



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Studie av korrelasjon mellom fotoluminescens og IV-kurver i solcellemoduler

A study of correlation between
photoluminescence and IV-curves in
solar modules

Mari Valle Kjelby

Miljøfysikk og fornybar energi

Forord

Denne oppgaven fullfører min utdanning innen Miljøfysikk og fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Dette har vært en lang reise, og det er mange personer som har hjulpet meg underveis.

Jeg vil rette en takk til min hovedveileder Espen Olsen og tilleggsveileder Ingunn Burud for god veiledning gjennom hele oppgaven.

Jeg vil også takke mine venner for en kjempefin studietid i Ås. En ekstra takk til Madde, Stine, Nina og Bob for tiden vi fikk oppleve sammen på Hawaii. Takk for alle latterkramper, oppblåsbare madrasser og minner for livet. En gjeng med bedre karma skal man lete lenge etter.

En ekstra stor takk til Madde som har vært min nærmeste siden dag én. I tillegg vil jeg også rette en stor takk til Stine for et kjempefint år som roomies. Videre vil jeg også takke mastergjengen og Uzair for ekstra støtte denne våren.

Sist men ikke minst, tusen takk til mamma, pappa og resten av familien for uvurderlig støtte, kjærlighet og heiarop gjennom studietiden. Jeg er takknemlig for alt dere har gjort for meg på denne reisen.

Mari Valle Kjelby
Ås, mai 2023

Sammendrag

For å opprettholde maksimal effektproduksjon fra solcelleanlegg er det avgjørende med overvåkning av skader og degradering på modulnivå. Bildeanalyse muliggjør overvåkning av enkeltmoduler i større solparker uten å forstyrre energiproduksjonen til den enkelte modulen. Denne masteroppgaven er en del av et større forskningsprosjekt som undersøker om fotoluminescens (PL) kan benyttes til et slikt formål.

Innsamling av data er utført over flere år for totalt 8 silisiumsolceller av typene multikrystallinsk, monokrystallinsk og bifacial moduler med varierende skadeomfang. Det er foretatt målinger av IV-karakteristikk og PL-signal for å studere om disse korrelerer. PL-bilder viser intensiteten på PL-signal fra modulen, som består av emitterte fotoner fra radiativ rekombinasjon. Siden graden av radiativ rekombinasjon avhenger av om fotogenererte ladningsbærere utnyttes i kretsen eller ikke, kan PL-bildene analyseres for friske og defekte områder i modulen.

PL-avbildningen er foretatt i direkte sollys, som krever bildebehandling for å fjerne støy i form av refleksjon. Dette oppnås ved avbildning i to forskjellige driftstilstander med ulik PL-intensitet, eksempelvis åpen og lukket krets. Det benyttes en MOSFET for hurtig veksling mellom driftspunktene. Bildene med svakt PL-signal trekkes fra bildene med sterkt PL-signal slik at resultatet (Δ PL-bilder) kun består av PL-signalet emittert fra modulen. Δ PL-bildene normaliseres og IV-karakteristikken korrigeres til standard testforhold (STC) for å muliggjøre sammenlikning mellom målinger foretatt ved ulike forhold.

Resultatene tyder på sterk korrelasjon mellom Δ PL-bilder og IV-karakteristikk. For tilsynelatende friske moduler er IV-karakteristikken tilnærmet nominell kurve og Δ PL-bildene viser ingen åpenbare effekttreduserende skader. For moduler hvor IV-karakteristikken viser tydelige effekttap underbygges dette ved analyse av Δ PL-bildene som viser tydelige sprekker. For moduler med totalknust modulglass tyder IV-karakteristikken på flere ødelagte celler, noe som også underbygges av Δ PL-bildene.

Abstract

A crucial part of obtaining maximum power production of big solar cell systems is to detect the development of degradation at module level. Image analysis enables monitoring of individual modules in larger solar parks without disturbing the energy production or having to connect to each individual module. This master's thesis is part of a larger project at NMBU with the aim of using photoluminescence for this purpose.

