

# Solcelle

IVAR SVALHEIM HAUGERUD  
*Universitetet i Oslo*

(Dated: 25. april 2018)

Eksperimentet i denne rapporten ble gjennomført i håp om å forstå hvordan å maksimere effekten til solceller, og hva den maksimale effekten er. For å forstå dette har det blitt gjort målinger av solceller under kontrollert belysning. Solcellene har vært i krets alene, i serie og i parallell under varierte lysforhold. Målingen av strøm-spenningkarakteristikken til solcellen, i positiv og negativ lederretning, viser at solceller oppfører seg som en diode. Fra å analysere strom-spenningkarakteristikken og beregne på effektivitet viser det seg at den optimale resistansbelastningen til en solcelle avhenger av belysningen til solcellen. Dette blir analysert videre ved å koble solceller i serie og parallell. Å koble solceller i parallell øker spenningen, å koble solceller i serie øker strømmen i kretsen, effekten vil være tilnærmet den samme. Derimot hvis en kobler solceller i parallell og bare belyser en solcelle får man en faktor 3.79 økning i maksimal effekten. Serie-koblede solceller gir en faktor 2.05 mer effekt av at begge solcellene er belyst, for parallell koblede øker effekten med 1.94 av å en solcelle belyst iforhold til to. Ved å bruke et solarimeter ble det målt at effekten til solcellen brukt i dette eksperimentet er på 7.35%.

## I. INTRODUKSJON

Mennesker har i århundrer prøvd å lage en evighetsmaskin. Fysikkens lover har vist at dette er umulig, energi er alltid bevart. Derimot kan en argumentere for at mennesker har klart å lage en evighetsmaskin ved solceller. Hvert sekund blir hver kvadratmeter av atmosfæren vår bestrålt med en energi på 1355 J [2]. Denne energien har truffet planeten i flere milliarder av år, og solen kommer til å fortsette å tilføre denne energien i all overskuelig fremtid. Solceller har en ufattelig stor, og tilnærmet evigvarende, energikilde å tappe energi fra. Og det er med dette i tankene at en kan argumentere for at evighetsmaskinen finnes, solcellen. Det er kanskje derfor bruk av solceller har skutt til himmels det siste tiåret [2].

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<sup>2</sup> 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 solcel-

len 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 energien  $E$  til et foton er proporsjonal med frekvensen,  $\nu$ , til fotonet

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

hvor  $h$  er Plancks konstant,  $c$  er lyshastigheten, og  $\lambda$  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

maksimal effektiviteten  $P_{max}$ . Under eksperimentet kommer vi til å gjøre målinger for å finne strømspenningskarakteristikkentil 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 kvantiserte 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 silisiumatomet. 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 dannet 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 elektronen 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 løsrive 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 enkeltsolceller i serie, ønskes det høyere strøm kobles det flere enkeltsolceller i parallell. Dette skal vi se nærmere på under eksperimentet.

### III. EKSPERIMENTELT

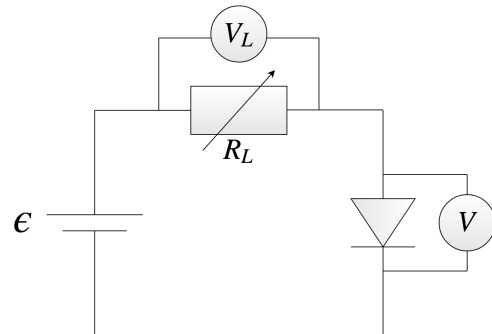
Under hele eksperimentet kommer vi til å ha en solcelle i en fast avstand fra en lyskilde. Solcellen plasseren i et stativ på en optisk benk sammen med en lysbildeprojektor. Avstanden mellom den lyskilden og solcellen er valgt slik at solcellene vi kommer til å bruke under eksperimentet kommer til å 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 ønsker 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.

