



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2021 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Studie av elektroluminescens og strømspenningskurver for å undersøke defektutvikling i solcellemoduler**

Study of electroluminescence and current-voltage  
curves to investigate the development of defects in  
PV modules

**Siri Bjørnstad Jensen**  
Miljøfysikk og fornybar energi



# Forord

Masteroppgaven fullfører min utdannelse innen miljøfysikk og fornybar energi ved Norges Miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er skrevet som et samarbeid med forskningsgruppa innen solenergi ved fakultet for realfag og teknologi ved NMBU. Samarbeidet har vært en stor inspirasjonskilde for veien videre etter fullført studie.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder Espen Olsen, og tilleggsveileder Ingunn Burud for god veiledning gjennom hele våren. Til tross for et til dels nedstengt campus har dere funnet gode løsninger på både veiledning og gjennomføring av eksperimentelt arbeid.

En stor takk rettes også til to av mine tilleggsveiledere, Ingeborg Høiaas og Marija Vuković, som begge har hjulpet til med gjennomføring av eksperimentelt arbeid, i tillegg til å dele sine viktige erfaringer knyttet til elektroluminescens avbildning ute i feltet. Takk til Ingeborg Høiaas for mange gode ideer, og ikke minst tiden du har satt av til å gi tilbakemeldinger, tips og råd underveis i prosjektet.

Videre ønsker jeg å takke kollektivet som har bidratt til å gjøre masterskriving på hjemmekontor til en god opplevelse. Takk for oppmuntring, lange lunsjpauser og mange artige distraksjoner. Avslutningsvis vil jeg takke familie og venner for mange støttende ord og samtaler gjennom studietiden, og særlig i løpet av masterperioden.

Ås, 26.05.21

Siri Bjørnstad Jensen

# Sammendrag

Behovet for overvåkning av solcellemoduler er helt sentralt for maksimering av effektproduksjon, samt levetiden til en solcelle. I løpet av levetiden til en solcellemodul, vil ulike defekter og degraderinger forekomme i varierende grad. Sprekkdannelse i halvleder materialet i løpet av produksjon, transport og montering, samt den resterende levetiden til en solcelle, er et kjent problem i solcelleindustrien. I forbindelse med hvilken grad fenomenet påvirker ytelsen og karakteristikken til en solcellemodul, er det derimot store uenigheter. For å undersøke sammenhengen mellom ytelsesendring og romlig informasjon tilknyttet oppståtte moduldefekter, kombinerer denne oppgaven bruken av elektroluminescens (EL)-avbildning og gjennomføring av strøm-spennings (IV)-kurvemålinger. Et kamera som detekterer fotoner med bølglengder i den kortbølgede infrarøde (SWIR) delen av bølglengdespekteret benyttes for å avbilde EL-signalet fra fire multikrystallinsk silisium (mc-Si) solcellemoduler. De resulterende EL-bildene avslører den romlige fordelingen av eventuelle moduldefekter. Formålet med oppgaven er å se på to ulike påførte skader på to separate solcellemoduler, og hvordan disse utvikler seg i løpet av tidsrommet satt av til oppgaven. Resultater settes i sammenheng med tidligere gjennomførte studier innen fagområdet, med hensikt om å bringe forskningen nærmere en konklusjon angående hvilken betydning sprekkdannelse har på effektproduksjon.

Resultater for den mest skadede solcellemodulen, navngitt Multi4, viser en tydelig sammenheng mellom elektrisk isolerte områder, grunnet sprekkdannelse parallelt med modulens samleskinner, og redusert effektproduksjon. Funnet støtter oppunder tidligere gjennomført forskning som trekker frem parallelle sprekker som dominerende, har høy sannsynlighet for å resultere i elektrisk isolerte celleområder, samt gir økt sannsynlighet for degradering. Modulen inneholder en sprekk vinkelrett på flere samleskinner som ikke påvirker effektiviteten til modulen, og viser at ikke alle sprekkdannelse har en signifikant påvirkning på modulytelsen. Etter to gjennomførte forsøk på å skade modulen navngitt Multi3, registreres ingen endringer i modulens ytelse. Til tross for uendret ytelse detekteres små intensitetsendringer i EL-signal etter andre skadepåføring. De svake intensitetsendringene viser at sprekkdannelse parallelt med samleskinnene forekommer oftest, noe som stemmer godt overens med resultater for modulen navngitt Multi4. Resultater for de to modulene sett i sammenheng med referansemodulene viser at alvorlighetsgraden til en defekt er med på å avgjøre hvor hurtig en eventuell, gradvis degradering forekommer. Å kombinere EL-avbildning med IV-kurve målinger har vist at enkelte skader kan detekteres kun ved å undersøke modulens IV-kurve. Dette åpner for den potensielle muligheten om å kun benytte seg av IV-kurve målinger for både informasjon vedrørende ytelse og ytelsesbegrensende faktorer i fremtiden.

# Abstract

The need for monitoring of solar cell modules is a central aspect to maximize power production, as well as the module lifetime. During the lifetime of a photovoltaic module, various defects and degradations will occur. A well-known problem in the solar cell industry is the formation of cracks in the semiconductor material during production, transport and assembly, as well as the remaining life of the module. However, there are major disagreements regarding which degree the phenomenon affects the performance and characteristics of the module. To investigate the relationship between module performance and the spatial information associated with module defects, this thesis combines the use of electroluminescence (EL) imaging and current-voltage (IV) curve measurements. A camera detecting photons with wavelengths in the shortwave infrared (SWIR) part of the electromagnetic spectrum is used to detect the EL signal from four multicrystalline Silicon (mc-Si) modules. The resulting EL images reveal the spatial distribution of any modular defects. The purpose of the thesis is to investigate two differently applied damages in two separate solar cell modules, and how these develop during the time of the thesis. With the intention of bringing the research closer to a conclusion regarding the significance of crack formation on power production, the results are studied in context with previous studies.

Results for the most damaged photovoltaic module, named Multi4, show a clear connection between electrically isolated areas due to the formation of cracks parallel to the busbars, and reduced power production. The finding supports previously conducted research that highlights cracks parallel to busbars as dominant, has a high probability of resulting in electrically isolated cell areas, and increase the probability of degradation. Since the module contains a crack perpendicular to several busbars that does not affect the efficiency of the module, it shows that not all crack formations have a significant impact on module performance. After two attempts to damage the module named Multi3, no changes are detected in the module's performance. Despite the unchanged performance, some small changes in EL signal are detected after applying damage for the second time. The slight change in intensity show that the formation of cracks parallel to busbars occur most often. This agrees well with the results for the module named Multi4. By looking at the results for the two modules in context with the reference modules, it is shown that the severity of a defect helps to determine how fast a gradual degradation occurs. Combining EL imaging with IV-curve measurements has shown that some damage can be detected just by examining the IV curve of the module. This opens the possibility of only needing to use IV curve measurements to gain information regarding both the performance and the factors reducing the module's performance in the future.

---

# Forkortelser

<b>c-Si</b>	Krystallinsk silisium
<b>CB</b>	Ledningsbånd
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device
<b>EL</b>	Elektroluminescens
<b>EM</b>	Elektromagnetisk
<b>FF</b>	Fyllfaktor
<b>FPA</b>	Focal Plane Array
<b>IEC-60891</b>	IEC 60891:2009 Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics
<b>IEC-60904-1</b>	IEC 60904-1:2020 Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics
<b>IV</b>	Strømspenning
<b>mc-Si</b>	Multikrystallinsk silisium
<b>MPP</b>	Maks effektpunkt
<b>OC</b>	Åpen krets
<b>OPC</b>	Driftsforhold
<b>SC</b>	Kortslutning
<b>SRH</b>	Shockley-Read-Hall
<b>STC</b>	Standard testbetingelser
<b>SWIR</b>	Kortbølget infrarød
<b>VB</b>	Valensbånd

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Forkortelser</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>4</b>
2.1 Prinsippene bak en solcelle . . . . .	4
2.1.1 Krystallinsk silisium . . . . .	4
2.1.2 Halvleder doping . . . . .	5
2.1.3 Fotogenerasjon av ladningsbærere . . . . .	5
2.1.4 pn-overgang . . . . .	6
2.1.5 Rekombinasjonsmekanismer og defekter . . . . .	8
2.2 Solcellekarakterisering . . . . .	9
2.2.1 Standard testbetingelser . . . . .	10
2.2.2 Strømspenningskurve . . . . .	11
2.3 Elektroluminescens . . . . .	14
2.3.1 Avbildning i det kortbølgede infrarøde bølgelengdeområdet . . . . .	15
<b>3 Eksperimentelt arbeid og prosedyre for gjennomføring</b>	<b>17</b>
3.1 Skadepåføring . . . . .	19
3.2 Hovedeksperiment 1: Karakterisering av solcellemoduler . . . . .	20
3.2.1 Nødvendige instrumenter og oppsett . . . . .	20
3.2.2 Prosedyre for måling av IV-karakteristikk . . . . .	22
3.2.3 Analyse av IV-kurvemålinger . . . . .	23
3.3 Hovedeksperiment 2: Elektroluminescensavbildning av solcellemoduler . . . . .	23
3.3.1 Nødvendige instrumenter og oppsett . . . . .	23
3.3.2 Prosedyre for EL avbildning . . . . .	23
3.3.3 Bildeanalyse . . . . .	24
<b>4 Resultater og diskusjon</b>	<b>26</b>
4.1 Multi4 . . . . .	27
4.1.1 Skadeutvikling . . . . .	27



4.1.2	Nærmere undersøkelse av EL-signal den 15.04.21 . . . . .	33
4.1.3	Sammenheng mellom modulkarakteristikk og EL-bilder . . . . .	34
4.1.4	Betydningen av sprekkdannelser . . . . .	35
4.2	Multi3 . . . . .	37
4.2.1	Utvikling av IV- og effektkurver . . . . .	37
4.2.2	Endringer i EL-signal . . . . .	41
4.2.3	Nærmere undersøkelse av endret EL-signal etter andre skadepåføring	43
4.3	Referansemoduler . . . . .	45
4.4	Korrigeringsparametere til STC . . . . .	48
4.5	Diskontinuitet ved gjennomføring av hovedeksperiment 2 . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Pythonkode for bildebehandling av EL-bilder</b>	<b>57</b>
<b>B</b>	<b>Hovedeksperiment 1 - Multi2</b>	<b>59</b>
<b>C</b>	<b>Korrigeringsparametere til STC</b>	<b>61</b>
<b>D</b>	<b>Hovedeksperiment 2 - Multi2</b>	<b>67</b>

# Kapittel 1

## Introduksjon

Med bakgrunn i The European Green Deal har Europa som mål å være en klimanøytral verdensdel innen 2050. Et sentralt punkt for realisering av målet er elektrisitetsproduksjon ved bruk av fornybare energikilder. Det stadig økende, globale fokuset på implementering av fornybar kraftproduksjon har i følge årsrapporten for 2020 fra Det internasjonale energi-byrået (IEA) ført til store kostnadsreduksjoner knyttet til solceller i løpet av det siste tiåret [1]. Elektrisitet produsert ved bruk av solceller er nå å finne blant de aller laveste prisene for elektrisitetsproduksjon. Fra rapporten fremkommer det at solenergi står sentralt når det kommer til elektrisitetsproduksjon i alle deres forutsette scenarier for de neste årene.

Utviklingen av solcelleteknologi har ført med seg store spenn i oppbygningen av, og virkningsgraden til en solcelle. Variasjoner innen halvledermateriale, tykkelse og produksjonsteknikker er eksempler på dette. Å holde prisen så lav som mulig samtidig som solcellens ytelse og virkningsgrad er høy, er sentrale aspekter under videreutvikling av dagens teknologi. I dag er det krystallinsk silisium (c-Si) som dominerer når det kommer til halvledermaterialer på solcellemarkedet [2]. Solceller klassifiseres enten som monokrystallinsk silisium, eller multikrystallinsk silisium (mc-Si), hvor ulikheter i krystallstrukturen til silisium skyldes prosessen benyttet for produksjon av Si-wafere.

En strømspennings (IV)-kurve viser forholdet mellom spenning og strøm i en solcelle, eller solcellemodul, ved bestemte driftsbetingelser. En slik kurve benyttes innen solcelleteknologien til å blant annet bestemme sentrale parametere for solcellen, eller modulen, i tillegg til at kurvens karakteristiske form gjør den til en metode for å oppdage defekter ved avvik fra kurvens forventede form. For at parameterne som benyttes for solcellekaraktisering skal gi sammenlignbare resultater, benyttes ofte standard testbetingelser (STC) ved gjennomføring av en IV-kurvemåling.

I løpet av levetiden til en solcellemodul vil, i varierende grad, ulike defekter og degraderinger forekomme. Defekter kan oppstå både under produksjonsprosessen, transport og montering, i tillegg til perioden hvor solcellemodulen er fastmontert og i drift. Eksempler er fuktskader, sprekkdannelser i halvledermaterialet og små sprekker i frontglasset på solcellemodulen som et resultat av ytre mekanisk stress. Med ytre mekanisk stress menes eksempelvis kraftig vind eller et tungt lag med snø [3]. PID - *Potential-induced degradation* er blant de mest alvorlige typene av degradering, og skyldes spenningsforskjeller mellom modulens aktive lag og modulrammen [4]. Resultatet er en solcellemodul med redusert

---

konverteringseffektivitet. Med økende mengde årlig installert kapasitet, vil også en økende effektmengde følgelig kunne gå tapt. Overvåking av solcellemoduler blir derfor i større grad sentralt for maksimering av effektproduksjonen og levetiden til en solcelle. En IV-kurve og parameterne som anvendes for solcellekarakterisering kan benyttes til å beskrive tilstanden til en solcellemodul, men gir til tross for dette mangelfull informasjon om den romlige fordelingen av den eller de ytelsesbegrensende faktorene. I mange tilfeller er det slik at disse faktorene ikke er visuelt synlige ved inspeksjon med det menneskelige øyet. For å forstå hvordan en spesifikk type defekt eller degradering påvirker karakteristikken til en solcelle, kan derfor IV-kurve målinger og bildeanalyse kombineres. Bildeanalysen kan ta for seg ulike typer mekanismer for analyse av bilder av en solcelle eller solcellemodul tatt med spesifikke kameratyper.

Elektroluminescens (EL) er en veletablert metode blant solcelleprodusenter for kvalitetskontroll, men benyttes også på fastmonterte solcellemoduler ute i feltet for vurdering av modulens ytelse og kvalitet [5]. EL er radiativ stråling generert ved rekombinasjon av eksternt tilførte ladningsbærere tilført gjennom kontaktene til solcellemodulen. For å avbilde EL-signalet ved spenningssetting av en solcellemodul kreves et kamera som detekterer fotoner med bølgelengder i den kortbølgede infrarøde (SWIR) delen av bølgelengdespekteret. Videre kan bildeanalyse benyttes for å avsløre ulike defekter og tapsmekanismer. I denne oppgaven benyttes et slikt SWIR kamera for å avbilde det radiative signalet utsendt av en mc-Si solcellemodul tilkoblet en effektkilde. Fordelen med EL-bilder er at de gir romlig informasjon, med høy oppløsning, slik at defekter kan studeres. Ved å kombinere bruken av EL-avbildning og gjennomføring av IV-kurve målinger, kan sammenhenger mellom endringer i ytelse samt romlig informasjon tilknyttet moduldefekter undersøkes.

Sprekkdannelse i halvledermaterialet i løpet av produksjon, transport og montering, og den resterende levetiden til en solcelle, er et kjent problem i solcelleindustrien. Det er derimot ingen felles enighet angående hvilken grad fenomenet påvirker ytelsen og karakteristikken til en solcellemodul. Utallige studier er gjennomført med ulike formål innen området, men konklusjonene avviker stort fra hverandre. Et sentralt fokus innen forskningen rettes mot retningen på sprekkdannelsene; hvilken retning som resulterer i størst effekttap, samt hvilken retning som forekommer oftest. Artikkelen *The Impact of cracks on photovoltaic power performance*, skrevet av *M. Dales et al.* [6] konkluderer med at ikke alle sprekkdannelser har en signifikant påvirkning på effektproduksjon. Eksempelvis skrives det at sprekker vinkelrett på modulens samleskinner ikke påvirker effektproduksjonen signifikant med mindre de krysser mer enn tre samleskinner. Sprekker parallelt med samleskinnene viser heller ikke en klar påvirkning på modulytelsen i alle studiets tilfeller. Det sistnevnte funnet strider med konklusjonen i *Criticality of cracks in PV modules* [7], hvor sprekkdannelser parallelt med samleskinner trekkes frem som særlig kritisk for effektproduksjon. Konklusjonen gjøres basert på at de detekteres hyppig, har høy sannsynlighet for å resultere i isolerte celleområder, og gir en økt sannsynlighet for degradering i løpet av modulens levetid. Også *G. E. Georghiou et al.* [8] skriver at sprekker parallelt med samleskinner resulterer i klare effekttap.

Formålet med denne oppgaven er å se på to ulike påførte skader på to solcellemoduler, og hvordan disse utvikler seg i løpet av tidsrommet satt av til oppgaven. En sammenligning mellom de to skadene, ulikheter i hvor raskt, eller om de forverres i løpet av det gitte tidsrommet, står sentralt. Resultater settes i sammenheng med tidligere gjennomførte studier innen fagområdet, med hensikt om å bringe forskningen nærmere en konklusjon angående

---

betydningen sprekkdannelse har på effektproduksjon. Dette vil tydeliggjøre hvilke tiltak som eventuelt burde gjøres for å forhindre effekttap som følge av sprekkdannelse. EL-bilder gjennomføres med jevne mellomrom for å detektere skader, og skadens utvikling over tid. Et sentralt aspekt av oppgaven er å ta i bruk IV-kurver tilhørende modulene for å se på hvordan den bestemte skaden påvirker modulens karakteristik, og om det er mulig å detektere skadens eventuelle påvirkning og utvikling på disse kurvene. To referansemøder, som ikke påføres skade, og som har blitt plassert i feltet samtidig som testmodulene, tas i bruk for sammenligning. Sammenligningen er sentral med tanke på degraderinger som forekommer i solcellemøder i løpet av dens levetid, og som ikke er direkte koblet til de påførte skadene. En referansemøde vil kunne avsløre denne potensielle degraderingen innen tidsrommet for oppgaven, slik at det er mulig å skille effekten av den påførte skaden fra naturlige degraderinger som ville forekommet selv uten skadepåføring.

Flere studier [8, 9] tyder på at solcellemøder som inneholder sprekker vil ha et større effekttap ved lave irradiansverdier og i et kaldt og snørikt klima, sammenlignet med et varmt og solrikt klima. Det eksperimentelle arbeidet tilknyttet oppgaven er gjennomført fra november 2020 til april 2021. At arbeidet er gjennomført på vinterhalvåret vil derfor vise effekten av skaden i løpet av de månedene de er forventet å påvirke modulenes ytelse i størst grad. Ytre faktorer, som snø og hagl kan i løpet av perioden føre til en forverring av den påførte skaden. I løpet av de drøye fem månedene arbeidet er utført, forventes det likevel ikke å se en tydelig utvikling på verken EL-bilder eller IV-kurver etter de påførte skadene, da tidsrommet er svært begrenset. Antakelsen baseres på funn gjort at *M. Köntges et al.* [7], hvor beregninger viser at kun 29 % av sprukne solceller resulterer i degraderinger i løpet av en kunstig aldringsprosess, mens bare 7 % fører til elektrisk isolerte celleområder.

# Kapittel 2

## Teori

Kapitlet tar for seg tre relevante hovedpunkter bak forståelsen som ligger til grunn for oppgavens senere kapitler; prinsippene bak en solcelle, etterfulgt av solcellekarakterisering, og avslutningsvis, elektroluminescens. Med mindre annet er spesifisert, er boken *Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems* [10] benyttet for teoretiske forklaringer i delkapittel 2.1.

### 2.1 Prinsippene bak en solcelle

En av hovedmekanismene bak virkemåten til en solcelle er generering av ladningsbærere som følge av absorpsjon av fotoner. De genererte ladningsbærerne er elektroner og hull, og har motsatt ladning. Målet er å utnytte den kjemiske energien knyttet til de genererte elektron-hull-parene ved at elektronene føres ut i en ytre krets hvor de utfører et arbeid. I denne konverteringen fra kjemisk energi til elektrisk energi må de fotogenererte ladningsbærerne separeres lenge nok til at elektronet kan føres ut i en ytre krets. Separasjonen gjøres i de fleste av dagens solceller ved bruk av en pn-overgang. Overgangen fungerer som en diode og sørger for at ladningsbærerne kun kan bevege seg i en retning. Den mest utbredte solcelletypen er laget av c-Si, og fokuset i denne oppgaven begrenser seg til mc-Si solceller med en pn-overgang.

#### 2.1.1 Krystallinsk silisium

Silisium (Si) har atomnummer 14, og omtales med sine fire valenselektroner som et halvleder materiale. For å oppfylle oktettregelen danner et Si-atom kovalente bindinger til fire andre silisiumatomer, og har dermed en krystallstruktur. Ved 0 K er alle valenselektronene bundet i et kovalent bånd, men ved temperaturer større enn 0 K brytes noen av bindingene i krystallen grunnet absorpsjon av termisk energi. Resultatet er frie ladningsbærere i form av et elektron-hull-par. Et fritt elektron etterlater en brutt binding, samt en ledig posisjon i krystallstrukturen som kan inntas av et annet elektron. Denne ledige posisjonen, omtalt som et hull, oppfører seg som en positivt ladet partikkel. Et slikt halvleder materiale som ikke har blitt tilsatt noen fremmedatomer, kalles et intrinsikk materiale. Et atom i c-Si anses som fremmed dersom det ikke er Si.

Innen solcelleteknologi skilles det mellom mono- og multikrystallinsk-Si avhengig av hvor-

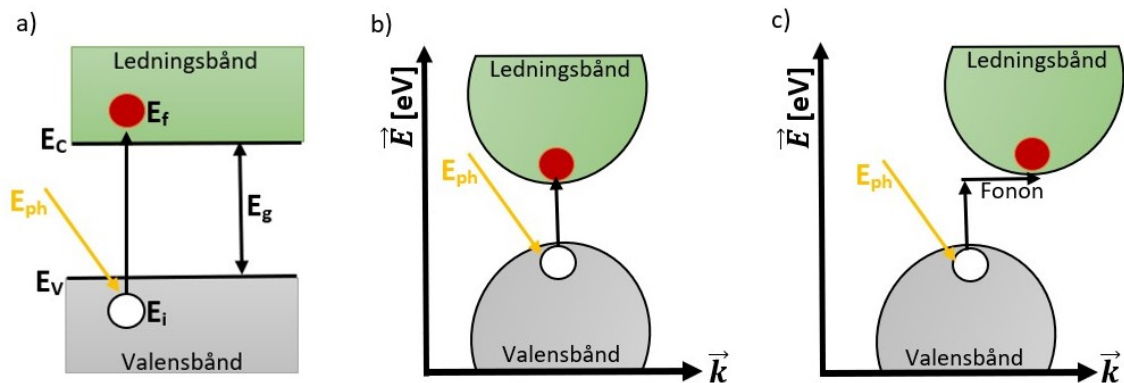
dan Si-waferen produseres. En monokrystallinsk solcelle består av én krystall, og har derfor en kontinuerlig og ubrutt gitterstruktur. Resultatet er wafere med uniform farge. Solceller av monokrystallinsk-Si wafere er den mest effektive av de to, men er samtidig også den dyreste da prosessen er mer energikrevende. mc-Si består av flere krystaller, og overgangen fra en slik krystall til en annen omtales som en korn grense. I disse grensene oppstår det gittermismatcher, noe som fører med seg defekter og dermed redusert effektivitet. En multikrystallinsk solcelle har en ikke-uniform krystallstruktur, med tydelige korn grenser, noe som gir slike solceller en visuelt synlig ujevn farge.

### 2.1.2 Halvleder doping

Doping av halvledermaterialer gjøres for å endre den elektriske ledningsevnen til en halvleder, ved at antallet frie ladningsbærere øker. Ved doping av c-Si erstattes noen av de opprinnelige Si-atomene i krystallen med fremmedatomer, og omtales da som en ekstrinsikk halvleder. Bor (B) og fosfor (P) er de vanligste dopeatomene for doping av c-Si innen solcelleteknologien. Med sine tre valenselektroner har ikke B-atomer muligheten til å danne bindinger med alle dets fire Si naboatomer. For hvert B-atom i krystallen vil det følgelig være et mobilt hull som, ved tilstrekkelig temperatur, kan motta et elektron fra en annen Si-Si binding i krystallen. Av den grunn at c-Si dopet med B domineres av hull som frie ladningsbærere, omtales halvlederen som p-dopet. I en p-dopet halvleder er derfor majoritetsladningsbæreren hull, mens minoritetsladningsbæreren er elektroner. I motsetning til en p-dopet halvleder, har en n-dopet halvleder størst konsentrasjon av negativt ladede ladningsbærere, altså elektroner. I n-doping benyttes P, som har fem valenselektroner, hvor kun fire av disse vil kunne danne bindinger med de fire Si naboatomene i gitterstrukturen. Det siste elektronet knyttet til P-atomet deltar dermed ikke i noe binding og er på denne måten svakt bundet til atomet. Følgelig vil termisk energi i c-Si ved romtemperatur føre til at dette elektronet enkelt kan frigjøres fra P-atomet og resultere i et fritt elektron. Majoritetsladningsbæreren i en n-dopet halvleder er dermed elektroner, mens minoritetsladningsbæreren er hull.

### 2.1.3 Fotogenerasjon av ladningsbærere

Når et foton absorberes i c-Si vil et elektron eksiteres fra sitt opprinnelige energinivå,  $E_i$ , til et høyere energinivå,  $E_f$ . På grunn av diskrete energinivåer i halvledermaterialet må fotonenergien være over en gitt verdi, som er temperatur- og materialavhengig, for at denne eksitasjonen skal kunne skje. Valenselektronene i en halvleder befinner seg under et energinivå omtalt som kanten av valensbåndet (VB),  $E_v$ , mens eksiterte elektroner befinner seg over energinivået omtalt som kanten av ledningsbåndet (CB),  $E_c$ . Energidifferansen mellom båndene kalles båndgapsenergien,  $E_G$ , til materialet, og fotonenergien,  $E_{ph}$ , må være større enn eller lik båndgapsenergien for at et elektron skal kunne eksiteres fra VB til CB. Dersom  $E_{ph} \geq E_G$  genereres et fritt elektron som eksiteres til CB, samt et gjenværende hull med energi  $E_i$ , altså et elektron-hull-par, slik som vist i figur 2.1 a). I figur 2.1 a) er VB og CB flate, men i en reell halvleder varierer båndene med en  $\vec{k}$  slik som vist i figur 2.1 b) og c).  $\vec{k}$  beskriver bevegelsesmengden til et elektron i halvlederen. Halvledermaterialer klassifiseres i to ulike grupper avhengig av hvordan toppen av VB og CB er plassert i forhold til hverandre. For halvledere hvor det høyeste punktet på VB er å finne direkte under det laveste punktet på CB, kan et elektron i VB eksiteres direkte opp i CB uten at det kreves noe endring i bevegelsesmengde. Dette kan sees i figur 2.1 b), og



Figur 2.1: a) Et elektron med opprinnelig energi,  $E_i$ , absorberer et foton med energi  $E_{ph} \geq E_G$  og eksiteres til et høyere energinivå,  $E_f$ , i et halvledermateriale med en båndgapsenergi på  $E_G$ .  $E_V$  er energien på båndkanten av VB, mens  $E_C$  er energien på båndkanten av CB. b) Direkte båndgap hvor et foton med tilstrekkelig energi fører til eksitasjon av et elektron. x-aksen viser hvordan VB og CB varierer med  $\vec{k}$ , mens y-aksen viser energinivået til VB og CB. c) Et foton, i tillegg til et fonon fra krystallen sørger for eksitasjon av et elektron i et indirekte båndgap. Figuren er, med tillatelse, tilpasset fra figur 3.1 og 7.1 i boken *Solar Energy*, Smets et al. [10].