Data collection has been carried out over a period of 4 years for a total of 8 silicon solar modules – four multi crystalline, two mono crystalline, and two bifacial modules. IV characteristic measurements and photoluminescence (PL) imaging have been performed to study the correlation between them. PL images display the intensity of emitted PL signal from a module, which consists of photons emitted due to radiative recombination. The amount of radiative recombination in a solar cell depends on the amount of current extracted, and PL images can therefore be used to analyze faults and degradation of modules. The PL images are acquired in direct sunlight, which requires image processing to remove noise in the form of reflection. This is achieved by photographing the modules at two different operating points with different PL-intensities - open and short circuit. Fast switching between these operating points is achieved by using a MOSFET. To remove the reflection from the images, images with a weak PL signal are subtracted from the images with a strong PL signal so that the result (Δ PL images) only display PL signal emitted from the module. The Δ PL images are normalized and the IV characteristic is corrected to standard test conditions (STC) to enable comparison between measurements taken in different conditions.

The results suggest a strong correlation between the Δ PL images and IV characteristics. For seemingly healthy modules, the IV characteristics resemble the nominal curve and the Δ PL images display no obvious power-reducing damage. In modules where the IV characteristic show obvious power losses, the Δ PL-images substantiate faulty solar cells with obvious cracks. For modules where visual inspection shows a broken module glass, the IV characteristic suggests several broken cells.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Abstract	iv
1 Introduksjon	1
2 Teori	5
2.1 Prinsippet bak solceller	5
2.1.1 pn-overgang	7
2.2 Modulenes oppbygging	8
2.2.1 Mono- og multikrystallinsk solcelle	10
2.2.2 Bifacial solcelle	11
2.3 Solcellekarakterisering	12
2.3.1 Hovedparametere	12
2.3.2 Standard test betingelser	13
2.3.3 IV-kurve	14
Irradians og temperatur	15
Skygging	16
2.3.4 Ekvivalentkrets	16
2.4 Tapsmekanismer	18
2.4.1 Rekombinasjon	19
Radiativ rekombinasjon	19
Shockley-Read-Hall rekombinasjon	20
Auger	21
2.5 Degradering av solceller	21
2.5.1 Spenningindusert degradering	21
2.5.2 Lysindusert degradering	22
2.5.3 Sprekker og mikrosprekker	23
2.6 Fotoluminescens	24

2.6.1	Δ PL-bilder	25
3	Metode og eksperimentelt arbeid	27
3.1	Skadepåføring	30
3.2	Måling av IV-kurver	31
3.2.1	Databehandling av IV-kurver	34
3.3	Innsamling av PL-bilder	35
3.3.1	Bildeanalyse	36
3.4	Visuell inspeksjon av moduler	38
4	Resultater og diskusjon	39
4.1	Multi1	40
4.2	Multi2	44
4.3	Multi3	48
4.4	Bi2	51
4.5	Mono1 og Mono2	55
4.6	Multi4 og Bi1	59
5	Konklusjon	67
6	Videre arbeid	69
	Videre arbeid	70
A	Python-kode	75
B	Utvikling i PL-bilder	77
C	Datablad SweModule	81

Kapittel 1

Introduksjon

Verden står i dag ovenfor store utfordringer knyttet til global oppvarming og energiforsyning. Siden den industrielle revolusjonen på 1700-tallet har det vært enorme mengder klimagassutslipp fra fossile energikilder [1]. På slutten av 1900-tallet ble det tydelig at den globale gjennomsnittstemperaturen har steget med mer enn 1°C siden den før-industrielle tid. Det ble derfor satt i kraft internasjonale tiltak for å redusere utslipp og satse mer på fornybare energikilder [2].

De første internasjonale klimaforhandlingene fant sted under FN-konferansen i 1992, hvor FNs Klimakonvensjon ble etablert [3]. Målet med Klimakonvensjonen var å hindre farlige klimautslipp forårsaket av mennesker. Fokuset på klima og miljø ble stadig større i årene som kom, og særlig klimagassutslipp ble satt på spissen. Parisavtalen ble vedtatt i 2015, og var den første globale klimaavtalen [3] [4]. Parisavtalen krever blant annet at alle land aktivt skal forsterke innsatsen mot å redusere klimautslipp for å redusere global oppvarming. I denne sammenheng har Norge i 2022 meldt inn et mål om å redusere klimagassutslipp med 50-55% innen 2030 [3] [5].

