

System för funktionstest av en solpanels åldring

Kandidatarbete inom elkraftteknik



Anton Apelberg
Amelia Bergum
Cajsa Jacobsson
Nathalie Kucharski
Hugo Palmgren
Alve Sonnerup

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, VT 2023
Handledare: David Steen
Examinator: Jimmy Ehnberg

System för funktionstest av en solpanels åldring
Anton Apelberg, Amelia Bergum, Cajsa Jacobsson, Hugo Palmgren, Nathalie Kucharski, Alve Sonnerup

© Anton Apelberg, Amelia Bergum, Cajsa Jacobsson, Nathalie Kucharski, Hugo Palmgren, Alve Sonnerup, 2023.

Handledare: David Steen, Avdelningen för Elkraftteknik
Examinator: Jimmy Ehnberg, Avdelningen för Elkraftteknik

Kandidatrapport 2023
Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för Elkraftteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete skrivet på Chalmers tekniska högskola vid avdelningen för Elkraftteknik. Arbetet utfördes av Anton Apelberg, Amelia Bergum, Cajsa Jacobsson, Nathalie Kucharski, Hugo Palmgren, Alve Sonnerup och som studerar på utbildningarna Maskinteknik, Automation och mekatronik samt Elektroteknik på Chalmers tekniska högskola. Först och främst vill vi framföra ett stort tack till vår handledare David Steen för all vägledning och alla givande samtal under hela projektarbetets gång. Dessutom vill vi rikta ett tack till CASE-labbet och personerna som är engagerade där för sitt trevliga bemötande och all hjälp vi fått. Slutligen vill vi tacka vår examinator Jimmy Ehnberg för hans snabba svar och hjälpsamhet när det kom till inköp av nödvändiga komponenter.

Abstract

Due to the ongoing climate and energy crisis, combined with cost reductions and political subsidies, the sales of solar panels have increased significantly in the past few decades. This has resulted in a large customer base interested in generating their own energy and contributing to the grid with local energy production. The growing customer base and the fact that solar panels have an estimated lifespan of 30 years may give rise to a growing second-hand market. A project has been carried out to meet the increasing demand and easily test the performance of aging solar panels. The goal was to develop a conceptual measurement tool to help consumers identify the performance of individual panels. In addition, manual measurements were carried out on existing panels to gain a basic understanding of the subject and investigate measurement methods for future implementation. After thorough work developing a circuit that meets the functional requirements and based on the manual measurements, a first prototype was presented. The project has resulted in a functioning model that can test the performance of individual solar panels, and the results obtained can form the basis for further product development work with the aim of realizing the concept in the future.

Sammanfattning

På grund av den pågående klimat- och energikrisen, kombinerat med kostnadsminskningar och politiska subventioner, har försäljningen av solpaneler ökat markant under de senaste årtiondena. Detta har resulterat i en stor kundbas som är intresserad av att generera sin egen energi och bidra till elnätet med lokal elproduktion. Den växande kundbasen och faktumet att solpaneler har en beräknad livslängd på 30 år kan ge upphov till en växande andrahandsmarknad. För att möta den ökande efterfrågan och enkelt kunna testa prestandan på åldrande solpaneler har ett projektarbete genomförts. Målet var att utveckla ett konceptuellt mätverktyg för att hjälpa konsumenter att identifiera prestandan på enskilda paneler. Därtill omfattade manuella mätningar på befintliga paneler för att få en grundläggande förståelse för ämnet samt undersökning av mätningsmetoder för framtida implementering. Efter grundligt arbete med att utveckla en krets som uppfyller de funktionella kraven och baserat på de manuella mätningarna presenterades en första prototyp. Projektet har resulterat i en fungerande modell som kan funktionstesta enskilda solpaneler och de erhållna resultaten kan ligga till grund för vidare produktutvecklingsarbete med målsättningen att realisera konceptet i framtiden.

Nomenklatur

Nedan presenteras nomenklaturen av beteckningar och förkortningar som använts i rapporten.

MPP	Maximum Power Point
I_{MPP}	Ström vid MPP
I_{SC}	Kortslutningsström
P_{MPP}	Effekt vid Maximum Power Point
R_{CH}	Karaktäristisk resistans
R_S	Serieresistans
R_{SH}	Shuntresistans
STC	Standard Testing Conditions
V_{MPP}	Spänning vid MPP
V_{OC}	Obelastad spänning

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Problem	1
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Etiska och samhällliga aspekter	2
1.4.1	Miljöpåverkan vid nyproduktion	3
1.4.2	Arbetsförhållanden för tillverkare	3
1.4.3	Återvinning av tunnfilmssolceller	3
2	Teori	4
2.1	Solcellens struktur och funktion	4
2.2	Olika typer av solceller	5
2.2.1	Kristallina solceller	5
2.2.2	Tunnfilmsolceller	6
2.3	Spektral strålning och luftmassa	6
2.4	IV- och PV-kurvor	7
2.4.1	Faktorer som påverkar solcellens operativa prestanda	8
2.4.2	Inre resistanser hos solpaneler	9
2.4.3	Solpanelers serie- och parallellkoppling internt och externt	10
2.5	Metoder för uppmätning av IV-kurvor	11
2.5.1	Variabel resistans	11
2.5.2	DC/DC omvandlare	12
2.5.3	Elektronisk last	12
2.6	Garanti och degradering	13
2.7	Miljöförhållandens påverkan	13
2.8	Cellsprickor	14
2.9	Ström- och spänningssäkerhet	14
2.9.1	Överbelastade komponenter	14
2.9.2	Säkerhet för människor	14
3	Metod	15
3.1	Information och litteraturinsamling	15
3.2	Tillvägagångssätt för mätningar	16
3.2.1	Mätobjekt	17
3.3	Manuella utomhustester	17
3.4	Manuella inomhustester	18
3.5	Framtagning av prototyp	18
3.5.1	Ursprungskrets	18
3.5.2	Spänningsmätning	19
3.5.3	Strömmätningar	20
3.5.4	Strömsäkerhet	20
3.5.5	Testning av ström och spänningsmätning med spänningsaggregat	21
3.5.6	Slutgiltig prototyp	21
3.5.7	Val av elektriska komponenter	22
3.6	CAD-modellering	23
3.7	Prototypmätningar	23
3.8	Jämförelser med datablad	24

4	Resultat	25
4.1	Skickutvärdering av solpaneler	25
4.1.1	Solpanel 1 (FS-380)	25
4.1.2	Solpanel 2 (FS-380)	26
4.1.3	Solpanel 3 (FS-380)	26
4.1.4	Solpanel 4 (FS-380)	27
4.1.5	Solpanel 5 (FS-380)	27
4.1.6	Solpanel 6 (Solibro)	27
4.2	Färdigställd prototyp	28
4.3	Mätresultat för solpanel 1	29
4.3.1	Manuell mätning	29
4.3.2	Prototyp	30
4.4	Mätresultat för solpanel 2	30
4.4.1	Manuell mätning	30
4.4.2	Prototyp	31
4.5	Mätresultat för solpanel 3	32
4.5.1	Manuell mätning	32
4.5.2	Prototyp	33
4.6	Mätresultat för solpanel 4	34
4.6.1	Manuell mätning	34
4.6.2	Prototyp	35
4.7	Mätresultat för solpanel 5	36
4.7.1	Manuell mätning	36
4.7.2	Prototyp	37
4.8	Mätresultat för solpanel 6	38
4.8.1	Manuell mätning	38
4.8.2	Prototyp	39
4.9	Inre resistanser	40
4.10	Jämförelse mellan förväntad och uppmätt verkningsgrad	41
5	Diskussion	43
5.1	Verifiering av prototypens prestanda i jämförelse med de manuella mätningarna	43
5.2	Analys av prototypresultat och datablad	43
5.3	Analys av elektriska parametrar	45
5.4	Felkällor	46
5.4.1	Generella felkällor	46
5.4.2	Felkällor vid utomhusmätningar	46
5.4.3	Felkällor vid inomhusmätningar	46
5.4.4	Felkällor för manuella mätningar	47
5.4.5	Felkällor för prototypen	47
5.5	Mätsystem och vidareutveckling	47
5.5.1	Fler och säkrare parametrar	47
5.5.2	Komprimering	48
5.5.3	Reducera brus	48
5.6	Framtida användning av mätverktyget	48
5.6.1	Mätverktyg som beslutsunderlag	48
5.6.2	Identifiera underpresterande moduler	49
5.7	Reflektioner	50
6	Slutsats	51
7	Källförteckning	52

1 Inledning

I fotspåren av kriget i Ukraina har priset på el ökat markant och satt press på företag och hushåll. En energiomställning har pågått under en längre tid och efterfrågan på solpaneler har vuxit stadigt. Installationen av nätanslutna solpanelsanläggningar har ökat under flera år [1] men de senare oroligheterna i omvärlden har ytterligare ökat intresset för el och energiproduktion [2]. Engagemanget har ökat inom allt från optimering, utbyggnad av produktion samt att ge nytt liv till begagnade artiklar så som solpaneler samt batterier. Det kan handla om att hitta nya användningsområden för till exempel batterier eller låta solpaneler producera el i fler år än vad som initialt var tänkt.

Det finns för närvarande begränsad forskning om hur åldring av solpaneler påverkar dess effekt, delvis på grund av att den största del som blivit installerad för privat bruk först nu når slutet på sin uppskattade livslängd [3]. Att köpa solpaneler är en stor investering, och utan tillförlitlig fakta om hur åldrandet påverkar funktionen kan det upplevas osäkert att investera i tidigare använda solceller. Detta begränsar möjligheten för att en andrahandsmarknad ska etableras, där både privatpersoners ekonomi samt miljön gynnas. Ett verktyg som med säkerhet kan uppskatta åldring och dess effekt på prestandan hos solpaneler hade därmed kunnat göra en andrahandsmarknad attraktiv.

Ämnet som ska undersökas i detta projekt är hur åldring påverkar solpanelers prestanda. Livslängden för en solpanel beräknas vara mellan 30-40 år, men det finns studier som tyder på att den kan vara betydligt längre [4]. Dessutom har tester indikerat att lägre instrålning samt temperatur är fördelaktigt när det kommer till åldring av solpaneler [5]. Detta tyder på att livslängden kan vara betydligt längre i klimatet som råder här i Sverige, och är intressant att undersöka. Indikationerna på att livslängden är längre har skapat ett ekonomiskt intresse för att investera i begagnade solpaneler. För närvarande utförs ofta en okulär besiktning vid köp av begagnade solpaneler, vilket kan vara bristfälligt i bedömningen av solpanelens skick. Detta gör det svårt för köparen att avgöra om solpanelen har åldrats väl eller om det finns interna fel. Eftersom intresset för privatbruk har ökat är det relevant att undersöka hur prestandan påverkas av åldrande.

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att utveckla ett lätthanterligt mätsystem som kan genomföra funktionstester utifrån ett åldringsperspektiv på enskilda solpaneler. Därtill analysera resultaten och jämföra mot producenters datablad för att komma till välgrundade slutsatser om solpanelens prestanda.

1.2 Problem

En prototyp av ett verktyg ska utvecklas för att kunna mäta åldringen av solpaneler. Den ska vara mobil samt kapabel till att funktionstesta enskilda solpaneler. Mätvärdena från detta verktyg bör också kunna användas för att se hur solpanelens prestanda skiljer sig från den prognos som finns i producentens datablad. Problemet blir alltså att designa ett koncept och tillhörande metodik som pålitligt kan beskriva solpanelers prestanda.

1.3 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att enbart studera tunnfilmssolceller där majoriteten varit i bruk i Grekland. Detta eftersom det var solpaneler av denna typ som var tillgängliga vid projektets uppstart. Avgränsningen beror också på att olika typer av solceller har olika materiella egenskaper. Således ger undersökning av en typ mer jämförbara resultat.

Projektet är begränsat till att undersöka ett mindre antal tunnfilmssolceller, 6 stycken. Analysen av solcellerna fokuseras främst på deras ålder och elektriska prestanda. Detta för att begränsa antalet åldringsparametrar och möjliggöra standardiserade jämförelser. Studien utgår även ifrån att solpanelernas datablad och tillhörande information är pålitlig och kan användas som referens.

Projektets huvudfokus är att utveckla ett mätverktyg för att analysera effektproduktionen av solpaneler. Detta sker genom att utföra tester både utomhus och i testmiljö genom att samla in och analysera relevant data och utveckla ett mätsystem som kan automatisera processen. På grund av säkerhetsaspekter vid arbete med höga spänningar utförs mätningar huvudsakligen på enstaka solpaneler, inte strängar med flera enheter. Målet med projektet är att ta fram en första prototyp som kan ligga till grund för vidare produktutveckling i framtiden.

Sammanfattningsvis är detta kandidatarbetets avgränsningar:

- Tester kommer endast genomföras på tunnfilmssolceller men verktyget som ska tas fram ska fungera på alla typer av solpaneler.
- Ett begränsat antal solpaneler om sex stycken kommer att undersökas.
- Mätresultat av solpanelers prestanda kommer enbart utgöras av hur den elektriska verkningsgraden förhåller sig från dess tillhörande datablad.
- Framtagandet av mätsystemet är arbetets primära fokus tillsammans med utvecklandet av en fungerande prototyp.
- Tester utförs enbart på specifika solpaneler och inte på strängar med flera enheter.

1.4 Etiska och samhällsliga aspekter

Syftet med detta projekt är att ta fram ett konceptuellt verktyg för att undersöka hur tunnfilmssolcellers prestanda har påverkats av dess åldring. Från detta kan eventuella slutsatser dras kring huruvida konsumenter borde behålla sina nuvarande celler eller om kassering och inköp av nya är mer kostnadseffektivt. Det är viktigt att notera att resonemang kring detta ur enbart ett effekt- eller kostnadsperspektiv kan leda till försummelse av andra parametrar som bör beaktas. Därför kommer detta kapitel beröra viktiga etiska och samhällsliga frågor kring tunnfilmssolceller, ur både ett hållbarhetsperspektiv och socioekonomiskt perspektiv.

1.4.1 Miljöpåverkan vid nyproduktion

Enligt svenska energimyndigheten produceras knappt 70 % av världens solpaneler i Kina [6] där fossila energikällor utgör en stor del av landets totala energiproduktion, dryga 80 % enligt organisationen ourworldindata [7]. Energiåterbetalningstid är ett sätt att uppskatta när solceller producerat mer energi än vad som förbrukats vid tillverkning. För solcellsanläggningar i Sverige brukar detta uppskattningsvis ligga mellan två till tre år [6]. Däremot måste en hel del aspekter vägas in för att få fram det här resultatet och det kan variera stort från cell till cell.

1.4.2 Arbetsförhållanden för tillverkare

I november 2022 tog USA beslut om att blockera mer än tusen leveranser av solpaneler från Kina [8] med hänvisning till uppgifter om att landet utnyttjat tvångsarbete i sin produktion. Världsamfundet har anklagat den kinesiska staten för att inskränka folkgruppen Uigurers mänskliga rättigheter i provinsen Xinjiang och i augusti 2022 publicerade FN en rapport [9] som beskriver dessa inskränkningar. Anklagelserna inkluderar utöver tvångsarbete exempelvis att uigurer sedan 2017 placerats i omskolningsläger, frihetsberövats på godtyckliga skäl och förföljts på grund av sin religion. Som tidigare nämnt produceras i dagsläget knappt 70 % av världens solceller i Kina [6]. Detta är oerhört viktigt att ta hänsyn till när slutsatser kring införskaffande av nya solceller diskuteras.

1.4.3 Återvinning av tunnfilmssolceller

Ur ett livscykelperspektiv har solpaneler störst miljöpåverkan vid tillverkning [10], sedan har de en förväntad livslängd på 30-40 år. Men vad som sker med dem efteråt är varierar stort mellan länder. Detta är av stor vikt i detta arbete, för att kunna ge en välgrundad rekommendation om enheterna ska kasseras eller behållas.

WEEE-direktivet (Waste of Electrical and Electronic Equipment) omfattar återvinningen av solceller inom EU, inklusive Sverige [10]. Enligt detta direktiv är försäljare inom den europeiska marknaden skyldiga att ansvara för återvinning av solceller samt att tillhandahålla information om hur detta ska utföras till konsumenterna. WEEE uppger att de flesta delar av solceller kan återvinnas, såsom glas, halvledande material samt metaller [11]. Återvinningen ser olika ut beroende på om solcellerna innehåller kisel eller annat halvledande material. Tunnfilmcellerna som ska undersökas är inte kisel-baserade, och återvinning av dem sker oftast genom att bryta ned dem i mindre beståndsdelar och sedan använda kemiska bad för att separera halvledande material. För Kadmium Tellurid (CdTe) kan upp till 95 % av komponenterna på så vis återvinnas. Dock återvinns idag endast aluminiumramarna samt glaset i Sverige, och att ta vara på metallerna separat är enligt Energimyndigheten en framtida fråga när kvantiteterna av avfall beräknas öka [10].

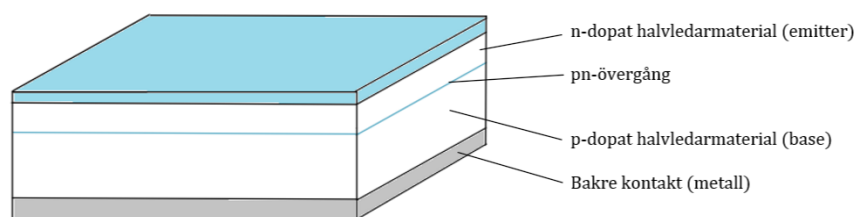
Ett alternativ till återvinning av solpaneler kan vara återbruk. Exempelvis har det studerats på avlägsna områden, utan stabil elförsörjning med dålig tillgång till kommunikation samt information, har haft stor nytta av att använda solpaneler till sin maximala livslängd [12]. Dock verkar det inte finnas en utarbetad plan för återanvändning av solceller i nuläget [13].

2 Teori

Följande avsnitt beskriver den bakgrund, teori och begrepp som är relevant för att förstå hur åldring påverkar solpanlers prestanda.

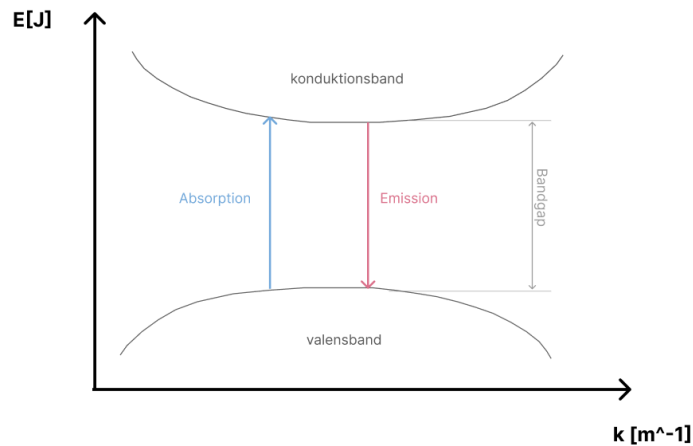
2.1 Solcellens struktur och funktion

En solcell, även kallad fotovoltaisk cell är en anordning som kan omvandla solens ljus till elektricitet. Som det visas i Figur 1 är den vanligtvis uppbyggd av en botten som utgörs av ett p-dopat halvledarmaterial och en topp som består av ett n-dopat halvledarmaterial. Att ett halvledarmaterial är p-dopat innebär att det dopas med ett material som har lägre antal elektroner, vilket innebär att strömledningen sker med positivt laddade hål. N-dopning innebär att halvledarmaterialet istället dopas med ett material som har ett överskott av elektroner, vilket innebär att strömledningen sker med negativt laddade hål. Kommer ett n-dopat och p-dopat material i kontakt med varandra bildas en pn-övergång som kan betraktas som ett gränsområde mellan de två materialen. Övergången är icke konduktiv och det är i detta område hål och elektroner attraherar och eliminerar varandra i en process som kallas rekombination [14].



Figur 1: Principskiss över en solcells struktur

Den högsta energinivån i en atomstruktur för ett halvledarmaterial är valensbandet som är ockuperat av endast elektroner. Energinivån ovanför valensbandet är konduktionsbandet som istället är delvis ockuperat eller saknar elektroner och mellan dessa nivåer finns ett energigap som kallas för bandgap. Med andra ord är bandgapet den minsta energin som krävs för att en elektron ska röra sig från valensbandet till konduktionsbandet och bli en fri laddningsbärare. Vilket innebär att den bär elektrisk laddning genom ett material. Laddningsbäraren som huvudsakligen transporterar laddningen kallas majoritetsladdningsbärare och den minst förekommande laddningsbäraren kallas för minoritetsladdningsbärare. Om bandgapet är stort som i en isolator krävs det väldigt mycket energi för att en elektron ska förflytta sig. Därför används halvledarmaterial för solceller då de har litet bandgap så det krävs lite energi för att elektronerna ska röra sig från valensbandet till konduktionsbandet. I Figur 2 beskrivs strukturen av ett direkt bandgap för ett halvledarmaterial [15, Kap. 4.1].



