

Solcelle

IVAR SVALHEIM HAUGERUD
Universitetet i Oslo

(Dated: 21. april 2018)

Hva er effektiviteten til en solcelle? La oss finne ut av det.

I. INTRODUKSJON

Mennesker har i århundrer prøvd å lage en evighetsmaskin. Fysikkens lover har i nyere tid fortalt oss at det er umulig å lage en envighetsmaskin, energi er alltid bevart. Derimot kan man argumentere for at mennesker har klart å lage en evighetsmaskin ved solceller. Hver sekund blir hver kvadratmeter av atmosfæren vår bestrålt med en energi på 1355 J [?]. Solen kommer til å fortsette å tilføre denne energien i all overskuelig fremtid, og med gode solceller kan vi utnytte denne energien. I denne forstand har mennesker greid å lage en evighetsmaskin, og det er kanskje derfor bruk av solceller har skutt til himmels det siste tiåret [?].

Selv om vi klarer å utnytte energien fra sola vår, er man ikke fornøyd med andel av energien man får bruk for. Av det som treffer atmosfæren vår er det 950 W/m^2 som når fram til jordoverflaten på en klar dag. Resten av energien blir absorbert eller reflektert i atmosfæren. Komersielle solceller klarer å utnytte mellom $15 - 22\%$ av energien som treffer jordoverflaten. Forskning innenfor solceller prøver å gjøre det rimeligere å produsere, og øke andelen av energien man får utnyttet. Vi ønsker derfor i dette eksperimentet å finne den maksimale effekten til en solcelle, og forstå hvordan man klarer å maksimere effekten. For å gjøre dette blir det gjennomført målinger av solceller, bestrålt av et kontrollert lys, i forskjellige situasjoner. Ved å gjøre målinger på strømmen i kretsen, og spenningen over solcellen kan vi finne strøm-spenning karakteristikken til solcellen. Fra disse målingene finner man den maksimale effekten en kan oppnå. Solcellene ble koblet i serie og parallell med hverandre for å se nærmere på effekten dette har på strømmen og spenningen produsert av solcellen. Disse målingene skal gjøres mens solcellen er fullstendig belyst, delvis belyst og ubelyst for å forstå hvordan solceller oppfører seg under forskjellige omgivelser.

II. TEORI

A. Kretsteori

I starten av det forrige århundret fant man uttrykket for energien til et foton. Dette uttrykket viser at ener-

gien E til et foton er proporsjonal med frekvensen, ν , til fotonet

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

hvor h er Plancks konstant, c er lyshastigheten, og λ er bølgelengden til fotonet. Denne relasjonen ble påvist av Einstein i 1905 gjennom målinger på den fotoelektriske effekt. Som den fotoelektriske effekt kommer solcellen til å være koblet i en krets med forskjellige komponenter. Den viktigste relasjonen vi kommer til å bruke er Ohms lov

$$V = RI, \quad (2)$$

som sier at spenningsfallet V er gitt av produktet mellom strømmen I og resistansen R . Dette kan brukes for å finne effekttapet, P , til en komponent er gitt av produktet mellom spenningsfallet V over komponenten og strømmen som går gjennom den

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}. \quad (3)$$

For å få lage den beste mulige solcelle burde effekten P være så stor som mulig. Vi kommer derfor til å trenge noen viktige relasjoner for den maksimale effektiviteten P_{max} . Under eksperimentet kommer vi til å gjøre målinger for å finne strøm-spenningsskarakteristikk til solcellen. Vi kommer derfor til å finne solcellens spenning med uendelig stor belastning, det vil si *open circuit*, V_{oc} . Og hvilken strøm som går i solcellen når kretsen er kortsluttet, det vil si *short circuit*, I_{sc} . Det viser seg at forholdet mellom den maksimale effekten og produktet av V_{oc} og I_{sc} er konstant, og har fått navnet *fill factor*.

