



**Linnéuniversitetet**

Kalmar Växjö

Examensarbete

# Jämförelse av solhybrider



*Författare:* Axel Nord & Oskar Jonsson

*Handledare:* Björn Zethräus

*Examinator:* Ulrika Welander

*Handledare, företag:* Per Wickman,  
Energirevisor

*Datum:* 2014-05-23

*Kurskod:* 2BT01E, 15 hp

*Ämne:* Examensarbete

*Nivå:* Högskoleingenjör

Institutionen för teknik



## Sammanfattning

Forskning inom solenergi går framåt med stora steg gällande båda solvärme och solel. Man kollar inte bara på själva teknikerna var för sig utan också på en kombination av både solel och solvärme som är det som kallas solhybrid. En solhybrids idé grundar sig på att en solcells verkningsgrad sjunker med ökad temperatur och kan med hjälp av en solfångare kylas ner och värmen tas tillvara på. Denna rapport jämför värmeproduktion och elproduktion med avseende på, i första hand, en solhybrids geometri i kylaren.

Teoriavsnittet beskriver solvärme och hur olika solcellstekniker fungerar samt dess miljöpåverkan vid framställningen och hur pass tillämpbara dessa solcellstekniker är i en solhybrid. En utförlig beskrivning över samtliga formler gällande solinstrålning samt en solhybrids energiflöden finns också med i teoriavsnittet.

Det första systemet finns på Per Wickmans hus i Öjaby utanför Växjö och använder sig av en aluminiumabsorbator. Det andra systemet finns i Lenhovda på Lenhovda radiatorfabrik och använder sig av en glasskiva under solcellen istället för en plastfilm som de andra stationerna, denna station använder sig av en ståladiator. Det tredje systemet finns i Åseda på Åseda Värme och Sanitets tak och använder sig av en kopparslinga i absorbatorn.

Med hjälp av aluminiumabsorbator i Öjaby producerades det  $1,2 \text{ kWh/m}^2$  el och  $4,95 \text{ kWh/m}^2$  värme. För att nå elbehovet i en godtycklig villa för en dag i Maj behövs det  $15,8 \text{ m}^2$  solhybrid och  $22,5 \text{ m}^2$  extra solvärmepanel för att man ska kunna täcka värmebehovet.

## Abstract

Research in solar energy is taking big steps in both solar heating and solar electricity. It's not only the technologies alone, but also the combination of both solar electricity and solar heating which is what is called a solar hybrid. The idea of a solar hybrid is that a solar cells efficiency decrease with increased temperature and with help from a solar collector be cooled and the heat can be utilized. This thesis report compares heat production and electricity production with respect of, in first hand, a solar hybrids geometry in the cooler.

The theory chapter describes solar heating and how different solar cell technologies work and their environmental impact at the production and how compatible these technologies are for the solar hybrid. A detailed description over the formulas about solar flux and the energy flows of a solar hybrid are also in the theory chapter.

The first system is located on Per Wickmans house in Öjaby outside of Växjö and uses an aluminum absorber. The second system is located in Lenhovda at Lenhovda radiatorfabriks roof and uses a sheet of glass under the solar cell instead of a plastic film that the other hybrids have, this hybrid uses a flat steel absorber. The third system is located in Åseda at Åseda Värme och Sanitets roof and uses a copper pipe absorber.

With the aluminum absorber in Öjaby it was produced 1,2 kWh/m<sup>2</sup> electricity and 4,95 kWh/m<sup>2</sup> heat. To reach the need of electricity for an arbitrary house for a day in May it needs 15,8 m<sup>2</sup> solar hybrid and 22,5 m<sup>2</sup> extra solar heating panels to cover the need of heat.

## Förord

Denna rapport är skrivet som ett examensarbete för Högskoleingenjör i energiteknik inriktning Energi och Miljö (180 hp) vid Linnéuniversitetet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och skrevs under den andra delen av vårterminen 2014.

Under arbetets gång har vi fått hjälp av flera olika personer och här skulle vi vilja rikta extra tack till:

- Per Wickman som varit projektledare i det projekt detta examensarbete varit en del av och som hjälpt oss med sin breda kunskap inom energi.
- Patrik Östangård som har hjälpt oss med sin kunskap inom radiatorer.
- Jim Strömqvist som är rörmokare på Åseda Värme och Sanitet som har installerat de olika systemen och hjälpt oss få en bra översikt på hur systemen sett ut.
- Jonas Mattson som är elektriker på Åseda Eltjänst AB som har varit med och installerat de olika systemen och har hjälpt oss med internetuppkopplingar och frågor vid andra problem.
- Björn Zethräus som varit vår handledare på Linnéuniversitetet som med sin breda kunskap hjälpt oss

# Innehållsförteckning

Sammanfattning	III
Abstract	IV
Förord	V
Innehållsförteckning	VI
1. Introduktion	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte och mål	8
1.3 Avgränsningar	9
1.4 Teckenförklaring	9
2. Teori	11
2.1 Solhybrider	11
2.2 Solhybridens historia	11
2.3 Solvärme	12
2.4 Solceller	13
2.4.1 Solcellstekniken	14
2.4.2 Kiselceller	15
2.4.3 Tunnfilmstekniken	15
2.4.4 Grätzelceller	17
2.4.5 Solcellers temperaturberoende	18
2.5 Solinstrålning	20
2.6 Tiltfaktor	22
2.7 Strålning genom glas	23
2.8 Energitransporter i solhybrider	24
2.9 Solhybridens värmebalans	25
2.10 Solhybrid El/Värme	26
3. Metod	27
3.1 Försöksupställningar	27
3.1.1 Öjaby	27
3.1.2 Lenhovda	29
3.1.3 Åseda	32
3.2 Beräkningsmodell	33
4. Genomförande	36
5. Resultat och analys	37
5.1 Teoretiska resultat	37
5.2 Verkliga resultat	40
5.2.1 Öjaby	40
5.2.2 Lenhovda	41

5.2.3 Åseda	43
5.3 Energibehov för en godtycklig byggnad	43
5.4 Energiproduktion för okyllda solceller och solvärme	43
5.5 Jämförelse mellan solhybrider och solceller och solvärme	43
6. Diskussion och slutsatser	45
7. Referenser	47
8. Bilagor	49
Bilaga 1	49
Bilaga 2	50
Bilaga 3	51

# 1. Introduktion

## 1.1 Bakgrund

Detta examensarbete ingår i ett projekt som leds av energirevisor Per Wickman. Med i utvecklingsarbetet ingår också Patrik Östangård, Lenhovda Radiatorfabrik, Evald Strandberg, Åseda Värme och sanitet som är VVS/värmepumpsexpert samt Henrik Stridh och Johan Markensten, Quantify Fastigheter, som ansvarar för ekonomi och marknadsföring.

Vid analysering av solhybriderna har det monterats tre försöksanläggningar. En i Öjaby utanför Växjö på Per Wickmans hus, en i Lenhovda på radiatorfabrikens tak och en på Åseda värme och sanitets kontorstak.

Vid analysen av produkten ska det primärt tittas på fyra punkter.

1. Om produkten uppfyller de krav som ställts för att kunna vara konkurrenskraftig på den Svenska och Europeiska marknaden. Både för befintliga hus och för nybyggda hus med bergvärme. Detta kräver att den är bättre än existerande produkter.
2. Beräkningen av hur mycket energi man kan spara med avseende på el och varmvatten på respektive testprojekt.
3. Verifiera hur mycket tillsatsen av solvärme kan ge genom att jämföra beräkningen av årsvärmefaktorn från denna provning med provningen enligt 12-dagarsmetoden.
4. Förutom prestanda- och tappvarmvattenprov även fuktprov för ev. kondens under solhybriden och en kontroll av säkerhetsfunktioner för att kunna erbjuda marknaden en säker och bra produkt.

Dessa punkter är uppsatta vid projektplansformulering av Per Wickman.

Detta arbete kommer bara beröra punk två.

## 1.2 Syfte och mål

Syftet med den här rapporten är att jämföra tre olika solhybrider som producerar värme och el. Solhybriderna är sammansatta av solceller och en absorbatör som sitter bakom solcellerna för att kyla solcellerna när de blir varma för att använda värmen på ett annat ställe t.ex. till att värma upp ett bergvärmelager.

# Linnéuniversitetet

Kalmar Växjö

Fakulteten för teknik

391 82 Kalmar | 351 95 Växjö

Tel 0772-28 80 00

teknik@lnu.se

Lnu.se/fakulteten-for-teknik

Solcellerna kommer vara samma på alla tre solhybriderna men absorbatörerna för kylsystemen kommer vara olika. De absorbatörer som testas är aluminiumabsorbator, platt stålabsorbator och isolerad rörslinga. Det är alltså olika absorbatörer i solhybriderna som ska jämföras. En av dem kommer använda sig av en glasskiva istället för en plastfilm för att öka solgenomstrålningen till absorbatören.

Målet med rapporten är:

- Att leverera en tabell som jämför tre olika solhybridens energiproduktion med avseende på olika inställningar på kylsystemen.

### 1.3 Avgränsningar

Denna rapport kommer endast jämföra de tre olika solhybriderna i Öjaby, Lenhovda och Åseda med avseende på uppvärmning av borrhålet.

### 1.4 Teckenförklaring

Här förklaras alla olika variabler som går igenom i teoriavsnittet.

$\eta$	= Elverkningsgraden	[%]
$\eta_{Tref}$	= Solcellens referensverkningsgrad	[%]
$\beta_{ref}$	= Solcellens temperaturberoende	[%/K]
$T_{cell}$	= Solcellens temperatur	[K]
$T_{ref}$	= Solcellens referenstemperatur	[K]
$\delta$	= Solens deklination	[° (Grader)]
$\gamma$	= Jordens rotation runt solen	[° (Grader)]
$\omega$	= Timmvinkeln, vid vilken timme på dyget	[° (Grader)]
$tst$	= True solar time, beroende på tidszon	[min]
$tidsskillnad$	= Skillnad mellan tiden på platsen och $tst$	[min]
$EoT$	= Korrigerar deklinationen under året	[° (Grader)]
$\theta_z$	= Zenitvinkeln, vinkel mellan jordens normal till solen	[° (Grader)]
$l$	= Längden för solstrålarna genom atmosfären	[m]
$\varphi$	= Latituden	[° (Grader)]
$r$	= Jordens radie	[m]
$P$	= Lufttrycket på jorden	[Pa]
$\rho$	= Luftdensiteten	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Jordens gravitation	[m/s <sup>2</sup> ]
$atm$	= Atmosfärshjden	[m]
$I_0$	= Solinstrålning till atmosfären	[W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	= Absorptionskonstant i atmosfären	[%]
$n_1$	= Brytningsindex 1.	
$n_2$	= Brytningsindex 2.	
$R_{\parallel}$	= Reflekterat ljus mot parallel yta	[%]
$R_{\perp}$	= Reflekterat ljus mot vinkelrät yta	[%]
$R_{Tot}$	= Totalt reflekterat ljus	[%]
$q_{refl}$	= Totalt reflekterat ljus	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{in}^0$	= Solljus ner till solpanelen	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{in}$	= Solljuset ner i panelen	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{abs}$	= Absorberat solljus	[W/m <sup>2</sup> ]

$q_{ledn}$	= Värmeledning	[W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda_{glas}$	= Täckglasets värmekonduktivitet	[W/(m·K)]
$\delta_{glas}$	= Täckglasets tjocklek	[m]
$T_{Yta}$	= Täckglasets yttemperatur	[K]
$T_{vatten}$	= Kylvattnets medeltemperatur	[K]
$q_{konv}$	= Bortfört värme genom konvektion	[W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha_{Luft-Glas}$	= Konvektionstal mellan yta och luft	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$T_{Omg}$	= Omgivningstemperaturen	[K]
$q_{emitt}$	= Emmiterad energi från solcellen	[W/m <sup>2</sup> ]
$\epsilon_{Cell}$	= Emissionsförhållande mellan utstrålande energi från aktuell kropp med svart kropp.	
$\sigma$	= Stefan-Boltzmanns konstant.	
$q_{el}$	= Genererad el	[W/m <sup>2</sup> ]
$A_{Celler}$	= Arean på cellerna i panelen	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Tot}$	= Total area på panelen	[m <sup>2</sup> ]
$A_{mellan}$	= Area mellan cellerna I panelen	[m <sup>2</sup> ]
$U$	= Värmegenomgångskoefficient	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\alpha_{cell}$	= Konvektionstal i cell	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\delta_{skikt}$	= Tjocklek på skiktet mellan absorbatör och cell	[m]
$\lambda_{skikt}$	= Värmekonduktivitet mellan absorbatör och cell	[W/(m·K)]
$\alpha_{vatten}$	= Konvektionstal i absorbatören	[W/(m·K)]
$q_{värme prod}$	= Producerad värme	[W/m <sup>2</sup> ]
$C_p$	= Vattens specifika värmekapacitet	[kJ/(kg·K)]

## 2. Teori.

I södra och stora delar av Europa är elproduktionen fossilbaserad, ca 50 %, varav hälften kommer från kolkraftverk som bara omvandlar en tredjedel av energin i kolet till el. Produktionssystemet är uppbyggt ur ett sådant miljöperspektiv så att all den förnybart producerade elen används först. Detta innebär att den sist producerade elen kommer från kolkraft. 1 TWh kolkraft ger så mycket koldioxidutsläpp som 1 miljon ton koldioxid, 1 kWh är ett kilo koldioxid.

Sverige har en god tillgång på förnyelsebar elproduktion från vattenkraft och andra förnyelsebara källor. Detta har gjort att det fortfarande finns mycket eluppvärmning av bostäder och elproduktionen är till det närmaste koldioxidfri. Även om Sverige har en miljösmart elgenerering så används det dubbelt så mycket el jämfört med övriga Europa.

Om Sverige skulle kunna spara på elanvändningen skulle en kWh som blir över kunna ersätta tre kWh på andra sidan Öresund.

Ett kallt klimat som i Sverige kräver mycket värme. Här värmer man upp bostadshus och större lokaler i städerna med hjälp av fjärrvärme till viss del, vilket produceras från kraftvärmeverk. En instoppad kWh bränsle ger 1/3 el och 2/3 värme vilket medför ett väldigt effektivt sätt att producera elektricitet. Om det skulle bli så att städerna inte använder all den el som produceras skulle den kunna skickas ner till kontinenten och minska kolproduktionen där.

Ett system som solhybrider, producerar både el och värme från solen. Det innebär en minskad användning av värme som kommer från kraftvärmeverken i ett område med fjärrvärme och skulle kunna sätta kraftvärmeverken i konkurs. En stor konkurrens med kraftvärmeverken som i stort sett har noll koldioxidutsläpp skulle innebära kontraproduktivitet och en solhybrid lämpar sig inte i dessa områden.

I de städer som använder sig av fjärrvärme från värmeverk vilka endast producerar värme lämpar sig solhybriden istället bra och bidrar till mindre bränsleåtgång från värmeverken. (Karlsson, B., 2014)

### 2.1 Solhybrider

Solhybrider använder sig av två mycket välkända tekniker, solfångare och solceller. Solfångare producerar värme och solceller producerar el. Det som gör att man kan sammanfoga dessa två tekniker är att när en solcells temperatur ökar så minskar verkningsgraden (Skoplaki, E. & Palyvos, J. 2009). Om man använder sig av ett kylsystem för att hålla temperaturen i solcellerna nere kan man ta tillvara på den värmen för att använda den på ett annat ställe.