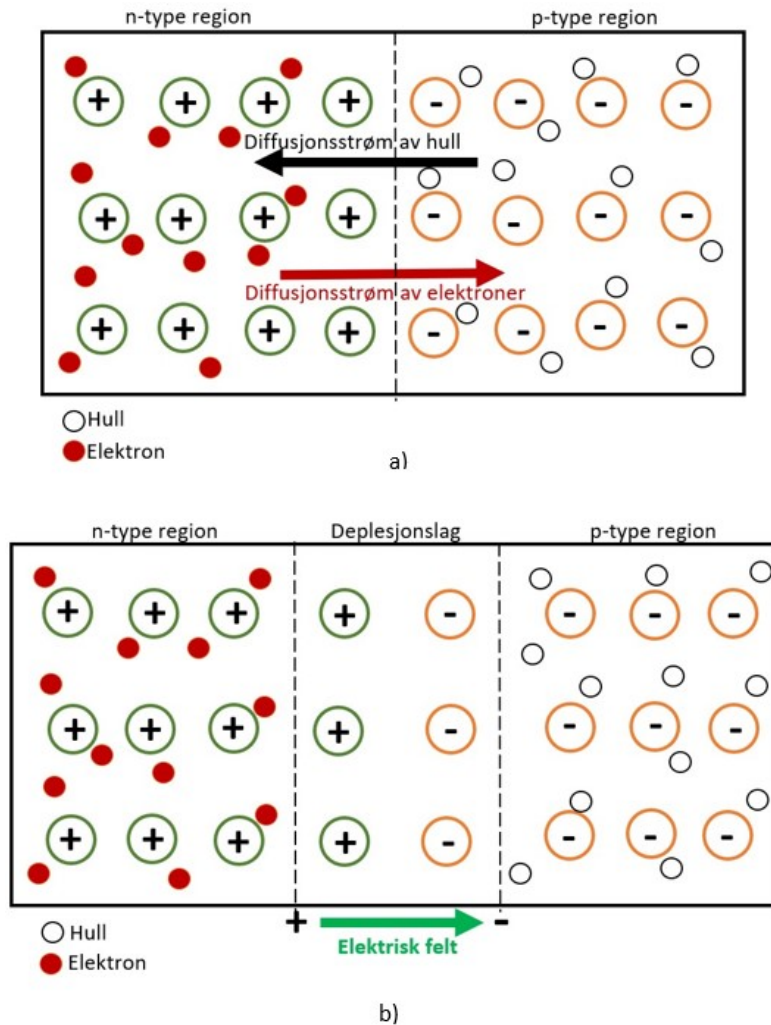
en halvleder med et slikt båndgap klassifiseres som et materiale med direkte båndgap. I figur 2.1 c) vises et indirekte båndgap hvor toppunktet i VB og bunnpunktet i CB ikke er direkte under hverandre. Eksitasjon av et elektron i et slikt båndgap krever endring i dets bevegelsesmengde i tillegg til energien absorbert fra et foton. En slik endring i elektronets bevegelsesmengde oppnås ved at det mottar vibrasjonsenergi fra krystallen i form av et fonon. c-Si er et indirekte båndgapsmateriale, og ved romtemperatur er båndgapsenergien 1.12 eV.

#### 2.1.4 pn-overgang

I en solcelle er målet å utnytte den kjemiske energien knyttet til fotogenererte elektronhull-par ved at elektronene føres ut i en ytre krets. For å forhindre at de genererte elektronhull-parene rekombinerer, altså at elektronet faller tilbake til sitt opprinnelige energinivå,  $E_i$ , før energien lagret i paret får utført et arbeid, består en solcelle av en pn-overgang som separerer de fotogenererte ladningsbærerne. Selve overgangen fra p-dopet region til n-dopet region omtales som en metallurgisk overgang. Et halvledermateriale som har en p-dopet og n-dopet del har en stor differanse i konsentrasjonen av frie elektroner mellom de to regionene. Konsentrasjonsdifferansen resulterer i en diffusjonsstrøm av elektroner fra n-type-regionen, over den metallurgiske overgangen og til p-type-regionen, som vist i figur 2.2 a). Slik som figur 2.2 a) viser, gjelder det motsatte for den store konsentrasjonen av hull på p-siden i forhold til n-siden, og resultatet er en diffusjonsstrøm av hull fra p-siden til n-siden. Depleksjonslaget som vises i figur 2.2 b) er en følge av disse diffusjonsstrømmene, og er et område tømt for frie ladningsbærere. Etersom området er tømt for frie ladningsbærere vil delen av depleksjonslaget som er nærmest p-type-regionen være negativt ladet, da hull er blitt fylt opp med elektroner, og etterlater dermed et negativt ladet ion. Tilfellet er motsatt på den delen av depleksjonslaget som er nærmest n-type-regionen. Her er elektroner fjernet fra atomene, og etterlater positivt ladede ioner. Disse ladningene setter opp et elektrisk felt i området rundt den metallurgiske overgangen. Slik som vist i figur 2.2 b), resulterer det

## 2.1. PRINSIPPENE BAK EN SOLCELLE

elektriske feltet i at ladningsbærerne må gå i motsatt retning av konsentrasjonsgradienten. Elektroner og hull kan dermed kun bevege seg i en retning over pn-overgangen samsvarende med det elektriske feltet. Denne bevegelsen av ladningsbærere kalles drift.



Figur 2.2: a) Diffusjonsstrøm av elektroner og hull over den metallurgiske overgangen når en p-type og n-type region kommer i kontakt. b) pn-overgang ved likevekt. Diffusjonsstrømmen resulterer i et depljesjonslag i området rundt den metallurgiske overgangen. Ioniserte atomer i depljesjonslaget setter opp et elektrisk felt som virker i motsatt retning av konsentrasjonsgradientene for elektroner og hull. Figuren er, med tillatelse, tilpasset fra figur 8.1 og 8.2 i boken *Solar Energy*, Smets et al. [10].

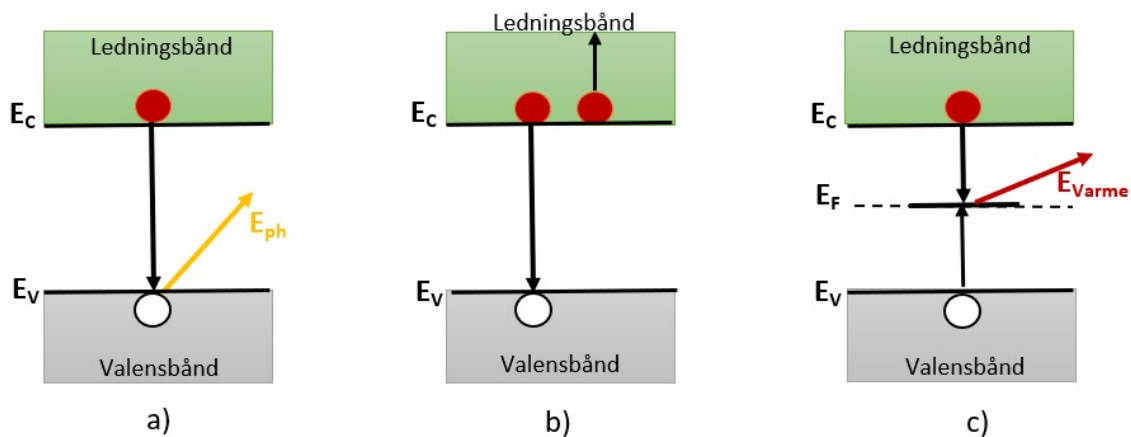
Ved likevekt er drift- og diffusjonsstrømmen av elektroner og hull like store, slik at netto total strøm er null. Av den grunn at fotogenerasjon av ladningsbærere endrer konsentrasjonen av minoritetsladningsbærerne i p- og n-type-regionene, er ikke dette tilfellet når solcellen er under belysning. Under belysning er fokuset at fotogenererte elektroner og hull skal separeres og samles ved hver sin kontakt. Elektroner samles i front n-laget og hull i bakkontakten. Ved generasjon av et elektron-hull-par i den n-dopede regionen er hullet en minoritetsladningsbærer, mens elektroner er en majoritet. Dermed er sannsynligheten for at det genererte elektronet kan samles ved front n-kontakten stor. Hullet derimot, er



avhengig av å ikke rekombinere med den dominerende mengden elektroner før det elektriske feltet i depleksjonslaget fører til at det krysser pn-overgangen og blir en majoritet på p-siden. Som majoritet på p-siden øker sannsynligheten for at hullet kan nå frem til bakkontakten før det rekombinerer med en minoritet, altså et elektron. Tilfellet er det motsatte ved fotogenerasjon av et elektronhull-par på den p-dopede siden, hvor elektronet er en minoritetsladningsbærer. Sannsynligheten for at et fotogenerert elektron og hull samles ved hver sin kontakt, og på denne måten bidrar til produksjonen av lysgenerert strøm, avhenger av rekombinasjonsraten i solcellen.

### 2.1.5 Rekombinasjonsmekanismer og defekter

Mengden rekombinasjon og hva som er den dominerende rekombinasjonsmekanismen i en solcelle, avhenger av flere faktorer. Om solcellen er mono- eller multikrystallinsk og om halvledermaterialet har et direkte eller indirekte båndgap er to sentrale faktorer. En rekombinasjonsprosess resulterer enten i utsending av et foton, ofte kalt radiativ rekombinasjon, eller overføring av varme. Radiativ rekombinasjon omtales også som bånd-til-bånd eller direkte rekombinasjon. Dette fordi et elektron fra CB rekombinerer direkte med et hull i VB, og fører til emittering av et foton med energi tilsvarende båndgapsenergien, slik som vist i figur 2.3 a). Det utsendte fotonet vil, grunnet sin energi, sjeldent absorberes i halvlederen, og sendes ut av halvledermaterialet. Direkte rekombinasjon er en prosess som dominerer i direkte båndgapsmaterialer. Årsaken er at det ikke trengs endring i bevegelsesmengden til elektronet for at en slik prosess skal kunne forekomme. Rekombinasjonsraten grunnet mekanismen er proporsjonal med tettheten til elektroner og hull i materialet. Selv intrinsiske halvledere, ved temperaturer over 0 K, har frie ladningsbærere, og direkte rekombinasjon er derfor uunngåelig, og klassifiseres som intrinsikk [11].



Figur 2.3: Et elektron og hull rekombinerer via a) radiativ rekombinasjon, b) Auger rekombinasjon og c) SRH rekombinasjon. Figuren er, med tillatelse, tilpasset fra figur 7.2, 7.3 og 7.5 i boken *Solar Energy*, Smets et al. [10].

I tillegg til direkte rekombinasjon er det to andre rekombinasjonsmekanismer som forekommer i solceller. Auger rekombinasjon er, som direkte rekombinasjon, en uunngåelig rekombinasjonsmekanisme som øker med ladningsbærerkonsentrasjon. Denne typen rekombinasjon er sentral i indirekte materialer hvor direkte rekombinasjon er mindre sannsynlig. Når et elektron og hull rekombinerer overføres den frigitte energien og bevegelsesmengden

til en tredje ladningsbærer, et elektron i CB eller et hull i VB. Den tredje ladningsbæreren termaliserer raskt til båndkanten og den frigjorte energien blir vibrasjonsenergi i gitterstrukturen. I figur 2.3 b) vises Auger rekombinasjon hvor den frigjorte energien overføres til et elektron.

Den siste av de tre mekanismene er Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasjon. I motsetning til direkte og Auger rekombinasjon som er uunngåelige rekombinasjonsmekanismer, er SRH knyttet til defekter i krystallen. Mekanismen kategoriseres følgelig som ekstrinsikk rekombinasjon [11] som kan unngås eller begrenses. SRH er et resultat av fremmedatomer i krystallstrukturen til halvledermaterialet. Disse atomene kan bevisst være en del av strukturen, slik som ved doping, eller uønskede. Fremmedatomene introduserer tillatte energinivåer,  $E_F$ , omtalt som feller, i det ellers forbudte båndgapet. Et elektron (eller hull) kan bli fanget i et slikt energinivå. Dersom et hull (eller et elektron) tiltrekkes til det samme energinivået mens elektronet (eller hullet) enda befinner seg der, rekombinerer de [12]. Mekanismen er vist i figur 2.3 c), og er oftest en ikke-radiativ rekombinasjonsmekanisme, hvor den frigjorte energien resulterer i varme i krystallen. Ved overflaten til en halvleder er det brudd i krystallsymmetrien. Her får ikke alle valenselektronene dannet kovalente bindinger, noe som fører til umettede bindinger. Som et resultat av disse defektene dannes det mange feller i båndgapet til materialet, noe som fører med seg SRH rekombinasjon. Slik SRH rekombinasjon grunnet umettede bindinger kalles overflaterekombinasjon, og kan bekjempes gjennom passivering og barrieredoping. De to nevnte prosessene er utenfor omfanget til oppgaven, og kan ved interesse leses om i *Smets et al.* [10]. I en multikrystallinsk solcelle fører korn grensene på samme måte som de umettede bindingene på overflaten til krystallen, til defekter og økt SRH rekombinasjon sammenlignet med en monokrystallinsk solcelle. Passivering, barrieredoping og bruk av monokrystallinske solceller fremfor multikrystallinske solceller, er eksempler på hvordan SRH er en mekanisme som kan begrenses i en solcelle.

For at en solcelle skal kunne generere mest mulig elektrisk effekt, må rekombinasjonsraten holdes så lav som mulig. Levetiden og diffusjonslengden til minoritetsladningsbærerne er avgjørende parametere for raten av rekombinasjon [13]. Mens levetiden til en minoritetsladningsbærer defineres som den gjennomsnittlige tiden det tar før en minoritetsladningsbærer rekombinerer [13], er diffusjonslengden til en minoritetsladningsbærer den gjennomsnittslengden en minoritetsladningsbærer beveger seg fra den ble generert til den rekombinerer [14]. Disse to parameterne må være tilstrekkelig store slik at minoritetsladningsbærere når fram fra punktet den ble generert og til pn-overgangen, slik at den kan samles ved front- eller bakkkontakten. Mengden defekter og dopingnivået i materialet er avgjørende for levetiden og diffusjonslengden. Dette ettersom mengden SRH rekombinasjon øker med defektnivået, og mengden Auger rekombinasjon øker med ladningsbærerkonsentrasjonen.

## 2.2 Solcellekarakterisering

For karakterisering av en solcelle, eller en solcellemodul, benyttes de samme parameterne. En solcellemodul består av flere solceller koblet sammen. De kan sammenkobles på ulike måter, avhengig av den ønskede strømmen og spenningen fra modulen. Ved seriekobling av cellene er strømmen gjennom alle de sammenkoblede cellene den samme, og begrenses av cellen som produserer lavest strøm. Spenningen derimot, adderes for seriekoblede celler. Ved parallellkobling av solceller er spenningen den samme over alle cellene, mens strømmen

## 2.2. SOLCELLEKARAKTERISERING

---

adderes. Som regel seriekobles solceller i en solcellemodul, slik at strømmen holdes lav for å minimere resistive tap.

Parameterne som i hovedsak brukes til å karakterisere ytelsen til en solcelle, eller solcellemodul, er  $I_{SC}$  (kortslutningsstrøm),  $V_{OC}$  (åpenkrets spenning),  $P_{maks}$  (maks effekt) og FF (fyllfaktor). Kortslutningsstrømmen til en solcelle er den maksimale strømmen som kan gå gjennom en tilkoblet ytre krets, og oppnås når spenningen over cellen er 0 V, altså ved kortslutning av elektrodene i cellen. For å unngå at kortslutningsstrømmen er avhengig av cellens areal, benyttes kortslutningsstrømtettheten  $J_{SC}$ , som typisk måles i mA/cm<sup>2</sup> [10]. Den maksimale spenningen en solcelle kan levere omtales som åpenkrets spenningen. Under antakelsen om at  $I_{ph} \geq I_0$  kan verdien for  $V_{OC}$  beregnes ved bruk av følgende sammenheng [10]:

$$V_{OC} \simeq \frac{k_b T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right), \quad (2.1)$$

hvor  $k_b$  er Boltzmanns konstant ( $1.380 \times 10^{-23} J/K$ ),  $T$  er celledemperaturen og  $q$  er elementærladningen ( $1.602 \times 10^{-19} C$ ).  $I_{ph}$  er den fotogenererte strømmen, mens  $I_0$  er metningsstrømmen til solcellen, og er en parameter som benyttes for å beskrive mengden rekombinasjon [10].

Ved  $V_{OC}$  er ikke cellen tilkoblet noe last og det går derfor ingen strøm gjennom den ytre kretsen.  $V_{OC}$  og  $J_{SC}$  er dermed ikke mulig å oppnå ved samme tidspunkt, men oppgis av solcelleprodusenter fordi de er sentrale parametere for karakterisering av en solcelle. Disse verdiene benyttes i beregningen av FF [10]:

$$FF = \frac{J_{MPP} V_{MPP}}{J_{SC} V_{OC}}. \quad (2.2)$$

$J_{MPP}$  og  $V_{MPP}$  representerer strømtettheten og spenningen ved  $P_{max}$ . MPP er maks effektpunktet til solcellen, og er følgelig det optimale driftspunktet. Ettersom  $V_{OC} J_{SC}$  kun er et teoretisk produkt, vil  $J_{MPP} V_{MPP}$  alltid ha en lavere verdi. Av dette følger det at FF aldri kan overskride eller være lik 1, men desto nærmere 1 verdien er, desto bedre er kvaliteten til solcellen.

Fra de nevnte parameterne kan også  $\eta$ , konverteringseffektiviteten til solcellen, bestemmes. Med konverteringseffektivitet menes hvor stor andel av effekten som treffer solcellen gjennom EM-stråling, solcellen klarer å konvertere til elektrisk effekt.  $\eta$  kan beregnes ved bruk av følgende sammenhenger [10]:

$$\eta = \frac{p_{max}}{G_{in}} = \frac{J_{MPP} V_{MPP}}{G_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{G_{in}}. \quad (2.3)$$

$G_{in}$  er definert som irradiansen som treffer solcellen, og måles i W/m<sup>2</sup>, mens  $p_{max}$  representerer maks generert effekt per areal, og måles med samme benevning.

### 2.2.1 Standard testbetingelser

For at parameterne som anvendes for karakterisering av solceller skal gi sammenlignbare resultater, benyttes STC. Disse betingelsene er en irradians på 1000 W/m<sup>2</sup>, et AM1.5 spekter og en celledetemperatur på 25°C [15]. AM står for *air mass*, og beskriver avstanden den elektromagnetiske (EM) strålingen fra solen må bevege seg gjennom atmosfæren i forhold til den korteste avstanden når solen er i senit (AM1) [10]. Intensiteten til den

EM-strålingen fra sola som treffer den ytre delen av jordens atmosfære omtales som solarkonstanten, og har en gjennomsnittlig verdi på omtrent  $1366 \text{ W/m}^2$  [16]. Molekyler og aerosoler i atmosfæren fører til spredning, absorpsjon og refleksjon av EM-stråling. Dette resulterer i at intensiteten og spekteret til solstrålingen endres på vei gjennom atmosfæren. Vanndamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), oksygen ( $\text{O}_2$ ) og karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ) er blant gassmolekylene som resulterer i mest absorpsjon og spredning. Molekylene og aerosoler er ikke uniformt fordelt i atmosfæren, og særlig konsentrasjonen av  $\text{H}_2\text{O}$  varierer stort med både tid og lokasjon [16]. Følgelig er det store endringer og variasjoner i intensiteten og spekteret på solinnstrålingen ved jordoverflaten. Spredning og refleksjon i atmosfæren, samt på grunn av objekter på jordoverflaten, fører til at deler av den EM-strålingen er diffus. Den globale strålingen fra sola består av både denne diffuse strålingen, i tillegg til den EM-strålingen som går upåvirket gjennom atmosfæren. AM1.5 spekteret er definert som den globale solinnstrålingen som mottas på en overflate vendt mot solen, og som er vinklet  $37^\circ$  mot horisontalen [10].

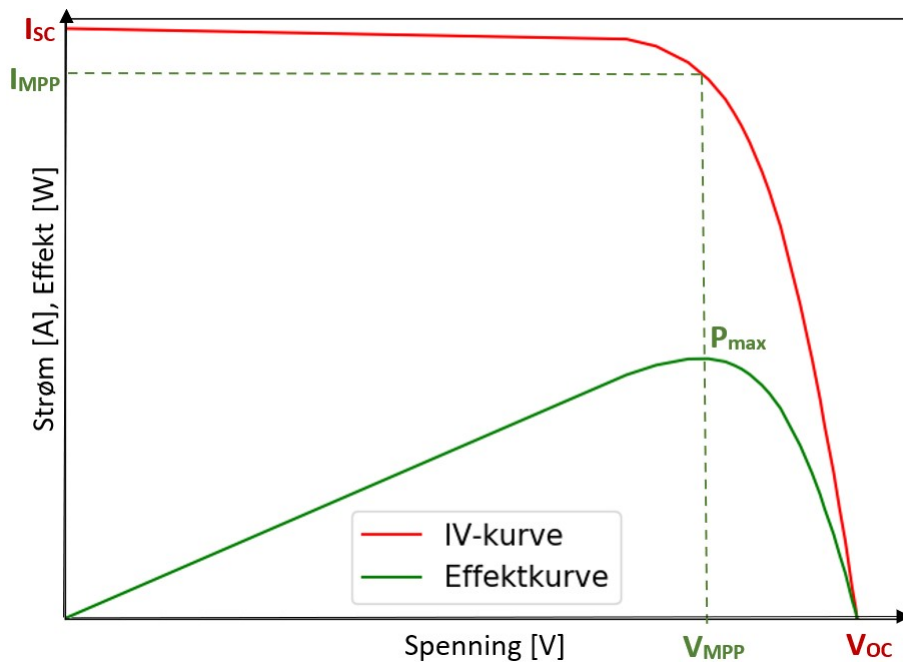
STC er definerte parametere som forekommer svært sjeldent under normale utendørsforhold [15]. Lokale vær og vindforhold vil påvirke både irradians og celletemperatur. Eksempelvis vil skyer føre til redusert solinnstråling som når solcellens overflate, og fuktig luft vil føre til økt absorpsjon og spredning slik at solspekteret endres. At en solcelle skal ha en temperatur på  $25^\circ\text{C}$  er vanskelig å kontrollere, da denne varierer og avhenger av både solinnstråling og omgivelsestemperatur [17]. Fordelen med innendørs målinger ved bruk av en solsimulator er derfor at testforholdene kan tilrettelegges og kontrolleres, slik at STC opprettholdes ved testgjennomføring.

### 2.2.2 Strømspanningskurve

En IV-kurve viser forholdet mellom spenning og strøm i en solcelle, eller solcellemodul, ved bestemte driftsbetingelser (ofte ved STC). Bestemmelsen av IV-kurven gjøres ved bruk av en strømkilde som varierer spenningen over, eller strømmen gjennom modulen. De mest sentrale parameterne som karakteriserer solcellen, eller modulen, kan hentes fra IV-kurven. En typisk slik kurve for en ikke-ideell solcelle vises i figur 2.4. På grunn av sin karakteristiske form, er kurven også effektiv for å oppdage feil ved avvik fra kurvens forventede form [17]. I samme figur vises også effekt-spenningskurven, som beregnes ved følgende sammenheng:

$$P = IV. \tag{2.4}$$

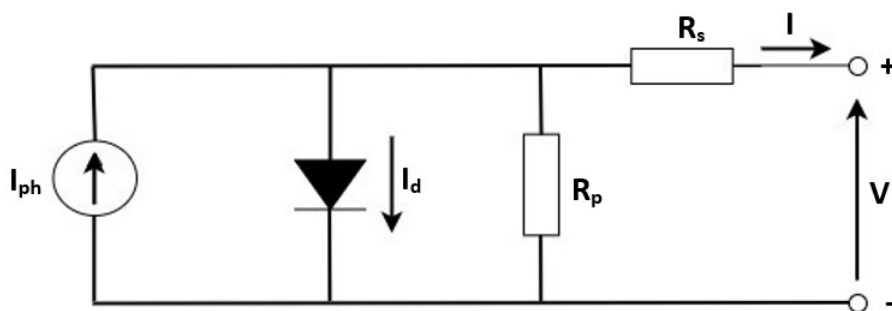
Ved toppunktet til effektkurven,  $P_{max}$ , kan den tilhørende kombinasjonen av strøm ( $I_{MPP}$ ) og spenning ( $V_{MPP}$ ) som resulterer i maksimal effekt, leses av. Slik som figuren viser, holdes strømmen relativt konstant når spenningen stiger fra 0 V, og har verdier rett under  $I_{SC}$ . Følgelig stiger også effekten jevnt med den økende spenningen frem til punktet hvor strømmen begynner å synke, og kjapt blir 0 A. Toppen på effekt-spenningskurven er derfor i vendepunktet på IV-kurven, hvor strømmen enda er høy og spenningen nærmer seg maksimal verdi,  $V_{OC}$ .



Figur 2.4: En Typisk IV-kurve (rød) leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, plottet med tilhørende effekt-spenningskurve (grønn) som leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen. MPP har effektverdien  $P_{max}$  ved spenningen  $V_{MPP}$  og strømmen  $I_{MPP}$ . Når strømmen er 0, altså ved åpen krets (OC), er spenningen på sitt maksimale,  $V_{OC}$ . Strømmen er størst ved kortsluttet (SC) krets, altså når spenningen er lik 0. Da har strømmen verdien  $I_{SC}$ .

### Effekten av endret shunt- og seriemotstand

IV-kurven som vises i figur 2.4 kan beskrives ved bruk av en ekvivalentkrets, hvor solcellen modelleres av en strømkilde i parallell med en diode. En slik presentasjon av en belyst solcelle, omtales som endiodemodellen. I realiteten forekommer det rekombinasjon i pn-overgangen, og ekvivalentkretsen i figur 2.5 inneholder derfor to sentrale komponenter; shunt ( $R_p$ )-, og seriemotstand ( $R_s$ ). Komponentene representerer tap, og dermed også reduksjon i FF og  $\eta$  til solcellemodulen.

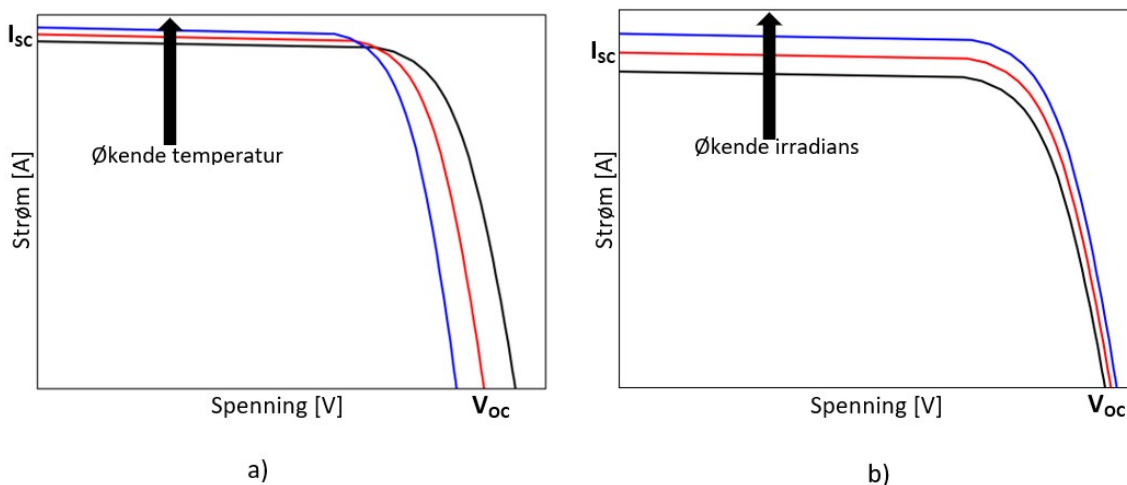


Figur 2.5: Ekvivalentkretsen til en ikke-ideell solcelle. Kretsen består av fire komponenter; en likestrømskilde, en diode, samt en serie ( $R_s$ )- og shuntmotstand ( $R_p$ ).  $I$  er den totale strømmen generert av solcellen,  $I_d$  er strømmen gjennom dioden, mens  $I_{ph}$  er den fotogenererte strømmen.  $V$  representerer spenningen over solcellens terminaler.