Figur 2: Bandgap för halvledare

Innehåller fotonen från det infallande ljuset mer energi än bandgapet rör sig elektronen mot konduktionsbandet. Detta innebär att ett elektron-hål par kommer genereras och ett flöde av elektrisk ström kommer uppstå. Att ett elektron-hål par skapas innebär att när elektronen rör sig från valensbandet till konduktionsbandet lämnar den ett hål efter sig vilket gör så att ledning kan ske [14]. Rekombinerar däremot laddningsbärarna kommer elektron-hål paret att försvinna och varken ström eller någon kraft kommer skapas. För att undvika detta används pn-övergången till att separera hålet och elektronen genom kraften från ett elektriskt fält. Om den ljusgenererade minoritetsladdningsbäraren når pn-övergången flyttas den över med hjälp av det elektriska fältet, vilket innebär att den nu istället är en majoritetsladdningsbärare. Kopplas basen och emittern på solcellen ihop blir den kortsluten och ett flöde av ljusgenererade laddningsbärare skapas. Det finns flera olika halvledarmaterial som uppfyller ovan krav men i praktiken används de nästan alltid i form av en pn-övergång [15, Kap. 4.1].

2.2 Olika typer av solceller

På marknaden finns idag huvudsakligen tre olika typer av solceller. Dessa är monokristallina solceller, polykristallina solceller samt tunnfilmssolceller. Det som mestadels skiljer dem åt är verkningsgraden, utseendet samt priset [10].

2.2.1 Kristallina solceller

Större delen av alla solceller som säljs idag är gjorda av kristallina kiselplattor som kapas av i stora kiseltackor [16]. Dessa tackor kan ta olika former som en enstaka kristall eller flera kristaller. Ensamma kristaller används för att skapa monokristallina solceller och flera kristaller används vid tillverkning av polykristallina celler. Monokristallina solceller särskiljer sig från de andra när det gäller utseende, de är oftast färgade och har en cylindrisk form. Den har den högsta effektiviteten av alla tre alternativen men har samtidigt en högre kostnad. Polykristallina celler har en rektangulär form då kisel smälts ner och hålls i rektangulära former. Priset är något lägre än för monokristallina men de har samtidigt en lägre verkningsgrad [16].

2.2.2 Tunnfilmceller

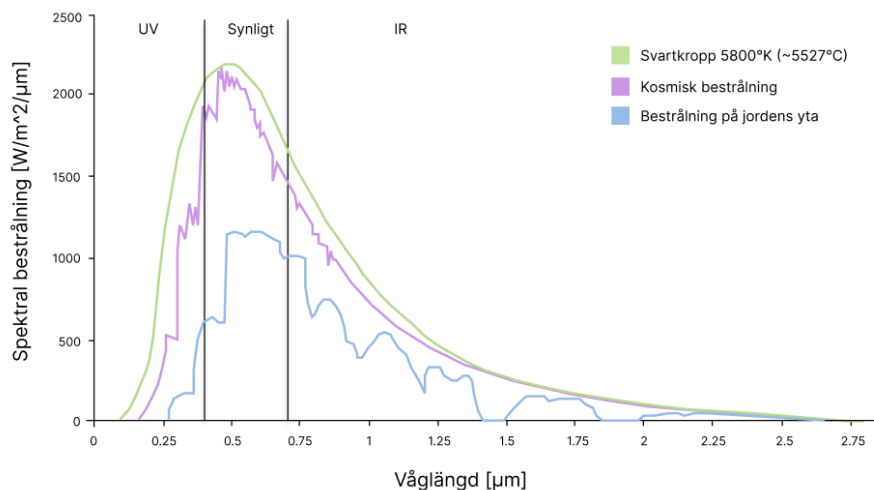
Tunnfilmceller är mycket tunnare än kristallina solceller, därav namnet och produceras vanligtvis i tre olika typer [16]. Amorf kisel (a-Si) som har en struktur där atomerna är slumpässigt ordnade jämfört med den fasta strukturen i kristallina celler. Filmerna kan även vara gjorda av Kadmium Tellurid (CdTe) eller Koppar Indium Gallium Selenid (CIGS). Dessa celler är billigast att producera och är väldigt flexibla när det kommer till laminering. Däremot är de inte lika effektiva som kristallina kiselsolceller [16].

Tabell 1: Verkningsgrad för olika solceller

Typ av solcell	Verkningsgrad	Kostnad
Monokristallin	20 % och uppåt	Hög
Polykristallin	15-17 %	Medel
CIGS	13-15 %	Medel
CdTe	9-11 %	Låg
a-Si	6-8 %	Låg

2.3 Spektral strålning och luftmassa

Att ta hänsyn till den lokala solinstrålningen där solceller ska användas blir intressant när en uppskattning av potentiell effektproduktion och åldring ska framtas. Solens instrålning har ett spektrum mellan 0,2 - 3 μm där våglängderna står för olika effektandelar, se Figur 3. Där visas strålningen för en så kallad svartkropp vid solens temperatur, det vill säga den strålning som sänds ut från solen. Dessutom visas den strålning från solen som sänds ut i rymden samt strålningen som når jordens yta.



Figur 3: Solens instrålningseffekt vid olika våglängder

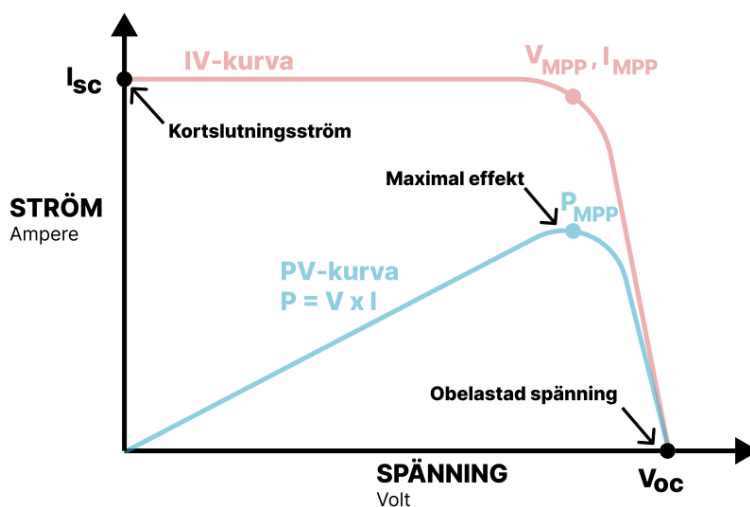
I regel vill man ha solpaneler som har hög transmission i det skyddande glaset och hög absorption i panelens solceller. Däremot är olika typer av solpaneler mer effektiva än andra vid olika våglängder vilket i sin tur påverkar hur mycket energi som absorberas av solcellen i praktiken [17]. Därför utgör solpanelens egna materiella egenskaper stor del av den totala energiförlusten från den totala solinstrålningen. Detta blir speciellt relevant när man undersöker skillnader på en solpanels prestanda i labbmiljö motsvarande utomhusmiljö. I

praktiken kommer solpaneler enbart användas utomhus vilket gör att eventuella tester i labb behöver efterlikna solinstrålningen så mycket som möjligt för att producera relevanta resultat.

Luftmassa är avståndet ljuset färdas genom atmosfären normaliserat till det kortaste avståndet när solen står 90 grader ovanför horisonten. Då solen befinner sig i denna positionen är luftmassan 1 och det benämns AM1. Varje luftmassa som är större än 1 beskriver hur många gånger mer atmosfär ljuset måste färdas igenom jämfört med om solen skulle stå 90 grader ovanför horisonten. Med andra ord kvantifierar luftmassan minskningen av ljusets kraft när det färdas genom atmosfären och absorberas av luft och damm. Detta innebär att olika luftmassor påverkar mängden solljus som når solpanelen vilket i sin tur påverkar hur mycket uteffekt panelen genererar [15, Kap. 2.4].

2.4 IV- och PV-kurvor

En IV-kurva, som kan ses i Figur 4, är ett verktyg som används för att beskriva relationen mellan spänning och ström för en solcell [18]. Dessa kurvor visar relationen mellan solcellens utgående spänning och den genererade strömmen, vilket är avgörande för att förstå hur enskilda celler, moduler och hela solcellssystem fungerar. PV-kurvor visar hur variationen i elektrisk effekt relaterar till variationen i spänning [15, Kap. 4.2].



Figur 4: IV- och PV-kurva för en solcell

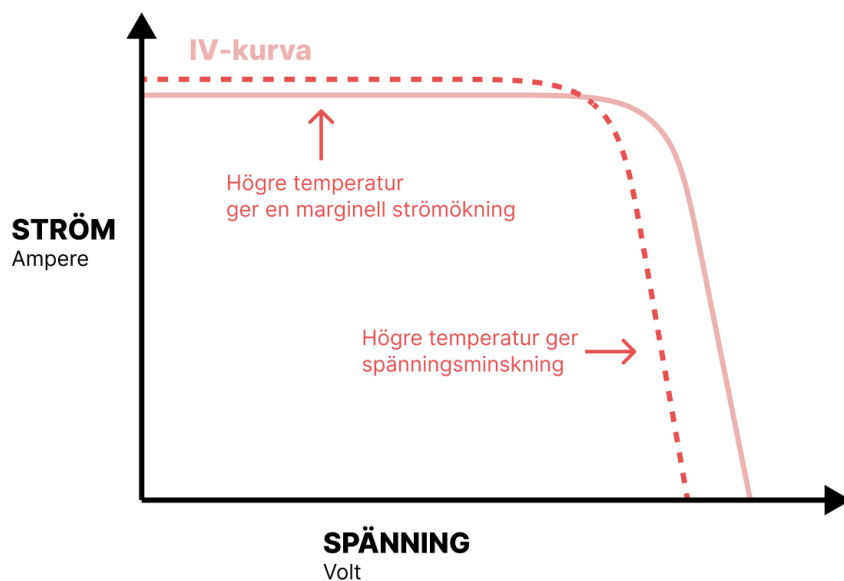
Viktiga parametrar för att karakterisera solpaneler är kortslutningsström, obelastad spänning och maxeffektpunkten [18]. Kortslutningsström (I_{SC}) inträffar när spänningen över solcellen är noll, d.v.s när solcellen är kortsluten. Kortslutningsströmmen är även den maximala strömmen som kan dras från solcellen [15, Kap. 4.2]. Obelastad spänning (V_{OC}) är den maximala spänningen som är tillgänglig från en solcell. Denna spänning uppstår när strömmen är noll, d.v.s när solcellen inte är ansluten till en krets [15, Kap. 4.2]. Maxeffektpunkten, eller MPP, är den driftspunkt där en solcell verkar optimalt och genererar högsta möjliga effekt. Denna punkt visas i PV-kurvor. I maxeffektpunkten producerar solcellen maximal användbar energi, i form av el. Förhållandena är inte konstanta, utan varierar i takt med förändringar i solinstrålning och temperatur [18].

Solcellens kortslutningsström (I_{SC}) beror på ett antal olika faktorer. En av dessa faktorer är solcellens area. För att eliminera detta beroende är ett vanligt tillvägagångsätt att istället beräkna kortslutningsströmtätheten (J_{SC} i mA/cm²). En annan faktor är antalet fotoner, dvs. den inkommande ljuskällans kraft. I_{SC} från en solcell är direkt beroende av ljusintensiteten. Detta fenomen är i linje med det faktum att solceller genererar mer elektricitet under soliga dagar jämfört med molniga dagar. Det leder till en förskjutning av IV-kurvan uppåt vilket resulterar i en höjning av den maximala effektpunkten.

Den maximala effekten beräknas genom användning av parametrarna tomgångsspänningen, kortslutningsströmmen och den så kallade fylldfaktorn. Fylldfaktorn, ofta betecknad FF, är förhållandet mellan den faktiska maximalt erhållbara effekten och produkten av V_{OC} och I_{SC} [15, Kap. 4.2].

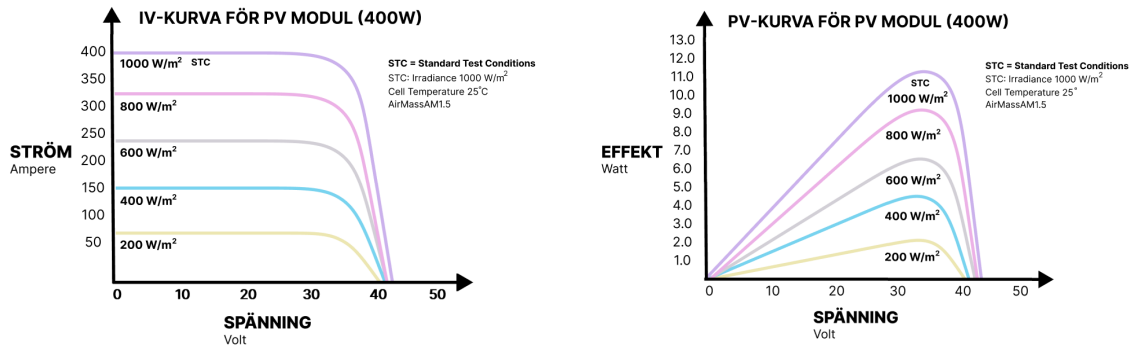
2.4.1 Faktorer som påverkar solcellens operativa prestanda

Solinstrålning och temperatur är viktiga faktorer som påverkar solcellens operativa prestanda. Dessa faktorer har direkt inverkan på den mängd användbar energi som genereras av solcellen. I flesta fall standardiseras spektrumet till AM1.5-spektrumet [15, Kap. 4.2] och solcellens obelastade spänning (V_{OC}) är starkt relaterad till temperaturen, vilket kan ses i Figur 5. [15, Kap. 4.2].



Figur 5: Temperaturpåverkan på IV- och PV-kurvor

Det som går att urskilja i Figur 5 är temperaturens påverkan på MPP. Där visas att effekten minskar med ökad temperatur. Denna minskning beror på att spänningen minskar men strömmen tycks vara snarlik. Det finns sätt att motverka minskad effekt på grund av temperaturökning och exempel på detta är load matching samt MPPT based control techniques [19]. Figur 6 beskriver hur effekten ändras med olika nivåer av solinstrålning. Detta är en relativt intuitiv variation då mer solinstrålning innebär mer fotoner som kan excitera elektroner i halvledarmaterialets valensband och således producera mer ström.

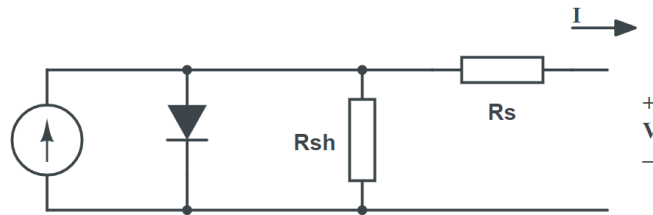


(a) IV-kurva för olika ingående effekter (b) PV-kurva för olika ingående effekter

Figur 6: IV- samt PV-kurvor för olika ingående effekter

2.4.2 Inre resistanser hos solpaneler

Den karaktäristiska resistansen är R_{CH} är utgångsresistansen vid MPP [15, Kap. 4.3]. Resistansen är lämplig att undersöka vid en analys av en solcells funktion. Den ger en indikation om vilka förluster som sker i solcellen, så kallade parasitiska förlustmekanismer, som påverkar verkningsgraden. De vanligaste parasitiska resistanserna är serieresistansen R_S samt shuntresistansen R_{SH} , se Figur 7.



Figur 7: Ekvivalent krets för en solpanel

Serieresistans R_S i en solcell uppkommer främst av strömmens rörelse genom det n- och p-dopade halvledarmaterialet, Kontaktresistanserna mellan de halvledande materialen samt i de övre och bakre metallkontakterna i solcellen [15, Kap. 4.3]. En ökad R_S påverkar främst solcellen genom att minska I_{SC} om resistansen är tillräckligt stor. Detta innebär i praktiken att den maximala effekten som kan utvinnas minskar.

Tvärt emot är det önskvärt att shuntresistansen R_{SH} är hög för att undvika förluster [15, Kap. 4.3]. Om R_{SH} är för låg färdas den ljusgenerade strömmen en alternativ väg, som inte tillför till effekten ut. R_{SH} är särskilt märkbar då ljusintstrålningen är svag, eftersom en mindre mängd ström genereras. Om R_{SH} understiger en nivå så att den orsakar märkbara förluster är det vanligtvis på grund av produktionsfel på modulen.

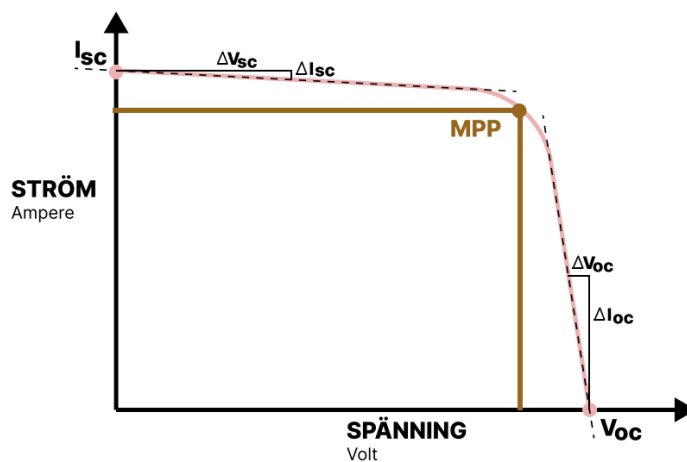
Åldrande av solpaneler påverkar cellens elektriska egenskaper, både serieresistansen och shuntresistansen. Serieresistansen ökar medan shuntmotståndet minskar. Korrosionsnedbrytning är den bidragande orsaken till ökning av serieresistansen på grund av minskad konduktivitet. Följaktligen minskar kortslutningsströmmen I_{SC} med en oförändrad obelastad spänning V_{OC} . Shuntresistansen minskar, som tidigare nämnt, på grund av att den ljusgenererade strömmen väljer en alternativ väg. Detta leder till en minskning av kortslutningsströmmen I_{SC} och den obelastad spänning V_{OC} . Dessa förändrade elektriska egenskaperna resulterar i en minskning av den maximala uteffekten vilket slutligen är avgörande för solcellens prestanda.

Hur resistanserna kan räknas ut från IV-kurvan beskrivs i ekvation 1.1 till 1.3 och visualiseras i Figur 8.

$$R_{CH} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \approx \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (1.1)$$

$$R_S = -\frac{\Delta V_{OC}}{\Delta I_{OC}} \quad (1.2)$$

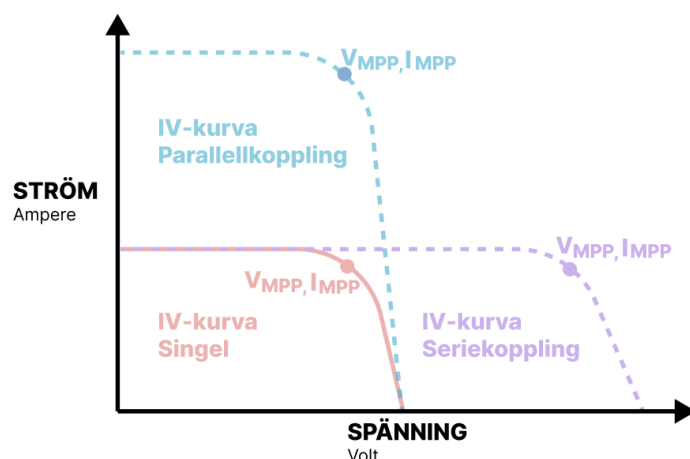
$$R_{SH} = -\frac{\Delta V_{SC}}{\Delta I_{SC}} \quad (1.3)$$



Figur 8: IV-kurvans värden som används för uträkning av R_S och R_{SH}

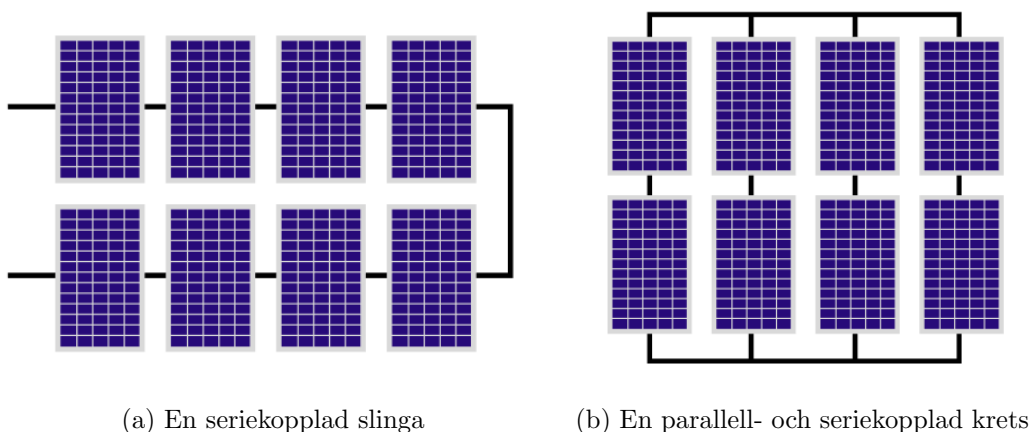
2.4.3 Solpanelers serie- och parallellkoppling internt och externt

En solpanel är uppbyggd av ett flertal enskilda solceller. Solcellerna är seriekopplade i strängar som i sin tur är parallellkopplade med varandra. I en seriekoppling genereras samma strömstyrka genom varje enskild solpanel såväl som enskild cell och spänningen över vardera solpanel kan adderas till en total spänning. Därav är seriekretsar väldigt känsliga när en solcell i kretsen har bristande funktionsförmåga då hela kretsens strömkapacitet försvagas. Detta kan leda till att hela seriekretsen inte genererar någon effekt på grund av en felaktig solcell. Det kan vara ett så litet fel som en lös ledning. En parallellkopplad krets påverkas däremot inte av att en enskild solcell är defekt. Däremot genererar en parallellkopplad krets en hög ström. Båda typerna av kopplingar beskrivs i Figur 9 [20].