### 2.2 Solhybridens historia

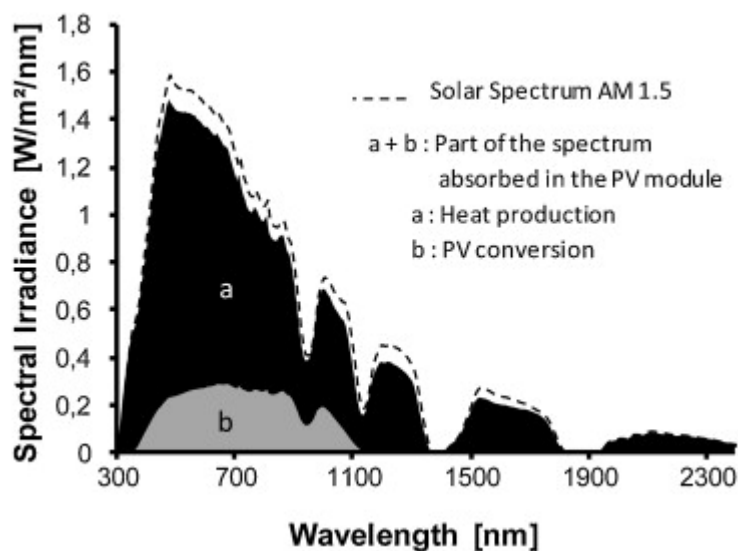
Det finns egentligen två olika enheter som kan användas för byggnader att ta tillvara på solens energi, solvärmefångare som tillverkar värme och fotovoltaiska celler (PV- celler) som gör om solens strålar till elektricitet.

Om man ser till PV- cellerna så absorberar de en stor del av den totala instrålningen men de har vanligtvis en relativt låg elverkningsgrad, omkring 90 % av den instrålade energin absorberas i PV- cellen och i en vanlig kommersiell polykristallin kiselcell omvandlas runt

15 % till elektricitet. Den potentiella värmetillgången från solcellerna är då 75 % av det instrålade ljuset.

Air Mass anger genom hur stor luftmassa solstrålarna behöver transporteras genom innan den träffar jorden. Den beräknas genom kvoten av den längd som solens strålar färdas och den längd solens strålar skulle färdas om den står rakt i zenit. En Air Mass på 1,5 motsvarar en zenitvinkel på 48,2 °. Vid tester av solpaneler brukar ett spektrum som motsvarar AM1,5 vara den standard som man använder för att jämföra olika solpaneler.

Figur 1 visar hur en PV- cells absorbtionsspektra ser ut över solstrålningens olika våglängder en vanlig dag vid Air Mass 1,5 (AM1,5).



Figur 1. Fördelning av el och värme hos en solcell (Dupeyrat, P et. al. 2014)

Vid kombinerad av PV- celler och solvärmefångare får man en solhybrid. Solhybrider är principiellt en av de mest effektiva sätten att ta till vara på solenergin. Därför har det skett många, både teoretiska och experimentella försök med solhybrider ända sedan 70- talet. (Dupeyrat, P. et. al. 2014)

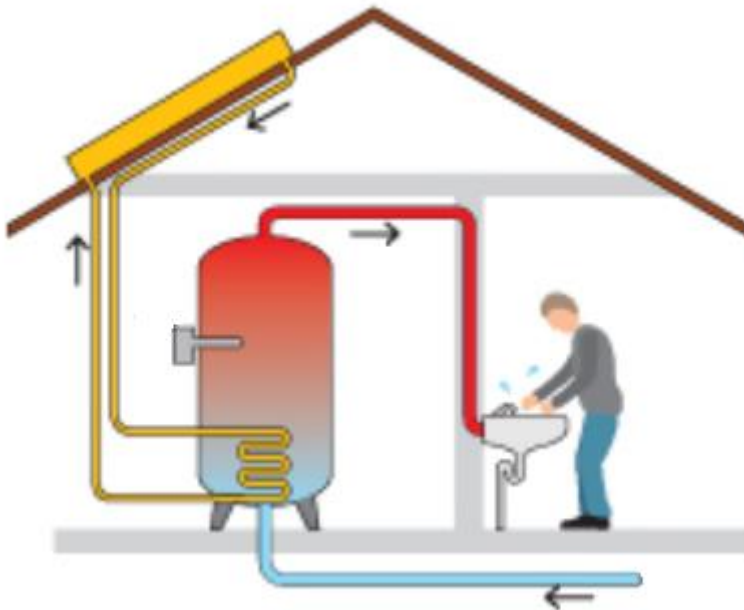
Idén med solhybrider från början var inte att man ville producera värme utan man hade det problemet att när solceller blir varma får de en sämre verkningsgrad, detta gör att de producerar mindre el ju varmare de blir. Därför började man forska på hur man skulle kunna kyla solcellerna för att få ut mer el.

Även om man har forskat mycket om solhybrider har de ännu inte fått så stor uppmärksamhet, detta förmodligen för att de inte varit ekonomiskt lönsamma. Men i takt med ökad oro över vad framtidens energikällor kan vara i och med att man försöker gå ifrån de fossila bränslena har intresset för solhybrider ökat. (Fudholi, A. 2014).

### 2.3 Solvärme

Det finns många olika tekniker vad gäller solvärme men grundprincipen är samma för de flesta. Det handlar om att värma upp vatten med hjälp av solens energi. Den vanligaste tekniken i Sverige och norra Europa använder sig av en vattenpump som kopplas till en

solfångare vilken oftast är placerad på hustaket. Vattnet pumpas genom solfångaren och vidare till en värmeväxlare och tillbaka till solfångaren igen. Detta kan ses i figur 2.



Figur 2 Förenklad schematisk bild av ett solfångarsystem.

Solfångarpanelen har en glasskiva med en absorptionsplatta i mitten och isolering underst. Absorptionsplattan är målad med en speciell svart färg för att få största möjliga värmeupptagning och har en genomgående rörslinga där vattnet pumpas igenom.

För att uppnå maximal instrålning på solfångaren skall panelen vara riktad rakt mot solen så stor tid som möjligt av dygnet och kan uppnås genom att ändra lutningen på panelen i förhållande till solen över året. På vintern skall man ha en mer vertikal lutning på panelen och på sommaren tvärt om då solen står högre. (Boyle, G, 2006)

En solig dag kan plana solfångare komma upp i en verkningsgrad på 70 – 80 %. (Vattenfall, 2014)

#### 2.4 Solceller

En av de svåraste utmaningarna för att lösa världens energiproblem ligger i att minimera kostnaderna och miljöpåverkingarna vid framställning av elektricitet. Solceller ses som en av de bästa alternativen till att skapa hållbar energi i framtiden (Razykov, T. 2011). Det pågår en snabb utveckling inom detta område och nya tekniker för att minska solcellernas kostnad och miljöpåverkan kommer ständigt fram. Detta arbete kommer bara att jämföra några stycken av dessa.

Man kan dela in solceller i tre olika grupper; första, andra och tredje generationen. Först kom halvledartekniken, de kiselbaserade solcellerna. Sen kom den andra generationens tunnfilmsteknik och senast den tredje generationens Grätzelteknik.

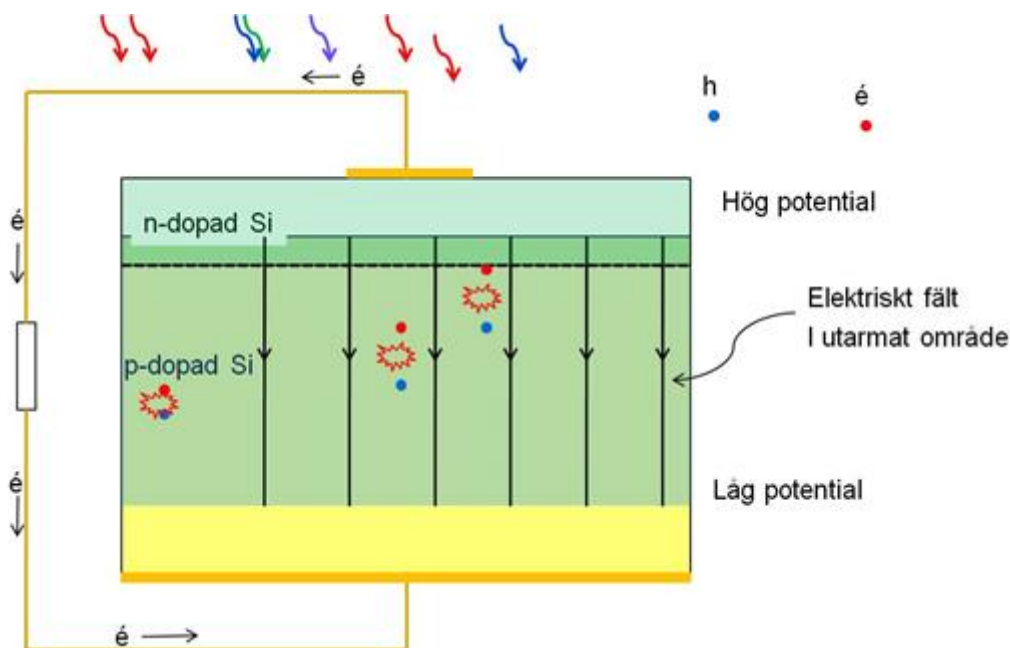
### 2.4.1 Solcellstekniken

För att förstå hur en solcell kan generera elektricitet måste man veta en del om halvledare. De vanligaste halvledare som används är kisel men det förekommer även andra som t.ex. germanium. Dessa grundämnen har fyra valenselektroner och vid en elektronparbindning bildas en kristallstruktur som ser ut som en diamants. Elektronerna är dock inte lika hårt bundna som i en diamant men de kan heller inte röra sig fritt som i en metall.

För att få en elektron att kunna röra sig fritt i en halvledare måste energi i form av t.ex. värme eller som i en solcells fall ljus excitera elektronen. När man tillför energi kan man kalla det att man ”rycker loss” en elektron från sitt valensband, detta kommer medföra att elektronen lämnar efter sig ett så kallat positivt hål. Närliggande elektron kommer då dras till hålet och lämna efter sig ett hål den också. Hålen kan på detta sätt också transporteras och medverkar alltså till strömmen.

Halvledare med lika många elektroner som det finns hål kallas egenledare. Det krävs dock mycket energi för att frigöra en elektron från en egenledare. Man kan då ”dopa” kiselkristallen med t.ex. fosfor, detta medför att en fosforatom med fem valenselektroner ersätter en kiselatom som skulle haft fyra och kräver mycket mindre energi för att ”ryckas loss”. Detta kallas ”n-doping” eller negativ laddning då man tillför negativt laddade elektroner. Man kan även dopa kiselstrukturen med ett material som har tre valenselektroner vilket medför att det kommer bli ett hål där det skulle suttit en kiselelektron vilket kallas p-doping (positiv). (Pielbalgs, A & Potočnik, J. 2009)

Då man fogar ihop en n-dopad och en p-dopad halvledare så skapas en så kallad p-n-övergång vilket innebär att n-sidan har ett överkott av elektroner och p-sidan har ett underskott, p-sidan får alltså ett överkott av hål. Elektroner och hål flyttar på grund av detta till motstående sida vilket medför att ena sidan av materialet får mer negativa laddningar och andra sidan får mer positiva laddningar och detta resulterar i en potentialskillnad i spänning vilken byggs upp under tillverkningen av kiselcellerna.



Figur 3 Elektron och -håltransport i kiselcell

Som visas i figur 3 kommer de n- och p-dopade skikten att ge upphov till en ström om en yttre krets ansluts, förutsatt att fria elektroner genereras i det n-dopade skiktet. När solljuset exciterar en elektron och ett elektron-hål-par framställs kommer elektronerna att drivas åt det håll som har högre potential (n-dopade) och hålen åt det håll som har lägre potential (p-delen). (Baranzahi, A. 2013)

#### **2.4.2 Kiselceller**

Kiselceller använder sig av halvledaren kisel som grundmaterial. Kisel är ett av jordens vanligaste grundämnen men det är också det material som idag begränsar tillverkningen av kiselceller. Detta är på grund av de dyrbara, miljöpåverkande och energikrävande metoderna som krävs vid framställning av tillräckligt rent kisel, både vid brytning av kisel och vid förädlingen. Tidigare har kiselrester från elektronikbranschen räckt för tillverkningen av kiselceller. I takt med att produktionen av kiselceller ökar kommer det behövas mer material. Kiselcellerna dopas vanligtvis med fosfor och bor. (Siden, G, 2013)

##### *Monokristallina solceller*

Monokristallina kiselceller består av en sammanhängande kristallstruktur och tillverkas av kisel med hög kvalitet och det krävs att de har nästan inga defekter eller orenheter. De var de vanligaste solcellerna förr i tiden men det har på senare tid kommit nya metoder för att sänka kostnaderna och sänka kraven på den höga kvaliteten som krävs på materialet. Monokristallina solceller har dock en högre verkningsgrad än många andra solceller så vid vissa tillämpningar kan dessa passa.

##### *Polykristallina solceller*

Polykristallina kiselceller består egentligen av monokristallina flak som är sammansatta till en cell. Detta kräver inte lika stor renhet och är lättare och billigare att tillverka än monokristallina celler då de inte ställs lika stora krav på materialet. Den negativa aspekten är att de inte är lika effektiva som monokristallina celler, detta är för att transporten av hål och elektroner i materialet störs vid korngränserna. Polykristallina kiselceller är de solceller som är vanligast idag.

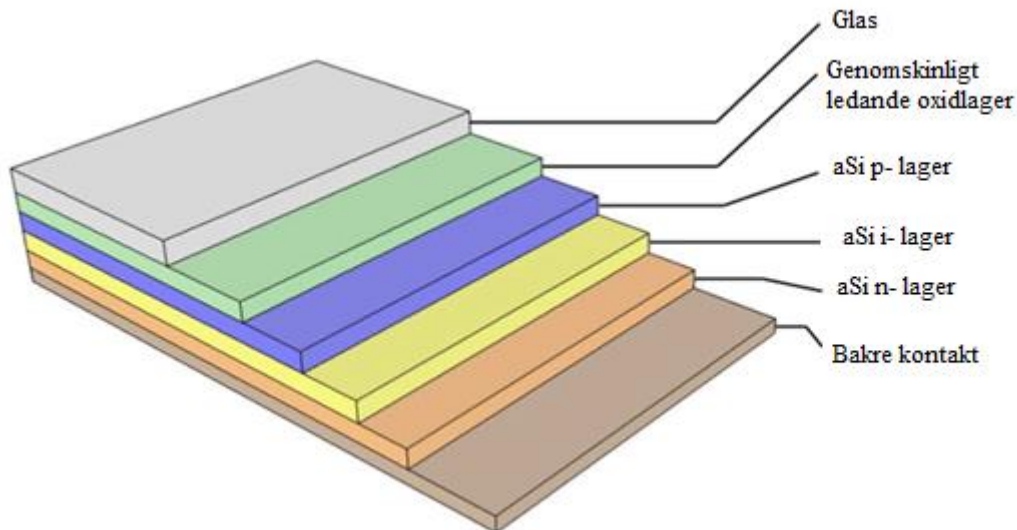
#### **2.4.3 Tunnfilmstekniken**

Tunnfilmstekniken går ut på att man inte ska behöva använda lika mycket material som i vanliga PV-celler. Detta gör att materialkostnaderna kan sänkas men vanligtvis får de samtidigt en sämre verkningsgrad.

Det finns flera olika tekniker för tunnfilmssolceller, de kan göras av olika sorters halvledare, några av de vanligaste är; kisel i form av amorft kisel (a-Si), kadmiumtellurid (CdTe) och koppar indium gallium deselenide (CIGS) (Alvarez, H. 2006). Det finns även nya tekniker som använder polykristallint kisel (p-Si) som har fördelar som de polykristallina cellerna har samtidigt som de har fördelarna som tunnfilmcellerna har (Becker, C. 2013).