En stor shuntmotstand, i tillegg til en liten seriemotstand, er essensielt for at en solcellemodul skal fungere så optimalt som mulig. Forklaringen ligger i ekvivalentkretsen i figur 2.5, hvor det er tydelig at desto større seriemotstanden er, desto større vil effekttapet over den bli. På solcellens IV-kurve vil en økt seriemotstand i hovedsak vises ved at spenningsfallet over motstanden reduserer terminalspenningen,  $V$ . Til tross for dette er  $V_{oc}$  upåvirket av en økning i  $R_s$ , ettersom netto strømflyt gjennom solcellen er null [18].  $R_s$  representerer motstanden til strømmen gjennom solcellemodulen, og inkluderer blant annet resistans i front- og bakkontaktene, i fingre og samleskinner, i tillegg til at serieresistansen kan ha en høy verdi dersom karakteristikken til de individuelle solcellene i en solcellemodul har stor variasjon [19]. Ved å studere kretsen er det også tydelig at shuntmotstanden bør være stor, slik at kun en begrenset mengde av den fotogenererte strømmen velger denne alternative veien. Shuntmotstanden inkluderes i ekvivalentkretsen nettopp for å beskrive eksistensen til alternative veier for strømmen som flyter gjennom dioden [20]. Da disse alternative veiene i stor grad oppstår på grunn av produksjonsfeil, som for eksempel urenheter nær pn-overgangen, benyttes parameteren for å beskrive kvaliteten til solcellen [20]. En redusert shuntmotstand resulterer i en IV-kurve med lavere I-verdier. Dette som en følge av at en større andel av den fotogenererte strømmen velger den alternative veien gjennom  $R_p$ .

### Betydningen av temperatur og irradians

Solcellemodulens driftspunkt er det punktet på IV-kurven som modulen drives i ved en bestemt tid. For best mulig utnyttelse av solenergien, bør modulen til enhver tid driftes i punktet på IV-kurven som resulterer i maks levert effekt,  $P_{max}$  [10]. Til tross for at IV-kurven til en uskadet solcellemodul alltid har en lignende buet form, er verdiene som leses av kurven avhengig av irradians og modultemperatur. Slik figur 2.6 a) viser, fører økt modultemperatur til en liten økning i  $I_{SC}$ , men en enda større reduksjon i  $V_{OC}$ . Produktet



Figur 2.6: Effekten av a) temperatur og b) irradians på en typisk IV-kurve. Figuren er, med tillatelse, tilpasset fra figur 3 og 4 i [21]

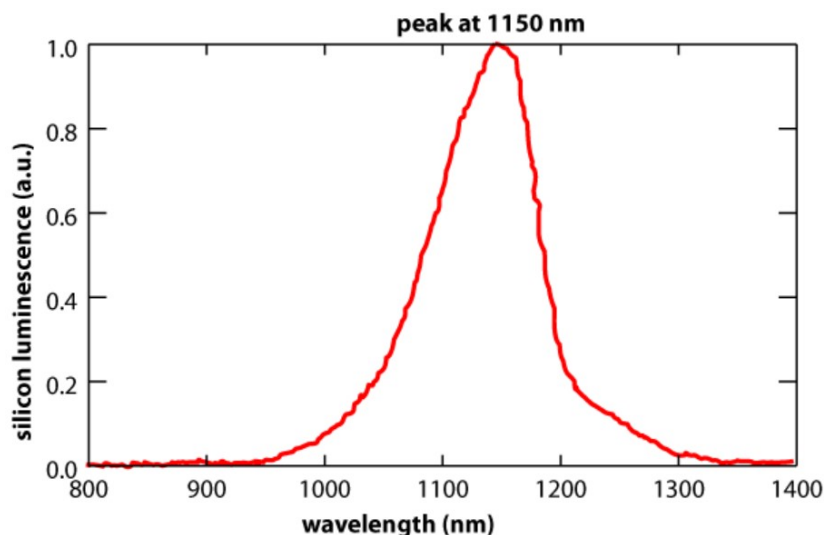
av de to størrelsene blir derfor lavere, og resulterer i følge ligning 2.3 i redusert effektivitet. Årsaken til den lille økningen i  $I_{SC}$  er økt termisk generasjon av frie ladningsbærere ved økt temperatur. Følgelig øker solcellemodulens intrinsiske ladningsbærerkonsentrasjon, noe som forårsaker en kraftig økning i metningsstrømmen,  $I_0$  [22]. Reduksjonen i

$V_{OC}$  kan derfor beskrives ved ligning 2.1. Til tross for at  $V_{OC}$  ser ut til å øke proporsjonalt med modultemperaturen, fører den kraftige økningen i  $I_0$  til at  $V_{OC}$  reduseres ved økt celledtemperatur. Temperaturen til en solcellemodul, eller en solcelle er derfor en av de mest sentrale parametrene som påvirker hvor effektivt den konverterer sollys til elektrisk energi [17].

Ved økt irradians, øker også effekten solcellen produserer. Dette betyr at MPP, og dermed også  $I_{MPP}$  og  $V_{MPP}$ , øker når solinnstrålingen øker. Akkurat hvordan solcellens parametre endres med irradians avhenger av spesifikasjoner fra leverandøren [10]. Uten disse vanskeliggjør det muligheten for å beregne hvordan solcelleparameterne påvirkes ved ulike solinnstrålinger. Likevel kan eksperimentelle data vise hvordan  $V_{OC}$  og  $I_{SC}$  endes med irradiansnivå, og eksempler på slike resultater kan sees i figur 2.6 b).

## 2.3 Elektroluminescens

Når et materiale emitterer EM-stråling etter absorpsjon av energi, omtales det som luminescens [23]. EL er radiativ stråling generert ved rekombinasjon av ladningsbærere tilført gjennom kontaktene til solcellemodulen. Luminescens som oppstår ved tilkobling til en elektrisk effektkilde, omtales derfor som EL. Ettersom c-Si er et indirekte båndgapsmateriale, innebærer det slik som forklart i delkapittel 2.1.5, at det er Auger rekombinasjon og rekombinasjon knyttet til defekter i materialet som er de dominerende rekombinasjonsmekanismene. Mengden bånd til bånd rekombinasjon som forårsaker utsending av et foton er derfor lav. Likevel kan det begrensede radiative signalet på grunn av direkte rekombinasjon i c-Si registreres ved bruk av en detektor [24]. Bølgelengden til de utsendte fotonene bestemmes av båndgapet til halvledermaterialet. For Si fører dette til at luminescenssignalet har en topp på 1150 nm [24], slik som vist i figur 2.7, og korresponderer med båndgapsenergien til Si på 1.12 eV ved romtemperatur.



Figur 2.7: Bølgelengdeområdet en Si-solcelle sender ut et luminescens signal. Kurven har en topp på 1150 nm, og flest utsendte fotoner kommer derfor til å ha denne bølgelengden. x-aksen viser bølgelengden til det utsendte fotonet i nm, mens y-aksen representerer luminescens signalet i a.u (relativ måleenhet), noe som betyr at verdiene er forholdstall. Figuren er hentet med tillatelse fra [24].

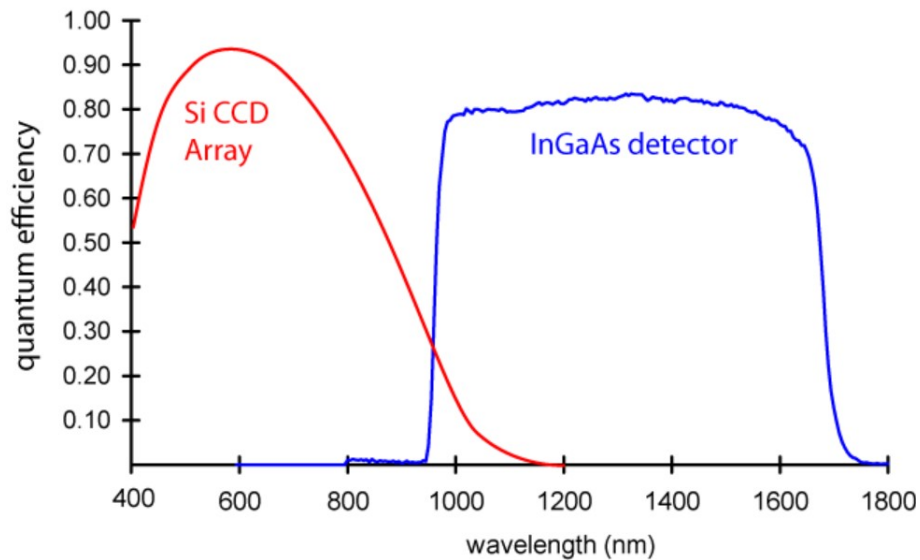
Den beskrevne prosessen som foregår ved utsending av fotoner fra en solcelle ved tilkobling til en elektrisk effektkilde, kan sees på som den motsatte prosessen som foregår i en solcelle når den er under belysning. I det sistnevnte tilfellet er det, som beskrevet tidligere, ønskelig med så lite rekombinasjon som mulig for økt effektivitet. Når solcellen spenningssettes, og eksterne ladningsbærere tilføres, er imidlertid rekombinasjonsprosessen helt sentral. De utsendte fotonene er et resultat av direkte rekombinasjon, og desto flere utsendte fotoner fra et område på solcellen, desto mer effektivt er området på generasjon av ladningsbærere under belysning. Områder med lite eller ingen rekombinasjon, er derimot defekte områder som vil bidra til å redusere solcellens effektivitet under belysning.

### 2.3.1 Avbildning i det kortbølgede infrarøde bølgelengdeområdet

I løpet av levetiden til en solcellemodul vil, i varierende grad, ulike defekter og degraderinger forekomme. Resultatet er en redusert levetid for ladningsbærerne, noe som fører med seg en reduksjon i solcellens virkningsgrad. Til tross for at en IV-kurve og tilhørende parametere, slik som beskrevet i delkapittel 2.2, kan benyttes til å beskrive tilstanden til en solcellemodul, gir den mangelfull informasjon om den eller de ytelsesbegrensende faktorene. Ved å benytte et kamera som detekterer fotoner med bølgelengder innenfor spennet vist i figur 2.7 for å avbilde utsendt EL-signal, kan bildeanalyse benyttes for å detektere ulike defekter og tapsmekanismer. Bølgelengdeområdet presentert i figur 2.7, er en del av SWIR delen av bølgelengdespekteret. Når målet er å avbilde EL-signalet utsendt av Si-solcellemoduler, er en mulig løsning å benytte et SWIR kamera.

Det er helt sentralt at detektoren i det benyttede SWIR kameraet er sensitivt for det nevnte bølgelengdeområdet for Si. En slik fotondetektor som, grunnet sin lave kostnad, er blitt mye benyttet for lignende applikasjoner er Si *Charge Coupled Device* (CCD). Figur 2.8 viser kvanteeffektiviteten til en slik detektor for varierende bølgelengder. Ved sammenligning med figur 2.7 er det tydelig at det er mulig å benytte en Si CCD til å detektere EL-signalet fra en Si-solcellemodul. Kvanteeffektivitet kan i dette tilfellet sees på som hvor effektivt detektoren fanger opp de innkommende fotonene [23]. Figur 2.8 inkluderer også sensitiviteten til en InGaAs detektor. De utsendte fotonene fra en Si-solcellemodul er sentrert mellom 1000-1300 nm. Til tross for at en Si CCD vil detektere en viss andel av de utsendte fotonene innen dette spennet, viser figur 2.8 tydelig at en InGaAs detektor vil fange opp langt flere av de utsendte fotonene. InGaAs detektorer er derfor et svært godt alternativ til en Si CCD. Forklaringen bak dette ligger i materialene benyttet i selve detektoren. En Si CCD begrenses av båndgapet til Si, og forhindrer muligheten til å ha en god sensitivitet over 1100 nm [25]. InGaAs derimot, med et mindre båndgap, kan mer effektivt detektere fotoner med energi tilsvarende SWIR bølgelengdeområdet [25]. Båndgapet til InGaAs kan kontrolleres, da mengden av de ulike materialene er avgjørende.





Figur 2.8: Kvanteeffektiviteten til en InGaAs detektor (blå) og en Si CCD detektor (rød) ved varierende bølgelengder. x-aksen viser bølgelengde i nm, mens y-aksen representerer kvanteeffektiviteten til den gjeldende detektoren. Figuren er hentet med tillatelse fra [24].

En InGaAs detektor består i hovedsak av en *Focal Plane Array* (FPA), som inneholder både det absorberende InGaAs laget, i tillegg til en "hette" av InP. Hetten forhindrer at fotoner med lavere bølgelengder enn 920 nm når absorpsjonslaget [26]. Det er viktig å merke seg at for en slik FPA InGaAs detektor vil det lave båndgapet også føre med seg en større mørkestrøm [25], altså termisk generert strøm. Derfor er det helt nødvendig at slike InGaAs SWIR kameraer inneholder muligheten til kraftig nedkjøling av detektoren for støyreduksjon i resultatbildet.

## Kapittel 3

# Eksperimentelt arbeid og prosedyre for gjennomføring

Det eksperimentelle arbeidet har i sin helhet blitt gjennomført på Søråsjordet, lokalisert nær NMBU, campus Ås. I hovedsak har to eksperimenter blitt gjennomført gjentatte ganger, med et mål om å undersøke i hvilken grad en spesifikk skade påvirker modulens karakteristikk, og en eventuell ytelsesutvikling som følge av skadepåføringen. De to hovedeksperimentene, inklusiv prosedyre og dato for gjennomføring, nødvendige instrumenter, i tillegg til metode for dataanalyse, vil bli presentert i det påfølgende kapitlet.

Det gjennomførte eksperimentelle arbeidet er utført på fire mc-Si solcellemoduler, heretter omtalt som Multi1, Multi2, Multi3 og Multi4. Monteringen av de fire modulene kan sees i figur 3.1, og er lokalisert på Søråsjordet. Modulene er montert med  $42^\circ$  elevasjon og  $2^\circ$  mot vest, i forhold til rett sør, for optimal energiproduksjon. De benyttede solcellemodulene er produsert av Swemodul, med et areal på  $1.46 \text{ m}^2$ , og spesifikasjonene under STC er angitt i tabell 3.1.

*Tabell 3.1:* Spesifikasjoner ved STC for de benyttede solcellemodulene levert av Swemodul. Informasjon er hentet fra modulenes installasjonsmanual [27].

Modulspesifikasjon	Verdi
$P_{max}$ [W]	250
$V_{MPP}$ [V]	30.3
$I_{MPP}$ [A]	8.20
$V_{OC}$ [V]	37.7
$I_{SC}$ [A]	8.80
$\eta$ [%]	17.1
FF	0.75

Masteroppgaven er knyttet til større forskningsprosjekter ved NMBU, og deler av datainnsamlingen er derfor gjennomført av ansatte på universitetet før tiden satt av til oppgaven. Det benyttes data samlet inn 06.11.20 og 26.11.20 av Ingeborg Høiaas, ansatt ved Fakultet for realfag og teknologi. Høiaas har godkjent bruken av både EL-bilder og IV-kurvemålinger gjennomført høsten 2020, da dette er et helt essensielt sammenligningsgrunnlag for arbeidet som gjennomføres i denne masteroppgaven. Tabell 3.2 inneholder



*Figur 3.1:* Oversiktsbilde over monteringen av de fire mc-Si solcellemodulene produsert av Swemodul som benyttes i oppgaven. Modulene er navngitt, Multi1, Multi2, Multi3 og Multi4 etter plassering. Oppsettet viser Multi4 etter den er påført synlige skader.

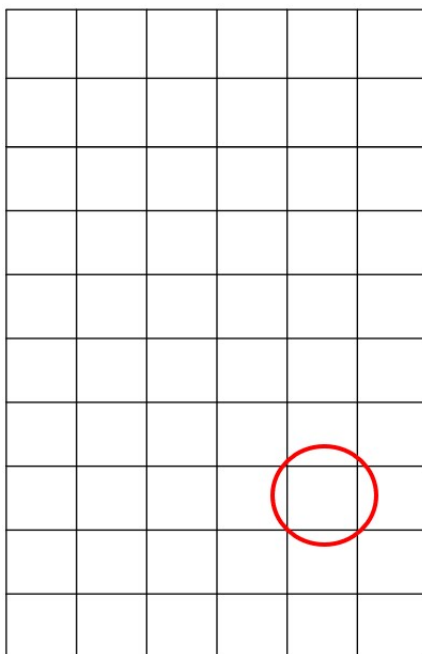
en oversikt over alt utført eksperimentelt arbeid, samt dato for gjennomføring. Dato er inkludert ettersom tiden mellom hver måling er sentral for en eventuell skadeutvikling.

*Tabell 3.2:* Oversikt over gjennomført eksperimentelt arbeid. Med mindre annet spesifiseres, gjelder beskrivelsen alle fire solcellemoduler.

Dato	Eksperimentelt arbeid
06.11.20	- IV-kurvemåling - EL avbildning
26.11.20	- Skadepåføring Multi4 - Første skadepåføring Multi3 - IV-kurvemåling - EL avbildning
05.02.21	- IV-kurvemåling - EL avbildning
09.03.21	- IV-kurvemåling
16.03.21	- EL avbildning - Andre skadepåføring Multi3 - Gjentatt EL avbildning Multi3
15.04.21	- IV-kurvemåling - EL avbildning

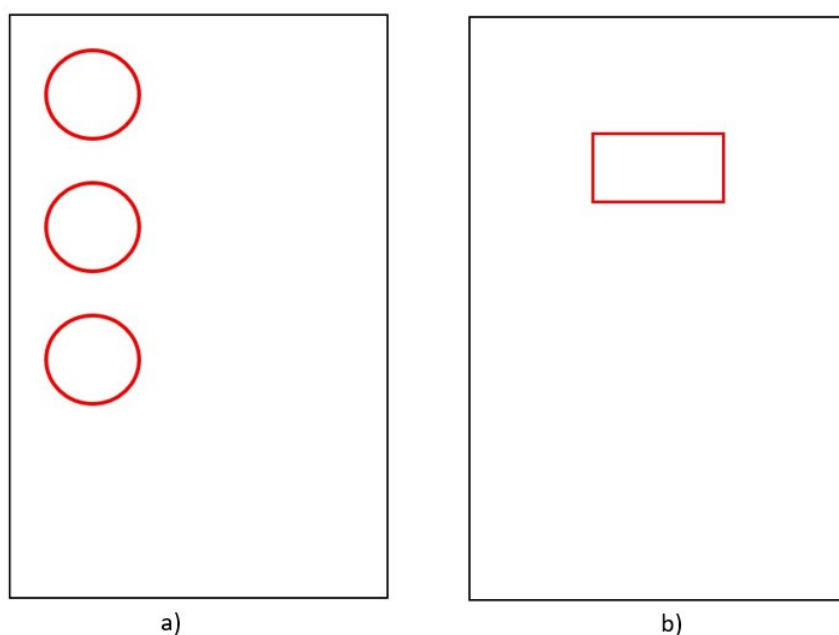
### 3.1 Skadepåføring

Den 26.11.20 ble to av de fire fastmonterte modulene påført ulike skader med intensjon om å benytte disse i videre forskningsarbeid ved NMBU, blant annet i denne masteroppgaven. En hammer i hardplast ble anvendt til å påføre store skader på Multi4. Gjentatte harde slag, lokalisert på cellen vist i figur 3.2, ble gjennomført på forsiden av modulen. Skaden er ment å representere påvirkning på en solcellemodul dersom et eller flere større objekter har truffet modulen. Slike hendelser kan eksempelvis forekomme i tilfeller hvor solcellemodulen er utsatt for menneskelige uhell ved at objekter mistes eller kastes, eller i ekstreme tilfeller hvor vær og vind kan føre til at objekter treffer modulen med høy hastighet.



*Figur 3.2:* Den røde ringen markerer cellen som mottok gjentatte harde slag under påføringen av skade på Multi4 den 26.11.20.

Med hensikt om å påføre skade med en mulig annen påvirkning på solcellemodulens karakteristikk enn skaden påført Multi4, ble plasthammeren også benyttet på Multi3 den 26.11.20. De tre markerte områdene i figur 3.3 a) ble utsatt for flere svakere slag på modulens bakside. I tillegg, den 16.03.21, har baksiden av den samme modulen blitt påført flere moderate slag. De to cellene påført slagene er markert i figur 3.3 b). Solcellemoduler kan være utsatt for lignende forhold ved eksempelvis hardhendt behandling av modulene under frakt og installasjon. I tilfeller hvor modulen ikke er bygningsintegrert, er baksiden, i likhet med fremsiden, utsatt for ytre mekanisk påvirkning etter installasjon.

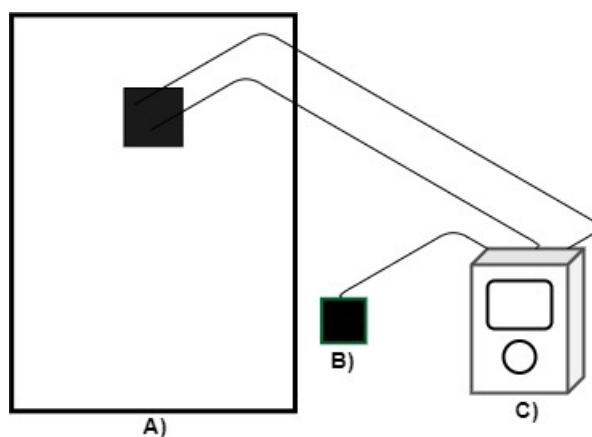


Figur 3.3: a) Områdene markert av de røde ringene representerer hvilke deler av baksiden av solcellemodul Multi3 som mottok svake slag under påføring av skade den 26.11.20. b) Den røde firkanten viser de to cellene som ble skadet under skadepåføring på baksiden av Multi3 den 16.03.21. Cellene ble utsatt for gjentatte moderate slag, med varierende plassering innenfor det markerte området.

## 3.2 Hovedeksperiment 1: Karakterisering av solcellemoduler

Karakterisering av de fire solcellemodulene gjøres ved gjennomføring av IV-kurvemålinger på samtlige moduler, i tillegg til videre beregninger av målingens resultater.

### 3.2.1 Nødvendige instrumenter og oppsett



Figur 3.4: Eksperimentelt oppsett for IV-kurvemåling, sett fra modulens bakside. Oppsettet består av A) solcellemodul med koblingsboks på baksiden av modulen, og B) referansecelle for irradiansmåling, begge tilkoblet C) et måleapparat for IV-kurvemåling.

Ved den praktiske gjennomføringen av hovedeksperiment 1 benyttes samme oppsett ved alle datoer for gjennomføring, og vises i figur 3.4.

#### Måleapparat for IV-kurve

For gjennomføring av individuelle IV-kurvemålinger på de fire solcellemodulene, er et måleapparat levert av HT Instruments, IV-400w, blitt benyttet. Ettersom STC er vanskelig å oppnå ved utendørsforhold, representerer resultatene fra gjennomføringen av en slik måling, karakterisering av solcellemodulen ved de faktiske driftsforholdene (OPC) på tidspunktet for gjennomføring. I tillegg til at instrumentet lagrer disse verdiene, transformeres de automatisk til STC, slik at målinger som utføres under ulike OPC, allikevel kan sammenlignes. Denne transformasjonen fra OPC til STC innebærer en korrigerings for temperatur- og irradiansavvik. HT Instruments oppgir at denne korrigeringen gjøres i henhold til prosedyre 2, beskrevet i *IEC 60891:2009 Photovoltaic devices—Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics* (IEC-60891) [28]. I henhold til standarden, korrigerer instrumentet målte strøm- og spenningsverdier for alle datapunkter ved bruk av de to følgende semi-empiriske ligningene:

$$I_2 = I_1 \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (3.1)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left( \beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R'_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1). \quad (3.2)$$

$I_1$  og  $V_1$  representerer koordinater fra punkter på den målte IV-kurven, mens  $I_2$  og  $V_2$  er koordinater fra punkter på den korrigerede IV-kurven.  $G_1$  er irradiansen på tidspunktet målingen ble gjennomført, og måles ved bruk av en referansecelle.  $G_2$  er irradiansen for den korrigerede IV-karakteristikken, altså irradians ved STC.  $T_1$  og  $T_2$  er henholdsvis den målte driftstemperaturen til modulen og modultemperaturen for den korrigerede karakteristikken, altså modultemperatur ved STC. Videre er  $V_{OC1}$  definert som modulens åpenkrets spenning ved  $G_1$  og  $T_1$ . Ligning 3.1 og 3.2 inneholder i tillegg 5 IV-korrigeringsparametere,  $\alpha_{rel}$ ,  $\beta_{rel}$ ,  $a$ ,  $R'_S$  og  $\kappa'$ , som kan bestemmes ut ifra IV-kurvemålinger gjennomført ved ulike temperatur- og irradiansforhold. I IEC-60891 standarden er  $\alpha_{rel}$  og  $\beta_{rel}$  definert som relative temperaturkoeffisienter for strømmen og spenningen til modulen målt ved 1000 W/m<sup>2</sup>, og er relatert til  $I_{SC}$  og  $V_{OC}$  ved STC.  $a$  er en korreksjonsfaktor for påvirkningen irradiansnivå har på  $V_{OC}$ .  $R'_S$  er modulens interne serieresistans, mens den siste av de 5 korrigeringsparametere,  $\kappa'$ , er en temperaturkoeffisient for  $R'_S$ , og tar hensyn til endringer i modulens indre serieresistans ved temperaturendring.

Brukermanualen fra HT Instruments beskriver flere ulike innstillinger for å måle, eller bestemme modultemperaturen, men anbefaler at innstillingen settes til at apparatet automatisk bestemmer temperaturen. Bestemmelsen gjøres da på bakgrunn av den målte åpenkrets spenningen til solcellemodulen.

Måleapparatet inkluderer også en *solskive* som benyttes for å måle vinkelen mellom solinnstrålingen og overflaten til solcellemodulen. Dersom solskiven viser en for stor vinkel, stemmer den ikke overens med testbetingelsene, og IV-kurvemålingen bør gjentas ved et annet tidspunkt.

### Referansecelle for irradiansmåling

Irradiansmåleren HT304N, levert av HT Instruments, er blitt benyttet for globale irradiansmålinger gjennom hele hovedeksperiment 1. Instrumentet består av to ulike referanseceller, mc-Si og monokrystallinsk-Si. Dette slik at den varierende spektrale sensitiviteten for de to nevnte krystallstrukturene for silisium kan simuleres avhengig av solcellemodulen som skal karakteriseres. HT instruments oppgir at to referanseceller er nødvendig ettersom *IEC 61829 Photovoltaic (PV) array—On-site measurement of current-voltage characteristics* setter som krav at den spektrale sensitiviteten til solcellemodulen som testes er den samme som for den benyttede referansecellen. Apparatet kan benyttes til irradiansmålinger innen et spenn på 50-1400 W/m<sup>2</sup>, med en usikkerhet på  $\pm 3.0\%$ .

### 3.2.2 Prosedyre for måling av IV-karakteristikk

Målingene gjennomføres på en solrik og skyfri dag, slik at irradiansen er så nær uniformt fordelt på solcellemodulen som mulig ved utendørsforhold. I henhold til den internasjonale standarden for målinger av IV-karakteristikk for solceller, beskrevet i *The International Electrotechnical Commission 60904-1:2020 Photovoltaic devices –Part 1: Measurements of photovoltaic current-voltage characteristics* (IEC-60904-1) [29], skal irradiansen være mellom 800 og 1200 W/m<sup>2</sup> når hensikten er å rapportere målinger ved STC. For målinger gjennomført ved irradiansverdier i det spesifiserte spennet er det mulig å minimere usikkerheter knyttet til korrigeringer for irradiansavvik. Da det eksperimentelle arbeidet i stor grad er gjennomført på vinterhalvåret er det ikke mulig å gjennomføre alle IV-kurvemålinger med irradiansverdier innenfor spennet definert i IEC-60904-4. Ettersom formålet med oppgaven er å undersøke en eventuell skadeutvikling, gjennomføres målingen uavhengig av om irradiansen er innenfor spennet eller ikke.

Referansecellen for irradiansmåling plasseres slik at vinkelen mellom solinnstrålingen og referansecellen, er den samme som vinkelen mellom solinnstrålingen og de fire solcellemodulene. Ifølge IEC-60904-1 skal en temperatursensor plasseres på en slik måte at den på best mulig vis kan representere modulens temperatur. Som et resultat av at modulen er sammensatt av 60 individuelle celler, skal plasseringen gjøres med kjennskap til at modultemperaturen kan være ikke-uniform. I de gjennomførte eksperimentene hvor måleapparatet for IV-kurve benyttes, tas ikke temperatursensorer i bruk. Årsaken er at måleapparatets anbefalte innstilling er at modultemperaturen settes av instrumentet avhengig av den målte  $V_{OC}$ -verdien for modulen.

