

Koblingsmåte og belysnings innvirkning på maksimal effekt generert av solceller

IVAR SVALHEIM HAUGERUD
Universitetet i Oslo

(Dated: 27. april 2018)

Eksperimentelle målinger på strømmen gjennom og spenningen over en solcelle ble gjennomført under forskjellige koblinger og belysninger, for å måle påvirkning dette har på maksimal effekt. Den maksimale effekten til en solcelle er en viktig egenskap for å få mest mulig elektrisk energi fra solcellepaneler. Måling av strøm-spenningkarakteristikken til solcellen, i positiv og negativ lederretning, viser at solceller er dioder. Fra å analysere strøm-spenningkarakteristikken og bruke dette til å beregne maksimale effekt viser det seg at den optimale resistansbelastningen til en solcelle avhenger av belysningen til solcellen. Den maksimale effekten funnet i dette eksperimentet for en enkelt solcelle er 43.6(1) mV. Dette blir analysert videre ved å koble solceller i serie og parallell. Å koble solceller i parallell øker strømmen, å koble solceller i serie øker spenningen i kretsen, effekten vil være tilnærmet den samme for de to koblingsmåten. Derimot hvis en belyser én solcelle, istedenfor to, måler man en faktor 263(3) mer maksimal effekt fra å ha solcellene koblet i parallel istedenfor i serie. Parallellkoblede solceller gir en faktor 2.04(1) mer effekt av at begge solcellene er belyst, for seriekoblede øker effekten med 512(7) av at begge solcelle belyst, iforhold til en. Ved å bruke et solarimeter ble det målt at virkningsgrad til solcellen brukt i dette eksperimentet er på 7.35(3)%.

I. INTRODUKSJON

Eksperimentet i denne rapport ble gjennomført i håp om å forstå hvordan belysning og koblingsmåte påvirker spenning, strøm og effekt generert av en solcelle, og hvilken virkningsgrad en solcelle har. En god solcelle skal genere mest mulig elektrisk energi under forskjellige belysninger og koblinger. Vi skal derfor gjøre målinger i elektriske kretser som inneholder belyste solceller for å finne den maksimale effekten solcellen klarer å genere, og studere hvordan denne maksimale effekten varierer under forskjellige koblingsmåter og belysninger.

Solceller omdanner lys til elektrisk strøm. Dette kan gjøres ved hjelp av halvlederteknologi. For solceller er det vanlig å bruke en halvleder laget av silisiummateriale. Halvledermaterialet gjør at negative ladninger, elektroner, lagrer seg i den ene halvlederen, mens positive ladninger, hull, på den andre. Når et foton treffer overgangsområdet mellom de to halvlederne vil det bli dannet et elektron-hull-par. På grunn av ladningsforskjellen mellom de to halvlederne vil elektronet og hullet bevege seg i hver sin retning, som danner en strøm. For å kunne utnytte strømmen er det koblet metallkontakter som forbinder de to halvlederne. I denne metallkontakten vil det dannes en strøm som kan utnyttes [4].

Eksperimentet som skal gjennomføres består av fire hoveddeler. Vi skal se på solcellen som en halvlederdiode (1) ved å måle strøm-spenningkarakteristikken til solcellen. Dette skal måles med og uten en ytre spenningskilde. For å teste diode-egenskapen til solceller skal målingene bli gjort i lederretning, og i sperreretning. Strøm-spenningkarakteristikken kan brukes videre til å måle solcellens optimale belastning (2). Disse målingene skal gjøres med solcellen direkte belyst, og delvis belyst, for å finne forholdet mellom

maksimal effekt i de to tilfellene. Maksimal effekt skal studeres litt nærmere ved å gjøre målinger på hvordan kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel påvirker maksimal effekt (3). Dette blir gjort ved å finne maksimal effekt under forskjellige belysninger for serie og parallellkobling av to solceller. Til slutt blir det gjennomført målinger for å finne hvor mye av den innfallende strålingseffekten som blir omgjort til elektrisk energi, ved å finne solcellens virkningsgrad (4). Fra de fire forskjellige målingene ønsker vi å få en bedre forståelse av virkemåten til solceller, og finne hvordan koblingsmåte og belysning påvirker maksimal effekt.

Hensikten med gode solceller er lett å se nytten av. Som det blir et økende antall mennesker på jorden, og man starter å innse de ødeleggende konsekvensene av et stort forbruk av olje og gass, har det blitt en stor vekst innenfor fornybare energikilder, spesielt vindkraft og solceller [2]. Solceller har en stor, og tilnærmet evigvarende energikilde å tappe energi fra, solen. Hvert sekund blir hver kvadratmeter av jorden bestrålt av solenergi på 1370 J [5]. Deler av energien blir absorbert i skyer og støv, men gjennomsnittlig vil jordoverflaten på ekvator midt på en klar dag absorbere energi på rundt 950 J per kvadratmeter hvert sekund [2]. I løpet av et år tilsvarer dette rundt 15000 ganger jordens årlig energiforbruk [5]. Selv om vi klarer å utnytte energi fra solen, er man ikke fornøyd med andel av energien man klarer å utnytte. Komersielle solceller klarer å utnytte mellom 15 – 22% av energien som treffer jordoverflaten [2]. Forskning innenfor solceller prøver å gjøre det rimeligere å produsere, og øke andelen av energien en får utnyttet. Vi ønsker derfor i dette eksperimentet å studere hvordan å maksimere effekten generert fra en solcelle under forskjellige belysninger.