##### *a-Si*

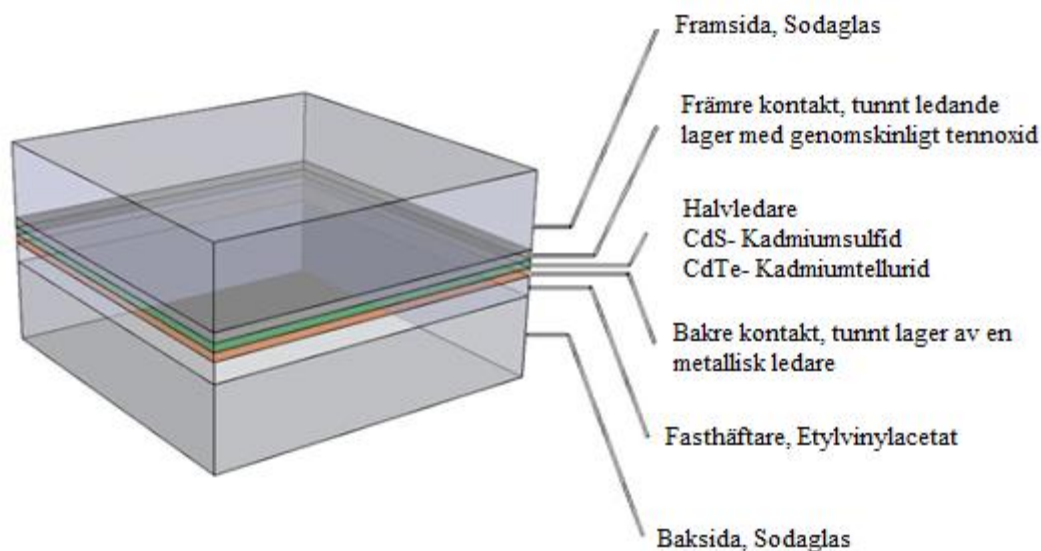
a-Si celler är uppbyggda av tre lager av halvledare, p, i och n och brukar kallas p-i-n celler. En schematisk bild över uppbyggnaden av a-Si cellen kan ses i figur 4 nedan. a-Si celler är i sig inte speciellt effektiva och dessutom försämras verkningsgraden snabbt i början när de utsätts för solljus. Från runt 6-10 % till 4-8 % efter några månader i solen (Boyle, G., 2006). De används idag på många ställen där verkningsgraden inte har så stor betydelse, t ex i miniräknare.



Figur 4. Schematisk bild över uppbyggnaden av en a-Si cell. (Residential solar, 2010)

### *CdTe*

CdTe är en av de lovande tunnfilmssolcellerna och de använder sig av sammansatta halvledare. Fram- och baksidan består av värmebehandlat sodaglas och har halvledarna CdTe och kadmiumsulfat (CdS). En schematisk bild över uppbyggnaden av CdTe cellen kan ses i figur 5 nedan. CdTe har en verkningsgrad på runt 12 % för kommersiella solceller och ett rekord på 16,1 % för hela modulen (Kaminski, P. 2014). En positiv sak med CdTe celler är att verkningsgraden inte sänks på samma sätt som i a-Si celler. Det negativa med dessa celler är användningen av kadmium som är en tungmetall och är mycket giftig. Därför måste man vidta åtgärder både vid produktion och när de har tjänat ut. Det är också kontraproduktivt att utveckla tekniker för att minska miljöpåverkan genom att använda tungmetaller.

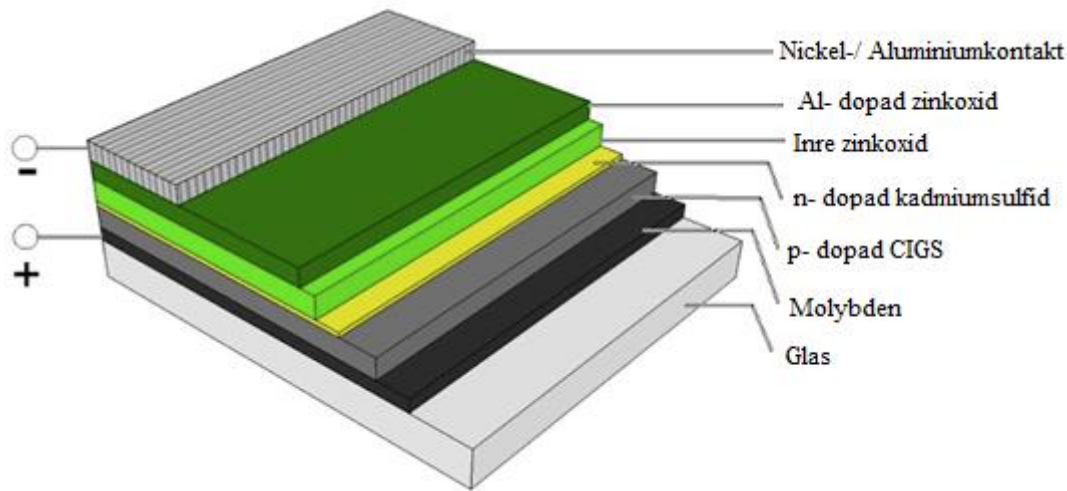


Figur 5. Schematisk bild över uppbyggnaden av CdTe cellen (Residential solar, 2010).

### *CIGS*

CIGS celler använder sig likt CdTe cellen av kadmium, dock krävs inte lika mycket kadmium som i CdTe. Produktionen av CIGS celler ligger en bit efter produktionen av CdTe celler, detta beror på den komplicerade framställningsmetod som krävs vid storskalig produktion av CIGS celler (Dhere, N., 2011). CIGS celler har den största absorptionskoefficienten av alla halvledarmaterial, de absorberar 99 % av det infallande ljuset på en mikrometer vilket gör att

de kan göras väldigt tunna och det är den teknik av tunnfilmssolceller som har högst verkningsgrad för kommersiella tunnfilmceller. (Residential Solar, 2010). En schematisk bild över uppbyggnaden av CIGS celler kan ses i figur 6.

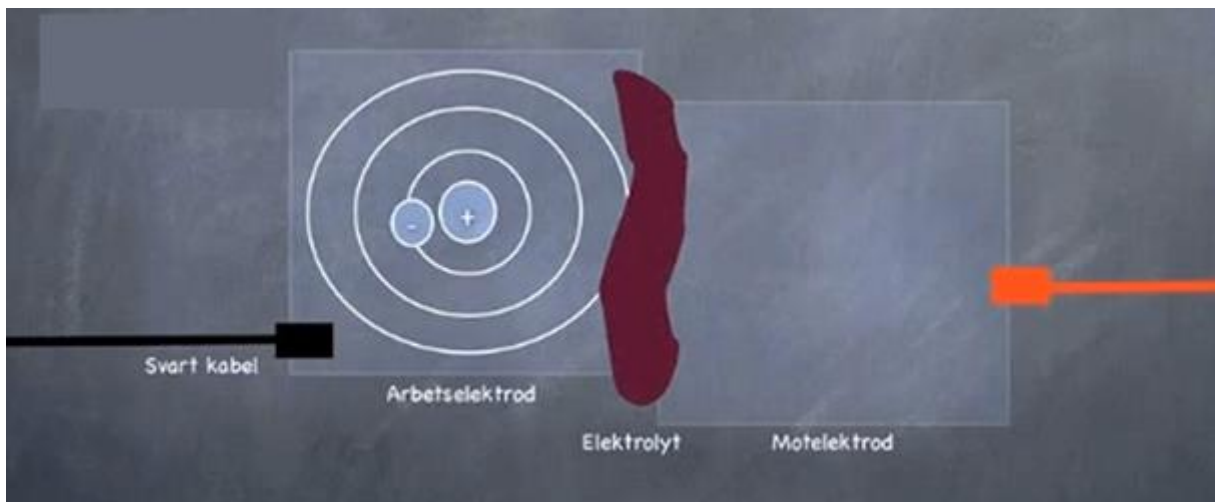


Figur 6 Schematisk bild över Uppbyggnaden av CIGS cellen (Residential solar, 2010).

#### 2.4.4 Grätzelceller

På engelska heter tekniken dye-sensitized solar cells vilken ungefär betyder ”färg-känsliga solceller”. (Gratzel, M 2005)

I förhållande till andra solcellstekniker fungerar denna teknik annorlunda, processen liknar fotosyntesens energiutvinning där färgämnet föreställer klorofyllet. (Roy. M. et al, 2011)



Figur 7 Schematisk bild över hur en grätzelcell fungerar

Figur 7 visar, väldigt grundläggande, hur principen för en grätzelcell går till (Nordekqvist, K 2013) I arbets elektroden finns atomer av något slag och hela principen bygger på att man ska kunna ”skörda” dessa atomers elektroner. Då solljus med rätt våglängd träffar elektronerna så kommer de att exciteras och i detta fall försvinna iväg genom den svarta kabeln i figur 7. Då denna elektron försvinner kommer det att bildas ett elektronhål och atomen blir positivt laddad. Elektrolyten har i sin tur i uppgift att bidra med elektroner till arbets elektroden som på så sätt får tillbaka sin ursprungliga laddning. Eftersom vi har en sluten krets så kommer den orange kabeln i figur 7 att bidra med nya elektroner till elektrolyten som har blivit positivt

laddad då den blev av med en elektron (O'regan, Grätzel, M 1991). När en yttre krets ansluts som fyller på med nya elektroner innebär det att cellen genererar elektricitet från ljus utan att det går åt någon som helst kemisk substans. Denna elektronbalans upprätthålls alltså genom att elektronerna cirkulerar genom den yttre kretsen.

Det vanligaste halvledarmaterialet är  $\text{TiO}_2$  (titanoxid) men man har även utfört tester då man använt halvledare som  $\text{ZnO}$  och  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Detta är exempel på halvledaroxider med stora bandgap. Titanoxiden ligger i kontakt med en redoxelektrolyt. Elektrolyten är en substans som innehåller fritt rörliga joner och redox betyder att oxidationstalet hos en atom ändras, i detta fall att elektroner förflyttas. Titanoxid absorberar i stort sett endast de kortare våglängderna i solljusets-UV-ljus vilket står för ca 4 % av den infallande instrålningen. För att kunna absorbera ett större spektrum färgas titanoxiden med ett färgämne och ett så kallat monolager bildas. (Grätzel, M 2005)

Grätzeltekniken verkar vara en av de mest lovande teknikerna just nu. Det är en väldigt billig framställning och än så länge används titanoxid i första hand som färgämne. (Roy, M. et al 2011). Ren titanoxid förekommer inte i speciellt stor utsträckning i naturen utan den framställs från titanmalm. Titanmalmen kokas först i svavelsyra och centrifugeras sedan, efter det sårar man på de partiklar man inte vill ha. Sedan mals den rena titanoxiden ner och är klar för användning. Titanoxiden är i sig inte miljöfarlig men enligt (Aulin, R. 2012) kan det vara en hälsorisk liksom asbest vid inandning av damm och det är vid framställningen av titanoxiden som grätzelcells-tekniken kan verka kontraproduktiv. Svavelsyran som används vid framställningen har en väldigt hög kokpunkt och vid förekomst i naturen avdunstar den inte. Svavelsyra är väldigt frätande och det som tränger ner i marken löser och frigör ämnen, kan även tränga sig ner ända till grundvattnet och är extremt frätande för människor. (Brenntag Nordic 2010)

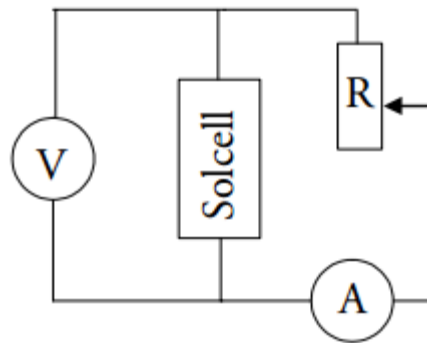
Tekniken är fortfarande i forskningsstadiet och man jobbar på att öka verkningsgraden genom en ökad diffusion vid val av färgämnen. (Roy, M. et al, 2011) Det är många processer som skall balanseras och effektiviteten är relativt låg. Världsrekordet för små testceller ligger på 12 % i verkningsgrad och det finns fortfarande många frågetecken som måste kunna svaras på för en bättre verkningsgrad. Höga temperaturer och ljusintensitet har visat påverka och kan orsaka sönderfall av solcellen. (Kloo, L. 2011)

#### **2.4.5 Solcellers temperaturberoende**

Det är allmänt känt att solceller tappar i elverkningsgrad när temperaturen ökar (Skoplaki, E & Palyvos, J. 2009), i det här avsnittet kommer teorin bakom detta gås igenom. Exempel på olika sorters solcellers temperaturberoende kommer även att ges.

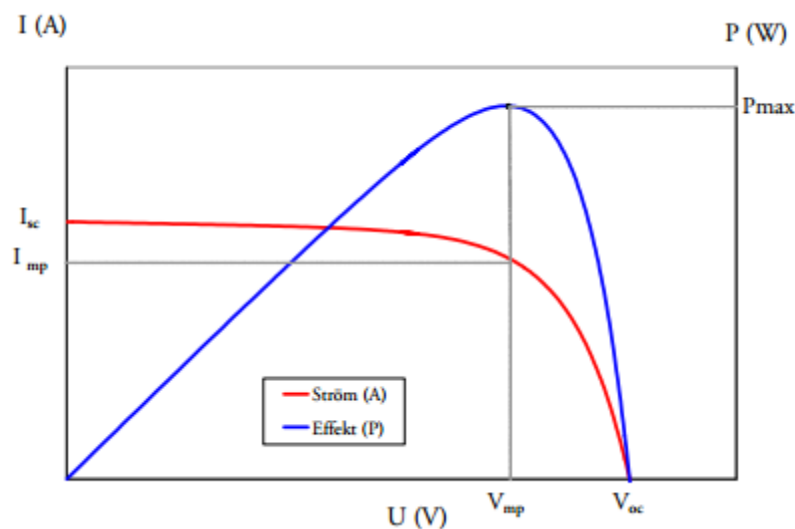
##### *I-V kurva*

För att kunna beskriva solcellernas temperaturberoende behöver man veta en del om de elektriska egenskaperna som solceller har. För att förklara dessa används en ström-spänningskurva (*I-V* kurva) som ritas upp genom att man ändrar på en yttre resistans samtidigt som man mäter strömmen och spänningen. Kopplingsdiagram som beskriver uppmätningen av *I-V* kurvor kan ses i figur 8.



Figur 8 Kopplingsschema vid tillverkning av I-V kurvor (Gajbert, H. 2002)

När den yttre resistansen  $R$  är noll, alltså om kretsen är kortsluten är spänningen noll och man får den maximala strömmen man kan få ut, kortslutningsströmmen ( $I_{sc}$ ). När man sedan ökar resistansen ökar spänningen i kretsen samtidigt som utströmmen minskar. När man har en oändlig resistans blir utströmmen noll och man får ut vilken tomgångsspänningen ( $V_{oc}$ ) är för kretsen. Den effekt som man får ut från solcellen är produkten mellan spänningen och strömmen. Maxeffekten ( $P_{max}$ ) för en solcell ges vid en viss ström ( $I_{mp}$ ) och spänning ( $V_{mp}$ ). En I-V kurva med  $P_{max}$  kan ses i figur 9.



