet installeret effekt (24 moduler x 98 W):	2352 W
Systemfaktor, gennemsnitsanlæg, fritstående:	0,7
Årlig solindstråling på flade stik syd, 45° hældning:	1163 kWh/m ²
Årlig solindstråling på flade stik syd, 15° hældning:	1097 kWh/m ²

Systemfaktoren tager hensyn til temperaturindflydelse, forskelle i de enkelte modulers ydelse og dermed koblingsrelaterede påvirkninger af ydelsen, tab i kabler og vekselretter osv. Systemfaktoren er dermed en faktor, der beskriver det samlede anlægs reelle virkemåde i forhold til det teoretisk optimale anlæg.

Ud fra ovennævnte data fås, at hvert solcellepanel bør yde ca. 1806 kWh/år, idet hældningen på panelerne er ca. 15°. Hvis hældningen var 45° burde panelerne hver yde ca. 1915 kWh/år. Den lave hældning medfører dermed en knap 6% lavere ydelse end en optimal placering.

Den forventede termiske ydelse er i projektansøgningen opgjort til 150 kWh/m², hvilket giver en samlet ydelse fra de to kasser tilsammen på:

Elydelse:	3.600 kWh
Varmeydelse:	6.720 kWh

Total energiydelse: 10.320 kWh

2.5 Andre solcelleudnyttelser i forbindelse med byggeriet

Udover de to solcellekasser, der er forbundet til bygningens ventilationsanlæg, er der i forbindelse med Roskilde Bank anvendt solceller i en række ovenlysvinduer (vist i figur 2.7 og 2.8), samt i form af et par forsøgspaneler (figur 2.9), der kan indstilles i orientering og hældning. Det ene forsøgspanel er forsynet med køleribber, tilsvarende solcellerne i panel A.



Figur 2.7 Solceller integreret i ovenlysvinduer



Figur 2.8 Ovenlysvinduer med solceller set indefra



Figur 2.9 To forsøgspaneler opsat på bygningens tag.

3. Måleprogram

Formålet med målingerne er at fastlægge følgende forhold:

- solcellernes elektriske ydelse
- effekten af koblingen med ventilationsanlægget på køling af solcellerne
- effekten af køleribber på bagsiden af solcellemoduler
- solcellekassernes termiske ydelse bidrag til forvarmning af ventilationsluft

Der er kun foretaget målinger i og omkring solcellekasserne, mens bygningens øvrige ventilationssystem ikke er inkluderet i måleprojektet.

3.1 Målepunkter

Der er placeret i alt 5 termofølere (PT100 type A) i hver solcellekasse. To af følerne er placeret som overfladefølere på bagsiden af et af de 24 solcellepaneler, andre to følere er placeret i lufthulrummet mellem solcellepaneler og hulplade, mens den sidste føler er placeret i udsugningen fra kassen til ventilationsanlægget. Placeringen af temperaturfølerne er vist i figur 3.1. Følerne på bagsiden af solcellepanelet og i hulrummet er placeret hhv. midt bag solcellepanelet og i hjørnet af dette, som vist på figur 3.2.



Figur 3.1 Placering af temperaturmålepunkter i solcellekasse



Figur 3.2 Placering af temperaturmålepunkter i forhold til solcellepanel

Denne placering af temperaturfølere giver mulighed for en vurdering af kølingen af solcellemodulerne, samt af bidraget til forvarmning af ventilationsluften.

Desuden måles lufthastigheden i kanelerne fra hver kasse med kalibrerede lufthastighedsfølere af typen VentCaptor. Placeringen af disse er vist på figur 3.3. Derved kan luftmængder og dermed varmetilskuddet beregnes.



Figur 3.3 Placering af lufthastighedsfølere i ventilationskanaler

3.2 Måling af vejrdata

Til registrering af udeklima er anvendt et kalibreret solarimeter af typen Eppley PSP til bestemmelse af det totale solindfald, samt en beskyttet temperaturføler (T100 type A) til bestemmelse af omgivelsernes temperatur. Solarimeteret blev umiddelbart inden opsætning på Roskilde Bank kalibreret hos SP (Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut). Solarimeteret er placeret umiddelbart ved siden af panel B og i samme hældning som dette (15°) (figur 3.4). Udetemperaturføleren er placeret på nordsiden af panel B og dermed i skygge fra dette (figur 3.5).



Figur 3.4 Placering af solarimeter ved panel B



Figur 3.5 Placering af beskyttet udetemperaturføler i skyggen af panel B

3.3 Samlet oversigt over målepunkter

Solcellepanel A: i alt 5 sensorer:

Sensor	Sensortype	Signal	Navn
overflade midt A	PT100	PT100	T A1
overflade hjørne A	PT100	PT100	T A2
lufttemp. midt A	PT100	PT100	T A3
lufttemp. hjørne A	PT100	PT100	T A4
luft fra panel A	PT100	PT100	T A5

Solcellepanel B: i alt 5 sensorer:

Sensor	Sensortype	Signal	Navn
overflade midt B	PT100	PT100	T B1
overflade hjørne B	PT100	PT100	T B2
lufttemp. midt B	PT100	PT100	T B3
lufttemp. hjørne B	PT100	PT100	T B4
luft fra panel B	PT100	PT100	T B5