II. TEORI

A. Kretsteori

I starten av det forrige århundet oppdaget man uttrykket for energien til et foton. Dette uttrykket viser at energien 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 ved å forklare den fotoelektriske effekt. Akkurat som den fotoelektriske effekt kommer solcellen i dette eksperimentet 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 over en komponent er gitt av produktet mellom strømmen I og resistansen R til komponenten. Dette kan brukes for å finne effekttapet, P , til en komponent, som er gitt av produktet mellom spenningsfallet 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 solcellen burde effekten P være så stor som mulig. Vi kommer derfor til å trenge noen viktige relasjoner for den maksimale effekten P_{max} . Under eksperimentet kommer vi til å gjøre målinger for å finne strøm-spenningskarakteristikken til solcellen. Vi kommer derfor til å finne solcellens spenning med uendelig stor motstand, det vil si *open circuit*, V_{oc} . Dette er den maksimale spenningen solcellen kan danne. Og det motsatte, hvilken strøm som går i solcellen når det er tilnærmet ingen motstand i kretsen, den er kortsluttet, det vil si *short circuit*, I_{sc} . Dette er den maksimale strømmen solcellen klarer å generere. Det viser seg at forholdet mellom den maksimale effekten og produktet av V_{oc} og I_{sc} er tilnærmet konstant, og har fått navnet *fill factor*.

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

Som den maksimale effekten P_{max} kan sees på som det maksimale arealet utspent av en rektangel i strøm-spenningskarakteristikk-kurven, er produktet av V_{oc} og I_{sc} arealet utspent av skjæringspunktene strøm-spenningskarakteristikken har med x og y akse. Det denne likningen sier er at forholdet mellom disse to arealene er tilnærmet proporsjonalt for samme solcelle, og denne proporsjonalitetskonstanten kalles *fill factor*.

Verdien til fill factor forteller hvor mye effekt solcellen klarer å produsere. Vanligvis er verdien på rundt 0.7 til 0.8, jo nærmere forholdet er 1, jo mer effekt får man fra kretsen [6].

Relasjonen i likning (4) er nyttig når vi skal studere forholdet mellom maksimale effekter. Årsaken til dette er at 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, for samme solcelle i forskjellige situasjoner, 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 med forskjellig belysning eller forskjellig kobling.

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

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

Ved å vite P_{inn} kan en beregne virkningsgraden ved å sammenlikne denne verdien med den maksimale effekten målt fra solcellen P_{max} . Dette gjøres med standard prosentregning

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

B. Halvledere og solceller

De fleste solceller er laget av halvledermateriale, for å forstå solceller må en 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, dette er elektronene med størst n og derfor høyest energi, som kalles valenselektronene. Ved å tilføre elektroner energi vil elektronene eksiteres, de øker avstanden til kjernen og hopper 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 elektroner kan ikke elektronene drifte 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 halvledermaterialer, 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 et fremmedatom 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 silisiumatomer. 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 vandrene hullstrøm. Siden vi har redusert antall elektroner kalles dette p -doping, p for positiv.

Grensesjiktet mellom to halvledere, der den ene halvlederen er n -dopet og den andre er p -dopet, kalles for en pn -overgang. I dette området, *overgangssonen*, vil noen av de fri elektronene fra den n -doped halvlederen fylle hullene i den p -doped 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 -området til p -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 mellom silisiumhalvledere. Får ett elektron tilført energi, ved å absorbere et foton, kan det løsnes fra kjernen og bevege seg fritt i krystallen. Mest sannsynlig vil elektronet binde 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 elektro-

net fra hullet. Som tiden går og fotoner danner flere elektron-hull-par vil p -området få et økende antall hull, og n -området et økende antall elektroner. Dette endrer på spenningsforskjellen mellom områdene. Nå øker antall positive ladninger på p -siden, og på n -siden øker antall negative ladninger. 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 ubrukelig? 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. Kobler man en motstand på ledningen vil det genereres en effekt, som vi skal måle i dette eksperiment. Strømmen av ladninger i ledningen gjør at feltstyrken opprettholdes, og prosessen fortsetter. Strømmen vil fortsette 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 i likning (1) finner vi at det kreves en bølgelengde mindre enn 1100 nm for å danne et elektron-hull par. Derfor vil alt lys med bølgelengde lengere enn 1100 nm ikke være gunstig for solcellen. Spenningen i solcellekretsen 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 en enkelt solcellen genererer alltid vil 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 dannes høyere spenning, eller høyere strøm. Dette skal vi se nærmere på under eksperimentet.

III. EKSPERIMENTELT

Under hele eksperimentet kommer vi til å ha en solcelle i en fast avstand på rundt en halv meter fra en lyskilde. Solcellen plasseres i et stativ på en optisk benk sammen med en lysprojektor, slik at belysningen og avstanden er stabil under hele eksperimentet. Avstanden mellom lyskilden og solcellen er valgt slik at solcellene kommer til å være fullstendig belyst. Eksperimentet foregår i ett mørkt rom for å kontrollere belysningen av solcellen.