$$\frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = FF. \quad (4)$$

Dette er en nyttig relasjon når vi skal studere forholdet mellom effekter. Årsaken til dette er et fill factor er en karakteristikk av solcellen, og er ikke avhengig av eksterne forhold. Siden fill factor er tilnærmet lik konstant kan vi finne forholdet mellom to effekter ved å bruke definisjonen av fill factor

$$\frac{(P_{max})_1}{(P_{max})_2} \approx \frac{(V_{oc}I_{sc})_1}{(V_{oc}I_{sc})_2}. \quad (5)$$

Hvor måling 1 og måling 2 kan henvise til f.eks målinger av samme solcelle, men emd forskjellig belysning.

For å beregne effektiviteten til solcellen blir det brukt et solarimeter under eksperimentet. Solarimeteret har en kalibreringskonstant a som gjør det mulig å beregne den bestrålte effekten på solcellen. Den bestrålte effekten er gitt av produktet mellom spenningen over solarimeteret V_s og arealet A av solcellen, som må divideres på kalibreringskonstanten a

$$P_{inn} = \frac{V_s A}{a}. \quad (6)$$

Ved å vite P_{inn} kan man beregne effektiviteten ved å sammenlikne denne verdien med den maksimale effekten i kretsen. Dette gjøres ved

$$\text{effekt} = \frac{P_{max}}{P_{inn}} \cdot 100\% \quad (7)$$

B. Halvledere og solceller

De fleste solceller er laget av halvledermateriale, for å forstå solceller må vi derfor forstå halvledere. Halvledere fungerer på grunn av kvanatiserte energinivåer til atomer. Elektroner i atomer oppbevarer seg på elektronskall som tilsvarer kvantetallet deres, $n \in \mathbb{N}$. For hvert energinivå er det oppdelt i underskall som blir bestemt av det azimutale kvantetallet $l \in \mathbb{N} < n$. Denne elektronkonfigurasjonen er forskjellig for forskjellige atomer, og bestemmer de kjemiske og fysiske prosessene til atomet.

Bindinger mellom atomer bestemmes av elektronene i de ytterste skallene, elektronene med størst n , som kalles valenselektronene. Ved å tilføre elektroner energi til elektronene vil de eksiteres, de flytter seg til et høyere skall. Siden energinivåene er kvantiserte vil forflytningen være kvantisert. For like atomer er disse energinivåene identiske, men når vi har flere identiske atomer sammen oppstår det nye effekter, *more is different*. De originale energinivåene splittes opp til flere forskjellige energinivåer. Antall forskjellige energinivåer øker med antall atomer, og er det nok atomer tilstede vil det bli dannet et kontinuerlig energibånd. Energibåndet som dannes av valenselektroner kalles valensbåndet. Er valensbåndet fullt av andre elektroner kan ikke elektronene flytte på seg, på grunn av Paulis eksklusjonsprinsipp, for å danne strøm i valensbåndet. Det blir først mulig å danne strøm hvis elektronene blir eksitert til det neste ikke-okkuperte energibåndet, som er over valensbåndet, dette båndet kalles ledningsbåndet. For silisium, som vi bruker i dette eksperimentet, og andre halvledere, er det et energiområde mellom valensbåndet og ledningsbåndet hvor elektronet ikke kan ha en energitilstand. Dette området kalles båndgapet, for silisium er størrelsen på båndgapet 1.12 eV.

Halvledere kan beholde krystallstrukturen sin, og forbedre sin elektriske ledningsevne, ved å bli dopet av

fremmedatomet. Doping innebærer at man erstatter en svært liten andel ($1/10^6$) av silisiumatomene med andre atomer. For at fremmedatomet skal binde seg til silisiumsgitteret trenger det fire valenselektroner. Arsen har fem valenselektroner, som gjør at det siste valenselektronet blir svakt bundet til arsen-atomet. Dette gjør at det lett kan binde seg til nabo silisium-atomet. Elektronet vil derfor fortsette å kunne bevege seg fra atom til atom inne i krystallen. Siden vi har økt antall elektroner kalles dette n -doping, n for negativ. Ved å dope silisium med bor-atomer, som har tre valenselektroner, vil det danne en vandrende hullstrøm. Siden vi har redusert antall elektroner kalles dette p -doping, p for positiv.

