

Slutrapport

Energistyrelsen–EUDP 2013-SÆRPULJE

Journal nr. 1936-0014

Udvikling af kombineret solcelle og sol-fanger modul (PVT) til etageejendomme ”PV iSOL - fase 1”

December 2015

RACELL SAPHIRE Technologies
STO Danmark
MAP Architects
DTU Byg
COWI
Andelsboligforeningen Nørrebrogade 233-23

Forord

Denne rapport er slutrapport for projektet "Udvikling af kombineret solcelle og solfanger modul (PVT) til etageejendomme" er støttet af Energistyrelsen gennem energiforskningsprogrammet EUDP 2013 Særpulje (journal nr. 1936-0014), og gennemført af følgende projektkonsortium:

I projektet deltog følgende:

- RACELL SAPHIRE Technologies ApS, Yakov Safir [Projektansvarlig]
- COWI, Svend Erik Mikkelsen m.fl. [Ekstern leverandør]
- STO Danmark A/S, Michael Kjølner [Partner]
- MAP Architects, David Garcia [Partner]
- DTU Byg, Simon Furbo [Partner]
- A/B Nørrebrogade 233-237, andelsboligforening [Partner & Bruger]

Racell stod som projektansøger og projektansvarlig.

De enkelte partnere har følgende hovedroller:

- Racell er projektleder og fokuserede på løsningsorienterede materialestrukturer, design og de deraf afledte konsekvenser for det produktionsmæssige i udviklingen af PVT- modul/system. Racells innovative produktionsprocesser og udviklingsarbejde baserer sig på virksomhedens erfaring, viden og specialudviklede produktionsudstyr.
- Racell indgik en aftale med COWI om assistance, dels med administration, kommunikation, koordinering og planlægning af aktiviteterne, dels ved medvirken til at definere og analysere løsningerne, set ud fra et helhedssyn, hvor integrationen i byggeprocessen, økonomien og det lovgivningsmæssige spiller ind.
- STO Danmark A/S indgik i udviklingen med den del af PVT-modulet/løsningen, der udgør isolering, montagesystem, montagearbejde og håndtering af varme/kulde problematikker i klimaskærmen. Der er som udgangspunkt fra STO flere forskellige konkrete ideer til produktudviklingen.
- MAP Architects medvirkede i team med de øvrige deltagere i udviklingen med design og arkitektur aspekter, herunder med at opstille krav, der kan sikre fleksibilitet og tilpasning. Også med henblik for at de arkitektoniske løsninger kan accepteres i en bred kreds af arkitekter og i praksis af diverse bygherrer.
- DTU bidrog til udviklingsfasen med ekspertviden og bidrog især med afprøvninger, tests, simuleringer og dokumentation af ydelse og holdbarhed.
- Andelsboligforeningen Nørrebrogade 233-237 (bygherren) deltog som bruger og blev inddraget som sådan. Endvidere bidrog foreningen med data mv., der brugtes som eksempel i udviklingsarbejdet. I det efterfølgende EUDP-projekt deltager foreningen mere aktivt med investeringer.

Projektet PV iSOL var fra starten tænkt som et projekt i to faser:

Første fase, som afrapporteres i denne rapport og som var søgt i særpuljen for bygnings-integreret solceller (BIPV), består af udvikling og afprøvning af solcellemoduler til integreret anvendelse.

Anden fase, som senere er bevilget i EUDP's almindelige pulje, består så i demonstration af produkt og koncept på hhv. den ældre bygning, andelsforeningen på Nørrebrogade 223-227 og på et nybyggeri på Søborg Hovedgade 150.

Både første og anden fase skulle medføre muliggørelse af løsninger der kan udnyttes i de mange tilsvarende typer af etageboliger i byområder, primært ved renoveringsprojekter, men som en sideeffekt også ved nybyggeri. Dertil skulle løsningen være skalerbar, så den er anvendelig på både store og små etageboliger.



Indholdsfortegnelse

	Side
Indholdsfortegnelse	4
Bilagsfortegnelse	5
Sammenfatning og konklusion	6
Summary and Conclusion	7
1 Indledning	8
1.1 Baggrund	8
1.2 Formål og indhold	8
1.3 Hovedaktiviteter i projektet.....	9
2 Projektresultater	11
2.1 Markedsvurdering og kravspecifikation.....	11
2.2 Tekniske løsningsmuligheder, analyse af disse og valgte løsninger	12
2.3 Laboratorie test (DTU rapport)	15
2.3.1 Termisk ydeevne	15
3 Kommercielle resultater.....	18
4 Formidling	20
4.1 Præsentationer, artikler, temadage, konferencer og lignende.....	20
4.1.1 Temadage og workshops	20
4.1.2 Konferencer og Udstillinger	21
Appendix - BILAG 1 - Performance Test of Racell PVT Modules.....	22
4.2 Introduction	22
4.3 Test Results.....	23
4.3.1 Thermo vision camera check.....	25
4.3.2 Model and parameter validation	27
4.3.3 Comparison of thermal output between the PVT modules	27
4.4 Annual Performance calculations for the Copenhagen climate.....	29
4.5 Conclusions	30
4.6 References.....	30

Bilagsfortegnelse

Bilag A - Årsrapport 2014 PV iSOL fase 1

Bilag B - Årsrapport 2015 PV iSOL fase 1

Bilag C - Oprindelige Tekniske bilag 14. juni

Bilag 1 - Appendix - Performance Test of Racell PVT Modules

Bilag 2 - DTU PVT MasterThesis MSM 2015

Bilag 3 - Slide Presentation PV iSOL til etageejendomme

Bilag 4 - Styrkeberegning af solcellebeslag

Bilag 5 - PVT tagdesign med og uden skorstene og ventillationsdele

Sammenfatning og konklusion

I projektets første fase, som blev afsluttet december 2014, er der udviklet et PVT modul "PV iSOL", hvor solcelle og evt. solfangerabsorber er præfabrikeret i en og samme enhed, monteres sammen med en isolering på mur eller tag. Det udviklede PVT modul er beregnet i første omgang til renovering af byejendomme. Modulet er altså et bygningselement, der er fuldt integreret med hhv. bygningens ydermur og med bygningens ydre tag.

For at fremskynde udbredelsen af teknologien er PVT modultypen i en udgave designet til montage sammen med eksisterende systemer, som f.eks. Rockwools REDAir koncept, således at det er fuldt tilpasset, netop Rockwools koncept. I en anden udgave monteres PVT modulet direkte ovenpå et eksisterende tagpaptag. I løbet af projektforløbet er det lykkedes at komme helt uden om solcellemodulers kostbare traditionelle aluminiumsbeslag, skinner og installation af disse. Med PV iSOL benyttes i stedet elementer der alligevel ville være indgået til montagen af standard facade eller tagbygnings-element, således at den altafgørende samlede systempris for facaden/taget, hvor solcellerne indgår, reduceres væsentligt. Da elementerne med iSOL løsningen er fuldt integreret, betyder det reelt at ekstraomkostningen for at montere solcellerne er lig nul. Hertil kommer at man halverer arealbehovet, idet solfangerne ligger inde i selve solcellemodulet i stedet for ved siden af.

I første fase af projektet har der været arbejdet parallelt i to spor. Det ene har været selve PV iSOL hhv. PVT iSOL modulet, dvs. produktionsmetoder og processer til sammenkobling af solceller med isoleringsslag og med absorber med nødvendige materialer til stivhed, varme- transport og isolering samt montage, således at der bliver tale om et billigt, holdbart og æstetisk rigtigt produkt. Det andet spor har været at arbejde med integrationen i bygningen. Her har ting som placering af rør og ledninger mv. været et afgørende udviklingspunkt. Et andet vigtigt punkt har været at komme frem til et system der kan tilpasses ujævne overflader, idet der ved montage af en delvist reflekterende overflade kræves en helt plan overflade uanset hvordan underlaget er.

Som en vigtig del i udviklingen af modulerne, foretoget en arkitektonisk bearbejdning af montering af modulerne med Nørrebrogade som eksempel, se nærmere i bilag. Al udviklingsarbejdet er foretaget ud fra en betragtning om at resultaterne er skalér- og replicerbare, således at løsningerne kan anvendes på alle mulige andre etageboligbygninger end de to i projektet udvalgte (Nørrebrogade og Søborg Hovedgade).

De mange forskellige opbygninger af PVT iSOL prototyper, blev udover standardtests af solcellemoduler, systematisk målt og testet på DTU, som man normalt måler solfangere. Alle målinger og tests var tilfredsstillende, inkl. stress af modulerne med hurtigt skiftende temperaturpåvirkninger. Effektiviteten for PVT iSOL modulerne var højere end ventet for moduler uden frontisoleringen. Simuleringsmodel fra Transys viste fine overensstemmelse og forudsigelighed med de målte værdier. Således var der en stor vindafhængighed, idet fronten af PVT modulerne som ventet fungerer som en stor kuldebro.

Fase 1 af projektet bestod af 5 arbejdsplaner, hvor arbejdsplan nr. 5 med den endelige udvikling og afprøvning blev udført i 2. halvår i 2014. Helt afgørende blev det for projektet med to nye innovative modultyper (nu patentansøgt). Det ene var til gavlen med et helt nyt fleksibelt montagesystem hvor et Omega metalprofil er indkapslet direkte inde selve modulet. Dette indbyggede Omegaprofil giver mulighed for at anvende alle mulige allerede eksisterende montagesystemer. Omega Systemet viste at det let kan anvendes med REDAir fra Rockwool og STO's dobbelt skinnesystem. En anden variant viste at man på under 30 minutter kan montere både skinner og et 200 kg tungt 8 m² PV iSOL modul på en rå mur. Det andet nye innovative modul blev en letvægtsløsning hvor det tunge glas udgår til fordel for et aluminium sinussandwich profil. Hermed blev PVT modul systemvægten på taget reduceret fra 31 kg/m² til kun 12 kg/m². Målinger og stress tests samt beregninger på vindsug m.m. viste at de nye iSOL modultyper var særdeles brugbare. En yderligere epokegørende egenskab blev at det bliver muligt både at skære og bore direkte i iSOL modulet.

Summary and Conclusion

In the phase 1 of the project, ended Dec. 2014, a PVT module "PV iSOL" was developed, so that the solar cells and even a solar absorber are prefabricated in the very same unit and are mounted jointly with an insulation-layer on a wall or a roof. This PVT module development is primarily for renovating apartment buildings. The module is a building element which is fully integrated with either the wall/envelope or the roof of the building.

In order to speed up the sales of the new technology, the PVT module was developed so it would easily fit into most existing insulation systems. F.ex. the REDAir Rockwool concept. Another PVT type with insulation is enabled to mount directly onto a flat roof. The result is thus, since the insulation was being done anyway, that there are no extra costs whatsoever for incorporating the solar module. The vital complete system price is almost not affected by including the iSOL solution. Furthermore the pay-back time is drastically reduced since within the same insulated footprint, both electricity and heat energy are being produced.

The PVT iSOL project development has been directed into two tracks. One was for production-methods and –processes for merging & laminating the cells, the fluid absorber and the insulation layer into one single unit. This meant dealing with various material combinations reg. rigidity, statics, heat flow, insulation layer and mounting elements. All of which should at the same time be cheap, durable architectural and aesthetic. The second track was working with the building integration. Major obstacles here have been developing hidden spaces for the large header pipes of the heat absorbers. Another critical issue was to make sure that the mounting was adaptable to uneven walls or façades. Partly reflecting elements such as solar modules would easily reveal any disorder in the symmetries of a façade.

An important part of the BIV project was done in creating architectural design works for the mounting. The two buildings, Nørrebrogade 223 and Søborg Hovedgade 150 were used as examples. All this work was simultaneously aimed at being replicable and scalable so that the solutions could be utilized for any multistory apartment building type.

The many PVT iSOL prototype variants developed were exposed to all the standard PV module IEC tests and then also thoroughly tested and measured as solar collectors normally are at the DTU. All tests and measurements were successful, including thermal stress of the modules with extreme temperatures. The efficiency for the PVT iSOL modules was higher than expected for modules without front insulation. However via the simulation with the Transys program it turned out that the measured results fitted exactly with the simulation model. Thus as expected, the non-covered front of the PVT modules were very sensitive to wind speeds, since the front is acting like a large area cold bridge.