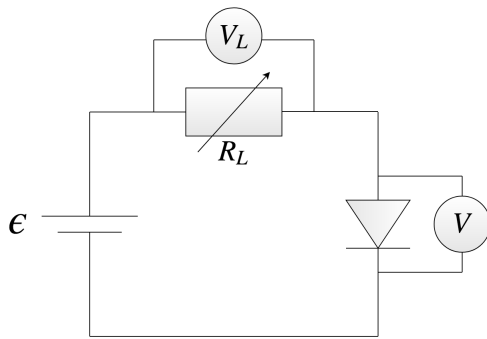
A. Strøm-spenningsskarakteristikk

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-spenningkarakteristikken med en ytre spenningskilde blir solcellen koblet i en krets sammen en varierende motstand R_L , en spenningskilde ϵ på 5 volt og to voltmeter, V og V_L . Selv om det blir brukt en ytre spenningskilde er solcellen belyst under målingene. Kretsen brukt for målingene er vist i figur 1. For å finne strøm-spenningkarakteristikken må vi måle spenningsfallet over solcellen, og strømmen som går gjennom solcellen. Spenningsfallet over solcellen blir målt av voltmeteret V , og strømmen i kretsen blir beregnet fra spenningsfallet over resistansen R_L , som vi leser av voltmeteret V_L ved hjelp av Ohm's lov (2). Under målingene varierer vi størrelsen på motstanden i kretsen for å få flere datapunkter. Det blir gjort flere målinger for hver verdi målt fra voltmeterene. Årsaken til dette er at de siste sifrene kan være ustabile, og flere målinger gjør at en kan finne spredningen. For målingene forventes det et område hvor det foregår mye endring i forholdet mellom strøm og spenning. Under eksperimentet velges derfor verdien til resistansen slik at vi får mange målinger i dette området. Siden vi ønsker å måle strøm-spenningkarakteristikken både i lederretning, og i sperreretning, snur vi polariteten på spenningskilden når vi er fornøyd med målingene i lederretning, og gjentar prosessen.

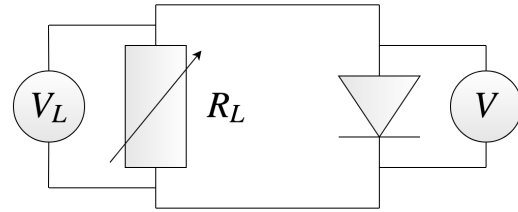


Figur 1: Krets for å måle strøm-spenning karakteristikk til solcellen, med en ytre påtrykket spenning ϵ .

2. Uten ytre spenningskilde

Vi ønsker nå å måle strøm-spenningkarakteristikken uten en ytre spenningskilde. Nå skal den eneste spenningskilden i kretsen være solcellen selv. For denne

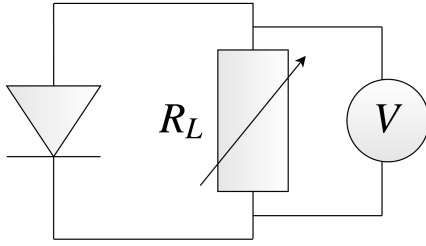
målingen bruker vi kretsen vist i figur 2. Vi skal igjen variere resistansen i motstanden R_L mens vi måler strømmen gjennom, og spenningen over, solcellen. Siden vi også her forventer et område med mye endring i strøm-spenningkarakteristikken velger vi verdier av motstanden slik at vi får flest målinger rundt dette området. 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 strømmen gjennom en åpen krets I_{sc} , finner vi ved å gjøre målinger mens vi lar R_L gå mot null, men aldri bli nøyaktig lik null. 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 karakteristikk til solcellen, uten en ytre påtrykket spenning.

B. Solcellens optimale belastning

Den optimale belastningsmotstanden på en solcelle vil gjøre at solcellen generer mest mulig effekt. Effekten beregnes fra å vite spenningsfallet over motstanden, og strømmen gjennom, ved likning (3), og det må derfor gjøres målinger av disse verdiene for å beregne effekten. 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 trengs det bare ett voltmeter i kretsen, kretsen som ble brukt er vist i figur 3 på neste side. 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° vekk fra lyskilden, slik at strømmen i kretsen, med en lav verdi for R_L , er halvert iforhold til den fullt belyste.

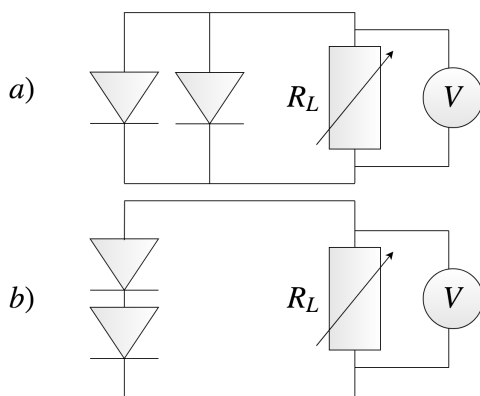


Figur 3: Krets for å måle strøm gjennom og spenning over solcellen for å finne den optimale belastningen til solcellen.

C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

For å oppnå høyere spenning fra en solcelle kan en koble flere solceller i serie, ønskes det en høyere strøm kan solcellene kobles i parallell. For å gjøre målinger på påvirkningen av koblingsmåte på strøm, spenning og effekt, bruker vi nå to solceller. De to solcellene monteres på den optiske benken 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 koblingsmåter og belysninger 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 parallellkoblede solceller og seriekoblede sol-



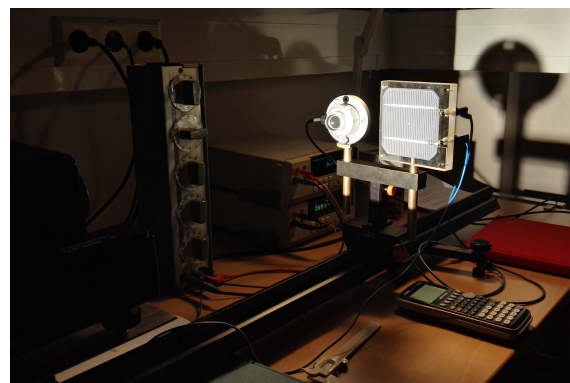
Figur 4: Krets for å måle spenningsfallet over resistansen R_L i en åpen krets (V_{oc}), og strømmen i en kortsluttet krets (I_{sc}), når to solceller er koblet i parallell (a) og i serie (b).

celler blir det gjort målinger av V_{oc} og I_{sc} for to forskjellige tilfeller. Det første tilfellet er at begge solcel-

lene er rettet direkte mot lyskilden, og derfor belyst like mye. Deretter dekker vi til den ene solcellen og gjør igjen de samme målingene, men nå med bare en solcelle belyst. Fra disse målingene kan en beregne effektivitetsforholdet mellom de to tilfellene med likning (5) for både serie og parallell koblede solceller, når en og to solceller er belyst.