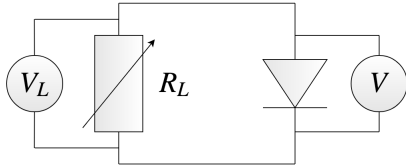


Figur 1: Krets for å måle strøm-spenningsskarakteristikken til solcellen, med en ytre påtrykket spenning  $\epsilon$ .

##### 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

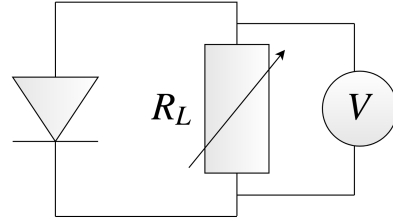
målingen bruker vi kretsen vist i figur 2. Vi skal igjen variere reistansen i motstanden  $R_L$  mens vi måler strømmen gjennom, og spenningen over, solcellen. Siden vi også her forventer et knekkpunkt i strøm-spenningkarakteristikken velger vi verdier av motstanden slik at vi får flest målinger rundt 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.



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

### B. Solcellens optimale belastning

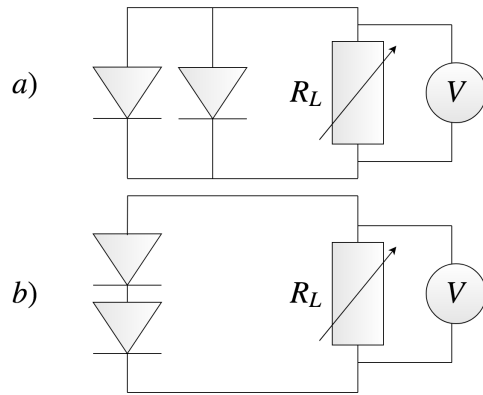
Den optimale belastningen på en solcelle vil gi mest mulig effekt fra en belyst solcelle. Effekten beregnes fra å bruke likning (3). Det må derfor gjøres målinger av spenningen over motstanden, og strømmen gjennom den. Siden det bare er en komponent i kretsen, utenom solcellen, vil alt spenningsfallet 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  $60^\circ$  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 spenningsfallet over resistansen i en åpen krets ( $V_{oc}$ ), og strømmen i en kortsluttet krets ( $I_{sc}$ ). For både paral-

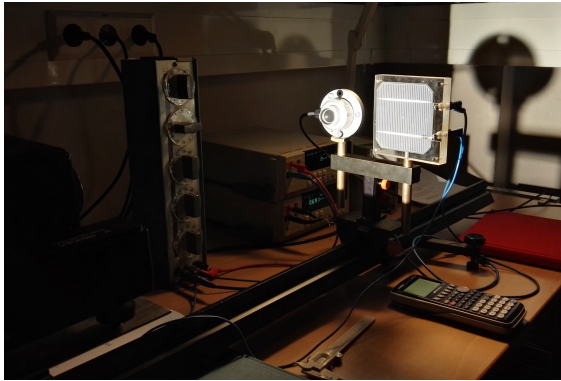


Figur 4: Krets for å måle forskjellen i strøm og spenning når to solceller er koblet i parallell (a) iforhold til i serie (b).

lellkoblede 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. 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  $R_L$ .