Ventilationskanaler: i alt 2 sensorer:

Sensor	Sensortype	Signal	Navn
lufthastighed A	VentCaptor	4-20 mA	luft A
lufthastighed B	VentCaptor	4-20 mA	luft B

Udeklima: i alt 2 sensorer:

Sensor	Sensortype	Signal	Navn
Omg. temperatur	PT100	PT100	T omg.
Solindfald	solarimeter	mV	Sol

Vekselrettere: i alt 2 sensorer:

Sensor	Sensortype	Signal	Navn
kWh-tæller A	-	puls	solcelle A
kWh-tæller B	-	puls	solcelle B

4. Måleresultater

Den samlede måleperiode har været fra 9. februar 2001 til 30. juli 2001. I starten blev der dog kun målt temperaturer og lufthastigheder, idet solcellerne på starttidspunktet endnu ikke var elektrisk tilkoblede. Panelerne fungerede dog som termiske solfangere, idet ventilationsanlægget var tilkoblet og aktivt. Solcellerne fungerede først elektrisk stabilt ca. 1. april.

4.1 Vejret i måleperioden

På baggrund af informationer fra DMI (DMI, 2001) kan vejret i foråret og sommeren 2001 vurderes i forhold til et normalår. Vejrdata på månedsbasis er angivet i tabel 4.1.

	middeltemperatur	middeltemperatur	antal soltimer	antal soltimer
	2001	normalår	2001	normalår
februar	0,5	0	85	71
marts	1,1	2,1	124	117
april	5,6	5,7	153	178
maj	11,4	10,8	301	240
juni	12,8	14,3	248	249
juli	17,5	15,6	312	236

Tabel 4.1Vejrforhold i forår og sommer, 2001 (DMI, 2001)

Samlet set har der fra februar til og med juli måned været i alt 1223 solskinstimer mod 1091 timer i et normalår. Det er ca. 12% mere end normalåret. I perioden fra 1. april, hvor solcellepanelerne har været elektrisk aktive, har antallet af solskinstimer været 1014 mod normalt 903, hvilket ligeledes svarer til ca. 12% mere end normalåret.

Solindfaldet på en sydvendt flade med en hældning på 15° er på et normalår ca. 1097 kWh/m². Solindfaldet er fordelt over årets måneder som angivet i tabel 4.2.

Måned	procentvis solindfald %	
januar	1,7	
februar	4,0	
marts	6,0	
april	11,6	
maj	14,3	
juni	16,8	
juli	14,7	
august	13,1	
september	8,6	
oktober	5,0	
november	2,5	
december	1,8	
I alt	100	

Tabel 4.2Procentvis fordeling af solindfald over årets måneder

4.2 UI-målinger

Der er foretaget UI-målinger ved indgangen til hver af de to vekselrettere for de to solcellekasser, med det formål at fastlægge solcellepanelernes karakteristik. UI-kurverne gælder dermed for hver kasse med i alt 24 solcellepaneler tilsammen. En UI-kurve viser sammenhængen mellem panelets strøm- og spændingsniveau og kan bl.a. anvendes til fastlæggelse af "MaxPP - Maximum Power Point", det strøm/spændingsniveau, hvor solcellerne yder mest.

Ydermere kan UI-målingerne anvendes til bestemmelse af den nominelle ydelse samt panelets effektivitet ved standardbetingelser. De målte værdier ved UI-testen er alle omregnet til standard testbetingelser, dvs. en solindstråling på 1000 W/m² og en celletemperatur på 25°C. De målte resultater er listet i tabel 4.3 og 4.4, mens UI-kurverne er optegnet i figur 4.1 og 4.2.

	Målt nominel/peak effekt	Installeret nominel effekt	Afvigelse
Panel A	1959	2352	-393 W (-17%)
Panel B	1969	2352	-383 W (-16%)

Den målte nominelle effekt er dermed for begge paneler noget lavere end den installerede effekt. Dette kan skyldes forskelle på de enkelte solcellemoduler. Hvis der er forskel på den nominelle strøm og spænding for de enkelte moduler imellem, kan det være svært at koble disse optimalt sammen. Her er begge paneler koblet sammen med hhv. 8 parallelforbundne serier med 3 seriekoblede moduler i hver.

	tomgangs- spænding	kortslutnings strøm	peak spænding	peak strøm	nominel effekt	nominel effektivitet
Panel A	123	23,3	92	21,3	1959	8,67
Panel B	129	22,4	98	20,2	1969	8,71

Tabel 4.4Målte elektriske nøgletal for solcellepanelerne

De to paneler er umiddelbart meget lig hinanden mht. nominel effekt og moduleffektivitet, mens MaxPP ligger lidt forskelligt for de to paneler. Da panelerne har hver sin vekselretter er det muligt at operere med forskellige arbejdspunkter for de to paneler, så begge kan arbejde ved MaxPP.