Grensesjiktet mellom to halvledere, der den ene er n -dopet og den andre er p -dopet, kalles for en pn -overgang. I dette området, *overgangssonen*, vil noen elektroner for den n -dopede halvlederen fylle hullene i den p -dopede halvlederen. Denne forflytningen av ladning fører til ladde ioner på hver side av overgangssonen. Dette gjør at p -siden blir netto negativt ladd, og n -siden blir netto positivt ladd. Denne ladningsforskjellen mellom de to områdene vil danne et elektrisk felt fra n -type til p -type området. Dette feltet vil hindre flere elektroner fra å bevege seg over overgangssonen.

Vi har beskrevet hvordan halvledere virker, men ikke hvordan dette er relatert til solceller og lys. For å forstå dette må vi se nærmere på overgangssonen til silisiumatomer. Får ett elektronet tilført energi, ved å absorbere et foton, kan det løsnes fra kjernen og bevege seg fritt i krystallen. Mest sannsynlig vil elektronet binne seg med det atomet det ble løsrevet fra, og vi er like langt. Er elektronet i overgangssonen vil retningen på det elektriske feltet gjøre at elektronene blir dratt over til n -området, og hullet i retning p -området. Spenningsforskjellen har separert elektronet fra hullet. Nå er det et atom på p -siden av overgangssonen som har mistet et elektron. Dette hullet kommer til å bli fylt av et annet elektron. Som tiden går vil p -området få et overskudd av hull, og n -området et overskudd av elektroner. Dette endrer på spenningsforskjell mellom områdene. Nå er det p -siden som blir positivt ladd, og n -siden blir negativt ladd. Dette gjør at den tidligere spenningsforskjellen avtar, helt til det ikke er noen ladningsforskjell på de to områdene. Dette fører til at det slutter å være transport av elektroner og hull i overgangssonen. Har nå solcellen blitt ubrukkelig? Nei, ved å koble p -området med n -området ved hjelp av en ytre ledning vil elektroner fra n -området strømme til hullene i p -området. Dette vil gjøre at feltstyrken opprettholdes, og prosessen kan gjentas. Strømmen vil fortsette å gå, så lenge lys treffer solcellen.

Ikke alt lys vil klare å løsribe elektroner fra atomet. For silisium er energien som trengs 1.12 eV. Ved å bruke relasjonen mellom energi og bølgelengde(1) finner vi at det kreves en bølgelengde mindre enn 1100 nm for

å løsrive et elektron for å danne et elektron-hull par. Derfor vil alt lys med bølgelengde lengere enn 1100 nm ikke føre til noe strøm i solcellen. Spenningen i solcelle kretsen vil aldri kunne bli større enn energien som kreves å løsrive et elektron, per elektron, $V < E/e$. For silisium vil dette bety at spenningen solcellen lager vil alltid være mindre enn 1.12 V. En så lav spenning ville ikke klart å lade opp de fleste batterier for praktisk nytte. Det er derfor ønskelig å endre på kretsen slik at det kan enten bli høyere spenning, eller høyere strøm i kretsen. For å få høyere spenning kan man koble flere enkelsolceller i serie, ønskes det høyere strøm kobles det flere enkelsolceller i parallell. Dette skal vi se nærmere på under eksperimentet.

III. EKSPERIMENTELT

Under hele eksperimentet kommer vi til å ha en solcelle i en fast avstand fra en lyskilde. Solcellen plasseren i et stativ på en optisk benk sammen med en lysbildeprojektor. Avstanden mellom den lyskilden og solcellen er valgt slik at solcellene vi kommer til å bruke under eksperimentet kommer til å være fullstendig belyst. Eksperimentet foregår i ett mørkt rom for å kontrollere belysningen av solcellen.