Phase 1 of the project consisted of 5 work packages. WP 5 determining the final development and testing and was developed in 2014. Most decisive were two innovative module types (both being patented). One was including an innovative mounting element, an Omega steel profile encapsulated together with the PV cells, so that any mounting system element could be adapted to this profile. Thus it would fit both with the REDAir and the STO systems. A variant of this new technology proved that an 8 m² and 200 kg heavy PV iSOL glass module could be mounted on a raw wall within 30 minutes only. The second innovative breakthrough was a light weight module to be mounted on any roof and reducing the system weight from 31 kg/m² to only 12 kg/m². Measurements and stress tests combined with theoretical calculations of the static effects and wind suction and loads, proved that this new type would be extremely durable. Also in the case of fire. Another successful result was that the PV iSOL module enabled drilling and cutting in the actual module.

1 Indledning

1.1 Baggrund

I dag anbringes solceller ofte på tage eller andre steder på stativer der i stedet for at udgøre klimaskærmen bliver monteret uden på selve klimaskærmen, eventuelt ved hjælp af ballast for at undgå at gennembryde taget. Dette gøres for at få solcellerne ventileret, så ydelsen bliver højere og risikoen for brand undgået. Efterhånden som solcellerne er faldet i pris, er disse stativer blevet den dominerende del rent prismæssigt og udgør i dag 60 %. Samtidig giver det en ringere udnyttelse af tagarealet. Tyndfilmsolceller har været set som løsningen, men er nu på vej ud på grund af de kendte problemer med effektivitet og holdbarhed.

Der er efterhånden en bred erkendelse af at vejen frem for solceller er bygningsintegration hvor solceller ikke er en ad on, men en indtænkt del af bygningen og processen. Dette er baggrunden for at særpuljen blev sat i værk.

1.2 Formål og indhold

Dette projekt vil udvikle PVT moduler, hvor solcelle og solfanger monteres sammen med isolering på mur eller tag, idet fokus er på typiske bygejendomme. Modulerne vil indgå som bygningselementer, der er fuldt integreret med bygningens ydermur og bygningens ydre tag. Det vil kunne limes eller skrues direkte på i bygningens råmur eller fungere som overtag uden på et undertag. Aluminiumsbeslag, dobbelte lag af metalprofiler til ventilationskøling af modulernes bagside og kostbar montage af disse bliver unødvendigt.

I EUDP projektet vil denne komplette integration af solceller betyde, at solcellernes bagside sidder "lukket inde" og derfor ikke bliver kølet, som for fritstående eller ventilerede solcellemoduler. De fuldt integrerede solceller vil derfor normalt blive væsentligt varmere, hvorved deres produktion af el vil falde (0,5 % pr. grad). For at modvirke dette køles solcellerne af den indbyggede væskeabsorber (som i en solfanger), derved stiger elproduktionen. Resultatet bliver at cellerne producerer mere strøm samtidig med at deres overskudsvarme kan anvendes til forvarmning af brugsvand mv., med eller uden varmepumpe. Der kan endvidere indgå et batteri til optimering af udnyttelsen af solcellerne ved anvendelse af el til varmepumpedrift i forbindelse og ved en smart grid styringsstrategi.

Projektet "PV iSOL" består af to faser: Fase 1 (som afrapporteres her) er udvikling og afprøvning af PVT-moduler og løsninger, og Fase 2 er udvikling af den totale løsning der viser selve bygningsintegrationen, montagesystemsløsningerne, inklusive den termiske del på en etageejendom i Nørrebrogade 233-237 (i København) og på Søborg Hovedgade 150 (i Gladsaxe). Projektfase 2 er bevilget og i gang.

Projektet tager udgangspunkt i Racell's metode og produktionsudstyr til fremstilling af PVT-paneler med monokrystallinske celler. Disse integreres med isoleringsløsninger på markedet.

Målet er at komme frem til et produkt, der indfrier forventningerne til effektivitet, multifunktion, montagevenlighed og arkitektonisk fleksibilitet. Pris-/ydelsesforhold, som er vigtige, vil vi se som et samlet billede, hvori indgår varmebesparelsen (ved renovering), den leverede el og varme, eventuelt fratrukket de udgifter, der ville være ved en traditionel løsning/renovering.

Det udviklede slutprodukt er efter fase 1 klar til demonstration i større skala, men kræver i fase 2, at der vil være yderligere tilpasninger og optimeringer under og efter demonstrationen.

Det kommercielle udbytte af projektet for projektgruppen knytter sig markedsføring af produktet, der kommer efter demonstrationen. Montage systemerne der udvikles i fase 1 og 2 for en fuld bygningsin-

tegration af store tunge moduler vil blive afprøvet og demonstreret på Søborg Hovedgade 150, hvor BOLIG+ konceptet introduceres for første gang i Danmark. Etageboligerne i BOLIG+ sponsoreres af RealDania Byg og vil skabe en del opmærksomhed. Både RealDania og Arkitema Arkitekterne, der står bag, har store forventninger til en kommerciel udbredelse af et fuldt integreret arkitektonisk let-montérbart ophængs- eller klæbesystem.

Grundet disse forventninger om en kommercialisering og produktion er der også hos RACELL ansøgt om flere patenter, som EUDP projektet har afstedkommet.

1.3 Hovedaktiviteter i projektet

Projektet indledtes med definition af krav til produkt og afgræsning af markedet. Derpå fulgte arkitektonisk/teknisk design af en række mulige løsninger med fokus på materialer, montage, arkitektur, pris og holdbarhed.

På grundlag af analyser og afprøvninger af disse delelementer, samlingsmetoder mv., blev løsningsmulighederne afgrænset. Der blev fremstillet 3 prototyper som blev afprøvet på DTU (se bilag 1).

Sideløbende med dette blev der foretaget simuleringer af udnyttelsen af modulerne i virkeligheden, især med Nørrebrogade som eksempel.

Som en del af projektet er der blevet udviklet et montagesystem til ophængning af modulerne. Holdbarheden af dette system er blevet dokumenteret ved omfattende styrkeberegninger suppleret med afprøvning på DTU's afdeling for bærende konstruktioner.

Projektet var inddelt i følgende aktiviteter.

Fase 1 (dette projekt)

Arbejdspakke 1 – Markedsvurdering og kravspecifikation

Arbejdspakke 2 – Tekniske løsningsmuligheder og design

Arbejdspakke 3 – Analyse

Arbejdspakke 4 – Laboratorietest

Arbejdspakke 5 – Prototype

Forløbet af disse aktiviteter var som følger:

Trods de ekstraordinært høje kravspecifikationer og målsætninger for det relativt kortvarige projekt, lykkedes det projektgruppen at forene både teori, analyse, beregninger, materialeparametre, effektivitet, ydelse, økonomi og æstetik. Arbejdspakkerne blev alle velafsluttet og både de faglige og konkrete delmål blev opnået.

De opnåede resultater for milepæle blev:

(M1) De arkitektoniske krav blev (a) helt plane "svævende" rammeløse moduler til gavlen (b) uden synlige rør, skruer, mellemrum o. lign. De montagemæssige krav blev at (c) eksisterende standard montagesystemer til isolering af facader, som f.eks. STO's og Rockwools løsninger skal kunne benyttes og at (d) kondensproblem også skulle kunne løses ved at ventilation bliver indbygget i selve PV modulstrukturen.

(KM1 & KM2) Arkitekt-, rådgiver- og entreprenør- virksomheder blev forespurgt og viste stor interesse for konceptet, men dog kun for løsninger der arkitektonisk og montagemæssigt ikke afveg fra eksisterende standardløsninger fra byggeriet. Forespørgsler hos udenlandske virksomheder bekræftede at eksport til Tyskland og Golfstater synes mulig. Fremvisning af 1:1 prototypemodeller gav meget positiv respons.

(M2) Flere detaljerede beregninger og løsningskitser blev udviklet med forsøg på at løse af især kondens og samlingsproblematikken via Acad & 3D modeller.

(M3) Udvalgte løsninger blev fremstillet, analyseret, sammenlignet og testet. Første prøvninger af flere meget forskellige prototyper PVT iSOL moduler (i størrelserne 0,5 m² – 7 m²) viser at konceptet kan realiseres og at både PV og T virkningsgraderne er høje (hhv. 18 og 55 procent). Visuelt levede modulerne op til de arkitektoniske succeskriterier.

(M4) Prototypemodulerne blev efter vellykket afprøvning iht. milepæl M4 bibeholdt på DTU på det udendørs testsite i første halvår 2015, således at de kunne måles og testes over en længere periode under forskellige vejrforhold. Resultaterne fra M4 viste en overbevisende overensstemmelse mellem simuleringsprogram og de faktiske målinger. Ligeledes viste et flowmålingsprojekt for prototypemodulerne på DTU at modulernes ydelser kunne simuleres.

Skinneophængsforløb blev vist frem til interesserede parter og virkede overbevisende ved formidling til kommende potentielle arkitekter og facadeudviklere i forbindelse med milepæl KM3.

Af hensyn til de arkitektoniske krav er de endelige prototyper til gavlen valgt med en blød prismatisk teflon over- flade der ligner glas. Mens den termiske absorber i PVT modulet er kommet i fokus på taget overvejes det at rette fokus på isoleringen af gavlen på bekostning af absorberdelen. En indbygget (patenterbar) sinusprofil i gavlmodulerne hindrer kondens og sikrer køling af cellerne. Samtidig kan gavlisoleringsmaterialet også indbygges i modulet.

Der blev udviklet et meget fleksibelt PV hhv PVT modul til tagbeklædning med isolering, hvor det er muligt at skrue direkte i modulet. Også opfindelser og udvikling af disse medførte en ny type af moduler hvor ventilering af PV modul eller køling af PVT modulet er mulig. Et eksempel på denne konstruktion er vist her, hvor man også ser ventileringen i sinuspladen i selve modulkonstruktionen.



2 Projektresultater

2.1 Markedsvurdering og kravspecifikation

Med resultatet af de første prototyper og måleresultaterne fra DTU har det vist sig at der er stor interesse for produkterne allerede inden de er demonstreret og før de er markedsført.

Efter temadage og formidlingsarrangementer har det vist sig store forventninger til PV iSOL løsninger fra EUDP projektet. Ved renovering af etageboliger vil et demonstreret og færdigt produkt være særdeles attraktivt for både arkitekter og bygherrer. Arkitekterne kan få opfyldt deres æstetiske ønsker og krav til funktionalitet og værdiskabelse for brugerne. Bygherre kan på sin side derudover få økonomien til at hænge sammen grundet det enkle montagesystem og pga. den store energiproduktion/m² og dermed hurtige tilbagebetalingstid.

Som eksempel vil interessen fra Realdania byg og invitation til deltagelse i BIPV projektet med Bolig+ i høj grad at styrke projektets replikationseffekt og fremtidige kommercielle udbredelse. Nybyggeriet Bolig+ indeholder samme kompleksitet og udfordringer som Nørrebrogadeejendommen med elegant skinneophæng og beslag af store tunge moduler på en gavl, samt montage af lette glasfri moduler på tag.

Ligeledes ser det ud til at kommuner, ligesom København kommune, der tidligere har opgivet at isolere gavle på større bygninger, alligevel kan få en attraktiv økonomi i gavlisolering ved at udnytte isolering via PV eller PVT modulerne med PV iSOL løsningen. Samme forhold gør sig gældende ved mange af de kommende renoveringsprojekter for store boligejendomme i byerne.

Endelig kommer isoleringsarbejder der er nødvendige for at bygninger kan leve op til de nye 2015 og 2020 energiklasser. Sidstnævnte har også vist sig som et kommende stormarked i forbindelse med store højhusprojekter i udlandet. Her er det afgørende at montagen er fleksibel og kan inkorporeres med eksisterende bygningselementer og deres vanlige standarder i stedet for specielle løsninger til solceller. Også at montagetiden af solceller kan skæres ned fra mange måneder til få dage eller uger har stor betydning for ethvert byggeprojekt. Således har der allerede været konkrete forespørgsler fra hhv. Norge, Sverige, Tyskland, Emiraterne, Kroatien, Serbien og Israel.

For alle parter i et renoveringsprojekt eller nybyggeri har man i PV iSOL løsningen udover arkitekturen en væsentlig økonomisk faktor i og med at alle størrelser og varierende mål for solcellemoduler kan indgå uden ekstraomkostninger, således at man ikke behøver at tilpasse bygningens facade eller tag til solcellerne, men omvendt så tilpasses PV iSOL uden besvær modulerne til bygningen.

Eneste afgørende udfordring, hvor PV iSOL benyttes fremfor PVT iSOL er de tilfælde hvor der kan være mangel på plads til de store header-rør i klimaskærmen og fremføringen inde i bygningen. Derfor er løsninger uden den termiske absorber kommercielt vigtige og blev valgt til demonstration for gavlløsningerne for både renoveringsejendommen på Nørrebro og Bolig+ nybyggeriet i Gladsaxe.

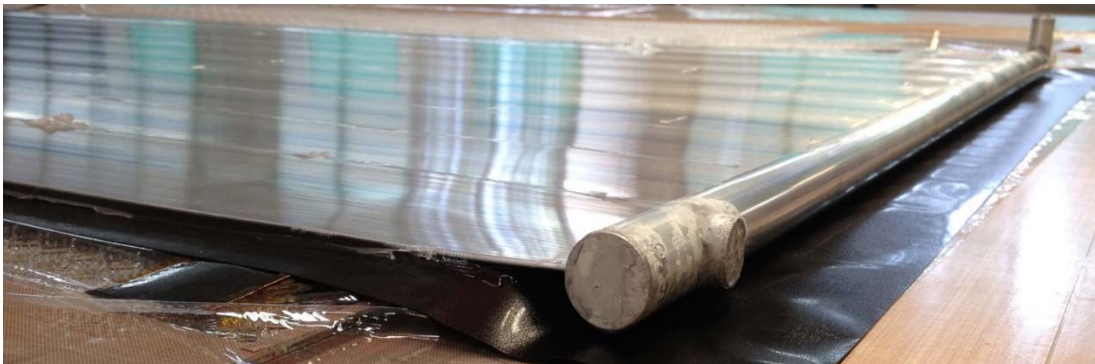
For at simplificere den kommercielle udbredelse ved renoveringsopgaver for etageejendomme med flade tage i byområder flade er der en evig udfordring mht. de mange delskygger fra gamle skorstene, udluftningshætter og lign. I projektet blev Nørrebroejendommen analyseret mht. forskellige tagændringer jf. bilag 5, hvor antallet af PVT moduler kunne udvides fra 44 til 61, altså knap en 50% øgning. Kompromiser måtte tages, men simuleringer af energiudbyttet gav en holdbar løsning der viste sig særlig gunstig for PVT: varmeproduktionstab ved delskygger er minimal for solvarme. For de PVT moduler der blev ramt af delskygger kunne PV elproduktionen optimeres vja. optimizere eller mikroinverterer. Dertil er der udviklet en ny type PVT moduler, hvor det bliver muligt at lave huller direkte i selve PVT modulerne, så udsugnings hætter kan stikke op igennem.

2.2 Tekniske løsningsmuligheder, analyse af disse og valgte løsninger

Hovedtrækkene i det udviklingsforløbet i EUDP projektets PV iSOL fase 1 kan opsummeres som følger:

Fra Kobberabsorber til Aluminium

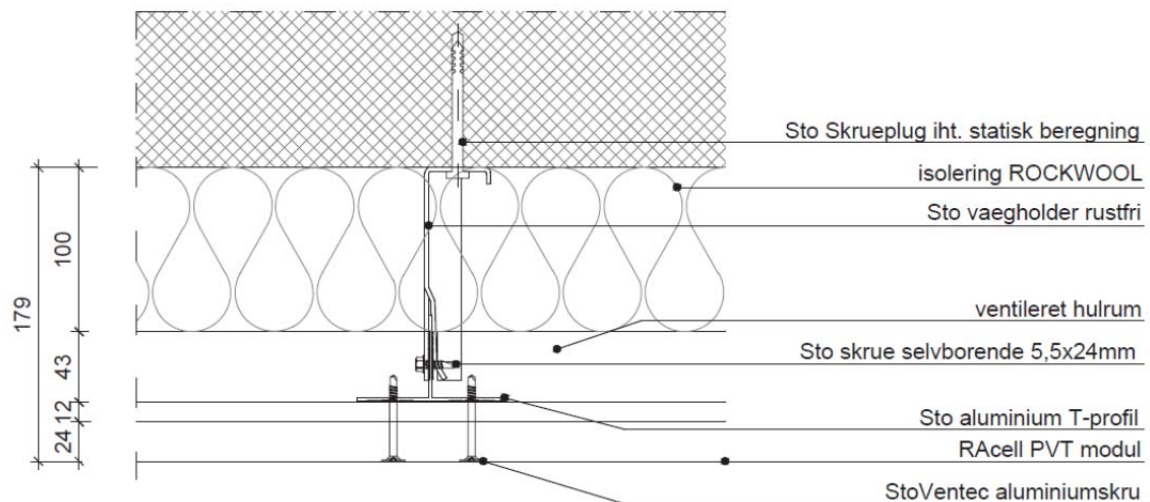
Den meget tunge og kostbare kobberabsorber som var udgangspunktet inden projektet begyndte er blevet erstattet af mange effektive tætte alurør i en tynd profiltype der normalt benyttes i køleren for kendte bilmærker. Specielle absorbere blev udviklet til projektet. Mange prototyper blev udviklet for at sikre mismatch mellem alu og glas med udvidelseskoefficienten. Mens kobber kan føjes og bøjes, var det ikke muligt at gemme de samlende headerrør i alu absorbereren. Følgen var at der blev udviklet en innovativ sandwichstruktur, så hovedrørene kunne skjules deri. De omfattende afprøvninger på DTU beviste at denne mere komplicerede struktur havde samme virkningsgrad som andre strukturer.



De kraftige 24 tommer header-rør her sammen med den 1 mm tynde alukapillarrørprofiler

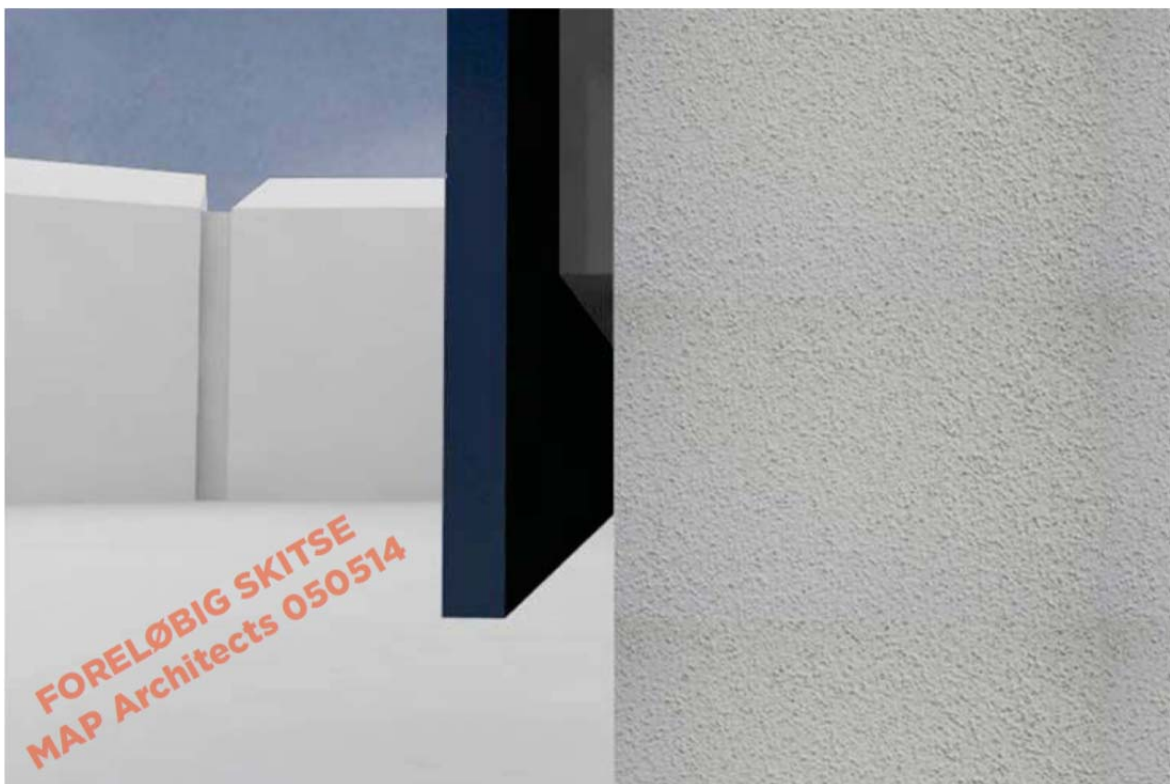
Isolering med PV modul uden kondens

Det lykkedes at indkapsle isoleringslag sammen med solcellerne. Udfordringen var imidlertid kondensdannelse på gavlen. Løsning af problemet med STO's eller Rockwools systemer viste sig mulig, men blev unødvendigt kostbar som det er vist på figuren nedenfor. Derfor blev der opfundet nye strukturer hvor kondens kunne undgås på trods af at man havde både solceller, alu-varmeabsorber og rockwool lamineret i en og samme enhed. Det blev dog besluttet at isoleringen af gavlen skulle ske uden brug af alu-absorber for at mindske kompleksiteten i denne fase af projektet. Til gengæld vil taganlægget få den komplette 3 dobbelt sammensatte PVT iSOL modul.



Arkitektonisk udtryk til Gavlmoduler

Adskillige varianter blev simuleret, visualiseret og afprøvet for Nørrebrogade ejendommen. Med friheden til at fremstille moduler i op til 3m x4 m lykkedes det at finde harmoniske og æstetiske løsninger med rammeløse moduler. En løsning som skulle vise sig interessant også for Bolig+ bygningen. Nedenfor detaljer for modulernes udformning i top og bund.



Ophængssystem for store rammeløse moduler

De kostbare stilladser der normalt anvendes ved montage af standardsolceller eller andre facadeelementer, kan fordyre et byggeri så meget at selve bygningselementerne bliver en mindre del af totalbudgettet. Løsningen for de store typisk 200 kg tunge glasmoduler krævede nye opfindelser, hvilket lykkedes at frembringe under projektførløbet. Det mest afgørende var Racell's innovative Omega stålprofil der lamineres inde i modulet. Omega profilen kan derefter udbygges med diverse typer af stålbeslag, som passer til skinner eller andre montagesystemer.

De største problemer med indkapsling/ laminering af de kraftige Omega-metalprofiler var at de kunne knække cellerne, kunne flytte sig under fremstillingsprocessen, kunne danne luftbobler foran cellerne m.m. Efter adskillige forsøg lykkedes det at udvikle profiler og processer til en repeterbar indkapsling. Nogle af de tidlige prototyper med diverse fejl (hvide pletter m.m.) ses nedenfor:

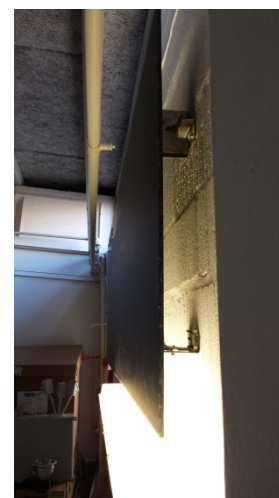


Selve beslagsystemet tog udgangspunkt i STO modellen hvor man benytter skinner til at modvirke div ujævnheder og krumninger henover en mur eller stor facade. Enkelte systemer blev afprøvet jf. STO, men det lykkedes at finde et billigere system der mere gik efter principper der minder om dem hvor man hænger store skærme op på lodrette vægge. En af prototyperne er vist her, er uden skinner og kunne med kun fire ophængspunkter klare en vægt på over 300 kg. Det blev derfor valgt som et af de systemer der siden skulle videreudvikles og optimeres.

Størst tiltro var der til dette system kombineret med skinnesystem.



Solcellemodul med 8mm glas ophængt vha. omega profil beslagsystem



Ophænget set fra siden

2.3 Laboratorie test (DTU rapport)

I alt fire PVT moduler blev testet på DTU i løbet af sommeren og efteråret 2014, idet kun den termiske ydeevne er blevet analyseret. Modulerne blev testet uden at solcellerne er aktive. Dette giver lidt højere målte termiske ydeevne, men beregninger og de afledte parametre er blevet korrigeret herfor. Den udførte modellering og beregning er baseret på arbejdet i IEA SHC Task 35 om PVT systemer. Testproceduren følger nøje HGHDV metoden i DIN EN ISO 9806:2014 standard.

For en detaljeret præsentation henvises til bilag 1 til denne rapport.

De afprøvede moduler er vist i Figur 1. Modul nr. 1-3 er på hver ca. 2 m² og har som bagside kun en træplade og luftrummet mellem modul og tag. Nr. 4 er isoleret med 100 mm mineraluld på bagsiden. Forskellen på modul 1-3 ligger i nogle konstruktive opbygninger af absorber og solceller.

Måler for vindhastighed og langbølget stråling ses og på billedet. Det vil fremgå at vindhastigheden har afgørende betydning for ydelsen.



Figur 1 – Moduler monteret på prøvestand på DTU. Modulet til højre er isoleret med 10 cm på bagsiden, de øvrige med en træplade.

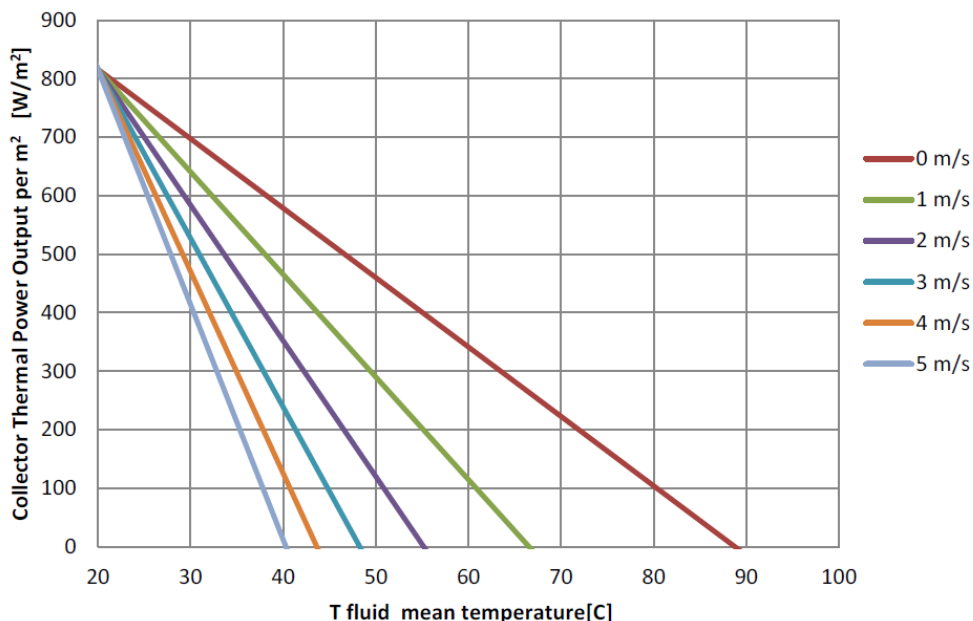
De viste moduler er koblet i serie til en beholder på 735 liter som langsomt varmes op. Derved sikres at alle moduler har det samme flow og ydelsen kan da måles med termosøjler over hvert modul. De afgørende parametre for den efterfølgende analyse er således temperaturstigningen over det enkelte modul, indløbstemperaturen og den målte vindhastighed og solindstråling. Analysen foretages så på timeværdier for sæt af disse værdier. Der har været konstant flow i anlægget over en lange perioder henover sommer og efterår 2014 og der er således opnået mange værdier som gør analysen er signifikant.

Det faktum at der også er cirkulation om natten gør at man samtidig måler modulernes evne til køling.

Som nævnt er afprøvningen primært for at bestemme den termiske ydeevne, men der er også udført en kort holdbarhed test, især af PVT modul laminering og aluminiumsabsorberen, der er udviklet af Hydro aluminium og baseret på ekstruderen. Herunder har modulerne været udsat for stagnationstemperaturer uden køling i længere tid. Resultatet af denne afprøvning viste at de tre forskellige opbygninger af absorber var holdbare og stabile og ikke viste tegn på nedbrydning eller formændring under prøveperioden.

2.3.1 Termisk ydeevne

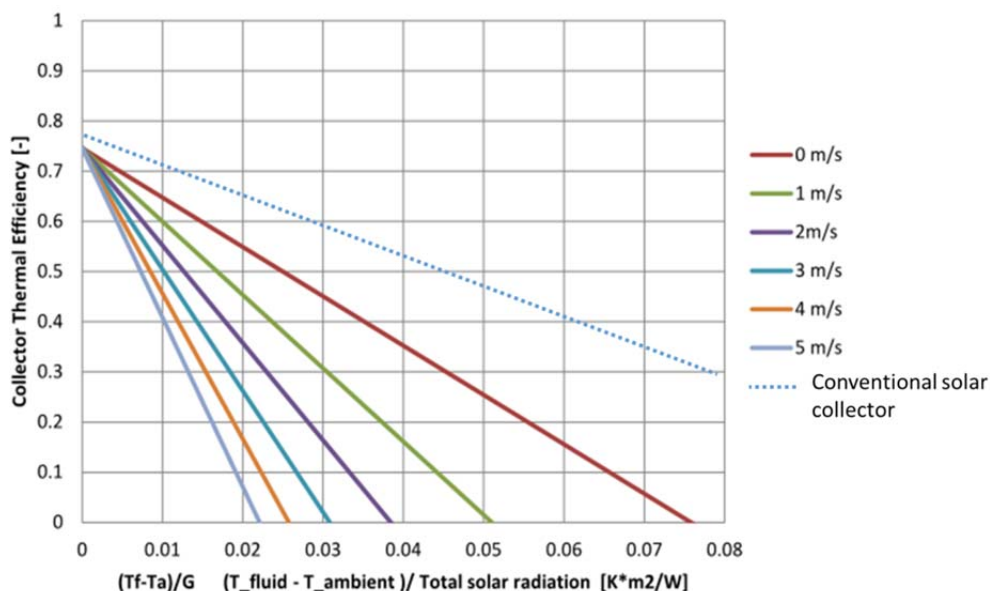
Nedenstående Figur 2 viser PVT modulets produktion af varme som en funktion af temperaturen på væsken for forskellige vindhastigheder målt umiddelbart ved siden af modulet. Det fremgår at der som ventet er en meget stor afhængighed af vindhastigheden, som det også er tilfældet med solfangere uden et isolerende dæklag.



Figur 2 - Effektivitetskurve for modul nr. 4, ydelsen i forhold til temperaturen på væsken.

Den følgende Figur 3 viser det samme, men udtrykt på den mere korrekte måde i forhold temperaturforskellen mellem væske og udeluft divideret med solindstrålingen. På samme figur er der vist den tilsvarende effektivitet for en almindelig solfanger med et lag glas til opvarmning af varmt brugsvand. Det fremgår heraf at det er nødvendigt at bruge PVT modulet i et temperaturområde hvor forskellen mellem væsketemperatur i modulet og den omgivende luft ikke er for stor, især ikke ved høje vindhastigheder. Det fremgår også at man i dette område kan opnå ganske pæne ydelser i sammenligning med en konventionel solfanger.

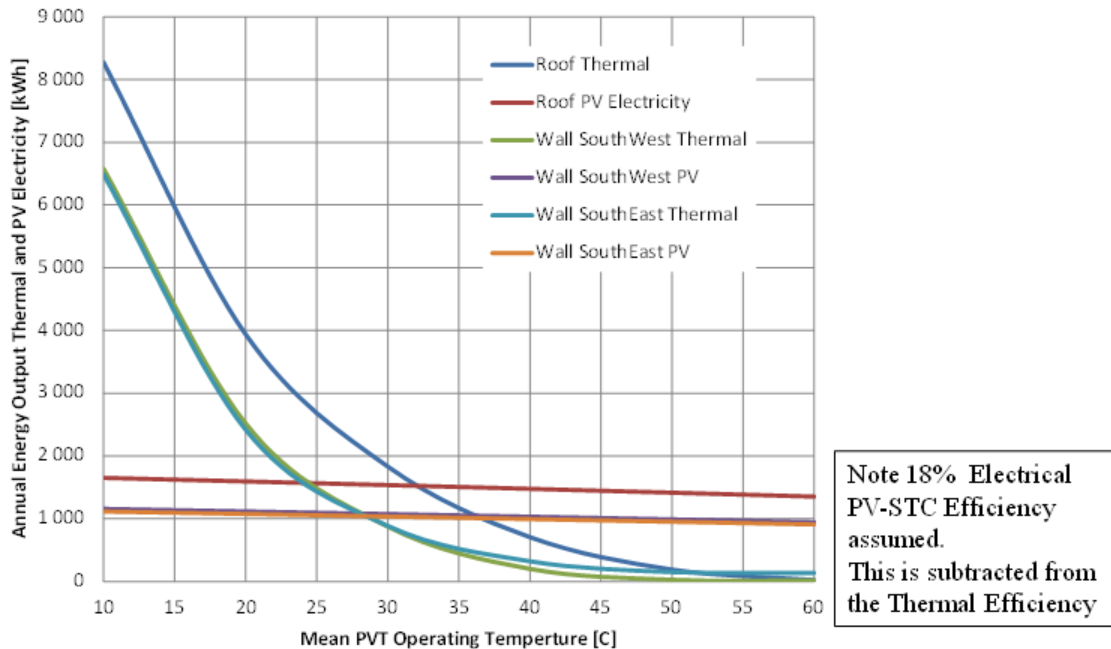
De viste kurver gælder for modul nr. 4, men det er konstateret at effektiviteten for de 4 målte moduler er meget ens og at isolering på bagsiden har minimal betydning. Dette hænger sammen med at varmetabet fra forsiden er mange gange større end tabet på bagsiden.



Figur 3 – Effektivitetskurve for PVT modul. Den stiplede linje viser effektivitetskurven for en almindelig solfanger med en varmetabskoefficient på 5,5 W/m2C.

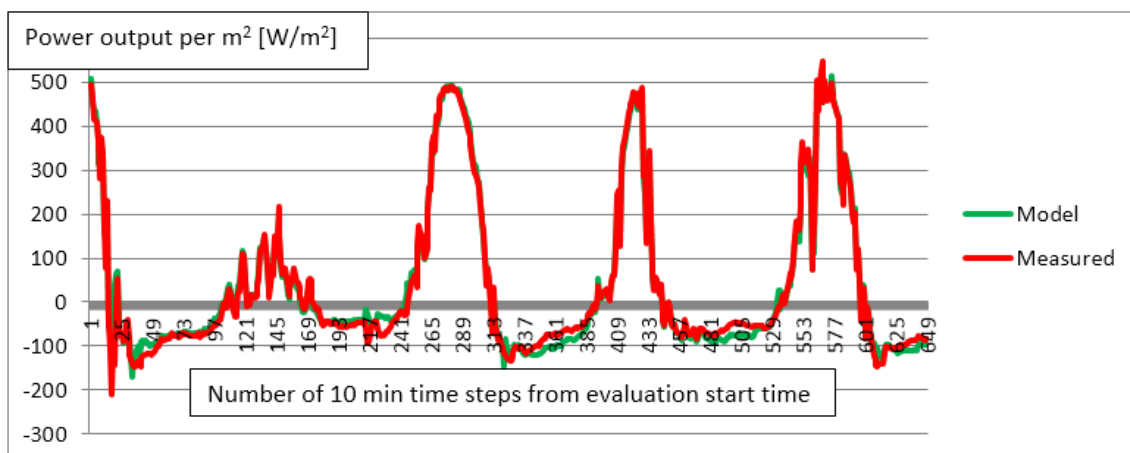
Af bilag 1 og

Figur 4 fremgår endvidere en beregning af de ydelser af el og varme der kan opnås med PVT modulet. Disse beregninger er baseret på den målte termiske effektivitet og den kendte effektivitet af solcellerne. Nedenfor er gengivet figuren der viser ydelsernes afhængighed af temperaturen af væsken i modulet. Det er her tydeligt at ydelsen mht. varme aftager kraftigt med stigende temperatur, mens ydelsen af el kun aftager lidt, svarende til de før anførte ca. 0,5 % pr. grad.



Figur 4. Beregnede ydelser af el og varme på grundlag af de målte effektiviteter. Det er brugt en hældning på 45 grader på Roof. Figuren viser den årlige ydelse på et modul på 6 m² som funktion af temperaturen af væsken i absorberen.

Som nævnt giver PVT modulet en vis kuldeydelse om natten, som det fremgår af Figur 5. Denne ydelse fremkommer idet der om natten vil være en udstråling til den kolde himmel, ligesom den omgivende luft i perioder vil være koldere end væsken i modulet. Afkølingen vil i perioder føre til at der dannes kondens på absorberen hvorved den modtager varme fra kondenseringen og afkølingen bremses. Det har ikke været hensigten med dette arbejde at gå nærmere ind i dette, men det åbner op for nye udviklingsspor.



Figur 5. Varmeydelsen pr. m² af PVT modulet over en periode på godt 4 dage. Der er vist målte og beregnede værdier. Det fremgår at der i perioden er en vis kuldeydelse om natten. Grafen er til illustration idet temperaturen af væsken ikke indgår.

Ambitionen med hensyn til den termiske ydeevne og stabiliteten af PVT modulet er blevet opnået. Endvidere er det tilfredsstillende at modulet er blevet så tyndt og stabilt som det er tilfældet.

Der kan for eksempel på en tagflade med 45 grader hældning opnås en ydelse på ca. 200 kWh pr. m² PVT ved forvarmning af vand til 35 C. Denne ydelse vil kun opnås hvis der er en ret lille dækningsgrad således at temperaturen ikke stiger over de 35 C. En nærmere analyse af dette vil blive foretaget under det igangværende demonstrationsprojekt.

Det ses at den tilsvarende ydelse for en lodret sydvendt gavl er ned under 100 kWh pr. m² PVT. Denne stiger så omkring 200 kWh hvis temperaturen kommer ned på ca. 27 C.

3 Kommercielle resultater

Facadeløsningerne fra PV iSOL fase 1 forventes brugt i kommende renoveringsprojekter hos Realdania, hos Henning Larsen Architects, Arkitema Architects og i kommunerne København, Århus, Middelfart, Albertslund, Hamburg (DE), Berlin (DE), Växjö (SE) m.fl. Hertil kommer større nybyggeri projekter i hhv. Oslo, Stockholm, Beograd og København.

Alle kommende potentielle projekter kræver dog før en kommercialisering at der udført en demonstration af PV iSOL systemet. Demonstrationerne på Nørrebrogade og af BOLIG+ er derfor af afgørende betydning for den kommercielle succes.

På næste side er vist udkastet til BOLIG+ projektet, hvor PV iSOL fase 2 pågår netop er færdiggjort. Mere herom i rapporteringen for fase 2. Det kan dog afsløres at Det lykkedes at videreudvikle Omega ophængssystemet, så man indenfor 20 minutter med adgang til en lift kan montere både skinner og et 200 kg tungt modul (areal 8m²). Et tilsvarende areal der skulle dækkes af standardmoduler ville tage ca. 12 timer at montere.

For en gavl på en 5 etagers bygning forventes projektet prismæssigt at have medføre at

(1) Montagearbejds løn inkl. stilladsomkostninger kan reduceres fra 1.500 kr/m² til kun 250 kr/m² for det nye Omegaophængssystemet inkl. lift.

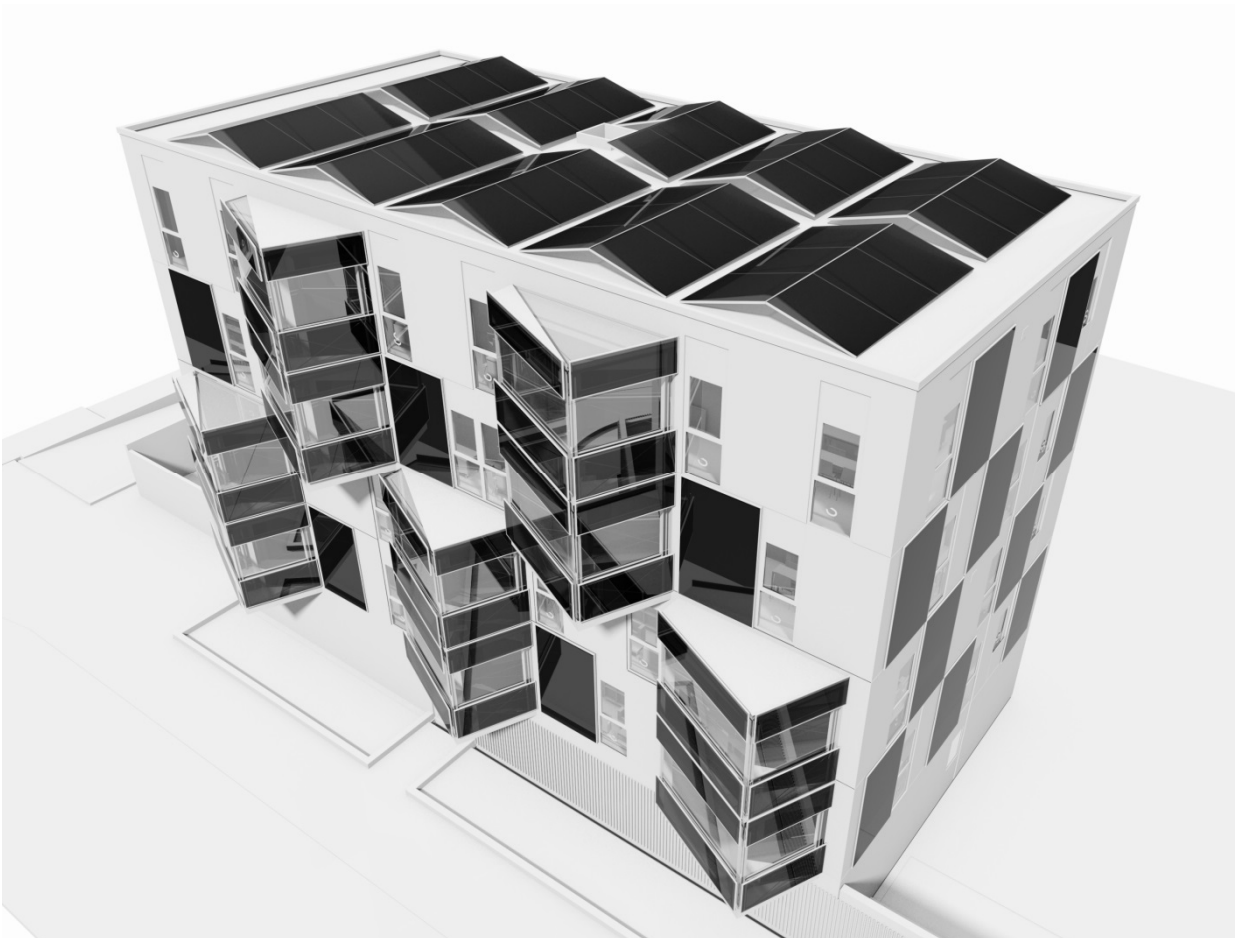
(2) For standard moduler med alu-rammer og dobbelt lag aluminiums-skiner falder Alu-montagematerialedelen fra 450 kr/m² til 120 kr/m².

(3) For et Kobber PVT modul falder prisen fra 16.500 kr/m² til 1.800 kr/m² for et Alu PVT modul.

Tilsammen forventes det altså, at hele systemprisen for en gavlinstallation med solceller og isolering for et PVT modul falder til en femtedel fra 1.950 kr/m² til 370 kr/m² for arbejds løn og materialer til ophæng. Tilsvarende gælder for selve PVT modulet at projektet ved overgang til aluminiumsabsorber med kapillarrør falder til en tiendedel fra 16.500 kr/m² til 1.800 kr/m².

Prisen for isoleringsmaterialet, stenuld eller glasuld, er uændret og for et PV standardmodul (ikke PVT) i stor størrelse, 6 m² forbliver prisen uændret således at et PV og et PV iSOL modul vil koste det samme.

For tagmodulernes vedkommende er der også store besparelser at hente og i samme størrelsesorden som for facademodulerne. Tagmodulerne kan tilmed passivt køles, selvom de klæbes direkte på tagpap. Hertil kommer at der ingen junction-box er, hvorved f.eks. rengøring af modulerne er lettere.



4 Formidling

I forbindelse med EUDP-projektet har projektpartnerne haft en række formidlingsaktiviteter.

4.1 Præsentationer, artikler, temadage, konferencer og lignende

Det har været primært via Temadage, workshops, konferencer og udstillinger. En række publikationer i form af populære præsentationer har været tilgængelige på nettet, mens publikationer i faglige tidsskrifter dog bevidst har været begrænset, grundet hemmeligholdelse af patenterbare teknologier.

Nedenstående er listet nogle af de mange præsentationer, der har været givet i relation til EUDP-projektet PV iSOL.

4.1.1 Temadage og workshops

Temadage i 2013 samt 2014 arrangeret af følgende:

- Building Green [Forum]
- Solar City Copenhagen [KADK og DAC]
- Gate 21 [Odense]
- Energistyrelsen [Bryggens Kulturhus]
- Egedal Kommune [Rådhuset]

Workshops i 2013 samt 2014 arrangeret hos bl. a. følgende:

- Københavns Kommune
- Egedal Kommune
- Skive Kommune
- Gentofte Kommune
- Henning Larsen Architects
- Arkitema Architects
- C.F. Møller Architects
- MAP Architects
- Cubo Architects
- Priedemann Fassadenberatung GmbH
- Mounting System GmbH
- GeoClimateDesign AG
- PI Photovoltaik-Institut Berlin AG
- FH Eberswalde, College for Sustainable Development
- TÜV Rheinland
- PVExperts.Org
- Fraunhofer CSP
- COWI

Rambøll
NIRAS
DATEA
EnergiMidt
RealDania Byg
Aarhus Universitet
Københavns Universitet
DTU-Byg
Savosolar
Rockwool
STO
ISOVER

4.1.2 Konferencer og Udstillinger

Fremvisninger og præsentationer ved konferencer og udstillinger i 2013 samt 2014:

Intersolar [med egen stand - Tyskland]
PV Specialists Energy Conference [med egen stand - Tyskland]
Climatizacion [med egen stand -Madrid]
Temadage hos RACELL [København]

Flere præsentationer og publikationer fremgår af diverse Bilag i Rapporten.

Fase 2 (demonstration i Nørrebrogade og Bolig+ i Gladsaxe)

En række publikationer og yderligere formidling der også inkluderer PV iSOL fase 1 kommer i 2015 og 2016 i forbindelse med realiseringen af PV iSOL fase 2.

Som nævnt er fase 2 efterfølgende blevet bevilget under EUDP's almindelige pulje og er under gennemførelse (journal nr. 64014-0561) mens denne rapport skrives. Fase 2 vil indeholde udvikling/tilpasning af løsning med køling af solceller til forvarmning af brugsvand. Endvidere vil der arbejdes med endelig udvikling af montagesystem af PVT-moduler. Andelsforeningen i Nørrebrogade 233-237 står parat til at investere 1,1 mio. kr. ud fra et ønske om at udvikle og forbedre deres ejendom, naturligvis under den forudsætning, at økonomien er rimelig.