Figur 9: Visualisering av parallellkopplings och seriekopplings IV-kurva

Det är viktigt att känna till kopplingsschemat och karaktärstiken för de olika kopplingarna vid uppmätning av solpanelersfunktion. Exempel på kopplingsschema av solpaneler visas i Figur 10.



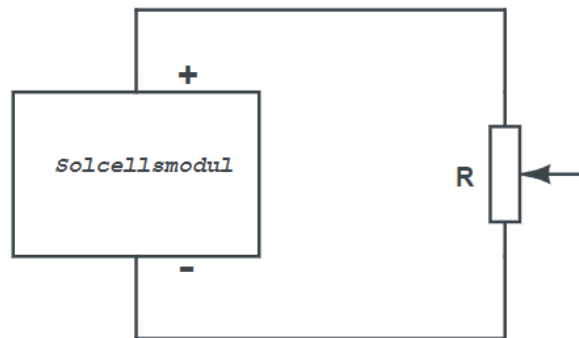
Figur 10: Kopplingsschema för solpaneler

2.5 Metoder för uppmätning av IV-kurvor

För att mäta upp en moduls IV-kurva finns flertalet olika metoder. De tre som undersökts är variabel resistans, DC/DC omvandlare samt elektronisk last.

2.5.1 Variabel resistans

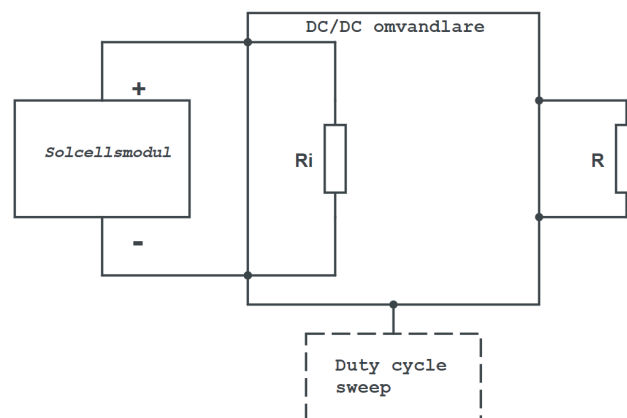
En solcellpanels IV-kurva kan mätas upp med variabel resistans-metoden [21], där solcellsmodulem kopplas upp enligt kretsschemat i Figur 11. Resistansen i potentiometern kommer ökas i steg från noll till ett högt värde för att finna mätvärdena för ström och spänning som utgör IV-kurvan. Viktigast är mätpunkterna kring IV-kurvans krökning då det är i detta område mätvärdena har högst förändringstakt. Valet av kretsens belastningsresistanser sker med störst avseende på detta område och är det enklaste sättet att mäta upp en moduls IV-kurva.



Figur 11: Kopplingsschema vid variabel resistans-metod

2.5.2 DC/DC omvandlare

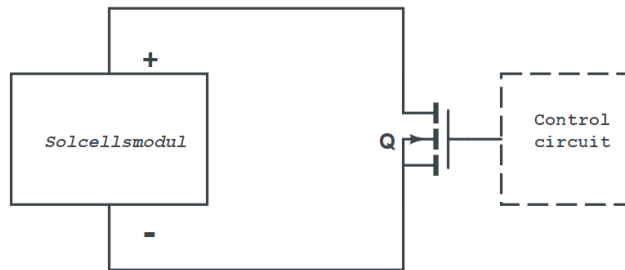
Genom att ändra förhållandet mellan inspänningen och utspänningen kan en DC/DC omvandlare efterlikna en resistans [21]. Transformationen hos en DC/DC omvandlare, vars kopplingsschema presenteras i Figur 12, kan styras genom att elektroniskt ändra omvandlarens arbetscykel. På så sätt ändras lasten på modulen, och på liknande sätt som för variabel resistans kan en IV-kurva erhållas. Dock kan strömrippel uppstå vid förändring av arbetscykeln orsakat av induktans, ett problem som inte förekommer i de övriga metoderna. Kopplingsschemat visas i Figur 12.



Figur 12: Kopplingsschema vid DC/DC omvandling-metod

2.5.3 Elektronisk last

En transistor, oftast en så kallad MOSFET, används som last i denna metod[21]. Metoden visas även schematiskt i Figur 13. Genom att applicera spänning på transistorns gate-kontakt justeras dess resistans och därmed modulens belastning. För att få den kompletta IV-kurvan behöver transistorn fungera i tre driftlägen, aktiv - som en spänningstyrd strömkälla, avstängd - som en öppen strömbrytare och ohmisk - som en linjär belastning av vilken spänning som appliceras på den och strömmen genom den. Flera transistorer kan parallellkopplas för att hantera en högre utströmmar från flertalet ihopkopplade moduler.



Figur 13: Kopplingsschema vid elektronisk last-metod

2.6 Garanti och degradering

I solcellers tillhörande datablad finns begränsad information om dess åldringsprocesser. Det finns en numerisk sammanställning av parametrar över effekt, spänning, ström och moduleffektivitet, med mera. Det som finns tillgängligt för att förstå åldrandet av solceller är en garanti som specificerar den maximala procentuella effektminskningen för panelen över tid, specificerat för 10 och 25 år [22]. Det är viktigt att känna till att prestanda som anges i databladet kan skilja sig från solpanelens verkliga prestanda. Databladet är en prognos som ger förväntade värden på effekt och prestanda men framförallt en garanti på solpanelens P_{MPP} -värde.

2.7 Miljöförhållandens påverkan

Hållbarheten av solcellsmoduler har en viktig roll i utvecklingen av solcellsteknik. Ett flertal faktorer leder till försämring av dess effektivitet. Försämringen beror bland annat på typen av solcellsteknik men även på miljön där modulerna har varit installerad. De parametrar som har en inverkan på prestandan och livslängden hos solceller kallas för åldringsparametrar. Åldringsparametrar som temperatur, instrålning, luftfuktighet och fysisk stress har en betydande inverkan på solpanelers prestanda under åren.

Vid flytt av solpaneler från optimerad labbmiljö till utomhusmiljö förloras 40 % effekt [23]. Upprinnelsen till denna minskning är utomhusmiljöns påverkan där parametrar som miljö, strålning, moln, skugga med fler är inkluderade. Beroende på vilken miljö solpanelerna befinner sig i varierar dess degraderingsprocess. Solljus består både av ljus i form av instrålning och värme i form av temperatur. Förutom ljus och värme har även luftfuktigheten en betydande effekt på degraderingshastigheten och livslängden för solpaneler utsatta för utomhusförhållanden. Alla dessa faktorer har en inverkan på solpanelens prestanda och åldring. Solpanelers temperatur, vilken är mycket beroende av placering och plats, stod för den högsta andelen av solpanelers degradering på 1,7 %-14,5 %, följt av relativ luftfuktighet som rapporterade 2,4 %-12,2 %. När solpaneler utsätts för solljus, resulterar effekterna av instrålningen och temperatur i en fotokemiskt inducerad degradering [24].

Högre luftfuktighet bidrar till större mängd vattenmolekyler som kan diffundera in genom den skyddande barriären i solpanelen. Detta leder till ett flertal negativa konsekvenser. Ett utav dessa konsekvenser är oxidation och korrosion i sammankopplingsmetallerna. Svullnad av material på grund av vattenabsorption och delaminering av kompositmaterial är också konsekvenser av luftfuktighet. Utöver det kan temperaturskillnader orsaka termisk stress på solceller. Termisk stress kan ge fysiska skador på solcellerna vilket för med sig att solcellernas effektivitet minskas.

2.8 Cellsprickor

Fysisk försämring hos solpaneler bidrar till en minskad uteffekt. Solcellsmodulen upphör inte att producera solenergi, däremot minskar effektiviteten.

Under åren har tillverkande solcells företag tenderat att minska tjockleken på solceller för att minska produktionskostnaderna. Detta har bidragit till att solcellerna blivit ömtåligare och mer känsliga mot mekaniska och termiska belastningar. Dessa belastningar kan skapa cellsprickor, även känd som mikrosprickor. Huvudfaktorer som kan skapa cellsprickor är tillverkningsfel, miljöförhållanden och fysisk påverkan [25]. Cellsprickors utformning och storlek har en stark koppling till effektförluster. Cellsprickor har en mycket varierad storlek och kan förekomma inom mm intervallet till μm micrometers sprickor som inte är synliga för det blotta ögat. Små sprickor, under 10 %, påverkar osannolikt produktionen av uteffekt, därmed även effektiviteten av solcellen, och är relativt ekvivalenta med solceller utan sprickor. En solcell som består av minst 25 % sprickor kan resultera i 30-40 % effektförluster. Större sprickor kan ha en radikal minskning av uteffekten, uppemot 60 % [26].

2.9 Ström- och spänningssäkerhet

Solpanelerna kan åstadkomma höga strömmar och spänningar, och det är därför relevant att ta det i beaktning både gällande komponenters funktion samt ur ett säkerhetsperspektiv för människor.

2.9.1 Överbelastade komponenter

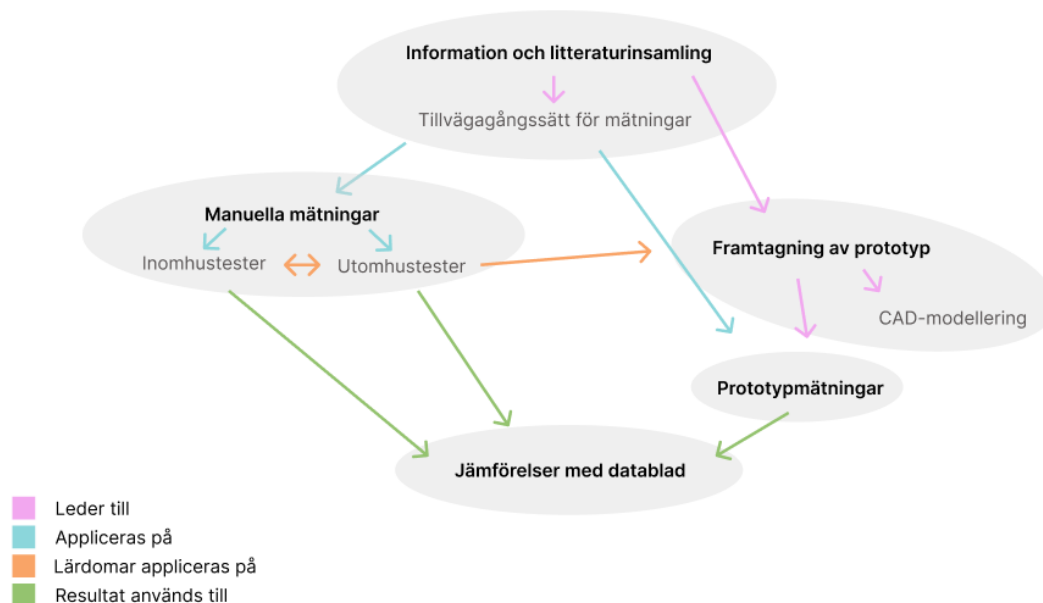
I elektriska komponenters datablad anges dess maxeffekt. Om denna överskrids kan komponenten överbelastas och ta skada [27]. Ofta orsakar en för hög effekt en temperaturökning, vilken kan förändra egenskaperna hos komponenten eller utgöra en brandrisk. För att få en säker samt tillförlitlig krets bör för lågt dimensionerade komponenter bytas ut istället för att överbelastas.

2.9.2 Säkerhet för människor

När det gäller säkerhet för människor är det främst strömmen som är skadlig [28]. Strömmen gör att musklerna krampar och resistansen i musklerna orsakar upphettning. En stöt uppfattas vid 0.7-1.1 μA , men fuktiga händer ökar känsligheten och även 0.5 μA kan uppfattas. Den så kallade släppströmmen, maxströmmen vid vilken personen kan släppa själv, varierar med personens kön, vikt, hudimpedans och strömmens frekvens. Det lägsta värdet på släppström är 6 och 9.5 mA för kvinnor respektive män. I följande ordning för ökande ström kan dessa saker ske: andningsförlamning, smärta, ventrikelflimmer, hjärtmuskelsammandragning, brännskador och muskelkontraktion. Vid en mindre stöt under 1 A kan effekter visa sig först efter flera timmar, då hjärtat kan ha fått en felaktigt rytm. Det är därför viktigt att söka vård även om personen inte upplever några besvär direkt [29].

3 Metod

Detta kapitel syftar till att beskriva hur tillvägagångssättet utformades för att utveckla ett lätthanterligt mätsystem för att utföra funktionstester på enskilda solpaneler. Detta för att realisera projektets syfte. Metoden har fem huvuddelar: information och litteraturinsamling, manuella mätningar på solpaneler, framtagning av prototyp samt mätningar med prototypen och slutligen jämförelser med prestandagaranti från datablad. Varje del spelade en betydelsefull roll i arbetsprocessen och beskrivs kronologiskt i följande delkapitel. Hur delarna i metoden integrerat med varandra kan ses i Figur 14.



Figur 14: Flowchart över arbetsgången som presenteras i metoden

3.1 Information och litteraturinsamling

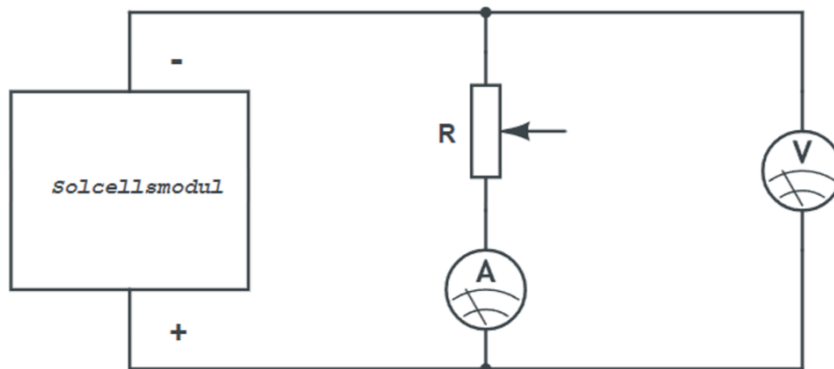
Arbetet inleddes med en litteraturstudie av solpanelers egenskaper. Syftet med projektet var att utveckla ett mätsystem som kan analysera parametrar som påverkar solpanelers prestanda över tid, vilket gjorde att fokus låg på att undersöka just dessa egenskaper. Informationen som samlades in utgjorde grunden för rapportens teorikapitel och projektets tillvägagångssätt.

För att få en djupare förståelse kring parametrar som kan påverka åldringen av solpaneler, genomfördes först en omfattande informationsinsamling kring olika solpanelers generella konstruktion. Projektet begränsades dock tidigt till att enbart analysera tunnfilmssolpaneler, vilket resulterade i en mer djupgående förståelse för just denna variant. Denna begränsning valdes då tillgängligheten av andra sorter av solpaneler var begränsad. Tillverkningsprocessen och egenskaper vid nyproduktion undersöktes också för att få mer insikt i hur producenter kan prognostisera degraderingen av solpaneler. Verkningsgraden vid nyproduktion och den förväntade degraderingen användes senare i projektet för att utvärdera hur utvecklingen faktiskt sett ut. Ytterligare information samlades in kring analysmetoden IV- och PV-kurvor, eftersom det snabbt blev tydligt att denna metod används frekvent för att bedöma solpanelers prestanda. Syftet med detta projekt är även att utveckla ett mätinstrument som kan användas för att karakterisera åldrandet hos solpaneler på ett enkelt och effektivt sätt. Därför behövde lämpliga mätmetoder jämföras mot

varandra för att få mer inblick i deras variationer samt landa i vilken metod som skulle vara mest lämpad för vår prototyp, denna del utgjorde den största delen av arbetets informationsinsamling. För att utveckla en prototyp med önskvärda egenskaper var det dessutom nödvändigt att undersöka på vilket sätt den skulle utformas samt vilka komponenter som var relevanta och kompatibla med systemet. Information kring både mätmetod samt komponenter samlades huvudsakligen in digitalt.

3.2 Tillvägagångssätt för mätningar

Mätningarna av solpanelerna utfördes med hjälp av variabel-resistans metod. Anledningen till att denna metod valdes var främst på grund av att dess enkelhet, låga kostnad och att solpanelerna inte genererade särskilt hög effekt. Dessutom var det enklare och mer kostnadseffektivt att anpassa metoden för en första prototyp. Figur 15 illustrerar en schematisk beskrivning över hur de olika mätinstrumenten och potentiometern kopplades till solpanelerna.



Figur 15: Krettschema för variabel resistans-metod med mätinstrument

Multimetrarna som kopplades in i konfigurationen var av modellen Agilent U1279A. Anledningen till att dessa instrument användes var främst på grund av den låga mätosäkerheten, $\pm 0,05\%$ för spänningen och $\pm 0,2\%$ för strömmen. Dessutom är multimetern handhållen, vilket möjliggjorde en enkel förflyttning mellan inomhus- och utomhusförhållanden. Vilken potentiometer som användes berodde på vilken panel som testerna skulle utföras på. Ju högre kortslutningsström solpanelerna uppnådde desto mer strömtålig potentiometer krävdes. Som ett resultat användes tre olika potentiometrar varav den första hade en strömtålighet på 0,7 A och nådde en resistans på 10 M Ω . Den andra potentiometern hade en strömtålighet på 1,36 A och uppnådde en resistans på 270 Ω , medan den sista hade en strömtålighet upp till 3,26 A och nådde en resistans på 100 Ω .

Före genomförandet av mätningarna användes en pyranometer för att kvantifiera instrålningen i enheten watt per kvadratmeter (W/m^2). Pyranometern som användes var av modellen RS PRO och den kunde läsa upp till 3999 W/m^2 med en mätosäkerhet på $\pm 10\%$. På grund av att solinstrålningen varierade över solpanelen beroende på pyranometerns placering, utfördes effektmätningar på fem olika platser på panelen för att sedan beräkna medelvärdet. Denna metod ansågs ge ett mer representativt värde jämfört med att endast avläsa värdet vid en enskild punkt. Dessutom genomfördes en bedömning av solpanelernas yttre skick. Varje solpanel tvättades av med vatten innan genomförandet av mätningarna för att ta bort eventuell smuts som kunde bidra till påverkade resultat.

När alla mätvärden hade samlats in, var det också möjligt att beräkna de inre resistanserna enligt ekvationerna (1.1), (1.2) och (1.3) i Teoriavsnittet 2.4.3. Syftet med dessa beräkningar var att få en insikt i hur solpanelernas prestanda förändrades i förhållande till de inre resistanserna. Detta ansågs vara av betydelse eftersom förändringar i dessa elektriska parametrar påverkar uteffekten solpanelen genererar.

3.2.1 Mätobjekt

Samtliga mätningar genomförs på sex tunnfilmssolpaneler, varav fem var av modellen FS-380 CdTe från First Solar och tillverkade år 2013. Dessa solpaneler har varit monterade i en solpanelspark i Grekland enligt uppgift. Den sjätte solpanelen var oanvänd och tillverkad år 2019 och av modellen Solibro SL2-F CIGS.

3.3 Manuella utomhustester

Solcellers effektivitet påverkas kraftigt av våglängden på instrålningen, och är specifikt utformade för solljus. Därav skedde mätningarna på solpanelerna utomhus för att få ett rättvisande resultat. Testerna genomfördes i molnfria förhållanden för att få så konstant instrålning som möjligt. Detta medförde begränsat antal dagar för genomförandet av mätningarna utomhus. Beslutet fattades med hänsyn till att solpanelens effektivitet fluktuerar när moln skymde solen, vilket gjorde det svårt att på ett rättvisande sätt mäta en konstant ineffekt och därigenom rättvisande uteffekt. Mätning i en utomhusmiljö medför andra felkällor såsom luftmassa, temperatur, instrålningsvinkel och en ständig föränderlig miljö. Det var en avvägning, men beaktades som nödvändigt för att få den instrålning som solpaneler är konstruerad för. För att hantera felkällan för fluktuerande instrålning vidtogs tidigare nämnd återgård, ett medelvärde av mätningar. Det var även viktigt att beakta andra parametrar såsom tidpunkten på dagen som påverkar solens position. Solens position som i sin tur påverkar luftmassan är en annan viktig parameter att beakta, då den påverkar solpanelens uteffekt. Dessvärre saknades det lämpliga verktyg för att mäta luftmassa under själva genomförandet av mätningarna. Istället användes en lämplig webbplats [30] för att i efterhand bestämma luftmassan vid tidpunkten då testerna genomfördes.

Vid testerna placerades solpanelen med riktning mot solen så gott det gick. På grund av att det inte fanns några vinklingsbara monteringshållare för solpanelerna placerades panelerna så vinkelrätt som möjligt mot solen. Beroende på vart solen befann sig var det svårt att visuellt avgöra om solpanelen hade rätt vinkel. Istället användes pyranometern för att avgöra när en rimlig ineffekt uppnåtts. Därefter anslöts multimetrarna och potentiometern enligt illustrerad konfiguration i Figur 15. En säkerhetssladd med skyddande plast runt metallkontakterna användes ur en säkerhetsaspekt för att koppla in till solpanelens negativa ingång. Testproceduren utfördes sedan genom att gradvis höja resistansen på potentiometern med långa steg tills en tydlig minskning av strömmen var märkbar. Därefter användes kortare steg för att finna den maximala uteffekten. När spänningen ökade med mycket små steg och strömmen fortsatte att tydligt minska, utfördes endast mätning av spänningen över solpanelens plus- och minusgångar utan någon ansluten belastning för att erhålla obelastade spänningen. Kortslutningsströmmen togs fram på liknande sätt genom att koppla en amperemeter mellan plus- och minusgången utan någon belastning ansluten. På grund av att förutsättningarna ständigt förändrades av solens rörelse genomfördes mätningarna så fort det var möjligt för att få små variationer i mätvärdena. Alla erhållna värden samlades sedan i ett excel dokument för att plottas ut som en IV-kurva och en PV-kurva.