Måleapparatet for IV-kurve sammenkobles med den multikrystallinske referansecellen for irradiansmåling, i tillegg til de elektriske kontaktene til den gjeldende modulen. Apparatet stilles inn på at målingene skal gjennomføres på en mc-Si solcellemodul med spesifikasjoner slik som angitt i tabell 3.1. For enhver dato for gjennomføring av IV-karakteristikk målinger skal prosedyren gjennomføres fire ganger, en per modul. Referansecellen for irradiansmåling har samme plasseringen i de fire gjennomførte målingene, mens prosedyren for tilkobling av modulens elektriske kontakter endres slik at verdiene gjelder for modulen som ønskes karakterisert.

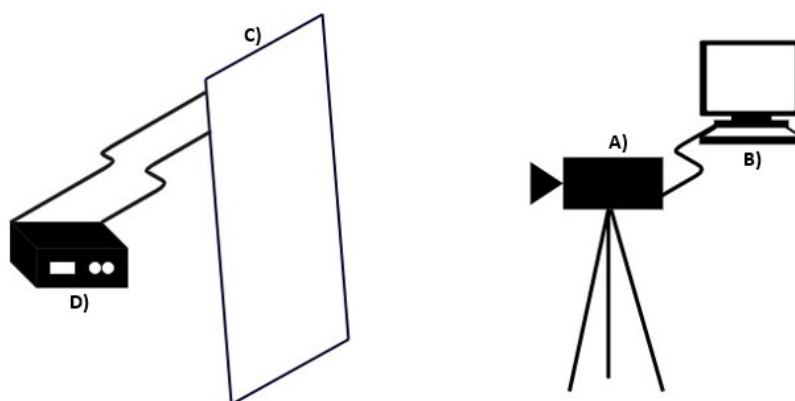
#### 3.2.3 Analyse av IV-kurvemålinger

For analyse av målt data anvendes programmet TOPVIEW, tilhørende det benyttede IV-kurve apparatet. Programmet tillater kun brukeren å plote IV-kurver målt ved samme dato, og resultatene begrenses derfor av dette. Det er imidlertid mulig å plote nominell IV-kurve, IV-kurve under OPC og IV-kurve korrigert til STC i et og samme plott. For å kunne sammenligne de målte, samt de korrigerede verdiene med nominelle verdier oppgitt av leverandør, blir denne funksjonen benyttet til å presentere IV-kurver. Multi1 er en av de to uskadede modulene, og benyttes som referansem modul. Dersom det, enten ved visuell inspeksjon, eller ved bruk av målte og korrigerede verdier for karakteriseringsparametere, oppdages større avvik fra spesifikasjoner gitt av Swemodul, plottes den gjeldene solcellemodulen sammen med Multi1. Dette vil, for Multi3 og Multi4, synliggjøre eventuelle endringer i kurvens form etter skadepåføring.

### 3.3 Hovedeksperiment 2: Elektroluminescensavbildning av solcellemoduler

#### 3.3.1 Nødvendige instrumenter og oppsett

Oppsettet benyttet for EL avbildning av en solcellemodul, vises i figur 3.5.



Figur 3.5: Eksperimentelt oppsett for EL avbildning, sett fra modulens fremside. Oppsettet består av A) kamera, tilkoblet B) en bærebær datamaskin, samt C) en solcellemodul koblet til D) en justerbar strømforsyning.

#### Kamera

Kameraet benyttet for EL avbildning i hovedeksperiment 2 er et Xeva FPA kamera, levert av Xenics Infrared Solutions. SWIR kameraet er utstyrt med en InGaAs detektor med en spektral rekkevidde på 900-1700 nm, og med en oppløsning på  $320 \times 256$  piksler per bilde.

#### 3.3.2 Prosedyre for EL avbildning

Det utsendte EL-signalet fra en solcellemodul er svært lavt sammenlignet med solstråling [19]. For å redusere bakgrunnsstøy må EL avbildningen derfor finne sted i mørket, og helst uten andre lyskilder i det nærliggende området. Strømforsyningen tilkobles slik at



modulen forspennes i lederretning. Ved å stille den påsatte spenningen fra kilden til  $V_{OC}$ , vil strømmen justeres til en jevn, lav verdi. Den 16.03.21 og 15.04.21 ble bilder også tatt ved å stille inn påsatt strøm til omtrent  $I_{sc}$ ,  $0,5I_{sc}$ , og  $0,1I_{sc}$ , og la spenningen justere seg etter dette. Målet med de ekstra bildeseriene er å undersøke om en høyere påsatt strøm vil gi et tydeligere resultatbilde med større kontraster.

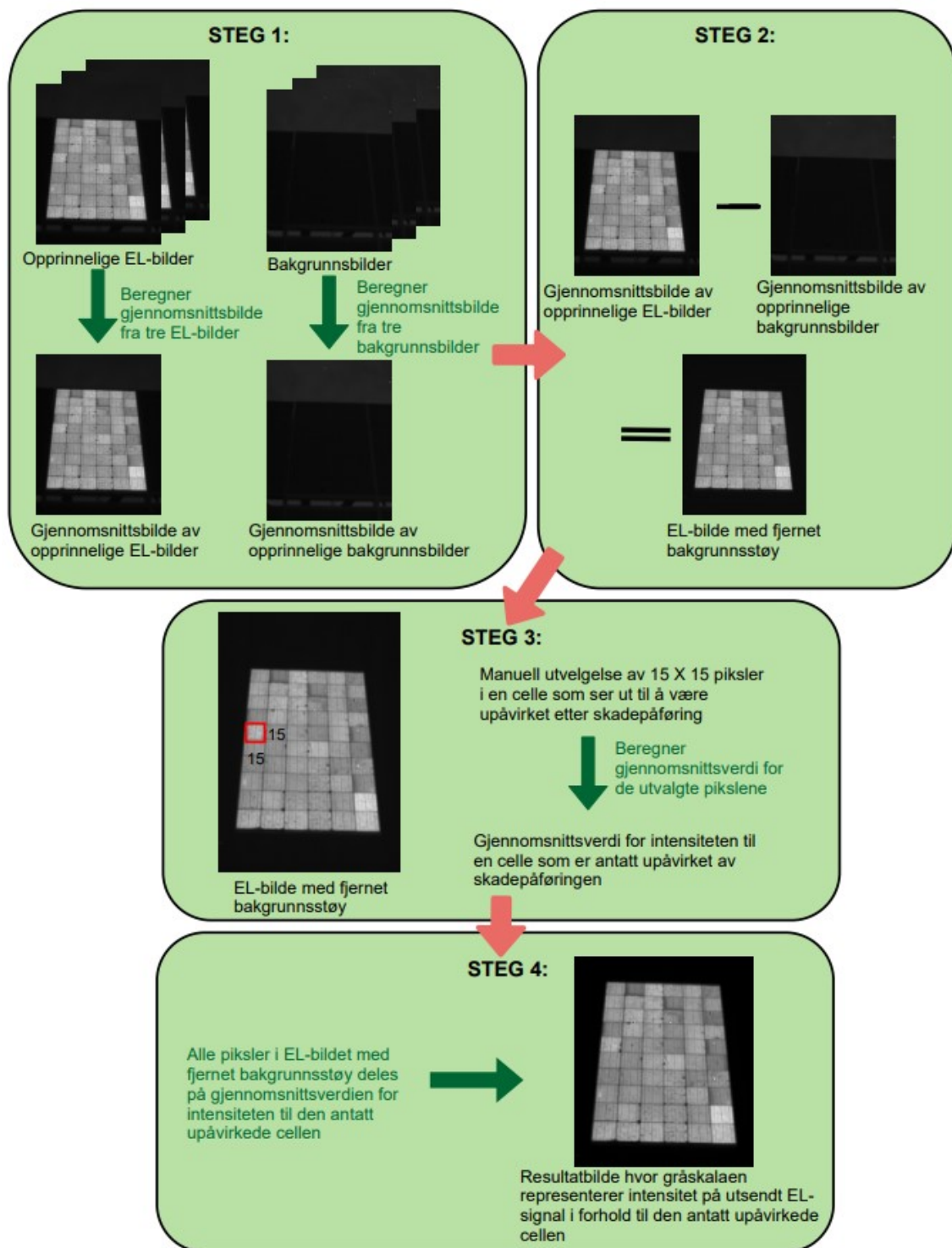
Det benyttede Xeva FPA kameraet montert på kamerastativet, kobles til den tilhørende PCen med installert programvare. Programvaren benyttes til å justere antallet bilder som tas per modul, i tillegg til integrasjonstiden. Alle EL-bilder tas med en integrasjonstid på 100 ms. Etter avbildning, kobles strømforsyningen fra, og den samme modulen avbildes med et uendret antall bilder slik som ved tilkoblet strømkilde. Den sistnevnte bildeserien er bakgrunnsbilder, og er nødvendige for å fjerne andre signaler enn selve EL-signalet som også er blitt detektert med Xeva FPA kameraet. Per bildeserie, av både EL- og bakgrunnsbilder, tas det tre bilder. Prosedyren gjøres for hver individuelle solcellemodul.

#### 3.3.3 Bildeanalyse

Programmeringsspråket Python er blitt benyttet for analyse av bildene tatt med SWIR kameraet. Figur 3.6 presenterer de fire stegene i den benyttede algoritmen for bildeanalyse. Målet med analysen er å fjerne eventuelt bakgrunnsstøy, i tillegg til at resultatbildet skal vise intensiteten på det utsendte EL-signalet, i forhold til det utsendte signalet fra en bestemt celle i solcellemodulen som er antatt upåvirket. Resultatbildet vil derfor gi informasjon om hvor godt et område på solcellemodulen fungerer i forhold til en av modulens celler som ikke ser ut til å være påvirket av den påførte skaden. Den benyttede metoden for normalisering fører til at påsatt strøm, som blant annet reduseres med redusert utetemperatur, ikke i stor grad påvirker intensiteten i de presenterte EL-bildene. Selve utvelgelsen av den upåvirkede cellen, ble gjort manuelt ved å sammenlikne EL-bildene av samme modul tatt på de ulike datoene. Referansecellen beskrives følgelig som antatt upåvirket, da utvelgelsen ikke ble gjennomført ved bruk av programvare, og derfor kan inneholde menneskelige feil. Den anvendte Pythonkoden er inkludert i Tillegg A.

For Multi3 den 16.03.21 ble serier med EL-bilder tatt både før og etter andre skadepåføring. Kameraets posisjon ble ikke endret i mellomtiden, og gjør det mulig å trekke resultatbildene fra hverandre. En slik analyse inkluderer steg 1-4, slik de beskrives i figur 3.6, før EL-bildet for Multi3 etter skadepåføring trekkes fra EL-bildet for Multi3 før skadepåføring.

### 3.3. HOVEDEKSPERIMENT 2: ELEKTROLUMINESCENSABILDNING AV SOLCELLEMODULER



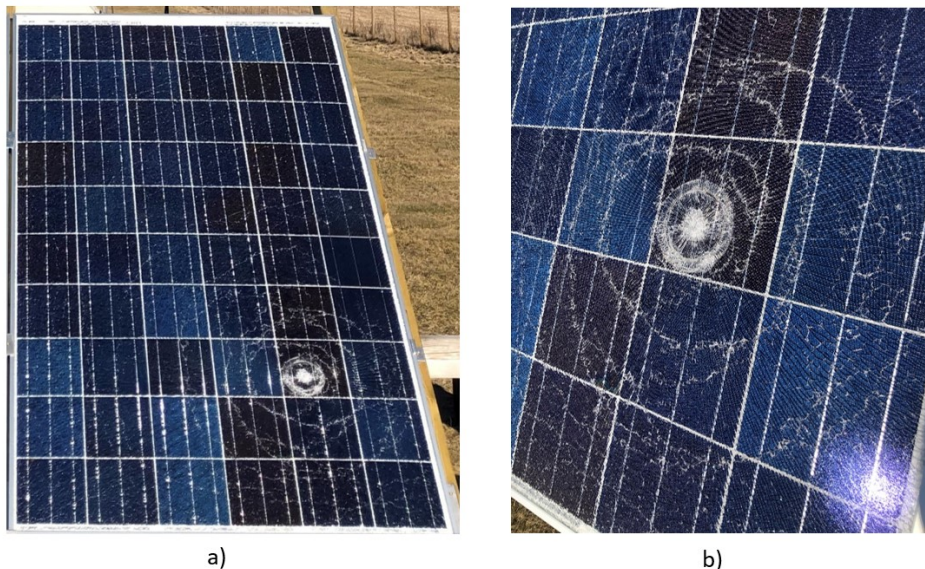
Figur 3.6: Fire steg som beskriver algoritmen benyttet for bildebehandling av bildeserier tatt med SWIR kamera Xeva FPA.

## Kapittel 4

# Resultater og diskusjon

Kapitlet tar for seg resultater for hver enkelt modul separat, og inkluderer en sammenligning mellom funn fra de to hovedeksperimentene og resultater fra tidligere gjennomført forskning. Hensikten med sammenligningen er å tydeliggjøre hvordan de to metodene sammen evner å vise effekten av de påførte skadene over tid. Avslutningsvis redegjøres det for utfordringer ved metoden benyttet for korrigering av karakteriseringsparametere til STC, samt knyttet til diskontinuitet i prosedyren for EL avbildning.

Skadepåføringen på Multi4 resulterte i skader som er synlige ved visuell inspeksjon. Ved å studere figur 4.1 a) er det tydelig at modulens frontglass har knust, og etterlatt seg et ujevnt mønster i glasset. Figur 4.1 b) er et nærbilde av området som mottok de harde slagene, og tydeliggjør hvor belastningen på modulen var størst. Lignende bilder for Multi3 er ikke inkludert, da de to gjennomførte skadepåføringene på modulens bakside ikke har resultert i endringer som er synlig for det menneskelige øyet.

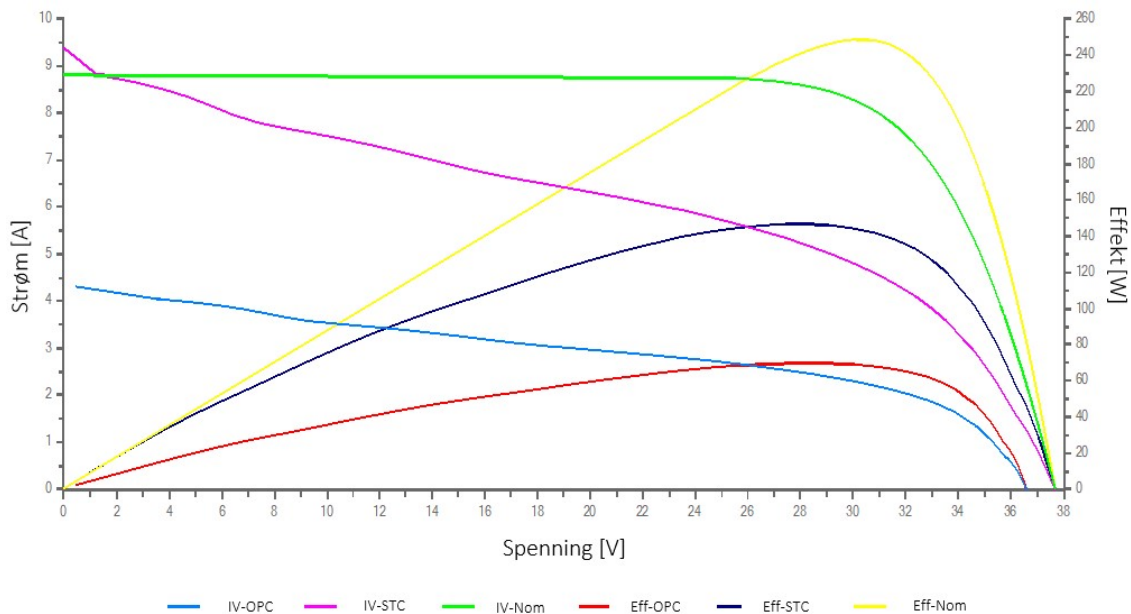


*Figur 4.1:* a) Multi4 etter skadepåføring på modulens fremside. b) Nærbilde av området som mottok de harde slagene.

## 4.1 Multi4

### 4.1.1 Skadeutvikling

Skadepåføring av Multi4 har resultert i store endringer i modulens IV-kurve. Figur 4.2 viser hvor drastisk den påførte skaden påvirker IV-kurvens form dagen skaden ble påført. Nominelle IV- og effektkurver er inkludert i figuren for sammenligning, slik at kurver ved STC og OPC kan sees i sammenheng med ønsket kurveform. Tabell 4.1 oppsummerer sentrale parametere hentet fra, eller beregnet ut ifra solcellemodulens IV-kurve. Korrigerte verdier i tabellen viser store endringer i forhold til parameterne spesifisert av leverandøren ved STC. Eksempelvis en reduksjon av  $P_{max}$  fra 250 W til 146.3 W, og en FF lik 0.43. IV-kurven korrigert til STC har en svakere stigning fra  $V_{oc}$  til  $V_{MPP}$  enn nominell IV-kurve, noe som tyder på en økt seriemotstand. Med dette medfølger en reduksjon i modulens effektproduksjon. Kurven er også kraftig endret i form fra  $V_{MPP}$  til  $I_{sc}$  ( $V=0$ ), og antyder en redusert shuntmotstand. Figur 2.5 viser hvordan en redusert shuntmotstand resulterer i effekttap ved at en større andel av den fotogenererte strømmen velger den alternative veien gjennom en redusert  $R_p$ .



Figur 4.2: IV- og effekt(Eff)kurver for Multi4 den 26.11.20. Inkludert i figuren er IV- og effektkurver ved OPC, IV- og effektkurver etter korrigering til STC, samt nominelle IV- og effektkurver. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på  $459.8 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $20.49 \text{ }^\circ\text{C}$ . IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

#### 4.1. MULTI4

---

Tabell 4.1: Karakteriseringsparametere for Multi4 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 26.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på 459.8 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 20.49 °C.

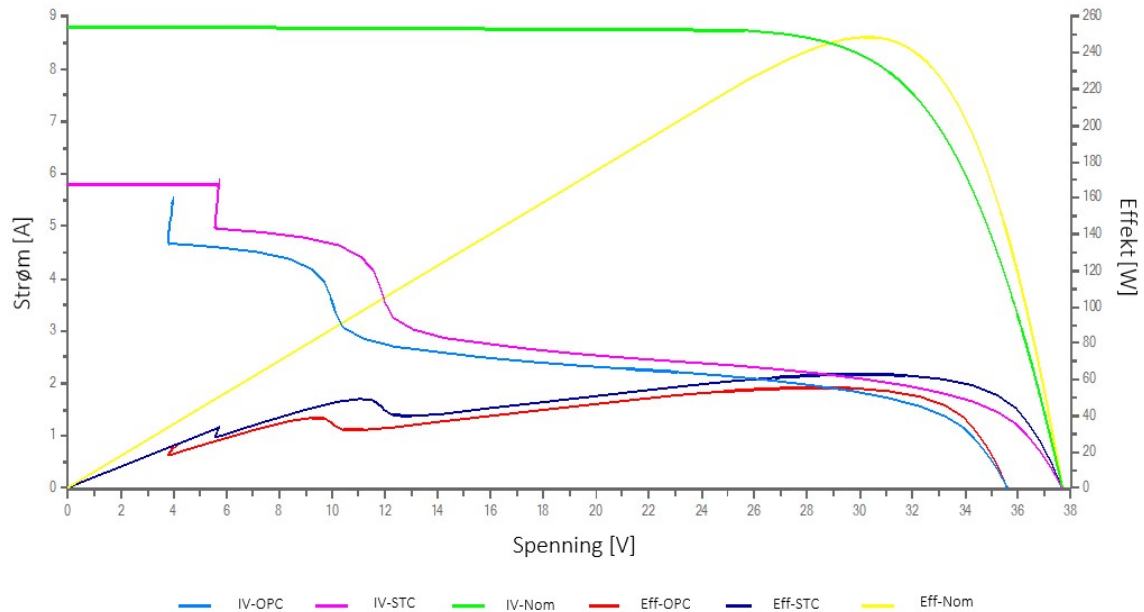
	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	69.49	146.30
$V_{MPP}$ [V]	28.44	27.46
$I_{MPP}$ [A]	2.44	5.33
$V_{OC}$ [V]	36.62	37.72
$I_{SC}$ [A]	4.30	8.92
$\eta$ [%]	10.35	10.02
FF	0.44	0.43

Den lyseblå kurven i figur 4.2 viser betydningen av irradians slik den beskrives i delkappittel 2.2.2. Som forventet, resulterer den lave irradiansen på 459 W/m<sup>2</sup> i redusert  $I_{sc}$ , og en liten reduksjon i  $V_{oc}$ . Modultemperaturen beregnet for Multi4 under gjennomføring av IV-kurvemålingen var 20.49 °C, altså kun noen grader lavere enn ved STC. En lavere modultemperatur vil i liten grad redusere  $I_{sc}$ . Dette vil samtidig resultere i en større økning i modulens  $V_{oc}$ , slik at lav modultemperatur isolert sett alltid vil ha en positiv effekt på modulens totale effektproduksjon. Likevel er dette et klart eksempel på at lav modultemperatur ofte er en følge av lav irradians, og følgelig en redusert effektproduksjon. Den røde effektkurven ved OPC er preget av dette, og har samtidig kraftig endret form i forhold til den gule, nominelle effektkurven. Ettersom STC er definerte parametere som sjeldent forekommer under normale utendørsforhold, er det sentralt å studere Multi4 under faktiske OPC. Tabell 4.1 inkluderer derfor modulens målte og beregnede parametere under OPC den 26.11.20. At  $P_{max}$  for Multi4 er funnet til å være 146.30 W ved STC er sentralt med tanke på sammenligning med modulens utgangspunkt, og ikke minst utvikling. Derimot at  $P_{max}$  er målt til 69.49 W ved de gitte OPC, er viktig å bemerke seg da dette er modulens faktisk maksimale effektproduksjon ved forholdene den opererer under. IV-kurvemålingen gjennomført den 26.11.20 er ikke gjort i henhold til IEC-60904-1, da irradiansen er utenfor det definerte spennet. Følgelig er det usikkerhet tilknyttet om de korrigerte IV- og effektkurvene er en god representasjon av modulens faktiske ytelse ved STC.

Resultater fra hovedeksperiment 1 den 15.04.21 presenteres i figur 4.3 og tabell 4.2, da de er helt sentrale med tanke på en eventuell utvikling av den påførte skaden i løpet av tidsperioden. Denne dagen ble IV-kurvemålingene gjennomført på en ikke-skyfri dag. Enkelte av målingene som ble forsøkt gjennomført ble derfor avbrutt av IV-kurve måleren grunnet for store irradiansvariasjoner, og ble gjennomført på nytt på et tidspunkt uten forstyrrelser. Til tross for dette kan formen på kurvene i figur 4.3 tyde på irradiansforstyrrelser under gjennomføringen. Samtidig viser en lignende studie gjennomført av *B. L. Aarseth og E. S. Marstein* [30] at slike store steg i IV-kurven kan skyldes sprekker. Det største "hoppet" på den målte IV-kurven, kan derfor være en følge av en nylig oppstått sprekk, eller en sprekk som isolerer et større område enn tidligere. Artikkelen viser også til en IV-kurve med et lignende, mindre, steg i IV-kurven, som kobles til en varm celle. Det er utenfor omfanget av oppgaven å undersøke termografi, og det kan ikke konkluderes med om dette er tilfellet for Multi4 eller ikke. Likevel presiserer artikkelen *Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review* [8]

#### 4.1. MULTI4

at i tillegg til å oppføre seg som rekombinasjonssentre under belysning, kan termografiske studier koble sprekker til en økt temperatur i nærliggende celleområder. Muligheten for at deler av modulens reduserte ytelse skyldes varme celler, utelukkes følgelig ikke dersom EL-bilder viser sprekkdannelser i silisiummaterialet i modulen.



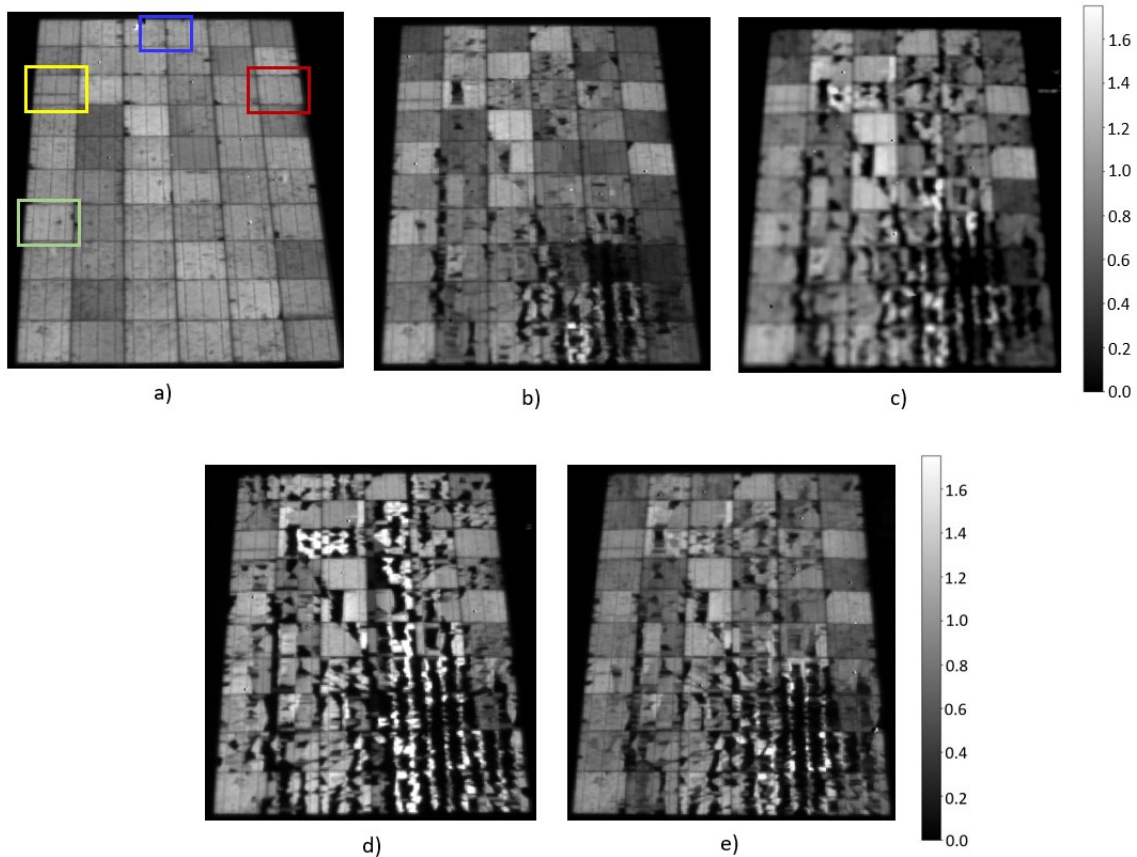
Figur 4.3: IV- og effekt(Eff)kurver for Multi4 den 15.04.21. Inkludert i figuren er IV- og effektkurver ved OPC, IV- og effektkurver etter korrigering til STC samt nominelle IV- og effektkurver. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på  $930.0 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $41.70 \text{ }^\circ\text{C}$ . IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

Tabell 4.2: Karakteriseringsparametere for Multi4 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 15.04.21. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på  $930.4 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $41.72 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	55.13	62.50
$V_{MPP}$ [V]	28.20	30.15
$I_{MPP}$ [A]	1.95	2.07
$V_{OC}$ [V]	35.63	37.70
$I_{SC}$ [A]	5.45	5.79
$\eta$ [%]	4.06	4.28
FF	0.28	0.29

#### 4.1. MULTI4

I figur 4.4 vises normaliserte EL-bilder for Multi4 for alle fem datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 2. Tilhørende påsatte verdier for strøm og spenning, vises i tabell 4.3. Tabellen har ingen påsatt verdi for strøm og spenning den 06.11.20, da disse ikke ble notert. Prosedyren var likevel den samme som ved senere gjennomførte målinger, slik at spenningen ble stilt til  $V_{oc}$  og strømmen stilte seg deretter. Resultater fra 15.04.21, vist i figur 4.4 e), viser tydelig at det tidligere beskrevne "hoppet" i IV-kurven fra samme dato, skyldes sprekkdannelser. Forventningen om å ikke se en tydelig utvikling på verken EL-bilder eller IV-kurver etter de påførte skadene, har dermed vist seg å ikke stemme.