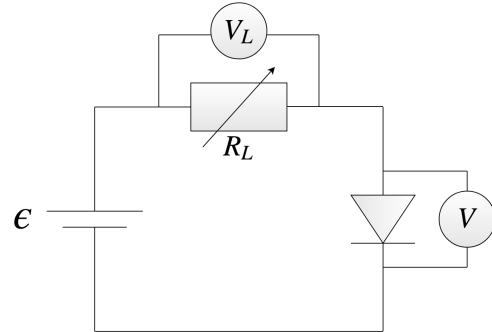
A. Strøm-spenningsskarakteristikk

Vi ønsker å måle strøm-spenningsskarakteristikken for en belyst solcelle. Først skal vi finne karakteristikken med en ytre spenningskilde i kretsen, og senere uten en spenningskilde i kretsen.

1. Med ytre spenningskilde

For å finne strøm-spenningsskarakteristikken med en ytre spenningskilde blir solcellen koblet i en krets sammen en varierende motstand, en spenningskilde på 5 volt og to voltmeter. Kretsen er vist i figur 1. For å finne strøm-spenningsskarakteristikken må vi måle spenningsfallet over solcellen, og strømmen som går gjennom solcellen. Spenningsfallet over solcellen blir målt av voltmeteret V i figur 1, og strømmen i kretsen blir beregnet fra spenningsfallet over resistansen R_L , som vi leser av voltmeteret V_L . Under målingene varierer vi størrelsen på motstanden i kretsen, og gjør flere målinger for hver verdi av resistansen, for å begrense usikkerheten i målingene. Vi forventer et knekkpunkt i forholdet mellom strøm og spenning, og vi velger derfor verdier av resistansen slik at vi får mange målinger rundt knekkpunktet. Siden vi øns-

ker å måle strøm-spenningsskarakteristikken både i lederretning (hullstrøm), og i sperreretning (negativ strøm), snur vi polariteten på spenningskilden når vi er fornøyd med målingene i lederretning, og gjentar prosessen.



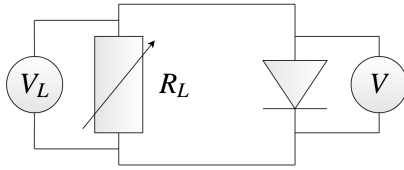
Figur 1: Krets for å måle strøm-spenningsskarakteristikken til solcellen, med en ytre påtrykket spenning ϵ .

2. Uten ytre spenningskilde

Vi ønsker nå å måle strøm-spenningsskarakteristikken uten en ytre spenningskilde. Nå skal den eneste spenningskilden i kretsen være solcellen selv. For denne målingen bruker vi kretsen vist i figur 2 på neste side. Vi skal igjen variere resistansen i motstanden R_L mens vi måler strømmen gjennom, og spenningen over, solcellen. Siden vi også her forventer et knekkpunkt i strøm-spenningsskarakteristikken velger vi verdier av motstanden slik at vi får flest målinger rundt dette knekkpunktet. Vi ønsker også å gjøre målinger for å finne spenningen når motstanden R_L går mot uendelig V_{oc} . For å gjøre motstanden uendelig stor kobler vi motstanden ut av kretsen, slik at det umulig kan gå strøm gjennom. Verdien for strømmen som går gjennom kretsen når motstanden R_L er null, det vil si I_{sc} strømmen gjennom en åpen krets, finner vi ved å gjøre målinger mens vi lar R_L gå mot null, men aldri bli nøyaktig lik null. Årsaken til at vi ikke kan sette R_L lik null er at da mister vi muligheten til å beregne strømmen I_{sc} i kretsen. Motstanden R_L må være stor nok til at vi kan måle spenningen V_L med en rimelig nøyaktighet.