3.4 Manuella inomhustester

Inomhustesterna genomfördes med avsikt att erhålla värden i en mer kontrollerad miljö, där variabler som temperatur, luftmassa och solens position inte ständigt förändrades. Emellertid fanns det ingen ljuskälla som kunde efterlikna solens ljus tillgänglig, varpå en ljusramp med sex monterade halogen strålkastare användes. Varje strålkastare hade en maxeffekt på 400 W. För att erhålla resultat som var jämförbara med utomhustesterna och databladet, justerades ljusrampens position tills ineffekten motsvarade samma värde som ineffekten vid utomhusmätningarna. Detta innebar att ljusrampen placerades väldigt nära solpanelen och på grund av halogenlampornas höga värmeutveckling var det nödvändigt att genomföra testerna relativt snabbt för att undvika att solpanelen blev överhettad. Därefter genomfördes testproceduren på samma sätt som vid utomhusmätningarna.

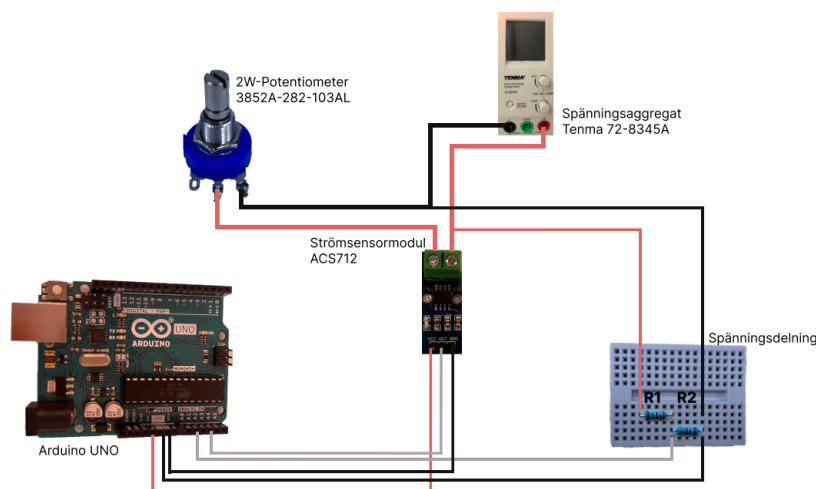
3.5 Framtagning av prototyp

Det automatiska mätsystemet utvecklades med mål att på ett mer lätthanterligt vis utvärdera solpanelers prestanda, genom att göra det mer kompakt samt automatiskt till en större grad. Mätvärdena skulle lagras automatiskt och systemet skulle vara mobilt. Prototypens syfte var att automatiskt mäta ström, spänning och temperatur samt lagra och visualisera datan. Visualiseringen av mätresultaten är av högsta vikt för att kunna utvärdera prestanda och jämföra resultatet från prototypen med manuella mätningar. Genom att inte bara ta fram modulens P_{MPP} , utan också använda IV- och PV-kurvor för visualisering, ökar jämförbarheten mellan mätresultaten och de manuella mätningarna. Därmed bidrar användningen av dessa kurvor till att öka tillförlitligheten av resultaten och förenkla utvärderingsprocessen av prototypen. Eftersom temperaturen påverkar IV- och PV-kurvorna, beslutades det att prototypen även skulle inkludera en temperaturmätning.

Från tidigare manuella mätningar framgick det att mätningarna resulterade i en spänning inom intervallet 51,7-103,3 V, och en ström inom intervallet 0,28-1,88 A. Eftersom prototypen är avsedd att användas för genomförande av samma funktionstester som de manuella mätningarna, är det av största vikt att den utvecklas med förmågan att hantera dessa strömmar och spänningar.

3.5.1 Ursprungskrets

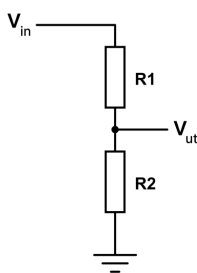
Systemet byggdes upp successivt, där den ursprungliga kretsen implementerades för att mäta ström och spänning. För att genomföra dessa första mätningar användes en Arduino UNO, två resistanser, strömsensormodul ACS712, spänningsaggregatet Tenma och en 2W-potentiometer samt sladdar och breadboards för att sluta kretsen. Systemet utgick ifrån variabel resistans-metod för att få fram IV- och PV-kurvor, och kopplingsschemat för kretsen visas i Figur 16. Valet att använda variabel resistans-metod beslutades utifrån att denna metod var principiellt simplast och bedömdes vara den mest effektiva för att testa en första prototyp. Denna del av metod består av konstruktion av spänningsmätning, strömsäkerhet, strömmätningar samt testning av ström och spänningsmätningar med hjälp av en strömkälla.



Figur 16: Kopplingschemat för ursprungskretsen

3.5.2 Spänningsmätning

Vid avläsning av ström samt spänning användes Arduinos analoga portar. Arduino UNOs analoga portar är konstruerade för att klara en maximal spänning på 5 V. För att undvika att den utsattes för höga spänningar från solpanelerna, vilket kan skada mikrokontrollern, krävdes det att spänningen minskades avsevärt. Spänningsdelning är en vanlig teknik som används för att uppnå detta, där spänningen delas upp över två eller flera seriekopplade resistanser för att minska spänningen på en specifik plats i kretsen. Figur 17 illustrerar spänningsdelningen, där V_{ut} representerar spänningen ut från kretsen in i Arduinon och V_{in} representerar spänningen från solpanelerna som går genom kretsen. För att skapa god säkerhetsmarginal i kretsen valdes resistanserna till spänningsdelningen utifrån att Arduinon ska tåla 140 V från solpanelerna. Valet av resistorerna gjordes utifrån ekvation 2.



Figur 17: Krets för spänningsdelning

$$V_{ut} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (2)$$

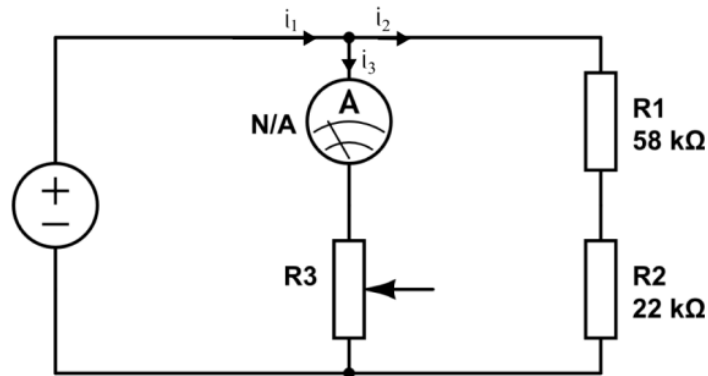
Resistorerna valdes till $R_1 = 68 \text{ k}\Omega$ och $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$. Vid användning av denna spänningsdelning har Arduino UNO en maximal ingående spänning på 4,4 V vid 140 V från solpanelen, vilket är inom Arduinos toleransram. Till spänningsdelningen valdes relativt höga resistorer för att sänka strömmen enligt Ohms lag. Detta för att skydda komponenterna i kretsen och för att säkerställa att den höga strömmen går genom strömsensorn.

3.5.3 Strömmätningar

Strömsensorn som valdes ursprungligen tålde upp till 20 A, vilket hade valts för att ha god säkerhetsmarginal. Det framkom emellertid att dess upplösning vid strömmar lägre än 2 A var otillräcklig och den uppmätta strömmen visade en betydande fluktuation, vilket inte stämde överens med de kontrollerade uppmätningarna från amperemetern. Komponenten byttes ut mot en strömsensor med tolerans upp till 5 A, vilket de uppmätta strömmarna på solpanelerna inte översteg. Med denna nya komponent var upplösningen för lägre strömmar under 2 A mer tillförlitlig, vilket var passande för prototypens mätintervall. Däremot hade även denna strömsensor en viss felmarginal och fluktation.

3.5.4 Strömsäkerhet

Inledningsvis behövdes den höga ström som genererades av solpanelerna tas i beaktning vid uppbyggnaden av kretsen. Det var nödvändigt att konstruera en krets som kunde hantera hög strömstyrka utan att skada dess komponenter. Figur 18 illustrerar kretsen samt strömmarna.



Figur 18: Ursprungskretsen med strömflödet utmarkerat

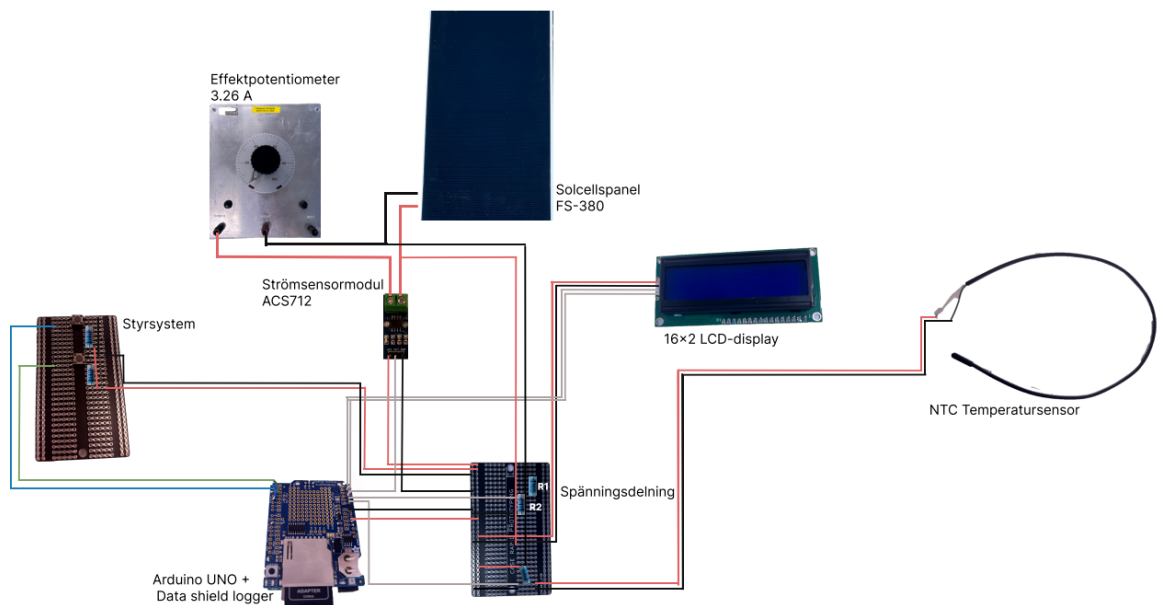
Strömmen i_1 är strömmen som genereras från solpanelen, strömmen i_3 är strömmen som går genom strömsensorn och potentiometern och i_2 är strömmen genom spänningsdelningen. Eftersom spänningsdelningen innehåller två mycket höga resistorer är strömmen i_2 betydligt lägre än strömmen i_1 och i_3 . Därav valdes tjockare kablar med högre strömtålighet vid dessa delar av kretsen. På grund av den höga strömmen i_3 krävs det att potentiometern har en hög ström- och effektåtlighet. En initial övervägning var att använda en potentiometer av mindre storlek som på ett varit mer estetiskt tilltalande. Desvärre tolererade denna potentiometer endast en effekt på 2W. Detta resulterades i att den överbelastades och överhettades. En konsekvens av detta var att potentiometern behövde bytas ut mot en som klarade av högre effekt, vilket resulterade i valet av en effektpotentiometer med en strömstyrka på 3.26 A. Effektpotentiometern var betydligt större än 2W-potentiometern, men gjorde kretsen mer tillförlitlig och säker. Detta gjorde systemet mer otympligt, men var en återgård för att kunna testa funktionen i en första prototyp. Det existerar mindre varianter av effektpotentiometrar, men hos återförsäljare som ingav förtroende hade de en kostnad som ansågs oproportionerligt hög för syftet och detta alternativ fungerade för att visa på funktionen av prototypen.

3.5.5 Testning av ström och spänningsmätning med spänningsaggregat

För undersöka om prototypen gav rimliga värden på ström och spänning användes ett spänningsaggregat som en spänning- och strömskälla. Dessutom felsöktes kretsen med kontrollmätningar av ampere- samt voltmeter om avläsningen av värdena var felaktiga. Genom att reglera inkommande ström- och spänningsvärden kunde spänningen successivt skalas upp på ett säkert sätt för att undvika skador på kretsen och testa prototypens avläsning. Med denna metod kunde avläsning för hela intervallet upp till 20 V testas fullständigt.

3.5.6 Slutgiltig prototyp

När ursprungskretsen för uppmätning av ström och spänning fungerade godtagbart fortsatte processen med att lägga till fler funktioner. Kretsen utökades med ett styrsystem i form av två knappar, en LCD-skärm och en termometer. Den första knappen i styrningen användes för att starta mätningen och den andra knappen till att avsluta mätningarna och presentera resultatet direkt på LCD-skärmen. Då även temperaturen har en inverkan på IV-kurvan installerades också en termometer, för att på så vis kunna logga värdena för jämförelse. När dessa komponenter fungerade, kopplades data logger shield in i kretsen. Detta möjliggjorde att mätdatan Arduino UNO sparades på ett SD-kort. Därefter kunde den anslutas till en dator för att plotta IV- och PV-kurvor. Den utökade kretsen visas i Figur 19.



Figur 19: Komponentschema för prototypens slutgiltiga krets

När alla komponenter var installerade och kretsen fungerade tillräckligt effektivt löddes kretsen fast på en PCB-Breadboard. Detta för att underlätta hantering av systemet, då den inte bryts vid användning.

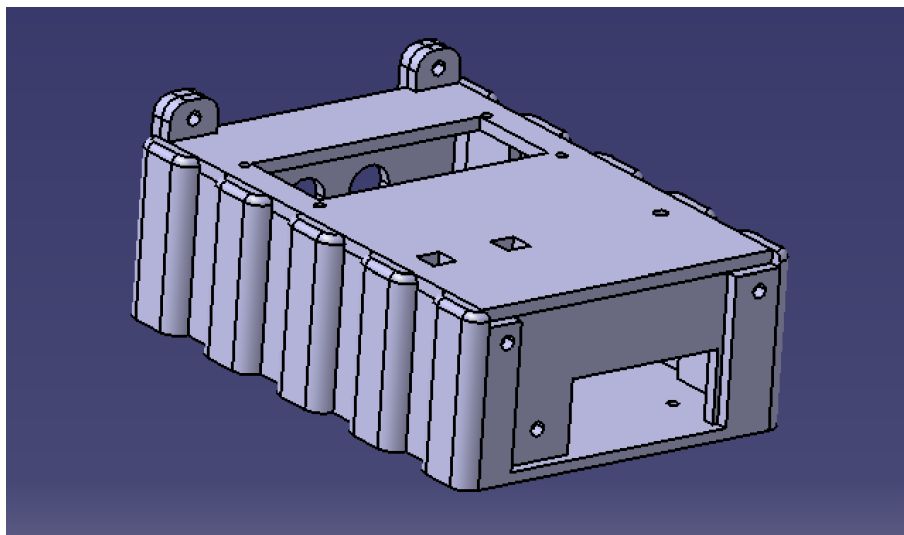
3.5.7 Val av elektriska komponenter

För att realisera den slutliga kretsen och åstadkomma de efterfrågade funktionerna införskaffades följande komponenter under utvecklingens gång:

- **Arduino UNO**
Mikrokontrollerkort med digitala och analoga portar för styrning samt avläsning från olika sensorer och mätinstrument i realtid [31]. Detta möjliggör analyser och beräkningar av den insamlade datan. Arduinon har en maxström på 40 mA och en maxspänning på 5 V. Denna mikrokontroller valdes med hänsyn till dess förmåga att samverka med övriga nödvändiga komponenter, användarvänlighet och kostnadseffektivitet.
- **Effektpotentiometer 3,26 A**
Den valda effektpotentiometern har en maxström på 3,26 A och en maxresistans på 100 Ω . Effektpotentiometrar är viktiga för att hantera höga strömmar och temperaturer i kretsen. En ström som överstiger maxströmmen kan orsaka överhettning av kretsens komponenter, vilket kan leda till skador eller funktionsfel. Genom att använda en effektpotentiometer kan man reglera och begränsa strömmen som flyter genom kretsen, vilket minskar risken för överhettning.
- **Strömsensormodul ACS712**
Högkvalitativ strömsensor som kan användas i kombination med en Arduino. Driftspänningen är 5V/DC och mätområdet är -5/+5 A. Strömsensorn består av en noggrann, lågoffset, linjär hall-sensorkrets med en koppar ledningsbana. Den applicerade strömmen genom kopparledningsbanan genererar ett magnetfält som tar upp hall-sensorn och därefter omvandlar den till en proportionell spänning. Denna utspänning motsvarar 185 mV/A. Valet av denna sensor grundade sig i att det på ett enkelt sätt går att använda datan från sensorn i en programvara eller styrenhet. Sensorn har också inbyggda skyddsfunktioner som skyddar mot överström och överhettning, vilket gör den tillförlitlig och säker att använda i högströmsapplikationer, vilket prototypen ska användas till.
- **Data logger Shield**
En data logger Shield är en tilläggsenhet till Arduino med integrerad SD-kortsmodul, vilket möjliggör insamling av data som sparas direkt på SD-kortet. Den valdes på grund av dess enkelhet att använda och dess förmåga att lagra stora mängder data. SD-kortet är en minnesenhet som används för att lagra eftersträvd mätdata under mätningarna. Därefter kan data överföras till en dator för vidare analys och visualisering. SD-kortet är särskilt användbart för att generera IV- och PV-grafer genom att använda datan i en kalkylbladsapplikation, som i detta fall valdes till Excel.
- **NTC Temperatursensor**
Temperatursensor som mäter temperatur i intervallet -50 – 100°C. Denna temperatursensor valdes på grund av dess förmåga att enkelt integreras med Arduinon, vilket gör den kompatibel med systemet. Vidare var NTC temperatursensorn kostnadseffektiv och har en liten storlek, vilket gjorde den lämplig för integration i prototypen.
- **16x2 LCD-display**
Display med möjlighet att visa 16x2 karaktärer. LCD-display valdes som ett lämpligt alternativ för att visa mätningar i realtid på grund av dess förmåga att enkelt integreras med Arduino och dess enkla användning.

3.6 CAD-modellering

För att skydda kretsens ingående delar och göra mätinstrumentet mer lätthanterligt utformades även en inneslutande låda med hjälp av programvaran CATIA V5. Modellen, som presenteras i Figur 20, optimerades för att vara så kompakt och lätthanterlig som möjligt. Detta för att underlätta processen av att uppskatta solpanelers prestanda och påvisa att konceptet har vidare utvecklingspotential som är intressant vid ett vidare produktutvecklingsarbete.



Figur 20: CAD-modell av mätverktygets inneslutande låda.

3.7 Prototypmätningar

Den färdigkonstruerade prototypen användes för att genomföra tester på solpaneler. Testerna utomhus utfördes på samma sätt som för de manuella testerna. Efter genomförda mätningar överfördes data från SD-kortet till en dator. Därefter analyserades datan i excel för att därefter generera både IV- och PV- kurvor. I syfte att minska effekterna av brusiga mätvärden, plottades även en trendlinje i IV- och PV-kurvorna. Detta gjordes med hjälp av en polynomlinje med grad 5 i excel som kunde anpassas till mätvärdena.

Två mätningar med prototypen genomfördes samtidigt som de manuella mätningarna, detta för att säkerställa samma utomhusförhållanden. Simultana mätningar innebär mycket snarlika miljöförhållanden. Detta gör att dessa mätningar kan användas för jämförelser av de två mätning metoderna samt för att säkerställa att prototypen kunde ge tillförlitliga mätresultat och vara användbar vid framtida mätningar av solpaneler. Baserat på att de manuella mätningarna var tidskrävande genomfördes endast två mätningar samtidigt med prototypen. Därefter användes prototypen för att genomföra tester på resterande solpaneler.

3.8 Jämförelser med datablad

Datablad för solpanelerna från First Solar FS-380 Series 3 PV Module (se Bilaga A) användes vid jämförelsen av garanti och verklig prestanda från mätningarna. Detta eftersom databladet från Solibro SL2-F (se Bilaga B) saknade en garanti. Enligt garanti-villkoren på solpanelens datablad säkerställs att solpanelens maximala effekt vid P_{MPP} inte understiger 90 % av dess nominella uteffekt efter en period på 10 år. Samt att den inte understiger 80 % av originaleffekten under 25 år. Denna information tillämpades för att skapa en linjär prognos över solpanelernas förväntade prestanda enligt garantin över tid. De nominella mätvärdena i databladet är framtagna i standardiserade testvillkor enligt STC-tester. Dessa testvillkor innebär en ineffekt på 1000 W/m^2 , temperatur på 25°C och en luftmassa på 1.5. Tabell 2 presenterar relevant information om solcellspanelernas nominella värden från databladet för First Solar och Solibro.