Figur 4.4: Normaliserte EL-bilder av Multi4, gjennomført a) 06.11.20, b) 26.11.20, c) 05.02.21, d) 16.03.21 (3. måling) og e) 15.04.21 (3. måling). Påsatte strøm og spenningsverdier benyttet for EL avbildningen vises i tabell 4.3. Skalaen viser intensiteten til det utsendte EL-signalet i forhold til den antatt upåvirkede cellen (med verdier på 1), slik at mørke områder har et svakere signal enn de lysere områdene. Cellen markert i rødt er den benyttede referansecellen, mens de resterende markerte cellene er eksempler på opprinnelige, defekte områder.

#### 4.1. MULTI4

---

Tabell 4.3: Avleste verdier for påsatt spenning og strøm for Multi4 ved alle datoer for gjennomføring av EL avbildning. 16.03.21 og 15.04.21 ble tre påsatte strøm- og spenningsverdier benyttet, mens de tidligere målingene ble gjennomført med en påsatt verdi.

Dato for gjennomføring	Påsatt spenning, [V]	Påsatt strøm, [A]
06.11.20	-	-
26.11.20	37.7	1.5
05.02.21	37.8 - 38.0	0.8
16.03.21	1. 43.3	1. 8.8
	2. 40.7	2. 4.4
	3. 37.7	3. 1.4
15.04.21	1. 43.0	1. 8.8
	2. 40.3	2. 4.4
	3. 37.7	3. 1.8

Inspeksjon av figur 4.4 a) avdekker flere små områder med få eller ingen utsendte fotoner, allerede før skadepåføringen. Eksempelvis en horisontal sprekk i cellen markert i gul. Figur 4.4 b) avslører derimot hvor stort skadeomfanget av den påførte skaden er i forhold til de kommenterte områdene figur 4.4 a). Skadepåføringen har resultert i store elektrisk isolerte områder, hvor det forekommer lite eller ingen rekombinasjon av eksternt tilførte ladningsbærere. Cellen som mottok de harde slagene, er naturlig nok den hardest rammede cellen i modulen. Også de omkringliggende cellene, særlig de lokalisert direkte under den hardest rammede cellen, viser store reduksjoner i utsendt EL-signal. Flere vertikale sprekker strekker seg ned fra den hardest rammede cellen, og isolerer hele områder mellom to og to samleskinner.

Enkelte av områdene med svakt signal i figur 4.4 a), ser ut til å ha utviklet seg til større områder etter skadepåføringen. Området som så ut som en liten sort prikk i cellen markert i grønn i figur 4.4 a), dekker i figur 4.4 b) et større areal. Det samme gjelder for området med svak intensitet, markert i blått, som har økt i størrelse fra figur 4.4 a) til b). Flere slike eksempler kan sees i figur 4.4 b), men er i større grad nærliggende til, eller blitt en del av de defekte områdene som oppstod som en følge av skadepåføringen. Om arealøkningen av de to ovenfornevnte områdene er direkte knyttet til den intensjonelle skadepåføringen eller ikke, kan ikke kommenteres med sikkerhet. Det som imidlertid er essensielt å merke seg er at defekte områder som oppstod som en følge av skadepåføring utvikler seg til å dekke en større og større andel av solcellemodulen mellom hvert EL-bilde som tas. Dette tyder på at de opprinnelige, små områdene med svakt signal i figur 4.4 a), også kan ha hatt en utvikling som ikke nødvendigvis kobles direkte opp mot den påførte skaden. Likevel er det sentralt å merke seg hvorfor allerede defekte områder ser ut til å utvikle seg, og ta opp ett større areal over tid. En sannsynlig årsak er det knuste frontglasset som en følge av skadepåføringen den 26.11.20. Frontglasset vil ikke lenger beskytte underliggende deler av modulen like godt mot vær og vind. Dette kan i seg selv være en forklaring på hvorfor de små kommenterte områdene i figur 4.4 a), utvidet seg raskt etter skaden ble påført.

Figur 4.4 b), c), d) og e) viser flere områder med svært høy intensitet. Fenomenet oppstår som en følge av modulens elektrisk isolerte områder. Eksternt tilførte ladningsbærere fordeles da mindre jevnt mellom modulens celler. Konsekvensen er at enkelte områder mottar

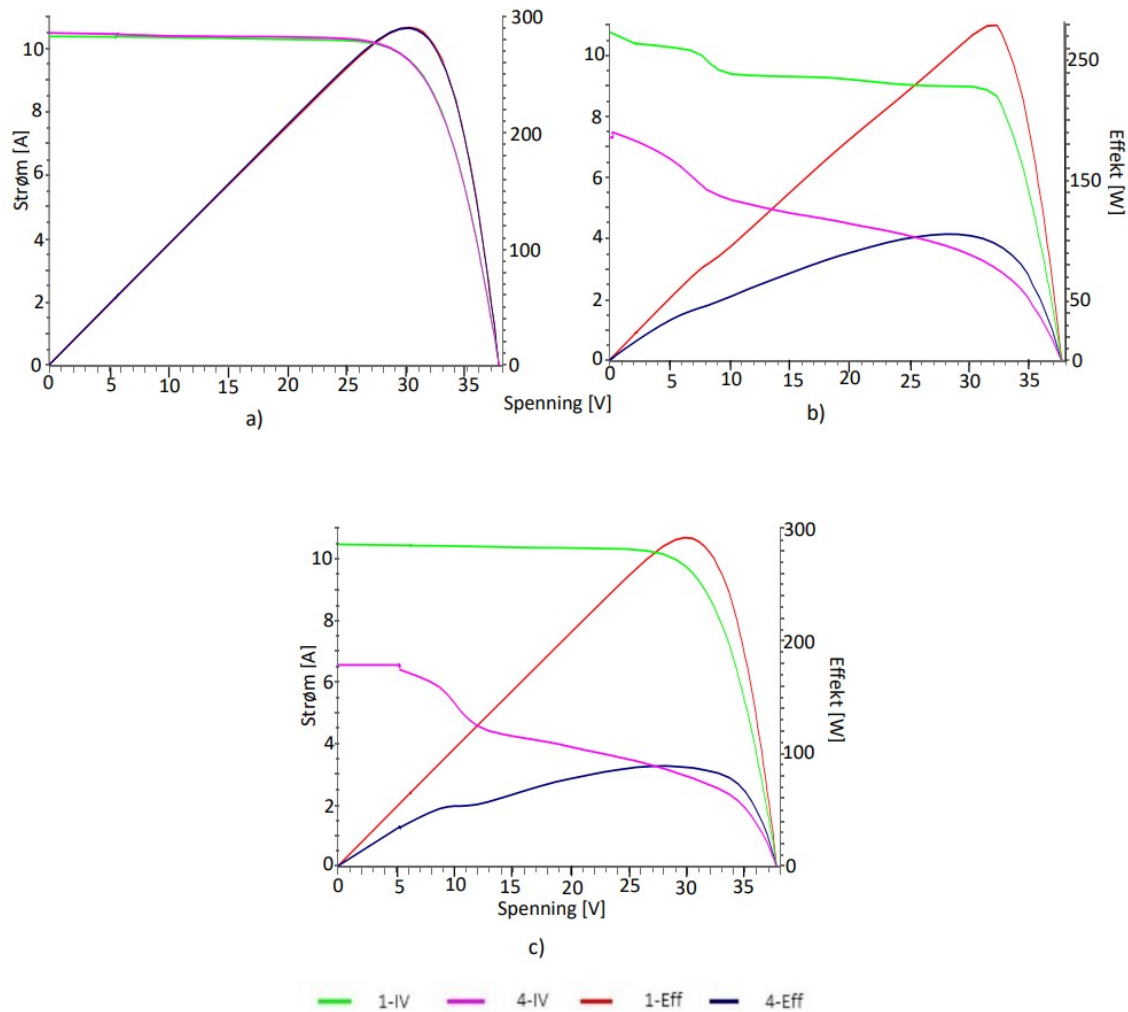


en høyere strømtetthet, og dermed økt rekombinasjon av eksternt tilførte ladningsbærere. Følgelig detekter SWIR kameraet flere fotoner i dette området.

Både fra figur 4.4 b) til c), og fra c) til d), strekker de vertikale sprekke seg videre oppover og isolerer områder mellom samleskinner også ovenfor den hardest rammede cellen. I løpet av tidsperioden fra skadepåføring til siste presenterte EL-bilde, ble modulen utsatt for store variasjoner i ytre mekanisk stress. Modulen har til tider vært fullstendig dekket av snø og/eller is, vært utsatt for flere runder med hagl, lange nedbørsdager, i tillegg til dager med kraftig vind og store temperaturvariasjoner. Artikkelen *Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review* [8] viser eksempler på hvordan en enkelt kraftig haglstorm kan føre til store skader og sprekker i en solcelle, og skriver videre at belastning fra snø og vind er blant de fem vanligste årsakene som forårsaker skader på solcellemoduler. I følge artikkelen er effekttapet per år grunnet sprekker, i et kaldt og snørikt klima, henholdsvis 3% og 6% høyere enn effekttapet i et mer moderat klima og i et varmt og tørt klima [8]. Med sitt knuste frontglass er Multi4 ekstra utsatt for ytre varierende faktorer, noe som kan være årsaken til den raske utviklingen.

Grunnet de drastiske endringene i EL-bildene til Multi4 i løpet av tidsperioden, bør også utviklingens påvirkning på IV- og effektkurver mellom 26.11.20 og 15.04.21 studeres. Figur 4.5 inneholder IV- og effektkurver korrigert til STC for Multi4 og Multi1 for 06.11.20, 05.02.21 og 09.03.21. Korrigerte kurver for Multi1 er inkludert slik at endringer som forekommer for Multi4 kan sammenlignes med eventuelle forandringer som oppstår i kurven til referansemodule. Kurvene presentert for Multi1 i figur 4.5 b) avviker fra sin opprinnelige form, slik de kan sees i figur 4.5 a). Formen på IV- og effektkurven til Multi1 i figur 4.5 c), er imidlertid tilbake til det opprinnelige utgangspunktet den 06.11.20. Avviket i figur 4.5 b) skyldes derfor høyst sannsynlig en hurtig endring i irradians under gjennomføring av IV-kurvemålingen uten at måleapparatet har registrert endringen som drastisk nok til å definere målingen som ugyldig.

Etttersom IV- og effektkurvene til Multi1 og Multi4 ligger over hverandre i figur 4.5 a), hadde de to modulene samme utgangspunkt før Multi4 ble intensjonelt skadet. Sammenligning av den korrigerte IV-kurven til Multi4 presentert i figur 4.3 og figur 4.5 b) og c), viser en gradvis utvikling av det tidligere kommenterte hoppet i figur 4.3. Også den korrigerte IV-kurven fra 26.11.20, vist i figur 4.2, viser en liten knekk ved spenningsverdier mellom 6-8 V. Observasjonen samsvarer med den raske endringen i strøm som forekommer rundt samme verdier for spenning for kurver målt ved senere datoer. Den gradvise økningen av elektrisk isolerte områder i figur 4.4 samsvarer i de fleste tilfeller godt med den observerte utviklingen på modulens IV-kurve. Unntaket kan sees i figur 4.4 e), hvor påvirkningen av den påførte skaden fremstår som mindre enn ved tidligere presenterte EL-bilder for Multi4. Resultatet bryter med mønsteret observert fra figur 4.4 b) til c), og fra c) til d). Ved sammenligning av figur 4.3 og 4.5 utvikler kurven seg på en slik måte at modulytelsen reduseres mellom de to datoene. At den påførte skaden fremstår som mindre i figur 4.4 e) stemmer dermed ikke overens med resultater fra IV-kurvemålinger, og bør undersøkes ytterligere. Det er kjent fra tidligere studier, eksempelvis [8], at enkelte sprekker vil resultere i lavintensitetsområder i EL-bilder ved høye påsatte strømmen, men forsvinner ved lavere verdier for påsatt strøm. Tabell 4.3 viser at påsatt strøm ved 3. måling den 15.04.21 er høyere enn tilsvarende verdi ved 3. måling den 16.03.21. Det virker derfor lite sannsynlig at det er påsatt verdi for strøm som har ført til at enkelte defekte områder er mindre synlig, eller ikke tilstede i figur 4.4 e).

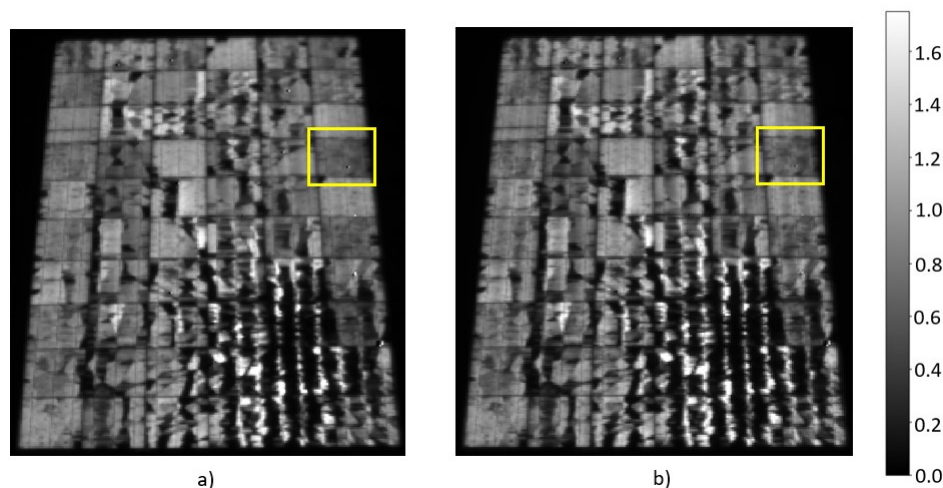


Figur 4.5: IV- og effekt(Eff)kurver korrigert til STC for Multi1 og Multi4 den a)06.11.20, b) 05.02.21 og c) 09.03.21. IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

#### 4.1.2 Nærmere undersøkelse av EL-signal den 15.04.21

For å studere EL-signalet fra Multi4 den 15.04.21 ytterligere, undersøkes også bildeserier gjennomført ved høyere verdier for påsatt strøm og spenning enn den utvalgte målingen presentert i figur 4.4 e). Figur 4.6 inkluderer normaliserte EL-bilder for Multi4 med effektkilde stilt til  $0.5I_{sc}$  (2. måling i tabell 4.3) og  $I_{sc}$  (1. måling i tabell 4.3). Flere områder med svakt signal i figur 4.4 d), som ikke var visuelt synlig i 4.4 e), kommer til syne i figur 4.6 a), og desto mer i b). Dette bekrefter at sprekker som vises ved tidligere datoer enn 15.04.21, også er tilstede den 15.04.21. Et eksempel er cellen markert i gul i figur 4.6, som dekkes av flere lavintensitetsområder i figur 4.4 d), men som ser nærmest upåvirket ut i figur 4.4 e). Figur 4.6 a) viser antydninger til et lignende mønster i cellen, mens i figur 4.6 b) kommer områdene enda tydeligere frem. De utpekte områdene ser imidlertid ut til å ha et sterkere utsendt signal i forhold til referansecellen i figur 4.6, enn i både figur 4.4 c) fra 05.02.21, samt figur 4.4 d) fra 16.03.21. EL-bilder fra 15.04.21 viser der-

med at flere områder på Multi4 inneholder sprekker som kun delvis, og i hovedsak ved høye påsatte strømmer, fører til elektrisk isolerte områder. Tilfellet er ikke det samme ved tidligere datoer. For å undersøke dette ytterligere og få en indikasjon angående videre skadeutviklingen på Multi4, ville det mest ideelle vært å gjenta hovedeksperiment 2 på modulen.



*Figur 4.6:* Normaliserte EL-bilder av Multi4 gjennomført 15.04.21. Effektkilde er stilt til a)  $0.5I_{sc}$  (2. måling i tabell 4.3) og b)  $I_{sc}$  (1. måling i tabell 4.3). Skalaen viser intensiteten til det utsendte EL-signalet i forhold til den antatt upåvirkede cellen (med verdier på 1), slik at mørke områder har et svakere signal enn de lysere områdene. Cellen markert i gul viser et eksempel på defekte områder som kommer til syne ved økt verdi for påsatt strøm.

### 4.1.3 Sammenheng mellom modulkarakteristikk og EL-bilder

Tabell 4.4 viser hvordan karakteriseringsparametere korrigert til STC, for Multi4 utvikler seg over tid. Tidligere presenterte EL-bilder gir ikke direkte informasjon om hvordan den påførte skaden påvirker modulytelsen i løpet av tidsperioden for oppgaven, men tabellen avdekker derimot tydelig hvor svekket ytelsen er blitt. Til tross for at modulens EL-bilde den 15.04.21 viser tegn til at modulen har færre fullstendig isolerte områder, viser tabellen en tydelig nedgang fra forrige gjennomførte IV-kurvetest.  $P_{max}$ ,  $I_{sc}$ ,  $\eta$  og FF er fire sentrale parametere som er blitt kraftig redusert fra modulens opprinnelige tilstand før skadepåføring, til siste IV-kurvemåling drøye fem måneder senere.  $I_{sc}$  reduseres mellom hver gjennomførte IV-kurvemåling, noe som stemmer godt overens med at mengden strøm produsert i en solcellemodul er proporsjonal med modulens aktive areal [8]. Elektrisk isolerte områder, vil til tross for generasjon av frie ladningsbærere under belysning, ikke bidra til den totale strømproduksjonen. Dette forklares ved at sprekkdannelsene forhindrer oppsamling av genererte ladningsbærere. I tillegg vil delen av en solcellewafer som inneholder en sprekke i varierende grad medføre økt rekombinasjon under belysning. Det totale resultatet er en solcellemodul som produserer lavere effekt. Lavere produsert effekt under samme utendørsforhold, vil følgelig resultere i en solcellemodul med svekket virkningsgrad. Utover dette er det flere sannsynlige faktorer som er med og påvirker modulens totale evne til å generere elektrisk effekt. Eksempelvis kan deler av effektetapet skyldes varme områder, og økt refleksjon av innkommende solstråler grunnet det knuste frontglasset.

Tabell 4.4: Karakteriseringsparametere for Multi4 for alle datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 1. De presenterte verdiene er målte verdier korrigert til STC.

	06.11.20	26.11.20	05.02.21	09.03.21	15.04.21
$P_{max}$ [W]	282.71	146.30	104.95	88.72	62.50
$V_{MPP}$ [V]	28.88	27.46	28.01	28.18	30.15
$I_{MPP}$ [A]	9.97	5.33	3.75	3.15	2.07
$V_{OC}$ [V]	36.52	37.72	37.69	37.69	37.70
$I_{SC}$ [A]	10.69	8.92	7.28	6.54	5.79
$\eta$ [%]	19.71	10.02	7.19	6.08	4.28
FF	0.72	0.43	0.38	0.36	0.29

#### 4.1.4 Betydningen av sprekkdannelser

En studie gjennomført av *M. Dales et al.* [6] tar for seg sprekkdannelser med ulik retning i mc-Si moduler. Som beskrevet i kapittel 1 er ett av artikkelens to hovedbidrag å bevise at ikke alle sprekker har en signifikant påvirkning på modulytelsen. Artikkelens resultater viser at sprekker parallelt med samleskinner ikke resulterer i betydelig påvirkning på modulytelsen i alle tilfeller. Sprekkdannelser parallelt med modulens samleskinner vil derimot i tilfeller der sprekken strekker seg over fem celler, resultere i drastiske reduksjoner i generert effekt. Resultater for Multi4 kan i stor grad sammenlignes med *M. Dales et al.* [6] studie. Slik som tidligere kommentert, viser figur 4.4 b) tydelige sprekkdannelser parallelt med samleskinnene, og en av disse strekker seg over fem celler. Tabell 4.4 avdekker en kraftig reduksjon i  $P_{max}$  fra en opprinnelig målt verdi på 282.71 W, til 146.30 W direkte etter skadepåføring. Den økte utstrekkelser av parallelle sprekkdannelser i Multi4, presentert i figur 4.4, kobles tydelig mot en klar reduksjon i  $P_{max}$  og andre parametre over tid i tabell 4.4. I liket med *Dale et al.* [6] viser Multi4 at sprekker parallelt med samleskinner, som påvirker fem celler, har en enorm påvirkning på modulytelsen. Resultatene presentert i figur 4.4 og tabell 4.4, viser imidlertid større effekttap enn den nevnte studien ved kortere lengder på parallelle sprekker. Grunnet store ødeleggelse på Multi4 kan ikke enkeltsprekker skilles fra hverandre, men de fleste påførte sprekke er parallelle med samleskinnene. Da kun få av sprekkdannelsene i Multi4 strekker seg over minst fem celler, er det tydelig at også kortere parallelle sprekker har signifikant betydning på modulens effektproduksjon enn hva som beskrives av *M. Dales et al* [6].

Studiet presentert i artikkelen *Criticality of cracks in PV modules* [7] inkluderer en intensjonell, jevn mekanisk belastning, etterfulgt av kunstig aldring på flere solcellemoduler. Konklusjonen er at kun 7 % av celler som inneholder sprekker utvikler elektrisk isolerte områder i løpet av den kunstige aldringen. 29 % av cellene med sprekker resulterer i degraderinger, hvor sprekker parallelt med samleskinnene i tillegg til å forekomme hyppigst også trekkes frem med særlig stor sannsynlighet for å forårsake degradering ved kunstig aldring. Resultater fra hovedeksperiment 2 viser tydelig hvordan vertikale sprekkdannelser i Multi4 fører til store elektrisk isolerte områder, samtidig som de er den dominerende retningen på sprekker. Artikkelens konklusjon vedrørende den minimale mengden sprukne celler som utvikler elektrisk isolerte områder, stemmer derfor ikke overens med resultater for Multi4. Samtidig er funnet med på å styrke delen av konklusjonen i *Criticality of cracks in PV modules* [7], hvor parallelle sprekker både forekommer hyppigst og har stor sannsynlighet for degradering med tiden. Da parallelle sprekkdannelser i Multi4 resultere-

rer i store elektrisk isolerte områder, kraftig redusert modulytelse og ikke minst en rask økning i sprekk lengde i løpet av tidsperioden, er det tydelig at slike sprekker bør unngås om mulig.

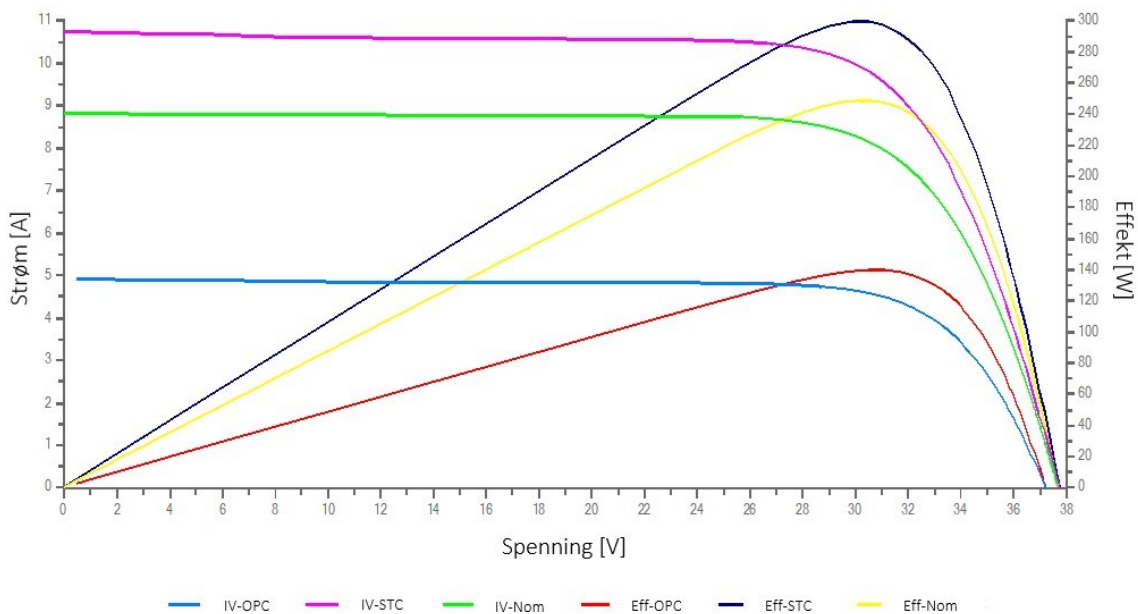
Tilhørende figur 4.4 a) har en tydelig horisontal sprekk på tvers av tre samleskinner blitt kommentert. Samtidig viser resultater fra IV-kurvemåling samme dato, figur 4.5 a), en solcellemodul uten redusert ytelse. Resultatet stemmer overens med funn gjort av *M. Dales et al.* [6], som beregner at sprekker vinkelrett på én, to eller tre samleskinner ikke har en signifikant påvirkning på effekten produsert av en solcellemodul. Da sprekken verken ser ut til å ha en lavere intensitet, eller øke i lengde i løpet av tidsperioden til det eksperimentelle arbeidet, påvirker den derfor heller ikke modulens ytelse ved siste dato for gjennomføring av hovedskeperimentene. Resultater fra *Criticality of cracks in PV modules* [7] tyder på at sprekkdannelser vinkelrett på samleskinner ikke resulterer i moduldegradering, noe som stemmer godt overens med observasjoner for Multi4. En tidligere foreslått løsning på å redusere effekten av sprekkdannelser er derfor en rotasjon av samleskinnene på  $90^\circ$  [31]. Vertikale sprekker vil ikke lenger være parallelle med samleskinnene, men vinkelrett på. De vil dermed i liten eller ingen grad påvirke modulytelsen. Hvordan en eventuell rotasjon av samleskinnene vil endre retningen på sprekker som oppstår, er derimot ukjent, og må undersøkes nærmere.

Kunstig aldringsprosesser som metode for å undersøke degradering av skader tilsvarer ikke den naturlige prosessen som ville forekommet ute i feltet. Det eksperimentelle arbeidet gjennomført i denne masteroppgaven, vil på en bedre måte representere modulenes faktiske respons på vær og klima i tidsperioden. Resultatene reflekterer utviklingen slik den ville forekommet for tilsvarende moduler i lignende områder på en bedre måte enn kunstige aldringsprosesser. Kombinasjonen av EL-bilder og IV-kurvemålinger gir den fordelene at romlig fordeling av, og defekter sin påvirkning på modulytelse, kan sees i sammenheng med hverandre. Tilsvarende studier inkluderer i hovedsak resultater fra EL avbildning og effektberegninger, men uten å inkludere IV-kurver. Dermed begrenses kunnskapen angående skadens påvirkning på modulens shunt- og seriemotstand. Analyse av endringer i IV- og effektkurver førte i seg selv til, at det med høy sannsynlighet kunne konkluderes med at årsaken var en eller flere sprekker i waferlaget i modulen. Over tidsrommet fra 26.11.20 til 15.04.21 utviklet dette seg til å isolere et gradvis økende areal av modulen. *B. L. Aarseth og E. S. Marstein* [30] studerer IV-kurver i sammenheng med termografi for defektgjenkjenning og effekttap. Likheten med resultater for Multi4 er beskrevet tidligere, men viser at sprekkdannelsene i de to tilfellene har lik påvirkning på IV-kurven. Ettersom *B. L. Aarseth og E. S. Marstein* [30] ikke har benyttet EL-bilder er det ikke mulig å kommentere retning og lengde på sprekken som fører til den ikke-ideelle kurven. Ved å gjennomføre slike studier ved bruk av både EL avbildning og IV-kurvetester, kan resultatene benyttes til å undersøke et potensielt mønster for hvordan en spesifikk skade påvirker modulens IV-kurve. Undersøkelser av defekter kan dermed gjøres ved bruk av kun IV-kurvemålinger. Dette ville vært svært hensiktsmessig, da EL avbildning er en mer tidkrevende prosess enn gjennomføring av en IV-kurvemåling.