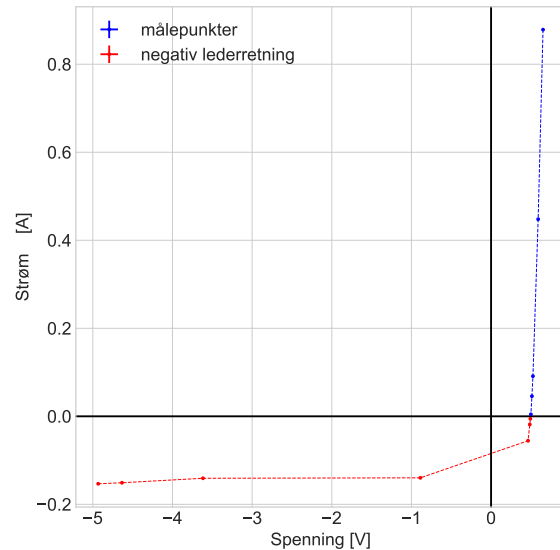
## IV. RESULTATER

### A. Strøm-spenningsskarakteristikk

For å finne strøm-spenning-spenningsskarakteristikken til solcellen målte vi strømmen gjennom og spenningen over solcellen. Det ble brukt en ytre spenning på 5 V, som ble målt til å være på 5.08(1) V. Målingene gjort strømmen og spenningen til en belyst solcelle, med en ytre spenningskilde på 5.08(1) V, er vist i figur 6. I denne figuren er både målinger i positiv og negativ strømretning vist. Kretsen brukt for generere og måle verdiene er vist i figur 1 på side 3.

Deretter lot vi solcellene arbeide på egenhånd

### Strøm-spenning karakteristikk med yte spenning på 5V



Figur 6: Strøm-spenningsskarakteristikken 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.

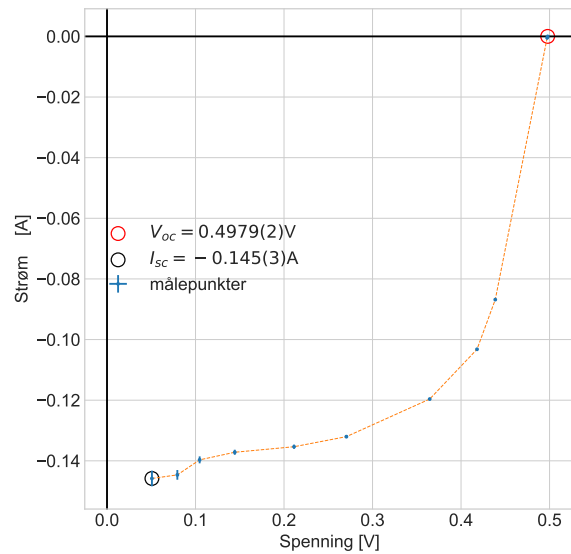
ved å fjerne den ytre spenningskilden. Målinger av strøm-spenningsskarakteristikken uten noen ytre spenningskilde er vist i figur 7 på neste side. Målingene for spenningen i en åpen krets,  $V_{oc}$ , og strømmen i en kortsluttet krets,  $I_{sc}$ , er markert i grafen. Verdien målt for  $V_{oc}$  var 497.9(2) mV, og verdien for  $I_{sc}$  var  $-145(3)$  mA.

For å kunne sammenlikne de to strøm-spenningsskarakteristikkene er et begrenset område av verdiene vist i figur 8 på neste side. Målingene med en ytre spenningskilde er målt i både negativ og positiv strømretning.

### B. Solcellens optimale belastning

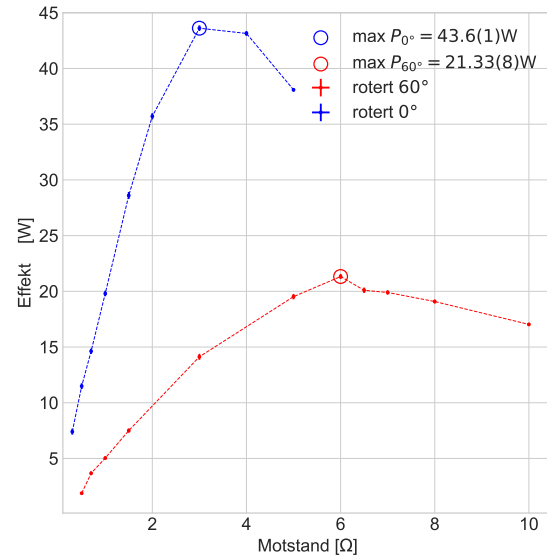
For å finne den optimale belastningen til solcellen ble strømmen gjennom og spenningen over solcellen målt. Derfor ble målingene fra strøm-spenningsskarakteristikken, vist i figur 7 på neste side, gjenbrukt, tillegg til nye målinger av en redusert belyst solcelle. Resultatet fra målingene er vist i figur 9 på neste side. Den redusert belyste solcellen i figuren er dreid omlag  $60^\circ$  vekk fra lyskilden, dette resulterte i omtrent halvert strøm for en lav resistanse  $\approx 0.5\Omega$ . Solcellen klarer å få en effekt på 43.6(1) W når motstandslasten er på 3.00(1)  $\Omega$ . For solcellen som er vendt  $60^\circ$  vekk fra lyskilden gir en maksimal effekt