Figur 9. I-V kurva med  $P_{max}$  (Gajbert, H. 2002)

Kortslutningströmmen är direkt beroende av vilken solinstrålning man har medan tomgångsspänningen ändras vid ändrad temperatur. När temperaturen ökar minskar tomgångsspänningen i cellen vilket medför att  $V_{mp}$  i sin tur också minskar, detta är på grund av att bandgapet i cellen minskar vilket gör att andelen termiskt exciterade elektroner ökar. Detta gör att maxeffekten ut minskar vilket betyder att verkningsgraden för solcellerna minskar. (Skoplaki, E & Palyvos, J. 2009)

#### Linjärt temperaturberoende

Alla uppmätta värden i det här avsnittet är uppmätta under standardiserade testförhållanden, STC (Standard Test Conditions). Dessa förhållanden är 25 °C i celltemperatur med 1000

W/m<sup>2</sup> i strålning vid AM1,5. Vid uppmätning av olika verkningsgrader har de högsta bekräftade verkningsgraderna vid STC för en modul med en yta över 800 cm<sup>2</sup> använts.

Verkningsgraden för en solcell ändras med temperaturen enligt det linjära sambandet i formel 1, detta har mätts upp experimentellt;

$$\eta = \eta_{T_{ref}} * (1 - \beta_{ref}(T_{cell} - T_{ref})) \quad (1)$$

(Skoplaki, E & Palyvos, J. A. 2009)

Kiselceller tappar ungefär 0,45 % i verkningsgrad för varje ökad grad. Motsvarande tapp för övriga solceller är 0,2 %/K för a-Si, 0,25 %/K för CdTe, 0,35 %/K för CIGS.(Zondag, H.A. 2005). Motsvarande värde för Grätzelceller är okänt då de inte använder samma teknik och alltså inte har samma temperaturberoende som vanliga solceller.

Verkningsgraderna för de olika solcellerna kan vara svårt att uppskatta men de högst uppmätta värdena för de olika solcellsmodulerna är följande; 18,5 % för polykristallina solceller, 10,5 % för amorft kisel, 15,7 % för CIGS, 16,1 % för CdTe, och 9,9 % för Graetzelceller (Green, M. et. al. 2013).

I tabell 1 nedan har verkningsgraderna och temperaturberoendet för de olika sorters solcellerna sammanställts.

**Tabell 1. Sammanställning av olika solcellers verkningsgrad och temperaturoberoende**

	$\beta_{ref}$ (%/K)	$\eta_{T_{ref}}$ (%)
Polykristallint kisel	0,45	18,5
Amorft kisel	0,2	10,5
CIGS	0,35	15,7
CdTe	0,25	16,1
Graetzel	-	9,9

## 2.5 Solinstrålning

I solen sker det kärnreaktioner som gör att solen har en yttemperatur på 5800 K. Detta gör att solen strålar ut energi i alla riktningar. En del av den här strålningen träffar jorden, i och med att jorden åker runt solen i en nära cirkulär bana kan man säga att solen strålar en konstant energi till jorden. Denna energi som träffar jordens atmosfär kallas *solarkonstanten* och brukar sättas till ungefär 1366 W/m<sup>2</sup>. Detta värde är inte riktigt exakt utan kan variera lite beroende på kärnreaktionerna i solen men också för att avståndet mellan jorden och solen varierar med ±1,5 % under året.(SMHI, 2014)

Av de solstrålar som kommer till yttre delen av atmosfären så kommer 25- 40 % reflekteras och åka ut i rymden igen, 20- 40 % kommer absorberas i atmosfären. Det betyder att 20- 55 % av den inkommande strålningen når jordytan.(Zethraeus, B. 2011).

Solinstrålning vid markytan består av två olika sorters strålning, direkt och diffus. Direkt solinstrålning är den strålning som man kan se direkt från solen. Den diffusa strålningen är den strålning som blir då den direkta strålningen studsar på något och sprids i atmosfären. Vid en helmulen dag finns alltså bara diffus strålning. Under ett helt år i norra Europa står den diffusa och den direkta solinstrålningen för en ungefär lika stor del.

Det finns många faktorer som bidrar till solinstrålningen, tex vilken latitud man befinner sig på, vilken årstid det är eller vilken tid på dygnet det är. Även väder och luftkvalitet spelar in men det kommer inte att tas upp här.

För att uppskatta den totala instrålningen till jordytan är vinkeln mellan zenit och solens strålar av stor betydelse, denna vinkel kallas *zenitvinkeln*( $\theta_z$ ). Ju större zenitvinkeln är desto större luftmassa måste solstrålarna ta sig i genom och det betyder att större andel av solstrålarna absorberas i atmosfären. Om zenitvinkeln är noll absorberas ungefär 30 % av alla solstrålar i atmosfären. Alltså är det bara 70 % av strålningen som kommer till jordens atmosfär som faktiskt kommer till jordytan.

*Latituden*( $\varphi$ ) beskriver vilken vinkel en position på jordklotet man befinner sig jämfört med ekvatorn och desto större belopp på latituden ju längre ifrån ekvatorn befinner man sig. Årstidsberoendet beror på att jordens axel har en vinkel jämfört med jordens bana runt solen. Denna vinkel kallas *deklinations*( $\delta$ ) och denna ändrar sig över hela året för att jorden snurrar runt solen. Detta gör att vid midsommar på norra halvklotet är jorden riktad 23,45 grader mot solen och tvärtom på vintern. Detta gör att solen står högre på sommaren än vad den gör på vintern.(SMHI, 2014) För att beräkna vilken deklination jordens axel har en viss dag på året används formel 2.

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 * \cos(\gamma) + 0,070257 * \sin(\gamma) - 0,006758 * \cos(2\gamma) + 0,000907 * \sin(2\gamma) - (3) 0,002697 * \cos(3\gamma) + 0,00148 * \sin(3\gamma) \quad (2)$$

Där  $\gamma$  är jordens rotation runt solen fram till den *dag* på året ( $n$ ) som *zenitvinkeln* ska beräknas för och den timme som solinstrålningen ska beräknas för,  $\gamma$  beskrivs av formel 3:

$$\gamma = \frac{360}{365} * (n - 1 + \frac{timme-12}{24}) \quad (3)$$

För varje timme snurrar jorden 15° runt sin egen axel, denna vinkel är den vinkel solen bildar mellan Greenwich och den aktuella platsen för den tid som passerat. När man räknar ut *timvinkeln*  $\omega$  måste man använda sig av den sanna soltiden (*tst*) för en viss plats. För att beräkna *timvinkeln* används formel (4):

$$\omega = \frac{tst}{4} - 180 \quad (4)$$

Den sanna soltiden *tst*, "true solar time", måste beräknas på grund av att solen står i olika vinklar i samma tidzon fast klockan är lika mycket i hela tidszonen. In i formeln sätter man för vilken timme, minut och sekund man vill räkna ut den sanna soltiden. *Tst* beskrivs av formel 5:

$$tst = timme * 60 + minut + \frac{sekund}{60} + tidsskillnad \quad (5)$$

För att räkna ut tidsskillnaden som är skillnaden mellan tiden på platsen och *tst* för samma plats behövs vilken *longitud* och *tidszon* platsen ligger används formel 6.

$$tidsskillnad = EoT - 4 * longitud + 60 * tidszon \quad (6)$$

Där *EoT* är en empirisk formel som korrigerar för jordens deklination under året och beskrivs av formel 7;

$$EoT = 229,18 * (0,000075 + 0,001868 * \cos(\gamma) - 0,032077 * \sin(\gamma) - 0,014615 * \cos(2\gamma) - 0,040849 * \sin(2\gamma)) \quad (7)$$

Vinkeln som solen har mot zenit beskrivs med hjälp av formlerna 2- 7 ovan och kan ses i formel 8.

$$\theta_z = \arccos(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi) * \sin(\delta)) \quad (8)$$

(National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014)

När *zenitvinkeln* är uträknad kan *längden som solstrålarna måste färdas genom atmosfären* (1) beräknas, för detta används formel 9. Detta kan härledas med vanlig trigonometri och med hjälp av cosinussatsen (se bilaga 1).

$$l = r * \cos(180 - \theta_z) + \sqrt{\left(\frac{r * \cos(180 - \theta_z)}{2}\right)^2 - 2 * r * atm - atm^2} \quad (9)$$

För att räkna ut *atmosfärshöjden atm* kan man använda sig av ekvation 10 om man antar att det råder samma tryck och densitet genom hela atmosfären

$$atm = \frac{P}{\rho * g} \quad (10)$$

För att sedan räkna ut den totala absorptionen i luften används Bourguer's lag 11 som beskriver absorptionen genom atmosfären som:

$$I(l) = I_0 * e^{-\alpha l} \quad (11)$$

Man kan lösa ut  $\alpha$  med hjälp av att anta vilken effekt inkommande strålning har och vilken sträcka den har färdats i atmosfären.

Med hjälp av formlerna 8- 11 kan solinstrålningen till en horisontell yta beräknas.

## 2.6 Tiltfaktor

Förhållandet mellan solinstrålningen till en horisontell yta och solinstrålningen till en vinklad yta kallas *tiltfaktorn*.

För instrålningen till vinklad yta med vinkeln  $\beta$  mot horisontalplanet och som står mot söder används formel 12;

$$\cos\theta = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (12)$$

Medans mot en horisontell yta beskrivs av formel 13;

$$\cos\theta_z = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (13)$$

Tiltfaktorn blir då enligt formel 14;

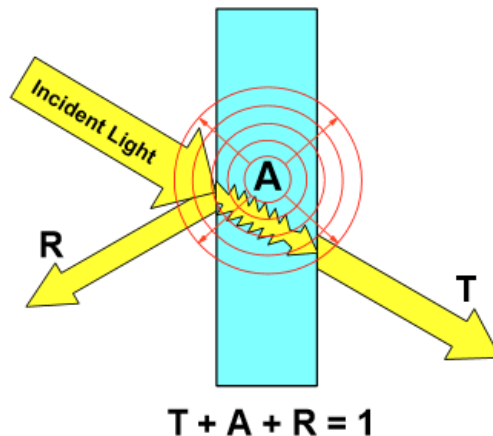
$$\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = \frac{\cos(\varphi-\beta)\cdot\cos(\delta)\cdot\cos(\omega)+\sin(\varphi-\beta)\cdot\sin(\delta)}{\cos(\varphi)\cdot\cos(\delta)\cdot\cos(\omega)+\sin(\varphi)\cdot\sin(\delta)} \quad (14)$$

För att få instrålningen till en vinklad yta multipliceras instrålningen mot den horisontella ytan med tiltfaktorn.

(Sukhatme, S. 2008)

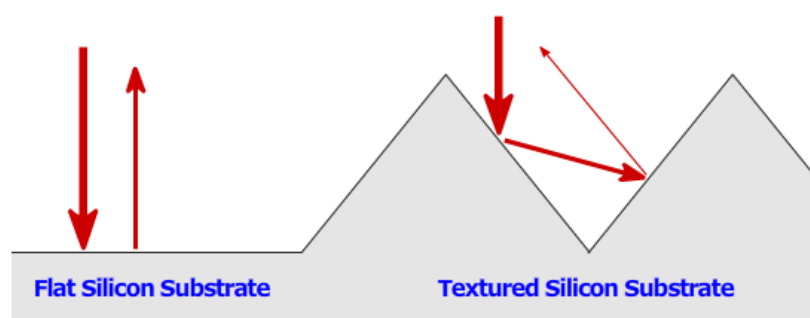
## 2.7 Strålning genom glas

Då solens strålar når ytan på solhybriden så kommer en del att reflekteras på ytan en del att absorberas i glaset och en del att transmittas in till solcellerna vilket kan ses i figur 10.



Figur 10 Reflektion, absorption och transmission av ljus i glas.

För största möjliga energiutvinning så vill man att det skall reflekteras så lite ljus som möjligt och man använder sig då av en anti-reflektionsfilm på ytan. Det kommer ändå att reflekteras en del av ljuset så för att kunna ta tillvara på fler våglängder så kan man även använda sig av en räfflad yta och får ljuset att studsas fler än bara en gång på ytan vilket kan ses i figur 11 där bredden på pilarna anger energimängden i solstrålarna.



Figur 11 Ljus studsar på en plan yta och en räfflad yta (PV- Education, 2014)

Snells lag i formel 15 beskriver vilken vinkel solljuset har som kommer in i solcellen i förhållande till infallsvinkeln:

$$n_1 * \sin\theta_1 = n_2 * \sin\theta_2 \quad (15)$$

Där  $n_1$  och  $n_2$  är materialens brytningsindex. Genom omskrivning av denna lag kan man då räkna ut med vilken vinkel ljuset har som kommer in i glaset enligt formel 16:

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1} \sin\theta_1\right) \quad (16)$$

För att sedan räkna ut hur mycket strålning som reflekteras mot glaset så används två ekvationer 17 och 18.

Den första används för ljus som är parallellt mot ytan:

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (17)$$

Den andra används för ljus som är vinkelrätt mot ytan:

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (18)$$

Total andel reflekterat ljus beskrivs då av formel 19.

$$R_{\text{Tot}} = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2} \quad (19)$$

Totalt reflekterat ljus beskrivs då av formel 20.

$$q_{\text{refl}} = q_{\text{in}}^0 * R_{\text{Tot}} \quad (20)$$

Efter det att en del av det infallande solljuset har reflekterats på ytan av solpanelen så kommer resten att åka in i glaset där en del absorberas och resten kommer att transmittas in till solcellen. Lambert-Bouguers lag om absorption förklarar absorptionen enligt ekvation 21.

$$q_{\text{abs}} = q_{\text{in}} * e^{-l * \alpha} \quad (21)$$

(PV- Education, 2014)

## 2.8 Energitransporter i solhybrider

Den del av solens strålar som når solcellerna kommer att absorberas i cellen och dess temperatur kommer stiga. På grund av att skillnaden är liten och för att det blir lättare så har det antagits att temperaturen på cellen och temperaturen på glasets undersida är samma. Detta medför att värmetransporten genom glaset kan uttryckas enligt ekvation 22.

$$q_{\text{ledn}} = \frac{\lambda_{\text{glas}}}{\delta_{\text{glas}}} (T_{\text{Cell}} - T_{\text{Yta}}) \quad (22)$$

Den värme som transporteras upp genom glaset till ytan av panelen kommer att transporteras bort genom konvektion enligt ekvation 23.

$$q_{\text{konv}} = \alpha_{\text{Luft-Glas}} (T_{\text{Yta}} - T_{\text{Om}}) \quad (23)$$

Allt som har en temperatur över den absoluta nollpunkten emitterar energi i form av strålning. Detta leder således till att cellerna kommer att ha ett emissionsförhållande som definieras som

kvoten mellan den energi som utstrålar från cellen och den energi som utstrålas från en svart kropp. Den totalt emitterade energin kan uttryckas enligt ekvation 24.

$$q_{emitt} = \varepsilon_{Cell} * \sigma * (T^4_{Cell} - T^4_{Omng}) \quad (24)$$

En del av den strålningen som träffar solcellerna kommer att bli el och resten kommer att bli värme. Hela solpanelen består inte av solceller och det som inte träffar solcellerna kommer att passera till absorbatoren via ett skikt av något slag. Hur mycket som blir el uttrycks i ekvation 25. Hur mycket som blir värme i cellerna uttrycks enligt ekvation 26 och hur mycket strålning som kommer mellan cellerna in till absorbatoren uttrycks enligt ekvation 27.

$$q_{el} = \frac{A_{Celler}}{A_{Tot}} * q_{in} * (\eta_{Ref} * (1 - \beta_{Ref}(T_{Cell} - T_{Ref}))) \quad (25).$$

$$q_{värme\ celler} = \frac{A_{Celler}}{A_{Tot}} * q_{in} * \left(1 - \left(\eta_{Ref} * (1 - \beta_{Ref}(T_{Cell} - T_{Ref}))\right)\right) \quad (26).$$

$$q_{värme\ mellan} = \frac{A_{mellan}}{A_{celler}} * q_{in} \quad (27)$$

Den värme som överförs från cellen till vattnet beskrivs enligt ekvation 28

$$q_{värme\ prod} = U * (T_{Cell} - T_{Vatten}) \quad (28).$$

$U$ -värdet beskrivs i ekvation 29 där konvektionen vid cellen i vattnet kan försummas.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{cell}} + \frac{\delta_{skikt}}{\lambda_{skikt}} + \frac{1}{\alpha_{vatten}} \quad (29)$$

I och med konvektionen vid cellen är obefintlig då det sitter en glasskiva ovanpå och att konvektionen i vattnet har försumrats kan då  $U$ -värdet istället uttryckas enligt ekvation 30.

$$U = \frac{\delta_{skikt}}{\lambda_{skikt}} \quad (30)$$

Den värme som överförs till vattnet kan då istället skrivas enligt ekvation 31.

$$q_{värme\ prod} = \frac{\delta_{skikt}}{\lambda_{skikt}} (T_{Cell} - T_{Vatten}) \quad (31).$$

## 2.9 Solhybridens värmebalans

Med hjälp av formlerna 20-31 ovan har en värmebalans för solhybriden ställts upp där alla energitransporter i solhybriden redovisas i formel 32.

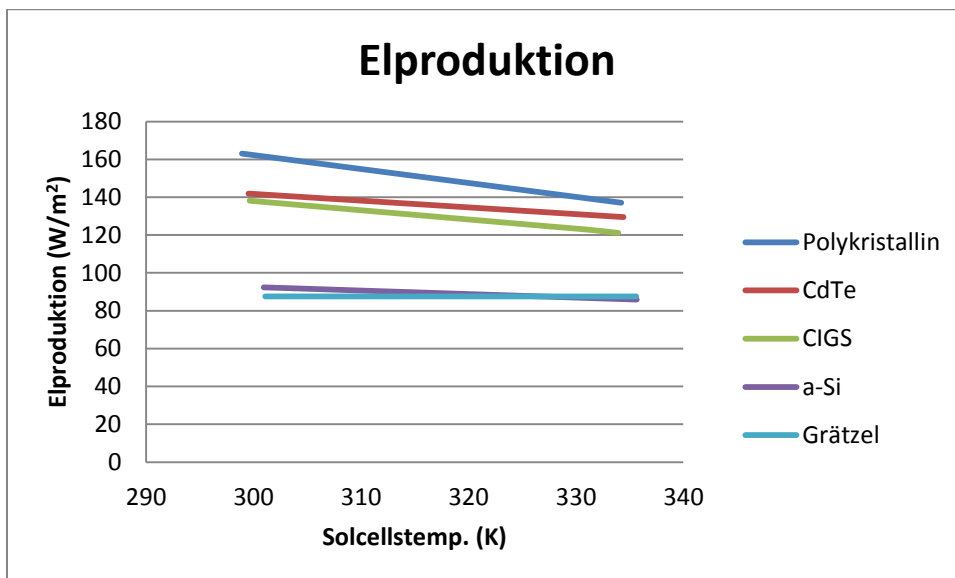
$$q_{in}^0 - q_{refl} = q_{abs} + q_{ledn} + q_{konv} + q_{emitt} + q_{el} + q_{värme\ celler} + q_{värme\ mellan} + q_{värme\ prod} \quad (32)$$

Uttryckt med formler för de olika q som beskrivits tidigare i detta avsnitt blir värmebalansen enligt ekvation 33.

$$q_{in}^0 - q_{in}^0 * R_{Tot} = q_{in} * e^{-l*\alpha} + \frac{\lambda_{glas}}{\delta_{glas}} (T_{Cell} - T_{Yta}) + \alpha_{Luft-Glas} (T_{Yta} - T_{Omg}) + \epsilon_{Cell} * \sigma * (T^4_{Cell} - T^4_{Omg}) + \frac{A_{Celler}}{A_{Tot}} * \left( \eta_{Ref} * (1 - \beta_{Ref} (T_{Cell} - T_{Ref})) \right) + \frac{A_{Celler}}{A_{Tot}} * \left( 1 - \left( \eta_{Ref} * (1 - \beta_{Ref} (T_{Cell} - T_{Ref})) \right) \right) + \frac{A_{mellan}}{A_{tot}} * q_{in} + q_{in} \frac{\delta_{skikt}}{\lambda_{skikt}} (T_{Cell} - T_{Vatten}) \quad (33)$$

## 2.10 Solhybrid El/Värme

För att jämföra hur tillämpbara de olika solceller som beskrivits tidigare i detta arbete är för solhybridstekniken har diagram gjorts som teoretiskt visar hur elproduktionen ändras med temperaturen på solcellen detta kan ses i figur 12. Vid beräkningarna antas en instrålning till solcellerna på 895 W/m<sup>2</sup>.



Figur 12

### 3. Metod

Som beskrivits i kapitel 1.1, ingår detta examensarbete i en projektgrupp där målet med arbetet är att jämföra tre olika sorters solhybrider. Alla hybriderna har samma solcellsteknik men med olika geometri på absorbatoren som sitter under solcellen. En av modellerna använder sig av en glasskiva mellan solcellen och absorbatoren istället för en plastfilm som de andra två har. Detta för bättre ljusgenomsläpplighet mellan solcellerna.

#### 3.1 Försökupställningar

Här beskrivs de olika anläggningarna där solhybriderna är uppsatta.

##### 3.1.1 Öjaby

I Öjaby sitter solhybriden på Per Wickmans hus. Här kan man använda den producerade värmen till tappvatten eller till uppvärmning av ett bergvärmelager. Absorbatorn under solcellerna är gjord av en platt aluminiumabsorbator vilket kan ses i figur 13.

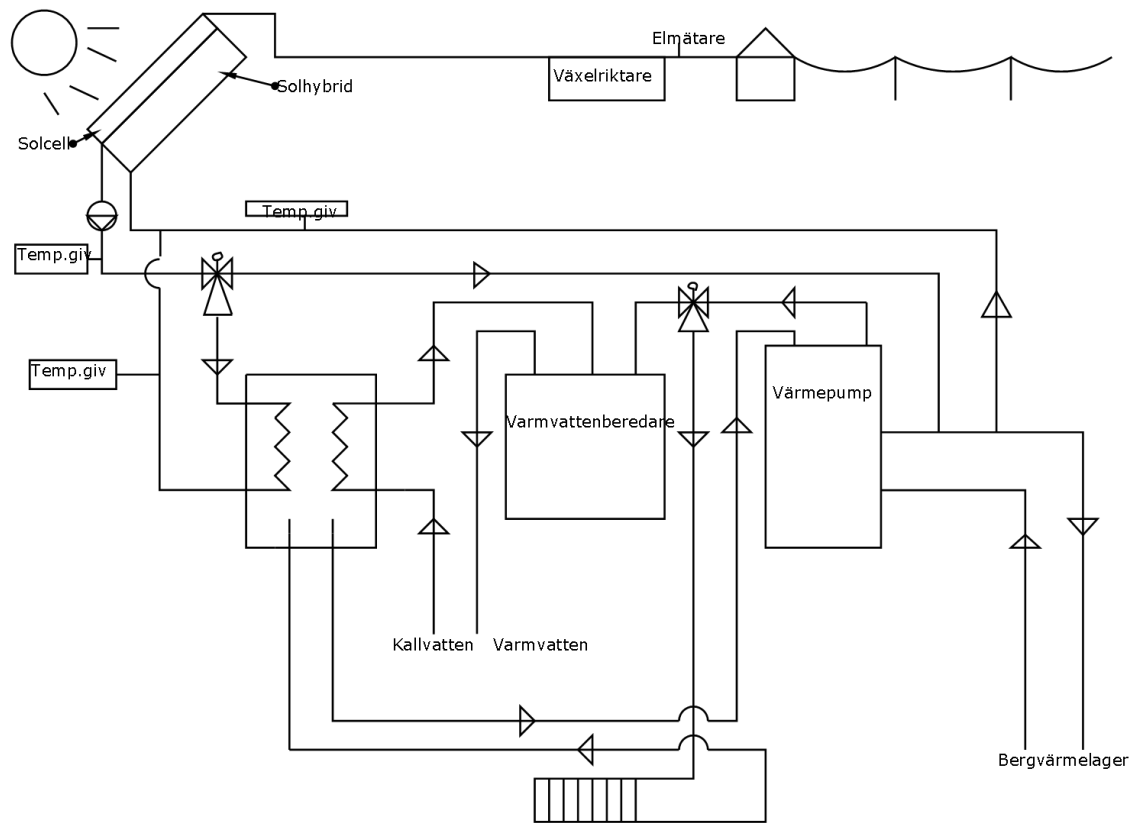


Figur 13 Absorbatorn bakom solcellerna i Öjaby

Bild på solhybriden och en systemskiss kan ses i figur 14 och 15. Solhybriden har en lutning mot horisontalplanet på  $27^\circ$ .



Figur 14 Försökupställningen i Öjaby



Figur 15 Systemöversyn över anläggningen i Öjaby och Lenhovda

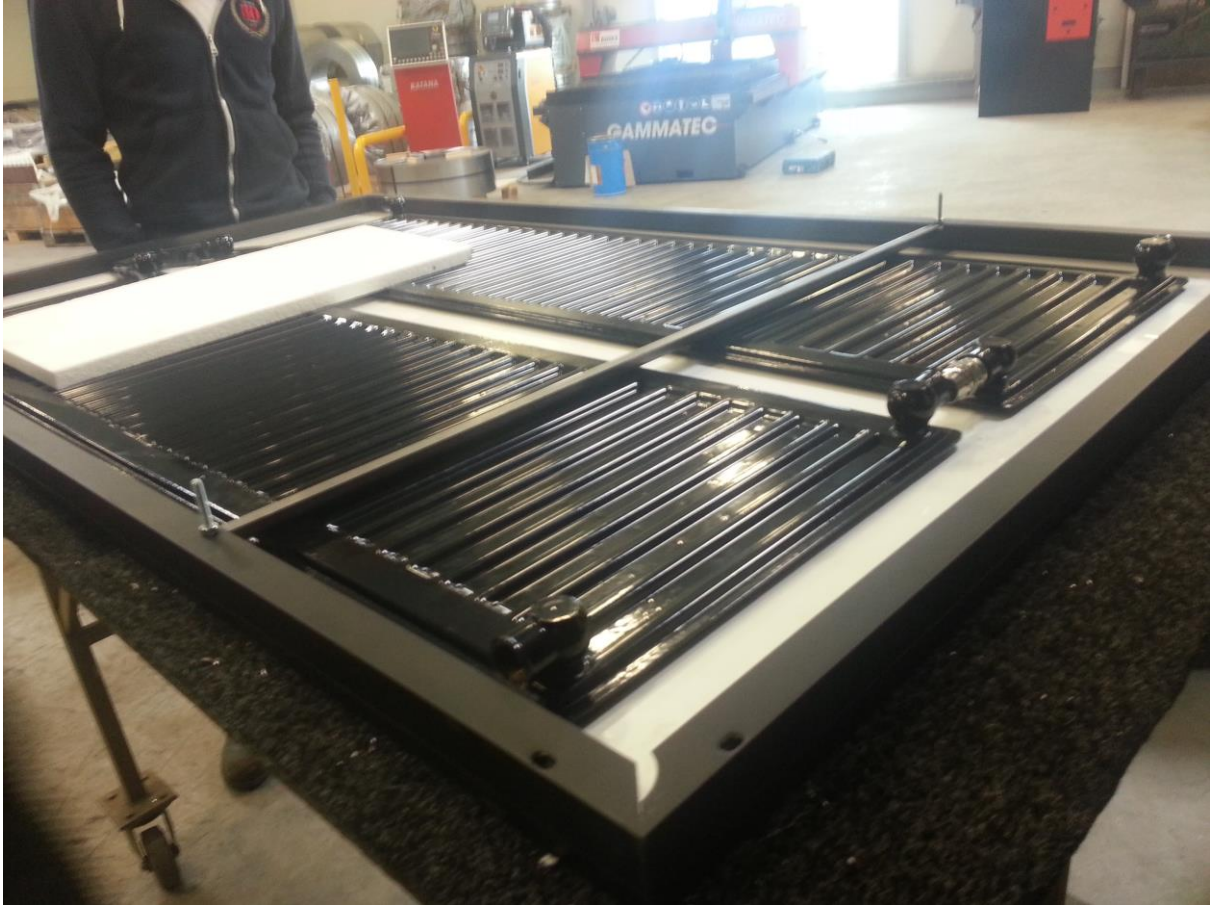
### 3.1.2 Lenhovda

Försöksuppställningen i Lenhovda sitter på Lenhovda radiatorfabriks tak och här kan den producerade värmen användas antingen som tappvatten eller som uppvärmning av ett bergvärmelager på samma sätt som i Öjaby, se figur 15. Försöksuppställningen i Lenhovda kan ses i figur 16 nedan.



Figur 16 Försöksuppsättningen i Lenhovda

Solhybriden har en lutning mot horisontalplanet på  $45^\circ$ . Absorbatorn under solcellerna är en vanlig ståladiator som vanligtvis används till uppvärmning av hus, detta kan ses i figur 17 nedan. Absorbatorn är inte isolerad på baksidan.



Figur 17. Absorbatoren bakom solcellerna i Lenhovda

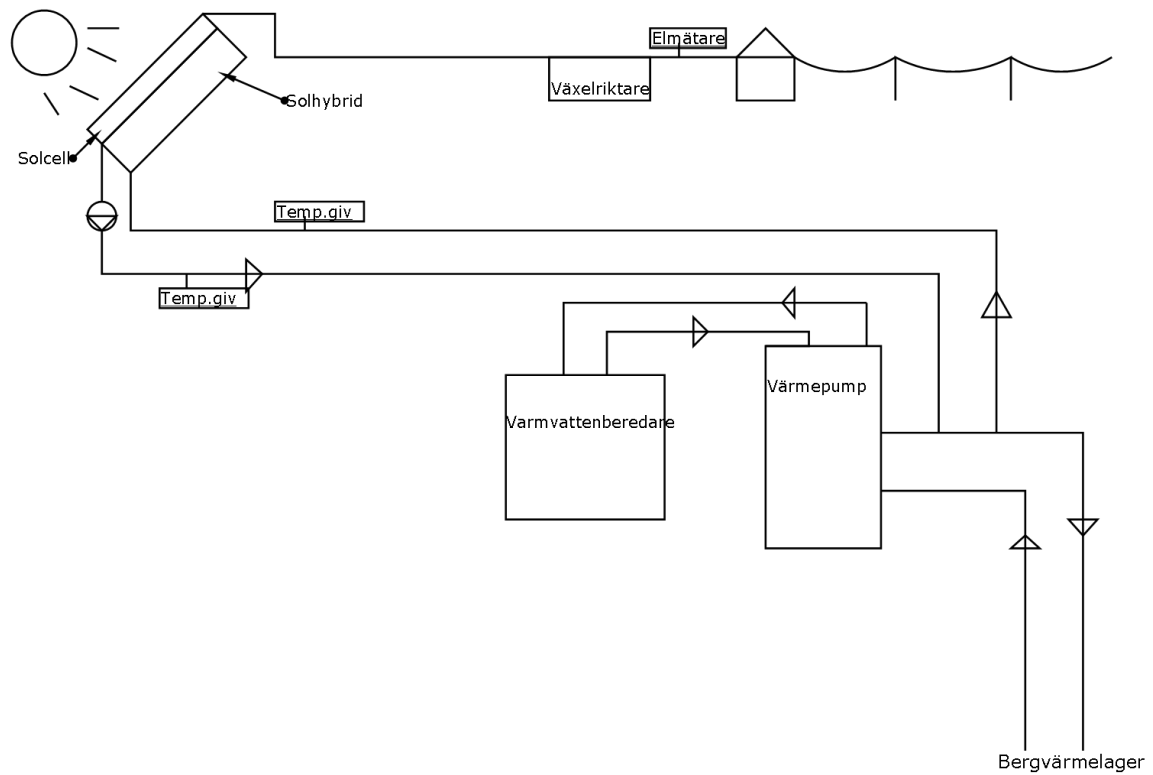
Solcellerna använder sig här av en glas- glas metod vilket betyder att utrymmet mellan solcellerna är genomskinligt för att släppa igenom mer solstrålning som sedan träffar absorbatoren, detta kan ses i figur 18.



Figur 18. Hur solcellerna ser ut med mellanrum

### 3.1.3 Åseda

Solhybriden i Åseda sitter på Åseda Värme & Sanitets tak. Absorbatoren består av en kopparslinga som går bakom solcellerna. Här används värmen endast till att värma upp ett bergvärmelager då de inte har behov av något tappvarmvatten, systemskiss kan ses i figur 19.



Figur 19 Systemöversyn över anläggningarna i Lenhovda och Åseda

Försöksuppställningen i Åseda kan ses i figur 20 nedan.



Figur 20. Försökupställningen i Åseda

### 3.2 Beräkningsmodell

En beräkningsmodell har formulerats för att kunna förutse och förbättra solhybridens prestanda. Beräkningsmodellen har formulerats i Microsoft Excel med hjälp av solhybridens värmebalans i kapitel 2.9 och kan räkna ut teoretiskt producerad elektricitet och värme som funktion av vilken tid på dygnet det är och vilken dag på året det är etc. I beräkningsmodellen kan olika värden för t.ex. olika materials värmeövergångstal och hur tjocka dessa material sätts in. Det slutgiltiga uttrycket ges av att en funktion av temperaturen hos cellen är lika med en annan funktion av temperaturen hos cellen vilket endast går att lösas numeriskt. Den punkt där dessa funktioner skär varandra ger cellens jämviktstemperatur vid det givna driftfallet.

Modellen innehåller uträkningar som beskriver tillfällig teoretisk solinstrålning till en tiltad yta på jorden. Dessa uträkningar bygger på solens position i förhållande till var på jorden man befinner sig, vilken dag på året det är och till vilken tid på dygnet men ger ett värde som inte tar hänsyn till den diffusa solinstrålningen vilket beskrivs i kapitel 2.5. Denna modell stämmer alltså inte överens med verkligheten men med hjälp av värden från SMHI, på hur mycket solinstrålning som absorberas i atmosfären kan modellen ge ett realistiskt värde på hur värmeupptaget i absorbatoren ändras sig med olika material och olika tekniker på solcellen i solhybriden.

I figur 21 nedan kan de olika parametrarna som beräkningsprogrammet tar hänsyn till ses.

Indata	
Dag i	141
Timme	21
Minut	0
Vinkel på panel	27
Absorberat	0,3
Longitud °	14,7746
Latitud °	56,8792
Tidszon	1
$\rho$ abs glas	0,04
$\lambda$ glas	0,9
$\delta$ glas	0,0032
T <sub>omg</sub>	294,35
A <sub>celler</sub>	1,63
A <sub>tot</sub>	1,65
$\eta_{ref}$	0,168
$\beta_{ref}$	0,0038
T <sub>ref</sub>	298,15
$\lambda_{under}$	0,9
$\delta_{under}$	0,01
T <sub>vatten</sub>	286,15
$\epsilon_{cell}$	0,9
A <sub> mellan</sub>	0,01
$\lambda_{absorbator}$	210
$\delta_{Absorbator}$	0,003
A <sub>absorbator</sub>	1,6
$\alpha$ glas-luft	5
Konvektion i vatten	1000

Figur 21. Indata till beräkningsmodell

I figur 21 ovan är värden insatta för 16:de maj kl 13:00. Den solhybrid som används har vinkeln 45 ° mot söder och ligger i Växjö. En absorbtion i atmosfären på 30 % indikerar en solig dag. Det absorberas 4 % strålning i glasytan och täckglasytan har en tjocklek på 3,2 mm med en värmekonduktivitet på 0,9 W/m·k. Temperaturen på omgivningen runt hybriderna är satt till 25°C. Arealen på själva cellerna är 1,63 m<sup>2</sup> och hela panelen är 1,65 m<sup>2</sup>.

Referensverkningsgraden på dessa celler är 16,4 % och har en verkningsgradsminskning enligt  $\beta_{ref}$  på 0,38 %/°C. Referenstemperaturen på cellerna är 25 °C och denna solhybrid har en glasskiva under solcellspanelen med tjockleken 1 cm och en värmeöverföring på 0,9 W/(m·K). Efter denna glasskiva så används en ståladiator för absorbtion av värmen med en värmeöverföring på 59 W/m·K och en tjocklek på 1,18 mm. Arealen på absorbatorn är 1,6 m<sup>2</sup> och konvektionstalet mellan glas och luft är 5 W/m<sup>2</sup>·K, konvektionen på vattnet är 1000 W/m<sup>2</sup>·K

Detta ger ett resultat som visar solstrålningen i figur 22.

	Utdata
Instrålning horisontell yta (W)	686
Instrålning till tiltad yta (W)	838
Instrålning till solcellen (W)	820

Figur 22. Instrålning till solhybriden

I figur 23 visas den teoretiskt producerade energin av solhybriden beräknat med beräkningsmodellen.,

	Producerad
El (W)	134
Värme (W)	672

Figur 23. Teoretisk producerad energi

## 4. Genomförande

För att få de mätvärden som behövdes för utvärdering av solhybriderna var ett av kraven att alla mätvärden skulle tas på samma dag och vid samma tid på dygnet för att få så lika solinstrålning som möjligt. Flödet av kylarvattnet i solhybriderna ändrades så att flödena på de olika stationerna blev så lika som möjligt. Sedan avlästes vilken eleffekt som producerades och vilken temperatur som blev på vattnet med det massflödet. Eftersom rapporten skrivs av två personer så gjordes mätningar vid samma tillfälle i Lenhovda och Åseda. Mätningarna i Öjaby utfördes därför ca. två timmar senare men med hyfsat samma solinstrålning i och med att mätningarna i Åseda och Lenhovda utfördes på förmiddagen och mätningarna i Öjaby på eftermiddagen.

Alla värden sammaställdes sedan i tabeller där den producerade värmeeffekten räknades ut för de olika driftfallen med hjälp av vattnets  $C_p$ -värde, temperaturen och volymsflödet. Dessa tabeller ger en överblick på vilket driftfall som ger den bästa kvoten, producerad el och producerad värme.

För att jämföra hur mycket energi solhybriderna producerar över en hel dag användes det beräkningsprogram som formulerats. Med hjälp av de värden som vattentemperaturen, utomhustemperatur, dag på året, tid på dygnet och vilket  $U$ -värde de olika stationernas absorbatörer har räknades den teoretiska el- och värmeproduktionen ut.

För att ge en tydlig syn på hur bra de olika solhybriderna är, tittas det på hur många kvadratmeter solhybrid det skulle behövas för att täcka elbehovet en över året genomsnittlig dag för en godtycklig villa. En jämförelse görs sedan med hur många kvadratmeter vanlig solvärmepanel det krävs för att täcka värmebehovet och hur många kvadratmeter okylda solceller man behöver för att täcka elbehovet för samma villa. Den dag som jämfördes med var en solig dag den 21 maj, detta ger inte verkliga resultat sett över ett helt år men det ger i alla fall en jämförelse mot vanliga solceller och solvärme.

Det tittas också på hur mycket el man behöver köpa utifrån för att täcka värmebehovet då man använder så många kvadratmeter solhybrid så att elbehovet täcks.

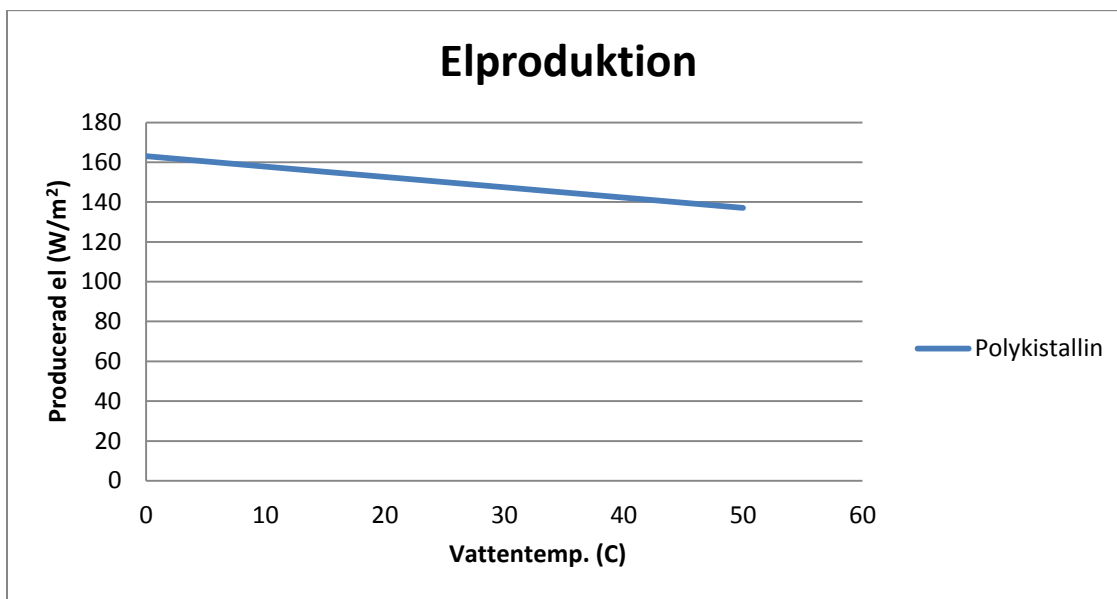
Det togs dessutom bilder med värmekamera vid försöksuppställningarna i Öjaby och Lenhovda för att kunna se hur temperaturen varierar över solhybriden.

## 5. Resultat och analys

Här kommer både teoretiska resultat från beräkningsmodellen och verkliga mätvärden redovisas.

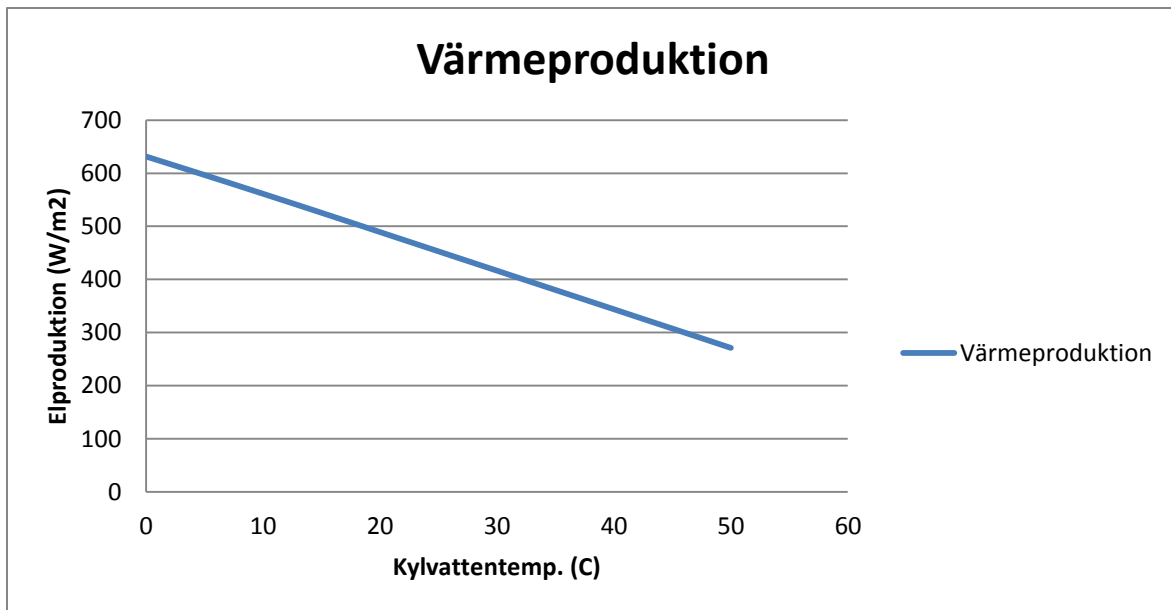
### 5.1 Teoretiska resultat

För att jämföra de uppmätta värdena gjordes graf med hjälp av beräkningsmodellen som visar hur el- och värmeproduktionen ändras med temperaturen på kylarvattnet och U- värdet på absorbatoren. För att beräkna elproduktionen användes referensverkningsgraden och temperaturberoendet för en polykristallin cell från tabell 1 och en konstant solinstrålning en solig dag klockan 12 vid midsommar. Diagrammet som visar hur elproduktionen ändras kan ses i figur 24.



Figur 24. Den använda solcellens elproduktion beroende av temperaturen på kylarvattnet.

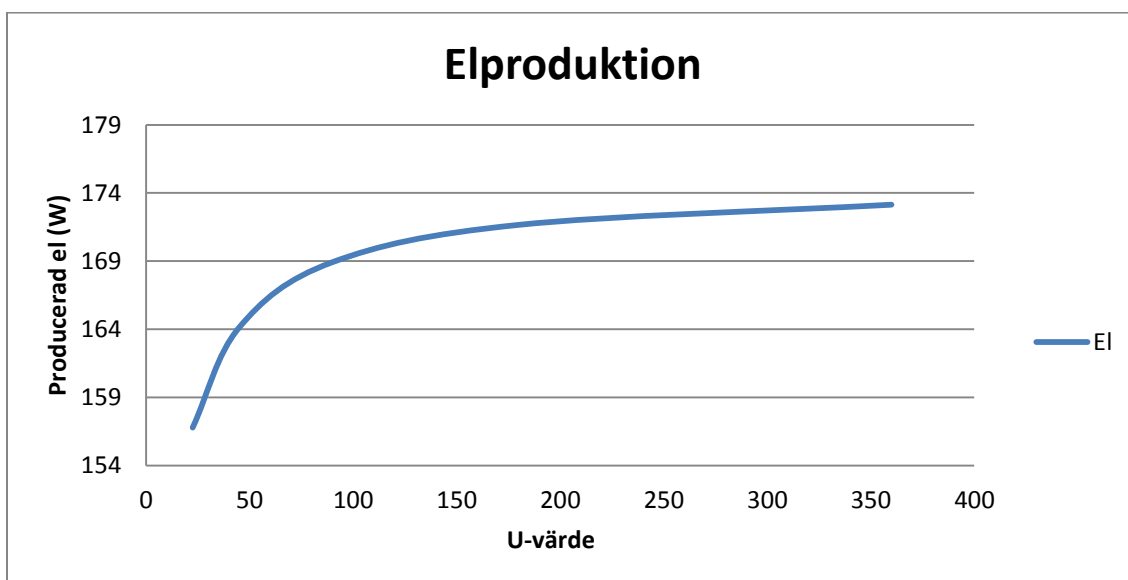
Temperaturen på har ökats med hjälp att minska på flödet av vattnet och därmed minskat uttaget av värme. Andra parametrar har satts konstant och kan ses i bilaga 2.



Figur 25

Enligt figur () och () produceras mer el och värme ju kallare kylarvatten man använder. Detta stämmer men man måste även ta hänsyn till kvaliteten på energin. Det är svårare att använda kallt vatten till värme även om man har kört in mycket energi i det.

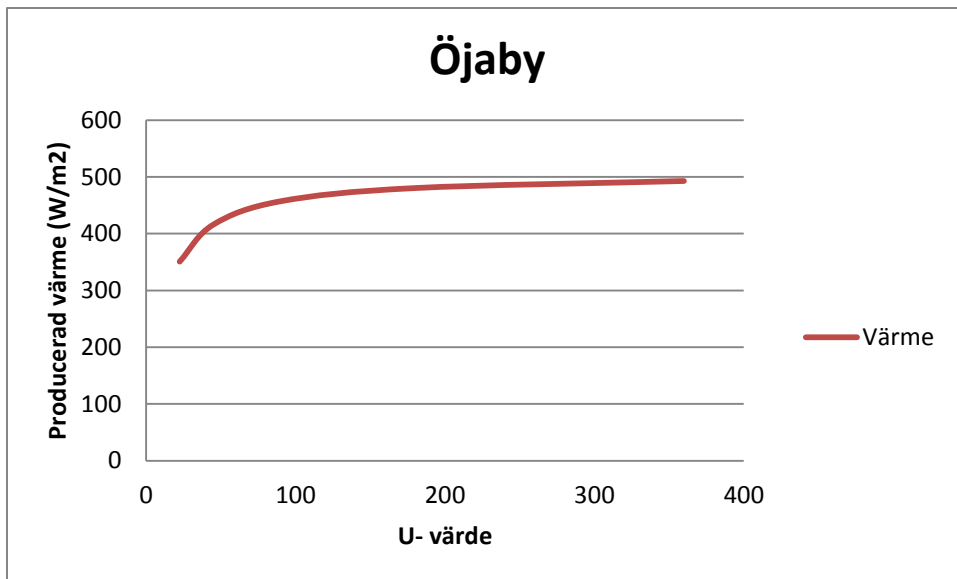
För att visa hur utformningen på absorbatoren under solhybriden spelar in på elproduktionen har en graf som visar vilken elproduktion solhybriden har vid olika U-värden på absorbatoren. Detta kan ses i figur 25.



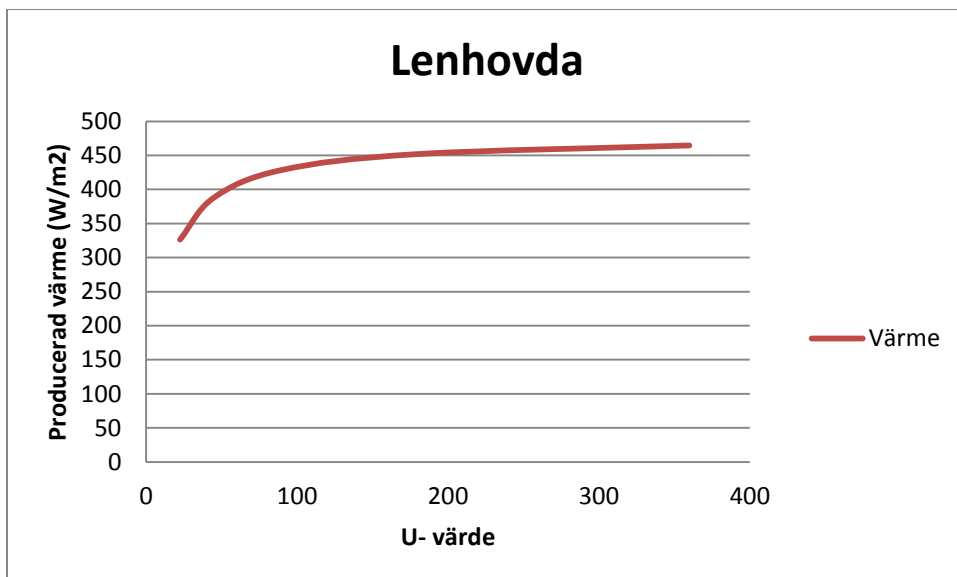
Figur 26. En polykristallin solhybrids elproduktion beroende på U-värdet på absorbatoren

Om absorbatoren har ett högre U-värde betyder det att den leder värmen från solcellen bättre vilket i sin tur ger en bättre elverkningsgrad för solcellen, detta kan ses i figur ().

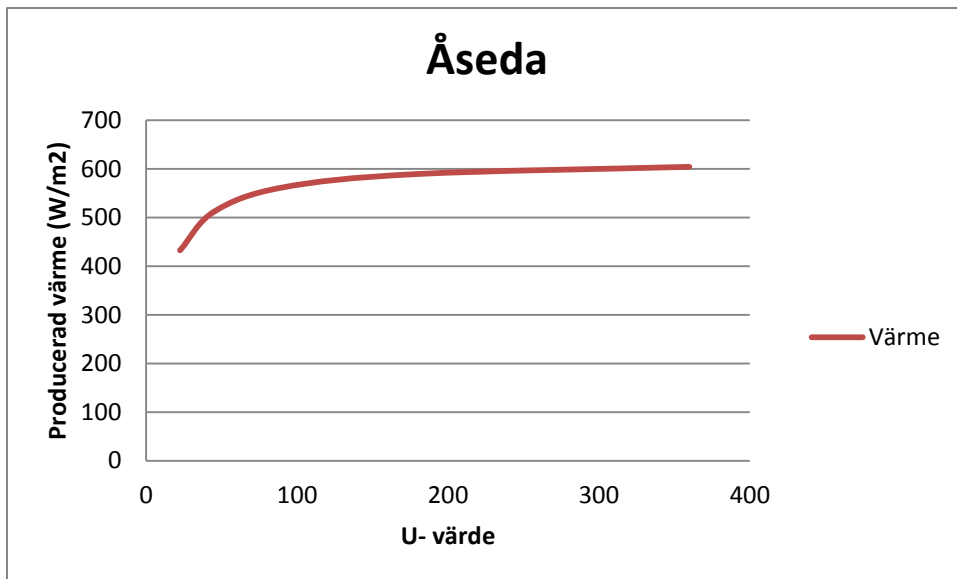
För att kunna beräkna U-värdet för de olika anläggningarna har grafer med den teoretiskt producerade värmen för de olika anläggningarna mot ett varierande U-värde gjorts. Detta kan ses i figur ()- ().



Figur 27 Teoretiskt producerade värmen mot ett varierande U- värde i Öjaby



Figur 28. Teoretiskt producerade värmen mot ett varierande U- värde i Lenhovda



Figur 29. Teoretiskt producerade värmen mot ett varierande U- värde i Åseda

## 5.2 Verkliga resultat

Resultaten från mätningarna vid de olika försöksuppställningarna i Öjaby, Lenhovda och Åseda togs enligt beskrivningen i kapitel 4 och redovisas i kapitel 5.1 5.2 och 5.3. Bilder med värmekamera togs också i Öjaby och Lenhovda och visas i kapitel 5.1 och 5.2. Bilder från Åseda kunde tyvärr inte tas då mätningarna skedde vid samma tidpunkt men på olika ställen och endast en värmekamera fanns att tillgå.

### 5.2.1 Öjaby

Mätresultaten från Öjaby redovisas i tabell 2 nedan.

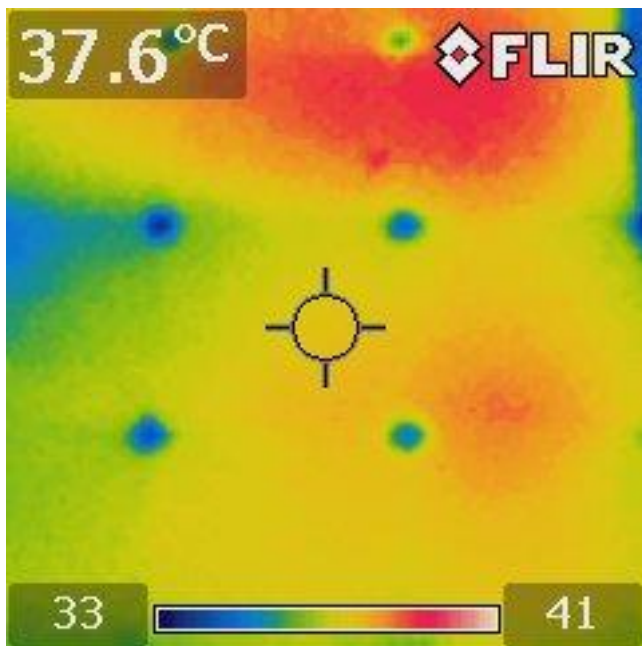
Tabell 2. Mätresultat från Öjaby

Flöde (l/h)	61	211	220	270	382	495	596	701	787	852
$T_{medel}$ (°C)	19	18,95	18,25	17,45	16,95	16,55	16,7	16,15	16,1	15,2
$P_{el}$ (W)	1383	1398	1412	1416	1434	1446	1589	1572	1554	1700
$P_{värme}$ (W)	1051	3610	3457	3740	5024	6049	7630	8077	8793	8924,

Tabell 2 visar totalproduktionen för hela anläggningen på  $12,8 \text{ m}^2$ . Snittproduktionen av värme blir enligt dessa resultat  $440 \text{ W/m}^2$ . Detta värde kan användas för att läsa av U- värdet i figur 27. U- värdet är här ungefär 90.

Med hjälp av detta U- värde har energiproduktionen för en dag på året räknats ut, i detta fall 21 maj. Denna dag producerar solhybriden  $1,2 \text{ kWh/m}^2$  el och  $4,95 \text{ kWh/m}^2$  värme.

Bild med värmekamera togs på framsidan av solcellerna i Öjaby, detta kan ses i figur 26. Bilder på baksidan kunde inte tas här då solhybriderna är monterade direkt på taket.



Figur 30. Bild med värmekamera på framsidan av solhybriden

### 5.2.2 Lenhovda

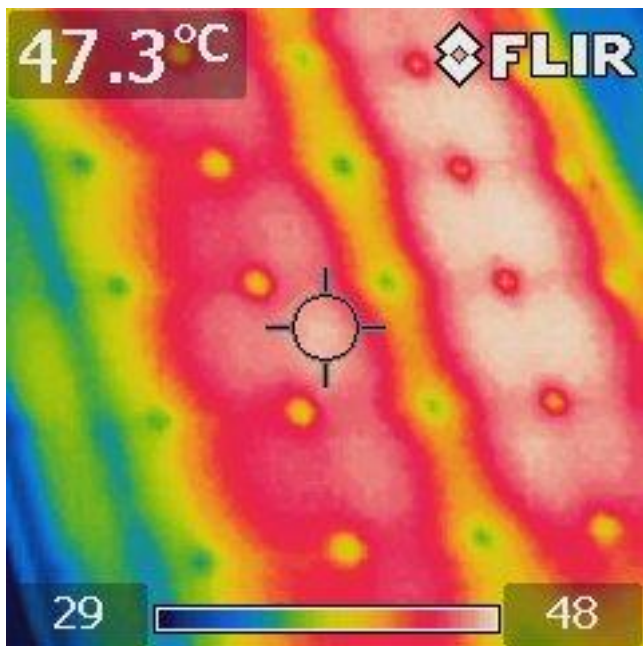
Mätresultaten från Lenhovda redovisas i tabell 3 nedan.

Tabell 3. Mätresultat från Lenhovda

Flöde (l/h)	30	84	137	191	244	298	352	405	459	512	566
$T_{medel}$ (°C)	30,95	32,05	32,65	32,2	32,35	32,05	31,5	31,1	31,4	31,25	30,05
$P_{el}$ (W)	1848	1804	1749	1823	1810	1788	1767	1786	1818	1930	1847
$P_{värme}$ (W)	248	788	1230	1643	2020	2185	2537	2924	2777	2087	2174

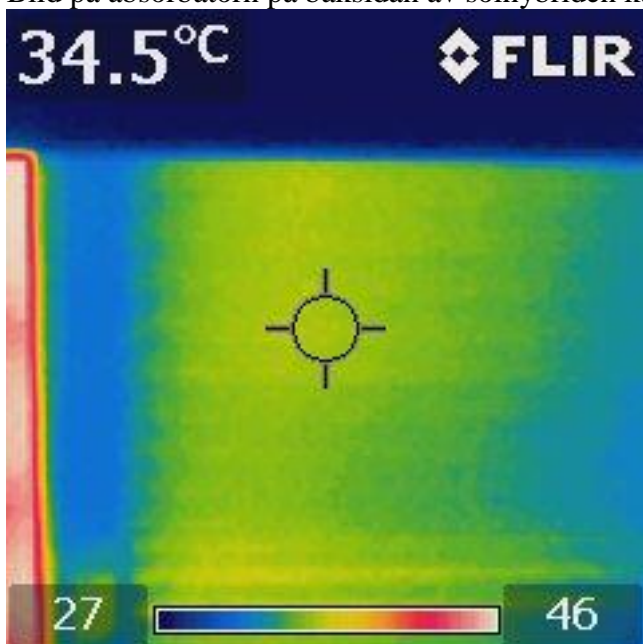
Tabell 3 visar totalproduktionen för hela anläggningen på  $12,8 \text{ m}^2$ . Snittproduktionen av värme blir enligt dessa resultat  $146 \text{ W/m}^2$ . Detta värde kan användas för att läsa av U- värdet i figur 28. U- värdet ligger här under det definierade intervallet.

Bild med värmekamera togs på framsidan av solhybriden på solcellerna togs och kan ses i figur 27.



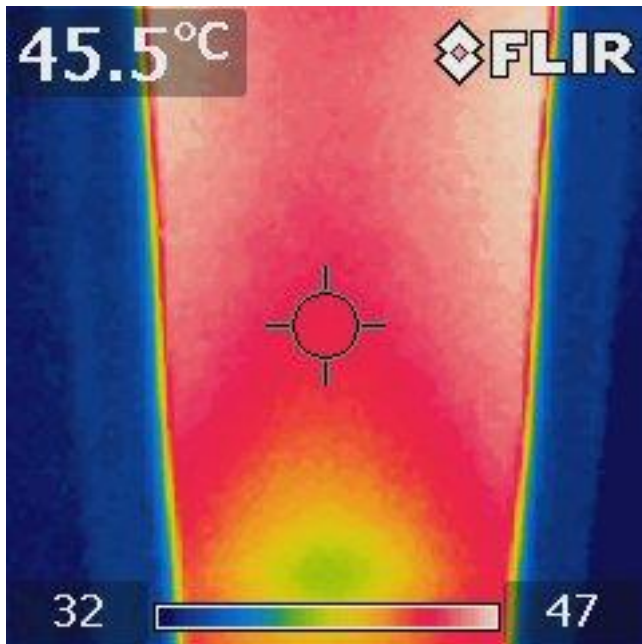
Figur 31. Bild med värmekamera på framsidan av solhybriden

Bild på absorbatoren på baksidan av solhybriden kan ses i figur 31.



Figur 32. Bild med värmekamera på absorbatoren på baksidan av solhybriden

Bild på baksidan av solhybriden bredvid absorbatoren kan ses i figur 32.



Figur 33. Bild med värmekamera på baksidan av solhybriden bredvid absorbatoren

### 5.2.3 Åseda

Mätresultaten från Åseda kan ses i tabell 4 nedan

Tabell 4. Mätresultat från Åseda

Flöde (l/h)	445	449	461	465	477	483	497	542	571
$T_{medel}$ (°C)	13,1	13,1	13,0	12,9	12,8	12,8	12,7	12,4	12,3
$P_{el}$ (W)	1835	1837	1842	1850	1857	1903	1845	1847	1859
$P_{värme}$ (W)	4247	4233	4239	4167	4164	4216	4281	4542	4586

Tabell 3 visar totalproduktionen för hela anläggningen på  $12,8 \text{ m}^2$ . Snittproduktionen av värme blir enligt dessa resultat  $336 \text{ W/m}^2$ . Detta värde kan användas för att läsa av U- värdet i figur 29. U- värdet ligger här utanför det definierade intervallet.

### 5.3 Energibehov för en godtycklig byggnad

Vid uppskattning av hur mycket el och värme en byggnad behöver per dag används snittbehovet för villan där testanläggningen i Öjaby är uppsatt. Villan är byggd 1984 och har en yta på  $250 \text{ m}^2$ . Där är energibehovet  $31\,500 \text{ kWh}$  per år, varav 78 % används till uppvärmning med en värmepump som har värmefaktorn 3, detta kan ses i bilaga 3. Det ger ett snittbehov för elen på  $18,99 \text{ kWh/dag}$  och ett värmebehov på  $202 \text{ kWh/dag}$ .

### 5.4 Energiproduktion för okylda solceller och solvärme

För att jämföra solhybriderna har värden beräknats på hur mycket el vanliga okylda solceller producerar med hjälp av beräkningsprogrammet och erfarenhetsvärden från vattenfall på hur mycket värme solvärmepaneler producerar. Alla dessa värden har beräknats för samma förutsättningar som testanläggningen i Öjaby. Den producerade elen blir då  $0,99 \text{ kWh/m}^2$  och den producerade värmen blir  $5,5 \text{ kWh/m}^2$ .

### 5.5 Jämförelse mellan solhybrider och solceller och solvärme

För att se hur effektiva solhybriderna är jämförs hur många kvadratmeter solhybrid som behövs för att täcka elbehovet hos villan i Öjaby. Dessutom hur mycket extra värme som behöver köpas in vid denna solhybridsyta. Detta jämförs med hur många kvadratmeter okylda

solceller plus solvärme som behövs för att täcka värmebehovet för villan. Vid jämförelserna används solhybriden med platt aluminiumabsorbator på grund av att det är den bästa solhybriden av de som testats.

För att täcka värmebehovet och elbehovet med solceller och solvärme behövs  $36,7 \text{ m}^2$  solvärmefångare och  $19,2 \text{ m}^2$  okylda solceller. För att täcka elbehovet med solhybrider behövs  $15,8 \text{ m}^2$ , då produceras  $78 \text{ kWh}$  värme. Vilket ger ett värmeunderskott på  $124 \text{ kWh}$  vilket kan täckas med hjälp av  $22,5 \text{ m}^2$  solvärmefångare.

## 6. Diskussion och slutsatser

Jämförelser på solhybriderna har genomförts på tre olika platser vilket har medfört olika mätfel gällande väder och tidpunkt de olika mätvärden tagits. Dessa platser har valts på grund av att de företag som är med i projektet har sina företag här och de har system där solhybriderna bara kan kopplas in.

På grund av förseningar med olika installationer av solhybriderna kunde mätningarna påbörjas först 4 veckor efter utsatt tid. Detta medförde att det bara gavs en chans för mätningarna och utfördes under icke optimala förutsättningar gällande väderlek. Mätvärden togs när solen var framme men på grund av variationer i solinstrålning blir dessa värden inte speciellt tillförlitliga.

De systemen som ligger i Öjaby och Lenhovda ser likadana ut på så sätt att de kan utnyttja sina system till tappvarmvatten, systemet i Åseda ser annorlunda ut på så sätt att de inte kan utnyttja solhybriderna för tappvattenproduktion. Åseda och Öjabys stationer möjliggör då ett säsonsberoende styrsystem där man på sommaren kan köra så mycket producerad varmvatten som möjligt till tappvatten men då det blir kallare ute och uppvärmningsbehovet av villan blir större, kan man köra systemet så att man värmer upp bergvärmehålet så mycket som möjligt. Ett system som bara kör tappvatten på sommaren skulle enligt figur 15, kapitel 3, innebära mindre elåtgång, dels på grund av att värmepumpen inte behöver köras och på grund av att det går åt färre cirkulationspumpar till systemet.

På grund av att Lenhovda radiatorfabrik använder sitt vatten från borrhålet till kylning av processmaskiner ger det en högre temperatur in till solhybriderna än i Öjaby eller Åseda. En temperatur in på ca 20 °C innebär att det måste vara mer än 20 °C ute eller att solstrålning är så pass stor så att denna kan öka temperaturen. Dessa solhybrider är heller inte isolerade alls på baksidan vilket medför förluster alla gånger utetemperaturen är mindre än vattentemperaturen i absorbatoren. Absorbatoren består dessutom av en vanlig ståladiator som inte ligger plant mot baksidan på solcellerna. Detta gör att det finns luft mellan solcellerna och absorbatoren vilket gör att värmeledningsförmågan minskar i och med att luften fungerar som en isolator. Det kan ses i figur () som visar bild med värmekameran på framsidan och baksidan av solhybriden att det är väldigt stor skillnad i temperatur vilket indikerar på en dålig värmeledningsförmåga på absorbatoren.

Med hjälp av värmekamera kan man se att inte hela solcellsytan kyls ned med hjälp av absorbatoren. Detta kan bero på att rören i absorbatoren har ett mellanrum på ca 100 mm i Lenhovda och Öjaby. På grund av att det inte fanns tillräckligt med tid till uträkning för hur stor yta som rören täckte så antogs att 80 % av solcellen kyls ned.

Stationen i Åseda hade ett egenflöde på 0,125 l/s och de andra stationerna hade ett försumbart egenflöde vilket också medförde problem vid jämförelserna av producerad värme.

Stationen i Öjaby har en lutning på 27° på solpanelerna och de andra stationerna har 45°. Detta gör att jämförelserna mellan de olika solhybriderna inte blir exakta. På denna stationen finns det en skorsten som skuggar panelerna ca kl 15:30 och det hann bli lite skugga över en av panelerna vid de sista två mätningarna.

I och med de dåliga förhållanden gällande väder och lokalisering fick vi mätvärden som inte stämmer överens med varandras U-värden. Med hjälp av en jämförelse på hur

värmeproduktionen ändrar sig med olika  $U$ - värden har en jämförelse med mätresultaten stått till grund för vilket  $U$ -värde som gäller vid de olika stationerna.

I detta arbete har endast den totalt producerade värmen jämförts utan hänsyn till kvaliteten på värmen. Detta är på grund av att alla mätningar gjorts mot uppvärmning av borrhålet. För att jämföra om värmen skulle användas som tappvatten skulle ytterligare beräkningar behövas.

I resultatet kan man se att stationen i Öjaby är bäst då den producerar mest el och värme med samma förhållanden som de andra stationerna. Denna station har en lutning på  $27^\circ$  på panelen vilket innebär mindre solinstrålning än de andra två. Att denna solhybrid får bättre resultat är på grund av att den har ett lägre  $U$ -värde mellan kylning och solcell och lite förluster.

För att Åseda och Lenhovdas solhybrider ska kunna leverera större effekt så måste absorbatoren i Lenhovda utgöra en större yta i förhållande till solcellspanel. Detta genom att använda en absorbatör som ligger rätt emot solcellen. De måste också isoleras på baksidan och för att de ska kunna producera värme fler timmar från solen så måste in-temperaturen sänkas en del. I Åseda har man ett egenflöde i vattnet som är stort i jämförelse med de andra stationerna, man skulle antagligen kunna sänka det för större värmeupptagning. En tätare rördragning i absorbatoren skulle förmodligen öka värmeupptagningen också.

## 7. Referenser

Aulin, R. (2012) Risk in nanoproductions, *Byggproduktionsteknik på LTH*

Baranzahi A. 2013. Solcellsfakta, *Solarlab Sweden*. Hämtad 2014-04-22  
<http://solarlab.se/solpanel/solcell-fakta>

Becker, C., Amkreutz, D., Sontheimer, T., Preidel, V., Lockau, D., Haschke, J., Jogschies, L., Klimm, C., Merkel, J., Plocica, P., Steffens, S. & Rech, B. (2013). Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives, *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 119, pp. 112-123

Boyle, G. (2009). Power for a sustainable future, *Renewable Energy, Oxford*. pp. 71-75

Brenntag Nordic AB, (2010). Säkerhetsdatablad Svavelsyra. *Brenntag Nordic AB*. Hämtad: 2014-04-25. [http://www.batteridepan.se/upload/Svavelsyra\\_37.pdf](http://www.batteridepan.se/upload/Svavelsyra_37.pdf) s. 2

Dhere, N. (2011). Scale-up issues of CIGS thin film PV modules, *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 95, pp. 277-280

Dupeyrat, P., Menezo, C. & Furtoin, S. (2014). Study Of The Thermal And Electrical Performances Of PVT Solar Hot Water System. *Energy And Buildings*, 68, pp. 751-755

Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M., Ruslan, M., Ibrahim, A. & Kazem, H. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, *Energy Conversion & Management*, 78, pp. 641-651.

Gratzel, M. (2005). Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic Chemistry* 44, pp. 6841-6851

Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E. D. (2013), Solar cell efficiency tables (version 42). *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 21: pp. 827-837.

Kaminski, P. Lisco, F. & Walls, J. (2014), Multilayer Broadband Antireflective Coatings for More Efficient Thin Film CdTe Solar Cells, *IEEE Journal Of Photovoltaics*, 4, 1, pp. 452-465

Karlsson, B. (2014). Professor i energisystem vid Linköpings universitet. *Björn Karlsson debatt*. ss. 1-3.

Kloo, L. (2011). Michael Grätzel- Förnyare av förnybar energiproduktion, *KTH*. Hämtad 2014-04-12: <http://www.kth.se/che/kemi2011/2.27954/kemmar-1.82389>

National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of commerce, Earth System Research Laboratory.  
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>

PV- Education, hämtad: 2014-04-25  
<http://pveducation.org/pvedrom/design/surface-texturing>

Razykov, T., Ferekides, C., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. & Upadhyaya, H. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar Energy*, 85, 8, pp. 1580- 1608

Roy, M., Deol, Y., Kumar, M., Prasad, N. & Janu, Y. (2011). Dye-sensitized Solar Cells for Solar Energy Harvesting, *AIP Conference Proceedings*, 1391, 1, pp. 46-49

Skoplaki, E & Palyvos, J. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, 83, 5, pp. 614-624

SP (2014). Förteckning över solfångare på svenska marknaden certifierade med Solar Keymark samt beräknade årliga energiutbyten.

[http://sp.se/sv/units/energy/Documents/ETk/Forteckning\\_P-markta\\_och\\_ovriga\\_solfangare.pdf](http://sp.se/sv/units/energy/Documents/ETk/Forteckning_P-markta_och_ovriga_solfangare.pdf)

Sukhatme, S., Nayak, J. (2008). Solar Energy Principles of Solar Thermal Collection and Storage. *Tata McGraw- Hill Publishing Company Limited* .pp. 101

Potočník, J. & Pielbalgs, A. (2009). Photovoltaic Solar Energy Development and current research, *Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union*, P.5.

Vattenfall, hämtad 2014-05-22

[http://www2.vattenfall.se/miniapps/om\\_vattenfall/Energikunskap/energilexikon/mainresult.asp?ItemID=1359](http://www2.vattenfall.se/miniapps/om_vattenfall/Energikunskap/energilexikon/mainresult.asp?ItemID=1359)

Zethräus, B. Professor vid Institutionen för bygg- och energiteknik, Linnéuniversitetet Växjö. Utbildning genom kursen Uthållig energiförsörjning, Linnéuniversitetet. Maj 2011.

Zondag, H. (2008). Flat-plate PV-thermal collectors and systems: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, 4, pp. 891-959

Bild:

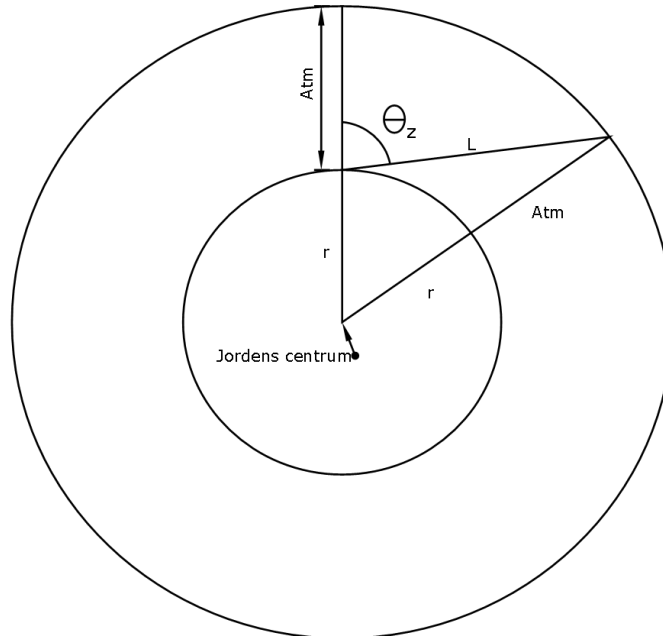
Gajbert. H. 2002, Koncentrerande solenergihybrider för byggnadsintegrering, LTH

Residential solar, Hämtad 2014-04-23

<http://www.residentialsolar101.org/thin-film-solar-technology/>

## 8. Bilagor

### Bilaga 1



För att beräkna  $l$  har triangeln ABC använts i cosinussatsen.

$$(r + \text{atm})^2 = r^2 + l^2 - 2 * r * l * \cos(180 - \theta_z)$$

Med förenkling med hjälp av pq- formeln fås nedanstående uttryck.

$$l = r * \cos(180 - \theta_z) + \sqrt{(r * \cos(180 - \theta_z))^2 + 2 * r * \text{atm} + \text{atm}^2}$$

## Bilaga 2

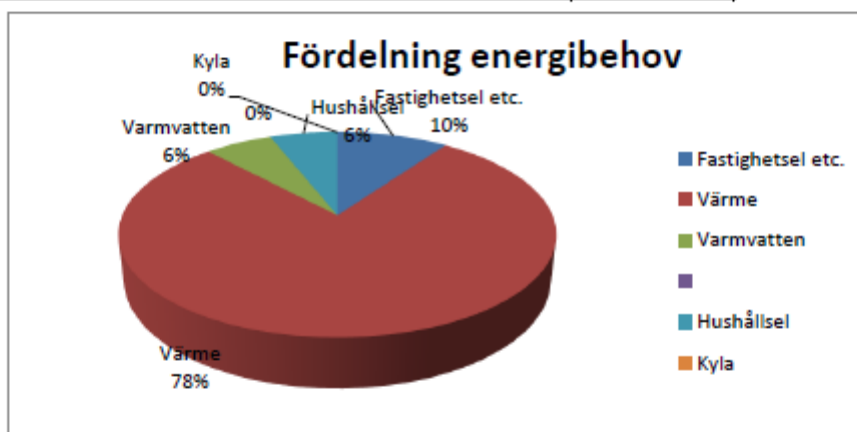
Indata	
Dag i	171
Timme	12
Minut	0
Vinkel på panel	45
Absorberat	0,3
Longitud°	14,7746
Latitud°	56,8792
Tidszon	1
$\rho$ abs glas	0,04
$\lambda$ glas	0,9
$\delta$ glas	0,0032
Tomg	293,15
Aceller	1,63
Atot	1,65
$\eta_{ref}$	-
$\beta_{ref}$	-
Tref	298,15
$\lambda_{under}$	0,9
$\delta_{under}$	0,01
Tvatten	-
$\epsilon_{cell}$	0,9
Amellan	0,01
$\lambda_{stål}$	59
$\delta_{Absorbator}$	0,00118
Aabsorbator	1,6
$\alpha$ glas-luft	5

## EnergiRevisor

### Rapport: Energistatus före och efter åtgärder

#### Nuvarande energibehov

Uppvärmning (ej graddagskorrigerat)	30 199 kWh
Uppvärmning (graddagskorrigerat)	31 175 kWh
Varmvatten	2 997 kWh
Kyla	
Fastighetsel samt el till frånluftsvärmepump	0 kWh
Hushållsel	3 000 kWh
<b>Nuvarande energibehov graddagskorrigerat</b>	<b>37 172 kWh</b>
<b>Normalt energibehov</b>	<b>31 567 kWh</b>



Nuvarande energibehov är 5 605 kWh högre än normalt energibehov.