Norge planlegger å nå dette målet ved å satse innen en rekke områder. Eksempler på konkrete tiltak er økning av CO₂-avgiften og lavere avgifter knyttet til resirkulering og klimavennlige alternativer [2]. Generelt sett skal det satses mer på fornybare energiløsninger.

Fornybar energiproduksjon har lenge vært en del av norsk kultur. Allerede før elektrisiteten var oppfunnet ble vannkraft benyttet for å utføre mekanisk arbeid. Da elektrisiteten kom på banen ble vannkraftverkene kilde for strømforsyning. I dag er vannkraft en av de mest utbredte fornybare energikildene i landet, og utgjorde hele 89% av energiproduksjonen i 2020 [6]. En stor fordel med vannkraft er forutsigbarhet i strømproduksjon, hvor sluser

kan åpnes og lukkes etter behov. I senere tid satses det i økende grad på andre fornybare energikilder som vind og sol.

Solen er en ekstrem energikilde som hvert år forsyner jorden med 15.000 ganger mer energi enn det globale årlige forbruket. Foreløpig utgjør solenergi den minste delen av energiproduksjon i Norge i forhold til vann- og vindenergi, men er stadig i rask vekst [7]. I løpet av 2022 økte den totale solkraftproduksjonen med omtrent 149 MWp. Med en totalt installert effekt fra solkraft på 299 MWp betyr dette en dobling i løpet av året [7].

Mer fokus og større satsing på forskning bidrar til stor utvikling i solcellebransjen. Videreutvikling av halvledermaterialer og produksjonsteknikker er eksempler som bidrar til bedre ytelse og redusert pris på modulene. Med utvikling mot billigere og mer effektive solceller blir det mer attraktivt for husstander å investere i solcelleanlegg. Selv om solkraft er mindre forutsigbart enn vannkraft er det likevel flere fordeler ved solceller. Grunnet størrelsen på modulene kan de installeres hvor som helst, eksempelvis på taket av husholdninger og næringsbygg. Dermed gir solceller mulighet for å utnytte ellers ubrukte områder til energiproduksjon. I tillegg bygges det også store solparker som kan bestå av flere hundre tusen solcellemoduler. For å drifte slike solparker er det fordelaktig med overvåkning av modultilstandene for å unngå behov for manuell inspeksjon. På den måten registreres hvilke moduler som bør repareres eller skiftes ut for å opprettholde høyest mulig energiproduksjon i anlegget.

Degradering av solcellemoduler er naturlig og derfor umulig å unngå, men forskjellige typer skader og defekter vil akselerere prosessen. Eksempler på slike skader er sprekker i glass eller halvleder materiale, produksjonsfeil, mekanisk skade ved transport og montering eller andre typer mekanisk stress. Værforhold er spesielt avgjørende for ytre mekanisk stress. Solcelleprodusenter garanterer vanligvis at solcellene etter 25 år skal ha en ytelse på minst 80% av hva de hadde som nye.

Fotoluminiscens er en hyperspektral avbildningsmetode som detekterer radiativ rekombinasjon. Denne formen for rekombinasjon oppstår dersom eksiterte ladningsbærere faller tilbake til grunntilstanden uten å utnyttes til strøm. Energien til ladningsbæreren vil da emitteres i form av et foton. PL-signalet registreres ved hjelp av et kamera som detekterer fotoner i det kortbølgede infrarøde området. Videre kan bildeanalyse benyttes slik at modulen kan analyseres for defekter og tapsmekanismer. Metoden er utbredt

for overvåkning av solceller i laboratoriet under produksjon, men har i senere tid blitt forsket på i forbindelse med avbildning av moduler i direkte sollys.

Denne oppgaven er en del av et forskningsprosjekt på NMBU med motivasjon om å finne en løsning for overvåkning av solparker. Oppgaven undersøker muligheten for å utnytte fotoluminiscens (PL) for overvåking av degradering i modulene. PL-bildene sammenliknes med respektiv IV-karakteristikk for å undersøke korrelasjon i fremstilling av modultilstand. Modulene benyttet i eksperimentet har skader i varierende grad. Enkelte er påført skader med hensikt om å undersøke skadeutvikling over tid, enkelte er skadet fra installasjon utendørs og resten er tilsynelatende friske. Modulene er av tre ulike typer; multikrystallinsk silisium, monokrystallinsk silisium og bifacial-moduler.

Kapittel 2

Teori

For å forstå prinsippene bak IV-karakteristikk og fotoluminescens presenteres først grunnleggende solcelleteori.

Dersom annet ikke spesifiseres er det boken Solar Energy - The Physics and Engineering of photovoltaic conversion [8] som brukes som kilde i dette kapitlet.

2.1 Prinsippet bak solceller

Solceller virker ved å utnytte fotovoltaisk effekt til å generere elektrisk strøm og spenning. Fotovoltaisk effekt betyr at elektroner i et materiale som utsettes for lys vil eksiteres og det dannes elektrisk potensiale. Eksitasjon av elektroner som utsettes for lys kalles fotoelektrisk effekt. Den fotoelektriske effekten ble oppdaget av Albert Einstein i 1905. Han forstod da at lys kan oppfattes som fotoner med en viss mengde energi. Energien til fotonet beskrives ved

$$E = h\nu, \quad (2.1)$$

hvor h er Plancks konstant og ν er frekvensen til lyset. Ved bruk av spesifikke materialer med ønskede egenskaper kan solceller designes for å utnytte den fotovoltaiske effekten best mulig. Disse materialene kalles halvledere. Krystallinsk silisium (c-Si) er eksempel på et halvledermateriale som er ofte brukt i solceller. Halvledere kategoriseres som materialer hvor båndgapet er stort nok til at elektroner ikke kan bevege seg fritt mellom valensbåndet (VB) og ledningsbåndet (LB) ved normal tilstand, men hvor elektronene kan eksiteres ved høy nok tilført energi.

Figur 2.1 viser båndgapet i ulike typer materialer. Metaller har ikke båndgap og leder derfor strøm ekstremt godt. De kalles ledere. Størrelsen på båndgapet i isolatorer derimot gjør at det skal ekstremt mye til før elektronene eksiteres og materialet leder strøm.

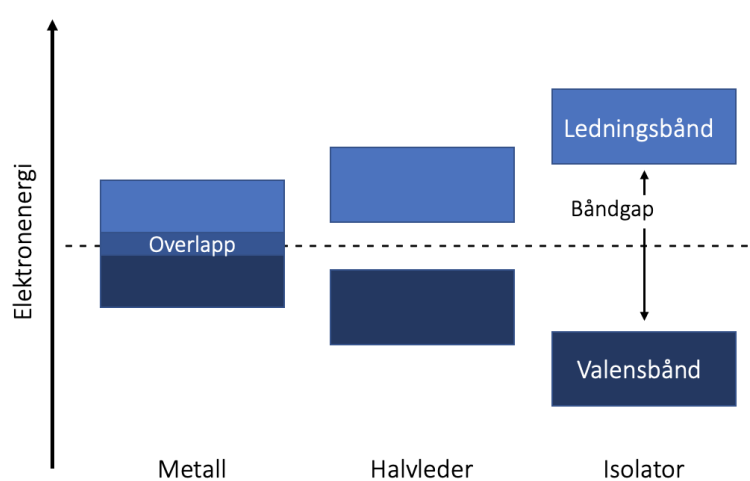


FIGURE 2.1: Sammenlikning av størrelse på båndgap i metaller, halvledere og isolatorer.

I ideelle halvledere kan elektronene kun oppta diskrete energinivåer som befinner seg på kanten av eller i VB og LB. De kan ikke befinne seg i båndgapet. I reelle halvledere er det ikke like enkelt. I virkeligheten er ikke VB og CB flate, men ujevn. Ujevnheten forårsakes av strukturen i halvledermaterialet.

På grunn av ujevnheten i strukturen dannes det direkte og indirekte båndgap som vist på figur 2.2 under. Ved direkte båndgap kreves det kun energi for å eksitere et elektron fra VB til LB. Ved indirekte båndgap (slik som i c-Si) er elektronet avhengig av bevegelsesmengde i tillegg til tilført energi fra et foton. Elektronet får tilført bevegelsesmengde i form av vibrasjoner i krystallgitteret. Denne bevegelsesmengden kan sees på som både bølger og partikler på samme måte som lys, og kalles fononer.

Når elektroner absorberes i LB etterlates det "hull" i VB hvor elektronet befant seg før det ble eksitert. Hullet i VB oppfører seg som en positivt ladet partikkel. En slik sammensetning av eksitert elektron og hull kalles et elektron-hull-par. Dersom det ikke virker ytre krefter på elektron-hull-paret vil elektronet omsider falle tilbake og rekombinere med hullet.

For å utnytte elektron-hull-paret til å utføre arbeid dannes en pn-overgang hvor det dannes et elektrisk felt som enkelt forklart skiller elektronene og hullene fra hverandre. Ved å koble på en ytre krets kan den kjemiske energien

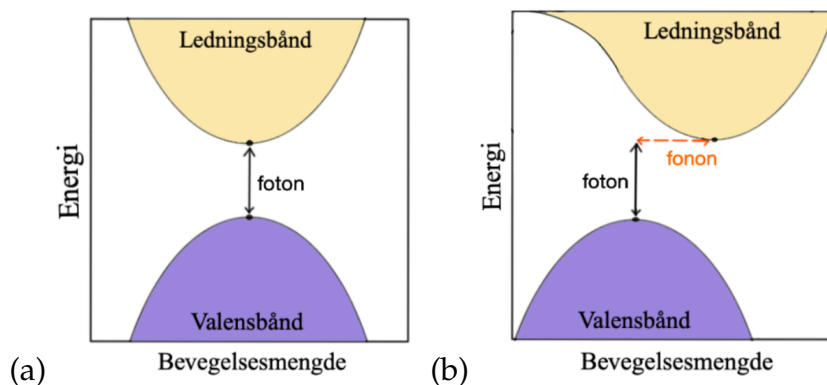


FIGURE 2.2: (a) Direkte båndgap. Ved direkte båndgap kreves det kun tilførsel av nok energi for at et elektron kan eksiteres fra valensbåndet til ledningsbåndet. (b) Indirekte båndgap. Ved indirekte båndgap kreves det bevegelsesmengde i tillegg til nok energi for at elektronet skal eksiteres fra valensbåndet til ledningsbåndet. Begge figurene er laget med inspirasjon fra boken *Solar Energy - The Physics and Engineering of photovoltaic conversion* [8].

i elektron-hull-parene konverteres til elektrisk energi som kan utnyttes til arbeid.

2.1.1 pn-overgang

De fleste halvledermaterialer har en krystallinsk struktur, som betyr at atomene er arrangert i et fast symmetrisk mønster. Silisium har atomnummer 14 og dermed 4 valenselektroner som alle danner kovalente bindinger med andre Si-atomer.

Konsentrasjonen av elektron-hull-par kan manipuleres ved bruk av doping. Dette gjøres ved å erstatte enkelte av Si-atomene i silisiumstrukturen med andre typer atomer som har enten 3 eller 5 valenselektroner. De oftest brukte atomtypene for doping av c-Si er fosfor og bor. Fosfor har 5 valenselektroner, som betyr at det ene elektronet som ikke danner kovalent binding med naboatomet vil være løst bundet. På grunn av termisk energi vil elektronet være fritt ved romtemperatur. Doping med fosfor fører dermed til høy konsentrasjon av elektroner og kalles følgelig n-doping siden elektronene er negativt ladet. Frie elektroner kalles i dette tilfellet majoritetsladningsbærere. Bor har 3 valenselektroner, så ved tilførsel av bor-atomer i silisium-materiale vil det dannes 3 kovalente bindinger med naboatomene og ett hull. Følgelig kalles dette p-doping, siden c-Si totalt får en mer positiv ladning på grunn av "mangel" på et elektron. I dette tilfellet er hull majoritetsladningsbærere. Når

to slike halvledermaterialer dopet med henholdsvis fosfor og bor legges inntil hverandre vil det oppstå en konsentrasjonsgradient på grunn av differansen i konsentrasjon av henholdsvis elektroner og hull. Frie elektroner i den n-dopede delen vil diffundere over til hullene i den p-dopede delen. På samme måte vil hullene fra den p-dopede regionen diffundere til den n-dopede regionen. Dette kalles *drift* av ladningsbærere. Diffusjonen vil fortsette til det er oppnådd likevekt. Under likevekt vil depleksjonssonen være tom for ladningsbærere, som fører til potensialforskjell mellom atomene som nå er ionisert. Dette resulterer i et indre elektrisk felt over depleksjonssonen som vist i figur 2.3. Dette systemet kalles en pn-overgang.

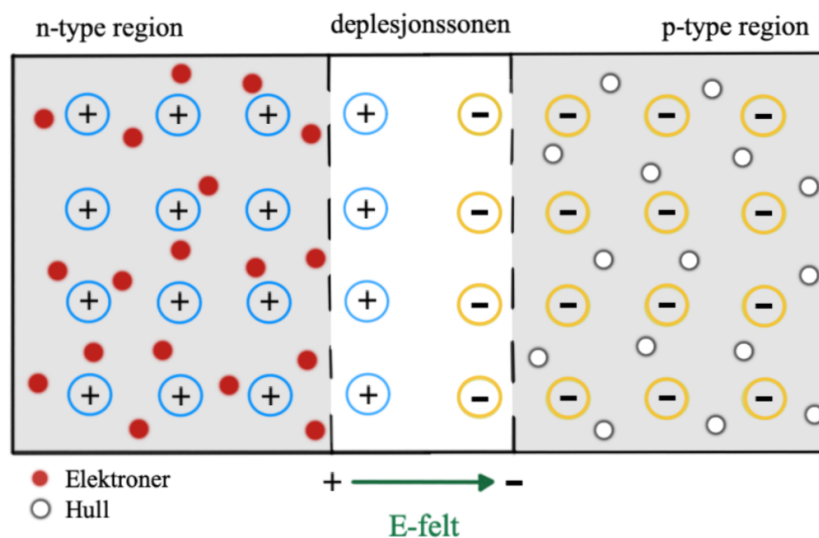


FIGURE 2.3: Pn-overgang med elektrisk felt over depleksjonssonen. Figuren er laget med inspirasjon fra boken *Solar Energy - The Physics and Engineering of photovoltaic conversion* [8].

2.2 Modulenes oppbygging

En typisk solcellemodul er i utgangspunktet bygget opp av 60 solceller koblet i serie for å minimere resistive tap. Disse 60 cellene deles inn i tre strenger med 20 solceller i hver. En seriekobling av solcellene fører til at spenningen som genereres i hver enkelt celle adderes og det oppnås totalt en høyere modulspenning. Den produserte effekten fra solcellemodulen blir dermed også av betydelig størrelse. Seriekobling av solcellene fører derimot til at strømmen i modulen begrenses til cellen som genererer lavest strøm. Dersom én solcelle genererer 0.6V og 5A, så vil seriekobling av 60 celler gi en åpen krets-spenning på $V_{oc} = 0.6 \cdot 60 = 36V$, og kortslutningsstrøm $I_{sc} = 5A$.

Solcellene kan også kobles i parallell, men siden dette fører til en høy generert strøm vil de resistive tapene i modulen også være høy. En slik kobling er derfor ikke like vanlig.

Figur 2.4 viser hvordan individuelle solceller kobles sammen ved hjelp av metallkontakter kalt busbars som består av en kobberplate. Hver celle har tre busbars, og mellom dem kobles det nettfingre som består av tynne kobbersnorer. Busbarene og nettfingrene gjør det mulig for ladningsbærerne å bevege seg i kretsen med minst mulig motstand.