## 4.2 Multi3

### 4.2.1 Utvikling av IV- og effektkurver

Skaden som ble påført Multi3 den 26.11.20 resulterte ikke i umiddelbare endringer på modulens IV-kurve. Slik som figur 4.7 viser, har IV-kurvene ved samme dato som den beskrevne skadepåføringen, lik form som den nominelle kurven spesifisert av leverandøren. Tabell 4.5 viser karakteriseringsparametere for Multi3 dagen modulen ble forsøkt skadet. Parameterne antyder at ved korrigering til STC har Multi3 en økning i  $P_{max}$  på 49 W, i tillegg til en 22 % økning i  $I_{sc}$  i forhold til verdiene spesifisert av leverandøren. En sammenligning mellom målte verdier ved OPC, og verdier korrigert til STC, tydeliggjør at strømverdiene er de som øker mest. IV-kurvemålingen ble gjennomført med en målt irradians på  $459.00 \text{ W/m}^2$ , og det er derfor naturlig at  $I_{sc}$  og  $I_{MPP}$  er to parametere som øker drastisk ved korrigering til  $1000 \text{ W/m}^2$ . Økende irradians vil imidlertid ikke påvirke spenningsverdiene i lignende grad, og forklarer hvorfor  $V_{MPP}$  og  $V_{oc}$  har omtrent samme verdi både før og etter korrigering. Temperaturkorrigeringen påvirker også resultatene, men i mindre grad, da avviket var vesentlig lavere enn for irradians. Det kan diskuteres om IV-kurven korrigert til STC representerer modulens faktiske ytelse ved disse driftsbetingelsene, da målingen ikke er gjennomført i henhold til IEC-60904-1. Dette kommenteres ytterligere i delkapittel 4.4.



Figur 4.7: IV- og effekt(Eff)kurver for Multi3 den 26.11.20 Inkludert i figuren er IV- og effektkurver ved OPC, IV- og effektkurver etter korrigering til STC, samt nominelle IV- og effektkurver. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på  $459.0 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $15.94 \text{ }^\circ\text{C}$ . IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

## 4.2. MULTI3

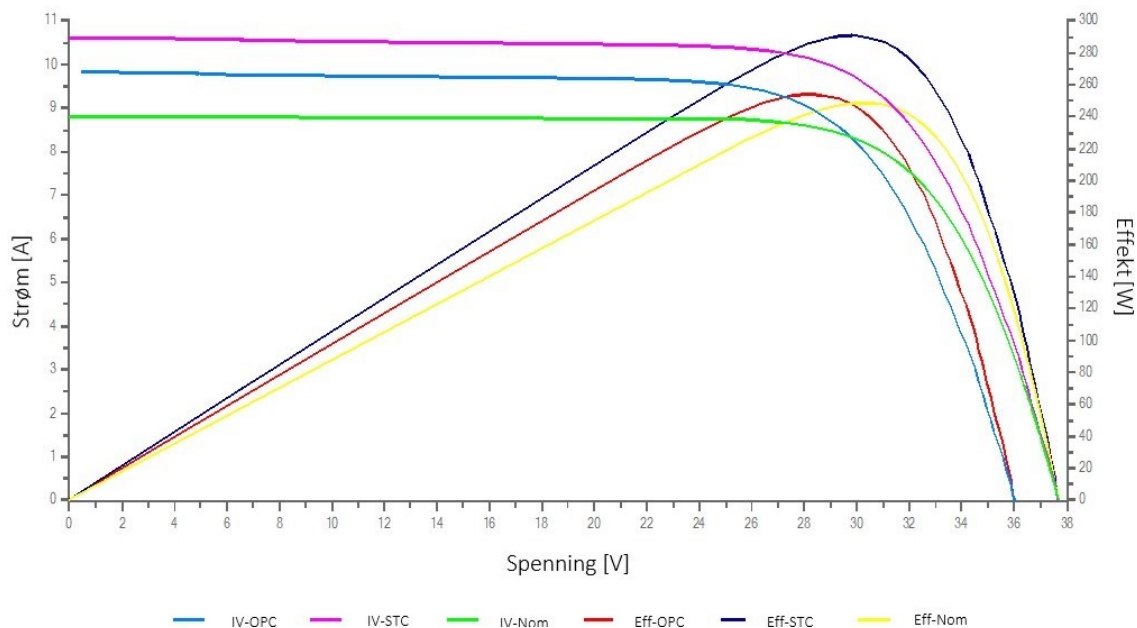
Tabell 4.5: Karakteriseringsparametere for Multi3 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 26.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på 459.0 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 15.94 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	139.62	299.00
$V_{MPP}$ [V]	30.49	30.54
$I_{MPP}$ [A]	4.58	9.79
$V_{OC}$ [V]	37.17	37.69
$I_{SC}$ [A]	4.90	10.70
$\eta$ [%]	20.83	20.48
FF	0.77	0.74

Første og siste IV-kurvemåling i etterkant av andre skadepåføring ble gjennomført 15.04.21. Følgelig er det ikke mulig å se en eventuell effekt av andre skadepåføring over et lengre tidsrom enn én måned. Resultater fra målingen gjennomført 15.04.21 vises i figur 4.8 og tabell 4.6. Visuell inspeksjon av IV-kurver i figur 4.8 viser at heller ikke denne påførte skaden førte til synlige endringer i forhold til nominelle kurver spesifisert av leverandøren. Verdien for  $P_{max}$  i tabell 4.6 er 8.44 W lavere enn den korrigerte verdien den 26.11.20. Også flere andre parametere viser små, negative endringer. Reduksjonen kan skyldes en mulig utvikling av skade påført 26.11.20, i tillegg til andre skadepåføring den 16.03.21. Reduksjonen er imidlertid liten, og kan skyldes andre faktorer enn de påførte skadene. Det faktum at IV-kurvemålingen gjennomført 26.11.20 ikke er i henhold til IEC-60904-1, fører til at korrigerte verdier kan avvike fra modulens faktiske ytelse ved STC. Konsekvensene kommenteres ytterligere i delkapittel 4.4, men vil i dette tilfellet skape en usikkerhet knyttet til om det faktisk har vært en reduksjon i  $P_{max}$  og enkelte andre parametere, eller ikke.

Tabell 4.6: Karakteriseringsparametere for Multi3 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 15.04.21. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på 916.7 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 37.90 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	253.98	290.56
$V_{MPP}$ [V]	28.20	29.89
$I_{MPP}$ [A]	9.01	9.72
$V_{OC}$ [V]	36.02	37.73
$I_{SC}$ [A]	9.82	10.57
$\eta$ [%]	18.98	19.90
FF	0.72	0.73



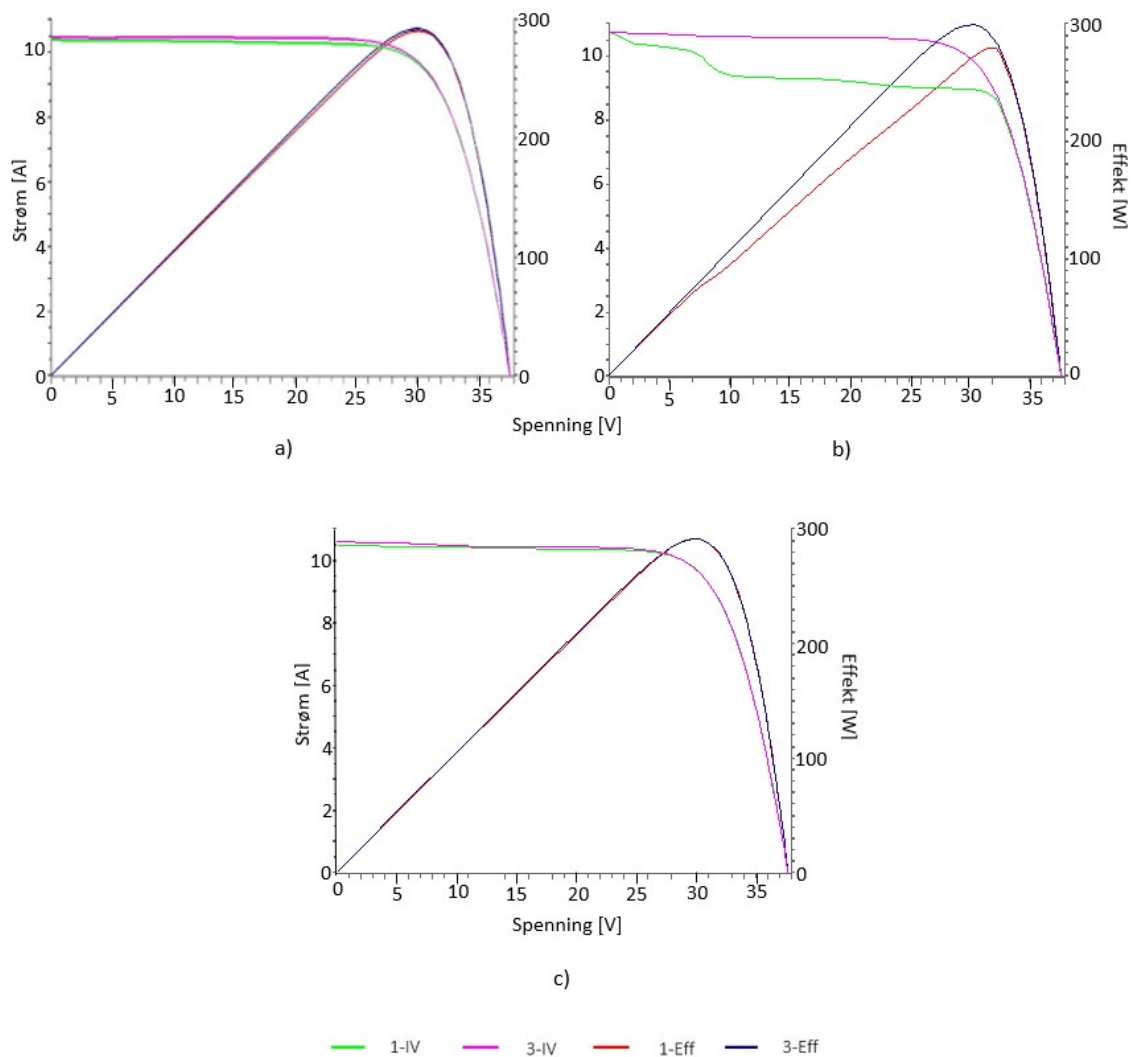
Figur 4.8: IV- og effekt(Eff)kurver for Multi3 den 15.04.21. Inkludert i figuren er IV- og effektkurver ved OPC, IV- og effektkurver etter korrigering til STC, samt nominelle IV- og effektkurver. OPC under gjennomføring av IV-kurvemålingen var en irradians på  $917.0 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $37.90 \text{ }^\circ\text{C}$ . IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

IV- og effektkurver korrigert til STC for Multi1 og Multi3 den 06.11.20, 05.02.21 og 09.03.21, vises i figur 4.9. Figuren inkluderer korrigerede IV- og effektkurver for Multi1, slik at dens eventuelle utvikling kan sammenlignes med potensielle endringer på IV- og effektkurvene til Multi3. Kurvene til Multi1 er de samme som inkluderer i figur 4.5. Følgelig viser også figur 4.9 b) en uforventet endring i IV- og effektkurvene til Multi1 som høyst sannsynlig skyldes irradiansendring under testgjennomføring.

Slik som figur 4.5 a) viste at Multi1 og Multi4 hadde samme opprinnelige utgangspunkt, viser figur 4.9 a) akkurat det samme for Multi1 og Multi3. Til tross for at kurvene til Multi1 avviker fra sin opprinnelige form den 05.02.21, kan ingen tydelige endringer oppdages for Multi3 den samme datoen. Figur 4.9 c) viser de siste resultatene fra IV-kurvemålinger gjennomført før andre skadepåføring. Heller ikke denne kurven viser tegn til at modulen har blitt påvirket av første skadepåføring, da kurvene til Multi1 og Multi3 ligger over hverandre. Det har det tidligere blitt tydeliggjort at IV-kurvemålingen gjennomført 15.04.21, etter andre skadepåføring, heller ikke viser tegn til endring, med unntak av små reduksjoner i enkelte karakteriseringsparametere. Resultatene viser at den første påførte skaden ikke har utviklet seg til å påvirke modulens ytelse innenfor tidsrommet satt av til det eksperimentelle arbeidet. Konklusjonen underbygges av tabell 4.7 som legger frem sentrale karakteriseringsparametere korrigert til STC for Multi3. Ingen av parameterne viser en klar nedgang fra før første skadepåføring til siste gjennomførte måling. Det er små variasjoner, slik som den tidligere kommenterte nedgangen i  $P_{max}$  fra 26.11.20 til 15.04.21. Korrigert verdi for  $P_{max}$  den 06.11.20, altså før første skadepåføring, viser en verdi lavere enn alle senere målte verdier. Det er kun målingen gjennomført 15.04.21 som er utført i henhold til IEC-60904-1, og usikkerheten knyttet til korrigeringen av de tidligere gjen-



## 4.2. MULTI3



Figur 4.9: IV- og effekt(Eff)kurver korrigert til STC for Multi1 og Multi3 den a) 06.11.20, b) 05.02.21 og c) 09.03.21. IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

nomførte målingene, kan være årsaken til at ytelsen til Multi3 ser ut til å forbedres fra før til etter første skadepåføring.

## 4.2. MULTI3

Tabell 4.7: Karakteriseringsparametere for Multi3 for alle datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 1. De presenterte verdiene er målte verdier korrigert til STC.

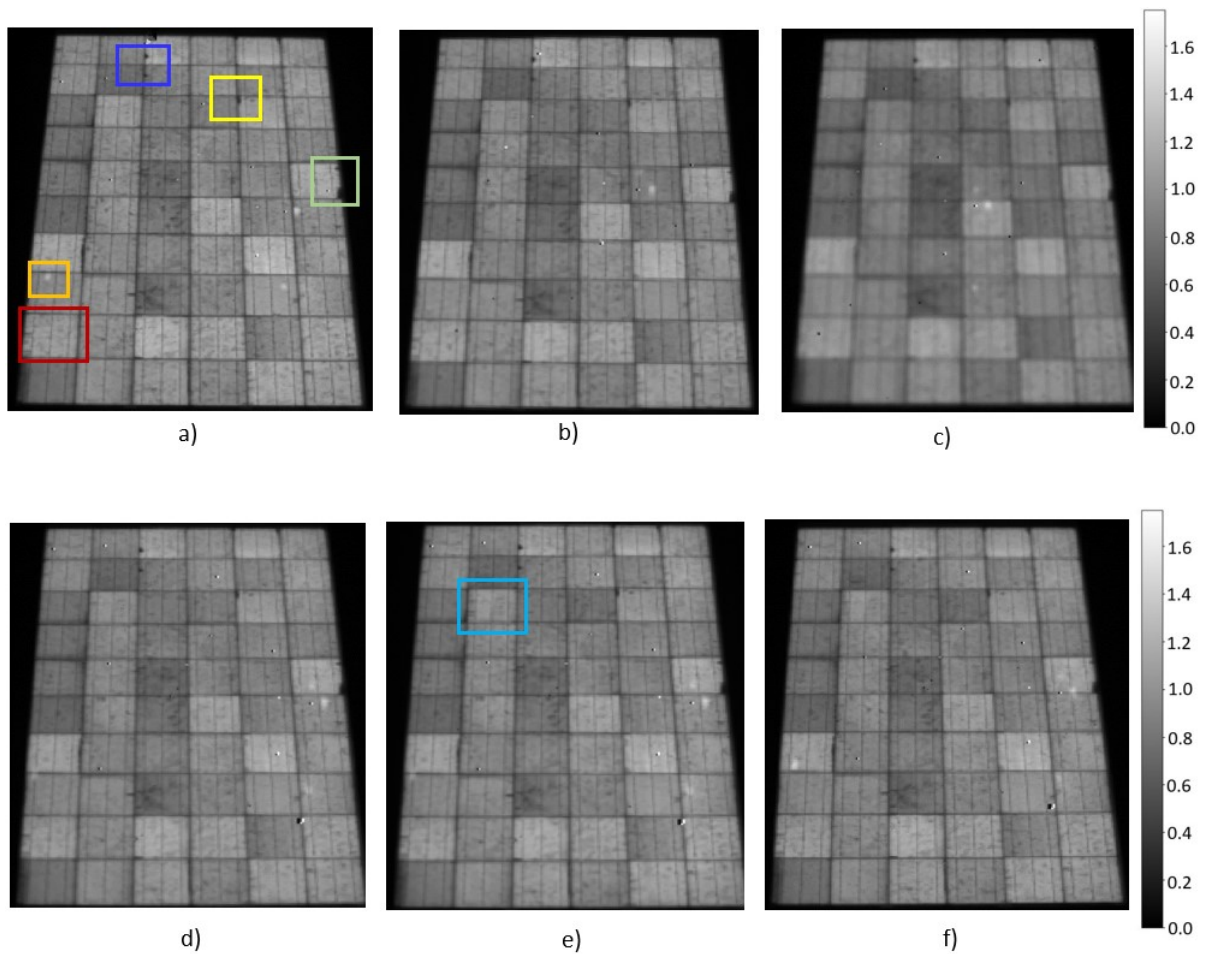
	06.11.20	26.11.20	05.02.21	09.03.21	15.04.21
$P_{max}$ [W]	285.67	299.00	298.81	290.83	290.56
$V_{MPP}$ [V]	29.24	30.54	37.66	29.75	29.89
$I_{MPP}$ [A]	9.77	9.97	9.81	9.78	9.72
$V_{OC}$ [V]	36.78	37.69	37.66	37.69	37.73
$I_{SC}$ [A]	10.57	10.70	10.69	10.53	10.57
$\eta$ [%]	19.57	20.48	20.47	19.91	19.90
FF	0.73	0.74	0.74	0.73	0.73

### 4.2.2 Endringer i EL-signal

Resultater for Multi4 viste at enkelte defekter og sprekkdannelser ikke påvirker modulens ytelse. Til tross for at de påførte skadene ikke påvirker effektproduksjonen til Multi3, er det derfor likevel nødvendig å studere modulens EL-bilder for å undersøke om slike defekter har oppstått. Normaliserte EL-bilder for Multi3 for alle fem datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 2 vises i figur 4.10, mens påsatte verdier for strøm og spenning kan sees i tilhørende tabell 4.8. Visuell inspeksjon av figur 4.10 a) viser små variasjoner i utsendt EL-signal, men svært få områder som har lavt eller ingen utsendt signal. Unntakene er et lite område med lav intensitet markert i grønn, et lignende område markert i gul, i tillegg til to *prikker* lokalisert under hverandre i det blåmarkerte området. Områdene er å se i alle presenterte EL-bilder i figuren.

Tabell 4.8: Avleste verdier for påsatt spenning og strøm for Multi3 ved alle datoer for gjennomføring av EL avbildning. 16.03.21 ble det gjennomført to serier med EL-bilder. *16.03.21 - før* viser til bildeserien tatt før andre skadepåføring, mens *16.03.21 - etter* viser til bildeserien tatt etter andre skadepåføring. 16.03.21 og 15.04.21 ble tre påsatte strøm- og spenningsverdier benyttet, mens de tidligere målingene kun ble gjennomført med en påsatt strøm- og spenningsverdi.

Dato for gjennomføring	Påsatt spenning, [V]	Påsatt strøm, [A]
06.11.20	-	-
26.11.20	37.7	1.5
05.02.21	37.7 - 37.8	0.7 - 0.8
16.03.21 - før	1. 42.0	1. 8.8
	2. 42.0	2. 4.4
	3. 37.7	3. 1.8
16.03.21 - etter	1. 41.5	1. 8.8
	2. 39.2	2. 4.4
	3. 37.7	3. 2.4
15.04.21	1. 41.9	1. 8.8
	2. 39.5	2. 4.4
	3. 37.7	3. 2.0



Figur 4.10: Normaliserte EL-bilder av Multi3 gjennomført a) 06.11.20, b) 26.11.20, c) 05.02.21, d) 16.03.21 (3. måling) - før andre skadepåføring, e) 16.03.21 (3. måling) - etter andre skadepåføring, og f) 15.04.21 (3. måling). Påsatte strøm og spenningsverdier benyttet for EL avbildningen vises i tabell 4.8. Skalaen viser intensiteten til det utsendte EL-signalet i forhold til den antatt upåvirkede cellen (med verdier på 1), slik at mørke områder har et svakere signal enn de lysere områdene. Cellen markert i rødt er den benyttede referansecellen, mens de resterende markerte cellene er eksempler på defekter og støypikslar.

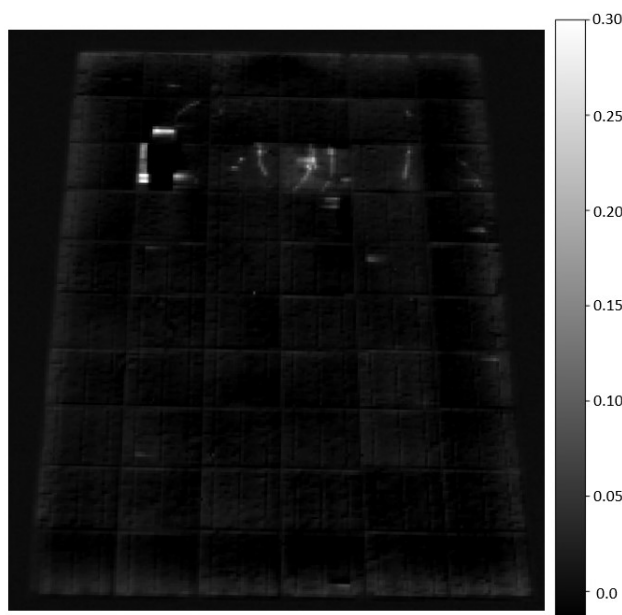
Figur 4.10 b) viser i likhet med IV-kurven til modulen direkte etter første skadepåføring, ingen synlige endringer i resultatbildet. Det som imidlertid fremstår som synlige endringer i alle resultatbildene i figuren er flere helt lyse områder med varierende lokasjon. Områdene blir definert som støypikslar, og et eksempel vises markert i oransje i figur 4.10. Støypikslar har ikke blitt fjernet i bildeanalysen, og vil fra bilde til bilde kunne ha varierende intensitet, mengde og lokalisering. Årsaken til at støyfjerning ble ekskludert er at det ikke er ønskelig å fjerne eventuelle små endringer eller defekter som oppstår i bildet, noe som kan skje ved bruk av verktøy for støyfjerning. Støypikslene kan sees bort ifra, og er ikke tilknyttet modulens utsendte EL-signal.

Figur 4.10 c) og d) viser i likhet med figur 4.10 b) ingen synlige endringer etter første skadepåføring. Heller ikke etter andre skadepåføring er det mulig å detektere store endringer i EL-signalet ved inspeksjon av figur 4.10 e) og f). EL-signalet detektert fra cellen

markert i figur 4.10 e) virker nå å være mindre uniform enn ved tidligere datainnsamlinger. Dette kan tyde på en liten sprekk, omtrentlig langs diagonalen fra nedre venstre hjørne, til øvre høyre hjørne. De eksternt tilførte ladningsbærerne blir delvis isolert til høyre for sprekkdannelsen, og seriemotstanden i cellen øker. Til tross for dette, er cellens mørkeste del, både i figur 4.10 e) og f), ved lignende intensitet som modulens resterende celler. Dette tyder på at sprekken har en lav alvorlighetsgrad. *G. E. Georghiou et al.* [8] definerer slike sprekker, som ikke resulterer i områder med lav intensitet i et EL-bilde, som sprekker som ikke fører til betydelige effekttap.

### 4.2.3 Nærmere undersøkelse av endret EL-signal etter andre skadepåføring

16.03.21 ble bildeserier gjennomført både før og etter andre skadepåføring. Ettersom kameraets posisjon ikke ble endret i mellomtiden, åpner dette muligheten for å trekke resultatbildene fra hverandre. En slik undersøkelse er ikke mulig for de andre resultatbildene, ettersom solcellemodulens posisjon i bildet varierer mellom de ulike datoene hovedeksperiment 2 har blitt gjennomført. For Multi3, den 16.03.21, har imidlertid dette blitt gjort, slik at eventuelle endringer som har forekommet i utsendt EL-signal direkte etter skadepåføring, synliggjøres. Resultatet etter EL-bildet til Multi3 etter skade er trukket fra EL-bildet til Multi3 før skade, vises i figur 4.11. I bildet representerer lyse områder, piksler

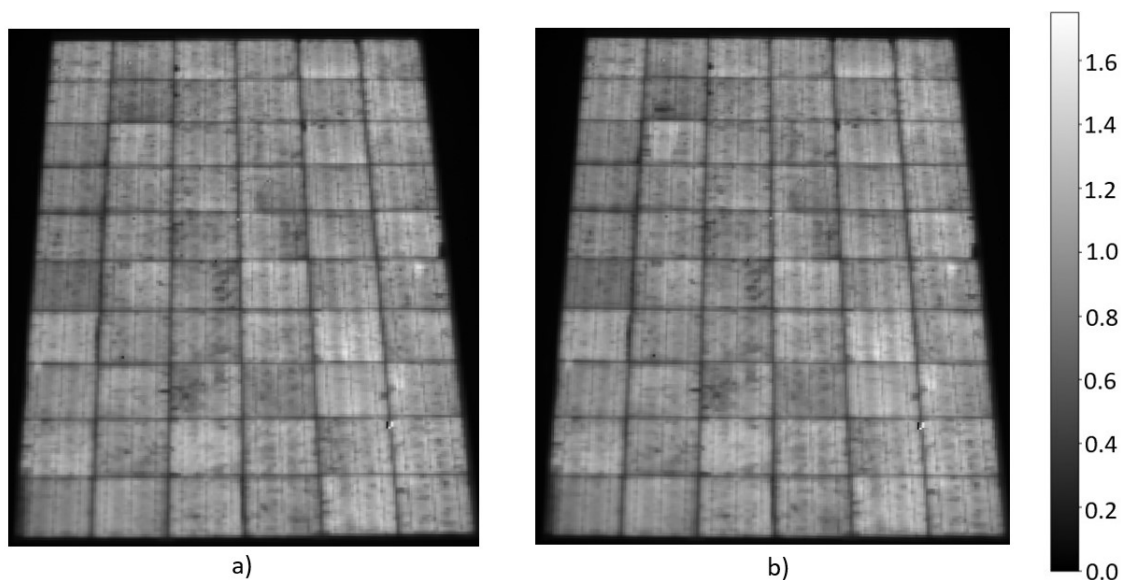


*Figur 4.11:* Normalisert EL-bilde for Multi3 etter skadepåføring den 16.03.21 trukket fra normalisert EL-bilde for Multi3 før skadepåføring den 16.03.21. Bildene trukket fra hverandre er resultatbilder fra seriene markert som 1.måling i tabell 4.8, altså at den eksterne effektkilden er stilt til  $I_{sc}$ . Skalaen viser endring i detektert EL-signal fra før til etter andre skadepåføring, slik at lyse piksler i modulen representerer et område som har hatt større endring i EL-signal enn mørkere områder.

som har redusert EL-signal fra før til etter skadepåføring. Det vises tydelige endringer i antall detekterte fotoner i de to cellene som har mottatt slag. Også enkelte områder i nærliggende celler har et redusert EL-signal, men i lavere grad. Unntaket er den tidligere kommenterte cellen til venstre for cellene som mottok den påførte skaden. Her har det ut-

sendte EL-signalet til venstre for den ytterste samleskinnen i cellen blitt vesentlig svakere etter skadepåføring. Også et område i cellen direkte over den beskrevne cellen viser at EL-signalet er svekket etter skadepåføring. Det er nødvendig å kommentere at subtraksjonen er gjort for to EL-bilder tatt ved påsatt strøm tilsvarende  $I_{sc}$ , altså med verdier for strøm og spenning som vises i tabell 4.8 under 1.måling. De subtraherte bildene er normaliserte, og skalaen i figur 4.11 viser derfor endring i det normaliserte signalet.

Det svekkede EL-signalet i de to cellene som ble skadet med intensjon, er slik som kommentert i et tidligere avsnitt, ikke mulig å detektere med visuell inspeksjon av figur 4.10 e) og f). Det er derfor hensiktsmessig å studere EL-bilder tatt under en høyere påsatt strøm, for å undersøke om endringen observert i figur 4.11 også er synlig uten subtraksjon. Normaliserte bilder med effektkilde stilt til  $I_{sc}$ , før og etter andre skadepåføring av Multi3, vises i figur 4.12. Slike målinger er ikke gjennomført for alle datoer hovedeksperiment 2 er utført, og er årsaken til at disse ikke presenteres i figur 4.10.



*Figur 4.12:* Normaliserte EL-bilder av Multi3 gjennomført a) før, og b) etter andre skadepåføring den 16.03.21. Påsatte strøm og spenningsverdier benyttet for EL avbildningen vises i tabell 4.8, markert med 1.måling. Skalaen viser det detekterte signalet fra solcellemodulen, slik at mørke områder har et svakere signal enn de lyse områdene.