Figur 4.1 UI-kurve for panel A



Figur 4.2 Ul-kurve for panel B

4.3 Elektrisk ydelse og systemfaktor

Der er opsat en kWh-tæller på hver af de to vekselrettere, hvor ydelsen fra hver af panelerne er målt. Tællerne blev opsat d. 9/3-2001, og aflæst sidste gang d. 30/7-2001. På grund af installationsproblemer kom solcellerne dog først rigtigt i gang omkring 1. april og solcelleydelsen i marts måned er derfor meget lille. Den elektriske ydelse for hver af panelerne er angivet i tabel 4.5.

	samlet elektrisk ydelse [kWh]	[kWh/m ²]
Panel A	1088	48,1
Panel B	959	42,4

Tabel 4.5 Målt elektrisk ydelse fra hver af panelerne

Panel A har i middel over måleperioden ydet ca. 13% mere end panel B. Dette skyldes bl.a. en forøget køling af solcellerne i panel A, men den øgede køling kan ikke forklare hele den ekstra ydelse. Kølingen af solcellerne er gennemgået i kapitel 4.4. UI-målingerne, der er beskrevet i kapitel 4.2, viser heller ikke nogen væsentlig forskel på de to paneler. Forskellen i ydelse kan derfor ikke skyldes, at cellerne i det ene panel er bedre end i det andet, eller at koblingen af de enkelte moduler er forskellige. En mulig forklaring kan være, at de to vekselrettere fungerer forskelligt, men dette er ikke muligt at fastslå på baggrund af disse målinger alene.

På en sydvendt flade med en hældning på 15° falder på det normalår ca. 1097 kWh/m²år. I måleperioden fra ca. midt i marts til slutningen af juli vil der i et normalår være en solindstråling på ca. 60% af årets samlede indstråling, dvs. 663 kWh/m². I samme periode i år har der dog været ca. 12% flere solskinstimer end i normalåret, hvilket svarer til ca. 743 kWh/m².

Anvendes de samme forudsætninger som angivet i kapitel 2.4, hvor den forventede årlige ydelse blev beregnet, fås, at hver af de to solcellepaneler burde yde 1223 kWh i den angivne måleperiode. Solcellepanelerne - især panel B - har dermed ydet mindre end forventet. Dette er dog beregnet med en systemfaktorværdi svarende til et fritstående gennemsnitsanlæg på 0,7 samt den nominelle effekt for panelerne, som er angivet af fabrikanten.

Et solcellepanels systemfaktor beskriver det samlede anlægs virkemåde i forhold til et teoretisk optimalt anlæg, idet den angiver forholdet mellem de reelt udnyttede energi ved den aktuelle solindstråling og den installerede effekt ved 1000 W/m². Systemfaktoren tager hensyn til temperaturindflydelse, forskelle i de enkelte modulers ydelse og dermed koblings-relaterede påvirkninger af ydelsen, tab i kabler og vekselretter osv. Systemfaktoren bør for et gennemsnitsanlæg med fritliggende moduler ligge på ca. 0,7, mens et bygningsintegreret anlæg typisk vil ligge på ca. 0,65.

Systemfaktor = P2 / P1 hvor

P2: målt effekt

P1: installeret effekt divideret med 1000 W/m² og ganget med målt solindfald.

Systemfaktoren kan også beregnes ud fra kWh-ydelser f.eks. på døgn, måneds- eller årsbasis. Dermed fås en gennemsnitslig systemfaktor. På baggrund af de målte ydelser kan systemfaktoren for hhv. panel A og panel B beregnes til:

 Panel A:
 0,62

 Panel B:
 0,55

Panel A har en noget højere systemfaktor end panel B. Dette skyldes som før nævnt, at panel A bliver bedre kølet, men dette kan ikke alene forklare forskellen mellem A og B.

Systemfaktoren ligger for begge paneler lavere end de 0,7 der er gældende for et fritstående gennemsnitsanlæg, men for panel A ligger værdien tæt på gennemsnitsværdien for et bygningsintegreret anlæg (0,65). Dette kunne alt andet lige type på, at solcellerne bliver kølet mindre, når de er indbygget i ventilationskasserne end hvis de var fritstående. Kølingen af cellerne vil være afhængig af, om ventilationsanlægget suger luft fra kasserne, hvilket ikke vil ske i de mest solrige og varme perioder.

Undervejs i måleforløbet - d. 15/6-2001 - blev kWh-tællerne ligeledes aflæst. Derved kan systemfaktoren beregnes for hhv. perioden 1/4-15/6 2001 og perioden 15/6-30/7 2001. Disse er vist i tabel 4.6. Det ses, at systemfaktoren er væsentlig lavere i sommerperioden end i foråret. Dette underbygger påstanden om, at det er manglende køling af cellerne, der er årsag til den lave systemfaktor. I sommerperioden er ventilationsanlægget slukket en større del af tiden, hvilket giver mindre køling af panelerne. I 2001 var især juli meget solrig, med over 30% flere solskinstimer end i et normalår. I de mest solrige perioder har ventilationsanlægget ikke suget luft fra panelerne, og kølingen af cellerne har derfor sandsynligvis været dårligere end hvis de var fritstående.

Systemfaktorer	1/4 - 15/6 2001	15/6 - 30/7 2001	hele perioden
Panel A	0,67	0,56	0,62
Panel B	0,59	0,50	0,55

 Tabel 4.6
 Systemfaktorer for panel A og B for forskellige perioder

På baggrund af målingerne må det forventes, at systemfaktoren vil variere over året, så den er høj i vintermånederne, hvor ventilationsanlægget suger luft fra panelerne de fleste dage, og lav om sommeren, hvor ventilationsanlægget ikke køler cellerne.

Når der tages hensyn til den lavere systemfaktor for den aktuelle periode ses det af tabel 4.7, at panelerne yder som de skal.

	målt elektrisk ydelse [kWh]	forventet ydelse (korrigeret) [kWh]
Panel A	1088	1083
Panel B	959	961

 Tabel 4.7
 Målt ydelse sammenlignet med korrigeret forventet ydelse for hver af panelerne

4.4 Køling af solcellepanelerne

Solcellemodulerne er placeret udenpå en hulplade, der danner "taget" på kassen. Ved at suge luft fra kassen skabes et undertryk, der trækker luft ind gennem hulpladen og dermed ind omkring solcellemodulerne. Undertrykket i kassen skal bevirke, at luften trækkes ensartet ind gennem hulpladen, så der kan opnås en ensartet køling af solcellepanelerne. Dog skal luften udenom solcellemodulerne for at komme ind til hulpladen.

To forhold er interessante at undersøge:

- den kølende effekt af, at ventilationsanlægget suger luft ind omkring solcellerne
- den kølende effekt af køleribberne på bagsiden af panel A.

For at undersøge dette er der placeret termofølere på bagsiden af et solcellemodul hhv. på midten af dette og i hjørnet af dette. Tilsvarende er der placeret termofølere i lufthulrummet bag solcellemodulet.

Figur 4.3-4.5 viser måledata fra to dage, hvor solindfald (figur 4.3) og udetemperatur (figur (4.5) er sammenlignelige. Dag nr. 110 er en fredag, hvor der suges luft fra kassen, mens dag nr. 111 er en lørdag, hvor ventilationsanlægget er slukket. Dette kan ses af den målte volumenstrøm fra panelet, som er vist i figur 4.4. Figur 4.5 viser desuden temperaturer på bagsiden af et solcellemodul i panel A samt temperaturer i hulrummet bag modulet.



Figur 4.3 Målt solindfald i perioden 20-21. april 2001



Figur 4.4 Målt volumenstrøm fra panel A i perioden 20-21. april 2001



Figur 4.5 Målte temperaturer i panel A i perioden 20-21. april 2001

Målingene viser, at der er væsentlig forskel på overfladetemperaturen hhv. midt på og i hjørnet af solcellemodulet, når ventilationsanlægget er aktivt (dag nr. 110). Tilsvarende er der stor forskel på temperaturen i lufthulrummet hhv. midt bag modulet og i hjørnet af modulet, men lufttemperaturen midt under modulet er højere end celletemperaturen i hjørnet af modulet. Temperaturfordelingen tyder på, at modulet bliver kølet med luft, der suges ind i mellemrummet mellem modulerne og direkte ind gennem hulpladen, eller at den luft der bevæger sig ind under midten af panelet undervejs bliver opvarmet så meget, at den ikke kan køle de midterste celler effektivt. De midterste solceller bliver kølet væsentligt mindre end cellerne i modulets kant.

Når ventilationsanlægget slukkes om aftenen (tid: 110,75 svarende til kl. 18) ses en lille stigning for temperaturerne i hjørnet af panelet - både celletemperatur og lufttemperatur. Denne effekt kan ikke ses på temperaturerne midt under panelet.

Når ventilationsanlægget er slukket (dag nr. 111) er kølingen af cellerne anderledes, idet der nu generelt er højere celletemperaturer end lufttemperaturer - både midt på modulet og i hjørnet. Dog er temperaturen midt på modulet stadig væsentlig højere end i hjørnet af modulet. Solcellemodulerne bliver her kølet med luft, der strømmer frit - drevet af en blanding af vindpåvirkninger og termiske forhold. Luften kan strømme ind mellem modulerne og ind i kassen, men også ind ved nogle moduler og ud ved andre. F.eks. kan der være en luftstrøm på langs ad lufthulrummet under solcellerne.

Betydningen af den forskellige afkøling af cellerne midt i modulet i forhold til cellerne i modulets kanter for modulets elektriske ydelse er afhængig af den elektriske kobling af solcellerne internt i modulet.

Ovennævnte forskel på køling af solcellerne med hhv. tændt eller slukket ventilationsanlæg er dog ikke entydig for hele måleperioden. I figur 4.6-4.9 er vist måledata for to andre dage også en fredag (dag nr. 103) og en lørdag (dag nr. 104), hvor ventilationsanlægget er hhv. tændt og slukket. Her viser temperaturerne både fredag og lørdag samme tendens - at luften i hulrummet generelt er koldere end celletemperaturerne - både midt bag modulet og i hjørnet. Dette kan tyde på, at der også er andre strømninger end den planlagte, selv når ventilationsanlægget er aktivt.



Figur 4.6 Målt solindfald i perioden 13-14. april 2001



Figur 4.7 Målte temperaturer i panel A i perioden 13-14 april 2001

Solcellemodulerne i panel A er forsynet med køleribber, der skal øge varmeovergangen til luften. Dette har to formål - dels at køle solcellerne mere, hvorved den elektriske ydelse kan forbedres, og dels at give et større varmebidrag til forvarmning af ventilationsluften. Effekten af køleribberne er dog til en vis grad sløret af, at der ikke har været samme flow fra de to kasser. Det har været et næsten dobbelt så stort flow fra panel A som B, hvilket også bør give en bedre køling af solcellerne. Volumenstrømmen fra de to paneler er vist på figur 4.8. Denne effekt kan dog ikke umiddelbart kvantificeres, idet det nøjagtige flowbillede omkring solcellerne ikke kendes. Desuden er det samlede flow fra solcellekasserne en del mindre end det projekterede flow på i alt 10.000 m³/h.



Figur 4.8 Målte volumenstrømme fra panel A og B i perioden 13-14. april 2001

Figur 4.9 viser temperaturen midt på bagsiden af et solcellemodul i hhv. panel A og panel B for to udvalgte dage i april (13/4-14/4). I disse to dage er udetemperaturen og solindfaldet sammenlignelige, men den første dag (dag nr. 103) er ventilationsanlægget aktivt, mens det den anden dag (dag nr. 104) er slukket. Begge dage ses, at temperaturen på panel B bliver op til ca. 5°C varmere end panel A midt på dagen. Der er her ikke nogen entydig effekt af, om ventilationsanlægget er tændt eller slukket, eller af at flowet fra panel A er større end panel B.



Figur 4.9 Målte temperaturer i panel A og B i perioden 13-14. april 2001

Solcellernes temperatur afhænger af solindfaldet, idet et større solindfald bevirker en højere temperatur som vist på figur 4.10, der er optegnet for perioden 1. april til 31. juli 2001. Jo højere solindfald, jo varmere bliver solcellerne især i panel B, mens panel A med køleribberne holder sig lidt køligere. Den store spredning på målingerne skyldes, at paneltemperaturen også afhænger af udetemperaturen, idet panelerne jo bliver kølet med udeluft. For målingerne i april måned ligger paneltemperaturerne derfor lavere ved samme solindfald end i juli måned, hvor udetemperaturen er højere.

Figur 4.11 viser sammenhængen mellem solindfald og overfladetemperatur for hhv. panel A og B, hvor resultaterne er sorteret efter perioder med hhv. aktivt ventilationsanlæg (hverdage) og passiv ventilation (weekender). Det kan her ses, at både køleribberne og ventilationsanlægget har betydning for kølingen af solcellerne.

Panel A bliver kølet mere end panel B, både med og uden ventilationsanlægget aktivt. Temperaturforskellen mellem panel A og B ligger på ca. 5°C ved 1000 W/m², uanset om anlægget er tænkt eller slukket, hvilket antyder, at de forskellige flow i de to paneler ikke har afgørende betydning for kølingen. Ventilationsanlægget bevirker en forbedret køling for både panel A og B. Ved 1000 W/m² ligger temperaturen ca. 8°C lavere, når ventilationsanlægget er aktivt.

En temperaturforskel på ca. 5°C på paneltemperaturen for hhv. panel A og B har betydning for solcellernes ydelse. Den elektriske ydelse ændres med ca. -0,4% per grads temperaturstigning, hvilket alt andet lige vil give en ændring af solcelleydelsen på ca. 2%. I mange perioder er solindfaldet dog lavere end 1000 W/m², og temperaturforskellen mellem A og B er dermed også mindre. Temperaturforskellen mellem panel A og B kan derfor ikke forklare den forskel i elektrisk ydelse på 13%, der er fundet tidligere (kapitel 4.3).



Figur 4.10 Sammenhæng mellem temperatur på bagside af solcellepanel som funktion af solindfaldet



Figur 4.11 Sammenhæng mellem solindfald, bagsidetemperatur midt på solcellepanel og forskellige kølinger af solcellerne

I figur 4.12 er vist tilsvarende kurver for temperaturen i hjørnet af et solcellepanel. Temperaturerne ligger generelt lidt lavere, hvilket viser, at cellerne i kanten af solcellepanelerne bliver kølet mere end cellerne i midten af panelet. Derudover viser kurverne det samme som beskrevet for figur 4.11.



Figur 4.12 Sammenhæng mellem solindfald, bagsidetemperatur i hjørne af solcellepanel og forskellige kølinger af solcellerne

I figur 4.13 og 4.14 er vist temperaturer i hhv. solcellekasse A og B for en enkelt dag (d. 20. april 2001). Desuden er vist temperaturen af den luft, der suges ind i ventilationssystemet.