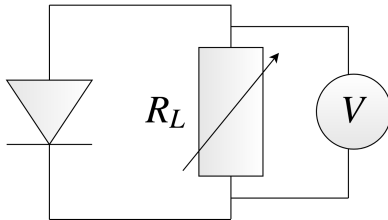
B. Solcellens optimale belastning

Den optimale belastningen på en solcelle vil gi mest mulig effekt fra en belyst solcelle. Effekten beregnes fra å bruke likning (3). Det må derfor gjøres målinger



Figur 2: Krets for å måle strøm-spenning karakteristikken til solcellen, uten en ytre påtrykket spenning.

av spenningen over motstanden, og strømmen gjennom den. Siden det bare er en komponent i kretsen, utenom solcellen, vil alt spenningsfallet skje over denne komponenten. Dette gjør at vi kan få all informasjonen vi trenger fra å måle spenningsfallet over motstanden, og vite resistansen. Derfor trenger vi nå bare ett voltmeter i kretsen, kretsen som ble brukt er vist i figur 3. Målingene for å finne optimal belastning blir gjort for samme solcelle, men med to forskjellige belysninger. Den ene belysningen er at solcellen er rettet direkte mot lyskilden for å få mest mulig bestråling. Den andre belysningen er at vi roterer solcellen rundt 60° slik at strømmen i kretsen, med en lav verdi for R_L , er halvert.

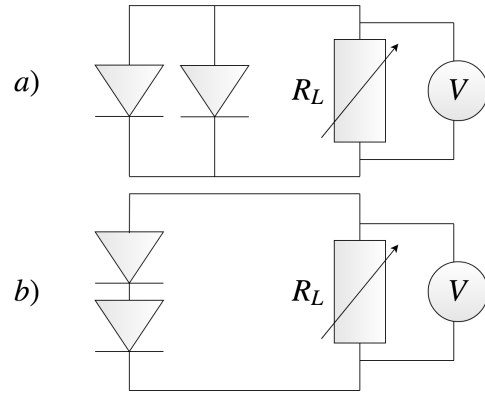


Figur 3: Krets for å måle strøm gjennom og spenning over solcellen, for å finne den optimale belastningen til solcellen.

C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

For å få høyere spenning fra en solcelle kobler man flere i serie, ønsker man høyere strøm kobler man dem i parallell. For å gjøre målinger på denne effekten bruker vi nå to solceller som settes i lik avstand til lyskilden. Det er to forskjellige kretser som blir brukt under målingene. En med solcellene i parallell, og en med solcellene i serie, disse to er vist i figur 4. For å finne forholdet mellom den maksimale effekten for forskjellige tilfeller bruker vi likning (5). Dette gjør at de to eneste egenskapene vi trenger å måle er spen-

ningsfallet over resistansen i en åpen krets (V_{oc}), og strømmen i en kortsluttet krets (I_{sc}). For både paral-

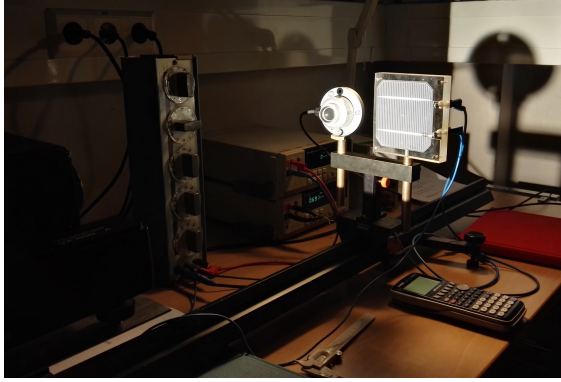


Figur 4: Krets for å måle forskjellen i strøm og spenning når to solceller er koblet i parallell (a) iforhold til i serie (b).

lekkoblede solceller og seriekoblede solceller blir det gjort målinger av V_{oc} og I_{sc} for to forskjellige tilfeller. Det første tilfellet er at begge solcellene er belyst like mye. Deretter dekker vi til den ene solcellen og gjør igjen de samme målingene. Fra disse målingene kan man beregne effektivitetsforholdet mellom de to tilfellene med likning (5) for både serie og parallell koblede solceller.