Strøm-spenning-karakteristikk for solcelle uten ytre spenning



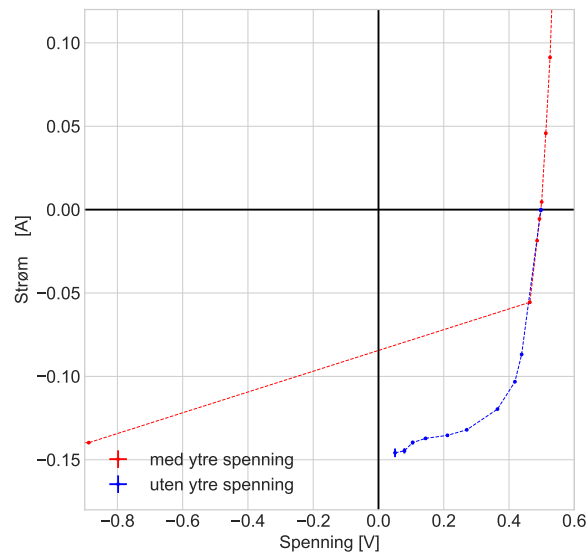
Figur 7: Strøm-spenning-skarakteristikken for en belyst solcelle uten en ytre spenningskilde. Kretsen brukt for å gjøre disse målingene er vist i figur 2 på side 4.

Effekt av solcelle som funksjon av motstandslast



Figur 9: Effekten til solcellen som en funksjon av motstanden i kretsen. Det blå datasettet er med en solcelle som er optimalt belyst, og det røde er for en solcelle som er rotert 60° vekk fra lyskilden. I figuren er de maksimale verdiene for hvert sett med måling markert og vist verdien til.

Strøm-spenning karakteristikk med og uten ytre spenning



Figur 8: Strøm-spenning-skarakteristikken for belyst solcelle med ytre spenningskilde (figur 1 på side 3) og uten ytre spenningskilde (figur 2 på side 4). Den ytre spenningskilden er på 5.08(1) V.

på 21.33(8) W med en motstand på 6.00(1) Ω.



### C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

Denne målingen ble gjennomført for å måle 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 en finne forholdet mellom effekten i kretsen ved å bruke likning (5). Det ble gjennomført målinger av de to verdiene med solcellene koblet i parallell, og serie, med begge belyst, og med en belyst. Resultatene fra målingene er vist i tabell I. Fra å bruke likning (5) på dataen vist i

Kobling	Parallell		Serie	
Måling	$V_{oc}$ [mV]	$I_{sc}$ [mA]	$V_{oc}$ [mV]	$I_{sc}$ [mA]
Begge belyst	499.8(3)	-293(3)	1000.9(9)	-139.2(2)
En belyst	461.53(2)	-155(2)	634.7(3)	-0.428(5)

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

tabell I kan en beregne fram til informasjon om de relative effektene for forskjellige koblinger og lysforhold. Når vi har begge solcellene belyst er effekten omtrent lik. Parallellkoblede solceller gir en faktor 1.05(2) mer effekt iforhold til at solcellene koblet i serie når begge solcellene er belyst. Derimot hvis bare en av solcellene er belyst er det en faktor 263(3) mer effekt fra å ha solcellene i parallell iforhold til å ha solcellene i seriekobling. For solceller koblet i parallell viser det seg at effekten når begge er belyst er en faktor 2.04(1) større enn når én solcelle er belyst i parallellkobling. For solceller koblet i serie er det en faktor 512(7) mer effekt å ha begge solcellene belyst, istedenfor bare en av de to solcellene belyst.

### D. Solcellens effektivitet

Ved å plasere et solarimeter ved samme avstand til lyskilden som solcellen kan en beregne effektiviteten til solcellen. Solarimeteret som ble brukt under eksperimentet hadde kalibreringskonstant  $a = 11.13 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ . Ved å bruke et skyvelær for å måle de forskjellige geometriske størrelsene til solcellen fant vi at arealet til solcellen var  $96.27 \text{ cm}^2$ . Gjennomsnittet av flere målinger til spenningen over solarimeteret viste seg å være  $686.2 \text{ mV}$ . Med disse målingene kan man bruke likning (6) til å vise at den innstråle effekten er  $593.54 \text{ W}$ . Denne verdien, sammen med den maksimale effekten som har blitt målt fra solcellen, som vist i figur 9 på forrige side, er  $43.615 \text{ W}$ , kan vi beregne effekten til solcellen med likning (7). Vi finner at effekten til solcellen er  $7.35\%$ .

Samtidig som spenningen over solarimeteret ble målt, ble det også gjort målinger av  $I_{sc}$  og  $V_{oc}$  til solcellekretsen. Dette ble gjort for å kunne sammenlikne disse verdiene med de tidligere målt i eksperimentet. Det ble målt at  $V_{oc}$  lå på  $502.38 \text{ mV}$ , og  $I_{sc}$  på  $161.14 \text{ mA}$ .

## V. DISKUSJON

### A. Strøm-spenningkarakteristikk

Målingen av strøm-spenningkarakteristikk ble gjort med og uten en ytre spenningskilde. Fra å se på målingene med en ytre spenningskilde, vist i figur 6 på side 5, kan man se en viktig egenskap med solceller. Solceller leder strøm i en retning, men ikke i en annen. Solcellen oppfører seg som en diode. Når strømmen går i positiv lederretningen har vi et positivt spenningsfall over solcellen, og positiv strøm i kretsen. Forholdet mellom strømmen og spenningsfallet ser ut til å øke eksponensielt. Av å snu polariteten på spenningskilden fikk vi målinger av strøm-spenningkarakteristikk i negativ lederretning. Disse målepunktene sier oss at strømmen i kretsen går fort mot en lav og konstant verdi, som er uavhengig av spenningen over solcellen, når strømmen beveger seg i sperreretning. Når motstanden er minst skjer all spenningsfallet over solcellen, for høyere motstander nærmer strømmen i kretsen seg 0, men går aldri over på grunn av polariteten på spenningskilden.

Målingene gjort av strøm-spenningkarakteristikken uten en ytre spenningskilde er vist i figur 7 på forrige side. Kurven på grafen er slik en forventer for en belyst solcelle. Formen på kurven er lik karakteristikken med en ytre spenningskilde. For lave resistanser flater strømmen ut mot en konstant verdi, som går mot  $I_{sc}$ . For høyere motstander øker strømmen eksponensielt, og skjærer  $x$ -aksen i  $V_{oc}$  hvor kretsen er åpen, det vil si uendelig motstand. Den maksimale spenningen fra en enkelt solcelle går mot  $0.5 \text{ V}$ . Av å bestemme den maksimale effekten til solcellen finner en det største arealet mulig innenfor kurven i den fjerde kvadrant.