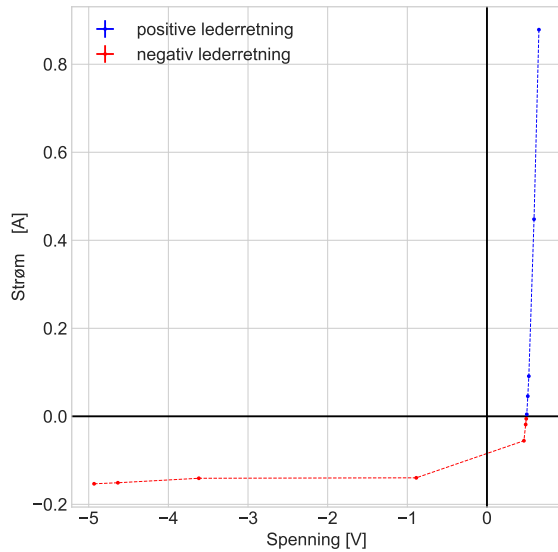
D. Solcellens virkningsgrad

For å finne virkningsgraden til solcellen må arealet til solcellen og irradiansen måles, det vil si den innfallende strålingseffekten per areal, og finne forholdet mellom denne og effekten over motstanden generert av solcellen. For å måle irradiansen blir det brukt 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 virkningsgraden til solcellen. En må måle spenningen over solarimeteret med et følsomt voltmeter, og notere seg kalibreringskonstanten til solarimeteret. Det andre en må måle er arealet til solcellen. Dette blir gjort ved å bruke et skyvelær. Grunnet formen til solcellen, som en kan se i figur 5, var det mange lengder som måtte måles. Spenningen over solarimeteret og arealet av solcellen kan brukes i likning (6) for å beregne strålingseffekten på solcellen. Fra forholdet mellom effekten den blir belyst, og den maksimale effekten solcellen kan danne i kretsen, kan vi beregne virkningsgraden 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 det belyste solarimeteret. I bakgrunnen ser vi de to multimetrene brukt under eksperimentet, og dekademotstanden.

Strøm-spenning karakteristikk med yte spenning på 5V



Figur 6: Strøm-spenningskarakteristikken for en belyst solcelle med en ytre spenning på 5.08(1) V. Kretsen brukt for å gjøre disse målingene er vist i figur 1 på side 4.

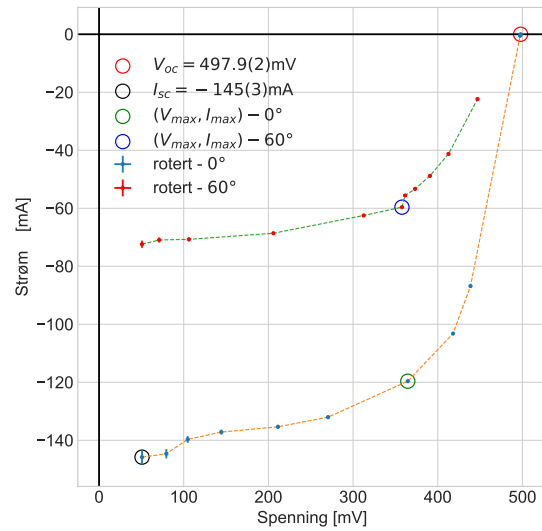
IV. RESULTATER

A. Strøm-spenningskarakteristikk

For å finne strøm-spenningkarakteristikken 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. Usikkerheten kommer fra databladet til voltmeteret. Målingene gjort av strømmen og spenningen til en belyst solcelle er vist i figur 6. Figuren inkluderer både målinger i positiv og negativ strømretning. Målepunktene viser usikkerheten i både spenning og strøm, men denne usikkerheten er for liten iforhold til endringen i strøm og spenning at den kan sees fra grafen. Kretsen brukt for generere og måle verdiene er vist i figur 1 på side 4.

Deretter lot vi solcellene arbeide på egenhånd ved å fjerne den ytre spenningskilden. Målinger av strøm-spenningskarakteristikken, for en fullt belyst og en delvis belyst solcelle, 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 for den fullt belyste solcellen. Verdien målt for V_{oc} var 497.9(2) mV, og verdien for I_{sc} var -145(3) mA. Usikkerheten for målepunktene stammer fra spredningen over flere målinger, og databladet til måleapparatene og motstanden brukt.