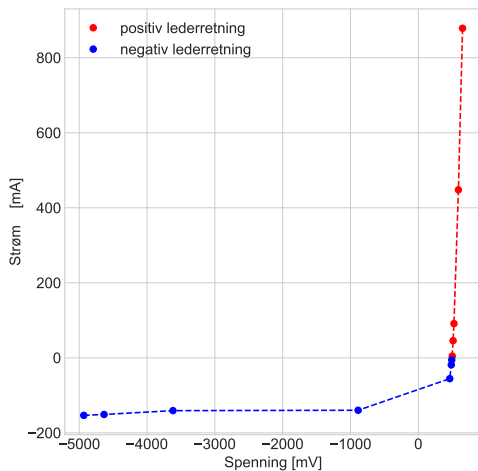
D. Solcellens effekt

For å finne effekten til solcellen kommer vi til å bruke et solarimeter. Oppsettet under målingen av solarimeteret er vist i figur 5 på neste side. Solarimeteret blir plassert ved samme avstand til lyskilden som solcellen, slik at strøm-spenning karakteristikken målt tidligere kan brukes. Det er to mål som må gjøres for å beregne effektiviteten til solcellen. En må måle spenningen over solarimeteret med et følsomt voltmeter, og notere seg kalibreringskonstanten til solarimeteret. Det andre en må målet er arealet til solcellen. Dette blir gjort ved å bruke et skyvelær. Grunnet formen til solcellen var det mange lengder som måtte måles. Spenningen over solarimeteret og arealet av solcellen kan brukes i likning (6) for å beregne effekten som solcellen blir belyst. Fra forholdet mellom effekten den blir belyst, og den maksimale effekten i kretsen kan vi beregne effektiviteten til solcellen med likning (7).



Figur 5: Bilde fra laboratoriet under måling av spenningen til solarimeteret. I bildet ser vi den belyste solcellen ved siden av den belyste solarimeteret. I bakgrunnen ser vi de to multimeterene brukt under eksperimentet, og den varierende motstanden R_L .

Strøm-spenning karakteristikk med ytre spenning på 5V



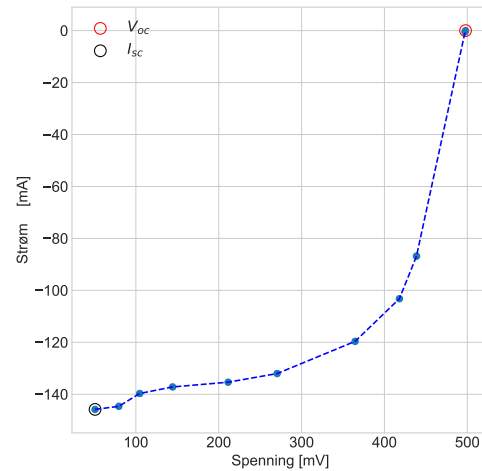
Figur 6: Strøm-spenningkarakteristikken for en belyst solcelle med en ytre spenning på 5 volt. Kretsen brukt for å gjøre disse målingene er vist i figur 1 på side 3.