### B. Solcellens effektivitet

Fra å se på grafen vist i figur 9 på forrige side er det to ting å merke seg. Den første, og den mest naturlige, er at solcellen som blir mer belyst gir en større effekt. Den andre er at hvilken lastmotstand som resulterer i maksimale effekten avhenger av bestrålingen. For den fullt belyste solcellen er resistansen som resulterer i størst effekt  $3 \Omega$ , for den redusert belyste er resistansen  $6 \Omega$ . Dette er et viktig faktum ved solceller. Ønsker du størst mulig effekt fra solcellen burde lasten i kretsen

varierte med belysningen av solcellen. Den maksimale effektforskjellen er omtrent en faktor to forskjellig mellom den fullt og redusert belyste solcellen.

### C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

Fra målingen vist i tabell I på forrige side er det lett å se at det å koble flere solceller i parallell øker spenningen i kretsen, og koble solceller i serie øker strømmen. Begge disse egenskapen vil dobbles iforhold til den andre koblingen. Fra tabellen kan en også se effekten av å bestråle to solceller iforhold til en, og hvordan koblingsmåte påvirker dette. For seriekobling halveres strømmen, men spenningen er nesten uforandret, når det blir belyst en solcelle istedenfor to. For parallellkobling synker både strøm og spenning. Spenningen blir litt under halvert, og strømmen er en faktor tre svakere.

Ved å bruke likning (5) kan en beregne forholdet mellom effekten for de forskjellige tilfellene. Det er da viktig å huske på at denne likningen er en tilnærming. Fill factor antas å være en karakteristikk ved solcellen som ikke er avhengig av ytre forhold. Dette gjør at den er tilnærmet konstant, og denne tilnærmingen skaper en usikkerhet i forholdet mellom effektene. En ville fått en mer nøyaktig verdi for effekten ved å måle strøm-spenningkarakteristikken for solcellene under alle forholdene. Dette ble ikke gjort under eksperimentet fordi det ville vært mer tidkrevende. Fra å se på forholdet mellom effektene for de ulike koblingene og lysforholdene kan en gjøre flere slutninger om hvordan en kan gjøre solceller mest effektive. Når to solceller er i parallell, men den ene er ubelyst, får man nesten fire ganger så mye effekt fra å ha solcellene i parallell

iforhold til å dem koblet i serie. Årsaken til dette er at solceller oppfører seg som en diode når de ubelyst. Derfor vil kretsen kortsluttes når kretsen kun består av en solcelle. For en parallellkobling vil dette ikke føre til at kretsen blir kortsluttet, siden den belyste solcellens påvirkning i kretsen ikke vil bli påvirket av den andre solcellen.

Etter å ha gjort målingene med de to solcellene målte vi virkningen på spenningen over resistansen av å bytte posisjonen til de to solcellene. Av å gjøre dette målte vi en spenningsforskjell på 3 mV. Denne forskjellen har derfor blitt tatt med i usikkerhetsberegningene for de relative effektene.

### D. Solcellens effekt

Under beregning av arealet tok vi hensyn til formen på solcellen, som en ser i figur 5 på side 5, men vi tok ikke hensyn til fingrene på tverrsnittet av solcellen. Dette kan ha påvirket den endelige effekten, men utslaget til effekten av solcellen av å inkludere dette ville vært minimalt.

Målingen av den maksimale effekten, og målingen av solarimeteret ble gjennomført med over en time mellomrom. Iløpet av denne tiden er det mulig det har vært noen uønskede forandringer på eksperimentet som kan ha forårsaket systematiske feil, for eksempel forandring av belysning i rommet, forandring av solcellens avstand til lyskilden eller intensiteten til lyskilden. Solcellen forventet å ha en effektivitet på rundt 10%, og det kan ha vært systematiske feil som disse som forårsaket avviket.

## VI. KONKLUSJON

---

[1] Squires, G.L. Practical Physics, Cambridge University Press, 2001.

[2] Fysisk institutt, FYS 2150. SOLCELLEN, Universitetet i Oslo, februar 2017.