Ved visuell inspeksjon av figur 4.12 er det ikke mulig å oppdage alle områder med endret EL-signal som sees i figur 4.11. Sammenlignet med forandringene som detekteres fra figur 4.10 d) til e), er derimot endringene synligere. Figur 4.12 b) viser et svakere signal fra en potensiell sprekke i den høyre av de to cellene som ble utsatt for direkte slag. Sprekken strekker seg parallelt med samleskinnene på cellens venstre halvdel. Selv om sprekkdannelsen også er mulig å oppdage i figur 4.12 a), har den et redusert signal i figur b), noe som vises enda tydeligere i figur 4.11. Endringer kan også skimtes i cellen til venstre for de to cellene som mottok direkte påføring av skade. Dette samsvarer med at cellen ser ut til å ha en diagonal, mindre synlig, sprekke også etter andre skadepåføring i figur 4.10. I figur 4.12 kommer ytterligere flere lavintensitetsområder til venstre i cellen tydelig frem, i tillegg til et område med svakt signal, vinkelrett på, og mellom to samleskinner i cellen over. At enkelte av sprekkdannelsene ikke vises i figur 4.10, men derimot er synlig i figur 4.12, betyr

at de nylig oppståtte sprekkeene ikke har ført til elektrisk isolasjon av enkelte områder, og at det er elektrisk kontakt i området sprekken er lokalisert [8]. Funnet stemmer overens med figur 4.12, som viser et detektert EL-signal også i områdene med sprekkdannelser.

Ettersom de små intensitetsendringene observert i EL-bilder for modulen, ikke har resultert i endret effektproduksjon, tåler modulen gjentatte, moderate slag mot dens bakside uten betydelig ytelsespåvirkning. Modulens ytelse senere enn én måned etter skadepåføringen kan ikke kommenteres med sikkerhet grunnet den sene gjennomføringen. Basert på den svake signalendringen er det imidlertid rimelig å anta at andre skadepåføring ikke vil påvirke modulytelsen uten påvirkning av kraftige, ytre mekaniske faktorer. Likevel presiseres det i publiserte artikler, eksempelvis [32], at den umiddelbare effekten av sprekkdannelser kan være liten, men at deres tilstedeværelse potensielt sett vil kunne påvirke modulytelsen på et senere tidspunkt. Når modulen utsettes for gjentatt, ytre mekanisk stress vil dette kunne resultere i transformasjon av eksisterende sprekker. De minimale sprekkdannelsene i Multi3 kan følgelig utvikle seg til sprekker med større grad av rekombinasjon under belysning. Over et lenger tidsrom, kan ytre mekanisk stress også forårsake elektrisk isolerte områder, slik som observert for Multi4. Til tross for de store ulikhetene i alvorlighetsgraden til sprekkdannelsene i Multi3 og Multi4, kan det ikke utelukkes at lignende prosesser kan forekomme over en lengre tidsperiode i Multi3.

Til tross for upåvirkede karakteriseringsparametere etter andre skadepåføring, bør likevel retningene på intensitetsendringer i figur 4.11 kommenteres. Multi4 viste tydelig at sprekker horisontalt med samleskinnene var den dominerende retningen. I figur 4.11 vises en sprekkdannelse med flere retninger, to vinkelrett på og fire parallelt med samleskinnene. Dermed er intensitetsendringer parallelt med modulens samleskinner dominerende også for Multi3. Resultatet samsvarer med eksperimentelle funn i *Criticality of cracks in PV modules* [7], hvor sprekkdannelser parallelt med samleskinnene forekommer oftest. Resultater angående retning av sprekkdannelser for både Multi3 og Multi4 strider imidlertid med *M. Dales et al* [6], hvor både sprekkdannelser med flere retninger og diagonale sprekker forekommer oftere enn parallelle. Hvilken retning som forekommer oftest, samt sprekkenes påvirkning på modulytelse er et helt sentralt aspekt for videre utvikling av solcellemoduler. For å kutte kostnader under produksjon av solceller, må tykkelsen på waferlaget reduseres [8]. Resultatet er mindre robuste celler som er ytterligere utsatt for sprekkdannelser ved mekanisk belastning [8]. Ettersom sprekker er uunngåelig i løpet av modulens levetid, må det arbeides med tiltak slik at de påvirker modulytelsen i minst mulig grad. En slik realisering er ikke mulig før det er oppnådd mer kunnskap angående dominerende retning av sprekkdannelser, samt retningens påvirkning på modulytelse.

### 4.3 Referansemoduler

IV- og effektkurver for Multi1 korrigert til STC den 06.11.20, 05.02.21 og 09.03.21 er presentert for Multi1 i både figur 4.5 og 4.9. En oppsummering av parameterne hentet og beregnet fra disse kurvene, i tillegg til målinger gjennomført 26.11.20, og 15.04.21 kan sees i tabell 4.9. Til tross for små variasjoner, vises ingen klar endring i modulens karakteristik, og derfor ingen tegn til naturlig degradering i løpet av tidsperioden. Ytterligere presentasjon av IV- og effektkurvene til Multi1 er ikke inkludert, da de ikke tilfører informasjon om modulens tilstand utover de tidligere presenterte kurvene. Ettersom referansemodulen ikke viser tegn til degradering i løpet av perioden, kan de drastiske endringene i karakte-

### 4.3. REFERANSEMODULER

riseringsparameterne til Multi4 med enda større sikkerhet knyttet direkte til den påførte skaden. Verdier presentert i tabell 4.9 er derimot lignende de for Multi3, i tabell 4.7, og underbygger tidligere konklusjon om at verken første eller andre skadepåføring har påvirket modulytelsen.

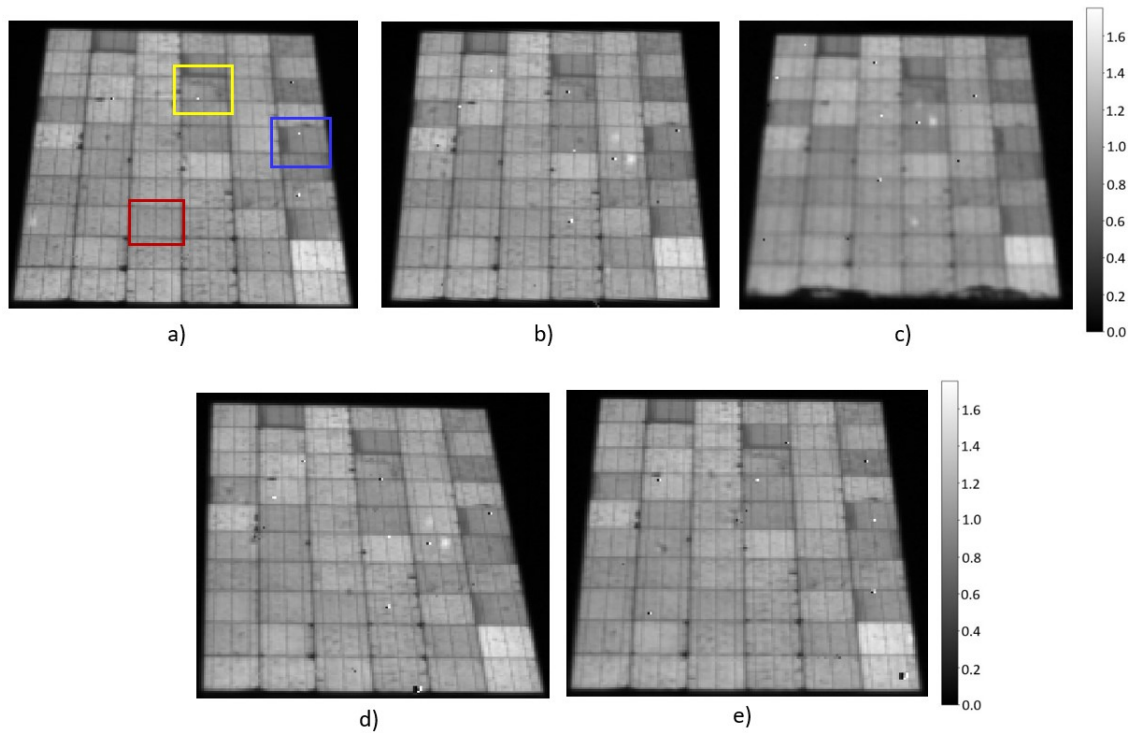
Tabell 4.9: Karakteriseringsparametere for Multi1 for alle datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 1. De presenterte verdiene er målte verdier korrigert til STC.

	06.11.20	26.11.20	05.02.21	09.03.21	15.04.21
$P_{max}$ [W]	280.32	299.74	278.88	291.09	291.55
$V_{MPP}$ [V]	28.95	29.84	32.30	29.82	29.87
$I_{MPP}$ [A]	9.68	10.05	8.63	9.76	9.76
$V_{OC}$ [V]	36.59	37.69	37.70	37.69	37.69
$I_{SC}$ [A]	10.44	10.63	10.43	10.43	10.53
$\eta$ [%]	19.20	20.53	19.10	19.94	19.97
FF	0.73	0.75	0.71	0.74	0.73

En oppsummeringstabell for Multi2 presenteres i tabell B.1 i vedlegg B. Også IV- og effektkurver fra første og siste dato for gjennomføring av hovedeksperiment 1, kan sees i henholdsvis figur B.1 of B.2 i vedlegg B. Kurvene viser at IV- og effektkurven til Multi2 er identisk med formen til de nominelle IV-kurvene spesifisert av leverandøren. Ytterligere kommentarer av resultater for Multi2 tilknyttet hovedeksperiment 1 er ekskludert, da de ikke tilfører analysen informasjon utover den allerede presentert for Multi1. Sammenligning av resultatene for Multi1 og Multi2 viser at det er likegyldig hvilken av de to modulene som hadde blitt benyttet som referansem modul i hovedeksperiment 1.

Resultater fra både Multi3 og Multi4 viser at modulens EL-signal kan endres uten å påvirke modulytelsen. For å studere påvirkningen av ytre faktorer i tidsperioden inkluderer normaliserte EL-bilder for Multi1 i figur 4.13, mens tilhørende tabell med påsatte verdier for strøm og spenning kan sees i tabell 4.10. Som for både Multi4 og Multi3, kan flere små områder med lite eller ingen detektert EL-signal, sees den første datoen hovedeksperiment 2 ble gjennomført, vist i figur 4.13 a). Det observeres flere tydelige sprekkdannelser i wafere, eksempelvis en sprekk i cellen markert i gul, som strekker seg fra omtrent øvre venstre hjørne, til nedre høyre hjørne. Fargen på sprekken indikerer at det forekommer rekombinasjon her, men i mindre grad enn i den benyttede referansecellen. I den blåmarkerte cellen vises et delvis elektrisk isolert område til venstre for en av samleskinnene. Dette kan tyde på en sprekk som delvis forhindrer eksternt tilførte ladningsbærerne å nå det beskrevne området, og er grunnen til at cellen har en mørkere grå farge enn den resterende cellen. Til tross for at figur 4.13 a) ikke er tatt direkte etter modulen ble montert og eksponert for sollys, er det kun et lite tidsrom mellom montering og første gjennomføring av hovedeksperiment 2. De kommenterte områdene er derfor et resultat av defekter oppstått i løpet av produksjonsprosessen, transport eller montering av solcellemodulen.

### 4.3. REFERANSEMODULER



Figur 4.13: Normaliserte EL-bilder av Multi1 gjennomført a) 06.11.20, b) 26.11.20, c) 05.02.21, d) 16.03.21 (3. måling) og e) 15.04.21 (3. måling). Påsatte strøm og spenningsverdier benyttet for EL avbildningen vises i tabell 4.10. Skalaen viser intensiteten til det utsendte EL-signalet i forhold til den antatt upåvirkede cellen (med verdier på 1), slik at mørke områder har et svakere signal enn de lysere områdene. Cellen markert i rødt er den benyttede referansecellen, mens de resterende markerte cellene er eksempler på defekter.

Tabell 4.10: Avleste verdier for påsatt spenning og strøm for Multi1 ved alle datoer for gjennomføring av EL avbildning. Den 16.03.21 og 15.04.21 ble tre påsatte strøm- og spenningsverdier benyttet for EL avbildning, mens de tidligere målingene kun ble gjennomført med en påsatt strøm- og spenningsverdi.

Dato for gjennomføring	Påsatt spenning, [V]	Påsatt strøm, [A]
06.11.20	-	-
26.11.20	37.7	1.3
05.02.21	37.7 - 37.8	0.7 - 0.8
16.03.21	1. 42.1	1. 8.8
	2. 39.9	2. 4.4
	3. 37.7	3. 1.8
15.04.21	1. 42.0	1. 8.8
	2. 39.5	2. 4.4
	3. 37.7	3. 1.8

I likhet med Multi3, er det ingen indikasjon på endring av de beskrevne områdene med svakt eller ingen signal i figur 4.13 a), for Multi1. Resultater fra hovedeksperiment 2, for



Multi2, kan sees i vedlegg D, og figur D.1 viser samme mangel på utvikling av defekte områder i løpet av tidsperioden. Verken IV- og effektkurven til Multi1 eller Multi2 viser tegn til endret serie- og shuntmotstand, da kurvenes form ikke avviker fra den nominelle. Følgelig påvirkes ikke modulytelsen av de små defekte områdene. Også tidligere presenterte resultater for Multi3 og Multi4 tyder på at opprinnelige, små defekte områder ikke har påvirket modulens IV- og effektkurve før skadepåføring. Defektene oppstått i produksjon, transport eller installasjon av de fire modulene, påvirker dermed ikke modulens ytelse i løpet av de drøye fem månedene det eksperimentelle arbeidet er utført. Til tross for at figur 4.5 a), viser at serie- og shuntmotstanden til Multi4 ikke er endret av de opprinnelige, defekte områdene i figur 4.4 a), er det tydelig fra figur 4.4 a) til b) at enkelte av områdene øker i størrelse. Det kan ikke utelukkes at økningen er med på å redusere modulens effektivitet. Dersom det eksperimentelle arbeidet hadde strukket seg over en lenger tidsperiode, er det mulig at lignende utvikling ville forekommet for Multi1, Multi2 og Multi3. I dette tilfellet underbygger mangelen på endring av defekte områder i de tre modulene, tanken om at det knuste frontglasset på Multi4 er hovedårsaken til at både opprinnelige områder med lav intensitet, i likhet med de nyoppståtte områdene etter skadepåføringen, øker raskere i areal enn hva som er tilfellet for de andre modulene. Følgelig er det sannsynlig at en tilsvarende utvikling kan sees for de andre modulene etter en lenger tidsperiode med påvirkning fra ytre faktorer. Resultatene poengterer at ytre mekaniske faktorer ikke påvirker ytelsen eller tidligere oppståtte defekter i løpet av en slik tidsperiode, med mindre modulen har vært utsatt for en voldsom skade.

## 4.4 Korrigering av karakteriseringsparametere til STC

Målingene som benyttes i oppgaven er gjennomført fra november til april, slik at det er flere tilfeller hvor irradiansen ikke faller innenfor spennet på  $800\text{--}1200\text{ W/m}^2$ , satt i IEC-60904-1. Slik som figur 4.7 viser, har IV-kurvemålinger blitt gjennomført med irradiansverdier helt nede i  $459.0\text{ W/m}^2$ . Det er kun målinger gjennomført 15.04.21 hvor målte irradiansverdier er innenfor det definerte spennet. Ved å studere ligning 3.1 for korrigering av målte strømverdier,  $I_1$ , vises det at desto mindre den målte irradiansverdien,  $G_1$ , er, desto større vil den korrigerte strømverdien,  $I_2$ , være. Resultatet er en korrigert verdi for strøm ved STC,  $I_2$ , som kan være unaturlig høy. Dette ettersom ligning 3.1 er definert i IEC-60891 med en hensikt om å korrigere strøm- og spenningsverdier som er målt i henhold til IEC-60904-1. For målinger gjennomført 06.11.20, 26.11.20, 05.02.21 og 09.03.21 ikke dette tilfellet, da irradiansverdiene faller utenfor standarden. Med den potensielle muligheten at beregnede  $I_2$ -verdier er unaturlig høye, medfølger det at de presenterte resultatene for  $I_{SC}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$  og FF ved STC også er større enn de ville vært dersom korrigeringen ble gjennomført i henhold til standarden.

På vinterhalvåret henger lave irradiansverdier som oftest sammen med en lav omgivelsestemperatur,  $T_1$ . Temperaturkoeffisienten,  $\alpha_{rel}$ , er definert som en positiv verdi, og følgelig er  $\alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)$ -leddet i ligning 3.1 positivt så lenge  $T_1$  har lavere verdi enn  $T_2$ . Tabell C.5 og C.6 fra tillegg C, samt tabell 4.1 og 4.5 fra målinger gjennomført 26.11.20, i tillegg til tabell C.7, C.8, C.9 og C.10 i tillegg C fra målinger gjennomført 05.02.21 viser tilfeller hvor irradiansen er lavere enn  $800\text{ W/m}^2$ , i tillegg til at modultemperaturen ved OPC er satt av IV-kurve apparatet til å være lavere enn  $25^\circ\text{C}$ . I 7 av de 8 målingene er den korrigerte verdien for  $I_{SC}$  ved STC beregnet til å være større enn verdien definert av

produsenten. Unntaket er naturligvis korrigeringen gjort på Multi4, hvor parameteren har blitt vesentlig svekket grunnet skadepåføring. I de 7 tilfellene kan den lave temperaturen ha fungert som en forsterkning av den kunstig høye korrigerede strømverdien. Samtidig viser IV-kurvemålinger gjennomført med irradians under  $800 \text{ W/m}^2$  den 09.03.21, presentert i tabell C.11, C.12, C.13 og C.14 i tillegg C, samt tabell C.1, C.2, C.3 og C.4 i tillegg C fra gjennomføring den 06.11.20, at den korrigerede  $I_{SC}$ -verdien i 7 av 8 tilfeller, hvor Multi4 er unntaket, også kan overskride verdien satt av produsenten, til tross for at  $T_1$  ikke er lavere enn  $T_2$ . Grunnen til overskridelsene kan være at produsenten, Swemodul, muligens har tatt høyde for degraderinger i de definerte nominelle kurvene for IV og effekt. Dette forklarer hvorfor andre karakteriseringsparametere overskrider definerte verdier ved STC. Ettersom de benyttede solcellemodulene ikke har stått utendørs lenger enn omtrentlig 6 måneder ved det eksperimentelle arbeidets avslutning, betyr det at de eventuelt forutsette degraderingene enda ikke har forekommet i modulene. Totalt sett fører målingene som ikke gjennomføres i henhold til det satte irradiansspennet til en økt usikkerhet knyttet til korrigeringene som gjøres, og underbygger viktigheten av at målingene gjennomføres i tråd med IEC-60904-1.

Det faktum at målte irradiansverdier ved gjennomføring av IV-kurvemålinger ikke faller innenfor spennet satt i IEC-60904-1, vil også ha en innvirkning på de korrigerede spenningsverdiene,  $V_2$ . I ligning 3.2 er det to korrigeringsparametre,  $a$  og  $\kappa'$ , med ukjent verdi, da IV-kurve apparatet ikke oppgir bestemmelsen av disse. Følgelig er det utfordrende å få kjennskap til hvor mye korrigeringen til STC avviker fra det faktiske resultatet dersom målingen ble gjennomført ved STC. Samtidig benyttes også forholdet mellom den målte irradiansverdien,  $G_1$ , og korrigeringsverdien for irradians,  $G_2$ , samt differansen mellom den korrigerede strømmen,  $I_2$ , og den målte strømmen ved OPC,  $I_1$ . Dermed følger det at ligning 3.2, og de korrigerede spenningsverdiene denne beregner, brukes på verdier som ikke samsvarer med standarden satt i IEC-60904-1. Resultatene bør derfor benyttes med en usikkerhet knyttet til hvorvidt de korrigerede verdiene stemmer overens med solcellemodulens faktiske ytelse ved STC. Ut i fra ligningen kan det derimot ikke kommenteres om de korrigerede spenningsverdiene,  $V_2$ , vil kunne være unaturlig høye eller unaturlig lave, grunnet ukjente verdier på de ovenfornevnte korrigeringsparametrene.

Det er tidligere, under kapittel 2.2, blitt gjort rede for hvordan modultemperatur påvirker IV-kurven til en solcellemodul. I etterkant av skadepåføring er det ikke lenger gitt at parameterne tilknyttet modulens IV-kurve endres på samme måte ved temperaturvariasjoner som forventet før skaden ble påført. En IV-kurvemåling gjennomført ved bestemte OPC kan kun beskrive hvordan defekten påvirker modulen ved disse gitte betingelsene. Temperaturkorrigeringen til STC, altså  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , er ikke tilpasset defektens påvirkning på de ulike korrigeringsparametrene. I følge *Bjørn L. Aarseth og Erik S. Marstein* [30] vil en korrigering av IV-kurvemålinger for defekte moduler følgelig kun være en approksimasjon.

Vinkelen mellom solinnstråling og solcellemodul måles ved bruk av en *solskive* tilhørende måleapparatet for IV-kurve. En konsekvens av å gjennomføre slike målinger i Norge på vinterhalvåret er at solen er for lav på himmelen til å oppfylle denne testbetingelsen. Målinger hvor testbetingelsen ikke er oppfylt fører til en økt usikkerhet knyttet til de korrigerede verdiene. Den 26.11.20, samt 05.02.21 var dette tilfellet, mens 09.03.21 og 15.04.21 var vinkelen mellom solinnstrålingen og modulen innenfor det godkjente spennet. 06.11.20 mangler et slikt resultat.

Artikkelen *The Impact of Cracked Solar Cells on Solar Panel Energy Delivery* [9] tar for seg effekten av degraderinger og sprekker ved både lave irradiansverdier og ved 1000 W/m<sup>2</sup>. Sentrale deler av dens konklusjon er også meget relevant for arbeidet gjort i denne masteroppgaven. Først og fremst konkluderes det med at solcellemoduler som inneholder mange celler med sprekker, vil ha en forverring i ytelse ved lave irradiansverdier sammenlignet med STC. Ytelsen ved STC blir derfor ofte en overestimering av modulens ytelse [9]. Følgelig, slik som poengtert i artikkelen, vil mengden produsert effekt være lavere ved nordligere, mindre solrike lokasjoner. Særlig på vinterhalvåret, da størsteparten av denne masteroppgaven har funnet sted, vil effekten av de påførte skadene føre til større effekttap enn i løpet av de solrike månedene. Det er derfor særlig viktig i slike områder å studere effekten av skader på solcellemoduler ved faktiske OPC, og ikke kun ta for seg korrigerede og muligens overestimerte parametere.

## 4.5 Diskontinuitet ved gjennomføring av hovedeksperiment 2

Som beskrevet i delkapittel 3.3.2, ble fremgangsmåten for EL-bilde takingen endret underveis. De første tre datoene for gjennomføring ble påsatt spenning satt til  $V_{oc}$ , og strømmen ble stilt deretter. Under gjennomføring av de to siste avbildningene ble strømmen stilt inn til en forhåndsbestemt verdi, slik at spenningen justerte seg etter denne verdien. Den 16.03.21 og 15.04.21 ble det i tillegg gjennomført bildeserier for tre ulike påsatte verdier for strøm og spenning per modul. For disse to datoene var  $I_{sc}$  første valgte påsatte verdi for strømmen, etterfulgt av  $0,5I_{sc}$ , og til slutt  $0,1I_{sc}$ . Resultatet er at når EL-bilder tas ved  $0,1I_{sc}$  har modulen blitt varmere enn dersom en startet med denne målingen og deretter økte den påsatte strømmen. Slik som tabell 4.3, 4.8 og 4.10 D.1 (i vedlegg D) viser, er verdien på den påsatte strømmen i 3. måling, som er blitt forsøkt gjort ved  $0,1I_{sc}$ , høyere enn ved de tre tidligere gjennomførte målingene. I praksis ble strømmen stilt til den verdien som ga en påsatt spenning lik  $V_{oc}$ . Den økte verdien for påsatt strøm ved samme spenningsverdi som tidligere,  $V_{oc}$ , tyder på at modulen har blitt varmere. Høyere strøm, betyr flere tilførte eksterne ladningsbærere, og dermed flere ladningsbærere som kan rekombinere og resultere i et sterkere EL-signal detektert med SWIR kameraet. Denne diskontinuiteten i utføringen fører til at det i tillegg til andre faktorer, som utetemperatur, vil forekomme ekstra variasjon i det detekterte EL-signalet utsendt fra solcellemodulene. Til tross for dette, har den benyttede metoden for normalisering ført til at påsatt strøm ikke i stor grad påvirker intensiteten i de presenterte EL-bildene, og denne utfordringen minimeres. Ved å benytte en antatt upåvirket referansecelle for hver modul, vil variasjonene mellom hver måling ha mindre verdi, da referansecellen på samme vis som de resterende cellene i modulen har et EL-signal tilsvarende den påsatte strømmen. Slik som både Multi3 og Multi4 har vist tegn til, er det først ved høye verdier for påsatt strøm og spenning at enkelte defekter kommer til syne. For slike tilfeller vil følgelig ikke normaliseringen hjelpe på diskontinuiteten i målingene, og resultatene kan av denne grunn variere mellom de ulike datoene for gjennomføring av hovedeksperiment 2.

## Kapittel 5

# Konklusjon

Resultater fra hovedeksperiment 1 og hovedeksperiment 2 viser en tydelig endring i ytelse hos Multi4. De harde slagene på modulens fremside som resulterte i knust frontglass, er helt utslagsgivende for utviklingen av modulens ytelse de neste månedene. IV-kurvene viste en gradvis utvikling av et *hopp*, som antas å skyldes at sprekker fører til elektrisk isolering av større områder enn tidligere. Forventningen om å ikke se en tydelig utvikling på verken EL-bilder eller IV-kurver i løpet av tidsperioden etter skadepåføring stemmer derfor ikke overens med presenterte resultater for Multi4. Den kraftige nedgangen i effektproduksjon er en følge av sprekkdannelse parallelt med modulens samleskinner. Resultater for Multi4 støtter oppunder tidligere forskning som trekker frem parallelle sprekker som dominerende, har høy sannsynlighet for å resultere i elektrisk isolerte celleområder samt gir økt sannsynlighet for degradering. I tillegg inneholder Multi4 en sprekk fra produksjon, frakt eller montering som er vinkelrett på tre samleskinner. Modulens IV-kurve viser at sprekken ikke påvirker effektiviteten. Konklusjonen er derfor at ikke alle sprekke-dannelse har en signifikant påvirkning på modulytelsen, samt at sprekker vinkelrett på samleskinner ikke påvirker effektproduksjon i betydelig grad.

For Multi4 viser  $I_{sc}$ -verdier korrigert til STC, hvordan verdien synker for hver gjennomført måling. Det reduserte, aktive modularealet og den synkende strømverdien viser hvor tydelig denne sammenhengen er. Unntaket er EL-bildet med en påsatt spenning på  $V_{oc}$  den 15.05.21, som viste en solcellemodul med mindre defekte områder enn tidligere. Til tross for dette viste den korrigerede verdien for  $I_{sc}$  en nedgang fra forrige måling. Ved å studere resultatbilder ved høyere påsatte strømverdier kom flere områder med svakere EL-signal til syne. Variasjonen kan derfor skyldes at områdene ikke er fullstendig elektrisk isolert. Nok en gjennomføring av hovedeksperiment 2 er nødvendig for å kommentere dette ytterligere.

Resultater fra hovedeksperiment 1 gjennomført på Multi3, viser ingen klar endring i verken form på IV- og effektkurver, eller på parametere benyttet for karakterisering i løpet av tidsperioden satt av til oppgaven. Enkelte områder med svak intensitet vises i modulens EL-bilder fra før skadepåføring, men ser i motsetning til for Multi4 ikke ut til å endres over tid. Da formen på modulens IV- og effektkurver ikke avviker fra formen til de tilsvarende nominelle kurvene, er det tydelig at disse små områdene i EL-bildene ikke påvirker ytelsen til modulen i løpet av tidsperioden.

Den første påførte skaden på Multi3 resulterte ikke i synlige endringer i dens utsendte EL-

---

signal. Enkelte endringer kan svakt detekteres i de to cellene som mottok moderate slag fra modulens bakside under andre skadepåføring, samt i enkelte omkringliggende celler. Endringen ble tydeligere ved å ta i bruk EL-bilder med høyere påsatt strøm, og subtraksjon av EL-bilder fra før og etter andre skadepåføring viser klare endringer i detektert signal. Resultatet tyder på at det er elektrisk kontakt i de påførte sprekke, og forklarer hvorfor de oppståtte defektene ikke påvirker modulens evne til å generere elektrisk effekt. Totalt sett kan det konkluderes med at solcellemodulens ytelse, i løpet av tidsperioden, ikke er svekket grunnet de to forsøkene på å skade modulen fra dens bakside. De svake intensitetsendringene etter andre skadepåføring viser at sprekkdannelser parallelt med samleskinnene forekommer oftest. Funnet stemmer overens med tilsvarende resultat for Multi4, og tydeliggjør at dette er den mest fremtredende retningen på sprekkdannelser.