Tabell 2: Tabell över elektriska parametrar för solpaneler från First Solar och Solibro

	First Solar	Solibro
P_{MPP} (W)	80	130
V_{MPP} (V)	48,5	83,4
I_{MPP} (A)	1,65	1,54
V_{OC} (V)	60,8	104,5
I_{SC} (A)	1,88	1,75

Förhållandena som används vid de framtagning av de nominella mätvärdena var svåra att återskapa med den labbutrustning och miljö som stod till förfogande. I det här fallet var det mer rimligt att använda verkningsgraden som jämförelseparameter istället för uteffekten. Detta beror på att uteffekten direkt påverkas av solinstrålningen och kan vara missvisande vid jämförelser mellan solpaneler som har testats vid olika solinstrålningar. Enligt databladet är den nominella uteffekten 80,0 W i det standardiserade testvillkoret. För att beräkna den nominella verkningsgraden användes ekvation 3.

$$\eta = \frac{P_{nyttig}}{P_{tillförd}} \quad (3)$$

Därefter användes den linjära modellen för att prognostisera solpanelernas förväntade verkningsgrad baserat på deras ålder. Den förväntade verkningsgraden användes som jämförelseparameter med den uppmätta verkningsgraden för att erhålla insikt i hur solpanelernas åldrande påverkat deras prestanda.

4 Resultat

Detta kapitel presenterar resultaten från de manuella mätningarna och prototypmätningarna på respektive solpanel. Dessutom inkluderar kapitlet en jämförelse mellan prototypens, manuella mätningarnas samt databladets verkningsgrad. Presentationen av jämförelsen utförs för att uppfylla projektets syfte.

4.1 Skickutvärdering av solpaneler

Syftet med detta kapitel är att beskriva det yttre skicket av de sex testade solpanelerna. För att kunna analysera resultatet samt dra slutsatser om de olika solpanelerna är dessa fysiska egenskaper viktiga att ta hänsyn till. Dessutom tilldelades de en numerisk beteckning i intervallet 1 till 6 för att möjliggöra en systematisk granskning av solpanelerna.

4.1.1 Solpanel 1 (FS-380)

Solpanel 1 har sprickbildning på dess yta, se Figur 21. Det finns en okänd lackering på glaset som har applicerats för att skydda panelen från fukt efter sprickbildning, se Figur 21c. Vid hantering av solcellen fortsatte sprickbildningen öka i storlek.



(a) Helbild



(b) Detaljbild



(c) Detaljbild

Figur 21: Skickutvärdering solpanel 1

4.1.2 Solpanel 2 (FS-380)

Solpanel 2 har inga okulära anmärkningar på yttre skicket, se Figur 22.



Figur 22: Skickutvärdering solpanel 2

4.1.3 Solpanel 3 (FS-380)

Solpanel 3 har tre stycken sprickbildningar, Figur 23, varav en djupare, se Figur 23d.



(a) Helbild



(b) Detaljbild

(c) Detaljbild

(d) Detaljbild

Figur 23: Skickutvärdering solpanel 3

4.1.4 Solpanel 4 (FS-380)

Solpanel 4 har restbeläggning från emballage på glaset, från transport, se Figur 24b.



Figur 24: Skickutvärdering solpanel 4

4.1.5 Solpanel 5 (FS-380)

Solpanel 5 har restbeläggning från emballage på glaset, från transport, se Figur 25b.



Figur 25: Skickutvärdering solpanel 5

4.1.6 Solpanel 6 (Solibro)

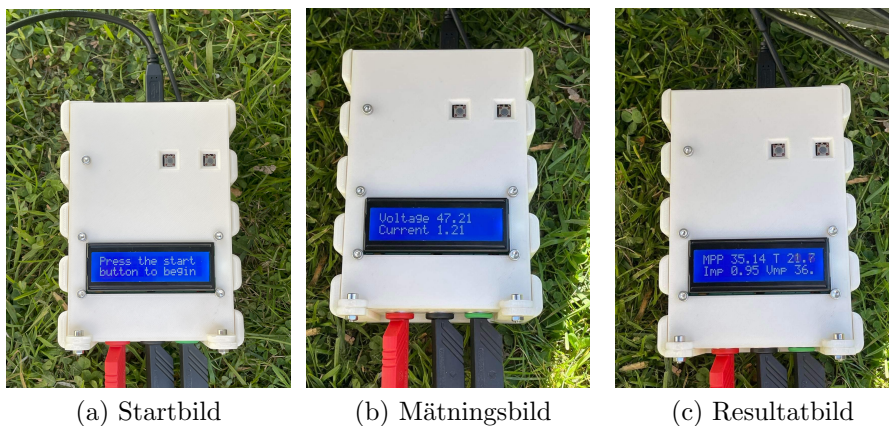
Solpanel 6 har inga okulära anmärkningar på yttre skicket, se Figur 26.



Figur 26: Skickutvärdering solpanel 6

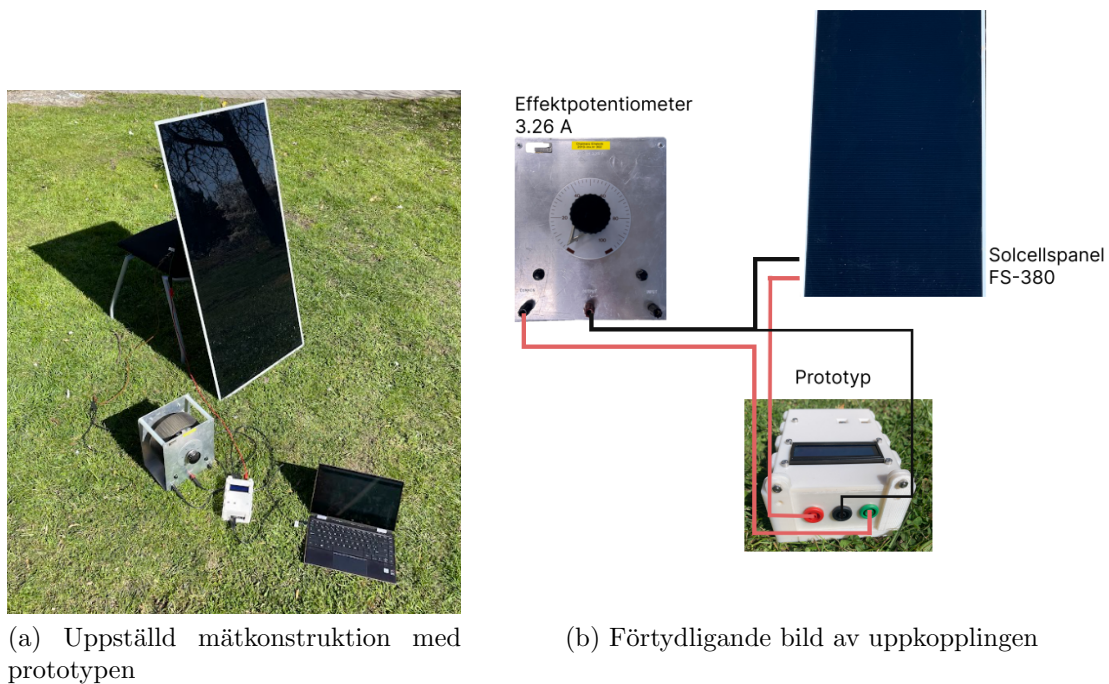
4.2 Färdigställd prototyp

Den färdigställda prototypen presenteras i Figur 27. Prototypen konstruerades med avsikt att innefatta tre steg. Det första steget är att starta prototypmätningarna, vilket utförs genom att trycka på den vänstra knappen, Figur 27a. Under det andra steget observeras den uppmätta spänningen och strömmen via LCD-skärmen vid den specificerade resistansen, Figur 27b. Det är i detta skede potentiometern justeras för att få samtliga mätningar för att prototypen ska kunna beräkna P_{MPP} -värdet. Ändringarna av ström och spänning uppdateras ständigt på LCD-skärmen. Det slutgiltiga steget, efter att potentiometern justerats färdigt, är att trycka på den högra knappen. Detta resulterar i Figur 27c, där LCD skärmen visar MPP, I_{MPP} , V_{MPP} och temperaturen. Efter de genomförda mätningarna kan SD-kortet från prototypen överföras till en dator för att få fram IV- och PV-kurvor.



Figur 27: Färdigställd prototyp

Figur 28b illustrerar de tre anslutningspunkterna, en röd, en svart och en grön, på prototypen där kablar kan anslutas. Den röda anslutningspunkten är avsedd för att ansluta prototypen till den positiva polen från solpanelen. Den svarta anslutningen är avsedd för att ansluta potentiometern ena utgång och solpanelens negativa pol. Den gröna anslutningspunkten är avsedd för att ansluta potentiometerns andra utgång till prototypen. Figur 28 visar prototypen monterad i en komplett mätkonstruktion utomhus.



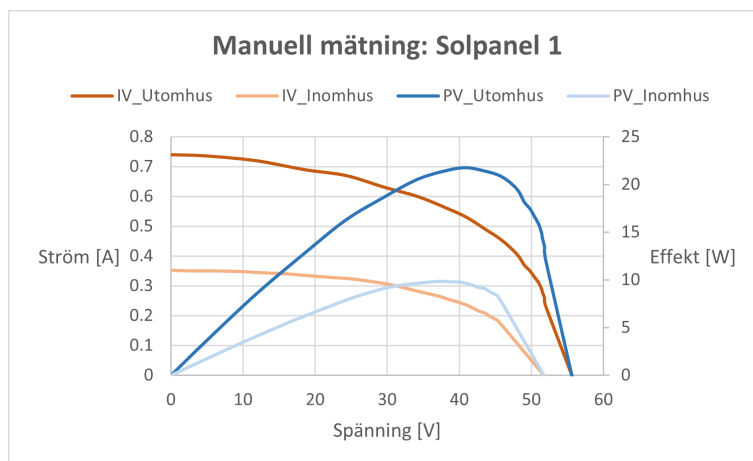
Figur 28: Koppling av prototyp till solpanel

4.3 Mätresultat för solpanel 1

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 1.

4.3.1 Manuell mätning

Mätningarna som gjordes utomhus på solpanel 1 skedde 28 mars 2023 mellan 14.20 och 14.30 där ineffekten mättes upp till 1210 W/m^2 , temperaturen uppmättes till 4°C luftmassan var ungefär AM1,79. Vid mätningen inomhus placerades ljusrampen på ett avstånd så att ineffekten med pyranometern uppmättes till samma värde.



Figur 29: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 1

Tabell 3: Uppmätta värden för solpanel 1

Solpanel 1	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,35	51,7	0,26	37,3	9,84	1,13
Utomhus	0,74	55,6	0,53	41,0	21,73	2,49

Det är tydligt från Figur 29 och Tabell 3 att samtliga elektriska parametrar minskade vid inomhusmätningarna, trots att ineffekten var densamma i båda fallen. Kortslutningsströmmen I_{SC} var parametern som uppvisade den mest markanta minskningen, medan den obelastade spänningen V_{OC} inte minskade lika mycket. Jämfört med databladet för FS-380 (se Bilaga A) är det en klar försämring i prestanda, även för utomhusmätningarna, trots att ineffekten var högre jämfört med databladet. Enligt databladet bör uteffekten vid en ineffekt på 1000 W/m^2 ha ett värde på 80 W, vilket innebär att solpanel 1 med en uteffekt på 21.73 W har minskat med 72.8 %, vilket är en tydlig försämring. Detta återspeglas även på verkningsgraden, som ligger på 2.49 % utomhus vilket är väldigt lågt.

4.3.2 Prototyp

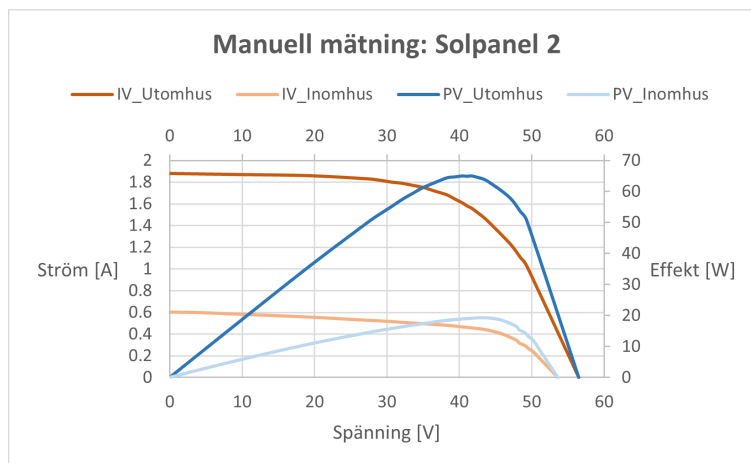
Inga prototypmätningar kunde utföras på solpanel 1. Detta berodde på att panelen hade spruckit ytterligare under hanteringen och var därför inte lämplig för teständamål.

4.4 Mätresultat för solpanel 2

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 2.

4.4.1 Manuell mätning

Mätningarna utomhus på solpanel 2 skedde 28 mars 2023 mellan 13.40-13.47, med en ineffekt på 1210 W/m^2 . Temperaturen utomhus var 4°C och det var en luft massa på ungefär AM1,70. Ljusrampen inomhus placerades så ineffekten blev densamma som för utomhusmätningarna.



Figur 30: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 2

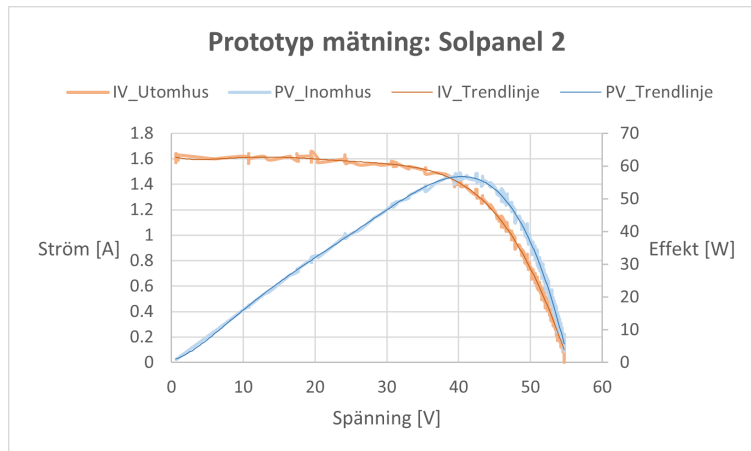
Tabell 4: Uppmätta värden för solpanel 2

Solpanel 2	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,60	53,6	0,44	43,5	19,23	2,21
Utomhus	1,88	56,5	1,56	41,7	65,05	7,47

Enligt Figur 30 och Tabell 4 så har alla parametrar minskat inomhus jämfört med utomhus förutom V_{MPP} . Enligt databladet för FS-380 (se Bilaga A) så ska kortslutningsströmmen I_{SC} uppgå i 1.88 A för en ineffekt på 1000 W/m^2 vilket panelen uppnår. Däremot kommer inte den obelastade spänningen V_{OC} upp i 60.8 V som den ska enligt databladet. Dessutom är den maximala effekten på 65.05 W lägre än för en helt ny panel, som har en specificerad uteffekt på 80 W för 1000 W/m^2 . Detta innebär att uteffekten har minskat med 18.7 % trots en högre ineffekt jämfört med databladet. Solpanelen presterar betydligt bättre utomhus, vilket också tydligt framgår av verkningsgraden inomhus som är 2.21 % jämfört med 7.47 % utomhus.

4.4.2 Prototyp

Mätningarna av solcellpanel 2 med hjälp av prototypen utfördes utomhus den 2 maj 2023 klockan 14:00. Ineffekten vid denna tidpunkt var 1061 W/m^2 och luftmassan var ungefär AM1,37. Uppmätta värden från prototypen visas i Tabell 5. I Figur 31 visualiseras prototypens IV- och PV-kurvor samt trendlinjer av dessa.



Figur 31: IV-kurva och PV-kurva för solpanel 2

Tabell 5: Uppmätta värden för solpanel 2

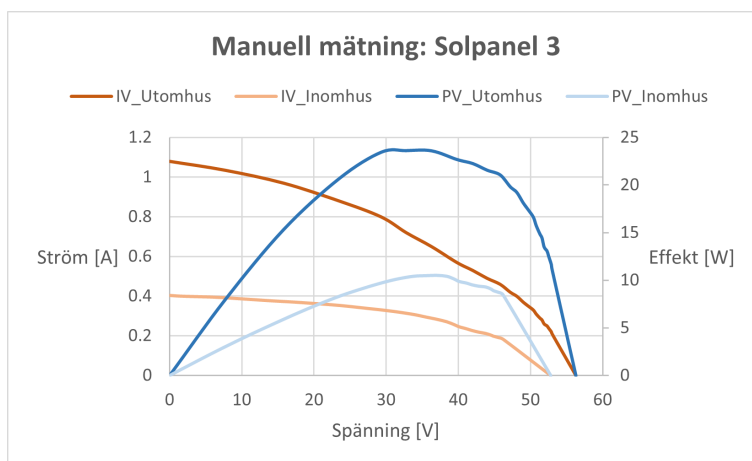
Solpanel 2	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	P_{MPP} (W)	η (%)
Prototyp	1,44	40,2	32,8	57,89	7,58
Trendlinje	-	-	-	56,50	7,40

4.5 Mätresultat för solpanel 3

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 3.

4.5.1 Manuell mätning

Mätningarna utomhus för solpanel 3 skedde 28 mars 2023 klockan 14.00-14.10 med en ineffekt på 1210 W/m^2 . Temperaturen utomhus mättes till 4°C och luftmassan var ungefär AM1,75. Inomhus placerades ljusrampen så att ineffekten var samma som för utomhusmätningarna.



Figur 32: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 3

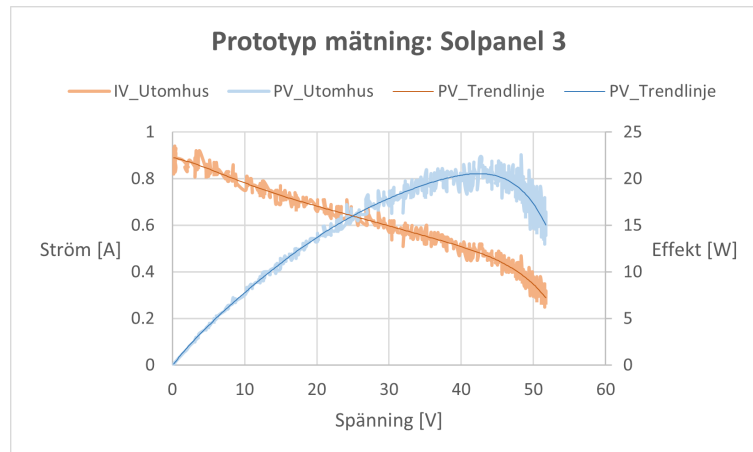
Tabell 6: Uppmätta värden för solpanel 3

Solpanel 3	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,40	52,8	0,28	37,1	10,50	1,20
Utomhus	1,08	56,3	0,72	32,8	23,61	2,71

Från Figur 32 och Tabell 6 observerades det en tydlig försämring i prestanda jämfört med databladet för FS-380 (se Bilaga A). Kortslutningsströmmen I_{SC} kom endast upp 1,08 A och den obelastade spänningen V_{OC} minskade också till 56.3 V. Det som också framgår tydligt från Figur 32 är att strömmen minskar snabbt när resistansen ökar vid utomhusmätningarna och uteffekten var betydligt lägre än den specificerade uteffekten i databladet. Verkningsgraden var också mycket låg för både inomhus- och utomhusmätningarna, då uteffekten endast uppgick i 23.61 W jämfört med databladet där den maximala effekten är 80 W. Vilket innebär att uteffekten har minskat med ungefär 70 %.

4.5.2 Prototyp

Mätningarna av solcellspanel 3 med hjälp av prototypen utfördes utomhus den 2 maj 2023 klockan 13:38. Ineffekten vid denna tidpunkt är 1123 W/m^2 och luftmassan var ungefär $AM1,36$. Uppmätta värden från prototypen visas i Tabell 7. I Figur 33 visualiseras prototypens IV- och PV-kurvor samt trendlinjer av dessa.



Figur 33: IV-kurva och PV-kurva för solpanel 3

Tabell 7: Uppmätta värden för solpanel 3

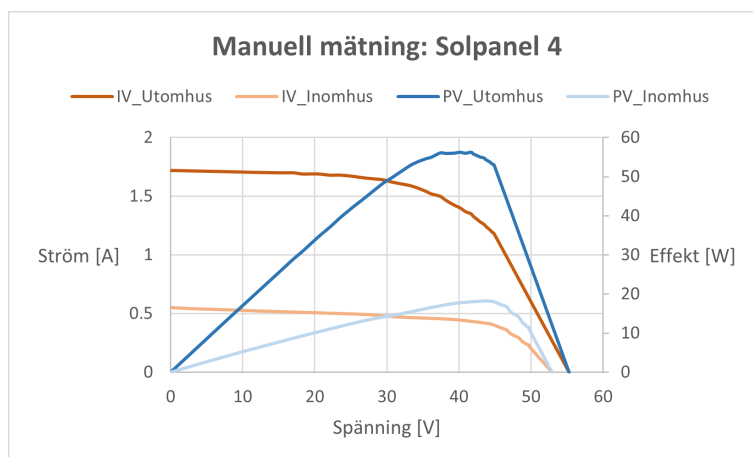
Solpanel 3	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	P_{MPP} (W)	η (%)
Prototyp	0,47	48,3	19,6	22,70	2,81
Trendlinje	-	-	-	21,5	2,67

4.6 Mätresultat för solpanel 4

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 4.

4.6.1 Manuell mätning

Mätningarna på solpanel 4 skedde 28 april 2023 klockan 14.00-14.10 med en ineffekt på 1020 W/m^2 , luftmassan var ungefär AM1,40 och temperaturen utomhus var ungefär 10°C . Mätningarna inomhus skedde med en annan ineffekt på 1210 W/m^2 .



Figur 34: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 4

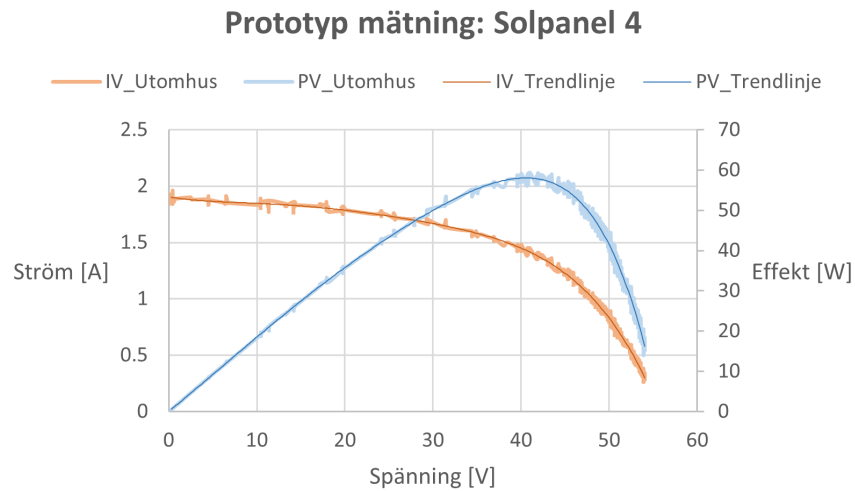
Tabell 8: Uppmätta värden för solpanel 4

Solcellspanel 4	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,55	52,90	0,41	44,40	18,20	2,48
Utomhus	1,72	55,3	1,35	41,70	56,30	7,67

I Figur 38 och Tabell 12 beskrivs värdena som uppmättes utomhus och inomhus för solpanel 4. Trots att det registrerades en högre ineffekt inomhus så var det en tydlig försämring i prestanda vilket återspeglas i de elektriska parametrarna. Där kortslutningsströmmen I_{SC} hade den mest påtagliga minskningen samtidigt som att den obelastade spänningen V_{OC} inte minskade lika mycket. Enligt databladet för FS-380 (se bilaga A) förväntas en uteffekt på 80 W vid en ineffekt på 1000 W/m^2 , vilket innebär att för solpanel 4 har uteffekten minskat med ungefär 29.6 % vilket är en tydlig försämring.

4.6.2 Prototyp

Mätningarna av solcellpanel 4 med hjälp av prototypen utfördes utomhus den 28 april 2023 klockan 14:00. Ineffekten vid denna tidpunkt är 1020 W/m^2 och luftmassan var ungefär AM1,40. Uppmätta värden från prototypen visas i Tabell 9. I Figur 35 visualiseras prototypens IV- och PV-kurvor samt trendlinjer av dessa.



Figur 35: IV-kurva och PV-kurva för solpanel 4

Tabell 9: Uppmätta värden för solpanel 4

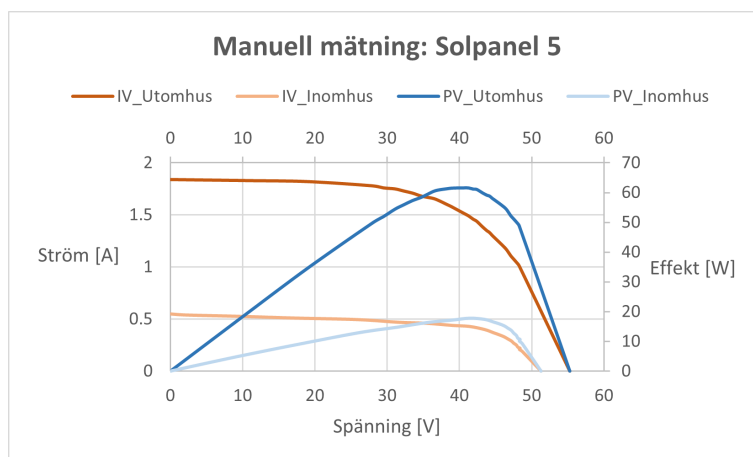
Solpanel 2	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	P_{MPP} (W)	η (%)
Prototyp	1,45	40,98	30,5	59,42	8,09
Trendlinje	-	-	-	57,81	7,87

4.7 Mätresultat för solpanel 5

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 5.

4.7.1 Manuell mätning

Mätningarna utomhus skedde 2 maj 2023 klockan 10.40-10.50 med en ineffekt på $1100\text{W}/\text{m}^2$. Luftmassan var ungefär $\text{AM}1,58$ och temperaturen var 11°C .



Figur 36: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 5

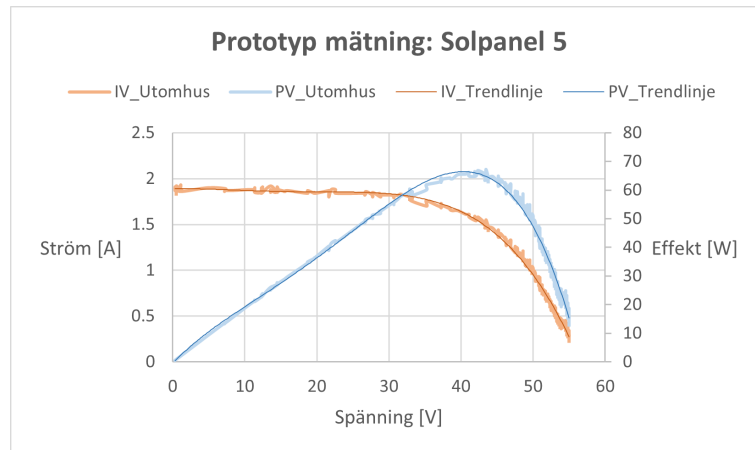
Tabell 10: Uppmätta värden för solpanel 5

Solpanel 5	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,55	52,90	0,41	44,40	18,20	2,30
Utomhus	1,84	55,3	1,52	40,5	61,56	7,78

Enligt informationen från Figur 36 och Tabell 10 uppnådde solpanel 5 en relativt hög effekt på $61,56\text{ W}$ utomhus. Detta representerar en tydlig förbättring jämfört med prestandan inomhus. Dock är det en minskning jämfört med specificerad ineffekt i databladet för FS-380 (se bilaga A) där den förväntade effekten för en ny solpanel är 80W . Detta innebär att trots en högre ineffekt vid utomhusmätningarna minskade uteffekten med ungefär $23,1\%$, vilket är en tydlig försämring. Kortslutningsströmmen I_{SC} minskade inte lika mycket jämfört med databladet då den förväntade kortslutningsströmmen för en helt ny panel bör vara $1,88\text{A}$ vid $1000\text{ W}/\text{m}^2$. Enligt databladet så bör den obelastade spänningen V_{OC} vara $60,8\text{V}$ för en ny panel vilket innebär att även den minskade. En betydande skillnad observerades även i verkningsgraden utomhus jämfört med inomhus. Där verkningsgraden utomhus kom upp i $7,78\%$ jämfört med $2,30\%$ inomhus.

4.7.2 Prototyp

Mätningarna av solpanel 5 med hjälp av prototypen utfördes utomhus den 2 maj 2023 klockan 10:40. Ineffekten vid denna tidpunkt är 1100 W/m^2 och luftmassan var ungefär AM1,58. Uppmätta värden från prototypen visas i Tabell 11. I Figur 37 visualiseras prototypens IV- och PV-kurvor samt trendlinjer av dessa.



Figur 37: IV-kurva och PV-kurva för solpanel 5

Tabell 11: Uppmätta värden för solpanel 5

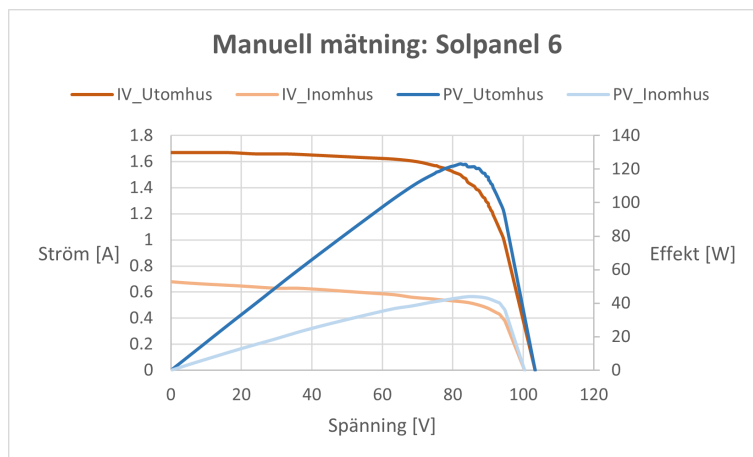
Solpanel 5	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	P_{MPP} (W)	η (%)
Prototyp	1,55	43,47	38,1	67,38	8,51
Trendlinje	-	-	-	65,80	8,30

4.8 Mätresultat för solpanel 6

Detta avsnitt syftar till att presentera resultatet från mätningarna genomförda manuellt samt med prototypen på solpanel 6.

4.8.1 Manuell mätning

Mätningarna utomhus på solpanel 6 skedde 17 april 2023 mellan 11.00-11.15. Ineffekten var ungefär 1230 W/m^2 , luftmassan var AM1,68 och utomhustemperaturen var 10°C . Ljusrampen inomhus placerades så att ineffekten var samma som vid utomhusmätningarna.



Figur 38: IV-kurvor och PV-kurvor för solpanel 4

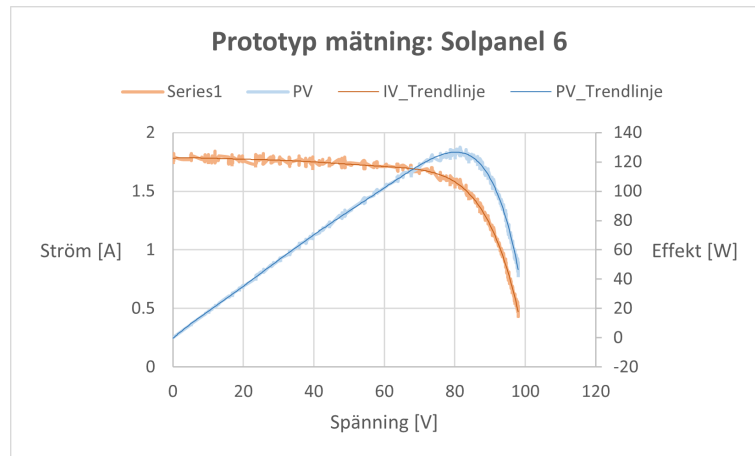
Tabell 12: Uppmätta värden för Solpanel 6

Solpanel 6	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)	η (%)
Inomhus	0,68	100,3	0,52	84,4	43,89	3,77
Utomhus	1,67	103,3	1,47	83,6	122,89	10,56

Utifrån Figur 38 och Tabell 12 observerades en tydlig skillnad i prestanda mellan utomhus- och inomhusförhållanden. Solpanelen visar en betydligt högre uteffekt utomhus, vilket resulterar i en högre verkningsgrad på 10,56 % utomhus jämfört med 3,77 % inomhus. Enligt databladet för SL2-F (se bilaga B) förväntas en effekt på 130W, vilket innebär att uteffekten vid utomhustesterna minskade med 5,47 % trots att ineffekten var högre. Dessutom minskade både kortslutningsströmmen I_{SC} och den obelastade spänningen V_{OC} vid både inomhus- och utomhusmätningarna jämfört med databladet, trots att solpanelen är ny.

4.8.2 Prototyp

Mätningarna av solpanel 6 med hjälp av prototypen utfördes utomhus den 5 maj 2023 klockan 14:40. Ineffekten vid denna tidpunkt är 1151 W/m^2 och luftmassan var ungefär AM1,41. Uppmätta värden från prototypen visas i Tabell 13. I Figur 39 visualiseras prototypens IV- och PV-kurvor samt trendlinjer av dessa.



Figur 39: IV-kurva och PV-kurva för solpanel 6

Tabell 13: Uppmätta värden för solpanel 6

Solpanel 6	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	P_{MPP} (W)	η (%)
Prototyp	1,60	81,49	23,6	130,38	11,97
Trendlinje	-	-	-	125,32	11,51

4.9 Inre resistanser

Detta kapitel presenterar inre resistanser som har beräknats enligt ekvationerna (1.1), (1.2) och (1.3) i Teoriavsnittet 2.4.3 med värden från de uppmätta IV-kurvorna. I Tabell 14 visas inre resistanser som beräknats från de manuella inomhusmätningarna.

Tabell 14: Inre resistanser från inomhusmätningarna

Inomhusmätningar			
Solpaneler	R_{CH} (Ω)	R_S (Ω)	R_{SH} (Ω)
Solpanel 1	141,29	34,81	423,86
Solpanel 2	98,42	14,08	450
Solpanel 3	131,09	36,90	325,70
Solpanel 4	108,29	14,29	458,33
Solpanel 5	108,29	14,29	458,33
Solpanel 6	162,3	14,70	563,80

Från Tabell 14 så är det tydligt att R_S är hög för båda solpanelerna med sprickor och lägre för de hela panelerna vid mätningarna inomhus. Dessutom är R_{SH} relativt hög inomhus även för solpanelerna med sprickor.

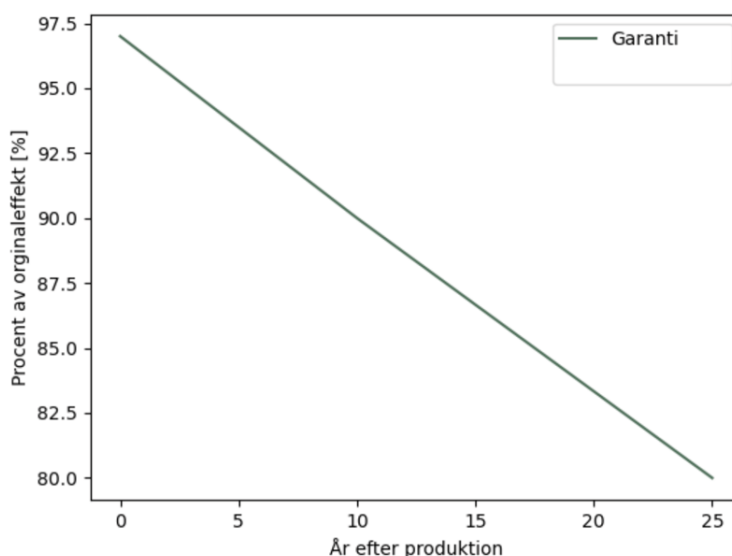
Tabell 15: Inre resistanser från utomhusmätningarna

Utomhusmätningar			
Solpaneler	R_{CH} (Ω)	R_S (Ω)	R_{SH} (Ω)
Solpanel 1	77,36	15,65	347,14
Solpanel 2	26,73	6,99	960
Solpanel 3	45,55	16,00	143,64
Solpanel 4	30,89	8,81	850
Solpanel 5	26,64	6,93	955
Solpanel 6	54,70	9,92	1402,50

Jämfört med värden som beräknades från mätningarna inomhus så är det en klar förändring vid mätningarna utomhus vilket kan avläsas från Tabell 15. Serieresistansen R_S är fortfarande lägre för de hela panelerna, samtidigt så är R_{SH} för de hela panelerna större jämfört med mätningarna inomhus. Däremot så minskade R_{SH} för solpanelerna som hade sprickor i sig utomhus jämfört med mätningarna som skedde inomhus.

4.10 Jämförelse mellan förväntad och uppmätt verkningsgrad

Från informationen från garanti villkoren på solpanelens datablad framställs en linjär graf, Figur 40. Den linjära grafen återger den förväntade prestandan hos solpanelerna i relation till deras nominella prestanda, efter en viss tidsperiod.



Figur 40: Garanti från producent

Från Figur 40 går det att avläsa att effekten efter 10 år bör vara 90 % av originaleffekten. Det går även att avläsa att efter 4 år bör effekten vara 94,6 % av originaleffekten. I ekvation 4 och ekvation 5 beräknas den nominella verkningsgraden för solpanelerna från First Solar, FS-380, och från Solibro. Efter detta tillämpas den nominella verkningsgraden för att uppskatta solpanelernas verkliga verkningsgrad enligt garantin vid aktuell tidpunkt, ekvation 6 och 7.

$$\eta_{First\ Solar} = \frac{80}{1000 \cdot 0,72} = 11,43 \% \quad (4)$$

$$\eta_{Solibro} = \frac{130}{1000 \cdot 0,946} = 13,21 \% \quad (5)$$

$$\eta_{First\ Solar, 10} = 0,9 \cdot 11,43 = 10,29 \% \quad (6)$$

$$\eta_{Solibro, 4} = 0,94 \cdot 13,21 = 12,42 \% \quad (7)$$

Tabell 16 och Tabell 17 presenterar verkningsgraden enligt garantin, manuella inomhusmätningar, manuella utomhusmätningar, prototypmätningar och trendlinjen för respektive solpanel.

Tabell 16: Verkningsgrad för solpaneler 1, 2 och 3

Verkningsgrad	Solpanel 1 (%)	Solpanel 2 (%)	Solpanel 3 (%)
Garanti	10,29	10,29	10,29
Manuella inomhusmätningar	1,13	2,21	1,20
Manuella utomhusmätningar	2,49	7,47	2,71
Prototyp utomhusmätningar	-	7,58	2,81
Trendlinje prototyp	-	7,40	2,67

Tabell 17: Verkningsgrad för solpaneler 4, 5 och 6

Verkningsgrad	Solpanel 4 (%)	Solpanel 5 (%)	Solpanel 6 (%)
Garanti	10,29	10,29	12,42
Manuella inomhusmätningar	2,48	2,30	3,77
Manuella utomhusmätningar	7,67	7,78	10,56
Prototyp utomhusmätningar	8,09	8,51	11,97
Trendlinje prototyp	7,87	8,30	11,51

5 Diskussion

I följande delkapitel diskuteras projektets resultat utifrån den valda metoden, utmaningar under arbetet och relevanta felkällor. Hur väl arbetet uppfyllt syftet analyseras i detta kapitel och diskussionen av resultatet används sedan för att komma fram till projektets slutsats.

5.1 Verifiering av prototypens prestanda i jämförelse med de manuella mätningarna

För att validera prestandan hos prototypen utfördes en jämförelse mellan den erhållna verkningsgraden från prototypen och verkningsgraden som erhöles från manuell mätning. Enligt resultaten presenterade i tabell 16 och tabell 17, kan det observeras att den procentuella skillnaden i verkningsgrad mellan prototypmätningen och manuell mätning i genomsnitt var 6,67 %. Den procentuella skillnaden i verkningsgrad mellan manuella mätningar och trendlinjen är i genomsnitt 4,15 %. Användningen av en trendlinje saknar hänsyn till störningar, avvikelser eller annan osäkerhet i mätningarna. Detta kan förklara varför trendlinjen visar ett närmare överensstämmelse med de manuellt uppmätta värdena. Det är emellertid av vikt att observera att de manuella mätningarna inte erhåller förhållanden som är helt idealiska, och därför inte kan användas som en direkt referenspunkt. Följaktligen syftar denna jämförelse inte till att uppnå exakt samma resultat som de manuella mätningarna, utan snarare att uppnå liknande resultat. En skillnad på 6,67 % respektive 4,15 % anses vara godtagbart för att verifiera prototypens prestanda. Ytterligare kan det konstateras att tillämpningen av en trendlinje kan vara högst användbar, då den avlägsnar avvikande punkter och brus från det generella mönstret.

Det är viktigt att notera att prototypen samplar ett större antal mätpunkter jämfört med de manuella mätningarna, vilket skapar en mer exakt bild av IV- och PV-kurvorna. Detta kan göra prototypen mer tillförlitlig än de manuella mätningarna. En annan skillnad viktig att notera är temperaturmätningarna. Vid de manuella mätningarna användes lufttemperaturen. Vid mätning med prototypen användes den inbyggda temperatursensorn. Denna sensor placerades brevid solpanelen vilket resulterade i en mer tillförlitlig avläsning av solpanelens temperatur. Mellan den 28 mars och 2 maj genomfördes manuella utomhusmätningar, medan prototypmätningarna genomfördes mellan den 28 april och 5 maj. Det är möjligt att dessa tidsmässiga skillnader kan ha bidragit till skillnaderna i resultaten mellan de två metoderna, eftersom väderförhållandena har en betydande påverkan på P_{MPP} .

5.2 Analys av prototypresultat och datablad

Garantin för FS-380 solpanelen har en verkningsgrad på 10,29 % efter 10 år, vilket ingen av solpanelerna 1–5 uppnådde enligt samtliga mätningar. Solpanel 3 hade den lägsta verkningsgraden på 2,27 %, medan solpanel 5 hade den högsta verkningsgraden på 8,30 %. Procentsatserna som presenteras i följande delkapitel hämtas från Tabell 16 och 17.

Eftersom testerna inte utfördes under ideala STC-förhållanden är det viktigt att ta hänsyn till detta vid jämförelsen av resultaten med informationen i databladet. Det är därför möjligt att det kan förekomma avvikelser mellan resultaten och informationen i databladet på grund av de skilda förutsättningarna. Däremot antas mätresultaten vara tillförlitliga för att göra en jämförelse mellan solpanelerna, då utförda mätningar genomförts under samma förutsättningar. Samtliga utomhusmätningar hade en högre ineffekt än ineffekten

enligt STC förhållanden vilket enligt teorin borde resultera i ett högre P_{MPP} vilket inte stämmer mot resultatet. Detta faktum kan indikera att de övriga skillnaderna i STC-förhållandena spelar en betydande roll. Ytterligare studier och analyser kan behövas för att identifiera vilka faktorer som har störst påverkan på verkningsgraden. Förutom den ineffekt som tidigare nämnades, finns det andra faktorer som avviker från STC förhållandena, såsom temperaturen och luftmassan. Dessa faktorer kan också ha en betydande påverkan på solcellernas prestanda och därmed bidra till skillnader i resultaten. Följande avsnitt beskriver specifika skillnader mellan den förväntade verkningsgraden enligt databladet och den faktiska verkningsgraden som erhållits från trendlinjen i mätresultaten.

Solpanel 2 uppmättes till en verkningsgrad på 7,40 % med prototypen och avvek med 2,89 procentenheter jämfört med garantin i databladet. Enligt skickutvärderingen fanns inga anmärkningar på det yttre skicket.

Solpanel 3 uppmättes till den lägsta verkningsgraden på 2,67 % med prototypen och avvek med 7,62 procentenheter jämfört med garantin i databladet. Enligt skickutvärderingen fanns det anmärkningar på det yttre skicket, inklusive tre sprickbildningar som ger upphov till en effektdifferens på 88 % jämfört med garantin. Detta stämmer överens med vad som presenterades i kapitel 2.7 i teorin där det beskrivs hur cellsprickor kan ha stor inverkan på solpanelers prestanda. En mer rättvisande jämförelse av solpanel 3 är att jämföra med solpanel 2 och effektdifferensen mellan dessa paneler är 63,7 %. På solpanel 1 utfördes endast manuella mätningar och dessa resulterade i en verkningsgrad på 2,49 %, vilket nära efterliknar solpanel 3. Däremot är det tydligt från de utförda mätningarna att sprickbildningen på solpanel 1 och 2 haft betydande inverkan på deras prestanda. Båda dessa paneler har tydlig sprickbildning och givit upphov till betydande effektminskningar. På grund av solpanelers konstruktion med serie- och parallellkopplade solceller är det svårt att visuellt bedöma hur en yttre spricka har påverkat solpanelens interna funktionalitet, vilket även det presenteras i teorikapitel 2.4.4.

Solpanel 4 uppmättes till den näst högsta verkningsgraden på 8,09 % med prototypen och avvek med 2,42 procentenheter jämfört med garantin i databladet. Enligt skickutvärderingen fanns inga anmärkningar på det yttre skicket, förutom märken på glaset från plastemballaget. Jämfört med solpanel 2 presterade solpanel 4 till och med 0,45 procentenheter bättre, vilket antyder att restbelägget från emballaget inte har en stor påverkan på prestandan.

Solpanel 5 uppmättes till en hög verkningsgrad på 8,30 % med prototypen och avvek med 1,99 procentenheter jämfört med garantin i databladet. Enligt skickutvärderingen fanns inga anmärkningar på det yttre skicket, förutom restbelägg från emballaget. Det är svårt att avgöra utifrån det yttre skicket varför solpanel 5 presterar 0,43 procentenheter bättre än solpanel 4. Vilket ger en indikation att solpanel 5 potentiellt åldrats bättre än solpanel 4. Däremot är den typen av slutsatser svårare att konkretisera då enbart ett fåtal mätningar under varierande förhållanden utförts. De manuella mätningarna bekräftar dock även dem att solpanel 5 presterar bättre än solpanel 4 vilket även det styrker antagandet att solpanel 5 haft en mer förmånlig åldring.

Enligt garantin för First Solar bör Solibro solpanelen ha en verkningsgrad på 12,42 % efter 4 år. Solpanel 6 uppmättes till en verkningsgrad på 11,51 % med prototypen och avvek med 0,51 procentenheter jämfört med garantin i databladet. Enligt skickutvärderingen fanns inga anmärkningar på det yttre skicket, och solpanel 6 var oanvänd vid testerna och tillverkad år 2019. Detta stärker prototypens trovärdighet när det gäller att utvärdera solpanelernas prestanda.

Sammanfattningsvis är det från mätningarna att samtliga solpaneler presterar sämre än vad som prognostiserats i producenternas datablad. Viktigt att ta hänsyn till är att solpanel 1-5 har varit i bruk i Grekland under 10 års tid och kraftig solinstrålning samt högre temperaturer kan ha haft negativ inverkan på panelernas prestanda. Det kan argumenteras att solpanelerna 1-5 är i sämre skick än vad de borde vara enligt garantin och att det kanske inte bara beror på att testmiljön saknade ideala STC-förhållanden. Solpanel 6, som var i nyskick vid testtillfället, har inte använts alls under 4 års tid och lagrats sen den införskaffades. Dessa parametrar kan ha haft en påverkan på solpanelernas prestanda men det är även viktigt att ifrågasätta huruvida prototypen eller den övergripande mätmetoden producerat missvisande resultat. Det anses dock att differensen mellan de utförda mätningarna och producenternas datablad varit godtyckligt snarlika, särskilt om hänsyn tas till att mätningarna ej utfördes under ideala förhållanden. Med det som bakgrund är det svårt att avgöra huruvida samtliga paneler presterar sämre än förväntat eller om differensen beror på varierande förhållanden vid givna mätningstillfällen, som samtliga avviker från ideala förhållanden. Det som däremot kan sägas är att solpanel 2, 4 och 5 presterar bäst av FS-380, solpanel 1 och 3 presterar sämre på grund av omfattande sprickbildning och att solpanel 6 presterar bäst av samtliga men är fortfarande sämre än prognoser från First solar.

5.3 Analys av elektriska parametrar

De elektriska parametrar som togs fram för att bedöma prestandan var kortslutningsströmmen I_{SC} , den obelastade spänningen V_{OC} , den inre serieresistansen R_S och den inre shuntresistansen R_{SH} då dessa parametrar förändras med åldringen av solpaneler. De inre resistanserna hade ungefär liknande värden för de hela solpanelerna, R_{SH} för solpanelerna var höga utomhus och R_S var låga vilket är rimligt då solpanelerna är hela. Däremot uppvisade solpanelerna med sprickor en tydlig förändring, R_S ökade och R_{SH} minskade jämfört med de hela panelerna, vilket ledde till att I_{SC} och V_{OC} minskade vilket överensstämmer med teorin. Att R_S ökade kan bero på korrosion som påverkar metallkontaktarna mellan solcellerna, vilket kan leda till att det blir större förluster. En avvikelse var dock att R_{SH} minskade vid utomhusmätningarna jämfört med inomhusmätningarna för solpanelerna med sprickor, vilket inte stämmer överens med teorin då strömmen och spänningen borde öka när R_{SH} blir större. Orsaken till detta är inte helt klart, det kan möjligen bero på temperaturskillnader och ökad luftfuktighet.

Det är dock svårt att dra några slutsatser kring hur dessa parametrar påverkat åldringen av solpanelerna, på grund av att mätningarna utfördes under andra förhållanden än STC och alla solpaneler av modellen FS-380 var lika gamla. För att göra en bättre bedömning av hur dessa elektriska parametrar förändras med åldringen hade mätningar på en ny solpanel av samma modell under liknande förhållanden krävts.

5.4 Felkällor

Det finns ett flertal felkällor som behöver tas i beaktning när resultatet analyserats. Somliga gäller generellt för alla mätningar medan andra gäller specifikt för mätningar utomhus, inomhus, manuellt och mätningar som görs med den framtagna prototypen.

5.4.1 Generella felkällor

De generella felkällorna gäller för samtliga manuella mätningar och prototypmätningarna. Pyranometern hade en felmarginal, vilket tas hänsyn till vid analys av resultatet. Felmarginaler kan uppstå på grund av hög resistans, dålig anslutning eller skadade kablar, och glapp i kablarna från plus- och minusingång.

5.4.2 Felkällor vid utomhusmätningar

Föränderliga förhållanden vid utomhusmätningar gav flera felkällor, men val av miljö var fördelaktig för pålitliga resultat tack vare solinstrålning. Instrålning är en felkälla vid mätningarna utomhus, och för att minska effekterna av detta har mätarna försökt hitta likvärdig instrålning mellan olika tillfällen. På grund av det oregelbundna solstrålningsmönstret, även inom korta tidsintervall, har det inte alltid varit genomförbart att upprätthålla likvärdiga instrålningsförhållanden. För att ta reda på den rådande instrålningen gjordes fem mätningar på olika platser på panelen och ett medelvärde togs. Instrålningsvinkeln kan också påverka effekten, och därför användes pyranometern för att bestämma vinkeln med maximal effekt och placera solpanelen med detta i åtanke. Ytterligare en faktor som varierat i utomhusmiljö är temperaturen. När temperaturen stiger minskar solcellers effektivitet. Eftersom den har så stark påverkan har temperaturen antecknats vid varje mätning. Luftmassa är en viktig faktor som påverkar solpanelernas effektivitet. Felaktiga resultat på effekt kan uppstå om optimal luftmassa inte uppnås, då luftmassan påverkar strålningsvinklar. Eftersom förhållandena vid olika mätningar var olika har luftmassan också varierat, vilket kan ha påverkat resultaten. Skuggning av solceller kan påverka deras prestanda negativt. För att undvika detta har försiktighetsåtgärder vidtagits vid varje mätningstillfälle, inklusive att undvika alla former av skuggning. Solpanelerna har också hanterats varsamt för att undvika eventuella skador som skulle kunna påverka effektiviteten.

5.4.3 Felkällor vid inomhusmätningar

Vid inomhustester var det svårare att avgöra hur pyranometern skulle placeras för att korrekt mäta ineffekten. Eftersom instrålningen inomhus primärt kom från en strålkastarramp med sex stycken strålkastare monterade med ett visst avstånd från varandra skilde sig instrålning betydande över solpanelen. Detta gjorde att en ungefärlig punkt på solpanelerna fick bestämmas för att mäta instrålningen, enligt metoden. Spektrat på instrålningsvåglängderna påverkar solpanelers prestanda. Strålkastarnas strålning skiljer sig från solinstrålning och kan orsaka felkällor vid inomhusmätningar. En uppskattning av påverkan hade kunnat göras med spektroskopi, men det var inte huvudfokus i detta projekt. Felkällorna i inomhusmätningarna tros ha stor inverkan på att verkningsgraden var lägre än vid utomhusmätningar.

5.4.4 Felkällor för manuella mätningar

Mätverktygen voltmeter och amperemeter kan ge fel i resultatet på grund av mindre avvikelser från verkligheten. Felaktig kalibrering av instrumentet kan vara en möjlig felkälla. Till skillnad från prototypens mätningar, krävde dessa mätningar mer tid. Större förändringar kunde alltså ske vid dessa mätningar, särskilt i den svårkontrollerade utomhusmiljön, vilket förstärkte de tidigare nämnda felkällorna.

5.4.5 Felkällor för prototypen

Strömsensorns mätningar varierar och har en offset jämfört med kontrollmätningar med amperemeter. Detta kan åtgärdas genom flera mätningar och jämförelser med en kalibrerad amperemeter. Plötsliga fluktuationer kan dämpas genom att ignorera avvikande värden. Andra felkällor är mätosäkerhet i Arduinos portar och förluster i kablar, vilket inte förväntas påverka resultatet mycket men bör ses över vid vidareutveckling.

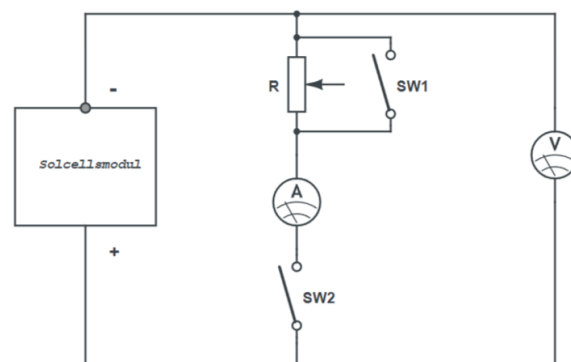
5.5 Mätsystem och vidareutveckling

Vidareutvecklingen som den automatiska mätsystemet står inför berör främst tre punkter, att ta fram fler och säkrare parametrar, göra systemet mer kompakt och därmed mer mobilt samt reducera brus i uppmätning.

5.5.1 Fler och säkrare parametrar

Genom att integrera en pyranometer i systemet kan solinstrålningen mätas upp och därefter kunna presentera modulens verkningsgrad. Detta är meningsfullt då det ger en konkret och jämförbar indikator direkt på solcellens prestanda. Det framstår som en relativt enkel åtgärd att implementera en ljussensor i systemet, för den vinning i funktion det ger och bör vara en av de första saker som tas med i en nästa prototyp. I den IV-kurvan som plottas från nuvarande prototyp tas en trendlinje fram manuellt, då mätpunkterna fluktuerar. I en vidareutveckling bör detta ske automatiskt och ge en funktion på vilken MPP kan hittas.

En annan möjlig utveckling är att ta fram en metod för att även mäta den obelastade spänningen och kortslutningsströmmen som är viktiga parametrar för att bedöma åldringen på solpanelen. En eventuell lösning hade kunnat vara att implementera två switchar i kretsen som visas i Figur 41.



Figur 41: Krettschema som visar placering av switchar

För att bestämma kortslutningsströmmen sluts båda switcharna så att belastningen från potentiometern kopplas ur och enbart strömmen kan mätas. Därefter mäts den obelastade spänningen genom att öppna switch 2, vilket kopplar bort både amperemetern och potentiometern, vilket möjliggör mätning av den obelastade spänningen.

5.5.2 Komprimering

Uppmätningen skedde med variabel resistans-metod vilket medförde att potentiometern i mätsystemet behövde tolerera en hög effekt. För att göra mätsystemet mer kompakt finns flertalet möjliga åtgärder, till exempel genom att tillverka en egen potentiometer, med parallellkopplade motstånd och ett styrsystem som kontrollerar strömbrytare som avgör genom vilka resistanser strömmen färdas. Utöver detta kan även metod för uppmätning av IV-kurva bytas ut, till DC/DC omvandlare eller elektronisk last. Genom att bygga ett styrsystem som ändrar lasten på solcellsmodulen automatiskt hade en lämplig andra prototyp kunnat tas fram.

5.5.3 Reducera brus

Ytterligare förbättringsarbete för prototypen skulle kunna åstadkommas genom att utveckla en algoritm för brusreduktion i koden som körs på Arduino-mikrokontrollern. Denna åtgärd skulle resultera i mer tillförlitliga resultat och minska behovet av att använda en trendlinje för att avlägsna extremvärden. Vidare skulle en brusreducerande algoritm öka arbetseffektiviteten genom att eliminera behovet av manuellt arbete i efterhand för att rätta till brus och avvikelser genom att skapa en trendlinje.

5.6 Framtida användning av mätverktyget

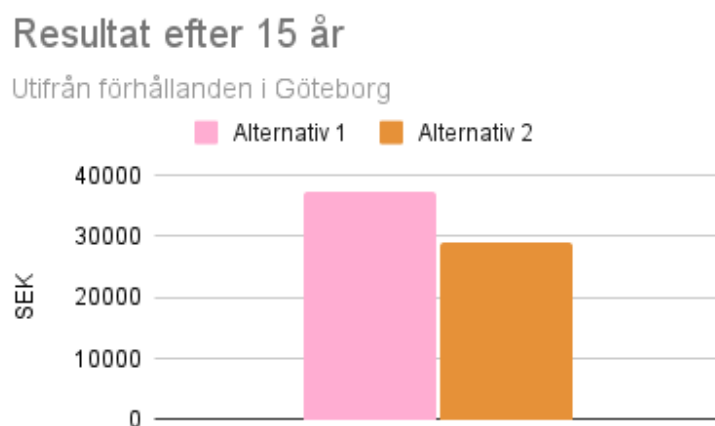
I detta avsnitt undersöks hur man kan applicera det vidareutvecklade mätsystem för att mäta solpanelers effektivitet på ett verkligt system. Två olika sätt att applicera mätverktyget i verkligheten har tagits fram. Dessa sätt är utformade för att ge en heltäckande och noggrann bild av solpanelernas prestanda och är hjälpsamma för att identifiera eventuella problem eller avvikelser från det förväntade. Genom att använda dessa metodiker kan en klar uppfattning om solpanelernas effektivitet göras och solpanelernas prestanda kan optimeras för att maximera utbytet av solenergi.

5.6.1 Mätverktyg som beslutsunderlag

Det primära tillvägagångssättet för tillämpning av mätverktyget på verkligheten är att erhålla beslutsunderlag för inköp av begagnade solpaneler. Med hjälp av mätverktyget kan man samla in relevant data och information om begagnade solpaneler som är tillgängliga på marknaden. Information i form av effekt och verkningsgrad. Genom att analysera denna data kan man få en bättre förståelse för deras prestanda och kvalitet, och också identifiera eventuella risker och utmaningar som är förknippade med inköp av begagnade solpaneler. Därefter kan denna data och information användas som beslutsunderlag för att fatta informerade beslut om inköp av begagnade solpaneler. Detta kan innefatta att jämföra olika leverantörer och erbjudanden, bedöma den totala kostnaden och lönsamheten för investeringen samt att identifiera potentiella problem och möjligheter med solpanelerna.

Mätverktygets fokus ligger på solpanelens verkningsgrad, vilket är en konkret indikator på hur mycket el panelen kan producera förutsatt att instrålningen är känd. Genom att använda sig av genomsnittlig solinstrålning i den region som solpanelen ska vara monterad kan prognoser göras över hur lönsam den är. Vid inköp av nya kan avskrivningstiden räknas ut, men även resultat över en längre tid för både nya och äldre solpaneler. På så vis kan

paneler med olika verkningsgrad samt förväntad degradering på ett tydligt vis jämföras. Nedan i Figur 42 visas en jämförelse mellan de solceller i våra mätningar fått högst respektive näst högst verkningsgrad under 15 år. Elpriset har antagits konstant snittpriset det senaste året för Göteborg (elområde 4)[32] och arean har antagits till 50 m² vilket är vanligt för en villa. Instrålningen antas vara snittet av det senaste årens instrålning under ett år i Göteborg [33]. Degraderingen av solcellernas verkningsgrad har antagits konstant på 0.05 % per år. Detta exemplet är utan hänsyn till inköpspris.



Figur 42: Lönsamhet efter 15 år, där alternativ 1 och alternativ 2 har 10,3 % respektive 8,06 % verkningsgrad

Denna representation av verkningsgrad och förväntad degradering ger konsumenter en tydlig indikation om vad dessa data innebär i verkligheten. Uträkningen går givetvis att anpassa efter konsumentens region, tillgänglig area samt inom vilken tidsram personen vill undersöka lönsamheten på. För att göra prognosen ekonomiskt pålitlig för en bör en trovärdig prisutveckling för försäljningspriset av el följas istället för ett medelvärde, men även en enklare form av prognosen ger en fingervisning när två typer av solceller jämförs och kan således fungera som beslutsunderlag för konsumenter.

5.6.2 Identifiera underpresterande moduler

Det sekundära sättet mätverktyget kan appliceras i verkligheten är för att finna mindre effektiva solpaneler som bör utbytas. För att påbörja processen är det nödvändigt att noggrant granska anläggningens elproduktion, för att finna eventuella avvikelser i produktionen som kan indikera problem med panelers effektivitet. Det är viktigt att ta hänsyn till andra faktorer som kan påverka solpanelernas prestanda, såsom skugga och väderförhållanden. När dessa övriga faktorer är uteslutna blir vårt mätsystem aktuellt för att felsöka solcellsanläggningen. Så som den första prototypen är utformad kan den enbart göra mätningar på enskilda solceller. Genom att montera isär anläggningen och testa dem enskilt kan konkreta slutsatser dras om vilken eller vilka solpaneler som underpresterar.

5.7 Reflektioner

Med hänsyn till resultaten från både manuella mätningar och utvecklingen av ett mätsystem kan vissa slutsatser dras. Projektet har resulterat i en mätmetod och tillhörande verktyg som kan ge konsumenter en bättre överblick över en solpanels prestanda. Dock är generella slutsatserna kring hur åldring påverkar solpaneler mer begränsade, på grund utav att prototypmätningarna inte genomfördes under STC förhållanden. För att åstadkomma mer tillförlitliga mätresultat borde prototypen användas i korrekta STC förhållanden. Således är prototypen av god kvalitet, men den bör användas under korrekta mättingsförhållanden för att uppnå optimala resultat. För att erhålla mer generella och pålitliga slutsatser angående åldrandet av solpaneler skulle det krävas ytterligare omfattande mätningar på en stor mängd solpaneler av olika åldrar.

Prestandauppskattningen anses vara den viktigaste aspekten vid analys av hur åldring påverkat solpaneler och den framtagna metodiken för det anses vara tillförlitlig. Det har varit möjligt att påvisa att paneler som har yttre skador eller som har belägg på glaset presterar märkbart sämre än de som inte är skadade och att alla paneler presterar sämre än vad producenterna har prognostiserat. Vid fortsatt arbete med fler solpanelstester och med fler parametrar anses det att mer generella slutsatser kring hur solpaneler påverkas av åldring kan dras. Genom att jämföra liknande solpaneler på fler sätt med bakgrund i hur och var solpanelerna har varit i bruk kan man dra mer generella slutsatser från mängddatan.

När diskussioner uppstår kring när solpaneler bör bytas ut eller kasseras måste man fortfarande ta hänsyn till de etiska frågor som lyftes i rapportens första kapitel. Att enbart se till problemet som en kostnads kalkyl av in- och utgifter speglar inte hela problemet. Kalkylen bör ta hänsyn till energin som krävs för att tillverka den nya solpanelen och de socioekonomiska aspekterna kring arbetsförhållanden vid tillverkning. Problemet blir således mer komplext men bör likaså beröras vid framtida analyser. Om solpaneler som exempelvis tillverkas i Kina, där både arbetsförhållanden är bristfälliga och utsläppen vid produktionen är höga, kan katalogiseras innan mätning kan en mer ärlig helhetsbild återspeglas om hänsyn tas kring det tillsammans med mätningarna.

En viktig aspekt att diskutera är de olika felkällor och osäkerheter som har påverkat arbetet. Vid projektets uppstart ansågs tester inomhus med strålkastare vara mycket relevanta. Dock, under projektets gång, med hjälp av testning och lärdomar, insågs det att sådana tester inte gav en tillförlitlig bild av solpanelers prestanda. Strålkastarnas våglängder efterliknade inte solens tillräckligt bra, och det insågs att tester utomhus var nödvändiga för att göra tillförlitliga jämförelser med producenternas datablad. Tester utomhus krävde dock att hänsyn togs till ytterligare parametrar, som exempelvis luftmassa och temperatur vid mätningstillfället. Dessutom producerade panelerna betydligt mer ström vilket krävde beaktande av säkerhetsaspekter.

Åldringen av solpaneler är en utmanande process att analysera. Fortsatt arbete på detta område bör präglas av en djupare analys kring åldringsaspekter som anses ha störst påverkan på panelernas degradering. Detta kan uppnås med hjälp av fler mätningar på solpaneler vars historik är mer känd, med hjälp av det utvecklade verktyget och mätmetoden.

6 Slutsats

Med hänsyn till projektets resultat anses syftet vara uppfyllt och problemformuleringen besvarad. Ett lätthanterligt mätsystem har tagits fram och resultaten från denna prototyp har använts för att analysera enskilda solpanelers prestanda i jämförelse med producenters datablad. Prototypen presenterar den studerade solpanelens P_{MPP} , yttemperatur, I_{MPP} och V_{MPP} och sparar värden från hela mätningen till ett SD-kort. Mätsystemet är mobilt och utför dessa tester med upprepbara resultat. Däremot finns också en mängd förbättringsmöjligheter vad gäller mätsystemets ingående delar samt den tillhörande koden. Arbetet har präglats av en utvecklingsprocess som har resulterat i en fungerande prototyp som kan utföra grundläggande funktionstester av solpaneler. Testerna har bland annat bevisat att sprickbildning på grund av fysiska skador har påverkar solpanelers elektriska parametrar negativt och att eventuella beläggningar på solpanelens yta även det har negativ inverkan på prestandan. Däremot är generella slutsatser kring hur åldringen har påverkat solpanelers prestanda svårare att avgöra. Eftersom data kring de solpaneler som testats enbart finns från nyproduktion samt från de mätningar som utförts under projektets gång anses detta inte vara nog grund för att dra slutsatser kring konceptet åldring i allmänhet. Om tester utförs på fler solpaneler under en längre tidsperiod anses dock metodiken vara sund nog för att uppskatta solpanelers generella åldring, givet tillräcklig mängd datapunkter. Däremot kan de funktionstester som utförts på specifika solpaneler avgöra hur just den panelens prestanda har utvecklats jämfört med producenternas prognoser. Således kan slutsatser dras kring enskilda solpanelers åldring och ge konsumenter en överblick av hur deras paneler presterar. Resultaten från detta projekt kan nu ligga som grund för vidare arbete, både vad gäller vidareutveckling av systemet och fortsatt produktutvecklingsarbete med den framtagna prototypen.

7 Källförteckning

Referenser

- [1] J. Berard. “22 000 nya nätanslutna solcellsanläggningar.” (2021), URL: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/22-000-nya-natanslutna-solcellsanlaggningar-under-2020/>.
- [2] TT. “Kriget drar upp elpriset – då ökar intresset för solceller.” (2022), URL: <https://www.nyteknik.se/kriget-drar-upp-elpriset-da-okar-intresset-for-solceller/827936>.
- [3] B. Walton. “A brief history of solar energy.” (2015), URL: <https://www.solarunitedneighbors.org/news/brief-history-solar-energy-2/1>.
- [4] F. Solar. “Our Technology.” (2022), URL: <https://www.firstsolar.com/Technology/CadTel>.
- [5] J. Pettersson. “Marknadsöversikt för solcellsmoduler, växelriktare, infästningsanordningar och kompletta system.” (2019), URL: <https://www.energimyndigheten.se/491e55/globalassets/tester/marknadsoversikt-for-solcellsmoduler-vaxelriktare-infastningsanordningar-och-kompletta-system-191121-signerad.pdf>.
- [6] Energimyndigheten. “solcellers miljöpåverkan.” (2019), URL: <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/solcellers-miljopaverkan/>.
- [7] ourworldindata. “China: Energy Country Profile.” (2022), URL: <https://ourworldindata.org/energy/country/china#how-much-of-the-country-s-energy-comes-from-fossil-fuels>.
- [8] Reuters. “U.S. blocks more than 1,000 solar shipments over Chinese slave labor concerns.” (2022), URL: <https://www.reuters.com/world/china/exclusive-us-blocks-more-than-1000-solar-shipments-over-chinese-slave-labor-2022-11-11/>.
- [9] OHCHR. “OHCHR Assessment of human rights concerns in the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, People’s Republic of China.” (2022), URL: <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/countries/2022-08-31/22-08-31-final-assesment.pdf>.
- [10] Energimyndigheten. “Olika typer av solceller.” (2019), URL: <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/olika-typer-av-solceller/>.
- [11] E. W. directive. “Collection Recycling.” (Accessed 2023), URL: <https://ourworldindata.org/energy/country/china#how-much-of-the-country-s-energy-comes-from-fossil-fuels>.
- [12] H. O. Andante Hadi Pandyaswargo Alan Dwi Wibowo. “Reusing solar panels to improve access to information and communication in an off-grid village: A financial feasibility assessment.” (2022), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722009891>.

- [13] M. E. Petrovic. “The circular economy and cities: Applications, limits and barriers (on the example of Utrecht).” (2018), URL: <https://www.cirkelstad.nl/wp3/wp-content/uploads/2018/07/MSc-Thesis-Maja-Elfering-Petrovic-11697733-11-June-20182.pdf>.
- [14] K. Mertens, *Photovoltaics Fundamentals, Technology and Practice: Structure and Method of Operation of Solar Cells*. München, Germany, kap. 4, s. 67–72. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/chalmers/home.action>.
- [15] C.B.Honsberg och S.G.Bowden. “Photovoltaics Education Website.” (2019), URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/instructions>.
- [16] T. Global. “What are Solar Cells? Including types, efficiency and developments.” (2023), URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-solar-cells>.
- [17] F. P. I. Theodore L. Bergman Adrienne S. Lavine och D. P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer, 7th ed.* Jefferson City, USA: John Wiley och sons, kap. 12.
- [18] D. L. Anna Bengtsson Erik Holm och B. Karlsson. “Skuggningshandbok: Design av solcellssystem för minimerad inverkan av skuggning.” (2017), URL: <https://energiforsk.se/media/28623/skuggningshandbok-energiforskrapport-2017-385.pdf>.
- [19] R. K. S. Piyush Choudhary. “Sustainability perspectives- a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities.” (2019), URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619311849?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=79fff35dfa00be58.
- [20] evergreen electrical services. “Are solar panels wired in series or parallel?” (2023), URL: <https://www.evergreenelectrical.com.au/blog/solar-panels-series-parallel>.
- [21] E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galan och J. Andujar Marquez, “Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review,” maj 2008, s. 1–6. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [22] S. Kurtz. “2016 NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop.” (2016), URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68116.pdf>.
- [23] F. D. Mehmet Meral. “A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation system.” (2011), URL: https://www.pvel.com/wp-content/uploads/PVEL-White-Paper_Mechanical-Stress-Sequence-Cracking-Down-on-PV-Module-Design.pdf.
- [24] U. Damo, C. G. Ozoegwu, C. Ogbonnaya och C. Maduabuchi. “Effects of light, heat and relative humidity on the accelerated testing of photovoltaic degradation using Arrhenius model.” (2023), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23000026>. 2023-02-18.
- [25] P. LLC. “Cracking Down on PV Module Design: Results from Independent Testing.” (2021), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000256>.

- [26] Y. H. Mahmoud Dhimish. “Rapid testing on the effect of cracks on solar cells output power performance and thermal operation.” (2022), URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-16546-z>.
- [27] M. Andresen och M. Liserre, “Impact of active thermal management on power electronics design,” *Microelectronics Reliability*, årg. 54, nr 9, s. 1935–1939, 2014, SI: ESREF 2014, ISSN: 0026-2714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.069>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271414002650>.
- [28] S. Reinfeldt, *Grundläggande bioinstrumentering*, mars 2023.
- [29] M. för samhällsskydd och beredskap. “Strömpenetration av räddningstjänstens skyddskläder vid olika typer av kontamination.” (2018), URL: <https://rib.msb.se/filer/pdf/29021.pdf>.
- [30] T. Hoffmann. “SunCalc.” (2023), URL: <https://www.suncalc.org/#/57.6871,11.979,3/2023.05.09/15:24/1/3>.
- [31] Arduino. “Arduino® UNO R3 Product Reference Manual.” (2023), URL: <https://docs.arduino.cc/static/bebf2e02f80771215770deca4eee2dd4/A000066-datasheet.pdf>.
- [32] SCB. “Elnätspriser för olika typkunder, tidsserie.” (2023), URL: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/prisutvecklingen-inom-energiomradet/elpriser-och-elavtal/pong/tabell-och-diagram/tabeller-over-arsvarden/elnaetspriser-for-olika-typkunder-1996/>.
- [33] N. SMHI. “Års- och månadsstatistik.” (2023), URL: <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige/manadens-vader-i-sverige/ars-och-manadsstatistik>.

Bilagor

A. Datablad för solpanel FS-380 CdTe



First Solar® FS Series 3™ PV Module

MECHANICAL DESCRIPTION	
Length	1200mm
Width	600mm
Weight	12kg
Thickness	6.8mm
Area	0.72m ²
Leadwire	4.0mm ² , 610mm
Connectors	MC4 type connector
Bypass Diode	None
Cell Type	CdS/CdTe semiconductor, 154 active cells
Frame Material	None
Cover Type	3.2mm heat strengthened front glass laminated to 3.2mm tempered back glass
Encapsulation	Laminate material with edge seal

Contact Info:

First Solar (Europe)
Tel: +800 3757 3757
info@firstsolar.de

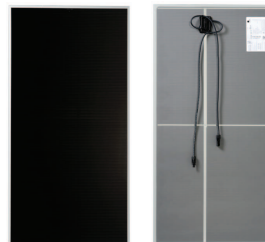
First Solar (US)
Tel: 877 850 3757
info@firstsolar.com

First Solar® FS Series 3™ PV Modules represent the latest advancements in thin film solar module technology. The Series 3 modules are IEC 61646 and IEC 61730 certified for use in systems up to 1000 VDC, and meet the requirements of Safety Class II. First Solar provides cost effective thin film module solutions to leading solar project developers and system integrators for large scale, grid-connected solar power plants. First Solar Global Technical Service provides technical support and comprehensive product documentation to support the design, installation, and long term operations of high performance PV systems

High Performance PV System Solutions

Key Features:

- Produces high energy output across a wide range of climatic conditions with excellent temperature response coefficient
- Proven to perform as predicted with a high Performance Ratio (PR)
- Frameless laminate is robust, cost-effective and recyclable, and does not require module grounding
- Manufactured in highly automated, state-of-the-art facilities certified to ISO 9001:2008 and ISO 14001:2004 quality and environmental management standards



Warranty:

- Material and workmanship warranty for ten (10) years and a power output warranty of 90% of the nominal output power rating ($P_{MPp} \pm 5\%$) during the first ten (10) years and 80% during twenty-five (25) years subject to the warranty terms and conditions.
- Modules are life cycle managed with a collection and recycling program, providing module owners with no cost, prefunded, end-of-life take back, and recycling of the modules.

For applications in North America please refer to the NA datasheet (PD-5-401-03 NA).



www.firstsolar.com

PD-5-401-03 JAN 2012

Electrical Specifications

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT STC*						
Nominal Values		FS-380	FS-382	FS-385	FS-387	FS-390
Nominal Power(+/-5%)	$P_{nom}(W)$	80.0	82.5	85.0	87.5	90.0
Voltage at P_{max}	$V_{mp}(V)$	48.5	48.3	48.5	49.2	49.2
Current at P_{max}	$I_{mp}(A)$	1.65	1.71	1.76	1.78	1.83
Open Circuit Voltage	$V_{oc}(V)$	60.8	60.8	61.0	61.0	61.0
Short Circuit Current	$I_{sc}(A)$	1.88	1.94	1.98	1.98	2.04
Maximum System Voltage	$V_{ms}(V)$	1000				
Limiting Reverse Current	$I_r(A)$	3.5				
Maximum Series Fuse	$I_{sf}(A)$	3.5				

TEMPERATURE CHARACTERISTICS		
Nominal Values		
Temperature Coefficient of P_{mp}	$\gamma_p(P_{mp})$	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of V_{oc} high temp (>25°C)	$\gamma_v(V_{oc,high})$	-0.27%/°C
Temperature Coefficient of V_{oc} low temp (-40°C to +25°C)	$\gamma_v(V_{oc,low})$	-0.20%/°C
Temperature Coefficient of I_{sc}	$\gamma_i(I_{sc})$	+0.04%/°C

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT 800W/m ² , NOCT 45°C, AM 1.5*						
Nominal Values		FS-380	FS-382	FS-385	FS-387	FS-390
Nominal Power(+/-5%)	$P_{nom}(W)$	80.0	81.9	83.8	85.6	87.5
Voltage at P_{max}	$V_{mp}(V)$	45.5	45.3	45.5	46.2	46.2
Current at P_{max}	$I_{mp}(A)$	1.32	1.37	1.41	1.42	1.46
Open Circuit Voltage	$V_{oc}(V)$	56.5	56.5	56.7	56.7	56.7
Short Circuit Current	$I_{sc}(A)$	1.54	1.59	1.62	1.62	1.67

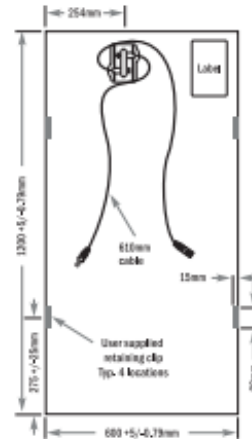
Reliability and Safety

Tested by leading international institutes and certified for reliability and safety.

- Certified to IEC 61646
- Certified to IEC 61730
- Certified to IEC 61701
- Salt Mist Corrosion Test
- CE Marking
- Safety Class II @ 1000 V
- MCS Certification



Mechanical Drawing



*All ratings +/- 5%, unless specified otherwise. Specifications are subject to change.
 *Standard Test Conditions (STC) 1000W/m², AM 1.5, 25°C
 *Nominal Operating Cell Temperature: Module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C air temperature, 3m/s wind speed.

About First Solar

First Solar is a leading manufacturer of photovoltaic (PV) solar modules, and a premier provider of solar solutions. By continually driving down manufacturing costs, First Solar is delivering an economically and environmentally viable alternative to peaking fossil-fuel generation. From raw material sourcing through end-of-life collection and recycling, First Solar is focused on creating value-driven renewable energy solutions that protect and enhance the environment.



B. Datablad för solpanel SL2-F CIGS



SOLIBRO SL2-F CIGS
Thin Film Solar Panel | 125 -145 Wp

- **More power generation**
Maximum additional power (+ 5 W)
Low temperature coefficient of 0.32% / K
- **Beautiful and elegant appearance**
Homogeneous black surface
Ideal product for photovoltaic solutions with high vision requirements
- **Framed laminate**
Easy to install and especially in small roof systems
It is highly stable
- **Quality control**
Module 100% through the solar cell module defect detection (EL), to ensure the production process
Longer and more stringent tests than IEC 61646
- **Certificates**
ISO 9001/ISO 14001
CE



理想的屋面系统解决方案



Beijing Chengchuang Kexing Technology Co.,Ltd
No5, Dong Fang Yao Road,Fangshan District,Beijing,China
sales.manager@ccxg.com.cn
<https://ccxg.en.alibaba.com/>
www.facebook.com/kexingtechnology
mobil/whatsapp +86-15601205921 Sunny Sun



Alibaba

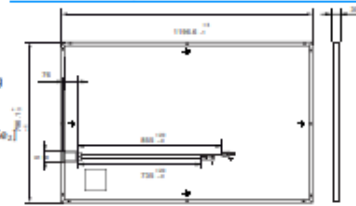


Facebook

Mechanical Specifications

length	1196.6 (+3/-1) mm
Width	79.1 (+3/-1) mm
Height	30 mm
Weight	18.0 kg
Front	4 mm tempered glass (ESG) with anti reflection coating
Back	3 mm Float glass
Frame	Black aluminum frame
Cell type	Copper indium gallium selenium CIGS [Cu (In, Ga) Se ₂]
Junction box	IP 67 with 1 bypass diode; 76 mm x 58 mm x 15.5 mm
Cable type	2.5 mm ² solar cable (+) 855 (+20/-0) mm; (-) 735 (+20/-0) mm
Cable connector	Renhe 05-6

Technical Drawings



Electrical Characteristic Parameters

STC testing conditions (1000 W/m², 25°C, AM 1.5 G spectrum)¹

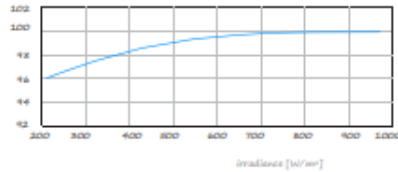
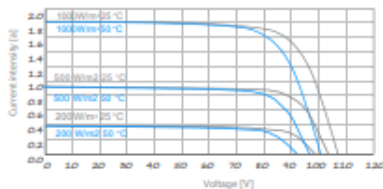
			1.2.0	1.3.0	1.3.5	1.4.0	1.4.5
Power (+5/-0 W)	[W]		125.0	130.0	135.0	140.0	145.0
Min Power	P _{min}	[W]	1.73	1.75	1.77	1.79	1.81
short-circuit current	I _{sc}	[A]	103.4	104.5	105.6	106.7	107.8
Open circuit voltage	V _{oc}	[V]	1.50	1.54	1.58	1.62	1.66
Current at PMPP	I _{mp}	[A]	83.4	84.5	85.5	86.5	87.4
Voltage at PMPP	V _{mp}	[V]	≥13.1	≥13.6	≥14.2	≥14.7	≥15.2
Rated conversion efficiency		[%]					

Rating of components at rated operating temperature (800 W/m², NMOT, AM 1.5 G spectrum)¹

			1.2.0	1.3.0	1.3.5	1.4.0	1.4.5
Power (+5/-0 W)	[W]		94.2	97.9	101.6	105.4	109.3
Min Power	P _{min}	[W]	1.39	1.40	1.42	1.44	1.45
short-circuit current	I _{sc}	[A]	97.8	98.9	100.1	101.2	102.3
Open circuit voltage	V _{oc}	[V]	1.20	1.23	1.26	1.29	1.32
Current at PMPP	I _{mp}	[A]	78.5	79.6	80.6	81.7	82.8
Voltage at PMPP	V _{mp}	[V]					

¹ Measurement tolerance PMPP ± 5%; tolerance ISC, VOC, IMPP, vmpp ± 10%. All STC tests are based on component pre-treatment: 20 kWh / M – 2 illumination (i.e. illumination at 1000 W / M – 2 and maximum power point for 20 hours) followed by cooling to 25 °C

Current voltage characteristic curve values at different temperatures and irradiation intensities performance under low irradiance



Temperature coefficient at 1000 W / m²

$$P_{max} \gamma \text{ [%/K]} - 0.32 \quad I_{sc} \alpha \text{ [%/K]} + 0.01 \quad V_{oc} \beta \text{ [%/K]} - 0.27$$

NMOT

Rated operating temperature of components [°C] 42

System integration characteristic parameters

Max system voltage V _{sys}	[V]	1000 (IEC) / 600 (UL 1703)	Protection level	II
Max reverse current I _r	[A]	4	Fire rating	C
Pressure design load (IEC 61215-2)	[Pa]	Max 3600*	Continuous operation	-40°C to +85°C

Packing Information

External dimension (including pallet)	L 1,313 mm × W 1,131 mm × H 996 mm
Total weight (full)	585 kg
Stackability in warehouse	2 + 1 (3 pcs overlap)
Number of components in each package	30
Maximum loading of 24 ton truck	40cartons, Volume limitation (2 × 10 + 2 × 10)
Max loading capacity of a 24 ton 40 inch high container	34cartons, Volume limitation (2 × 9 + 2 × 8)

Tips!

The terms of the installation instructions must be observed. Please refer to the installation and operating instructions for more information about the product license, or consult your technical service personnel.