Med Realdania's store engagement i BOLIG+ projektet vil der i meget høj grad blive publiceret og formidlet om PV iSOL resultaterne. Det sker både med Temadage, internet, bogpublikation og film.

Appendix - BILAG 1 - Performance Test of Racell PVT Modules

Bengt Perers, Simon Furbo and Jakob Berg Johansen
DTU Civil Engineering-Report R 322 (UK)
November 2014

4.2 Introduction

This test performed at DTU Byg is part of the project "Development of PVT module for multi apartment buildings." The aim of the project, which is supported by the Danish Energy Agency within the EUDP programme, is to develop a Building Integrated PVT. (BIPVT). The BIPVT has a multifunction design to produce electricity, as well as thermal energy and additionally act as thermal insulation of a building. This can be achieved at the same time when the innovative product is installed on a wall or roof. Architects, consultants and building companies are also involved to get a pleasant, practical and safe design of the whole installation.

Four PVT modules from the company Racell [7] have been tested at DTU during the summer and autumn 2014. Only thermal performance has been analysed. The modules were tested without the PV part active. This gives slightly higher measured thermal performance but in the annual calculations, the derived parameters have been corrected for the PV part being active. This is done by reducing the thermal zero loss efficiency by the nominal cell efficiency (18% assumed). The equations behind the test and calculation model are described in detail in [1]. This modelling is also based on work within IEA SHC Task 35 about PVT systems [2]. The test procedure closely follows the QDT method in the DIN EN ISO 9806:2014 standard [3].

The collector prototypes tested, are shown in figure 1. Collector 4 is heavily insulated (10 cm mineral wool) on the backside. Collector 1, 2 and 3 to the left, only have an air space and a wooden board on the backside. The extra wind and long-wave sky radiation sensors close to the collectors are also indicated.



Figure 1. The prototype collectors tested. They are connected in series and have the same flow rate. The collector size is 2 m² respective 6 m².

By means of pyranometers the total and diffuse solar radiation on the modules were measured. Also the ambient temperature was measured. The volumetric water flow through the modules was measured with an ultrasonic flow meter. The inlet and outlet temperatures of each module along with temperature difference across each module between inlet and outlet were measured with thermocouples and specially designed thermopiles. Thermopiles have extra high accuracy, at low temperature differences that occur frequently during this kind of test.

The collector loop was connected to a 735 litre tank. Normal hot water draw offs were applied at 7:00 12:00 and 19:00 to get a low inlet temperature for the collectors.

The heat transfer fluid used in the modules is water, which was separated from the water in the tank with a heat exchanger. Pumps were set to run 24 hours to get a continuous flow and a slow temperature swing up and down in the PVT collectors, out of phase with the solar radiation and ambient temperature each day.

This meant that the inlet temperature to the collectors in series was slowly increasing during the day and then going down in the late afternoon and night until the next morning.

The large thermal inertia of the tank meant that a time lag was introduced between solar radiation and operating temperature. This gave good conditions for evaluation of collector parameters.

On top of this also night time data were used to get the heat loss parameters more reliable. The night time losses are not exactly the same as during day time, but the special aluminum absorber used here, has a very high heat transfer efficiency factor F' making the error small in heat loss evaluation at night, even if the thermal flow is going the other way leaving the collector then. For cost optimized finned solar collector absorbers the error can be significant though, when using night data and separate loss parameters are needed for day and night.

The PVT collectors are designed to be installed in a demonstration project at Nørrebro in Copenhagen. The whole concept also includes an integrated insulation of the old brick walls of the facades. Therefore the PVT collector gets a multiple function of 1) heat production, 2) electricity production and 3) wall insulation.

Figure 2 shows an architect view of the finished installation on two facades southwest and southeast. The DTU test was primarily a thermal performance test, but also a short durability test, especially of the PVT module lamination and new aluminum absorber design. The aluminum alloy is developed by Hydro Aluminum. The aluminum extrusion is made by SAPA and the prototype absorbers were made by the collector manufacturer Savosolar:

SAPA <http://www.sapagroup.com/en/precision-tubing/solar/applications-in-solar/mpe-absorbers/>
Savosolar. <http://www.savosolar.fi/>

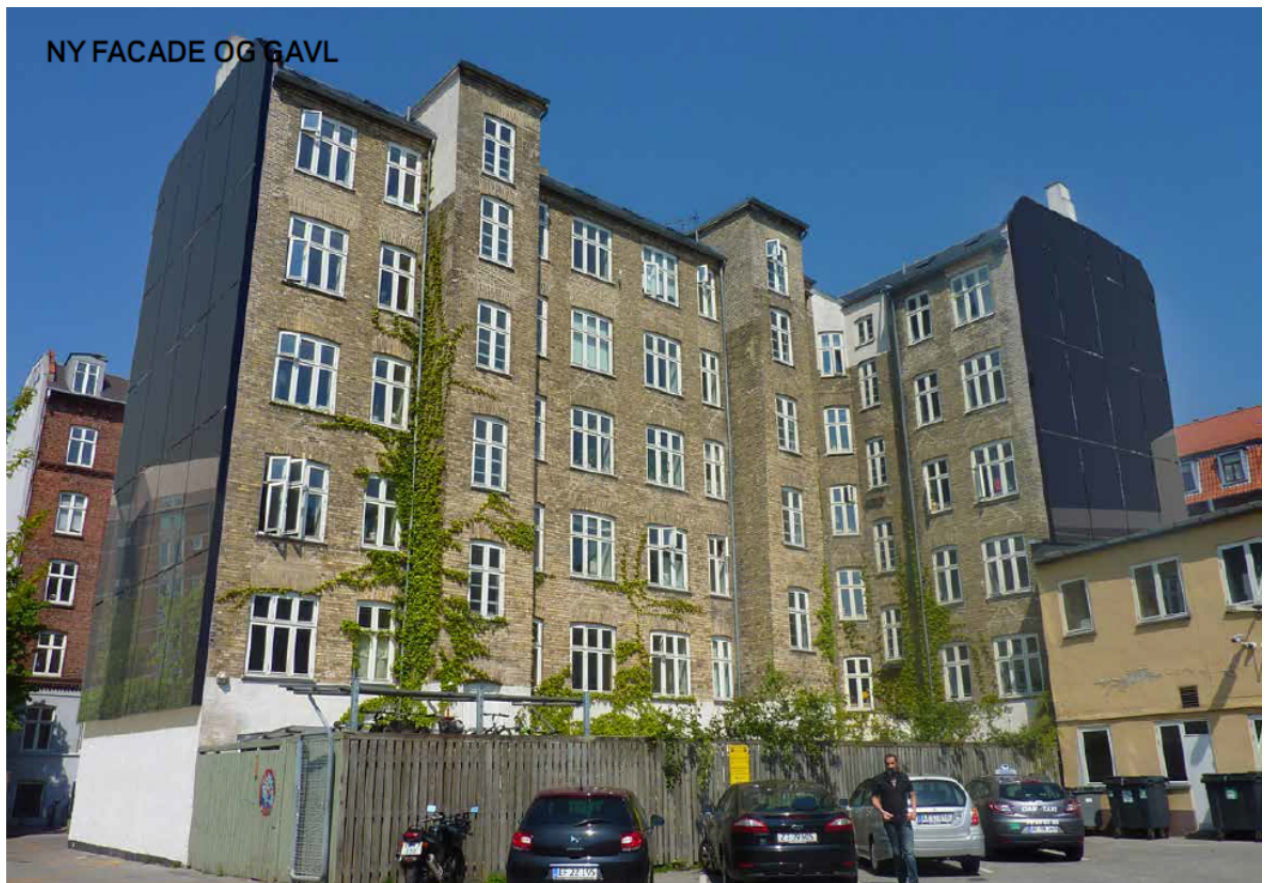


Figure 2. An Architects view of the demonstration installation, on two walls in Nørrebro Copenhagen.

4.3 Test Results

Based on analysis of all day performance measurement data from July 2 to July 6 at DTU, the PVT collector parameters and a thermal collector model for annual performance prediction, has been determined for module 4.

A Standard QDT all-day model and parameters from test have been used to create a standard test efficiency diagram, figure 3. The full all day QDT model and parameters are used to derive the curves but the input variables are set to clear weather conditions at noon given below:
 Beam radiation (900 W/m^2), Diffuse irradiation (100 W/m^2), Incidence angle (0°), Wind speed in steps 0-5 m/s and long wave net radiation (-100 W/m^2).

The strong wind and temperature dependence on the thermal performance can be seen in both figure 3 and figure 4. This is due to the unglazed design.

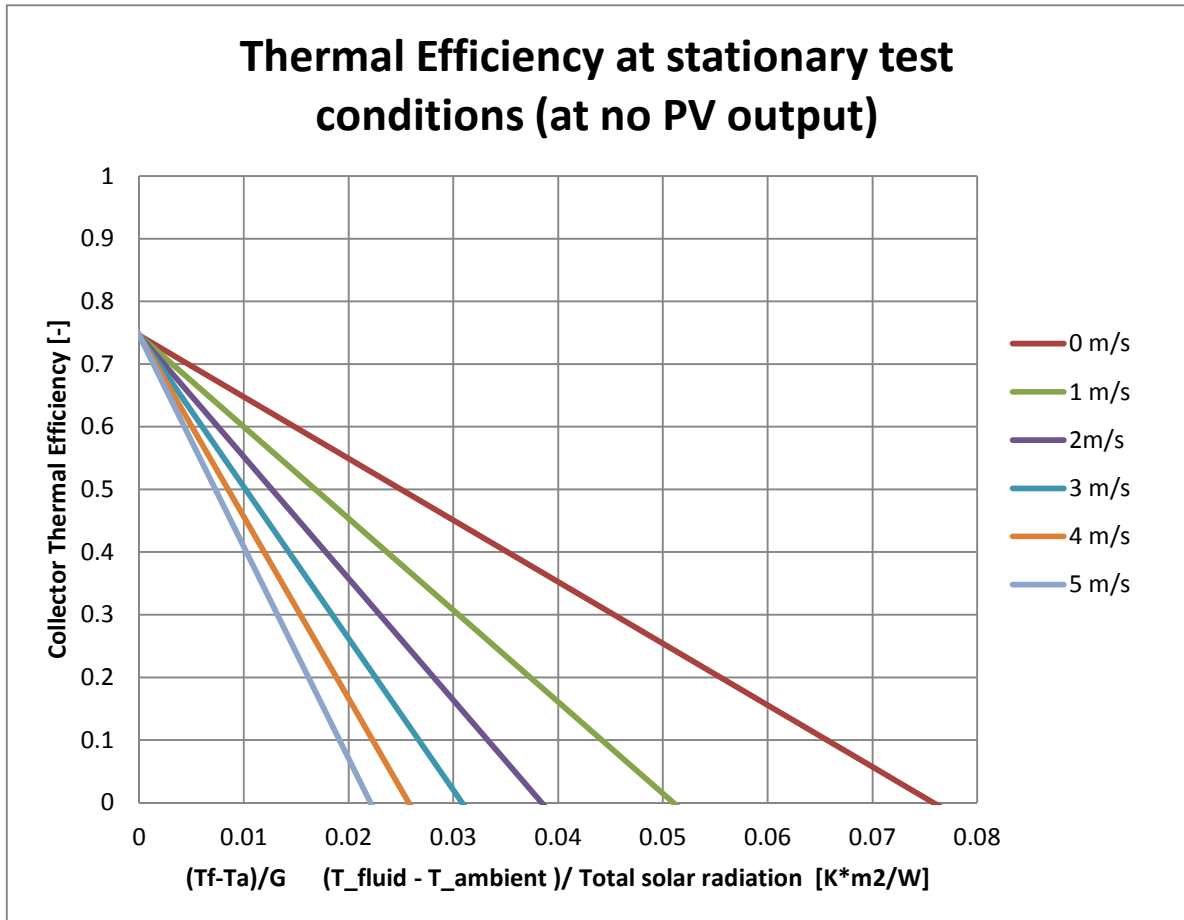


Fig 3. Collector thermal efficiency diagram. Calculated from the model with fixed clear weather variable values. The model parameters used, are from July.

The same information and variable settings can also be used to show results as peak power output per m^2 at standard test conditions, see figure 4.

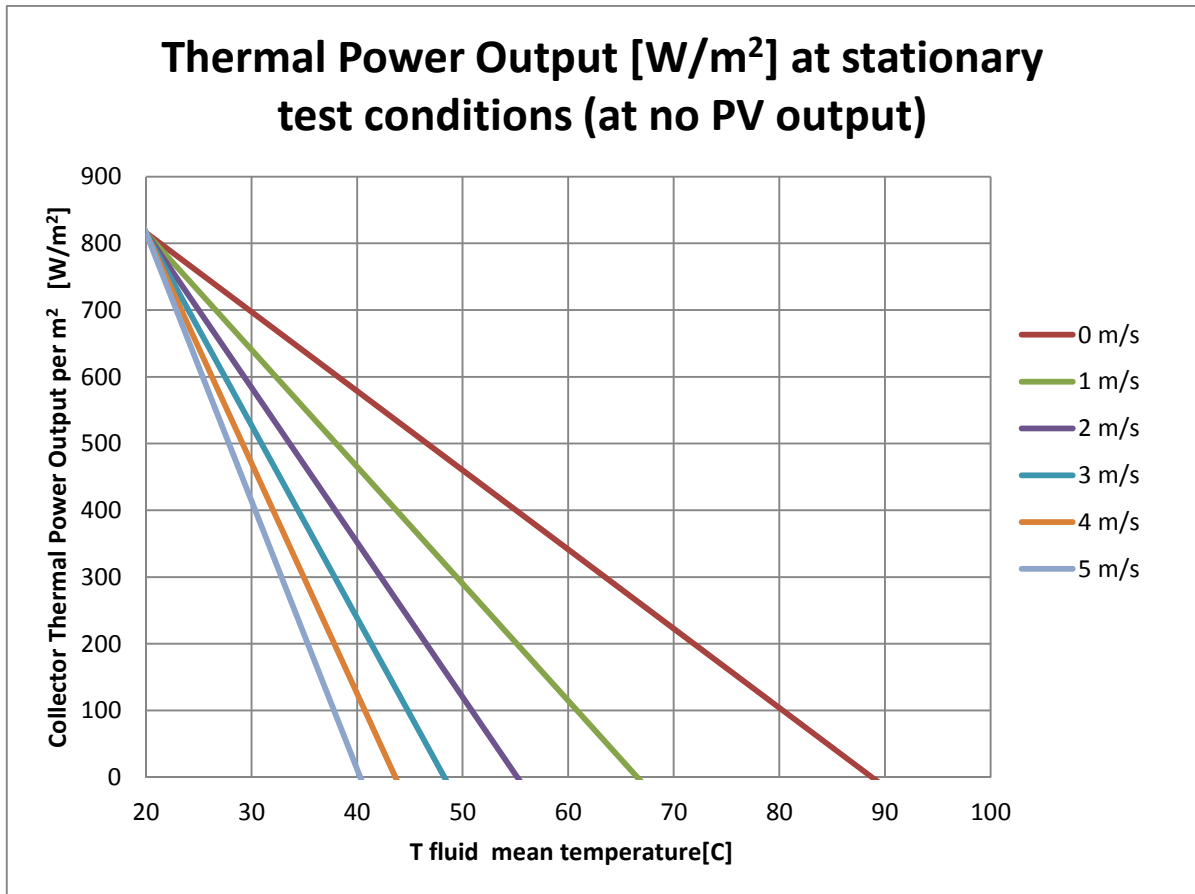


Fig 4. Power output per m² aperture area versus mean operating temperature, at different wind speeds. The diagram is calculated from the full QDT model with fixed clear weather variable values. Model parameters used, are from July 2014.

4.3.1 Thermo vision camera check

A thermo vision camera was used to check the surface temperature of all 4 prototypes. This was done to reveal any problems with flow distribution or delamination of the cells from the special aluminum absorber. This could otherwise reduce the performance significantly.

As can be seen in figure 5 the surface temperature only varies slightly. No significant cold- or hot spots are visible.

The temperature resolution is magnified for each picture to still give colour changes. Therefore, the colour scales are not the same for the different collector thermal images.

The main reason why there is a temperature gradient visible in collector 4 and not for the other collectors is that the flow per m² is much higher (3 times) for the small collector prototypes due to the series connection.

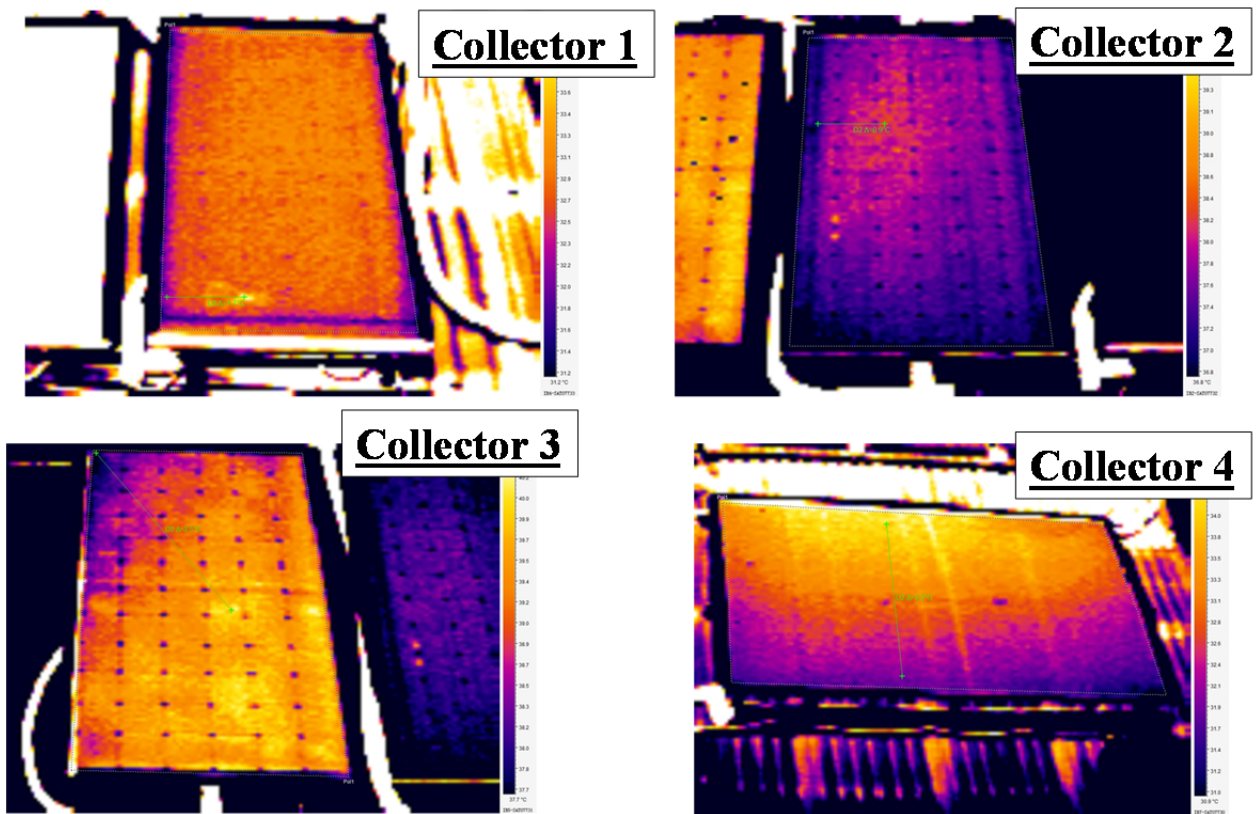


Figure 5. Thermo vision camera pictures indicating that there are no problems with delamination or flow distribution or air enclosures that can affect the performance results.

4.3.2 Model and parameter validation

A comparison of all day power output is shown in figure 6 for module 4. Measurements are compared to the QDT model with a complete parameter set and all measured input variables active in the modeling.

The diagram indicates a reasonable match for all days and also 24 hours around the clock.

The nighttime measurements are used to separate the heat loss parameters from the zero loss efficiency parameters more accurately.

The heat loss parameters are theoretically not perfectly equal during day and night in general, but for this very good absorber and PVT design, this can be justified as the heat transfer between fluid and collector surface is so good and the error will be small.

This diagram is important to give confidence in the annual performance calculation as the same model and parameters are used in the ScenoCalc tool.

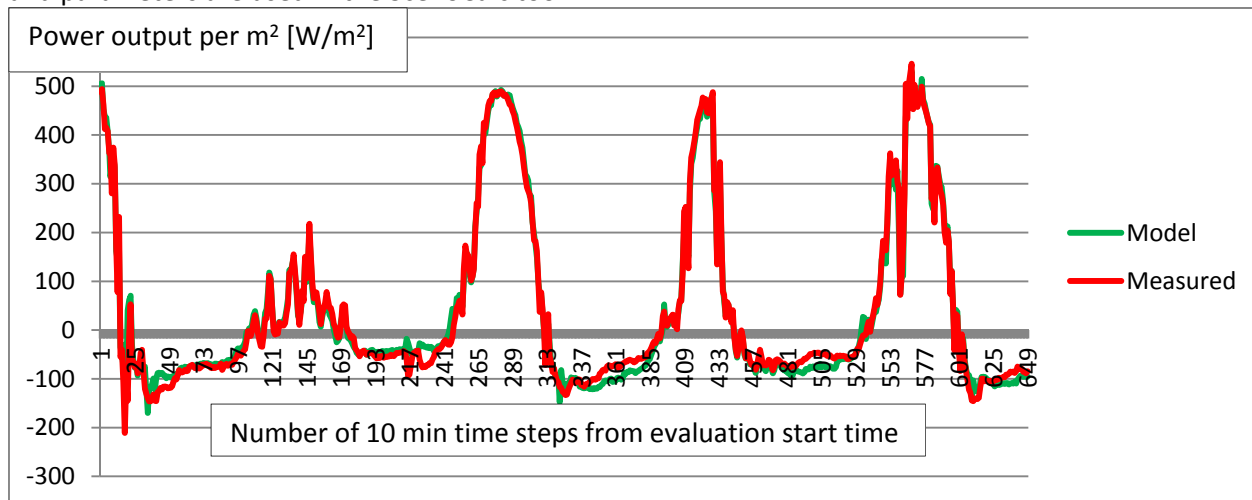


Fig 6. Model validation for the test period in July 2014. The same model and parameters are used in the annual performance calculations using ScenoCalc PVT.

4.3.3 Comparison of thermal output between the PVT modules

To give an experimental impression of how close the different PVT modules perform, some data are shown from the end of the season in October, when the power output is most sensitive to design differences. The absorbed thermal solar energy and heat losses gets closer to each other or even negative over the day and as the net output is the difference in between it gets more sensitive.

Figure 7 shows thermal output per m² of aperture area, to be directly comparable between differently sized modules. There is a small difference in power output, due to the increasing operating temperatures, when the collectors are connected in series. It can be seen that collector 3 (green curve) that is first in the flow order, has the highest performance during day and lowest during night. This is as expected. The opposite happens for the last collector 4 (dark blue curve). If the collectors were exactly the same in performance, the curves would differ like this. A red curve is also shown for the total energy going into the tank. This is a double check that no strange measurement errors are present.