De to referansemodulene, Multi1 og Multi2, viser i liket med Multi3 ingen klar endring i karakteriseringsparametere, form på IV- og effektkurver eller i detektert EL-signal ved påsatt spenning tilsvarende  $V_{oc}$ . Opprinnelige defekte områder i modulenes EL-bilder, oppstått i løpet av produksjonsprosessen, transport eller installasjon, påvirker ikke modulenes ytelse, eller endres i løpet av de drøye fem månedene hovedeksperimentene er utført. Små variasjoner i sentrale parametere for de ulike datoene for gjennomføring kan sees for begge modulene, men virker å skyldes store ulikheter i OPC under testgjennomføring. Det er kun den siste datoen for gjennomføring av hovedeksperiment 1 at testkravene for gjennomføring av IV-kurvemålinger er oppfylt når hensikten er å korrigere målinger til STC. Derfor er det rimelig å konkludere med at avvikene skyldes korrigerende av målinger. Konklusjonen fører med seg at heller ikke naturlige degraderinger har forekommet i noen av de fire modulene i løpet av tidsperioden.

Tidsperioden fra de første skadene ble påført modulene den 26.11.20 til siste gjennomførte måling den 15.04.21 er mer enn tilstrekkelig til å kunne konkludere med en tydelig utvikling av skaden påført Multi4. Tilfellet er motsatt for Multi3, hvor resultater fra de to hovedeksperimentene viser lite eller ingen tegn til endring i løpet av tidsperioden. Det knuste frontglasset til Multi4 er hovedårsaken til den raske utviklingen, da det ikke lenger i like stor grad beskytter modulens aktive lag mot ytre faktorer. Månedene etter skadepåføring på Multi4 har inneholdt store variasjoner i værforhold, noe som kan ha resultert i enda raskere utvikling enn dersom det eksperimentelle arbeidet ble utført i løpet av sommermånedene.

Det er enda en lang vei å gå innen forskning på sprekkdannelser i mc-Si solcellemoduler, og det er store uenigheter angående hvordan de påvirker effektproduksjon. Kombinasjonen av EL-bilder og IV-kurvemålinger er en effektiv måte å studere romlig fordeling av defekter og deres påvirkning på modulytelse. Resultater presentert i denne masteroppgaven viser både tegn til å stemme svært godt, så vel som ikke overens med tidligere gjennomført forskning. Sentrale funn fra hovedeksperiment 1 og hovedeksperiment 2 gjennomført på de fire solcellemodulene oppsummeres ved:

- Den mest dominerende retningen på sprekkdannelser er parallelt med modulens samleskinner
- Ikke alle sprekkdannelser har en signifikant påvirkning på effektproduksjon
- Alvorlighetsgraden til defekten er med på å avgjøre hvor hurtig en eventuell degradering forekommer

## Kapittel 6

### Videre arbeid

Et videre arbeid bør ha tre fokusområder. Først og fremst bør videre skadeutvikling av Multi4 studeres. Et sentralt aspekt er hvor redusert modulytelsen blir før utviklingen stagnerer. Som fokus for Multi3, bør modulen overvåkes videre for å undersøke om de små intensitetsendringene over tid vil utvikle seg til å påvirke modulkarakteristikken. Arbeidet med følgende fokusområde for de to modulene, vil kunne bidra til å føre forskningen et steg nærmere en konklusjon angående hvorvidt parallelle sprekkdannelser i stor grad resulterer i elektrisk isolerte områder og degradering. I tillegg vil et slikt målrettet arbeid føre solcelleindustrien nærmere et mer ideelt moduldesign.

Det tredje fokusområdet er kombinasjonen av EL avbildning og IV-kurvemålinger for defektgjenkjenning. Oppgaven har vist at kombinasjon av EL avbildning og IV-kurvemålinger bør benyttes under videre forskning, da dette gir muligheten til å undersøke mer konkrete sammenhenger mellom endret EL-signal og form på IV-kurven. I det videre arbeidet bør IV-kurvemålinger gjennomføres med irradiansverdier mellom  $800\text{-}1200\text{ W/m}^2$ , slik at karakteriseringsparametere korrigert til STC kan studeres med mindre tilknyttet usikkerhet.

# Bibliografi

- [1] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2020*. Paris, IEA; 2020 [hentet 05.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> .
- [2] D. Chung, D. Feldman, R. Fu, R. Jones-Albertus, D. Jordan, S. Kurtz, K. Horowitz og M. Woodhouse. *On the Path to SunShot: The Role of Advancements in Solar Photovoltaic Efficiency, Reliability, and Costs*. National Renewable Energy Laboratory, U.S Department of Energy, 2016.
- [3] O. Breitenstein, J. Knoch, J. I. van Mülken, T. M. Pletzer og S. Rißland. *Influence of cracks on the local current-voltage parameters of silicon solar cells*. Progress in Photovoltaics: Research and applications, vol. 23: s. 428-436, 2015.
- [4] B. B. Van Aken, M. Schwark, J. Slamberger og P. Virtic. *Comparison of potential-induced degradation (PID) of n-type and p-type silicon solar cells*. Energy , vol. 161: s. 266-276, 2018.
- [5] J. Berghold, S. Koch, C. Sobottka og T. Weber. *Outdoor electroluminescence imaging of crystalline photovoltaic modules: comparative study between manual inspections and drone-based aerial surveys*. 2nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, s. 1736-1740, 2016.
- [6] M. Dales, M. Dhimish, V. Holmes og B. Mehrdadi. *The impact of cracks on photovoltaic power performance*. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, vol. 2: s. 199-209, 2020.
- [7] S. Kajari-Schröder, M. Köntges og I. Kunze. *Criticality of cracks in PV modules*. Energy Procedia, vol. 27: s. 658-663, 2012.
- [8] G. E. Georghiou, B. Kubiack, T. Krametz, C. Mayr, O. Papanastasiou, L. Paragyri, M. Theristis. *Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review*. Renewable Energy , vol. 145: s. 2387-2408, 2020.
- [9] D. Colvin, K. O. Davis, A. M. Gabor, M. Hopwood, M. W. Rowell, E. J. Schneller og H. Seigneur. *The Impact of Cracked Solar Cells on Solar Panel Energy Delivery*. 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), s. 810-813, 2020.
- [10] O. Isabella, K. Jäger, A. Smets, R. Van Swaij og M. Zeman. *Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT Cambridge Ltd, 2016.

- [11] G. M. Wyller. *Correlation of defect luminescence and recombination in multicrystalline silicon*. Masteroppgave, Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 2015.
- [12] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Types of Recombination*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 15.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/types-of-recombination>.
- [13] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Lifetime*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 18.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/lifetime>.
- [14] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Diffusion Length*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 18.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/diffusion-length>.
- [15] B. V. Chikate og Y. A. Sadawarte. *The Factors Affecting the Performance of Solar Cell*. International Conference on Quality Up-gradation in Engineering, Science and Technology, 2015.
- [16] K.N. Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, 2002.
- [17] C. C. Hah, C. S. Kwang A. Q. Malik og L. C. Ming. *Characterization of Multicrystalline Solar Cells*. ASEAN Journal on Science & Technology for Development, vol. 23(no. 1&2): s. 97-106, 2006.
- [18] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Series Resistance*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 13.04.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>.
- [19] K. A. Berger, T. Friesen, U. Jahn, K. Kato, S. Kurtz, M. Köntges, H. Liu, C. Packard og M. V. Iseghem. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. International Energy Agency: Photovoltaic Power Systems Programme, 2014.
- [20] V. d'Alessandro, S. Daliento, M. Garigiulo og P. Guerriero. *A straightforward method to extract the shunt resistance of photovoltaic cells from current-voltage characteristics of mounted arrays*. Solid-State Electronics, vol. 63: s. 130-136, 2011.
- [21] E. C. Bortoni, D. M. Fèbba, A. F. Oliveira og R. M. Rubinger. *Impacts of Temperature and irradiance on polycrystalline silicon solar cells parameters*. Solar Energy, vol. 174: s. 628-639, 2018.
- [22] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Effect of Temperature*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 25.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>.
- [23] I. E. Høiaas. *Hyperspectral imaging as a tool to study solar induced photoluminescence from PV modules*. Masteroppgave, Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 2019.
- [24] S. G. Bowden og C. B. Honsberg. *Electroluminescence*. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 27.01.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/electroluminescence>.



- [25] Teledyne Princeton Instruments. *InGaAs Cameras: The Basics* [hentet 20.04.21]. Tilgjengelig fra: <https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/ingaas-sensors-the-basics>.
- [26] Xenics Infrared Solutions. *User Manual. Xeva FPA Cameras*. 2015.
- [27] Swemodule AB. *Installation intruction for Solar Photovoltaic Modules*. 2013.
- [28] IEC. *60891, Photovoltaic devices: Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*. Edition 2.0, 2009.
- [29] IEC. *60904-1, Photovoltaic devices–Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*. Edition 3.0, 2020.
- [30] B. L. Aarseth og E. S. Marstein. *Defect recognition and power loss estimation of PV systems using infrared thermography*. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, s. 1563-1568, 2019.
- [31] U. Eitner, S. Kajari-Schröder, M. Köntges og I. Kunze. *Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests*. Solar Energy Materials Solar Cells , vol. 95: s. 3054-3059, 2011.
- [32] B. Bjørneklett, X. Breitenmoser, S. Kajari-Schröder, M. Köntges og I. Kunze. *The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks*. Solar Energy Materials Solar Cells, vol. 95: s. 1131-1137, 2011.

Tillegg A

## Pythonkode for bildebehandling av EL-bilder

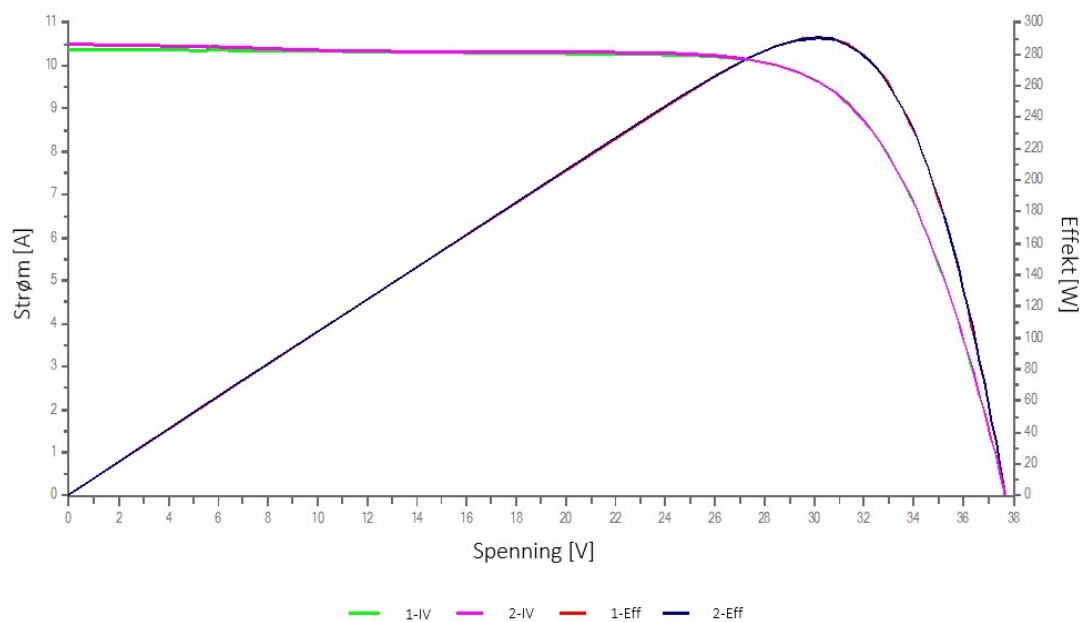
```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2
3
4 import glob
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import skimage
8
9 """
10 Koden er nummerert i henhold til stegene i figur 3.6
11 """
12
13
14 # 1. Importerer bakgrunnsbilder
15 bakgrunn = glob.glob('*.png')
16 alle_bakgrunn = np.array([skimage.io.imread(bakgrunn[i]).astype(
17     np.int16) for i in range(len(bakgrunn))])
18
19
20 # 1. Importerer EL-bilder
21 EL = glob.glob('*.png')
22 alle_EL = np.array([skimage.io.imread(EL[i]).astype(
23     np.int16) for i in range(len(EL))])
24
25
26 # 1. Beregner gjennomsnittsbilde av bakgrunnsbilder
27 gjsnitt_bakgrunn = np.mean(alle_bakgrunn, axis=0)
28
29
30 # 1. Beregner gjennomsnittsbilde av EL-bilder
31 gjsnitt_EL = np.mean(alle_EL, axis = 0)
32
33
34 # 2. Trekker gjennomsnittsbildet av bakgrunnsbilder fra gjennomsnittsbildet
35 # av EL-bilder
36 resultat = np.subtract(gjsnitt_EL, gjsnitt_bakgrunn)
37
38
39 # 3. Manuell utvelgelse av 15 x 15 piksler (verdiene er kun eksempler)
40 upåvirket_celle = resultat[195:210, 75:90]
41
42
43 # 3. Gjennomsnittsverdi av de utvalgte pikslene
44 gjsnitt_celle = np.mean(upåvirket_celle)
45
46
47 # 4. Alle piksler i EL-bildet deles på gjennomsnittsverdien
48 nytt_resultat = resultat/gjsnitt_celle
49
50
51 # 4. Presenterer resultatbildet
52 plt.figure()
53 plt.imshow(nytt_resultat)
54 plt.clim(0, 1.75)
55 plt.colorbar()
56 plt.show()

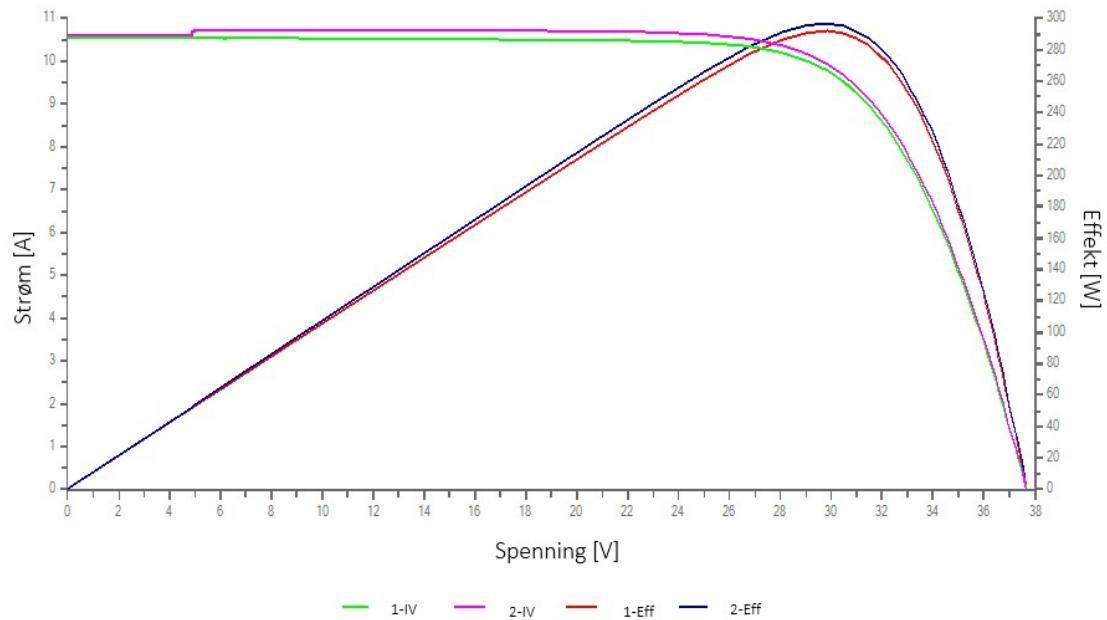
```

## Tillegg B

# Hovedeksperiment 1 - Multi2



Figur B.1: IV- og effekt(Eff)kurver korrigert til STC for Multi1 og Multi2 den 06.11.20. IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.



Figur B.2: IV- og effekt(Eff)kurver korrigert til STC for Multi1 og Multi2 den 15.04.21. IV-kurver leses av med spenning på x-aksen og strøm på y-aksen, mens effektkurver leses av med spenning på x-aksen og effekt på y-aksen.

Tabell B.1: Målte og beregnede verdier for Multi2 for alle datoer for gjennomføring av hovedeksperiment 1. De presenterte verdiene er målte verdier korrigert til STC.

	06.11.20	26.11.20	05.02.21	09.03.21	15.04.21
$P_{max}$ [W]	280.73	301.34	294.20	291.98	296.03
$V_{MPP}$ [V]	28.95	29.90	30.85	29.84	29.87
$I_{MPP}$ [A]	9.70	10.08	9.54	9.79	9.91
$V_{OC}$ [V]	36.59	37.6 9	37.69	37.73	37.72
$I_{SC}$ [A]	10.58	10.69	10.52	10.52	10.58
$\eta$ [%]	19.23	20.64	20.15	20.00	20.28
FF	0.73	0.75	0.74	0.74	0.74

## Tillegg C

# Korrigerings av målinger ved OPC til STC

I tillegg C inkluderes tabeller som ikke er presentert tidligere for korrigerings av sentrale solcelleparametere fra OPC til STC.

### Gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 06.11.20

*Tabell C.1:* Målte og beregnede verdier for Multi1 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 06.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på  $594.2 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $34.44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	164.96	280.32
$V_{MPP}$ [V]	28.67	28.95
$I_{MPP}$ [A]	5.75	9.68
$V_{OC}$ [V]	35.53	36.59
$I_{SC}$ [A]	6.20	10.44
$\eta$ [%]	19.01	19.20
FF	0.75	0.73

*Tabell C.2:* Målte og beregnede verdier for Multi2 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 06.11.20 OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på  $595.2 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $34.47 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	165.19	282.71
$V_{MPP}$ [V]	28.67	28.95
$I_{MPP}$ [A]	5.76	9.70
$V_{OC}$ [V]	35.53	36.59
$I_{SC}$ [A]	6.29	10.58
$\eta$ [%]	19.01	19.37
FF	0.74	0.73

Tabell C.3: Målte og beregnede verdier for Multi3 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 06.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 598.0 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 32.86 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	168.15	285.67
$V_{MPP}$ [V]	28.97	29.24
$I_{MPP}$ [A]	5.81	9.77
$V_{OC}$ [V]	35.72	36.78
$I_{SC}$ [A]	6.28	10.57
$\eta$ [%]	19.26	19.57
FF	0.75	0.73

Tabell C.4: Målte og beregnede verdier for Multi4 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 06.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 601.9 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 35.31 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	166.42	282.71
$V_{MPP}$ [V]	28.61	28.88
$I_{MPP}$ [A]	5.82	9.79
$V_{OC}$ [V]	35.46	36.52
$I_{SC}$ [A]	6.35	10.69
$\eta$ [%]	18.94	19.36
FF	0.74	0.72

## Gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 26.11.20

Tabell C.5: Målte og beregnede verdier for Multi1 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 26.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 459.7 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 15.74 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	140.13	299.74
$V_{MPP}$ [V]	30.55	29.84
$I_{MPP}$ [A]	4.59	10.05
$V_{OC}$ [V]	37.35	37.69
$I_{SC}$ [A]	4.86	10.63
$\eta$ [%]	20.88	20.53
FF	0.78	0.75

Tabell C.6: Målte og beregnede verdier for Multi2 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 26.11.20. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 460.0 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 13.52 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	141.58	301.34
$V_{MPP}$ [V]	30.78	29.90
$I_{MPP}$ [A]	4.60	10.08
$V_{OC}$ [V]	37.35	37.69
$I_{SC}$ [A]	4.88	10.69
$\eta$ [%]	21.08	20.64
FF	0.78	0.75

## Gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 05.02.21

Tabell C.7: Målte og beregnede verdier for Multi1 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 05.02.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 558.3 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 10.27 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	161.30	278.88
$V_{MPP}$ [V]	33.83	32.30
$I_{MPP}$ [A]	4.77	8.63
$V_{OC}$ [V]	38.28	37.70
$I_{SC}$ [A]	5.93	10.43
$\eta$ [%]	19.79	19.10
FF	0.71	0.71

Tabell C.8: Målte og beregnede verdier for Multi2 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 05.02.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 561.3 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 8.55 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	172.97	294.20
$V_{MPP}$ [V]	32.71	30.85
$I_{MPP}$ [A]	5.29	9.54
$V_{OC}$ [V]	38.52	37.69
$I_{SC}$ [A]	5.86	10.52
$\eta$ [%]	21.10	20.15
FF	0.77	0.74



Tabell C.9: Målte og beregnede verdier for Multi3 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 05.02.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 559.5 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 10.49 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	174.14	298.81
$V_{MPP}$ [V]	32.07	37.66
$I_{MPP}$ [A]	5.43	9.81
$V_{OC}$ [V]	38.26	37.66
$I_{SC}$ [A]	5.94	10.69
$\eta$ [%]	21.32	20.47
FF	0.77	0.74

Tabell C.10: Målte og beregnede verdier for Multi4 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 05.02.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 560.5 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 14.96 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	61.97	104.95
$V_{MPP}$ [V]	29.73	28.01
$I_{MPP}$ [A]	2.08	3.75
$V_{OC}$ [V]	37.70	37.69
$I_{SC}$ [A]	4.05	7.28
$\eta$ [%]	7.57	7.19
FF	0.41	0.38

## Gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 09.03.21

Tabell C.11: Målte og beregnede verdier for Multi1 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 09.03.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 751.3 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 38.17 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	207.77	291.09
$V_{MPP}$ [V]	28.03	29.82
$I_{MPP}$ [A]	7.41	9.76
$V_{OC}$ [V]	35.59	37.69
$I_{SC}$ [A]	7.94	10.43
$\eta$ [%]	18.94	19.94
FF	0.74	0.74

Tabell C.12: Målte og beregnede verdier for Multi2 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 09.03.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på  $750.5 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $36.87 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	209.08	291.98
$V_{MPP}$ [V]	28.20	29.84
$I_{MPP}$ [A]	7.41	9.79
$V_{OC}$ [V]	35.73	37.73
$I_{SC}$ [A]	7.98	10.52
$\eta$ [%]	19.08	20.00
FF	0.73	0.74

Tabell C.13: Målte og beregnede verdier for Multi3 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 09.03.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på  $751.0 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $37.09 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	208.21	290.83
$V_{MPP}$ [V]	28.09	29.75
$I_{MPP}$ [A]	7.41	9.78
$V_{OC}$ [V]	35.70	37.69
$I_{SC}$ [A]	8.02	10.53
$\eta$ [%]	18.99	19.92
FF	0.73	0.73

Tabell C.14: Målte og beregnede verdier for Multi4 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 09.03.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på  $748.7 \text{ W/m}^2$  og en modultemperatur på  $43.56 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	62.42	88.72
$V_{MPP}$ [V]	26.09	28.18
$I_{MPP}$ [A]	2.39	3.15
$V_{OC}$ [V]	35.00	37.69
$I_{SC}$ [A]	4.97	6.54
$\eta$ [%]	5.71	6.08
FF	0.36	0.36

---

## Gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 15.04.21

Tabell C.15: Målte og beregnede verdier for Multi1 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 15.04.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 918.7 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 35.52 °C.

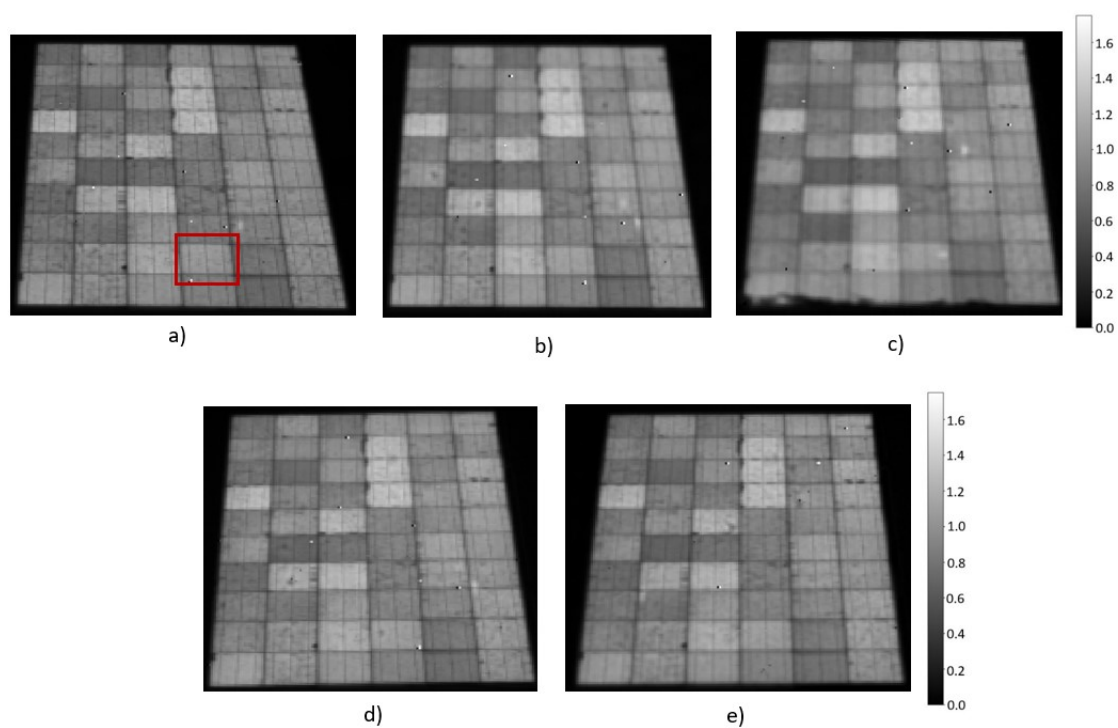
	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	258.26	291.55
$V_{MPP}$ [V]	28.56	29.87
$I_{MPP}$ [A]	9.04	9.76
$V_{OC}$ [V]	36.39	37.69
$I_{SC}$ [A]	9.75	10.53
$\eta$ [%]	19.25	19.97
FF	0.73	0.73

Tabell C.16: Målte og beregnede verdier for Multi2 ved gjennomføring av hovedeksperiment 1 den 15.04.21. OPC under gjennomføring av IV-kurve målingen var en irradians på 949.9 W/m<sup>2</sup> og en modultemperatur på 24.25 °C.

	Måling ved OPC	Korrigert til STC
$P_{max}$ [W]	281.98	296.03
$V_{MPP}$ [V]	29.96	29.87
$I_{MPP}$ [A]	9.41	9.91
$V_{OC}$ [V]	37.68	37.72
$I_{SC}$ [A]	10.04	10.58
$\eta$ [%]	20.33	20.28
FF	0.75	0.74

## Tillegg D

### Hovedeksperiment 2 - Multi2



Figur D.1: Normaliserte EL-bilder av Multi2 gjennomført a) 06.11.20, b) 26.11.20, c) 05.02.21, d) 16.03.21 (3. måling) og e) 15.04.21 (3. måling). Påsatte strøm og spenningsverdier benyttet for EL-avbildningen vises i tabell D.1. Skalaen viser intensiteten til det utsendte EL-signalet i forhold til den antatt upåvirkede cellen (med verdier på 1), slik at mørke områder har et svakere signal enn de lysere områdene. Cellen markert i rødt er den benyttede referansecellen.

---

Tabell D.1: Avleste verdier for påsatt spenning og strøm for Multi2 ved alle datoer for gjennomføring av EL avbildning. Den 16.03.21 og 15.04.21 ble tre påsatte strøm- og spenningsverdier benyttet for EL avbildning, mens de tidligere målingene kun bestod av en påstått verdi.

Dato for gjennomføring	Påsatt spenning, [V]	Påsatt strøm, [A]
06.11.20	-	-
26.11.20	37.7	1.5
05.02.21	37.7 - 37.8	0.7
16.03.21	1. 41.7	1. 8,8
	2. 39.5	2. 4.4
	3. 37.7	3. 2.1
15.04.21	1. 41.7	1. 8.5
	2. 40.3	2. 4.4
	3. 37.7	3. 2.2



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway