

CHALMERS



World Solar Challenge

Optimering av solceller

Farokh Aghajanzpour
Patrik Björnsson
Åsa Holmberg
Johan Jonsson
Karl Skötte
Niklas Öberg

Institutionen för Produkt- och Produktutveckling
CHALMERS
Göteborg, Sverige 2013
Kandidatarbete: PPUX03-13-10

Förord

Denna rapport har tillkommit som resultat av ett kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Maskinteknik på Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Vi i projektgruppen vill framföra ett tack till alla engagerade under sammanställningen av arbetet. Vi vill rikta ett särskilt tack till Amir Baranzahi, JU Solar Team, Bengt Kasemo, Henrik Pettersson, Ragnar Larusson, Anders Hellman samt Maria Grahn för deras samarbete och stöd.

Vi vill också tacka Göran Gustafsson, vår handledare på institutionen för produktutveckling, som under arbetets gång har bistått med råd och vägledning.

Sammanfattning

Detta kandidatarbete syftar till att genomföra en kvalificerad studie, med World Solar Challenge(WSC) i beaktning, av placering och styrning av solceller samt val av lämpliga solcellstyper. WSC är en tävling för solcellsdrivna bilar som hålls vartannat år i Australien. Bilarna kör under sju dagar en 3000 kilometer lång sträcka med start i Darwin och mål i Adelaide.

Studien undersöker vilka solceller som är bäst lämpade för uppgiften; om det är nödvändigt att styra cellerna för att behålla en god infallsvinkel mot solen samt hur solcellerna skall placeras för en optimerad ljusupptagning. Solcellerna som behandlas under rapporten är kiselceller, Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) samt tandemceller, mer kända som multijunctionceller. Den eventuella effektvinsten har även undersökts i form av styrning av cellerna kontra aerodynamiska energiförluster i form av luftmotstånd.

De studieformer som har tillämpats vid projektets gång är intervjuer av forskare och experter inom berörda områden, studiebesök hos andra tävlande, litteraturstudier samt utförlig undersökning av tidigare tävlingsbilar. Kompletterande beräkningar har även genomförts för att kunna ta beslut av styrningens eventuella fördelar samt bedömning gällande optimal placering av solcellerna.

Resultatet av de genomförda studierna har lett till slutsatserna att kiselcellerna är de bäst lämpade solcellerna för bilen idag. Att fritt försöka styra solcellerna är ej fördelaktig då den aerodynamiska förlusten blir större än den eventuella effektvinsten. Dock kan styrningen möjligtvis ske under ett aerodynamiskt utformat skal så att cellerna ej påverkar luftströmningen kring karossen. Det är även svårt att ge ett slutgiltigt konkret förslag på optimal placering och styrning då det kräver en mer utförlig modell av den tänkta tävlingsbilens utformning. Rekommendationer till det slutgiltiga WSC-projektet är också att hålla en fortsatt bevakning på utveckling för DSSC då studierna tyder på att dessa kan bli väldigt intressanta inom en inte allt för avlägsen framtid. Alternativet att helt använda sig av DSSC till en konceptbil skulle kunna bli en stark kandidat i kategorin Evolution Class i WSC.

Abstract

This bachelor's thesis intend to execute a qualified study, with regards to the World Solar Challenge (WSC), of the placement and steering of solar cells and deciding the most suited choice of cells for this purpose. WSC is a competition for solar-powered cars which is held every two years in Australia. During the seven days of the race the solar-powered cars are supposed to travel a 3,000 km distance between Darwin and Adelaide in as short time as possible.

The study examines the solar cells that are best suited for the task, if it is necessary to steer the cells during the race to keep a good angle towards the sun and how the solar panels should be positioned on the race car for the most efficient light absorption. The solar cells investigated within this report are silicon cells, Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) and the so-called tandem cells, known as multi-junction cells. The possible efficiency profit has also been studied in terms of steering of the cells versus aerodynamic losses of energy in the form of increased wind resistance.

The different techniques that have been applied within the project, to gain relevant knowledge, are interviews of scientists and experts in related fields, literature studies and extensive research of earlier participating race cars. Calculations were also carried out in order to help make decisions considering potential advantages with implementation of solar cell steering and deciding the optimal placement of the panels on the car.

The results of the studies conducted have led to the conclusion that silicon cells are the most suitable solar cells for the car today. Freely trying to steer the solar cells is not advantageous as the aerodynamic loss becomes greater than the gained energy. However, the steering can possibly occur under an aerodynamically designed shell so that the cells do not affect the flow around the body. It is also difficult to give a definitive proposal on the optimal placement and steering of the cells because it requires a more detailed model of the intended race car design. Recommendations to the final WSC project is to keep a continued monitoring of the development of DSSC because the performed studies suggest that these could, in a near future, be of great interest. The option to fully use DSSC to a concept car could be a strong candidate in the evolution class category in the WSC.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning.....	2
Abstract	3
Innehållsförteckning.....	4
1. Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Solcellsteknik	1
1.1.2 World Solar Challenge	3
1.1.3 WSC - En ständig utmaning	4
1.1.4 Chalmers - WSC	5
1.1.5 Tidigare tävlingsbilar	6
1.1.6 Intressanta solceller	6
1.2 Syfte.....	7
1.2.1 Kategorisering.....	7
1.2.2 Placering av solceller	8
1.3 Avgränsningar	8
2 Solceller	9
2.1 Kiselbaserade solceller	9
2.2 Multijunction photovoltaic cell	11
2.3 DSSC.....	13
2.4 Förluster	14
2.5 Tidigare tävlande.....	15
2.5.1 Aurora.....	15
2.5.2 Tokai University.....	16
2.5.3 University of Michigan.....	16
2.5.4 TU Delft.....	17

3 Styrning och placering	18
3.1 Vinkel	18
3.2 Ljusintensitet	19
3.3 Fokusering av solljus.....	21
3.4 Skuggning	22
3.5 Luftmotstånd	23
3.6 Fordonsförluster.....	26
4. Metod	28
4.1 Litteraturstudie.....	28
4.1.1 Datainsamlingsfas.....	28
4.1.2 Analysfas.....	28
4.1.3 Skrivarfas	29
4.2 Intervjustudie	29
4.2.1 Intervjuer	29
4.2.1.1 Frågor om olika typer av solceller:	29
4.2.1.2 Frågor om hur vinkeln till solcellen påverkar effekten:	30
4.2.1.3 Frågor om luftmotståndet:.....	30
4.3 Efterforskning	31
4.3.1 WSC	31
4.3.1.1 Tävlings förändringar.....	31
4.3.1.2 Tidigare Bilar.....	31
5. Resultat.....	32
5.1 Resultat solceller	32
5.1.1 Verkningsgrad.....	32
5.1.2 Ekonomi.....	32
5.1.3 Miljö.....	33
5.1.4 Vikt.....	34
5.1.5 Rekommenderad val	34

5.2 Resultat placering och styrning	34
6. Diskussion	36
6.1 Diskussion om metodval	36
6.2 Diskussion studiens begränsningar	37
6.3 Miljö.....	38
6.4 Kiselcellernas dominans	39
6.5 Solcellsteknik för stationära system.....	39
6.6 Hur arbetet kunnat förbättrats	40
6.7 Rekommendationer för fortsatt arbete	41
7. Slutsats	42
8. Referenser	44
9. Bilagor.....	47
9.1 Bilaga A	47
9.2 Bilaga B	48
.....	48

1. Introduktion

På uppdrag från institutionen för Produkt-och produktutveckling vid Chalmers tekniska högskola har detta kandidatarbete framtagits för att undersöka implementering av solceller på en solcellsdriven tävlingsbil. Olika typer av solceller studeras samt möjligheter till placering och styrning av cellerna på bilen. Rapporten skall verka som ett underlag till högskolans planerade deltagande i tävlingar för solcellsdrivna bilar, med huvudfokus på World Solar Challenge (WSC) i Australien.

1.1 Bakgrund

Nio av tio resor i vårt land sker på vägar, liksom hälften av alla godstransporter¹. Nästan sex miljarder liter bensin och fyra miljarder liter diesel förbrukas i Sverige varje år¹. Det innebär stora utsläpp av växthusgasen koldioxid och andra hälso- och miljövådliga ämnen (t ex kolväten, partiklar och kväveoxider). Totalt släpper vägtrafiken varje år ut cirka 17 miljoner ton koldioxid, vilket motsvarar ungefär en fjärdedel av Sveriges totala koldioxidutsläpp från fossila bränslen¹. Koldioxiden från bilarnas avgaser bidrar till den ökande växthuseffekten. Om halten av koldioxid fördubblas kan jordens medeltemperatur öka med 1-4,5 grader under det kommande seklet, bedömer FN:s klimatpanel, IPCC¹. På grund av den annalkande koldioxidproblematiken har efterfrågan på hållbara och förnyelsebara energikällor ökat markant. Ett av det mest aktuella och alternativa områden som idag studeras är solcellsteknik som, med tillgång till solljus, kan alstra elektrisk energi utan någon förbränning med koldioxid som restprodukt.

1.1.1 Solcellsteknik

Den mest anmärkningsvärda egenskapen för solceller är dess förmåga att omvandla solenergi till direkt användbar energi. Solceller är ett samlingsnamn för den teknik, där en enhet nästan bestående av enbart ett fast material eller molekyler bundna till ett fast material fångar fotoner i solljuset och omvandlar energin till elektrisk ström och spänning. Denna teknik möjliggör direkt omvandling av solenergi till elektrisk energi utan konvertering mellan olika mellanformer av energi så som till exempel brännbara bränslen. Solceller klassificeras idag i olika generationer, ett begrepp som myntades av australiensaren Martin Green och delas upp i²:

- **Första generationen-** Monokristallina kiselceller

¹ (http://www.hsr.se/VKJG_bilen_och_miljon, 2013)

² (Bengt Ridell, 2011)

- **Andra generationen**- Låg kostnad och låg effekt. Tunnfilmceller såsom CdS (kadmiumselenid), CdTe (kadmiumtellurid), a-Si (amorft kisel), CIGS (koppar, indium, gallium, selenid) och tunn multikristallina kiselceller
- **Tredje generationen** - Låg kostnad och hög effek

Idag finns det ej några alternativ som helt uppfyller tredje generationens krav men dessa solceller kommer, enligt Greens definition, ha betydligt högre verkningsgrad, 30-40%¹. Sådana celler kan utvecklas från flera olika tekniker. De kan baseras på nuvarande ledande typer av celler kiselceller eller tunnfilmceller med kompletterande teknik, teknik som bidrar till ökad effektivitet, liksom plasmoniska- eller nanotråd-förbättrade solceller¹. De kan även hittas bland framväxande typer av solceller som DSSC alternativt vara baserade på så kallade tandemceller, även kallade multijunction-celler¹. Dessa utnyttjar två typer av solceller staplade ovanpå varandra för att samla in ett större spektrum av solens ljus¹.

De konventionella solcellerna baseras främst, i enkla drag, på ett så kallat halvledarmaterial som utnyttjar ett elektroniskt bandgap. Ett halvledarmaterial besitter egenskapen att den kan fungera som både isolator och ledare. För att en halvledare skall kunna leda elektricitet krävs tillförseln av tillräckligt med energi för att excitera elektronerna i atomens yttre skal så kallade valenselektroner. Bandgap är måttet på den energi som måste tillföras för att excitera valenselektronen i halvledarmaterialet. Mekanismen i solcellen bygger på den princip där fotonen, som träffar halvledaren, från solljuset har en tillräckligt hög rörelseenergi för att excitera en valenselektron och skapa en elektrisk ström. För att skapa en elektrisk ström krävs det kompletterande elektriska komponenter som kan leda elektronen dit den skall nyttjas. Det krävs även elektroner som ersätter den exciterade valenselektronen, något som löses genom att komplettera halvledarmaterialet med till exempel dopning² (se kiselceller avsnitt 2.1) eller en elektrolyt³ (se DSSC avsnitt 2.3).

Idag finns det flera olika projekt som arbetar med att aktivt ge upphov till utveckling och investering inom solcellstekniska områden. Ett av dessa projekt är World Solar Challenge⁴.

¹ (Bengt Ridell, 2011)

² (Mauk, 2003)

³ (<http://www.g24i.com/pages>)

⁴ (<http://exeger.com/dye-sensitized-solar-cells>, 2013)

1.1.2 World Solar Challenge

Hans Tholstrup var en dansk äventyrare som redan på 1980-talet insåg nödvändigheten av att undersöka hållbara energilösningar som substitut för fossila bränslen¹. Med petroleumbolaget BP som sponsor, konstruerade Hans Tholstrup världens första solcellsdrivna bil, kallad The Quiet Achiever¹. Med denna bil genomkorsade han 1983, en sträcka på 4000 kilometer mellan Sydney och Perth i Australien på 20 dagar¹. Detta var föregångaren till det som idag kallas för WSC där den första tävlingen arrangerades 1987 med 4 deltagande lag². WSC är en tävling för solcellsdrivna bilar, så kallade Electric Vehicles (EV:s) i Australien som hålls vartannat år och går av stapeln i oktober³. De tävlande ska under sju dagar, med endast solljus som energikälla, ta sig en sträcka på 3000 kilometer med start i Darwin till slutdestinationen Adelaide³. Bild 1 visar tävlingens sträcka.



Bild 1: Karta över Australien och tävlingens rutt

I 2013:s års tävling är 30 innovationsföretag och universitet anmälda där samtliga världsdelar är representerade⁴. Värt att nämna för 2013 års tävling är att det för första gången finns med ett svenskt lag i start-uppställningen då Jönköpings Universitet ställer upp med ett tävlingsbidrag⁴. Nytt för i år är även införandet av fyra olika tävlingsklasser som är⁵:

- **Challenger Class Solar EV:s** - Detta är en klass som primärt är designat för prestation snarare än för komfort. Bilen behöver endast bära en förare. Först till slutdestinationen i Adelaide är vinnare i denna klass.
- **Cruiser Class Solar EV:s** - Denna klass är främst designad för praktiska ändamål. Bilen behöver utöver föraren ha plats för minst en passagerare. Bedömningen görs på förbrukad energi, den totala körtiden för tävlingssträckan, totala nettolasten samt bilens praktiska egenskaper.
- **Adventure Class** - I denna klass kan nya lag delta med gamla bilar som inte uppfyller årets regelverk för Challenger Class. I övrigt gäller samma förutsättningar som för Challenger Class.

¹ (<http://www.nma.gov.au/collections-search/display?irn=37958>, 2013)

² (<http://www.docstoc.com/docs/29052420/The-WORLD-Solar-Challenge---The-Background>, 2013)

³ (http://www.worldsolarchallenge.org/about_wsc, 2013)

⁴ (<http://www.solarracing.org/2013/01/01/list-of-teams-participating-in-the-2013-world-solar-challenge/>, 2013)

⁵ (http://www.worldsolarchallenge.org/page/view_by_id/1, 2013)

- **Evolution Class** - Klassen är skapad för att visa upp nya fordon som modifierats, designats och utvecklats för att signifikant minska miljöpåverkan. Dessa bidrag kan vara rena koncept eller praktiska modeller som uppfyller kraven för individuellt byggda bilar men inte kraven för Solar EV:s. En teknisk kommitté bestämmer sedan bilens lämplighet för deltagande i klassen.

1.1.3 WSC - En ständig utmaning

För att få fram nya innovativa lösningar till framtida problem utmanas deltagande lag av ett ständigt föränderligt regelverk. Ett exempel på detta i 2013 års upplaga är att bilarna måste konstrueras med fyra hjul med en placering som ska likna dagens civila bilar, detta till skillnad från föregående tävlingar då kravet endast var tre hjul¹. En förändring som denna innebär rent fysiskt att bilarna får en ökad vikt, till följd av fler komponenter, samt att ett extra hjul innebär ökad markfriktion, något som belastar en redan hårt pressad resursfördelning. Inför 2011 års upplaga gjordes det stora förändringar då den tillåtna ytan av multijunctionceller halverades från sex kvadratmeter till tre kvadratmeter, genomsnittsytan för taket på dagens bilar, vilket bidrog till en avsevärt minskad energitillgång¹. Genom att begränsa den energigenererande ytan utmanas de deltagande att söka efter lösningar för att kunna kompensera för avsaknaden som uppstått till följd av minskad energitillförsel.

Förändringar som dessa är exempel på hur kontinuerliga förändringar i regelverket utmanar de tävlande lagen och driver dem mot nya mål, som tar tekniken ett steg närmare en hållbar framtid.

Förutom regelverket så finns det ett mer uppenbart problem, nämligen mängden solljus. Inte bara det att dagens EV:S saknar effekt och komfort, de fungerar också ineffektivt under molniga dagar och verkningslöst på nätterna¹. Även om deltagarna ej kör på natten, kan de ändå behöva handskas med molniga förhållanden. Detta dilemma har gett upphov till större exploatering av batteriets effektivitet för att få till en förbättrad effektlagring utan att fordonet ökar i vikt. Batterierna är ett problem, inte bara för EV:s utan även för de flesta mobila elektriska komponenter såsom bärbara datorer och mobiltelefoner. Bilbatteriernas egenskaper såsom vikt och livslängd är idag inte acceptabla utan kräver en markant förbättring för att få till en konkurrenskraftig och stabil lösning¹. Än större vikt läggs på att solcellerna optimeras för att kunna prestera maximalt under hela den tid som solen finns att tillgå, något som inte är helt självklart eller enkelt. Många olika faktorer så som till exempel typ av celler, vinkel mot solen, kylning och skuggning spelar stor roll för solcellens

¹ (http://www.worldsolarchallenge.org/about_wsc, 2013)

prestanda¹. Hur det på ett effektivt sätt tas hänsyn till dessa olika faktorer, utan att öka bilens vikt och negativt påverka bilens aerodynamik, är en ingenjörsmässig utmaning som kräver expertis och långvarig forskning och utveckling.

Dagens EV:s, som kör den 3000 km långa sträckan längs Stuart Highway, kanske känns långt ifrån de bekväma och rymliga bilar som står i garaget idag, dock kan det genom en fortsatt förbättring och utveckling, kanske inom en kort tid, bli en daglig syn att se dessa bilar susa förbi på vägar runtom i världen.

1.1.4 Chalmers - WSC

Chalmers har länge legat i framkant inom hållbar utveckling, något som idag är av yttersta vikt. Att delta i samhällsnyttiga sammanhang bidrar med möjligheten till vidareutveckling, fördjupad forskning samt exploatering av nya lösningar som senare kan komma att implementeras inom andra områden. Ett högaktuellt forskningsområde idag är just solljusenergi och dess utveckling. Universitet runt om i världen så som Chalmers måste finna projekt där ny teknik och forskning kan appliceras.

Mycket av tekniken finns men det gäller att förstå och finna vilken roll den skall spela i jakten på en hållbar framtid. Projekt så som WSC fungerar som en bro mellan forskningen och marknaden där ny teknik kan demonstreras för politiker och näringslivet. Ett forum så som WSC är nödvändigt för att visa vad som går att åstadkomma med dagens teknik och vilka alternativ till fossila bränslen som existerar.

Chalmers intresse för deltagande i WSC har funnits en längre tid. Det är däremot inte förrän nu ett aktivt arbete påbörjats för att förverkliga ett deltagande av 2015 års upplaga av WSC. Årligen deltar Chalmers i olika projekt, såsom Eco-marathon och Formula Student, tävlingar som handlar om effektiv resursfördelning och högpresterande tävlingsfordon. Eco-marathon är en tävling där det handlar om att, för en egenbyggd bil, få till den högsta möjliga bränsleeffektiviteten. Formula Student är en tävling för ingenjörstudenter där en "Formula 1 liknande" bil byggs. Bilarna tävlar mot andra liknande bilar i olika klasser. Formula Student ska inom en snar framtid gå ifrån konventionella förbränningsmotorer och istället använda sig av elmotorer. Skillnaden mellan Formula Student-bilen och WSC-bilen kommer då egentligen, bortsett från utseendet, endast vara hur el-energin genereras eller snarare hur batterierna som driver motorn laddas.

Denna förändring skapar en unik möjlighet för Chalmers att kombinera de tre olika projekten. Genom att samla dessa projekt under samma tak kan tidigare kunskap och expertis förvaltas på ett effektivt

¹ Bengt Kasemo, Professor på Chalmers, Institutionen för teknisk fysik, intervju 2013-02-27

sätt. Fokus kan då läggas på att koncentrera arbetet på att samla in ny kunskap och utveckling på solcellsområdet, ett område som idag är ständigt föränderligt och kräver kontinuerlig uppdatering och uppmärksamhet.

Förutsättningarna för ett lyckat deltagande i WSC 2015 är goda. Det som nu behövs kompletteras är den nog så viktiga biten om solceller. Det är egentligen den enda området som det saknas tidigare erfarenheter ifrån.

1.1.5 Tidigare tävlingsbilar

Sedan starten 1987 har bilarna utvecklats från väldigt extrema och unika lösningar till de mer strömlinjeformade och standardiserade som ses idag. Standardiseringen tycks vara som mest befast från tävlingen 2001 där förändringen istället fokuseras på tekniska lösningar och finess. Vid 2005 var bilarna så pass bra att de kunde överstiga hastighetsbegränsningar på de Australiensiska vägarna och tävlingsledningen valde då att skärpa reglerna och minska den tillåtna solcellsytan till sex kvadratmeter. Under alla dessa år hade valet av solcellstyp varit tämlig självklar bland de högpresterande tävlande då multijunctionceller potentiellt har en dubbelt så hög verkningsgrad som sina konkurrerande solceller. Detta ändrades dock när ett australiensiskt lag för första gången körde i mål med de betydligt mer miljövänliga kiselbaserade solcellerna, ledningen bestämde då att tävlande i fortsättningen (från 2011) inte fick köra med mer än tre kvadratmeter multijunctionceller, dock var restriktionen på sex kvadratmeter kvar för de kiselbaserade solcellerna. 2011 ställde alla bilar som gick i mål upp med kiselbaserade solceller.

Under tävlingens livstid har det varit ett flertal olika deltävlande, till en början var det mest olika bilorienterade företag som deltog, men med tidens gång har det blivit allt vanligare för universitet att leda bilutvecklingen med företag som sponsorer istället. De senaste tio åren är det specifikt fyra olika lag som utmärkt sig. Aurora från Australien, University of Michigan från USA, TU Delft från Nederländerna och Tokai University från Japan.

1.1.6 Intressanta solceller

Genom undersökningen av tidigare deltagande bilar i WSC och framförallt tidigare vinnare av WSC så är det tydligt vilka solceller som idag är populärast och med andra ord troligtvis också bäst lämpade. För första gången har det dock skett ett generationsskifte då, som tidigare konstaterat, alla bilar som gick i mål vid 2011 års upplaga använde sig av kiselbaserade solceller. Det var även första gången

som en bil med kiselceller segrade¹. Att undersöka kisel- och multijunctionceller som kandidater är av yttersta vikt för att skapa en förståelse för vad som ligger till grund för ett lyckat deltagande i WSC.

Utöver de ovannämnda alternativen har gruppen även valt att undersöka DSSC som är en solcell med intressanta tänkbara applikationsområden. Förutom dess fördelaktiga miljövänliga egenskaper så spås den ha god potential till att bli en högeffektiv solcell inom en snar framtid. Ytterligare en nämnvärd aspekt med dessa solceller är att det finns forskare på Chalmers med expertis inom området². I Göteborg finns även företaget Swerea som har sin bas för tillverkning och utveckling av ny teknik för dessa solceller. Enligt projektgruppen tros denna typ av solcell kunna bidra med nya och spännande innovativa lösningar till en tävlingsbil i WSC och det ses därför vara värt en närmare undersökning.

1.2 Syfte

Projektet syftar till att skapa en kunskapsplattform för solceller på solcellsdrivna tävlingsbilar i WSC, detta för att förverkliga Chalmers framtida deltagande. De största utmaningarna för ett tävlingsdeltagande ligger i att finna och effektivt använda solceller optimerade för uppgiften och samtidigt hantera olika energiförluster för bilen. Det är slutligen differensen mellan energin som genereras från solcellerna och energin som bilen förbrukar genom vikt, luftmotstånd och dylikt som avgör hur fort och länge bilen kommer att kunna köras. Rapporten kommer att visa vilka solceller som är bäst lämpade och ge beslutsunderlag för placering och eventuell reglering. Uppgiften har delats upp i två delar, kategorisering och placering av solceller, för att ge en bättre överblick över problemet.

1.2.1 Kategorisering

För att lyckas i tävlingen krävs optimala solceller, att hitta de bästa cellerna för ändamålet innefattar en rad utmaningar som ska lösas:

- hög verkningsgrad, utnyttja solenergin i så hög grad som möjligt.
- låg vikt, en tyngre bil kräver mer energi.
- låg miljöpåverkan, från tillverkning till återvinning.
- kostnad, ekonomi är ofta avgörande i slutändan.

¹ (<http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/Sunswift2009.html#celebration>, 2009)

² Bengt Kasemo, Professor på Chalmers, Institutionen för teknisk fysik, intervju 2013-02-27

En litteraturstudie, undersökning av tidigare deltagare samt intervjuer skall ge gruppen ett underlag för att kunna kategorisera de olika solcellerna efter ovannämnda punkter.

1.2.2 Placering av solceller

För att få ut så mycket energi som möjligt är det viktigt att beakta solcellernas vinkel mot solen. Solstrålens infallsvinkel påverkar genererad effekt, vid sämre infallsvinkel erhålls en lägre verkningsgrad. Problemen med att vinkla solpanelerna mot solen är att det kan påverka bilens aerodynamik negativt, samt kan den extra tekniken som behövs för ändamålet öka vikten på bilen. Förhållandet mellan vunnen energi och ökat luftmotstånd kommer att undersökas. Detta ska leda fram till ett beslut för om det lönar sig, rent energimässigt, att styra och reglera vinkeln av solpanelen.

1.3 Avgränsningar

Hur en eventuell tävlingsbil ska se ut kommer ej att behandlas. Regelverket ändras ständigt, hur reglerna kommer se ut då Chalmers deltar är omöjligt att veta. Därav behövs hänsyn för gällande regler ej tas. Inga styrprogram kommer att utvecklas vid eventuellt beslut om styrning.

2 Solceller

2.1 Kiselbaserade solceller

Solceller baserade på kisel tillhör den första generationens solceller. Dessa celler utgör den dominerande tekniken av den kommersiella produktionen bland solceller. Mer än 80% av den nuvarande globala produktionen av solceller baseras på kristallin kiselteknik¹. Tekniken för att producera kiselceller är väl etablerad och erbjuder marknaden lösningar som i dagsläget har acceptabel effektivitet samt en livslängd på minst 25 år¹; detta bör dock sättas i perspektiv mot solcellens stötkänslighet och skörhet². Teoretiskt sett har kiselceller en begränsad effektivitet på ca 29%¹, dock är det en lång väg kvar innan denna effektivitet uppnås för kommersiella produkter.

Trots en väletablerad produktionsteknik och långvarig forskning inom området så är tillverkningskostnaden och energiåtgången relativt hög för denna generation av solceller. Den höga energiåtgången beror bland annat på att kisel framställs ifrån kiseloxid. Kiseloxiden är ett vanligt förekommande material och förekommer naturligt i till exempel öknar. För att få rent kisel från kiseloxid krävs det att syret reduceras bort vilket är en väldigt energikrävande process. Den höga energiåtgången medför att kiselceller har en hög energiskuld som tar ca. 1.5-2.5 år att återbetala³. Kostnaderna har successivt minskat och förväntas minska ytterligare tack vare både teknikutveckling och ökade försäljningsvolym¹. Moduler tillverkade av kiselceller förlorar gradvis sin effektivitet vid ökad temperatur². Det är således viktigt att hålla en god luftcirkulation kring cellerna för att bibehålla en god effektivitet². De mest etablerade varianterna av kiselceller är monokristallina och multikristallina kiselceller¹.

Monokristallina kiselceller har en cellverkningsgrad på 24% och en modulverkningsgrad på 18% och är den mest effektiva variant av kiselceller¹. Dessa celler skärs ut från stora enskilda kristaller som odlats under noggranna förhållanden. Att odla stora kristaller av ren kisel är en svår och energikrävande process, så produktionskostnaden har därav historiskt sett varit väldigt hög¹. Utveckling av ny teknik har lett till förbättrade produktionsmetoder som använder mindre material och skapat en mer stabil process¹. Konkurrens bland utvecklare har även det bidragit till utvecklingen och prispressningen¹.

¹ (Bengt Ridell, 2011)

² JU Solar team, Jönköpings tekniska högskola, 2013-04-08.

³ Bengt Kasemo, Professor på Chalmers, Institutionen för teknisk fysik, intervju 2013-02-27

På grund av att multikristallina kiselceller består av flera kiselkristaller snarare än en enda kristall så är multikristallina kiselceller betydligt billigare att tillverka¹. Den minskade produktionskostnaden beror på att tillväxten av kristallerna inte är lika hårt styrd som för monokristallina kiselceller och att kristallerna är mycket större¹.

Moduler producerade baserade på dessa celler är som ovan nämnt billigare men har en effektivitet som är lägre på både modul- och cellnivå¹.

Kiselceller är relativt enkla anordningar. I dess mest vanligt förekommande form, består solcellen av en tunn kiselplatta som dopas². Med en dopad kiselplatta menas införandet av en lämplig mängd kontrollerade föroreningar för att styra dess elektriska egenskaper². Föroreningar kategoriseras vanligen i så kallade n-skikt och p-skikt, där n-skiktet syftar på ett överskott av negativt laddade elektroner, som tillförs till exempel genom dopning i Fosfor². Andra föroreningar så som till exempel Bohr fungerar som elektronacceptorer, vilket innebär att de fungerar som positiva laddningsbärare, även kallat p-skiktet².

Dessa skikt utnyttjas för underlättandet av elektronflödet i solcellen. När solljuset träffar cellen exciteras en elektron från kiselatomen, dessa exciterade elektroner skapar en ström som utnyttjas². Elektronerna leds tillbaka till baksidan av p-skiktet och fyller det positiva hålrummet i p-skiktet och kretsen är fullbordad utan att någon elektron gått förlorad². På detta sätt kan kiselcellen generera elektricitet utan sönderfall under en lång tid, det vill säga dess livstid som är minst 25-30 år¹.

Kiselkristallerna i cellerna är som sagt väldigt sköra och för att skydda cellerna från yttre påfrestningar brukar en skyddande glasskiva appliceras³. Detta ökar kiselcellens styvhet och robusthet, något som är nödvändigt för att bibehålla den goda livslängden³. Glasskivan medför att vikten för en modul ökar avsevärt.

Kiselcellen har idag, som tidigare nämnts, kommit väldigt långt i utvecklingen. Utvecklingen har kommit så pass långt att den teoretiskt högsta gränsen snart är nådd⁴. Detta beror främst på att kisel som material har en inre begränsning som sätter stopp för en ökad effektivitet².

¹ (Bengt Ridell, 2011)

² (Mauk, 2003)

³ (<http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/how-solar-panels-work/>, 2013)

⁴ (<http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/technology/monocrystalline-solar-cells/>, 2013)

2.2 Multijunction photovoltaic cell

Multijunction solceller är uppbyggda av ett flertal lager halvledare där varje lager är anpassat för olika ljusvåglängder¹, se bild 2.

För att bygga flerlagriga solceller, multijunctionceller, används två olika tekniker. I den första kopplas lagren ihop i efterhand, för att kunna använda dessa krävs mycket tunnare celler än vanligt och tekniken kallas således tunnfilmsteknik. Det är en mycket mer komplicerad process än att bara använda vanliga solceller, och hittills har inga sådana celler producerats utanför labbmiljö med en verkningsgrad på över 9%.

För den andra tekniken, och den teknik som i huvudsak används för multijunctionceller, är filmerna mekaniskt och elektriskt ihopsatta. För att åstadkomma detta krävs en väldigt svår och kostsam process med väldigt specifika material som arbetar väl med varandras egenskaper och där bandgapen är på ett sådant sätt att ljuset kan tas upp². Det är på grund av dessa krav som dessa högeffektiva celler är väldigt mycket dyrare än konventionella kiselceller samt varför giftiga och dyra material som till exempel galliumarsenik (GaAs) används. Trots priset på gallium är det inte den som ligger till grund för multijunctioncellers nackdelar, utan snarare arseniken som det är bundet till. Arsenik är ett väldigt miljöskadligt ämne som sätter sig i marken och grundvattnet vilket kan leda till stora förgiftningar av områden som är skadligt för både människa, djur och natur. I dagsläget finns det inget effektivt sätt att återvinna arseniken eller på annat sätt ta hand om den i slutet på produktens livscykel.

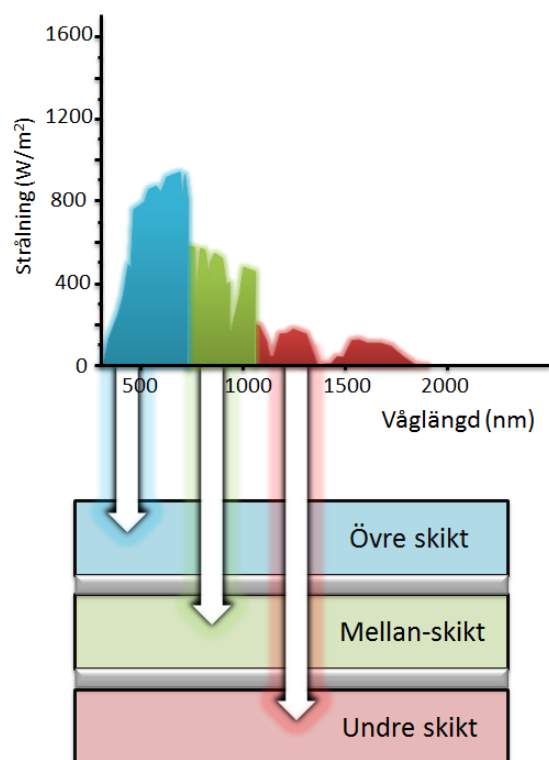


Bild 2: Areal visar mängden upptagen energi

Den mest förekommande och högst utvecklade typen av multijunctionceller är triplejunction celler, alltså en solcell byggd på tre olika typer av material och således tre olika bandgap. Detta tillåter solljuset att upptas i ytterligare två våglängdsområden vilken betydligt sänker förlusterna från icke-

¹ (http://www.hsr.se/VKJG_bilen_och_miljon, 2013)

² (<http://solarlab.se/solpanel/knowledgebase/index/view/faq/om-man-inte-kan-placera-sin-solcell-optimalt-hur-mycket-sjunker-effekten-d-/>, 2013)

upptagningsbar energi jämfört med en solcell med enbart ett bandgap. Det är i dessa celler som arsenik används för det mittersta lagret, vilket gör dessa celler skadliga för miljön. Verkningsgrader fås dock på över 30% under okoncentrerat solljus och 40% med fokusering, således är multijunctionceller mer attraktiva för tillämpningar med begränsad yta där miljöpåverkan är av mindre vikt, till exempel för applikation ute i rymden.

Det är svårt att förutse framtiden i ett såpass nytt ämne som solceller, speciellt multijunction eftersom tekniken är nyare än de mer standardiserade kiselceller. Däremot kan nya framsteg ses ske så ofta som två gånger per år inom till exempel triplejunction med ljuskoncentration, där varje framsteg i genomsnitt ökar den absoluta effektiviteten hos cellerna med 0,67%¹.

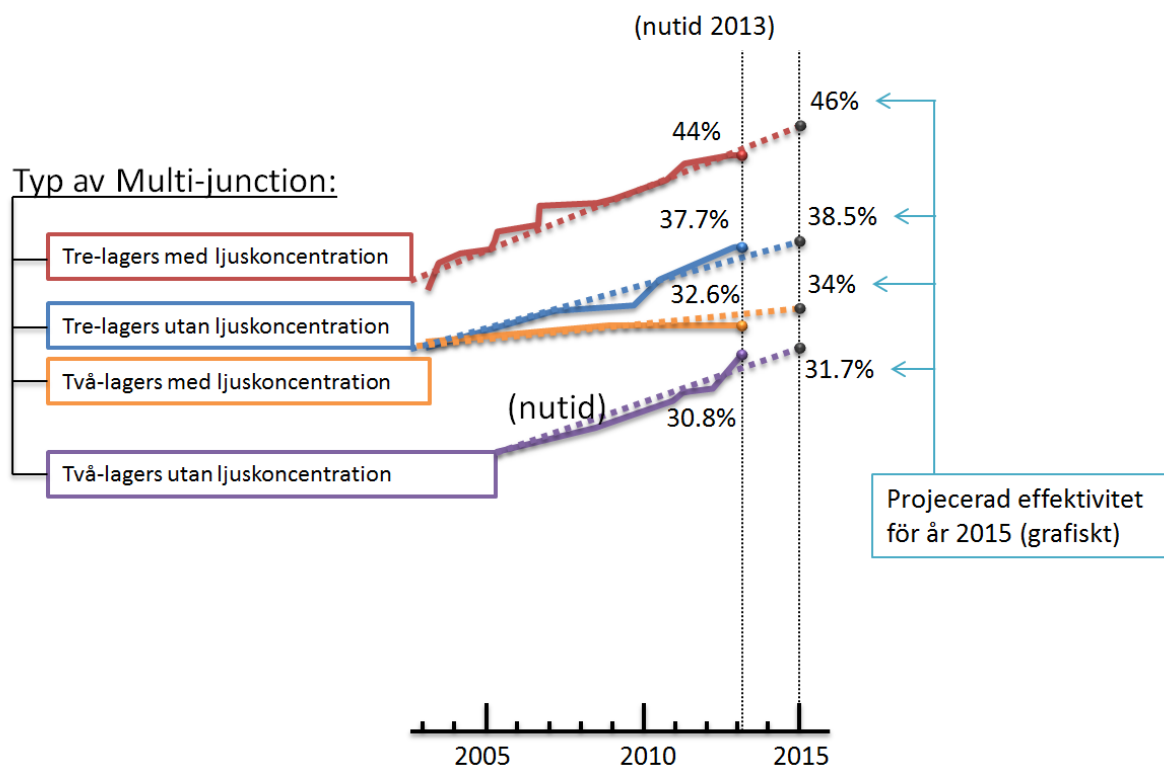


Bild 3: Extrapolerad graf om solceller utveckling

Studerars nyhetsutbudet inom multijunctioncellernas utveckling ser framtiden lovande ut. Publicerade artiklar från februrari 2013 talar om celler som under koncentrerat ljus når upp till 51.8%². Dessa resultat skall ses på med viss skeptisism eftersom de är tagna från simuleringar och inte är gjorda i laboratoriemiljö, än mindre i bruksmiljö för slutkonsumenter. Något som är säkert är att Multijunction fortfarande om två år kommer vara de celler med högst effektivitet².

¹ (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/PVeff%28rev110826%29.jpg>, 2013)

² (<http://phys.org/news/2013-02-multijunction-solar-cell-efficiency-goal.html>, 2013)

Grafen på bild 3 visar hur effektiviteten har ökat fram från 2004 till mars 2013. Antalet utvecklingar som har skett inom varje område av Multijunction varierar från cirka 5 till 17 under en trettonårsperiod, vilket ger en ganska rättvis bild av vart varje celltyp kommer vara 2015 om utvecklingskurvorna extrapoleras.

2.3 DSSC

På senare år har det forskats på flera solcellstekniker för att finna ett effektivt alternativ till kiselbaserade celler. Syftet med forskning och utveckling rörande dessa områden har som avsikt att finna alternativa solceller som har högre effektivitet samt låg tillverkningskostnad per genererad Watt elektricitet¹. En solcell som möter dessa kriterier brukar refereras till som tredje generationens solceller¹. I dagsläget saknas det dock solceller som uppfyller dessa kriterier till fullo. Anledningen till att det finns en vilja att introducera andra material än kiselbaserat material är för att kunna utnyttja solljusets fullständiga spektrum¹. Konventionella solceller är gjorda av ett material, och utnyttjar endast ett bandgap¹. Till följd av bandgapet får den extraherade spänningen en övre gräns². Den högre effektivitetsgränsen för en perfekt kiselbaserad solcell är cirka 29%¹. Denna gräns baseras på den så kallade Shockley- Queisser limit och är ett mått på den högst uppnåbara effektiviteten för en perfekt solcell¹. En gräns som baseras på solceller bestående av endast ett material och endast ett elektroniskt bandgap¹. För att möjliggöra ökad effektivitet måste solcellerna utnyttja material eller cellstrukturer innehållande fler bandgap¹.

Den nya tekniken med DSSC har väckt stort intresse inom solcellsindustrin¹. DSSC anses besitta potential för en betydande kostnadsminskning per ytenhet samt en förbättring i vikt, transparens och andra fysiska variabler såsom flexibilitet, se bild 4, jämfört med kiselbaserade solceller³. En annan nämnvärd egenskap hos DSSC är förmågan att producera elektricitet i sämre ljusförhållande så som till exempel molniga förhållanden eller vid inomhusljus⁴. Detta på grund av dess förmåga att utnyttja hela solljusets spektrum³.



Bild 4: Demonstration av DSSC:s flexibilitet

¹ (Bengt Ridell, 2011)

² (Mauk, 2003)

³ (<http://www.g24i.com/pages>)

⁴ (http://www.dye-solar-cell.com/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=3&Itemid=55, 2013)

Tekniken för DSSC bygger på nanoteknik och är baserad på halvledarmaterialet titandioxid(TiO_2) och har en relativt enkel uppbyggnadsstruktur¹. De porösa nanokristallina TiO_2 partiklarna är arrangerade i en multilagerstruktur och är belagda med ljusabsorberande molekyler, så kallade Dye-molekyler, som omges av en elektrolyt¹. Inkommande solljus träffar Dye-molekylen och exciterar elektronen¹. Den exciterade elektronen förflyttar sig snabbt till den intilliggande TiO_2 partikeln och leds via denna till anoden¹. Den vakanta platsen i Dye-molekylen ersätts då av en elektron som tas upp av elektronbäraren i elektrolyten¹. Elektronbäraren i elektrolyten tar i sin tur upp en elektron från katoden och kretsen är sluten. Bild 5 till höger visar elektronens väg.

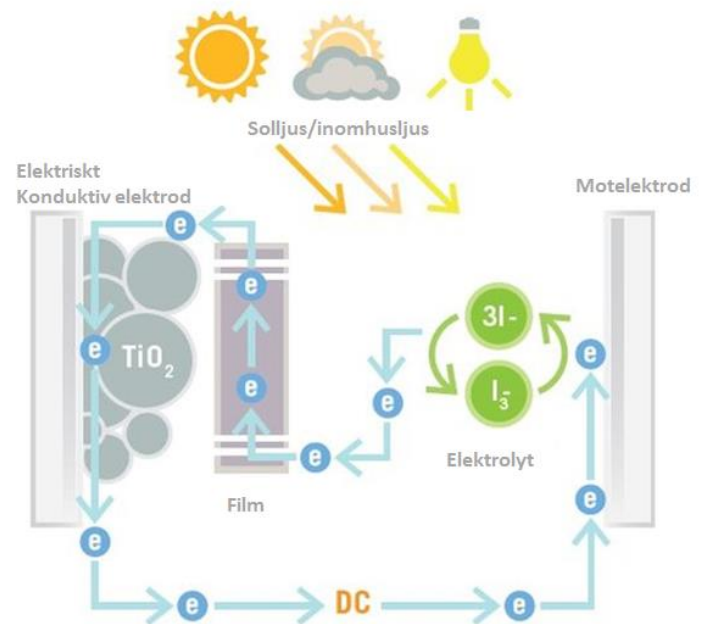


Bild 5: Elektronens väg genom DSSC-kretsen

Ytterligare en fördel med DSSC är att dess halvledarmaterial titanoxid, är ett råmaterial i form av en oxid jämfört med kisel vars halvledarmaterialet måste framställas från råmaterialet kiseloxid och kräver avancerad teknisk utrustning².

DSSC har en ungefärlig livslängd och effektivitet som endast motsvarar hälften så mycket som för kiselcellerna¹. Även om DSSC, med en verkningsgrad på 11%, är långt ifrån samma nivå som för kiselbaserade solceller så är den teoretiska gränsen för DSSC:s potentiella effektivitet betydligt högre än för kisel, närmare 32% på Shockley-Queisser limit¹.

2.4 Förluster

Förluster i en solcell består huvudsakligen av tre olika fenomen. De första förlusterna kommer från svartkroppsstrålning, alltså den energi som utsöndras ur alla material ovanför absoluta nollpunkten. Den andra förlusten kan ses som förlusten av att elektronerna rör på sig till öppna elektron hål, alltså förlusten av att utnyttja det fenomen som möjliggör solceller att fungera. Dessa båda förlusttyper är det svårt att göra någonting åt men de står bara för ungefär 17% (7% + 10%) av förlusterna³.

¹ (Bengt Ridell, 2011)

² Bengt Kasemo, Professor på Chalmers, Institutionen för teknisk fysik, intervju 2013-02-27

³ (Mauk, 2003)

Den huvudsakliga förlusten kommer snarare från möjligheten att uppta all energi från fotonerna och i vissa fall ingen energi alls. Fotoner som kommer in med energi lägre än bandgapet i det material solcellen är uppbyggt av tas inte upp alls och ingen energi utvinns. Konventionella solceller tar inte upp ljus i det infraröda spektrum trots att det står för nästan hälften av energin från solen. Om fotonerna istället kommer in med för mycket energi jämfört med bandgapet kommer överskottet flytta elektroner längre än vanligt vilket ökar förlusterna från förlusttyp två avsevärt. Det är denna förlust som gör det omöjligt för en solcell byggt av endast ett lager att ta upp energi förbi en viss gräns, Kisel-cellerna ligger väldigt bra i sitt spektrum och toppar materialtyperna i upptagningsförmåga men kan teoretiskt sett inte ta upp mer än 30% av energin under perfekta förhållanden. För att lösa detta problem kan solceller istället konstrueras i flera lager, där bandgapen stämmer överens på ett sådant sätt att mycket mer av energin kan tas upp. En teoretisk cell uppbyggd av oändligt många lager uppnår en maximal verkningsgrad på 87%¹.

2.5 Tidigare tävlande

Nedan presenteras de fyra tidigare nämnda lagen som utmärkt sig på WSC. Här presenteras övergripande om hur deras utveckling har fortskridit och vad som särskiljer dem åt.

2.5.1 Aurora

Aurora har tävlat i World Solar Challenge sedan starten 1987 och har deltagit i alla tävlingar därefter. Bild 6 visar bilen från 2001. Aurora har under sina år valt att vidareutveckla sina bilar till dess att de finner det relevant med en total uppdatering, vilket har resulterat i



Bild 6: Bilen Aurora från 2001

att de hittills ställt upp med fyra olika bilar under åren. De tog hem sin enda vinst hittills 1999 med den tredje bilgenerationen "Southern Aurora" som även placerade sig tvåa i de tre nästkommande tävlingarna. Till tävlingen år 2007 ändrades reglerna och bilarna tilläts inte längre ha solceller på mer än sex kvadratmeter, därför byggdes istället "Aurora Evolution" som har varit Auras bil sedan dess. Aurora valde 2009, samtidigt som sina Australiensiska medtävlande, att byta från multijunctionsceller till kiselceller.

Aurora är ett icke-vinstdrivande företag som samarbetar med ett flertal universitet i Australien. Detta medför att deras budget är klart lägre än de stora universiteten som har stora sponsorer bakom sig. Som exempel på detta kan ges att Aurora hade 2011 en budget 5-10% så stor som de lag som

¹ (Bengt Ridell, 2011)

hamnade i toppen¹, trots detta var Aurora ett av få lag som klarade sig i mål trots en ovanligt hård tävling genom skogsbränderna.

De stora förändringarna Aurora bilarna har genomgått mellan tävlingarna (bortsett från när bilmodellen byts ut) tycks ligga mest på viktoptimering. Inom solceller tycks den enda markanta förändringen vara bytet till Kiselbaseradesolceller.

2.5.2 Tokai University

Tokai University syntes för första gången på WSC 2009 med sin bil "Tokai Challenger". De hade ställt upp med samma bil tidigare i bland annat en likartad tävling i Sydafrika året innan och plockat hem en vinst därifrån. De två åren Tokai ställt upp i WSC och alla tre år (2008, 2010 och 2012) de ställt upp i den Sydafrikanska motsvarigheten har Tokai vunnit. Tokai University har



Bild 7: Bilen Tokai Challenger från 2011

valt att vidareutveckla samma bil, "Tokai Challenger", under de senaste fem tävlingarna, en bil byggd med ett flertal betydelsefulla Japanska namn som sponsorer. 2011 bytte de från multijunctionceller till Panasonics HIT-celler², en kiselbaserad solcell byggd med en teknologi som efterliknar den som används hos multijunctionceller². Utöver solcellsbytet lyckades Tokai även minska vikten mellan 2009 och 2011 med 20 kg³, trots detta tycks det bara vara solcellssponsorn som bytts så viktförändringen ligger antagligen i en optimering av den utrustning och materialåtgång som användes 2009. Bild 7 visar bilen efter denna optimering.

Tokai har tidigare valt att använda professionella tävlingsförare för att bättre optimera energiåtgången och minska potentiella förluster vid körningen.

2.5.3 University of Michigan

Detta universitet har deltagit i tävlingen sedan 1990, och har byggt en ny bil från grunden varje gång. Första bilen inom det relevanta spannet, "M-Pulse", ser dock rätt lik ut den senaste bilen "Quantum" och formerna på bilarna däremellan varierar väldigt lite. Något som är intressant att notera är att laget 2007 och 2009 använt sig av ljusfokuserare⁴, och har till och med tagit ett patent inom

¹ (<http://new.aurorasolarcar.com/Cars/Aurora101>, 2013)

² (http://www.panasonic-batteries.com/files/news/2_110824_Panasonic_TokaiChallenger2_Specs_E.pdf, 2013)

³ (<http://www.houseofjapan.com/electronics/2011-tokai-challenger-solar-car>)

⁴ (http://solarcar.engin.umich.edu/pastteams/multimedia/solex_summer2007.pdf, 2013)

området. Huruvida laget använt sig av den tekniken till 2011 är oklart, men av vad går att döma görs detta ej. Till grund för detta beslut ligger med stor sannolikhet regeländringen, eftersom att multijunctioncellerna är de som främjas mest av fokusering. Den senaste bilen har kiselbaserade solceller, med en uppmätt watt ut från cellerna på 1470 W¹. Trots att de aldrig vunnit har de fyra gånger sedan 2001 kommit in på tredje plats. Mellan 2009 och 2011 har deras fokus legat på att få ner vikten, vilket gjorde att vikten minskade från 235 kg till 145 kg. Bilen gjordes även 30% mer aerodynamisk. Bild 8 visar resultatet av ändringarna.



Bild 8: Bilen Quantum från 2011

2.5.4 TU Delft

Bilen "Nuna" var under en lång tid den bästa bilen; den vann fyra gånger i rad från 2001 till och med 2007. Detta universitet har ett samarbete med Europe Space Agency (ESA) och har på så sätt fått extremt bra teknik att jobba med. De har gjorts få förändringar mellan bilarna under den vinnande perioden, mestadels justeringar av bilen utefter det skiftande regelverket. En intressant sak att notera är att bilen på sin bästa körning någonsin, som dessutom fortfarande är rekordet för banan, inte alls hade uppgraderat sina solceller. Det året gick de endast in för att bättra på vikten och aerodynamiken, under tiden de behöll exakt samma solceller. Värt att notera är att samma år som de hade högst medelhastighet någonsin visade de sin lägsta noterade topphastighet.



Bild 9: Nunu från 2011

Delft använder sig av en bakomliggande bil med meteorologutrustning och datorer. Dessa datorer har ständig kontakt med solcells bilen via wifi och får information om väglutning, hastighet, batteriladdning etc. vartefter datorn räknar fram den mest energikonserverande hastigheten. Till sist så skickas den optimala hastigheten tillbaka till Nuna och bilen anpassar hastigheten därefter. Föraren behöver alltså inte hålla gaspedalen själv. Max-mängden Watt har varierat kraftigt över åren från Nuna, men trots detta har inte totaltiden på banan förändrats märkbart. Bild 9 visar den senaste versionen av Nuna.

¹ (<http://solarcar.engin.umich.edu/the-car/>, 2013)

3 Styrning och placering

För att en solcell ska fungera optimalt krävs att solljuset faller rakt in mot cellen, den skall alltså som bäst vara riktad vinkelrät mot solen. För att högsta effekt ska uppnås måste modulerna placeras i antingen en fast vinkel som till större delen av loppet är nära optimal eller styrs för att alltid ligga optimalt mot solen. Vid styrning uppstår problem med att ökad vinkel ger ökat luftmotstånd. Det ökade luftmotståndet bör viktas mot den vinst som kan göras.

3.1 Vinkel

Vinkeln har betydelse för hur stor effekt solcellerna producerar. En vinkel som avviker +/- 15 grader från optimal vinkel ger en försumbar förlust¹. Det är först vid stora vinklar som förlusten blir stor, vid 30 graders avvikelse är förlusten cirka 12%². Med en solföljare kan effekten över en dag vara 40% högre än för en fastmonterad solpanel². Den optimala vinkeln är när panelen står 90 grader mot solen. För att hålla optimal vinkel mot solen under en hel dag krävs det att panelen styrs med till exempel en mekanisk styrning. Ett problem som uppstår vid styrning är att en förändring av vinkeln kan ge bilen ökat luftmotstånd vilket i sin tur leder till förluster i bilens hastighet. Det är flera faktorer som spelar in på hur panelen ska vinklas när styrning saknas, beroende på position och tid på året. Bild 10³ visar en jämförelse av effekten för en fix monterad yta och en yta som följer solen under en dag.

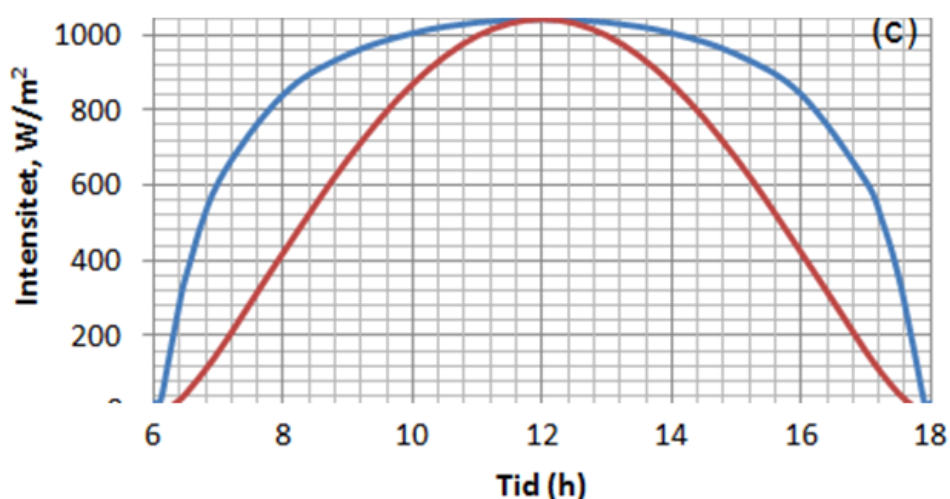


Bild 10: Strålning av solen under en dag, blå kuva visar en yta som följer solen och röd kurva visar en fast horisontell yta

¹ (<http://solarlab.se/solpanel/knowledgebase/index/view/faq/om-man-inte-kan-placera-sin-solcell-optimalt-hur-mycket-sjunker-effekten-d-/>, 2013)

² (<http://www.solartradingpost.com/solar-panel-angle.html#>, 2013)

³ (Baranzahi, 2013)

Det finns ett par tumregler som bör följas vid montering av en solpanel utan styrning. På norra jordklotet ska de alltid vara riktade mot exakt söder och på samma sätt ska paneler på södra jordklotet vara riktade mot exakt norr¹. Den bästa vinkeln beror på årstid och kan anpassas därefter. För vintern hittas denna genom att multiplicera latituden där panelerna placeras med 0.89 och sedan addera 24². För vår och höst, multiplicera latituden med 0.92 och subtrahera 2.3². För sommar, multiplicera latitud med 0.92 och subtrahera 24.3². På detta vis fås vinkel från horisontalplanet som panelerna bör monteras efter beroende på årstid.

3.2 Ljusintensitet

När energin från solen når jordens atmosfär är intensiteten 1350 W/m², vid inträde genom atmosfären förlorar den intensitet². När solenergin passerar genom atmosfären absorberas och sprids ljuset av luftmassan den passerar. När ljuset når en plats på jorden i 90 gradig vinkel mot solen, kallas det att den har passerat en luftmassa (AM, eng. airmass)¹. När solljuset faller in i en annan vinkel färdas de en längre sträcka, se bild 11, genom atmosfären och därför genom en större luftmassa, ju större AM desto svagare blir ljuset. För att beräkna AM finns en formel som tar hänsyn till jordens kurvatur².

$$AM = \frac{1}{\cos(\varphi) + 0.50572(96.07995 - \varphi)^{-1.6364}}$$

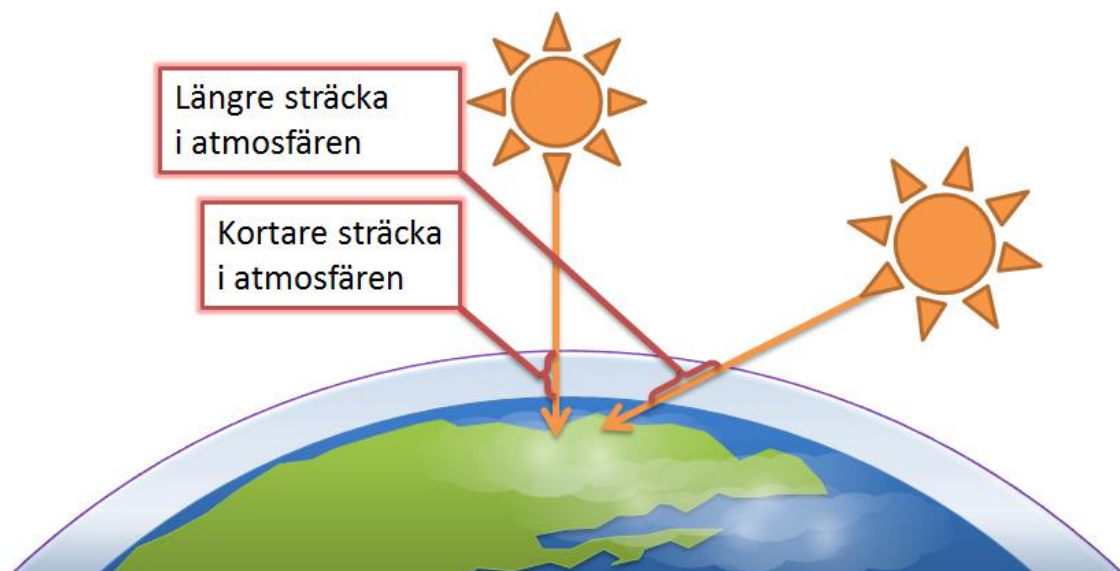


Bild 11: Bilden illustrerar hur ljuset färdas en längre sträcka vid olika infallsvinklar

¹ (<http://greenliving.nationalgeographic.com/figure-correct-angle-solar-panels-2584.html>, 2013)

² (Baranzahi, 2013)

Vid passage genom 1,5 atmosfär tappas cirka 27 %¹. Energiförlusten är dock inte proportionell mot AM¹. Som förklaras i avsnitten om vad en solcell är behövs en viss energi för att excitera en elektron. Denna energi motsvaras av bandgapet, solcellen kan därför inte tillgodogöra sig överskottet av energi som den träffas av. Detta gör att det spelar mindre roll att en del av ljuset absorberas i atmosfären så länge som det finns tillräckligt med energi för att excitera elektronerna i solcellen. Med andra ord påverkas ljusintensiteten mer än vad den sedan påverkar solcellseffekten¹. Nedan redovisas tabell A som visar en jämförelse av solcellseffekten vid olika ljusintensitet¹.

AM	P_{IN} (W)	P_{UT} (W)	$verkningsgrad = \frac{P_{UT}}{P_{IN}}$ (%)
0	1350	160	12
1,5	1000	150	15
2	800	120	15

Tabell A: Filtrering av högenergifotoner påverkar solpaneler marginellt. AM0 är utanför atmosfären

Solcellen påverkas av antalet fotoner som träffar solcellen men inte av hur mycket energi varje foton innehåller, förutsatt att energin i fotonen räcker till att excitera en elektron. Det finns olika empiriska ekvationer som anpassar solstrålningen mot AM¹. Den enklaste modellen tar bara tjockleken på atmosfären i beräkning, men i själva verket påverkas ljusintensiteten också av mängden föroreningar, aerosol, vattenånga m.m. Ett approximativt värde på ljusintensiteten, I_0 , fås av ekvationen¹:

$$I = 1,1 \times I_0 \times 0,7^{AM^{0,678}}$$

$I_0=1353W/$, ljusintensiteten när AM=0

0,7 kommer från antagandet att 70 % av ljuset är direkt ljus

1,1 kommer från att det diffusa ljuset bidrar med ca 10 % av det direkta ljuset

¹ (Baranzahi, 2013)

3.3 Fokusering av solljus

Ljusfokusering är ett väl använt koncept vid stora solcellsanläggningar, speciellt vid breddgrader där solen oftast inte ligger bakom moln. Tekniken går i korthet ut på att fokusera ljus på en solcell, som då får mer ljus än vad den skulle få i vanligt solljus. Mängden fokuserad ljus kontra arean den fokuseras på avgör vilken kategori ljusfokuseringsanläggningar hamnar i, till exempel: tio kvadratmeter ljus fokuserat på en kvadratmeter solcellsyta får en kategori tio. En fokusering av 100 kvadratmeter till en kvadratmeter hamnar i kategori 100. Fördelarna med ljusfokusering är att vissa typer av solceller får en minskad förlustfaktor vid hög fokusering. Vissa anläggningar kan ha en fokusering så hög som 500 gånger. De solceller som drar mest nytta av fokuseringen är multijunctioncellerna, som vid fokusering kan uppnå en effektivitet på över 40%, här med en faktor 400 på fokusering¹.

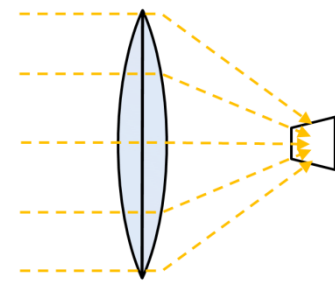


Bild 12: Fokusering med lins

Det finns två generella sätt att fokusera ljus; med speglar eller med linser. Med speglar används konkava speglar till att fokusera ljuset på en punkt som visas i bild 12. Med linser används ett konvext glas som släpper igenom ljuset fast med ändrad riktning som går att se i bild 13. Båda tekniker lider av problemet med indirekt ljus, så fort ljuset blir diffust sjunker effektiviteten radikalt. Infallsvinkeln på ljuset blir också väldigt viktig, eftersom fel vinkel också sänker effektiviteten avsevärt. Av dessa två tekniker är spegling väldigt svårt att applicera vid WSC, detta på grund av att trafikreglerna är väldigt hårda mot speglar i trafiken eftersom dessa kan vara en trafikfara för andra.

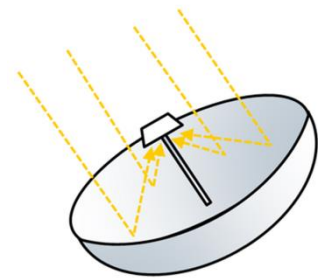


Bild 13: Fokusering med spegel

¹ (http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf, 2013)

3.4 Skuggning

Skuggning är något som påverkar solcellerna i stor utsträckning. Det beror bland annat på att effekten av skuggning på en solcell blir större än den geometriska förlusten av instrålad energi¹. Det beror i sin tur på att en enstaka solcell har så låg spänning att seriekoppling är absolut nödvändig. När en solcell hamnar i skugga ökar denna solcells motstånd¹. Om flera solceller är seriekopplade innebär det ökade motståndet på en solcell att strömmen till de övriga solcellerna stryps. Bild 14 visar effekten av en solcell vid klar himmel respektive i skugga².

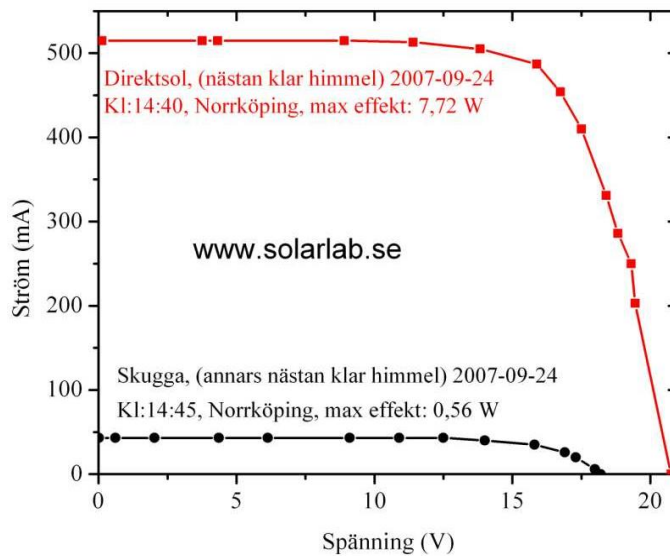


Bild 14: Effekten av en solcell vid klar himmel respektive i skugga

Problemet kan kringgås genom att införa bypass-dioder¹. Dioderna monteras över varje modul³. Vid partiell skuggning, då en mindre del av solcellerna hamnar i skugga, kommer dioden leda strömmen förbi de skuggade cellerna³. Detta innebär att några celler som kanske inte skuggas också kan komma att kopplas bort, men strömslingan och funktionen upprätthålls³. Bild 15 illustrerar hur moduler och dioder är seriekopplade.

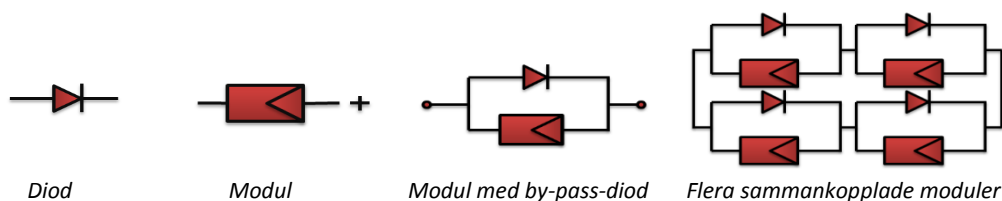


Bild 15: Om en modul skuggas upphör alla celler i denna modul att fungera. Dioden gör att strömmen leds förbi den skuggade modulen så att strömslingan upprätthålls.

¹ (<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/Energiberakningar/>, 2013)

² (<http://solarlab.se/solpanel/faq2#answer111>, 2013)

³ (<http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/moduler/>, 2013)

Om det är möjligt att förutsäga vilka solceller som löper störst risk att bli skuggade kan effekten av skuggningen minimeras. Om skuggningen inte går att förutsägas finns det en viss risk att solpanelen slutar att fungera även om det bara är en liten del av panelen som skuggas¹. Bild 16 och 17 illustrerar hur detta kan uppstå.

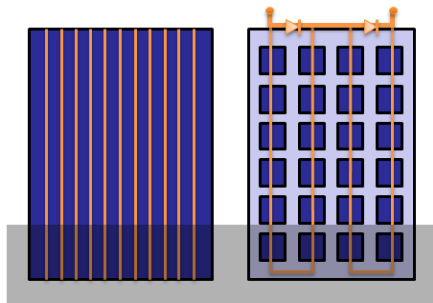


Bild 16: En tunnfilmsmodul och en kiselcellsmodul med samma skuggning. Kiselmodulen är seriekopplade med två integrerade dioder inlagda. Med skuggningen minskar tunnfilmsmodulens effekt med ca 10% och kiselmodulens effekt med nästan 100%. Detta beror på att skuggade celler finns i bägge sub-strängarna

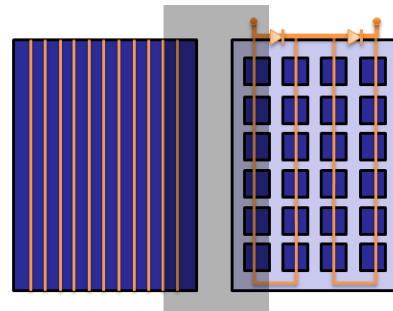


Bild 17: En tunnfilmsmodul och en kiselcellsmodul med samma skuggning. Med den nya skuggningen minskar kiselmodulens effekt med ca 50%, då de skuggade cellerna endast finns i en sub-sträng. Tunnfilmsmodulens effekt minskar nu med nästan 100% då hela celler är skuggade.

3.5 Luftmotstånd

För att avgöra om det lönar sig att styra solcellerna behöver luftmotståndet beräknas. När bilen utformas skapas formen på bilen i syfte att minimera luftmotståndet. Formen på ett föremål avgör hur luften passerar föremålet och hur luftvirvlarna kommer att se ut under passagen. Optimalt önskas laminär strömning under hela passagen. Under laminär strömning följer luften bilens strömlinje utan att bilda några luftvirklar. I många fall är laminär strömning svår att uppnå och strömningen övergår någon gång under passagen till turbulent (oordnad strömning). Många gånger handlar det då istället om att fördröja den turbulenta strömningen eller minska turbulensen. Detta kan göras på olika sätt och ett exempel är den gropiga ytan på golfbollar. De små groparna på golfbollen skapar små luftvirklar som orsakar mindre turbulens och därmed mindre luftmotstånd än det stora luftvirvlarna som skapas om bollen varit slät. Inom bilvärlden finns ett flertal exempel på liknande tillämpningar, bland annat Porsche vars backspeglar styr undan luften från dörrhandtagen och därmed skapar mindre luftmotstånd².

¹ (<http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/moduler/>, 2013)

² (White, 2011)

Luftmotståndet är den största anledningen till att inte styra solcellerna. Eftersom ingen bil har tagits fram kan endast en enklare beräkning göras. Kraften kan beräknas genom¹:

$$F = \frac{C_D}{2} * \rho * V^2 * A$$

Dragkoefficienten C_D , är en dimensionslös kvantitet som används för att kvantifiera dragkraften på ett objekt i ett strömmande material såsom vatten eller luft. Ett lågt C_D indikerar ett objekt som passerar lättare genom luften. Ett typiskt värde för en bil är =0,3. För att kunna beräkna C_D på riktigt görs simuleringar på den tänkta bilen alternativt mätningar i vindtunnlar.

För en optimal beräkning bör den tänkta bilen simuleras med solceller som går att vinkla mot solen. Sedan bör olika C_D beräknas beroende på solcellernas vinkel mot solen, i simuleringsprogrammet. Då ses hur styrningen av solcellerna påverkar dragkraften och därmed kan en bedömning göras huruvida styrning lönar sig eller ej.

I en första studie där bilens utseende inte har tagits fram kan en approximativ beräkning göras med redan kända C_D .

Form	Dragkoefficient
Sfär	0.47
Halv-sfär	0.42
Kon	0.5
Kub	1.05
Vinklad kub	0.8
Long cylinder	0.82
Kort cylinder	1.15
Strömlinjeformad	0.04
Strömlinjeformad halvkropp	0.09

Bild 18: Olika uträknade C_D för kända kroppar

¹ (White, 2011)

Den mest strömlinjeformade kroppen, se bild¹ 18, är en droppe med den tjocka ändan framåt. Problemet med en sådan kropp är att den inte kan sägas ha god aerodynamik eftersom den tenderar att lyfta bilen i höga farter¹.

I beräkningen antas att en solcellspanel, formen av en platta, vinklas emot solen som står bakom bilen, enligt bild 19.

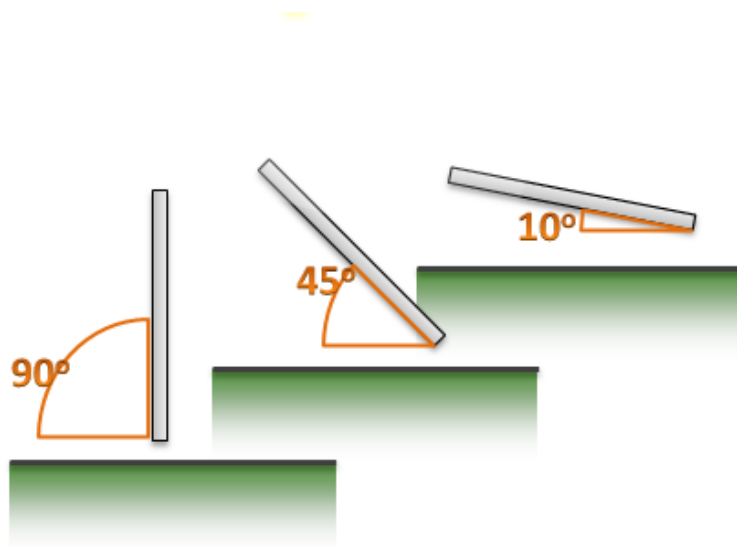


Bild 19: Illustrerar hur solcellspanelen vinklas i 90°, 45° och 10°.

Beräkning² för endast en solcellspanel/platta 90°, 45° och 10°.

$$C_D=1$$

$\rho= 1,2041 \text{ kg/m}^3$, densiteten för luft

$V= 85 \text{ km/h}$, den genomsnittshastigheten som krävs för att vinna tävlingen

$A=\sin(x^\circ) \cdot 0.5 \cdot 1$, arean för en vinklad platta

Beräkningen av kraften görs på samma sätt i alla fallen, x° har ersatts med vinkeln för det specifika fallet.

$$F = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \sin(x^\circ) \cdot 0.5 \cdot 1 = \frac{1}{2} \cdot 1.2041 \cdot \left(\frac{85}{3.6}\right)^2 \cdot \sin(x^\circ) \cdot 0.5 \cdot 1$$

¹ (White, 2011)

² Ragnar Larusson, doktorand på Chalmers, tillämpad mekanik, intervju 2013-04-15

För att omvandla kraften till effekt (P) används:

$$P(45) = F \cdot V = 188.7 \cdot \frac{85}{3.6} = 2801.8 \text{ W}$$

$$P(90) = 255.1 \cdot \frac{85}{3.6} = 6022.8 \text{ W}$$

$$P(10) = 21.9 \cdot \frac{85}{3.6} = 688.1 \text{ W}$$

För att kunna jämföra resultatet med något beräknas dragkraften på bilen Aurora som deltog i WSC 2007¹.

Beräkning för Aurora:

$$C_D = 0.1$$

$\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$, densiteten för luft

$V = 85 \text{ km/h}$, den genomsnittshastigheten som krävs för att vinna tävlingen

$A = 0.76 \text{ m}^2$, frontarea

$$F = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A = \frac{0.1}{2} \cdot 1.2041 \cdot \left(\frac{85}{3.6}\right)^2 \cdot 0.76 = 25.1 \text{ N}$$

$$P = F \cdot V = 25.51 \cdot \frac{85}{3.6} = 602.3 \text{ W}$$

3.6 Fordonsförluster

Förlusterna delas upp i tre delar, se bild: Motorförlust, den energi som förloras under omvandlingen av energin, såsom värme. Luftmotstånd, den mekaniska kraft som luften ger upphov till, den energin som "tas" av luften när bilen pressar sig igenom den. Rullmotstånd, det motstånd som uppstår när ett runt föremål rullar på en plan yta, orsakas främst av deformationen av föremålet. Rullmotståndet ökar proportionellt med bilens tyngd. Batterierna i dagens bilar har 100% verkningsgrad och bidrar alltså inte med förluster i systemet.

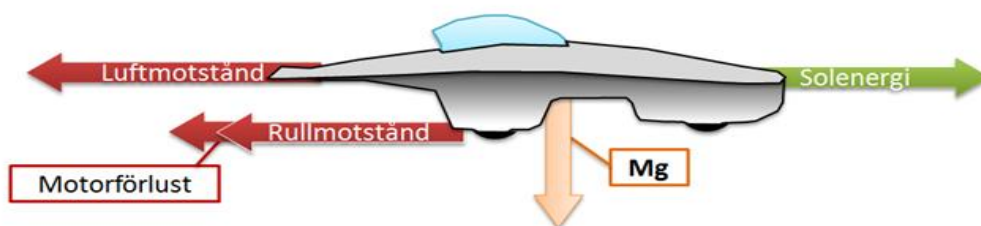


Bild 20: Friläggning av bilen

För att se ungefär hur stora de olika förlusterna är görs en beräkning på en tävlingsbil, se Bild 20. Beräkningen är gjord på Auroras tävlingsbil som deltog i WSC 2007¹.

¹ (<http://new.aurorasolarcar.com/Cars/Aurora101>, 2013)

Motorförlust:

$E = 972 \text{ W}$, energin som solcellerna ger

$\eta = 0.97$, motorns verkningsgrad

$M = E \cdot (1 - \eta) = 29,16 \text{ W}$, motorförlust

Luftmotstånd:

$$F_1 = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A$$

$C_D = 0.1$

$\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$, densiteten för luft

$V = 85 \text{ km/h}$, den genomsnittshastigheten som krävs för att vinna tävlingen

$A = 0.76 \text{ m}^2$, frontarea

$F_1 = 25,51 \text{ N}$

$L = F_1 \cdot V = 25.51 \cdot \frac{85}{3.6} = 602.3 \text{ W}$

Rullmotstånd:

$C_r = 0.0027$, rullmotståndskoefficienten

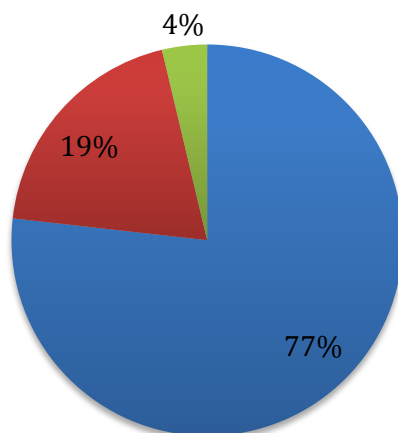
$mg = 2400 \text{ N}$, tyngden på bilen

$F_2 = C_r \cdot mg = 6,48 \text{ N}$

$R = F_2 \cdot V = 153 \text{ W}$

Totala förluster

■ Luftmotstånd ■ Rullmotstånd ■ Motorförlust



Tabell B: Ett diagram över bilens förluster

4. Metod

Detta kapitel beskriver vilka metoder som valts att användas för att på ett vetenskapligt grundligt sätt angripa problemet. Det finns två nödvändiga sätt att närma sig problemen och för att dra kvalitativa slutsatser. En efterforskning över tidigare tävlingsbilar ger kunskap som kan användas för att dra slutsatser av deras framgångar och misstag. En litteraturstudie ger ett större och mer holistiskt synsätt av problemet vilket skapar en bredare grund och en djupare förståelse för vad som ligger bakom de definitiva slutvalen. Genom att börja med grundliga litteraturstudier av solceller skapas en god förståelse för hur olika solceller fungerar och vilka variabler som har inverkan på funktionaliteten med intervjuer av forskare och specialister inom relevanta områden kan litteraturstudierna kompletteras med spetskunskap och mer aktuell information skaffas.

4.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie delas enklast in i tre faser: datainsamling, analys och skriva.¹ På detta vis blir studien effektiviserad och resultatet relevant. Nedan följer en närmare presentation av de olika faserna.

4.1.1 Datainsamlingsfas

För att optimera litteraturstudien formulerades först en frågeställning och sedan utfördes en första sökning utifrån denna. I den första sökningen utreds om det finns tillräckligt med publicerat material att tillgå för att den ska kunna fullföljas. Frågeställningen utformades för att ge en uppfattning om hur solcells forskning ser ut idag och vilka typer av solceller som har en framtid. Genom att sedan definiera syfte och göra avgränsningar begränsades undersökningen ytterligare för att på så sätt ge sökresultat som är relevanta¹. För att på ett snabbt sätt ta sig genom många artiklar delades arbetet upp i par.

4.1.2 Analysfas

I denna fas analyseras urvalet. Det som analyserades är huruvida resultaten i artiklarna motsvarar det syfte som formulerats¹. Det var också viktigt att analysera om artikeln bidrog med ny kunskap eller om den i huvudsak var bekräftande. I den här fasen bedömdes också hur tillförlitliga resultaten var

¹

(http://pingpong.ki.se/public/pp/public_courses/course06238/published/1292428054230/resourceId/3969767/content/infoweb/node-2278687/Examensarbete%20bm-utbildningen%2007.pdf, 2013)

och hur pålitlig datan var. Det utfördes genom att analysera diskussionen i artikeln, hur pass resultaten diskuteras kritiskt och om de jämför sina resultat med andra studier.

4.1.3 Skrivarfas

I skrivarfasen drogs nytta av att ett grundläggande arbete i de tidigare faserna gjorts. Stor möda lades på att beskriva syftet med litteraturstudie. För att få en sammanhängande rapport var det viktigt att anknyta syftet med resultat, diskussion och slutsatser¹.

4.2 Intervjustudie

Efter litteraturstudien krävs det att den förvärvade kunskapen kompletteras med aktuell spetskompetens från specialister och forskare inom området. Intervjuer av relevanta personer är en effektiv metod för insamlandet av sådan information. Det är en trygghet att även kunna bekräfta det framtagna resultat som nåtts med någon som har hög kompetens inom ämnet samt be om vägledning eller råd om vart ett fortsatt informationsletande kan ta vid. Det är också ett lämpligt sätt att få kompletterande frågeställningar från personer utifrån där saker som frånsätts kan upptäckas. Genom en intervju finns möjligheten att ställa mer specifika frågor som exakt riktar sig mot sökta resultat.

4.2.1 Intervjuer

Intervjuerna har skett i två omgångar. Första omgången intervjuades personer för att komplettera litteraturstudierna. Andra omgången gjordes för att återkoppla resultat mot gamla bilor genom att intervjua aktiva WSC-deltagare.

Frågorna som har ställts har riktats specifikt till de intervjuades expertisområden. Frågorna har delats upp i tre kategorier: olika typer av solceller, hur vinkeln till solcellen påverkar effekten och luftmotståndet.

4.2.1.1 Frågor om olika typer av solceller:

För att finna ytterligare kompletterande information och personer med expertis rörande solceller gjordes flera intervjuer. Dessa intervjuer bidrog till en ökad kontaktkrets samt den ökade tillgången till nytt material och ökad förståelse inom området. Exempel på frågor som ställdes till personerna som intervjuades finns bifogat i bilaga.

1

(http://pingpong.ki.se/public/pp/public_courses/course06238/published/1292428054230/resourceId/3969767/content/infoweb/node-2278687/Examensarbete%20bm-utbildningen%2007.pdf, 2013)

Följande personer intervjuades inom området:

Maria Grahn - Doktor vid avdelning teknisk resursteori vid Chalmers tekniska högskola. Föreläst om bl.a. solcellsenergi i kursen Termodynamik för M2 . Prasad för sina insatser inom hållbarutveckling.

Bengt Kasemo - Professor vid Institutionen för teknisk fysik på Chalmers tekniska högskola. Bengt Kasemo är en av de främsta forskarna inom nanoteknologi. Han är bland de ledande forskarna i världen när det gäller innovationer baserade på nanoteknologi. Ett av hans många forskningsområden har varit DSSC och han har även agerat som rådgivare åt svenska statens energimyndighet.

Henrik Pettersson - Arbetar med utveckling av DSSC på Swerea vars utvecklingsavdelning är baserad i Göteborg.

Anders Hellman - Assisterande professor på avdelningen teknisk kemi vid Chalmers tekniska högskola. Anders är även aktiv i föreningen Chalmers Solar.

WSC-deltagare (Jth) - Studenter och lärare, som i år ska delta i WSC, vid Jönköpings tekniska högskola.

4.2.1.2 Frågor om hur vinkeln till solcellen påverkar effekten:

En del av litteraturstudien kompletterades då det var svårt att hitta information om hur effekten hos solcellen påverkas när solljuset avviker från optimal vinkel. Företaget Solarlab har sedan det startade varit engagerade i att förse skolor med solceller i utbildningssyfte och kontaktades därför att de villigt och pedagogiskt skulle besvara frågor så som:

- Hur mycket effekt förlorars på att inte ha optimal vinkel mot solen?

4.2.1.3 Frågor om luftmotståndet:

Ingen litteraturstudie om luftmotståndet har gjorts då kunskap inom området besitts av gruppen samt bred kompetens på Chalmers kan erhållas.

Ragnar Larusson, doktorand på tillämpad mekanik och handledare i kursen, kontaktas via mail med förhoppningen om att han kan hjälpa till med att svara på frågor som:

- Hur mycket ökar luftmotståndet av vinklade paneler?

- Hur mycket effekt förlorars med ökat luftmotstånd?

4.3 Efterforskning

Denna fas av arbetet kan beskrivas som den med minst tillförlitliga källor, dock samtidigt en av de områden som har resulterat i en stor mängd användbar data. Målet har här varit att bedöma tidigare tävlingar och deras resultat samt förändring från år till år. Utifrån denna fakta har slutsatser kunnat dras om hur regelverket kan komma att se ut och vart trenden för de framtida bilarna ligger. Vad som kan förväntas i kommande tävlingars regler och tävlande kan potentiellt spara mycket tid och energi som annars hade behövts läggas för att komma fram till saker andra lag redan insett.

4.3.1 WSC

Regelanalyser har genomförts som visar på förändringar som kan tänkas komma till WSC i framtiden. Fakta och indikationer om de andra bilarnas tekniska data har insamlats, därefter kategoriserats och jämförts.

4.3.1.1 Tävlingens förändringar

Störst vikt vid efterforskning om de gamla regler har lagts på förändringen från 2011 till 2013. Denna förändring är den mest aktuella vilket kommer att få en direkt påverkan på Chalmers första deltagande. Vid analys av tidigare än 2011 års förändring har endast de största förändringarna lagts vikt vid, dessutom endast de förändringar som involverar solcellerna och deras regulationer. Fakta om 2013 års tävling fanns att hitta på den officiella hemsidan medan information om tidigare tävlingar fanns att hitta i artiklar om tävlingen.

4.3.1.2 Tidigare Bilar

Information från lag som länge legat i toppen har ansamlats för att finna vart förändringar skett och vad respektive lag tycks finna mest relevant. Majoriteten av efterforskningen och resultaten från den har tagits fram från relaterade nyhetsartiklar från de olika åren samt den information respektive organisation och lag har valt att dela med sig av. Resultat från den officiella tävlingssidan har använts för att bedöma hur varje lag presterat från år till år.

5. Resultat

För att optimera solcellerna på en tävlingsbil i WSC tas hänsyn till solcellsval samt placering och styrning av solceller. Resultatet baseras på miljöpåverkan, ekonomi och tävlingsprestanda.

5.1 Resultat solceller

Solcellstyperna besitter skilda egenskaper samt olika för- och nackdelar. De mest betydelsefulla skillnaderna finns inom verkningsgrad, ekonomi, miljö och vikt.

5.1.1 Verkningsgrad

För tidigare tävlande och diverse andra applikationer såsom satelliter och dylikt har valet baserat på verkningsgrad varit tämligen självklart. Multijunctionceller är skapta med enbart verkningsgrad i åtanke och har baserats på att lösa problemet med bandgapsrelaterade förluster vilket är verkningsgradens stora baneman. Kort kan det ses som att en tripplejunctioncell är tre solceller på varandra vilket kommer ge ett klart bättre resultat än en ensam (singlejunction) solcell.

Problemet som uppstår med multijunctionceller är regelverket. WSC tillåter inte längre mer än tre kvadratmeter av cellerna vilket innebär en avsevärt reducerad tillgång till effekt. Ställs detta i relation med kiselceller, med en verkningsgrad på ca 20% och som totalt får utgöra sex kvadratmeter, leder detta till att den totala tillgången av effekt, från kiselcellerna, blir högre i slutändan. En multijunctioncell har en verkningsgrad kring 30%, detta utan extern fokusering, vilket ej räcker till för att konkurrera med kiselcellernas större tillåtna area. För att få en konkurrenskraftig multijunctioncell-lösning krävs extern fokusering av solljus. Med en extern fokusering tillkommer andra fysiska variabler som gör denna lösning svår och komplicerad. Verkningsgraden för DSSC är idag endast 11% vilket är hälften så mycket som för kiselcellerna och endast en tredjedel så mycket som för multijunctioncellerna. Även om DSSC fungerar avsevärt bättre i diffust ljus så innebär verkningsgraden på 11% att den är otänkbar som en ensam lösning på en tävlingsbil.

5.1.2 Ekonomi

Den i särklass största solcellstypen är kiselbaserade solceller. Det finns en välutvecklad industri och en växande marknad kring kiselceller vilket innebär att priserna hos dessa solceller ständigt pressas på grund av ökad konkurrens. Det lågpresterande multikristallina kiselcellerna är avsevärt billigare som tidigare nämnts medan de monokristallina kiselcellerna är betydligt dyrare. En uppskattad kostnad, för att täcka det sex kvadratmetrarna på bilen med monokristallina kiselceller, kan tas från

JU Solar Team som uppskattat deras laserskurna monokristallina kiselceller till ca. 250 000 sek. Motsvarande mängd multijunctionceller kan kosta upp till tio till hundra gånger mer, dock fås bara tre kvadratmeter användas vilket innebär färre mängd celler och således lägre pris. Vid användning av multijunctionceller rekommenderas dock någon form av solljusfokusering, för att verkligen utnyttja dess potential, vilket ökar kostnaden ytterligare.

Även om effektiviteten för DSSC:s är lägre än för många av de bästa tunnfilmceller, är priset-till-prestanda-förhållandet som erhålls genom dessa solceller överlägsen. DSSC består av billiga material och tillverkningsprocessen är energisnål jämfört med t.ex kiselceller. Detta gör att tillverkningen av DSSC är billig vilket gör att marknadspriset för den är lägre än andra tunnfilmceller. Industrin och marknaden för DSSC är ej lika välutvecklad som för t.ex kiselceller vilket leder till att priserna idag inte är så låga som de skulle kunna vara.

5.1.3 Miljö

En av WSC huvudsyften är att stimulera utvecklingen av nya innovativa och miljövänliga lösningar för framtida transportmedel. Detta innebär att solcellens miljöpåverkan är en viktig del i valet. För att se om en solcell är miljövänlig så krävs det en viktning av flera olika aspekter så som vilka material den består av samt hur energikrävande framställningsprocessen är kontra solcellens effektivitet och livslängd. Kiselkristallerna till kiselcellen tillverkas ifrån kiseloxid som är ett vanligt, naturligt förekommande ämne. Processen för att växa kiselkristaller och för att reducera bort syret ifrån kiseloxiden är dessvärre väldigt energikrävande. Den energikrävande processen bidrar till att kiselceller har en hög energiskuld när dem tas i bruk vilket tar ca. 1.5-2.5 år att återbetala. Livslängden för kiselceller är 25-30 år, om inte mer, vilket ger den flera år att producera "ren" energi. Titanoxiden i DSSC är också ett vanligt och naturligt förekommande ämne. Den stora skillnaden jämfört med kisel är att titanoxiden, som används till halvledare i DSSC, ej kräver en vidare förädling vilket sparar stora mängder energi. Livslängden och effektiviteten för DSSC idag är dock endast hälften än för kiselcellerna. Multijunctioncellerna är delvis baserade på giftet arsenik vilket är en stor miljöfara. I en rankning av miljöpåverkan från dessa tre solceller är multijunction definitivt sämst då en återinföring av arsenik i produkter skulle vara förödande för miljön. Bäst ur miljösynpunkt är DSSC men kiselcellerna är inte så mycket sämre. Skulle processerna för kisel förbättras och bli energieffektivare skulle kiselceller helt klart vara ett mer tänkvärt alternativ ur miljösynpunkt. Att processerna för kiselceller skulle bli mer effektivare är troligt.

5.1.4 Vikt

En kiselcell har en låg vikt men är extremt skör. Det är ofta nödvändigt att täcka över cellerna med en relativt tjock glasskiva som skyddar mot stötar och ökar styvheten. En glasskiva över cellen skulle flerdubbla kiselcellens totala vikt. DSSC är konstruerat av lättviktsmaterial och har en hög mekanisk robusthet vilket gör den tålig mot yttre påfrestningar. Detta medför att inget skyddande material måste tillföras för att skydda DSSC så som för kiselcellen. Utan en skyddande glasskiva på kiselcellen så är den viktmässigt likvärdig med DSSC. Multijunction är viktmässigt likvärdig med både DSSC och kiselcellen, dock får endast tre kvadratmeter av multijunctionceller användas på en tävlingsbil vilket resulterar i en mindre totalvikt. Men för att multijunction skall vara ett effektivt alternativ krävs som tidigare nämnt en fokuserandelösning vilket skulle bidra till att vikten skulle öka markant. De tävlingsbilar som idag använder sig av kiselceller väljer att inte skydda dem på grund av den ökade vikten som glasskivan tillför, något som är nödvändigt för resultatet, men vilket innebär en ökad risk för att cellerna ska skadas under tävlingen.

5.1.5 Rekommenderad val

Genom att vikta de tre solcellstyperna i samtliga kategorier har följande slutsatser nåtts. Multijunctionceller var tidigare det självklara valet på grund av sin betydligt högre verkningsgrad. Då den tillåtna ytan för multijunction har halverats genererar kiselcellen mer energi. Multijunctioncellen kan generera minst lika mycket energi, dock krävs i så fall en fokuseringsanläggning som skulle öka både vikt, komplexitet samt kostnad. Tänkvärt är att använda DSSC som dellösning till exempel som fönster då den besitter transparanta egenskaper. Som en huvudlösning klarar DSSC i nuläget inte att tillföra den energi som krävs för att konkurrera mot bilar drivna med de andra två solcellstyperna.

Det bästa alternativet idag, totalt sett till prestanda, ekonomi, miljö och vikt, är monokristallina kiselceller vilket också är den dominerade lösningen bland dagens tävlingsbilar i WSC.

5.2 Resultat placering och styrning

Som framgår i teoriavsnittet så kan upp till 35-40% vinnas vid utnyttjande av en solföljare, vinsterna som kan göras är alltså stora. Dessa vinster görs dock till största delen under morgon och kväll som framgår av Bild 10. Tävlingen pågår mellan 8 och 17 vilket leder till att större delen av tävlingen utspelar sig när solen står högt och förlusterna är låga. Dessutom framgår det att förlusterna är försumbara om vinkel avviker med upp till plus/minus 15 grader från optimal. Problemet är alltså att vinsterna som kan göras mellan 8 till 17 behöver övervinna förlusterna som vinklingen av solcellerna resulterar i.

I bästa fall kan ca 1400 W, se Bilaga B, fås ut från solcellerna. Beaktas beräkningarna i avsnittet om luftmotstånd innebär det att luftmotståndet tar en stor del av energin. Vilket i sin tur betyder att stora vinster kan göras på att optimera solcellsbilens aerodynamik.

Som inses av uträkningarna i avsnittet är det C_D och frontarean som förändras mest i de olika fallen. Med en liten C_D och liten frontarea kan luftmotståndet minskas betydligt. Med vinklade solceller fås en större frontarea och ett större C_D . Med en framtagna bil skulle det gå att simulera vinklingen av solcellerna och ett exakt C_D och en exakt frontarea hade kunnat beräknas. De förenklade beräkningarna tyder dock på att det inte lönar sig att vinkla solcellerna. Den energivinst som kan göras förloras relativt lätt med en försämrad aerodynamik. Istället bör aerodynamiken optimeras så mycket som möjligt och därefter placeras solcellerna. Det enda som behövs ha i åtanke är att alla solceller skall få plats på bilen.

Alternativet skulle vara att forma bilen så att möjlighet fås att placera solcellerna inuti karossen och tillverka delen över solcellerna transparent. Vinklingen av solcellerna skulle då inte påverka luftmotståndet såvida detta inte har gjort frontarean större för att få plats med solcellerna.

Vid placering av solcellerna måste hänsyn tas till den negativa inverkan av skuggningen. För att undvika energiförlust bör karossen byggas och solcellerna placeras så att ingen skuggning uppkommer över dagen. När solcellerna kopplas samman till paneler är det viktigt att dioder kopplas in för att kunna kringgå att hela panelen kortslutas och begränsa energiförlust vid eventuell skuggning.

6. Diskussion

I detta avsnitt har kandidatgruppen valt att diskutera styrkor och svagheter med arbetets metod samt riktning för den fortsatta utvecklingen. Diskussionen lyfter fram problem som kan uppstå till följd av den aktuella utvecklingskurvan och marknadssituationen som finns för dagens solceller.

6.1 Diskussion om metodval

Det är viktigt att förstå varför metoden sker i de steg som den har utförts. Att först börja med en grundlig och mer generell litteraturstudie är av yttersta vikt. Detta för att undersöka samtliga solcellsalternativ samt kunna förstå vilka faktorer som spelar roll vid användning av solceller. Det i sin tur hjälper till att förstå de val som ligger bakom de slutliga lösningar som idag sitter på dagens tävlingsbilar. Genom att sedan studera de tidigare bilarna kan en återkoppling skapas emot de slutsatser som nåtts under litteraturstudier. En sådan återkoppling ger en djupare förståelse för vad som ligger i grund för en lyckad lösning. Risken finns, om studien inleds med att titta på tidigare bilar och lösningar, att nya och kanske effektivare lösningar förbises. Ett tydligt exempel på vad den övergripande litteraturstudie bidrog med är solcellstypen DSSC. Det är möjligt att DSSC idag inte anses vara en konkurranskraftig lösning, men det är troligt om 5-10 år att denna typ av solceller blivit en riktig utmanare till kiselceller. Det kan tyckas tämligen enkelt att idag inse att kiselcellen idag är det bästa alternativet för tävlingsbil genom att bara se på tidigare tävlande och segrare i WSC. Lika viktigt som det är att förstå hur en bil lyckas, lika viktigt är det att förstå varför den lyckas. För att driva utvecklingen framåt krävs det att tidigare lösningar och resultat ständigt ifrågasätts, allt för att hela tiden se till att gränsen för vad som är möjligt ständigt pressas framåt.

Som en del i att driva på utvecklingen av konkurranskraftiga lösningar krävs det också att det införlivas kompetenta personer i projektet. Det är rentav avgörande för resultatet. Intervju är ett effektivt sätt att komma i kontakt med experter och forskare som kan komplettera med spetskunskaper inom berörda områden. Insikten att ens egna kunskaper är långt ifrån tillräckliga nås ganska snabbt. För att komma vidare i projektet är det då nödvändigt att ha kompetenta personer att vända sig till för tips och råd.

En intervju är inte bara en bra källa till information utan även en bra inkörsport för framtida samarbete. Företag som intervjuas är många gånger villiga att sponsra med deras teknik så länge de förstår vad projektet innebär och att det är ett unikt forum för prövandet av ny teknik.

6.2 Diskussion studiens begränsningar

För att utföra korrekta beräkningar av bilens egenskaper krävs en realistisk modell, med andra ord behöver bilens utseende vara bestämt. Under det genomförda arbetet saknades dessa förutsättningar och de framtagna resultaten och beräkningarna blev därför ungefärliga. Hade det funnits en modell hade resultaten från denna varit direkt applicerbara mot bilen och de tveksamheter som finns nu, inte existerat. Trots detta tycks det dock fortfarande att de beräknade resultaten är tillräckliga för att föra välgrundade resonemang och dra kvalitativa slutsatser. De siffror som har använts är tagna från tidigare framgångsrika deltagare och därför är det inte särskilt osannolikt att Chalmers, om de lyckas väl, uppnår liknande siffror. De siffror som är resultatet av beräkningarna för luftmotståndet vid vinkling är så pass övertygande att även om det verkliga resultatet skulle vara en bråkdel så skulle samma slutsatser kunna dras. I beräkningar av luftmotståndet har det endast räknats på värsta tänkbara scenariot. Detta är att solcellspanelarna riktas mot färdriktningen, se Bild 21. Ett annat tänkbart scenario hade varit att panelerna vinklas åt höger eller vänster, detta leder till att frontarean på plattan är minimal och därmed blir luftmotståndet minimalt, se Bild 22. Med andra ord hur panelerna än vinklas så ändras bilens form och strömningen störs, cd och frontarea ökar i båda fallen. Som tidigare nämnts bör detta scenario undvikas så långt som möjligt.

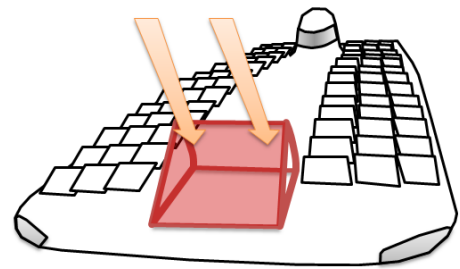


Bild 21: Bil med cellerna lutade framåt

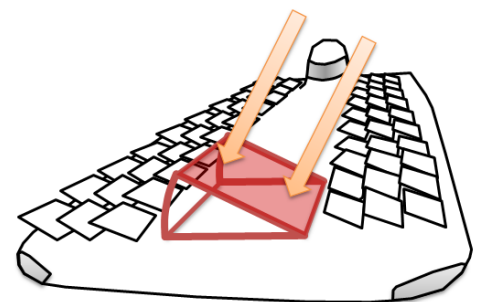


Bild 22: Bil med cellerna lutade åt sidan

Det har också uppstått problem då det varit svårt att hitta information om hur mycket energi som exakt tjänas på att vinkla cellerna. Om tillgång till solceller funnits hade relativt enkla undersökningar och beräkningar kunnat utföras för att se hur mycket energi som förloras på att inte ha optimal vinkel. Istället har information införskaffats om hur mycket energi som kan vinnas på solfångare och olika tabeller som visar hur mycket det finns att vinna under olika tider på dygnet. För att komma fram till ett resultat blev vi i slutändan tvungna att dra en del egna slutsatser. Detta gjordes med antaganden om att de flesta solcellerna väldigt sannolikt kommer att sitta på ovasidan karossen vinklade rakt upp mot himlen. Då kommer troligtvis vinkeln till solen inte avvika mycket mer än 15 grader mellan 8 till 17 på dagen då tävlingen pågår. Slutsatsen blev att relativt stora vinster kan göras under en hel dag men under tävlingstimmarna blir vinsterna mindre. Dessutom sågs hur mycket

luftmotståndet påverkades av olika vinklar. En liten försämring av aerodynamiken resulterar i stora förluster för bilen. Att experimentera med vinklarna på bekostnad av aerodynamiken kan helt enkelt inte löna sig.

6.3 Miljö

De stora tekniska utmaningarna projektgruppen ställts inför i dagens samhälle kretsar i hög grad kring hållbar utveckling och en sundare användning av miljö och natur. Då samhället i stora delar byggts upp på fossila bränslen och materialval baserade på ekonomi och tillgänglighet i första hand krävs det ordentliga satsningar på potentiell teknik och vågade val för att främja utvecklingen. Trots att multijunctionceller ger renare energi än fossila bränslen byggs de upp av arsenik, ett ämne som, liksom asbest, valts på grund av sina unika materialegenskaper men för biologiska system har förödande konsekvenser. Det fundamentala syftet för WSC och anledningen till att det startades var för att stimulera utvecklingen av hållbara energikällor. Det är befogat att ifrågasätta multijunctions vara eller icke vara i WSC. Att förespråka en hållbar framtid och samtidigt satsa miljoner på solceller som multijunctionceller kan upplevas som ett rent hyckleri. I flera år har samhället kämpat med att fasa ut gifter så som arsenik och en ökad användning av multijunctionceller kan då upplevas som ett steg tillbaka i utvecklingen. I en artikel om Tokai Universitets vinst i WSC 2009 kommenterade Toshihige Hamano, VD för Sharp som 2009 var leverantör av multijunctionceller till deras tävlingsbil, valet av multijunctionceller som följande:

“By making the most of knowledge to be obtained from the coming race, we would like to expand the application of our solar cells, but we are not planning to use the space cell for normal vehicles. ... To use the space cell on earth, it is necessary to develop a substitute for arsenic, which is used for the middle cell, or to establish a recycling system for it. ... This time, our solar cell is recyclable, so we decided to use it on earth as an exception.¹”

Oavsett om det går att återvinna dessa celler så bör en ökad användning av arsenik undvikas. Detta för att en ökad hantering automatiskt alltid medför en ökad risk för arsenikutsläpp och som tidigare nämnt så kan även små utsläpp få förödande konsekvenser. Frågan är egentligen hur en ökad satsning på potentiella 3:e generationens solceller skall uppnås då andra generationen fortfarande inte löser miljökraven, och första generationen börjar nå sin maximala potential. Kan fokus flyttas från prestanda till hållbarhet och samtidigt behålla intresset för tävlingen? Kandidatgruppen tror på DSSC som framtida solceller och som en mer hållbar lösning. Dock är verkningsgraden för dessa för

¹ (http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/, Techon, 2013)

dålig och räcker inte till för att konkurrera med de andra solcellsalternativen. Idag så är det upp till varje deltagande lag att ta ställning till vad som de anser vara viktigast.

6.4 Kiselcellernas dominans

Idag kan det konstateras att kiselcellerna står inför samma problematik liknande den som finns för dagens bränslemotorer. Den så kallade Sterlingmotorn har en mycket högre teoretisk verkningsgrad än vad den klassiska förbränningsmotorn, som idag används i våra bilar, har. Trots Sterlingsmotorns potential är det ändå förbränningsmotorn som är den överlägset dominerande lösningen. Förbränningsmotorn uppfanns först vilket har gjort industrin och marknaden så pass långt utvecklad kring förbränningsmotorn att det nästan är omöjligt för nya lösningar att slå sig in på den dominerade marknaden. Lite samma utveckling har skett på solcellsmarknaden men istället för förbränningsmotorn så är det kiselceller som är dominerande. Idag finns det mängder av tillverkare av kiselceller och det flesta solcellsbaserade energilösningar bygger på kiselteknik. Denna utveckling riskerar att hämma utvecklingen av nya solceller som har större potential än vad kiselceller besitter. Därför kan det ses som att högskolor som Chalmers har ett ansvar att hela tiden söka efter nya lösningar som kan utmana kiselceller. Det är även viktigt att staten ser till att satsa mer pengar på ny solcellsrelaterad forskning samtidigt som solceller subventioneras för privatbruk, allt för att se till att stimulera marknaden i en hållbar riktning. Det är dags att dra lärdom från misstagen som begicks för förbränningsmotorn och undvika att solceller går samma öde till mötes.

6.5 Solcellsteknik för stationära system

De flesta begränsningar och problem som finns för solcellerna till en tävlingsbil idag beror på att solceller och teknik för solceller bygger på stationära system. Med ett stationärt system menas t.ex. solceller monterade på ett hustak. För ett stationärt system är vikt en ganska irrelevant variabel medans vikt för en tävlingsbil i WSC är av yttersta relevans, till och med avgörande för vinst eller förlust. Detta innebär t.ex. att kiselcellerna på en tävlingsbil blir extremt utsatta då den skyddande glasskivan, som vanligtvis sitter över kiselcellerna, måste avlägsnas för viktminskning. Det räcker med att något tappas eller att någon sätter lite tryck på en cell för att den ska skadas. Med kiselceller till ett sammanlagt värde på 250 000 på bilen kan det tyckas nödvändigt att de borde skyddas på något sätt. Idag skyddas cellerna ej vilket är en medveten risk då vikten med glasskiva är oacceptabel. Även solcellslösningar med multijunctionceller drabbas av den stationära viktproblematiken. Dessa celler togs först fram av NASA för att sitta på deras satelliter i rymden och har olika fokuserings- och reglersystem för att uppnå enastående verkningsgrader. För att multijunctionceller ska kunna konkurrera med endast tre kvadratmeter i WSC krävs en kompletterande fokuseringsanordning.

Detta innebär en avsevärd ökning av vikt men framförallt ett ökat luftmotstånd vilket leder till att det idag inte skulle vara effektivt lösning. Detta utesluter dock inte att det kan finnas nya sätt som kan kringgå problematiken med luftmotstånd och vikt. Oavsett om solcellerna skall sitta på en bil, ett hus eller en satellit så behöver det ske ytterligare framsteg för att minska vikt och storlek på kompletterande utrustning för samtliga solceller.

6.6 Hur arbetet kunnat förbättrats

I retrospektiv är det oftast lättast att inse vad som hade behövt göras för att ha genomfört ett så bra arbete som möjligt. Gruppens analys av arbetet som gjorts är att fakta och slutsatser som tagits fram har varit väldigt värdefulla. Något som gruppen är överens om dock är att en tidigare kontakt med fler just nu deltagande lag i tävlingen WSC hade varit väldigt givande. Möjligheten att få se hur andra lag löst problem ger både en insikt i vilka problem som faktiskt kommer behövas lösas och ett förslag på hur det kan lösas. Många av de insikter som projektet har mynnat ut i hade troligtvis kunnat fastslås tidigare om fler kontakter med andra lag hade kunnat upprättats.

Gällande andra lag så är det alltid ett problem att få ut de hårt anförskaffade kunskaperna, eftersom det är dessa insikter som ofta leder till en vinnande bil. Ett ledande lag vill gärna hålla sina viktigaste kunskaper hemliga. Detta hade dock också varit ett moment att göra annorlunda, nämligen det att mycket tidigare och mer omfattande studera de vinnande bilarnas konstruktion och de förlorande bilarnas problem. Samtidigt som det är svårt att utan att veta någonting om solceller sätta sig in i solcells-bilar och väga fördelar och nackdelar så borde detta arbete startats så tidigt som möjligt. För att gå djupare in på vad som kunnat gjorts annorlunda hade kontakten Jonathan Rice behövts utnyttjats mer. Användning av han, vars position är projektledare på Formula Student, hade kunnat ge projektgruppen en klarare bild av problemen som stods inför och vad projektgruppen skulle behöva fokusera uppmärksamheten på. Speciellt eftersom att Formula Student just detta år bestämt sig för att gå över till en eldriven bil från en bensindriven.

En observation som gjorts är att arbetet ofta dragit ut på tiden till texterna. Att upprätta interna deadlines och faktiskt hålla dem är av högsta prioritet för att arbetet ska röra sig framåt. Ett problem är när arbetet leder till att t.ex. en undersökning måste göras när projektet har för kort tid kvar för att genomföra en sådan undersökning. En tidig kartläggning om var problemen ligger är lika viktig som att hitta en lösning på problemen. Sist men inte minst hade det varit en fördel att få tag på riktiga solceller att jobba med. Även om mycket fakta går att få tag på via internet, intervjuer, böcker etc. så faktiska exemplar av de olika solcellerna kunnat bidra till problemlösningen, och inte minst

kreativiteten. Förutom dessa insikter om vad som hade kunnat gjorts bättre i arbetet så är gruppledammarna mycket nöjda med resultatet.

6.7 Rekommendationer för fortsatt arbete

Utifrån vad gruppen har insett och lärt sig av detta arbete kan vissa rekommendationer för fortsatt arbete ges. Detta kan summeras i två viktiga punkter: fördjupning i andra lag och större inriktning på energioptimering. Att inte utnyttja de andra cirka 40 lagens framsteg och slutsatser under utvecklingens gång vore att kasta bort mycket potentiell värdefull information. Att kontinuerligt studera de andra lagen, inte bara under förundersökningarna utan även under det faktiska byggandet av Chalmers tävlingsbil, är således av hög relevans. I detta område borde även en djupare efterforskning i gamla tävlingar ske, där information om varför vissa lag misslyckades. Den andra rekommendationen till fortsatt arbete är som sagt fördjupningen i aerodynamiken och rullmotståndet. I dagsläget skulle ännu en fördjupning inom solceller inte bidra med så mycket mer användbar information och insikt än vad detta arbete kommit fram till.

Frågor att ställa till andra WSC-lag

- Vilket Cd-värde på bilen
- Hur stor effekt fås ut
- Hur mycket väger bilen
- Hur högt rullmotstånd
- Vilket volt-tal plockas ut ur solcellerna
- Vilken batterieffekt

7. Slutsats

Syftet med rapporten var att finna den mest lämpade solcellen och undersöka den optimala placeringen av cellerna på en tävlingsbil. Dessutom skulle lönsamheten av att styra solcellerna undersökas för att få ut högsta möjliga effekt. Det som framgått under arbetets gång är att i stort sett alla bilar använder sig av samma typ av solceller. För att utnyttja energin på bästa sätt finns dock bara ett fåtal olika motorer och batterier att tillgå, med andra ord kan i stort sett alla tävlande teoretiskt få ut samma effekt. Den svåraste uppgiften är att minska förlusterna för att energieffektivisera bilen. Enligt beräkningarna för förluster kan det tydligt ses att luftmotståndet och rullmotståndet utgör största andelen av förlusten, för att lyckas i tävlingen måste alltså aerodynamiken och vikten på bilen optimeras. För att optimera aerodynamiken och därmed få ett så lågt C_D som möjligt krävs att solcellerna inte stör strömningen, att vinkla och styra är därmed ett dåligt alternativ. Det kan i samma mån vara problematiskt att montera solfokuserare på karossen om det sker på bekostnad av aerodynamiken. När det kommer till placeringen utav solcellerna skall dessa göras efter att bilen har utformats, med andra ord tas ingen hänsyn till placeringen utav solcellerna när utformningen görs bortsett från att sex kvadratmeter solceller ska kunna rymmas på bilen.

Det finns trots allt mycket energi att vinna på att styra solcellerna och ännu mer av att samtidigt använda solfokuserare, så länge aerodynamiken inte påverkas mer än den mängd energi som vinnas av en sådan lösning. Detta görs exempelvis genom en transparent kaross, något som skulle möjliggöra styrningen utan att störa bilens form. På samma sätt kan solfokuserare placeras under karossen, negativa aspekter med en sådan lösning är att frontalarean, med stor sannolikhet kommer att bli större för att skapa utrymme för tekniken.

Karossen måste, vid en eventuell styrning, göras såpass stor att den också klarar av vinklingen av cellerna. Detta kan göra att bilen inte bara får en större frontalarea utan att den också blir tyngre. En tänkbar lösning för att kringgå problemet är att använda multijunctionceller. Dessa celler har enligt regelverket en begränsning på tre kvadratmeter, detta på grund av cellernas höga verkningsgrad. Med endast tre kvadratmeter solceller att placera ut och vinkla kan den slutliga formen på karossen göras mer strömlinjeformad istället för att behöva rymma sex kvadratmeter solceller med bekostnad på aerodynamiken. Precis som i denna rapport när vinsten av att vinkla solcellerna vägdes mot den försämrade aerodynamiken bör fördelarna med en transparent kaross vägas mot en försämrad aerodynamik och eventuell viktökning i nästa steg av projektet.

Andra faktorer som är avgörande för slutresultatet är förare och supportbilarna. Bland de just nu ledande lagen i tävlingen används inhyrda erfarna rallyförare för att minimera förluster som den mänskliga faktorn bidrar till. Vissa lag använder sig även av en bakomliggande bil med datorutrustning som beräknar den energieffektivaste hastigheten för bilen kontinuerligt.

Sammanfattning: Sex kvadratmeter solceller kommer ge kraft nog att driva en hårtork, inte mer. Energitillgång skiljer sig knappt mellan de olika tävlande, vilket gör att förlustreducering är det viktigaste att fokusera på. Att få ner luftmotstånd och rullmotstånd är enligt projektgruppen den största utmaningen för ett vinnande koncept. Det behövs alltså en bil med kiselceller och optimerad aerodynamik, däck med minsta möjliga rullmotstånd och så låg vikt som möjligt.

.

8. Referenser

Baranzahi, A. (2013). *Bok i Solteknik*. Norrköping: UU.

Bengt Ridell, R. N. (2011). *Solar Power and Solar Fuels Synthesis Report*.

<http://exegeer.com/dye-sensitized-solar-cells>. (2013). *Exegeer*. Hämtat från <http://exegeer.com/dye-sensitized-solar-cells>

<http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/how-solar-panels-work/>. (2013). *Exploring Green Technoly*. Hämtat från <http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/how-solar-panels-work/>

<http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/technology/monocrystalline-solar-cells/>. (den 21 05 2013). *Exploring Green Technology*. Hämtat från <http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/technology/monocrystalline-solar-cells/>

<http://greenliving.nationalgeographic.com/figure-correct-angle-solar-panels-2584.html>. (2013). *Greenliving nationalgeographic*. Hämtat från nationalgeographic: <http://greenliving.nationalgeographic.com/figure-correct-angle-solar-panels-2584.html> 2013

<http://new.aurorasolarcar.com/Cars/Aurora101>. (2013). *Aurora 101; Aurora*. Hämtat från Aurora: <http://new.aurorasolarcar.com/Cars/Aurora101> den 21 05 2013

<http://phys.org/news/2013-02-multijunction-solar-cell-efficiency-goal.html>. (2013). <http://phys.org/news/2013-02-multijunction-solar-cell-efficiency-goal.html>. Hämtat från <http://phys.org/news/2013-02-multijunction-solar-cell-efficiency-goal.html> den 12 02 2013

http://pingpong.ki.se/public/pp/public_courses/course06238/published/1292428054230/resourceId/3969767/content/infoweb/node-2278687/Examensarbete%20bm-utbildningen%2007.pdf. (2013). *Examensarbete*. Hämtat från http://pingpong.ki.se/public/pp/public_courses/course06238/published/1292428054230/resourceId/3969767/content/infoweb/node-2278687/Examensarbete%20bm-utbildningen%2007.pdf 2013

http://press.porsche.com/vehicles/08_press_kits/pdf/2008_911_Carrera_4_Carrera_4S/2008_Carrera_4_Carrera_4S_Coupe_Long.pdf. (2013). *Porsche*. Hämtat från Porsche: http://press.porsche.com/vehicles/08_press_kits/pdf/2008_911_Carrera_4_Carrera_4S/2008_Carrera_4_Carrera_4S_Coupe_Long.pdf den 13 05 2013

http://solarcar.engin.umich.edu/pastteams/multimedia/solex_summer2007.pdf. (2013). *Solarcar*. Hämtat från http://solarcar.engin.umich.edu/pastteams/multimedia/solex_summer2007.pdf

<http://solarcar.engin.umich.edu/the-car/>. (2013). *Solarcar*. Hämtat från <http://solarcar.engin.umich.edu/the-car/>

<http://solarlab.se/solpanel/faq2#answer111>. (2013). *Solar Lab Sweden*. Hämtat från Solar Lab Sweden: <http://solarlab.se/solpanel/faq2#answer111> den 26 03 2013

<http://solarlab.se/solpanel/knowledgebase/index/view/faq/om-man-inte-kan-placera-sin-solcell-optimalt-hur-mycket-sjunker-effekten-d-/>. (2013). *Solar Lab Sweden*. Hämtat från Solar Lab Sweden: <http://solarlab.se/solpanel/knowledgebase/index/view/faq/om-man-inte-kan-placera-sin-solcell-optimalt-hur-mycket-sjunker-effekten-d-/> den 26 03 2013

http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/. (2013). Hämtat från http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/ den 22 03 2013

http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/. (2013). *Techon*. Hämtat från http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/ den 03 03 2013

http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/. (2013). *Techon*. Hämtat från http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090908/175016/

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/PVeff%28rev110826%29.jpg>. (2013). Hämtat från <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/PVeff%28rev110826%29.jpg> den 12 01 2013

<http://www.docstoc.com/docs/29052420/The-WORLD-Solar-Challenge---The-Background>. (2013). *Docstoc*. Hämtat från <http://www.docstoc.com/docs/29052420/The-WORLD-Solar-Challenge---The-Background>

http://www.dye-solar-cell.com/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=3&Itemid=55. (2013). *Dye Solar Cells*. Hämtat från http://www.dye-solar-cell.com/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=3&Itemid=55

[http://www.g24i.com/pages, f. \(u.d.\). *g24i*](http://www.g24i.com/pages,f.(u.d.).g24i). Hämtat från <http://www.g24i.com/pages,faqs,74.html> 2013

http://www.hsr.se/VKJG_bilen_och_miljon. (2013). *Håll Sverige Rent*. Hämtat från Håll Sverige Rent:
http://www.hsr.se/VKJG_bilen_och_miljon den 13 02 2013

http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf.
(2013). *Irena*. Hämtat från
http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf

<http://www.nma.gov.au/collections-search/display?irn=37958>. (2013). *Nma*. Hämtat från
<http://www.nma.gov.au/collections-search/display?irn=37958>

<http://www.solarracing.org/2013/01/01/list-of-teams-participating-in-the-2013-world-solar-challenge/>. (2013). *Solar Racing*. Hämtat från <http://www.solarracing.org/2013/01/01/list-of-teams-participating-in-the-2013-world-solar-challenge/>

<http://www.solartradingpost.com/solar-panel-angle.html#>. (2013). *Solar Trading Post*. Hämtat från
Solar Trading Post: <http://www.solartradingpost.com/solar-panel-angle.html#>, 2013

<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/Energiberakningar/>. (2013). *Elforsk AB*.
Hämtat från Elforsk AB:
<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/Energiberakningar/>, den 19 03 2013

<http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/moduler/>. (2013). *Elforsk AB*. Hämtat från
Elforsk AB: <http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/moduler/> den 19 03 2013

http://www.worldsolarchallenge.org/about_wsc. (2013). *World Solar Challenge*. Hämtat från
http://www.worldsolarchallenge.org/about_wsc

http://www.worldsolarchallenge.org/page/view_by_id/1. (2013). *World Solar Challenge*. Hämtat från
http://www.worldsolarchallenge.org/page/view_by_id/1

Mauk, M. G. (2003). *Silicon solar cells: Physical metallurgy principles*.

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Higher Education.

9. Bilagor

9.1 Bilaga A

Exempel på frågor som ställdes under intervjuer för solceller

- Vilken solcell tror du är bäst lämpad för uppgiften?
- Hur fungerar respektive solcell och hur är de uppbyggda?
- Vilka fysiska variabler besitter de olika solcellerna? (flexibel, transparent, tunn, vikt, etc...)
- Hur påverkas solcellen av diffust ljus? (en molning dag)
- Behöver solcellen kompletterande fokusering för att åstadkomma en bra verkningsgrad? Är detta mer relevant vissa solceller än andra?
- Pris (generellt) ?
- Solcellernas miljöpåverkan (framställning och slutfas)?
- Vad har modul- respektive cellnivå för inverkan på effektiviteten?
- Hur är robustheten för respektive solcell?
- Hur påverkar solljusets infallsvinkel verkningsgraden?
- Har du tillgång till material som kan vara användbart för projektet?
- Har du något tips på andra solceller som kan vara intressanta för ändamålet?
- Vet du vart vi kan vända oss för vidare information eller tips på personer vi kan kontakta?

9.2 Bilaga B

Tidigare intressanta bilar i WSC

Lag	Bilnamn	Placering	Toppsh. [km/h]	Snittsh. [km/h]	Cd	Typ av solceller	Max-watt	Solc. Effektivitet	Solc. area [m ²]
University of Michigan	M-Pulse	3:a 2001	N/A	87.37	N/A	Multijunction	N/A	N/A	N/A
	Spectrum	Gick ej i mål 2003	N/A	N/A	N/A	Multijunction	N/A	N/A	N/A
	Momentum	3:a 2005	74.35	90.03	N/A	Multijunction	N/A	N/A	N/A
	Continuum	7:a 2007	N/A	N/A	N/A	Multijunction Ljuskoncentrator	N/A	N/A	N/A
	Infinium	3:a 2009	140	90.49	N/A	Multijunction Ljuskoncentrator	N/A	N/A	N/A
	Quantum	3:a 2011	169	84.33	<0.1	Kisel	<1470	N/A	N/A
TU Delft	Nuna 1	1:a 2001 (32:39)	N/A	91.81	N/A	Multijunction	N/A	N/A	
	Nuna 2	1:a 2003 (32:05)	170	97.02	N/A	Multijunction (trippel)	2469	24.5%	9
	Nuna 3	1:a 2005 (29:11)	130	103	0.07	Multijunction (trippel)	2419	27%	8
	Nuna 4	1:a 2007 (33:00)	142	90.87	0.05	Multijunction (trippel)	1814	27%	6
	Nuna 5	2:a 2009 (32:38)	145	91.9	0.025	Multijunction (trippel)	2284	34%	6
	Nuna 6	2:a 2011 (33:50)	N/A	88.6	0.0225	Monokrystalint Kisel	1478	22%	6
Tokai University	Tokai Challenger	1:a 2009 (29:49)	160	100.54	N/A	Triple-junction (InGaAs)	1800	N/A	6
	Tokai Challenger	1:a 2011 (32:45)	160	91.54	N/A	HIT solceller	1320	N/A	6
Aurora	Southern Aurora	1:a 1999	122	72.96	N/A	Multijunction	1500	N/A	6
	Southern Aurora	2:a 2001	122	90.26	N/A	Multijunction	1500	N/A	6
	Southern Aurora	2:a 2003	122	91.9	N/A	Multijunction	1500	N/A	6
	Southern Aurora	2:a 2005	122	92.03	N/A	Multijunction	1500	N/A	6
	Aurora Evolution	3:a 2007	152	85	0.08	Multijunction	N/A	N/A	6
	Aurora Evolution	6:a 2009	N/A	70.82	0.08	Monokrystalina kisel solceller	1250	N/A	6
	Aurora Evolution	7:a 2011	N/A	61.5	0.08	Monokrystalina kisel solceller	1250	N/A	6