

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Solcellspaneler med radikalt minskad miljöpåverkan</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Solar cell panels with a radically reduced environmental impact</b>	
Universitet/högskola/företag <b>Uppsala universitet</b>	Avdelning/institution <b>Avd. f elektroteknik</b>
Adress <b>Box 256, 75105 Uppsala</b>	
Namn på projektledare <b>Ilia Katardjiev</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Nyckelord: 5-7 st <b>Solceller, miljö, återvinning, materialanvändning,</b>	

*Energimyndigheten rekommenderar att denna mall används vid slutrapportering. Om annan slutrapportmall används ska ändå motsvarande innehåll finnas med i den. Innan du skickar in rapporten ska stödtexterna raderas.*

*Huvudsyftet med slutrapporten är att den ska kunna användas för att sprida projektets resultat. Den blir öppet tillgänglig i Energimyndighetens projekt-databas. Om projektet vill lämna in information som inte ska tillgängliggöras via Energimyndighetens projekt-databas ska denna läggas i separat bilaga.*

*Information av administrativ karaktär (formell utvärdering av måluppfyllelse, beskrivning och motivering av avvikelser etc) ska rapporteras i den obligatoriska administrativa bilagan (se mall på Energimyndighetens hemsida). Den administrativa bilagan publiceras inte i Energimyndighetens projekt-databas.*

## Förord

*Här ska stå vilka som har finansierat projekten samt andra som bidragit till ett lyckat projekt t ex referensgrupp.*

Energimyndigheten samt forskare vid Ångströmlaboratoriet, Uppsala universitet, Upwis AB, PlasticProdukter AB.

## Innehållsförteckning

*Nedan ligger en kod för innehållsförteckning. Förutsatt att du använder formatmallarna för rubriker så kommer rubrikerna automatiskt med i innehållsförteckningen när du klickar på förteckningen och trycker på F9.*

Sammanfattning .....	2
Summary .....	3
Inledning/Bakgrund .....	4
Genomförande .....	4

Resultat .....	7
Diskussion.....	18
Publikationslista.....	20
Referenser, källor.....	20
Bilagor .....	21

## Sammanfattning

*En sammanfattande beskrivning av innehållet i slutrapporten på en halv till en sida.*

*I sammanfattningen förklaras vilket problem/utmaning ur ett energiperspektiv som projektet har hanterat? Vad har gjorts för att besvara frågan och lösa utmaningen? Beskriv kort vilka resultat projektet har och hur de kan tolkas och användas. Vilken är den nya kunskap som kommit fram genom projektet? Vad blir nästa steg? Sammanfattningen bör skrivas i "journalistisk anda" med de viktiga resultaten och nyhetsvärdet först.*

Solcellspaneler utnyttjar solljus för att producera el. Deras återvinning dock är ganska kostsam, varför de dumpas i soptippar efter sin livstid på cirka 20 års. De använder också giftiga och miljöskadliga material vilket utgör en miljömässig utmaning. Deras verkningsgrad (vanligtvis runt 20 %) begränsas av grundläggande fysiska lagar.

Detta projekt syftar till en avsevärd minskning av förbrukningen av solcellsmaterial men samtidigt med bibehållen elproduktion. Detta uppnås genom att koncentrera solljuset på en solcell med betydligt mindre yta. Alltså, man använder betydligt mindre solceller för att producera samma mängd el. Det finns huvudsakligen två operationsregimer. Den första kallas Low Concentration (LC)-regimen där ljuset koncentreras mellan 2 och 4 gånger. I det här fallet är koncentrerande solcellspaneler statiska och monteras på hustak precis som dagens icke-koncentrerande solpaneler. Den andra regimen kallas Hög Koncentration (HC)-regimen där solljuset koncentreras hundratals gånger eller mer. I detta fall behöver de koncentrerande solcellspanelerna spåra solen. Projektet har utforskat båda dessa regimer och föreslagit innovativa lösningar som lägger grunden till ett mycket mera effektivt utnyttjande av solenergin samt med avsevärt minskad materialåtgång och miljöpåverkan. Dessa lösningar för nuvarande håller på att kommersialiseras.

I LC-fallet går projektet ett steg längre genom att kombinera el- och värmeproduktion i en och samma hybridsolpanel, vilket ökar nettoenergieffektiviteten per ytenhet väsentligt. På så sätt kan man producera inte bara el utan utnyttja resterande 80% av solenergin för uppvärmning av lokaler, bostäder, etc. Den föreslagna lösningen på grund av sin höga verkningsgrad är

även lämplig för användning i länder med kalla klimatförhållanden och har potential att öppna nya marknader i Norden.

Det är att påpeka att i HC-fallet idag finns knappt storskaliga kommersiella tillämpningar pga stora investerings- och underhållskostnader. Med andra ord är denna teknik i stort sätt fortfarande i R&D stadiet. I projektet har man utvecklat en innovativ lösning som kan potentiellt konstituera ett genombrott i området.

## Summary

*En sammanfattande beskrivning av innehållet i slutrapporten på engelska på en halv till en sida. Motsvarande sammanfattning som den svenska.*

Solar cell panels use renewable sunlight to produce electricity. They are, however, expensive to recycle for which reason they are dumped in landfills after end of life of about 20 years. They also use hazardous and limited in abundance materials which poses both an environmental and technical challenge. Their efficiency, (typically around 20%) is limited by fundamental physical laws.

This project aims at the substantial reduction of solar cell materials while preserving the total amount of electricity produced. This is achieved by concentrating the sunlight onto a smaller in area solar cell thus reducing proportionally the use of solar cell materials and producing the same electricity at the same time. There are essentially two regimes of operation. The first one is called Low Concentration (LC) regime where light is concentrated between 2 and 4 times. In this case concentrating solar panels are static and mounted on rooftops exactly as today's non-concentrating solar panels. The second regime is called High Concentration (HC) where sunlight is concentrated hundreds of times and more, and concentrating solar panels need to track the Sun. The project has explored both of these regimes and proposed innovative solutions which advance substantially their performance and lay the ground for more efficient solar energy technologies with substantially decreased environmental footprint.

In the LC case the project goes a step further by combining electricity and heat generation in one and the same hybrid solar panel, thus increasing the net energy efficiency per unit area. The proposed solution owing to its high efficiency is suitable for use in cold climate conditions and has the potential to open new markets in the North.

It should be pointed out that in the HC case today there are hardly any large-scale commercial applications due to large investment and maintenance costs. In other words, this technology is still in the R&D stage. The project has developed an innovative solution that could potentially constitute a breakthrough in the area.

## Inledning/Bakgrund

*Beskriv bakgrund och skäl till varför projektet har genomförts. Vad är utmaningen/problemet? Orientering inom området; problembakgrund. Vad behöver göras (i energisystemet). Vilka behov i samhället eller på marknaden ska projektet hjälpa till att tillgodose och vilken nytta förväntas projektet bidra med. Lite om kunskapsläget. Hur angrips frågan i detta projekt, vad är syftet, finns det några hypoteser, osv. Huvudman, finansiering, tid som projektet pågått etc.*

Dagens kommersiella solcellsteknik baseras på singel- och poly-Si, CdTe, CIGS och a-Si med marknadsandelar 95%, 4%, 1% respektive 0,1% [1]. Alla dessa tekniker är begränsade av tillgången på de material som behövs för deras produktion. Vidare har alla solpaneler en livstid på 20-25 år vilket väcker frågan om deras återvinning. Solpaneler är inte en ”cirkulär” teknik än. Idag hamnar de flesta avfallspaneler på deponier och en del skickas till fattiga länder där elektroniskt avfall inte regleras. Enligt International Agency for Renewable Energy, skulle det finnas kumulativt 78 Mt (miljoner ton) avfallspaneler år 2050 [2]. Återvinning praktiseras sällan idag i de flesta länder eftersom kostnaden för återvinning långt överstiger intäkterna från den. Dagens återvinningsteknologi återvinner bara glaset, Al och Cu från kiselavfall för en intäkt på cirka \$3/panel medan återvinningskostnaden är över \$30/panel i USA [3]. Således flyttar vi i själva verket dessa betydande återvinningskostnader framåt till en obestämd tid och potentiellt skapar ett betydande miljöproblem. Nuvarande forskning om nya solceller följer samma väg - användning av begränsade material där vissa återigen är miljöskadliga.

Projektet syftar till att lösa till en större del båda ovanstående problem genom att minska solcellernas yta, 2 till 4 gånger för statiska solcellspaneler och hundratals gånger för högkoncentrerande solspårningspaneler men med bibehållen elproduktion. Detta resulterar i en radikal minskning av materialåtgången och lindrar problemet med solpanelernas återvinning. Detta uppnås genom att koncentrera solljus till solceller med mindre area där ljuskoncentratorerna är gjorda av miljövänliga och återvinningsbara material som plast, vatten, glykol, etc.

Projektet genomförs av Uppsala universitet och leds av Prof. Ilia Katardjiev, avdelningen för fasta tillståndets elektronik. Projektet har pågått under tiden 2021-08-24 – 2024-02-29.

## Genomförande

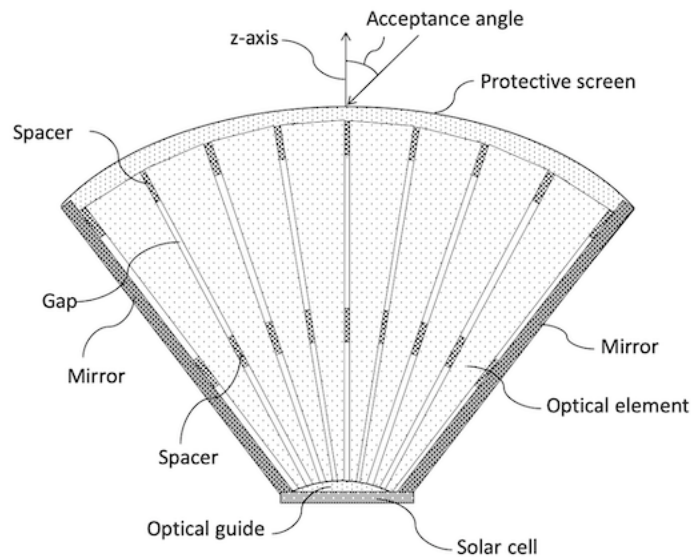
*Beskriv de olika delmomenten/arbetspaketen i projektet samt vilka metoder som har använts. Vilka projektdeltagare/grupper har medverkat i projektet?*

Projektets övergripande syfte är att avsevärt minska förbrukningen av begränsade naturresurser i nuvarande solcellspaneler, genom att koncentrera solljuset på en solcell med betydligt mindre area. Två olika grader av solljuskoncentration utforskas, nämligen 2-4 gånger för statiska paneler och hundratals gånger för solspårningspaneler. Det första fallet motsvarar låg koncentration medan det andra

motsvara hög koncentration. Följaktligen kallas panelerna Low Concentration Photovoltaic (LCPV) och High Concentration Photovoltaic (HCPV) solpaneler. Vid låga koncentrationer är acceptansvinkeln tillräckligt bred så att solpanelerna är statiska (alltså behöver inte spåra solen) medan i det andra fallet är acceptansvinkeln väldigt liten därför behöver man spåra solen med en noggrannhet som är proportionell till koncentrationen.

Genomförandet av projektet innefattar följande större delmoment:

### 1. Design och konstruktion av en LCPV panel



**Figure 1.** Schematic of a fractal concentrator (FC)

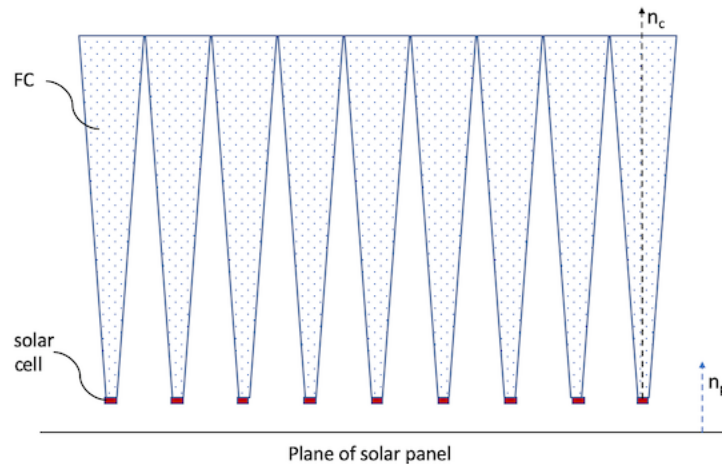


**Figure 2.** Side view of FC-concentrators (concentration = 3X) – left with an absorbing focal plane and right with a reflective focal plane. Consequently, the left concentrator absorbs all light within a wide acceptance angle hence its black appearance.

En LCPV panel representerar en matris av fraktala koncentratörer (FC) med solceller positionerade vid respektive fokalplan. Principen av dessa koncentratörer

utvecklades i tidigare projekt av projektledare. Det är att notera att en FC-ljuskoncentrator vanligen har ljusreflektorer på periferin.

## 2. Design och konstruktion av en HCPV panel



**Figure 3b.** Cross-sectional view of HCPV solar cell panel

Skillnaden mellan FC-koncentratorerna för HCPV solcellspaneler är att förhållandet mellan acceptansytan är mycket större än utgångsytan (vilket ger koncentrationsfaktorn – i detta fall  $> 100$ ). Vidare saknar dessa FC-koncentratorer ljusreflektorer vid periferin.

## 3. Design och konstruktion av en plattform för utvärdering av både LCPV och HCPV solcellspanelerna.

Syftet med utvärderingsplattformen är att utvärdera både den optiska och elektriska prestandan hos LCPV och HCPV panelerna.

## 4. Utvärdering av prestandan hos solcellspanelerna

I detta arbetspaket utvärderas experimentellt både den optiska och den elektriska prestandan hos solcellspanelerna.

## 5. Projektledning och administration

Detta är en standard aktivitet.

## 6. Publicering och kommunikation

Detta är en standard aktivitet.

Projektet utfördes huvudsakligen vid avdelningen för fasta tillståndets elektronik, Uppsala universitet i samverkan med Micro-Structure Laboratory (MSL), Ångströmlaboratoriet, avdelningen för fasta tillståndets fysik samt avdelningen

för solceller. En del av arbetet gjordes av Verkstaden vid Ångströmlaboratoriet medan en annan outsourcades till två företag – UPWIS AB (Uppsala) och PlasticProdukter AB (Stockholm). Specifikt gjordes all metalisering och annan processning vid MSL. All optisk karaktärisering av optiska material (absorptions- och reflektionsstudier) vid avdelningen för fastatillståndets fysik. All mekanisk konstruktion gjordes av Ångström verkstaden. Upwis AB tillverkade sensorsystemet och kotlelektroniken för utvärderingsplattformen medan PlasticProdukter AB tillverkade de optiska elementen av ljuskoncentratorerna. Designen av alla komponenter utfördes av huvudsökande. Central till designarbetet var en egenutvecklad "ray-tracing" mjukvara som användes för designen av både LCPV och HCPV ljuskoncentratorerna.

## Resultat

*Beskriv resultat och slutsatser som genererats inom ramen för projektet.*

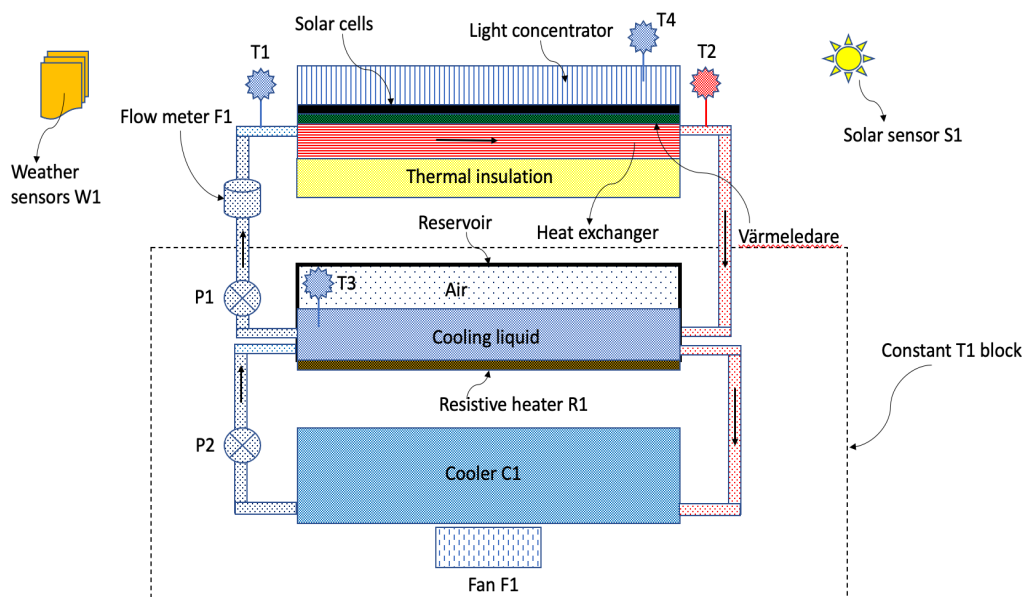
*Här beskrivs de resultat som får vara offentliga eftersom alla slutrapporter ska vara sökbara i Energimyndighetens projektdatabas.*

*Information som projektledaren bedömer som konfidentiell och ej ska publiceras externt kan rapporteras i bilagor. Bilagor som inte ska publiceras externt ska märkas upp genom att "KÄNSLIG INFORMATION" skrivs in i dokumentets rubrik. Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med "KÄNSLIG INFORMATION". Dessutom ska i filnamnet läggas in ordet "KÄNSLIG INFORMATION".*

### I. Design och konstruktion av utvärderingsplattformen

Strukturen av resultatredovisningen följer de arbetspaketen beskrivna ovan.

Figur 4 visar schematiskt designen av utvärderingsplattformen.



**Figur 4.** Schematisk vy av utvärderingsplattformen

Utvärderingsplattformen består av själva LCPV/HCPV panelen som är i termisk kontakt med en värmeväxlare. Vidare har den två oberoende vattenkretsar som håller temperaturen i värmeväxlaren konstant. Utvärderingsplattformen har också två kontrollblock - konstant temperatur T1-block samt mätblock.

### **A) Konstant T1-block**

Temperaturen på kylvätskan T1 hålls konstant, till exempel  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . Detta uppnås genom en kombination av värmaren H1 och kylaren C1. Både H1 och C1 är spänningsdrivna på ett alternerande sätt efter behov från en och samma strömförsörjning (Rigol DP711). Kylaren C1 och fläkten F1 stängs av när värmaren H1 är påslagen och vice versa. Fläkten F1 kan slås på och stängas av efter behov men är bara "på" när C1 är "på". Pumpen P2 är en konstantflödespump som alltid är "på" (även när kylaren C1 är avstängd). Detta ökar styrblockets termiska massa och minskar temperatursvängningar.

### **B) Mätblock**

Mätblocket består av värmeväxlaren, de två temperaturgivarna T1 och T2, pumpen P1 med variabelt flöde och flödesmätaren F1. Detta block ska köras i två lägen enligt följande:

#### *a) Konstant T2-T1 mode*

Flödes hastigheten för pumpen P1 varieras för att hålla temperaturskillnaden T2-T1 konstant inom vissa gränser, till exempel  $40 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .

#### *b) Konstant flöde*

I detta fall kommer pumphastigheten (varv per minut) för pumpen P1 att justeras konstant för att hålla flödes hastigheten F1 konstant inom vissa gränser, t.ex.  $20 \pm 0,1$  ml/min.

### **C) Tilläggsensorer**

Avläsningarna från alla sensorer kommuniceras till kontrollenheten (datorn) inklusive T1, T2 och F1. Ytterligare information, såsom drivspänningar för värmaren och kylaren samt styrsignalen till pumpen P1 också kommuniceras till centralenheten.

#### *a) Solinstrålningssensor S1*

Denna sensor mäter intensiteten av solstrålningen i W/m<sup>2</sup>. Den används för att sätta systemet i "viloläge" när strålningen faller under ett givet värde, säg 50 W/m<sup>2</sup>, samt för att slå på det när solinstrålningen överstiger detta värde +20%. S1



stängs aldrig av och fungerar som en "vakningsenhet". S1 mäter även lutningsvinkeln för systemet som också kommuniceras vidare.

b) Vädersensorer (lufttemperatur, fuktighet, vindhastighet)

Dessa används vid utomhusanvändning av systemet

En del delblock byggs och testats separat innan de sätts in i systemet. Plattformen har också en ljuskälla på 1 kW med dimensioner 40x40 cm som emulerar solens strålning, alltså både spektrum och variabel intensitet. Plattformen styrs av en dator som kontrollerar alla parametrar och samlar datan.

Som poängterat ovan är syftet med utvärderingsplattformen att utvärdera både den optiska och elektriska prestandan hos LCPV och HCPV panelerna. Den optiska prestandan utvärderas genom att ersätta solcellerna med en ljus absorbatör som omvandlar det koncentrerade ljuset till värme vilken sedan mäts av själva utvärderingsplattformen genom att mäta temperaturskillnaden ( $T_2 - T_1$ ) samt flödet av kylvätskan. På detta sätt får man den optiska transmissionskoefficienten av FC-koncentratorerna med bra noggrannhet eftersom de senare också agerar som termisk isolering från omgivningen, alltså praktiskt allt ljus omvandlas till värme. Den elektriska prestandan får man från direkta mätningar av den maximala elektriska effekten. Följaktligen ger denna plattform både den optiska och den elektriska prestandan vilka är de nödvändiga parametrarna för att karaktärisera panelernas prestanda. Inte minst ger denna uppsättning möjligheten att genomföra plan B, dvs utforska möjligheten att utvärdera solpanelen för bi-generation, alltså att uppskatta verkningsgraden för att samtidigt producera både el och värme. Det är att poängtera att solcellernas verkningsgrad är ca 20% och resterande 80% av solenergin förloras i form av värme. Då är det mycket fördelaktigt att studera möjligheten att skörda både el och värme med samma solcellspaneler där den sammansatta energimässiga verkningsgraden ligger uppskattningsvis på ca 70-80%.

Figur 5a visar det konstruerade mätblocket medan Figure 5b visar samma block under operation. Mätningarna genomfördes för olika värden av ingångsparametrarna  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , flödet  $F_1$  samt ljusintensiteten.



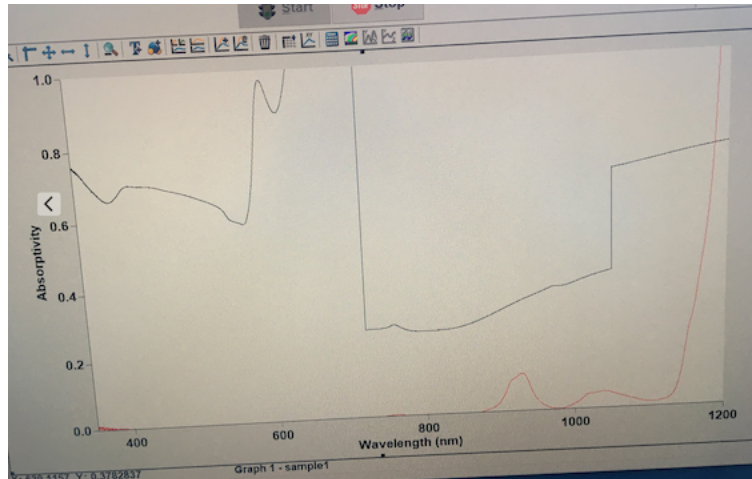
**Figur 5a.** *Utvärderingsplattformen*



**Figur 5b.** *Under operation*

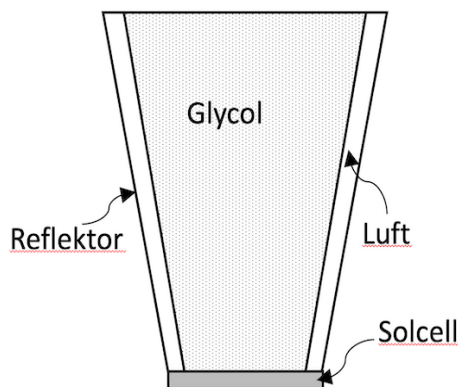
## II. Design, konstruktion och utvärdering av LCPV panelen

Som nämnt ovan i relation till Figur 3 består LCPV panelen av en matris av ljuskoncentratorer med solcellschip positionerade vid respektive fokalplan. Grundprinciper i ljuskoncentratorernas designen förutom bra prestanda är användning av återvinningsbara material samt låg material- och tillverkningskostnad. Prestandan bestäms av koncentrationsfaktorn, acceptansvinkeln och transmissionskoefficienten. Ljuskoncentratorerna i Figur 2 uppfyller alla dessa krav förutom kraven för låga material- och tillverkningskostnad. Specifikt använder dessa koncentratorer relativt mycket dyrbart material som ökar kostnaden väsentligt. Följaktligen genomfördes en omfattande studie om möjliga billigare material dock med lika bra optiska egenskaper, alltså låg optisk absorption och högt brytningsindex. Studien identifierade ett antal optiska vätskor som uppfyller dessa krav. Exempel på sådana är Terminol VP1, Terminol 62, Glycerol, Etylenglykol, Propyleneglykol, etc. Studien inkluderade också egenskaper såsom UV-tålighet, nedbrytningstemperatur, kostnad, tillgänglighet, toxicitet, miljöaspekter, återvinningsbarhet, osv. Följaktligen omgjordes designen av koncentratorerna och anpassades till dessa material. För projektets ändamål valdes Etylenglykol. Figur 6 visar absorptionsspektrumet av Etylenglykol i det synliga spektrumet.

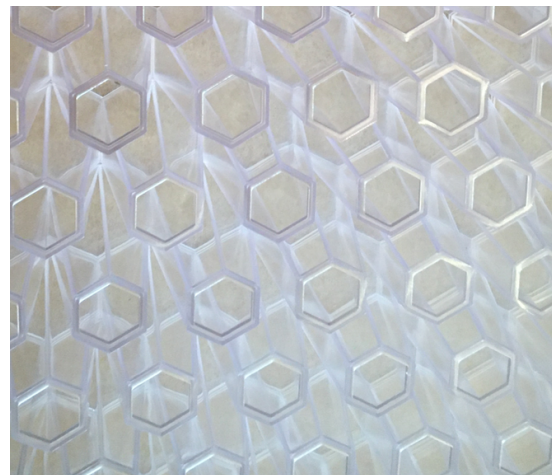


**Figur 6.** Absorptionsspektrum av Etylenglykol (den röda kurvan)

Uppenbarligen visar Etylenglykol en låg absorption upp till 1150 nm. Figur 7a visar schematiskt den nya designen av en ljuskoncentrator medan Figur 7b visar tillverkade koncentratorer utan reflektorer.

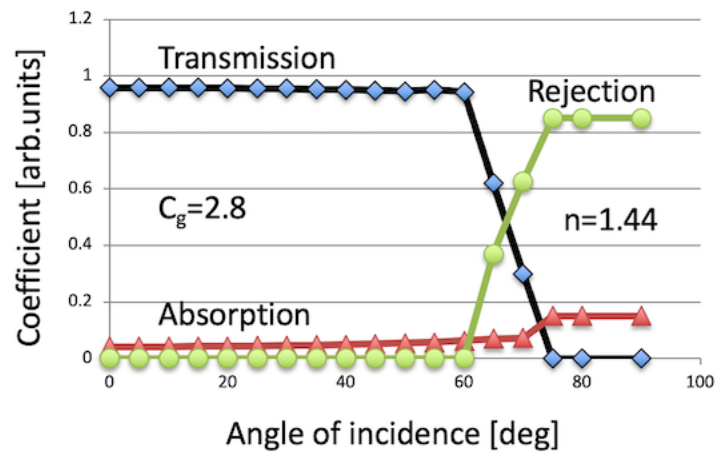


Figur 7a. Design av ljuskoncentrator



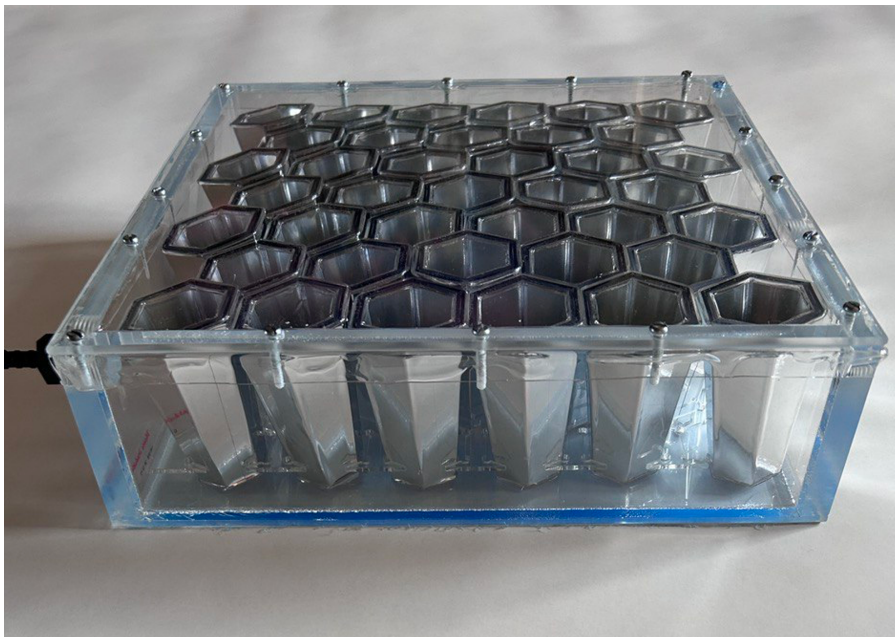
Figur 7b. Array av ljuskoncentratorer tillverkade i polikarbonat (före metalisering).

Designen av ljuskoncentratorerna genomfördes med egen utvecklad mjukvara som ger större flexibilitet. En optimerad design innebär maximal acceptansvinkel vid vald koncentreringsfaktor (3X i detta fall) och valt material (glykol i detta fall), maximal transmission inom acceptansvinkeln, uniformitet av det koncentrerade ljuset, etc. Den beräknade transmissionen och acceptansvinkeln visas i Figure 8. Den effektiva koncentrationsfaktorn i verkligheten är 2.8X pga luftspalterna på periferin av koncentratorn.



**Figur 8.** Beräknad prestanda av ljuskoncentratorerna enligt ny design.

Följaktligen tillverkades ljuskoncentratorerna enligt den optimerade designen och en LCPV panel konstruerades som visat i Figur 9.



**Figur 9.** LCPV panel med ljuskoncentratorer

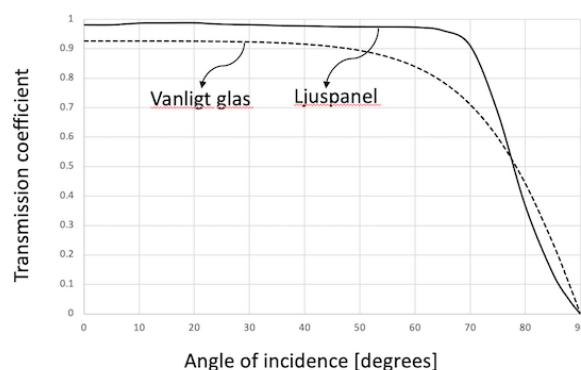
Vidare utvärderades prestandan av LCPV panelen enligt följande. I första hand uppmättes dess transmissionskoefficient genom att omvandla allt transmitterat ljus till värme. Detta gjordes genom att ersätta solcellerna i Figur 4 med en ljus

absorbator. Som nämndes ovan är utvärderingsplattformen speciellt anpassad för att mäta denna värme med stor noggrannhet. Mätningarna visar en optisk transmission vid normal infallsvinkel på ca  $89\% \pm 4\%$ . Detta är något lägre än de beräknade 93% i Figur 8 pga fabrikationsbristfälligheter. Detta resultat visar att den konstruerade LCPV panelen har en excellent transmission och är fullt lämpad för koncentrering av solljus i kombination med solceller.

Följaktligen har LCPV panelen kombinerats med specialutformade solceller med en uppmät verkningsgrad på 18%. I så fall är det förväntade elektriska verkningsgraden av LCPV panelen  $0.89 \cdot 0.18 = 16\%$ . De uppmätta värdena under olika bestrålningsförhållanden varierade mellan 15.5% och 16.5%. Det är att poängtera att en högre prestanda än förväntad är inte konstigt eftersom solcellerna presterar bättre vid högre ljusintensitet vilket är fallet här.

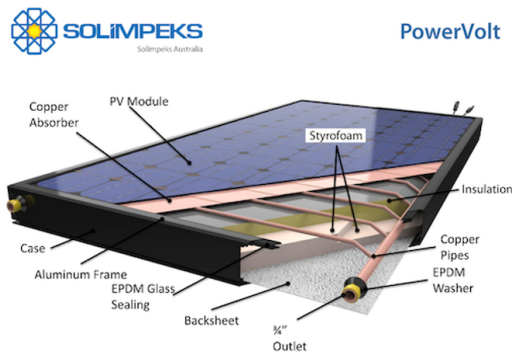
Alla dessa resultat visar att LCPV paneler är en väl fungerande teknik för statiska solcellspaneler vars största fördel är minskningen av solcellsarean proportionellt till koncentrationsfaktorn.

Det är att poängtera att panelen med koncentratorerna (Fig. 9) agerar också som termisk isolator av solcellerna från omgivningen vilket i vissa fall kräver kylning av solcellerna. Detta öppnar möjligheten för att skörda samtidigt en stor del av resterande värme, alltså resterande 80% av solenergin vilken vanligen förloras till omgivningen. En annan faktor som gynnar denna lösning är det faktum att det är bara 1/3 del av ytan som genererar värme jämfört med hela solcellsarean i det vanliga fallet, alltså värmeförlusterna minskar med faktor 3. En liten nackdel dock är det faktum att glykol vanligen är en vätska vilket medför vissa termiska konvektionsförluster. För att ytterligare minska de termiska förlusterna har man i projektet designat en specialutformad transparent panel (också kallad ljuspanel) som har både en hög ljustransmissionskoefficient och hög värmeisoleringsförmåga. Det är att poängtera att ljuspanelen tillverkas av plast med vakuumformning vilket är en standard, lågkostnads tillverkningsmetod. En patentansökan[4] har redan skickats in till PRV. Figur 10 visar panelens transmissionskoefficient. För jämförelse är också inkluderad transmissionskoefficient av optiskt glas.

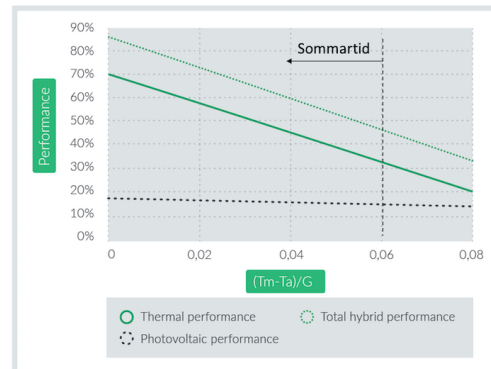


**Figur 10.** *Transmissionskoefficienter av ljuspanelen och optiskt glas*

Denna panel kan användas i kombination med både vanliga solcellspaneler och med koncentrerande solcellspaneler. För att förenkla diskussionen samt för att kunna göra en jämförelse med befintliga produkter på marknaden tar vi det första av dessa två fall för illustration. Figur 11a visar en sådan hybrid solel-/solvärme panel som marknadsförs av Solimpeks.

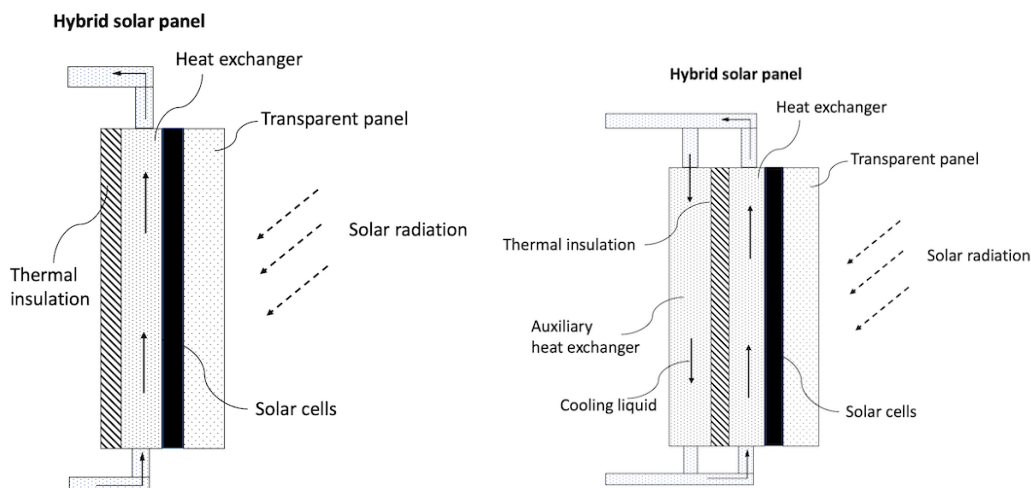


**Figur 11a.** Hybrid solel-/solvärme panel



**Figur 11b.** Verkningsgrad

Kombi-panelen i Fig. 11a består av en solcellspanel, värmeväxlare och en värmeisolator på baksidan. Framsidan är skyddad av ett skyddsglas som ligger i kontakt med solcellspanelen. Uppenbarligen är värmeisolationen av solcellspanelen mot omgivningen nästan obefintlig vilket förklarar panelens låga verkningsgrad vintertid (Fig. 11b), alltså när temperaturskillnaden mellan vätskan i värmeväxlaren och omgivningen är relativt stor. Därför är sådana paneler inte populära i kalla länder. Sådana paneler används huvudsakligen för varmvatten eftersom de genererar väldigt lite värme under kalla säsonger pga sin låga verkningsgrad. Å andra sidan genererar panelerna överskott av värme på sommaren vilket bildas i panelerna och leder till överhettning – en situation som kallas för stagnation. Enligt panelens specifikation är stagnationstemperaturen runt 160 grader. Detta förkorta panelens livstid samt försämrar solcellernas prestanda. Det sista man borde nämna är att installationskostnaderna för sådana paneler är ganska stora med hänsyn till alla vattenledningar, pumpar och extra värmeväxlare i förhållande till ändamålet – alltså att värma upp små mängder av vatten. Det hade varit mycket fördelaktigt om panelen hade en högre verkningsgrad vintertid så att den utnyttjar till fullo värmen som genereras av solcellspanelen och på så sätt använda denna värme för uppvärmning av bostäder. Detta uppnås i detta projekt genom att värmeisolera solcellspanelen med ljuspanelen som illustrerat i Figur 12a.



**Figur 12a.** Förbättrad design av en hybrid sol-/solvärme panel

**Figur 12b.** Operationsprincip av den nya solpanelen

Skilnaden med panelen i Fig. 11a är att nu är panelen termiskt isolerad från omgivningen med den transparenta panelen vilket ger en högre verkningsgrad särskilt vid en större temperaturskillnad mellan kylvätskan och omgivningen. Extra värmeisoleringen av solcellerna dock leder till en högre stagnationstemperatur under de varma månaderna. Detta problem löses genom en extra ”auxiliary” luft-vatten värmeväxlare som illustrerat i Figur 12b. Specifikt under stagnation cirkulerar kylvätskan in i den interna kretsen som illustrerat med flödespilarna. Detta flöde drivs av gravitationskrafter (alltså passivt) i kombination med värmekonvektion i den första värmeväxlaren. På detta sätt löses stagnationsproblemet och solcellerna kyls ner passivt under de varma månaderna. Samtidigt är denna konstruktion lämpad för att användas i kombination med en värmepump. På detta sätt kan man konstruera helhetslösningar för uppvärmning/kylning av lokaler genom en kombination av solvärme och luftvärme från omgivningen där solvärmens utnyttjas till fullo medan luftvärmen sätts på vid behov. Lösningen illustrerad i Fig. 12b är en principlösning. Uppenbarligen är solpanelen i Fig. 12b dyrare än solpanelen i Fig. 11a. Den faktiska lösningen är i verkligheten marginellt dyrare med bibehållen funktionalitet. Denna lösning är en del av den ovannämnda patentansökan[4] och presenteras i större detalj i en separat bilaga (*Tri-generation – KÄNSLIG INFORMATION.pdf*).

Det är att poängtera att designen av den transparenta panelen var inte en del av den ursprungliga arbetsplanen. Den kom till som sidoresultat under designen av ljuskoncentratorerna. Detta spår dock bestämdes att fullföljas pga dess stora potential för ett betydligt effektivare utnyttjande av solenergin och framförallt med hänsyn till det faktum att dessa kombinerade solpaneler är lämpade för länder med kallklimat där sådana produkter är ytterst begränsade pga otillräcklig verkningsgrad. Sist ska man nämna att ljuspanelen kan användas som självständig tillämpning t ex som växthuspanel eller för andra belysningstillämpningar.

Slutligen ska man nämna att en första prototyp håller på att framställas och testas.

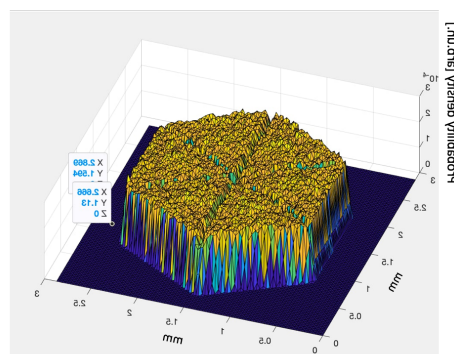
Formellt kan man säga att alla mål i denna del av arbetet är uppnådda medan arbetet med hybridpanelen är utöver det som ursprungligen planerats i projektet.

### III. Design, konstruktion och utvärdering av HCPV panelen

För HCPV panelen valdes också FC-ljuskoncentratorer pga sin höga transmission samt ljusuniformitet. Figur 13a visar sådana koncentratorer med koncentrationsfaktor 100 medan Figur 13b visar den beräknade ljusuniformiteten.



**Figure 13a.** Tillverkade HCPV koncentratorer med koncentrationsfaktor 100



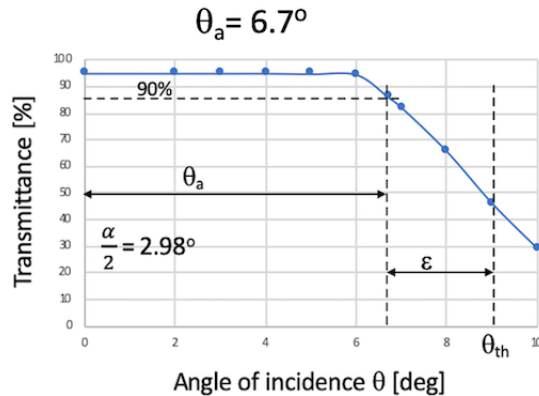
**Figure 13b.** Uniformitet av det koncentrerade ljuset

Den optiska transmissionen av ljuskoncentratorerna utvärderades med fotometer. Transmissionskoefficienten låg på  $81\% \pm 5\%$ . Det beräknade värde ligger på  $92\%$ . Skillnaden förklaras med reflektionsförluster från bottenytan av koncentratorn som enligt beräkningar ligger på  $8\%$ . Denna förlust försvinner vid monteringen av solcellerna pga optisk matchning. Därför kan man säga att transmissionskoefficienten ligger på ca  $90\%$  vilket var målvärdet.

Det är att påpeka att inga andra ljuskoncentratorer har sådana egenskaper, alltså så hög transmittans och ljusuniformitet. Nästa steg var att montera hög prestanda solceller och bygga panelen. Dessa solceller är specialdesignade för höga koncentrationer och är inte kommersiellt tillgängliga. Fraunhofer institutet som tidigare lovat att leverera sådana solceller med önskade dimensioner meddelade att de hade slutsålt sitt lager och erbjöd att tillverka en hel skiva till en kostnad på 100,000 euro vilket absolut inte rymdes inom budget. Det är också att påpeka att monteringen av solcellerna är ett rent tekniskt arbete, alltså det involverar ingen R&D aktivitet. Därför lades denna del av arbetet åt sidan i väntan på en alternativ lösning och fokus flyttades till den största utmaningen i projektet, nämligen solspårningen. Ljuskoncentratorer har en acceptansvinkel som är invers proportionell till koncentrationsfaktorn. Figur 14 visar transmittansen, respektive acceptansvinkeln, av en FC-koncentrator med koncentrationsfaktor 100. Från figuren följer att acceptansvinkeln i detta fall är  $6.7^\circ$ . Detta är alltså noggrannheten med vilken man behöver spåra solen. Följaktligen utvecklades en



metod för solspårning. Metoden insågs vid den tidpunkten att vara känslig information och publicerades inte. Manuskriptet bifogas som bilaga ”Solspårningsmetod vid 100X.pdf”.



**Figure 14.** *Transmittans som funktion av infallsvinkeln*

En vägledningsprincip i arbetet i detta projekt har alltid varit kommersialiseringspotentialen av slutresultaten. Detta gör att man alltid skapar sig en helhetsbild av de tilltänkta slutprodukterna. En djupare analys i fältet visar att optiken inte är den största utmaningen i ljuskoncentrerings teknikerna utan det är kostnaden av hela anläggningen och dess underhåll. Idag i stort sätt finns inga betydande kommersiella applikationer förutom paraboliska speglar (parabolic troughs) som tar upp ett nischområde (se t ex Absolicon.se). Den största kostnaden i sådana anläggningar är faktiskt de massiva konstruktionerna som stödjer optiken och spårar solen som illustrerat i Figur 15.



**Figure 15.** *HCPV Solar Parabolic Solar Concentrator - Solartron*

Det finns ett stort antal varianter av högkoncentrerande ”tracking systems” och de alla lider av samma problem – oförsvarbara tillverknings- och underhållskostnader. Solspårningsmetoden utvecklad i detta projekt och nämnt ovan är inget undantag. Det är därför ytterst viktigt att utveckla en lösning som är kostnadseffektiv men samtidigt behåller sin funktionalitet. En sådan lösning har faktiskt utvecklats i projektet och dess tillvägagångssätt beskrivs kortfattat i bilaga ”Solspårning – KÄNASLIG INFORMATION.pdf”. En provisorisk patentansökan[5] har redan granskats av PRV med positivt utlåtande. Det följer från analysen ovan att en sådan lösning kommer att konstituera ett genombrott i fältet och öppna vägen till ett antal solenergitillämpningar.

Formellt har man uppnått alla planerade mål i denna del av arbetet förutom den elektriska karakteriseringen av HCPV panelen pga utebliven leverans av solceller. Istället har man utvecklat en innovativ lösning till solspårning vilket som förklarat ovan är den största utmaningen för denna teknik och som öppnar vägen till dess kommersialisering.

## Diskussion

*Diskussion med tolkning av resultaten, resultaten sätts i ett energisammanhang. Vad kan de komma att betyda för utvecklingen av ett hållbart energisystem. Vad behöver göras härnäst? Beskriv gärna vilka effekter i samhället som projektet kan förväntas leda till.*

### 1. Statiska LCPV solcellspaneler

Dessa paneler representerar matriser av ljuskoncentratorer som i sin tur fokuserar solljuset på små solceller och på så sätt minskar den totala solcellsarean. Minskningen är lika med koncentrationskoefficienten vilken ligger på ungefär 3 solar, alltså solcellsarean minskas med faktor 3. Det är också att påpeka att ljuskoncentratorerna har en stor acceptansvinkel vilket innebär att panelerna inte behöver spåra solen. Därför är PCPV panelerna statiska och används precis som dagens solcellspaneler. Solcellerna har en begränsad livstid på ca 20-25 år. Deras återvinning är kostsam därför skrotas dem som elektroniskt avfall i deponier vilket skapar ett växande miljöproblem. LCPV panelerna minskar detta avfall med faktor 3 vilket är det viktigaste resultatet från denna del av arbetet. Ljuskoncentratorerna å andra sidan är gjorda av återvinningsbara material som t ex Polykarbonat och optiska vätskor (glykol eller naturoljor). Ljuskoncentratorerna tillverkas med tryckformning vilket är en lågkostnads tillverkningsteknik. Tillverkningskostnaden av en LCPV panel därför ligger något lägre än en motsvarande standardsolcellspanel. Teknikens mognad i nuläget ligger uppskattningsvis på en TRL nivå 4.

### 2. Hybrida bi- och tri-generations solenergisystem

Dagens solceller har en verkningsgrad på ca 20%. Resterande solenergi alstras ut i omgivningen i form av värme. Därför är det fördelaktigt att även skörda en del av denna värme och utnyttja den för uppvärmning av lokaler och bostäder eller för industriella ändamål. På så sätt utnyttjas effektivt både arean av solpanelerna och den tillgängliga solenergin. Å andra sidan är solstrålningen inneboende intermitent och den kan användas som energikälla under begränsade tider under dygnet och året. Detta leder till att solenergin behöver nästan alltid kompletteras med en annan energikälla för att försörja en slutanvändare dygnet runt. Bäst om den kompletteras med en annan energieffektiv och miljövänlig teknik som t ex värmepumpar. Som beskrivet ovan utvecklades i projektet ett högeffektivt tri-generations solenergisystem där nyckeln i systemet är en högpresterande hybrid solpanel. Denna solpanel har en hög verkningsgrad vid låga temperaturer i omgivningen vilket gör systemet lämpat för länder med kallklimat som Sverige. Liknande system har redan introducerats i Sverige (samster.se). Skillnaden är att systemet utvecklat i detta projekt har en högre verkningsgrad och följaktligen utnyttjar solenergin effektivare särskilt under de kalla månaderna. Det som är bra med sådana system är att de erbjuder en helhetslösning, alltså uppvärmning/kyllning året runt och samtidigt producerar de el. Med dagens teknik är detta den mest energieffektiva lösningen.

Här är det onödigt att ange en TRL nivå eftersom tekniken som sådan är redan beprövad och lösningen i projektet är huvudsakligen en förbättring av prestandan.

### **3. Solcellspaneler med hög ljuskoncentration**

Denna teknik har alltid varit attraktiv pga sin stora potential. Specifikt, en anläggning med en koncentrationsfaktor på 1000X använder tusen gånger mindre solcellsarea vilket i praktiken löser materialproblematiken samt till en mycket större del miljöproblemet med återvinningen. Vidare kan man använda solceller med en verkningsgrad som överstiger 40%. Därför har tekniken utvecklats intensivt under de senaste decennierna dock utan stor framgång. Problemet ligger inte så mycket i själva optiken utan i det faktum att man behöver spåra solen med stor noggrannhet. Detta i sin tur leder till konstruktionen av massiva och dyra mekaniska anläggningar vilka kräver ständigt underhåll och kontroll. Stora testanläggningar har byggts runt om i världen och ingen har resulterat i kommersiell verksamhet. Följaktligen har intresset i tekniken minskat på senare tid. Den främsta konferensen i området som leddes av Fraunhofer institutet terminerades år 2023.

Initialt och enligt projektplanen fokuserades arbetet i detta projekt på en original optisk design av ljuskoncentratorerna som resulterar i både hög ljustransmittans och en perfekt uniformitet av det koncentrerade ljuset (vilket har varit ett utpräglat problem). Under projektets gång insågs att även denna lösning kommer att lida av samma problematik med solspårningen. Följaktligen (och med hänsyn till utvecklingen i området) insågs att ett nytt och radikalt tillvägagångssätt behövdes för att lösa problemet. En sådan lösning har lyckligtvis utvecklats under projektet och en patentansökan håller på att förberedas. Det viktigaste i denna lösning är dess enkelhet samt dess låga tillverknings- och underhållskostnad.

Teknikens TRL nivå ligger på nivå 3. Om potentialen av denna teknik bevisas i praktiken kommer detta att representera ett genombrott i området.

Projektet har utlyst ett exjobb vid Linköpingsuniversitet vars syfte är att under projektledarens handledning utveckla en detaljerad affärsplan som bygger på resultaten i detta projekt. Exjobbprojektet har godkänts av kursansvarig Charlotte Norrman och fyra studenter har börjat jobba på avhandlingen vilken planeras att avslutas i maj 2024.

## Publikationslista

*Slutrapporten ska i förekommande fall innehålla en publikationslista och, där så är möjligt, annat relevant material från projektet. Vad har publicerats, var/i vilket sammanhang har det skett, samt ge en kort sammanfattning av exempelvis förekommande artiklar med fokus på vad vi kan lära av projektet. Det kan t ex vara korta sammandrag av skrivna artiklar, både publicerade och manus.*

1. SE 2151249-6, I.Katardjiev, ” A shutter system for controlling the exit light flux from an array of refractive trough light concentrators”, oktober 2021.
2. SE 2150731-4, I.Katardjiev, Provisorisk patentansökan, 2021
3. I.Katardjiev, Evaluation of a Fractal Concentrator of Light at 100X, American Institute of Physics (AIP), 2022. Vol. 2550, article id 040004
4. I.Katardjiev, Sun Tracking Method for Fractal Concentrator Panels (Manuskript - se bilaga: SunTracking.pdf)
5. SE 2430039-4, I.Katardjiev, ”A transparent panel with enhanced light transmission and acceptance angle as well as off-incidence luminance for lighting and solar harvesting applications”, februari 2024
6. Linnéa Isaxon, Alex Hildebran, Andrej Pajtas, Abdelrahman Mansour, Exjobbssarbete i exjobbskursen TEIO06, ” Taming the Sun – achieving an efficient and sustainable use of solar energy”, 2024

## Referenser, källor

1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Photovoltaic Report (2020)
2. International Renewable Energy Agency, End-of-Life Management-Solar Photovoltaic Modules (2016)
3. M. Tao, V. Fthenakis, B. Ebin, B.-M. Steenari, E. Butler, P. Sinha, R. Corkish, K. Wambach, and E. S. Simon, Progress in Photovoltaics-Research and Applications, 28, 1077 (2020)

4. SE 2430039-4, I.Katardjiev, "A transparent panel with enhanced light transmission and acceptance angle as well as off-incidence luminance for lighting and solar harvesting applications", februari 2024
5. SE 2150731-4, I.Katardjiev, Provisorisk patentansökan, 2021

## Bilagor

- *Administrativ bilaga (se mall) (OBLIGATORISK)*

*Andra bilagor kan t ex vara:*

- *Vetenskapliga artiklar (färdiga, accepterade, eller inskickade manus)*
- *Ritningar, kartor, fördjupade metodbeskrivningar, resultattabeller etc*
- *Avhandlingar*
- *Känslig information som ej ska publiceras i Energimyndighetens projektdatabas.*

*Bilagor som inte ska publiceras externt ska märkas upp genom att "KÄNSLIG INFORMATION" skrivs in i dokumentets rubrik. Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med "KÄNSLIG INFORMATION". Dessutom ska i filnamnet läggas in orden "KÄNSLIG INFORMATION".*

1. Administrativ bilaga
2. Tri-generation – KÄNSLIG INFORMATION.pdf
3. Solspårning – KÄNSLIG INFORMATION.pdf
4. SunTracking.pdf