IV. RESULTATER

A. Strøm-spenningkarakteristikk

For å finne strøm-spenning-spenningkarakteristikken til solcellen målte vi strømmen gjennom og spenningen over solcellen. Målingene gjort strømmen og spenningen til en belyst solcelle, med en ytre spenningskilde på 5V, er vist i figur 6. Målinger i både positiv og negativ strømretning er vist i figuren. Kretsen brukt for disse målingene er vist i figur 1 på side 3. Der-

Strøm-spenning-karakteristikk for solcelle uten ytre spenning

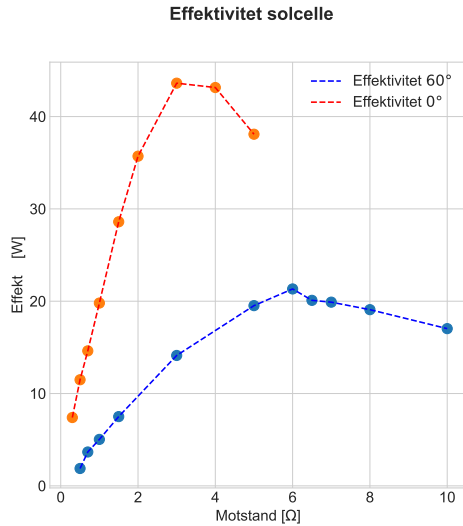


Figur 7: Strøm-spenningkarakteristikken for en belyst solcelle uten en ytre spenningskilde. Kretsen brukt for å gjøre disse målingene er vist i figur 2 på forrige side.

etter lot vi solcellene arbeide på egenhånd, og gjorde målinger på strøm-spenningkarakteristikken uten noen ytre spenningskilde. Målingene vi gjorde er vist i figur 7. Målingene for spenningen i en åpen krets, V_{oc} , og strømmen i en kortsluttet krets, I_{sc} , er markert i grafen.

B. Solcellens optimale belastning

For å finne den optimale belastningen til solcellen målte vi strømmen gjennom og spenningen over solcellen. Vi gjenbruker derfor målingene fra strøm-spenningkarakteristikken vist tidligere, tillegg til nye målinger av en redusert belyst solcelle. Resultatet fra målingene er vist i figur 8 på neste side. Den redusert belyste solcellen i figuren er dreid omlag 60° vekk fra lyskilden, dette resulterte i omtrent halvert strøm for en lav resistanse $\approx 0.5\Omega$.



Figur 8: Effekten til solcellen som en funksjon av motstanden i kretsen. Det røde datasettet er med en solcelle som er optimalt belyst, og det blå er for en solcelle som er rotert 60° vekk fra lyskilden.

C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

Ved denne målingen ønsker vi å finne forholdet mellom maksimal effekt for solceller under forskjellige koblinger og lysforhold. Fra å måle strømmen i en sluttet krets, og spenningen i en åpen krets, kan man finne forholdet mellom effekten i kretsen ved å bruke likning

(5). Vi gjorde derfor målinger på de to verdiene med solcellene koblet i parallell, og serie, med begge belyst, og med en belyst. Resultatene fra disse målingene er vist i tabell I. Fra å bruke likning (5) på dataen vist

Kobling	Serie		Parallell	
	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]
Begge belyst	-499.82	-293.20	-1000.87	-139.62
En belyst	-461.53	-155.17	-634.704	-427.6

Tabell I: Målinger gjort av spenningen i en åpen krets, og strømmen i en kortsluttet krets. Fra disse verdiene kan vi beregne forholdet mellom effektiviteten til de forskjellige tilfellene.

i tabell I fant vi mye informasjon om de relative effektene fra solcellene til hverandre. Når vi har begge solcellene belyst får vi rundt 5% mer effekt fra å ha solcellene i serie iforhold til i parallell. Derimot hvis bare en av solcellene er belyst får vi en faktor 3.79 mer effekt fra å ha solcellene i serie. For solceller koblet i serier viser det seg at forholdet mellom en belyst og begge belyst er at man får en faktor 2.05 mer effekt fra at begge er belyst iforhold til bare en belyst. Det samme forholdet, men for parallellkobling, er omtrent likt, men motsatt. For parallell kobling får man en faktor 1.94 mer effekt fra å ha en solcellene belyst iforhold til to.

D. Solcellens effekt