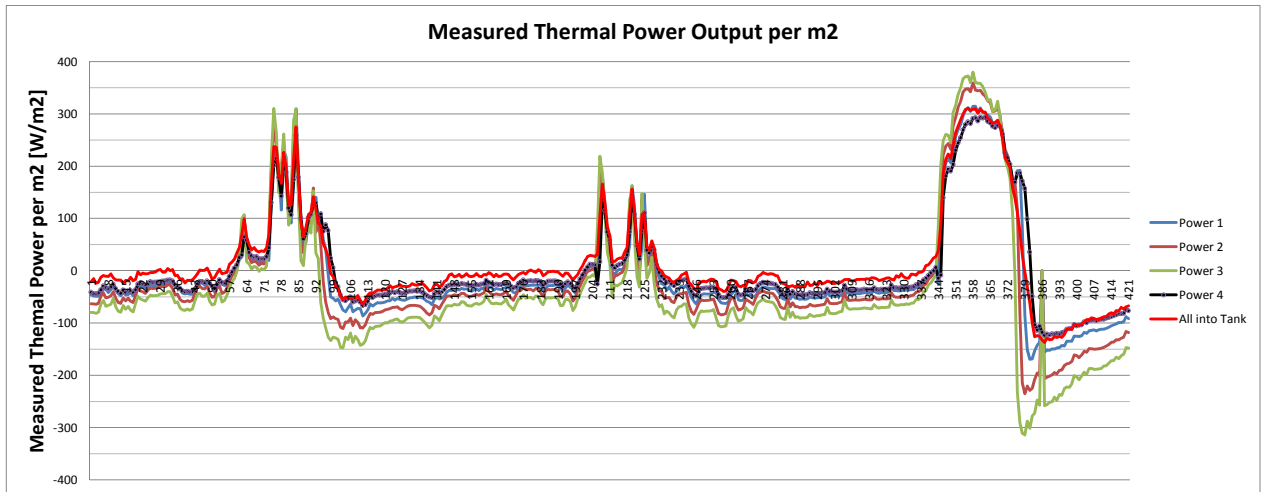


Figure 7. Measured thermal power output, for all PVT collectors for October 26-28. Also the total power going into the cooling (heat sink) tank is shown. All results are presented as power per m^2 aperture area. Note no correction, for different mean operating temperature in the collectors, is done in this diagram.

In figure 8 the modelled collector output power (Y-axis) versus measured output power (X-axis) for collector 1, 2, 3 and 4 are shown. This is for a period in late October using the exactly the same model and parameters determined for module 4 from the July data evaluation.

A small difference can be seen between the collector prototypes. However, the difference is very close to the measurement accuracy. The scattered points come from partial shading of the collectors from trees around the test site. The small solar sensor detector area may be fully illuminated but the collectors partly shaded. It could generally be the opposite producing low points but here the solar sensor is high up on the test roof where the shade only may reach in winter.

The model will predict normal performance as if they were fully illuminated, but the collectors do not receive full solar radiation part of the afternoon and produce much less net thermal power output than normal for shorter periods giving scattered points.

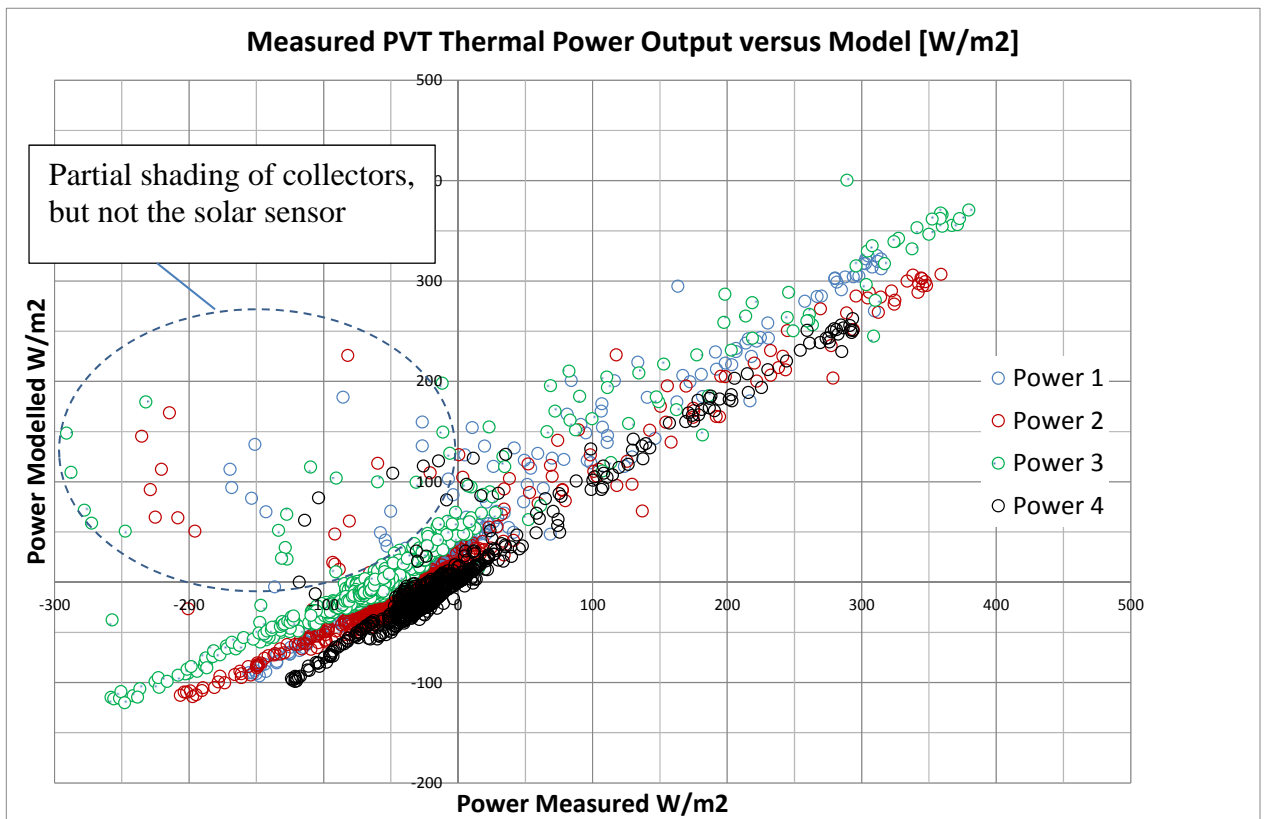


Fig 8. Modelled collector power (Y-axis) versus measured power (X-axis) for collector 1, 2, 3 and 4 for a period in late October with the model and parameters from the July data evaluation. A small difference can be seen between the collectors but it is very close to the measurement accuracy. From the measurements, it is concluded that the thermal efficiency curves are almost the same for the four modules.

4.4 Annual Performance calculations for the Copenhagen climate

The model and parameters derived from July data were used in the ScenoCalc PVT tool [4], to estimate annual energy output both from the PV and from Thermal part of the prototype PVT design. The PV aperture area based STC (Standard Test Conditions) module efficiency, was set to 18% corresponding closely to the high performance PV cells usually used by Racell. This STC efficiency was subtracted from the thermal zero loss efficiency, as the thermal test was done without the PV part active.

The chosen PV input STC efficiency level 18%, based on module aperture area, can later be adapted to the real STC efficiency in an installation to derive results that are more precise.

In figure 9, it can be seen that the thermal performance is extremely sensitive to the system temperature demand. Full hot water temperatures are not attainable in practice in the Danish climate. However, preheating and Swimming pool heating is completely possible in a good system with low temperature losses in heat exchangers for example. Connection to a heat pumps system is also a possible system solution.

It can also be seen that there is a significant difference due to tilt. A façade installation gives much less energy per year than a 45 degree tilted roof installation at the same operating temperature. A reduction of the operating temperature by 5-8 K, can compensate for the tilt disadvantage in thermal performance for a façade. The PV electrical output is always around 30-40% lower for the façade almost independent of operating temperature.

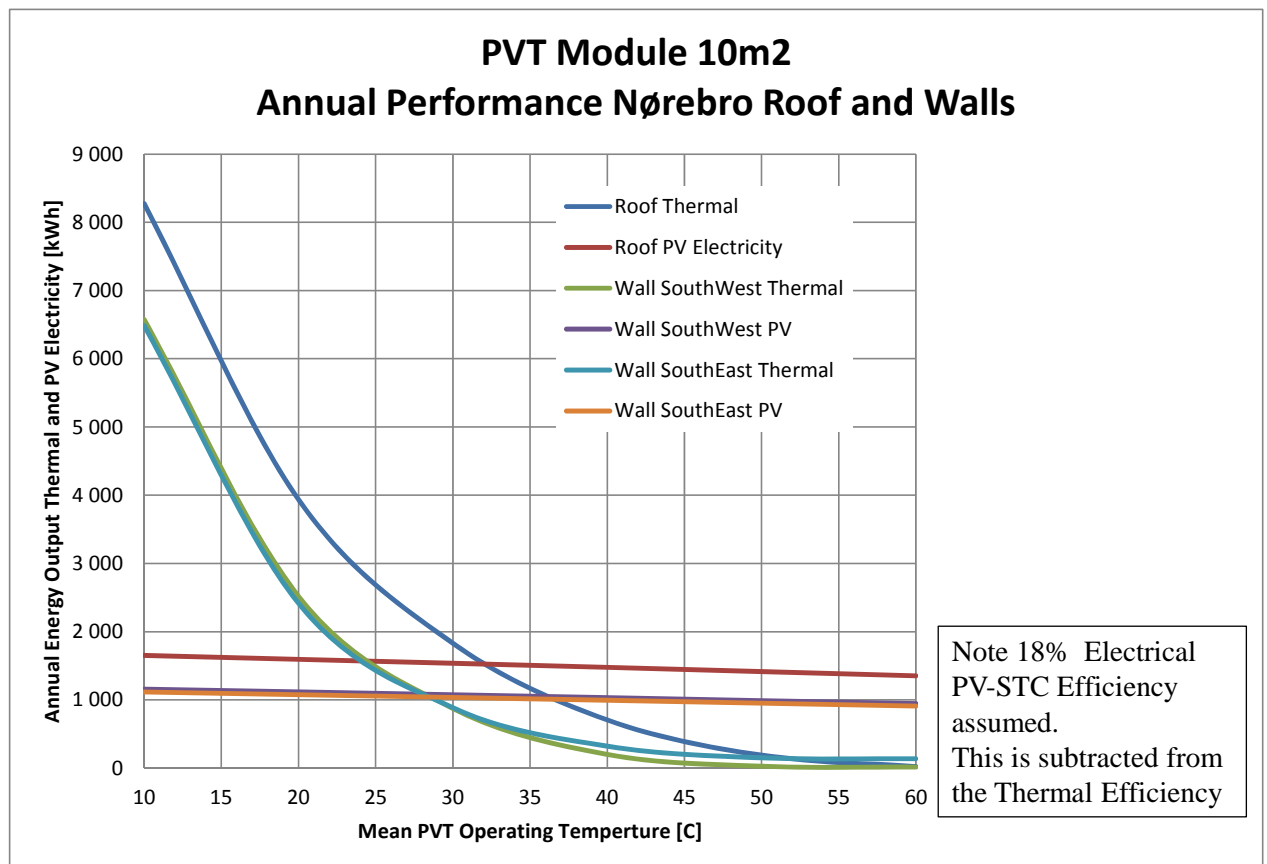


Figure 9. Annual performance, at different operating temperatures. Both electrical and thermal outputs are shown. A 10 m² module and 18% STC PV module efficiency is assumed. The calculations are done with the ScenoCalc-PVT tool.

4.5 Conclusions

The experimental investigations at DTU showed that:

- The thermal efficiency is almost the same for all four prototypes.
- The zero loss efficiency is high
- The heat losses are high due to the unglazed front surface.
- Simple back insulation is enough for thermal performance (for an unglazed design).
- Low temperature system operation is important for high annual output.
- Hot water preheating, ventilation air preheating, pool heating or connection to the cold side of a heat pump system, are some possible applications.
- No durability or corrosion problems were observed, but the testing time is very short compared to the required life time in an installation.

4.6 References

1. B. Perers, P. Kovacs, M. Olsson et. al. "A tool for Standardized Collector Performance Calculations including PVT". SHC conference San Francisco 2012.
2. IEA SHC Task 35 PV Thermal Solar systems. <http://archive.iea-shc.org/task35/>
3. EN ISO 9860:2014 Collector test standard.
4. ScenoCalc tool (thermal version, PVT version not official yet)
<http://www.estif.org/solarkeymarknew/press-room/news/98-new-version-scenocalc>
5. SAPA <http://www.sapagroup.com/en/precision-tubing/solar/applications-in-solar/mpe-absorbers/>
6. Savosolar. <http://www.savosolar.fi/>
7. Racell <http://www.racell.com/>