Strøm-spenning-karakteristikk for solcelle uten ytre spenning



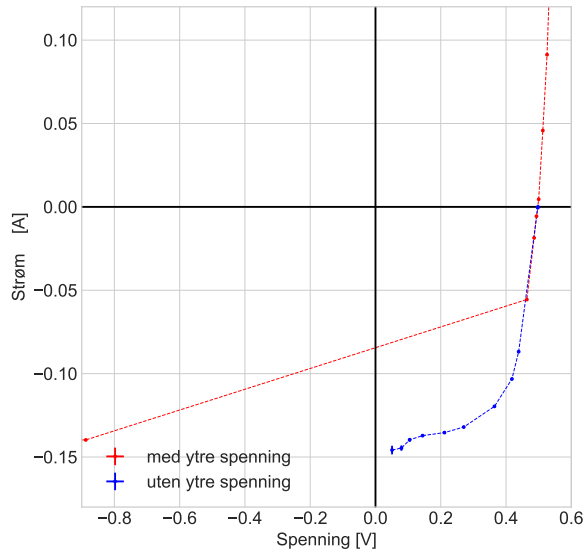
Figur 7: Strøm-spenningskarakteristikken for en optimalt belyst solcelle og en delvis belyst solcelle, uten en ytre spenningskilde. Kretsen brukt for å gjøre disse målingene er vist i figur 2 på side 4. Maksimalpunkter og V_{oc} og I_{sc} er markert i figuren for den fullt belyste solcellen, med verdi. Med I_{max} og V_{max} menes det ikke maksimal strøm og maksimal spenning, men henholdsvis den strømmen og den spenningen som resulterer i maksimal effekt.

For å kunne sammenlikne de to strøm-spenningskarakteristikkene, med og uten en ytre spenningskilde, er et begrenset utvalg av målingene vist i figur 8 på neste side. For kurven med en ytre spenningskilde, er målinger i både negativ og positiv strømretning inkludert.

B. Solcellens optimale belastning

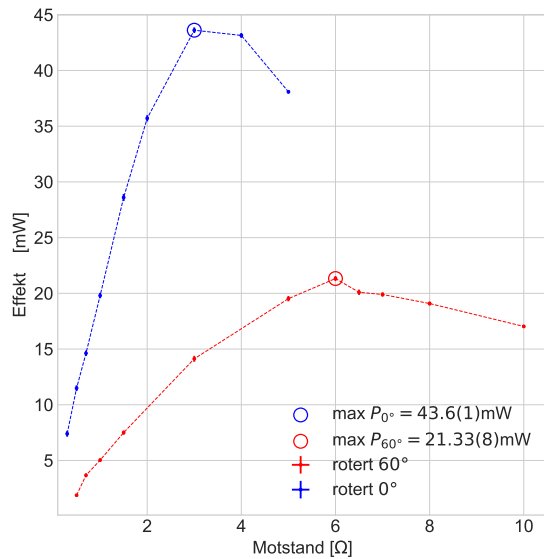
For å finne den optimale belastningen til solcellen ble strømmen gjennom og spenningen over solcellen målt. Derfor ble målingene fra strøm-spenningskarakteristikken, vist i figur 7, gjennombrukt. Resultatet fra målingene er vist i figur 9 på neste side. Den redusert belyste solcellen i figuren er dreid omlag 60° vekk fra lyskilden, dette resulterte i omtrent halvert strøm for en lav resistanse på 0.5Ω. Solcellen klarer å generere en maksimal effekt på 43.6(1) mW når motstandslasten er på 3.00(1) Ω, strømmen i kretsen er -119.6(3) mA og spenningen på 364.6(3) mV. Solcellen som er vendt 60° vekk fra lyskilden gir en maksimal effekt på 21.33(8) mW med en motstand på 6.00(1) Ω, en strøm på -59.6(1) mA og en spenning på 357.7(3) mV når maksimal effekt oppnås. Usikkerhe-

Strøm-spenning karakteristikk med og uten ytre spenning



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

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.

ten til verdiene er beregnet fra spredningen over flere målinger av samme verdi, og usikkerheten i en enkel måling fra databladet til måleapparatet. Verdien til fill factor, beskrevet ved likning (4), for den fullt belyste solcellen er 0.57(1), og for den redusert belyste solcellen er fill factoren lik 0.59(1). Hvor det ble brukt I_{sc} for den redusert belyste solcellen, og V_{oc} for den fullt belyste solcellen i beregningen, på grunn av for få målinger.

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 maksimal 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 solcellene belyst, og med en belyst. Resultatene fra målingene er vist i tabell I.

Kobling	Parallell		Serie	
	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]
2 belyst	499.8(3)	-293(3)	1000.9(9)	-139(2)
1 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 maksimal effekt til de forskjellige tilfellene.

Fra å bruke likning (5) på dataen vist i tabell I kan en beregne fram informasjon om de relative effektene for forskjellige koblinger og lysforhold. Når vi har begge solcellene belyst er effekten omtrent lik for parallell og seriekobling. Parallellkoblede solceller gir en faktor 1.05(2) mer effekt iforhold til seriekobling, 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 solcellene er belyst er en faktor 2.04(1) større enn når én solcelle er belyst. 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. Usikkerhetene er beregnet fra spredningen over flere målinger og usikkerheten i en enkelt måling fra måleinstrumentet. Disse usikkerhetene er brukt videre for å beregne usikkerheten i forholdet mellom effekten under de forskjellige forholdene ved hjelp av regneregler for usikkerheter [1]. Usikkerheten i å anta at fill-factor konstant er ikke tatt med i betraktning. Fra å bruke verdien beregnet

for fill factor tidligere, kan vi bruke likning (4) til å finne den maksimale effekten fra å ha to koblete solceller. Beregningene gir oss at den maksimale effekten er 84(1) mW.

D. Solcellens virkningsgrad

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, kan en beregne at arealet til solcellen er $96.3(2) \text{ cm}^2$. Usikkerheten kommer fra databladet til skyvelæret brukt under målingene. Gjennomsnittet av flere målinger til spenningen over solarimeteret viste seg å være $686.2(3) \text{ mV}$, hvor usikkerheten kommer fra spredningen over flere målinger, og usikkerheten i en måling fra databladet til voltmeteret. Fra disse verdiene kan en bruke likning (6) til å vise at den innstråle effekten er $593(2) \text{ mW}$. Denne verdien, sammen med den maksimale effekten som har blitt generert av solcellen, $43.6(1) \text{ mW}$, kan vi beregne virkningsgraden til solcellen med likning (7). Vi finner at virkningsgraden til solcellen er $7.35(3)\%$. Hadde solcellen i dette eksperimentet hatt et areal på 1 m^2 ville den nådd en effekt på $4.52(1) \text{ W}$.

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 6, kan en se en viktig egenskap ved solceller. Solceller leder strøm i en retning, men ikke i en annen. Solcellen oppfører seg som en diode. Årsaken til dette er at når man snur polariteten til spenningen vil kontaktpotensialet på pn -overgangen øke, og dette gjør at det ikke vil kunne lede noe strøm over solcellen.

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. Ved å snu polariteten på spenningskilden ble det gjort målinger av strøm-spenningkarakteristikk i negativ lederretning. Disse målepunktene sier oss at strømmen i kretsen går mot en lav og konstant verdi, når spenningen går mot null og er negativ. 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. På grunn av at forholdet mellom strøm gjennom og spenning over solcellene er en krum linje, viser dataene at en solcelle er en ikke-lineær komponent. Målepunktene som er i første og tredje kvadrant er strøm-spenning-forholdet der solcellen konsumerer effekt, men for målepunkter i fjerde kvadrant generer solcellen effekt [3]. Altså er det kunn noen kombinasjoner av strøm og spenning, hvor solcellen generer effekt, når det er en ytre spenningskilde.

Siden solcellen er en diode burde det ikke gå noe strøm i kretsen når polariteten til spenningskilden er snudd, men målingene viser at det går en strøm. Denne strømmen kalles lekkasjestrøm, som oppstår fra pn -overgangen i en diode når polariteten er snudd. Forflytningen av ladninger skyldes økt kontaktpotensial over pn -overgangen som gjør at elektroner fra p -siden blir dratt mot spenningskildens positive side, og hullene på n -siden blir dratt mot spenningskildens negative side. [7]

Målingene gjort av strøm-spenningkarakteristikken uten en ytre spenningskilde er vist i figur 7 på side 6. La oss første se på målingene for den fullstendig belyste solcellen. Kurven på grafen er slik en forventer for en belyst solcelle. 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 generert fra en enkelt solcelle går mot 0.5 V . For å bestemme I_{sc} kunne det ikke brukes en kortsluttet krets, hvis resistansen til motstanden er null, vil også spenningen vi måler vise null, dette gjør at det blir umulig å måle en verdi for I_{sc} . Under målingene ble det derfor brukt en motstand på 0.5Ω , grunnen til at det ikke ble valgt en lavere motstand er at for en så lav resistanse vil lednings- og kontakt-resistanser ha en effekt på spenningsfallet i kretsen, og er noe som vi ikke klarer å måle under eksperimentet. Siden kurven flater ut når spenningen minker, blir den svakeste motstanden som gir et konstant spenningsfall over motstanden brukt for å måle I_{sc} . Som en ser i grafen virker dette som en god tilnærming av I_{sc} . Målingene av strømmen gjør et lite rykk ned for de to laveste målepunktene. Årsaken til dette kan være noe systematisk feil under eksperimentet som, ustabiliteter i lysstyrken eller ikke-ideelle koblinger. Det burde merkes at for disse målepunktene er usikkerheten i strømmen større enn for de andre målepunktene på grunn av den lave motstanden. Fra at linjen gjennom målepunktene er krom kan det slutes at solceller er ikke-lineære komponenter. Siden alle datapunktene er i fjerde kvadrant betyr dette at solcellen generer effekt i kretsen.

For den svakere belyste solcellen som er rotert 60° vekk fra lyskilden er formen på kurven den samme, men med en lavere strøm. Målingene viser at spenningen over solcellen er den samme for begge belysninger.

En ser også at det er for omtrent samme spenning at de to kurvene oppnår maksimal effekt. Det kunne vært spennende å gjøre flere målinger av dette, med forskjellig belysninger for å se om V_{max} varierer eller ikke. Hvor V_{max} betyr spenningen som fører til maksimal effekt. Fra grafen ser man at det vil bli generert mindre effekt for den mindre belyste solcellen. Under eksperimentet burde det blitt målt V_{oc} for den mindre belyste solcellen, dette gjorde det vanskeligere å sammenlikne fill factor for den fullt belyste solcellen og den delvis belyste. Verdien brukt for V_{oc} for å beregne fill factor for den redusert belyste solcellen, ble derfor V_{oc} for den fullt belyste solcellen. Fra figuren kan det virke som at begge kurvene går mot samme verdi for V_{oc} , men på grunn av mangel på måleresultater kan vi ikke være sikre. Dette fører til en større usikkerhet i verdien til fill factor for den redusert belyste solcellen. Dette er noe som burde sees nærmere på i et senere eksperiment.

De to strøm-spenningkarakteristikkene er vist sammen i figur 8 på side 7. Fra målepunktene er det lett å se at de to kurvene passer godt sammen. Dessverre ble det ikke gjort flere målinger av strøm-spenningkarakteristikken i negativ strømmetning. Men fra å vite at strømmen i sperreretning også skal flate seg ut når spenningen går mot null, og ved å se at de to kurvene flater ut mot samme verdi, er det fristende å trekke slutningen at de to kurvene ville fortsatt å følge hverandre i fjerde kvadrant. En forklaring på at de to grafene går mot samme verdi kan være effekten den ytre spenningskilden har på kontaktpotensialet. Når vi måler I_{sc} vil det ikke være noe spenningsfall over solcellen, og for dette tilfellet vil det bare være lekkasjestrøm som går i kretsen, og de to kretsene burde derfor ha tilnærmet samme verdi for strømmen, siden det bare er lekkasjestrøm i begge tilfellene. Når vi måler verdien for V_{oc} går det ingen strøm i kretsen for begge tilfeller, og da gir det mening at det må være samme spenningsfall over kretsen. Det siste er også et argument for å kunne anta at V_{oc} er tilnærmet lik for den redusert belyst og den fullt belyste solcellen.

Årsaken til at det ble brukt et voltmeter og en motstand for å beregne strømmen gjennom kretsen istedenfor et amperemeter, er at når solcellen er den eneste spenningsforskyneren til kretsen kan den indre motstanden i et amperemeter være for stor, slik at solcellen ikke kan yte maksimalt. Dekademotstanden brukt som erstatning hadde en stor usikkerhet i motstanden, iforhold til usikkerheten i spenningen, som gjør at det er en mye større usikkerhet i strømmen enn i spenningen. Dette kan en se tydelig i figur 7 på side 6 og i tabell I på side 7. Denne effekten er hovedsaklig merkbar for lave motstander, grunnet det høye konstantleddet i usikkerheten til dekademotstanden, som var $\pm 5\text{m}\Omega$.

B. Solcellens optimale belastning

Fra å se på grafen over effekten generert av solcellen, vist i figur 9 på side 7, er det to ting å merke seg. Den første, og den mest selvfølgelig, er at solcellen som blir sterkere belyst gir en større effekt. Den andre er at hvilken lastmotstand som resulterer i maksimal effekt avhenger av belysningen. For den fullt belyste solcellen er resistansen som resulterer i størst effekt $3.00(1)\Omega$, for den redusert belyste er resistansen $6.00(1)\Omega$. Dette er en viktig egenskap ved solceller. Ønsker man en størst mulig effekt fra solcellen burde lasten i kretsen variere med belysningen av solcellen. Fill factoren beregnet for den fullt belyste solcellen er $0.57(1)$, og sier oss hvor mye effekt vi får ut fra solcellen vår. For vanlige solceller burde fill factor være på rundt $0.7 - 0.8$ for optimalt belyste solceller [6]. Som vi har sett har solcellen brukt i dette eksperimentet en lavere effekt, og derfor en lavere fill factor. Den absolutt optimale verdien av fill factor er 1.

Den maksimale effekten, den optimale belastningen og den optimale strømmen, er ganske lik en faktor to forskjellig mellom den fullt og redusert belyste solcelle. Om dette forholdet fortsetter å være proporsjonalt er noe som det ikke var tid til å måle under dette eksperimentet, men denne sammenhengen er noe som burde måles i et senere eksperiment for å se nærmere på sammenhengen.

I figur 9 på side 7 har de to største verdiene for effekten, for den fullt belyste solcellen, nesten samme verdi. Dette kan bety at den optimale belastningen ligger i området mellom disse to målepunktene, det vil si mellom 6Ω og 6.5Ω . En konsekvensen av dette ville være at den maksimale effekten funnet for solcellen er litt lavere enn den faktisk maksimale effekten. Dette har isåfall påvirket virkningsgraden til solcellen, og vært med på å føre til at den er lavere enn vi forventet.

C. Kombinasjon av enkeltsolceller i et solcellepanel

Fra målingen vist i tabell I på side 7 er det lett å se at det å koble flere solceller i serie øker spenningen i kretsen, og å koble solceller i parallell øker strømmen. Begge disse egenskapene vil dobblies iforhold til den den andre koblingsmetoden. Fra tabellen kan en også se effekten av å bestråle to solceller iforhold til en, og hvordan koblingsmåte påvirker dette. 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. Denne tilnærmingen er

ikke tatt med i beregningen av usikkerheten til maksimal effekt forholdene. Denne usikkerheten er kun beregnet fra spredningen til en serie av målinger til I_{sc} og V_{sc} og databladet til måleapparatene. Det at verdiene for fill factor for fullt- og delvis- belyst solcelle er tilnærmet like er et godt tegn for tilnærmingen vår at fill factor er konstant for forskjellige belysninger. For å få en mer nøyaktig, og spesifikk verdi for effekten, kunne strøm-spenningkarakteristikken for solcellene blitt målt individuelt under alle forholdene. Dette ble ikke gjort under eksperimentet grunnet tidsbegrensninger.

Fra å se på forholdet mellom effektene for de ulike koblingene og lysforholdene kan en gjøre flere slutninger om hvordan en kan få maksimal effekt ut av solceller. Når bare en solcelle er belyst gir det en faktor 263(3) mer effekt å ha solcellene koblet i serie i forhold til parallell. Årsaken til dette er at solceller oppfører seg som en diode når de er ubelyst, det vil ikke føre strøm på grunn av kontaktpotensialet over pn -overgangen. Derfor vil kretsen brytes når kun den ene solcellen er belyst. For en parallellkobling vil dette ikke føre til at kretsen blir brutt, siden den belyste solcellens påvirkning i kretsen ikke vil ødelegge for den andre solcellen. Derimot for seriekoblede solceller vil en ubelyst solcelle ødelegge strømførselen i kretsen, og reduserer effekten dramatisk. Akkurat som målingene viser. Fra disse målingene ser en at det er ekstremt viktig at alle solcellene er belyst når de kobles i serie. Målingene viste at vi fikk omtrent samme effekt for å ha begge solcellene belyst under serie og parallell. Parallellkobling gir en litt større effekt som er en faktor 1.05(2) større enn effekten fra seriekoblingen. Vi fant også at effekten fra to solceller var 83(1) mV, som er en faktor 1.90(2) mer enn den maksimale effekten fra en enkel solcelle, som vi forventet å ligge på rundt to. Avviket i effekt-forholdene stammer mest sannsynlig fra usikkerheter i målinger, feil fra å tilnære fill factor som konstant, eller ustabiliteter i lysstyrke eller ikke-ideelle koblinger.

Etter å ha gjort målingene med de to solcellene målte vi endringen av spenningsfallet over resistansen ved å bytte posisjonen til de to solcellene. Målingen viste en spenningsforskjell på 3 mV. Denne forskjellen har derfor blitt tatt med i usikkerhetsberegningene for de relative effektene.

D. Solcellens virkningsgrad

Under beregning av arealet tok vi hensyn til formen på solcellen, som en ser i figur 5 på side 5, men det ble ikke tatt hensyn til fingrene på tverrs av solcellen. Dette kan ha påvirket verdien vi fant for virkningsgraden, men endringen i arealet til solcellen ved å inkludere dette ville vært minimal, og ikke resultert i store forskjeller.

Målingen av den maksimale effekten, og målingen av solarimeteret ble gjennomført med over en times 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.

Årsaken til at en forventer en så lav virkningsgrad som 10% i dette eksperimentet, når kommersielle solceller er på rundt 15 til 22%, er at i vårt eksperiment blir det ikke brukt sollys som belysning. I vårt eksperiment er den eneste lyskilden en lysprojektor, som ikke vil gi samme spredning av forskjellige bølgelengder som lys fra sola. Lys fra sola inkluderer korte bølgelengder utenfor det synlig spekteret som bærer mye energi. Det er viktig å ha fotoner med høy nok energi for å kunne løsrive elektronene og danne elektron-hullpar. For en solcelle av silisium trengs det en energi på 1.12 eV, som tilsvarer en bølgelengde mindre enn 1100 nm. Bølgelengder mellom 800 og 1100 nm er muligens ikke like godt dekket av lysprojektoren, siden den har ikke som hensikt å produsere fotoner utenfor det synlige spekteret. Dette kan være en av årsakene til at solcellen gir en lavere virkningsgrad enn det som forventes av solceller.

VI. KONKLUSJON

I dette eksperimentet har det blitt gjort flere målinger på solceller i forskjellige koblinger og lysforhold. Fra å analysere disse målingene har det blitt gjort flere slutninger om hvordan å maksimere effekten fra solceller. Fra å se på strøm-spenning karakteristikken til en solcelle, med (figur 6 på side 6) og uten (figur 7 på side 6) en ytre spenningskilde, kan vi se at en solcelle oppfører seg som en diode, i den forstand at den bare leder strøm i en retning.

De samme målingene kan brukes til å beregne den maksimale effekten til en solcelle. Dette ble gjort for en total belyst solcelle, og en delvis belyst solcelle. Denne målingen er vist i figur 9 på side 7, og forteller oss at den optimale motstandsbelastningen er en funksjon av belysningen til solcellen. Dette er en viktig egenskap ved solceller, som må utnyttets for å kunne få mest mulig effekt fra et solcellepanel.

I eksperimentet ble det gjort målinger av hvordan forskjellige lysforhold påvirket effekten for forskjellige koblingsmåter. Disse målingene er vist i tabell I på side 7, og gir oss mye informasjon om hvordan å maksimere effekten generert av solceller. For å øke strømmen burde solceller kobles i parallell, men ønsker man økt spenning burde de kobles i serie. Det forteller oss også at det er nødvendig at begge solcellene

er belyst, når de er koblet i serie, for å få noe effekt fra solcellene. For parallellkoblinger øker maksimal effekten med en faktor 2.04(1) om to solceller er belyst istedenfor bare en. For seriekoblede solceller er det en faktor 512(7) større maksimal effekt genert når begge solcellene er belyst iforhold til en. Hvis bare en av solcellene skal være belyst er det en faktor 263(3) større maksimal effekt av at solcellene kobles i parallell istedenfor serie. Dette er viktig å bruke hvis en vet at deler av solcellepanelet ikke kommer til å være belyst iløpet av dagen. Ved å bruke et solarimeter kunne forholdet mellom den bestrålte effekten og den genererte effekten fra solcellen beregnes. Det ble målt at virkningsgraden til solcellen var 7.35(3)%.

Utstyrsliste

- Lysprojektor - Voigtländer
- Voltmeter (2) - Fluke 45
- Dekademotstand - Danbridge DR5/ABCDE
- Optisk benk
- Skyvelær
- Spenningskilde
- Solcelle (2)
- Solarimeter
- Ledninger

-
- [1] Squires, G.L. Practical Physics, Cambridge University Press, 2001.
- [2] Fysisk institutt, FYS 2150. SOLCELLEN, Univseritet i Oslo, februar 2017.
- [3] Robert T. Paynter, B.J. Toby Boydell, Electronics Technology Fundamentals, Pearson second edition, 2005.
- [4] Lars Mæhlum, solceller, <https://snl.no/solceller>, Store norske leksikon, sist oppdatert 30. oktober 2017, hentet 24. april 2018.
- [5] Knut A. Rosvold, Knut Hofstad solenergi, [https://](https://snl.no/solenergi)

- snl.no/solenergi, Stor norske leksikon, sist oppdatert 17. desember 2017, hentet 24. april 2018.
- [6] Karl Ochsner Solar Cell I-V Characteristic <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html> Alternative Energy Tutorials, sist oppdatert april 2018, hentet 25. april 2018.
- [7] Reverse leakage current, https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_leakage_current, Wikipedia, sist oppdatert 15. mai 2017, hentet 26. april 2018