Målingerne i panel A (figur 4.13) viser, at der bliver suget luft ind ved den temperatur, som også findes i lufthulrummet under den yderste del af solcellemodulerne. Den viste dag er lufttemperaturen i hulrummet under midten af et solcellemodul ca. 28°C varm, mens luften under hjørnet af modulet er ca. 18°C. Den luft, der suges ind til ventilationsanlægget er tilsvarende ca. 18°C. Dette kan tyde på, at udeluften suges ind mellem modulerne og direkte ind gennem hulpladen uden at fordele sig ligeligt i hulrummet under solcellerne.

Målingerne i panel B (figur 4.14) viser et lidt andet billede. Temperaturen af luften der suges ind til ventilationsanlægget ligger ca. midt mellem temperaturen af luften midt under et solcellepanel og under hjørnet af dette. Desuden er temperaturforskellen i lufthulrummet ikke nær så stor (ca. 5°C mod ca. 10°C i panel A). Dette yder på et mere ensartet indtag af luft fra hele hulpladen.

Målingerne viser desuden, at indsugningstemperaturen til ventilationsanlægget er højere fra panel A end fra panel B, på trods af at der suges ca. dobbelt så meget luft fra panel A. Hvis effektiviteten af panelerne som termiske luftsolfangere var ens, burde temperaturen af luften være lavere i panel A på grund af det højere flow. Dette er ikke tilfældet, hvilket indikerer, at køleribberne i panel A giver en forbedring af den termiske effektivitet.



Figur 4.13 Målte temperaturer i panel A d. 20. april 2001



Figur 4.14 Målte temperarurer i panel B d. 20. april 2001

4.5 Solfangereffektivitet

Idet solcellepanelerne kan betragtes som som termiske luftsolfangere, kan solfangereffektiviten beregnes på baggrund af de målte data. Solfangereffektiviteten beregnes som forholdet mellem den faktiske ydede termiske effekt og den effekt, som modtages fra solen.

Solfangereffektiviteten er beregnet ud fra udvalgte måledata, idet kun perioder hvor ventilationsanlægget er aktivt, og hvor der er forholdsvist meget sol, er medregnet. Desuden er kun medregnet måledata fra tidsrummet 11-13 (soltid), for at undgå effekten af skæve indfaldsvinkler og dermed høj refleksion.

Solfangereffektiviteten for hhv. panel A og B er vist i figur 4.15. Der er stor spredning på resultaterne, hvilket skyldes at effektiviteten påvirkes af flere forskellige forhold. Dels har vindpåvirkninger en indflydelse på varmetabet fra panelerne, dels kan varmekapaciteten for konstruktionen spille ind. Resultaterne tyder dog på, at panel A har en højere effektivitet end panel B, ikke alene på grund af den højere volumenstrøm, men også på grund af køleribberne.



Figur 4.15 Solfangereffektivitet for panel A og B beregnet ud fra målte data

Ventilationsanlægget har hovedsageligt arbejdet med faste volumenstrømme fra solcellepanelerne, hvorfor en egentlig effektivitetskurve ved varierende flow ikke kan bestemmes nøjagtigt. I de perioder, hvor anlægget har været i drift har panelerne i gennemsnit haft en effektivitet som angivet i tabel 4.8.

	volumenstrøm [m ³ /hm ²]	effektivitet [-]
panel A	144	0,31
panel B	61	0,12

Tabel 4.8 Gennemsnitlig volumenstrøm og solfangereffektivitet for panel A og B

Effektiviteten af forsellige typer luftsolfangere (ikke PVT-paneler) er vist i figur 4.16. Som solfangere kan panelerne sammenlignes med den canadiske "Solarwall", på grund af anvendelsen af en hulplade som både absorber og luftindtag. Effektiviteten af solcellepanelerne kan dog ikke forventes at ligge på samme niveau som "Solarwall", idet hulpladen ikke ligger eksponeret for direkte sol. Hulpladen modtager solenergien indirekte ved en kombination af stråling fra bagsiden af solcellepanelerne og konvektion på grund af luftbevægelserne mellem solceller og hulplade.



Figur 4.16 Effektivitet for forskellige typer luftsolfangere (Fechner, H., 1999)

Effektivitetskurven for den canadiske "Solarwall" viser desuden, at effektiviteten som funktion af volumenstrømmen stiger kraftigt ved forholdsvist lave flow, mens stigningen efterhånden flader ud. I det område hvor panel A arbejder (ca. 170 kg/hm²) vil kurven for en almindelig "Solarwall" være stort set vandret. Dette er ikke tilfældet med panel A, hvilket kan skyldes, at køleribberne bevirker, at der kan opnås en effektivitetsstigning også ved større flow.

4.6 Termisk ydelse

Overskudsvarmen fra solcellerne udnyttes til forvarmning af ventilationsluft til bygningen. Ventilationsanlægget er aktivt i bygningens brugstid (fra kl. 7.00 til 18.00 på hverdage), mens det er slukket udenfor brugstiden. Hvis der er behov for forvarmning af ventilationsluften suges luft fra solcellepanelerne, ellers tages luften direkte ind gennem et bypass.

Figur 4.17-4.19 viser måledata fra en uge i april måned med en del sol og udetemperaturer, der svinger mellem ca. 5°C og 15°C. Figur 4.19 viser et typisk forløb, hvor anlægget kører med rimelig konstant flow i dagtimerne mandag til fredag, mens der ikke suges fra panelerne i weekenden.

På baggrund af målingerne må det antages, at der køres med en on/off styring af luftindtaget fra panelerne. Det er desuden sandsynligt, at der er en temperaturstyring, der afgør, hvorvidt luften suges fra solcellepanelerne eller fra bypasset. Detaljerne i den anvendte CTS-styring kendes dog ikke.



Figur 4.17 Målt solindfald i perioden 23-29. april 2001



Figur 4.18 Målte temperaturer i panel A og B i perioden 23-29. april 2001



Figur 4.19 Målte volumenstrømme i perioden 23-29. april 2001

I de efterfølgende grafer - figur 4.20-4.22 - ses tilsvarende måledata for en uge i juli måned. Her er udetemperaturerne høje (15-27°C i dagtimerne) og der er også meget sol. Det er derfor usandsynligt, at bygningen har behov for forvarmning af ventilationsluft. Dog kan det ses, at der suges luft fra panelerne i morgentimerne og evt. også sidst på eftermiddagen. Dette kan ikke skyldes et egentligt opvarmningsbehov i bygningen, men det kan være et udtryk for ønske om at klimatisere indblæsningsluften af trækhensyn, eller der kan være en fejl i styringen af anlægget. Det er derfor usikkert, hvorvidt den termiske energi, som solcellekasserne leverer i sommermånederne bør regnes med som en reel ydelse. Dette kan ikke afgøres uden af kende bygningens egentlige behov.

I perioden 1/4 til 31/7 har anlægget leveret i alt 868 kWh fra panel A og 315 kWh fra panel B, dvs. i alt 1183 kWh. På grund af perioder med udfald af dataopsamlingscomputer er disse tal dog ikke repræsentative for den reelle termiske ydelse i perioden. Den væsentlig højere ydelse fra panel A skyldes dels en lidt højere indsugningstemperatur, dels at der suges ca. dobbelt så meget luft fra panel A som fra panel B.



Figur 4.20 Målt solindfald i perioden 16-22. juli 2001



Figur 4.21 Målte temperaturer i panel A og B i perioden 16-22. juli 2001



Figur 4.22 Målte volumenstrømme fra panel A og B i perioden 16-22. juli 2001

4.7 Bemærkninger til målingerne

Målingerne på anlægget blev påbegyndt d. 9. februar 2001, dog kun i form af temperatur- og lufthastighedsmålinger. På dette tidspunkt var solcellepanelerne endnu ikke elektrisk tilkoblede, og havde derfor ingen elektrisk ydelse. Panelerne fungerede i den første periode derfor udelukkende som termiske solfangere, idet ventilationsanlægget kunne udnytte varmen til forvarmning af ventilationsluft.

Der blev til hver vekselretter opsat kWh-tællere d. 9/3-2001, samtidig med den elektriske installation af solcellepanelerne. Den 21. marts blev pyranometer og udetemperaturføler opsat.

Grundet installationsproblemer solcellerne først til at fungere elektrisk stabilt omkring 1. april.

Målingerne blev afsluttet d. 31. juli 2001, dog blev kWh-tællerne aflæst for sidste gang d. 30. juli 2001.

5. Konklusion

På baggrund af målingerne kan det konkluderes, at de kombinerede solcelle- og ventilationskasser fungerer efter hensigten og leverer både el til nettet og termisk energi til forvarmning af ventilationsluft til bygningen.

Formålet med målingerne har været at undersøge følgende forhold:

- køleeffekten af koblingen mellem ventilationsanlæg og solcellepaneler
- køleeffekten af køleribber opsat på bagsiden af solcellepaneler
- den elektriske og termiske ydelse fra PVT-anlægget

Målingerne har vist, at ventilationsanlægget har en tydelig indflydelse på kølingen af cellerne i både panel A og B. Panelerne bliver kølet op til ca. 8° mere, når anlægget er aktivt, end når det er slukket.

Umiddelbart tyder målingerne dog på, at kølingen af solcellerne samlet set er dårligere end hvis panelerne stod helt frit på taget. Bestemmelsen af de to panelers systemfaktor tyder på dette, idet systemfaktoren er lavere end for et fritstående gennemsnitsanlæg. Især i sommerperioden er systemfaktoren lav, hvilket skyldes, at ventilationsanlægget ikke suger luft fra panelerne i de mest solrige perioder. Systemfaktoren vil sandsynligvis variere over året og være højest i vinterperioden og lavest om sommeren.

Princippet for kølingen, hvor luften suges ind mellem panelerne og gennem en bagvedliggende hulplade synes ikke optimal, idet måleresultaterne indikerer, at det hovedsageligt er cellerne i panelernes yderkanter, der bliver kølet, mens cellerne i midten af panelerne bliver væsentlig varmere. Dette kan enten skyldes, at luften bevæger sig ind mellem solcellemodulerne og direkte ind gennem hulpladen uden at fordele sig i hulrummet mellem moduler og hulplade, eller at luften fordeler sig som den skal, men strømmer så langsomt, at den når at blive væsentligt opvarmet inden den når ind til de midterste celler. Den uens køling af solcellerne har betydning for den elektriske ydelse - afhængig af cellernes indbyrdes elektriske kobling.

Solcellerne i panel A bliver kølet væsentligt mere end cellerne i panel B, hvilket især skyldes de monterede køleribber. Temperaturen på bagsiden af solcellemodulerne har været op til ca. 5° lavere i panel A end i panel B. Der har også været et større flow omkring cellerne i panel A, men måleresultaterne indikerer, at det ikke er dette, der har været afgørende. Køleribberne har derfor væsentlig betydning for kølingen af solcellerne.

I måleperioden har kasserne i alt haft en elektrisk ydelse på:

	elektrisk ydelse [kWh]
Panel A	1088
Panel B	959
I alt	2047

Dette er som udgangspunkt lidt lavere end forventet, når det tages med i betragtning, at måleperioden har været noget mere solrig end et normalår. Den forventede ydelse er dog beregnet på basis af en systemfaktor på 0,7, hvilket svarer til et fritstående anlæg. Hvis det

indregnes i forudsætningerne, at systemfaktoren er lavere på grund af mindre køling af panelerne, må det konkluderes, at solcellerne yder som de skal.

Solcellerne i panel A har ydet ca. 13% mere end cellerne i panel B. Der er bedre køling af cellerne i panel A men dette kan ikke forklare hele denne forskel i ydelse. Temperaturforskellen kan kun bevirke en forskel i ydelse på ca. 2%. De UI-målinger, der er foretaget på panelerne, viser at der ikke er stor forskel på cellerne i hhv. panel A og B, så forskellen skyldes derfor ikke dårligere celler eller en dårligere kobling af solcellemodulerne. i panel B. En mulig forklaring kan være, at de to vekselrettere virker forskelligt, men en entydig forklaring på forskellen i elektrisk ydelse kan ikke gives på baggrund af de gennemførte målinger alene.

I måleperioden har den termiske ydelse fra solcellekasserne været:

	termisk ydelse [kWh]
Panel A	868
Panel B	315
I alt	1183

Målecomputeren har dog ikke været helt stabil i hele perioden, hvorfor de målte ydelser ikke er repræsentative for den termiske ydelse som anlægget reelt har givet. Anlægget har også bidraget til forvarmning af ventilationsluften i de perioder, hvor målecomputeren ikke har været i gang.

Målingerne har vist, at ventilationsanlægget har suget luft fra solcellekasserne også i sommerperioden, hvor det er usikkert om der er et behov for forvarmet luft i bygningen. Det er derfor usikkert, hvor stor en del af den målte termiske ydelse, der egentlig bør regnes med som en reel ydelse. De målte ydelser kan derfor vanskeligt generaliseres til en forventet årlig ydelse, idet dette forudsætter, at bygningens egentlige behov kendes.

Målingerne tyder dog på, at den termiske ydelse fra anlægget er lav. Solcellekassernes effektivitet som luftsolfangere er beregnet ud fra målingerne. Sammenlignes med effektiviteten for en canadisk "Solarwall", som er sammenlignelig i konstruktionsprincip, ligger solcellekassernes effektivitet på ca. det halve i forhold til "Solarwall". Dette er dog forventeligt, idet solcellekasserne kun indirekte virker som luftsolfangere - hulpladen ligger ikke i direkte sol, og varmen skal derfor overføres fra solcellerne til hulpladen. Det er vanskeligt at opnå en optimal overføring af varme fra solceller til hulplade, hvilket bl.a. ses af, at kølingen af solcellerne ikke er ensartet. Desuden kan utætheder i kasserne bevirke, at en del luft suges ind udenom solcellerne, hvorved en optimal forvarmning af ventilationsluften ikke opnås.

Ved vurdering af den reelle termiske ydelse for PVT-anlægget bør det også indgå, at der i ventilationssystemet er varmeveksling mellem indblæsnings- og udsugningsluft. En del af den forvarmning, der opnås i luftsolfangeren, kunne varmeveksleren også have leveret. De to komponenter - luftsolfanger og varmeveksler - er dermed til en vis grad konkurrenter til levering af den samme varmeydelse. I et anlæg med varmeveksler bør den reelle termiske ydelse derfor være fratrukket den del, som varmeveksleren kunne have ydet ekstra, hvis luftsolfangeren ikke var der.

6. Referenceliste

Ahm, P. et al, 1999 Solceller Energistyrelsen, 1999.

DMI, 2001 www.dmi.dk

Innopex, 1998 SE/167/98/DK/NL/IT Innovative Architectural Integration of Photovoltaic Energy in Existing Buildings in DK, NL, IT.

Radisch N, 2001 Kontorhus uden køling Teknologisk Institut, 2001

Roskilde Bank, 2001 www.roskildebank.dk

SunVent, 1998 RB/166/98 Low energy Housing Retrofit Projekt Using Solar Ventilation Towers.

Fechner, H., 1999. Investigations on Series Poduced Solar Air Collectors, Final Report. IEA task 19 Solar Air Systems. Arsenal Research, Department of Renewable Energy, october 1999.