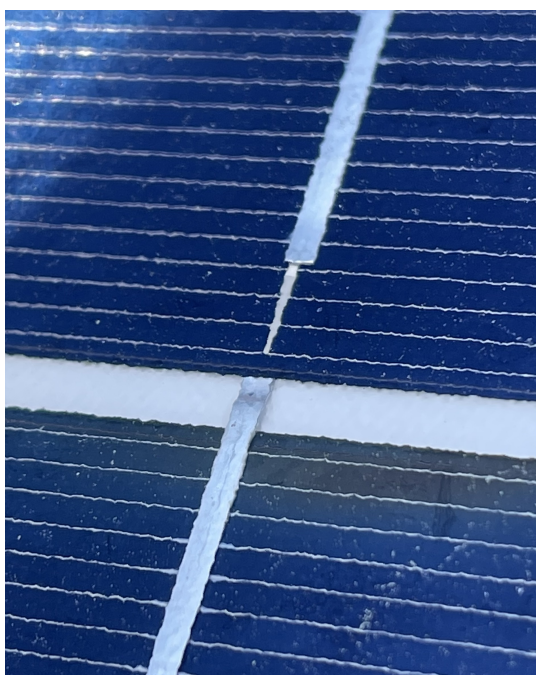


FIGURE 2.4: Bildet viser hvordan individuelle solceller kobles sammen ved hjelp av metallkontakter på fremsiden og baksiden kalt busbars (grå metallplate). Nettfingrene er også synlig (tynne grå kobbersnorer på tvers).

Siden solcellene er seriekoblet er modulen svært sensitiv for skygging. Dersom en av cellene i en streng blir skygget, vil strømmen i hele strengen begrenses til kortslutningsstrømmen I_{sc} til den skyggede cellen. Cellene som befinner seg før den skyggede cellen i strengen forsøker likevel å tvinge gjennom en strøm som er høyere enn denne kortslutningsstrømmen. Den skyggede cellen opplever dette som en påtrykt reversspenning og polariteten over cellen reverseres. Det vil også oppstå hot spot (varmt område) over den skyggede cellen som kan være skadelig. For å forhindre at skygging av én enkelt celle begrenser strømmen i hele modulen kobles hver streng i parallell med en bypassdiode. Optimalt skulle det vært koblet en bypassdiode over

hver enkelt celle, men dette er dyrt. Bypassdiodene kobles inn reversspent slik at de i utgangspunktet ikke leder strøm. Dersom en eller flere celler i en streng opplever skygging vil polariteten over bypassdioden reverseres grunnet reversspenningen den skyggende cellen opplever. Bypassdioden blir følgelig forspent i lederetning og begynner å lede strøm. Ved bruk av bypassdioder koblet over hver streng vil to av strengene fremdeles generere strøm og spenning som normalt selv om den ene strengen kobles ut. Figur 2.5 viser en bypassdiode D_{B3} som er forspent i lederetning og leder strømmen unna streng med skygget celle. Den skyggede cellen er markert med et rødt kryss.

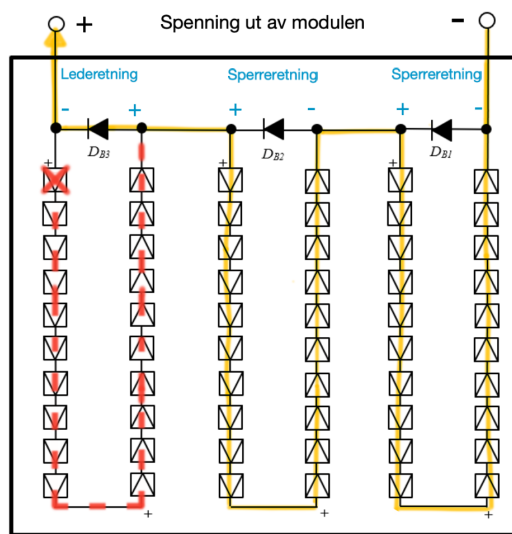


FIGURE 2.5: Illustrasjonen viser hvordan en solcellemodul kobles sammen med tre parallellkoblede strenger med 20 celler koblet i serie. Her vises også en bypassdiode D_{B3} som er forspent i lederetning og leder strømmen unna streng med skygget celle. Den skyggede cellen er markert med et rødt kryss. Illustrasjonen er inspirert fra labmanualen "Solcellefysikk- og karakteristikk" [9].

Silisiumsolceller kan lages på forskjellige måter. Vi skiller i hovedsak mellom to typer silisium wafere; monokrystallinsk og multikrystallinsk.

2.2.1 Mono- og multikrystallinsk solcelle

Monokrystallinsk silisium betyr at atomene i materialet er strukturert i en enkel og gjentakende krystallinsk gitterstruktur [10]. Den regelmessige strukturen til slike solceller gir en høyere effektivitet enn for andre typer silisium-solceller, men er til gjengjeld dyrere å produsere.

En multikrystallinsk solcelle skiller seg fra monokrystallinsk solcelle ved at flere mindre silisiumkrystaller settes sammen for å danne en wafer. Multikrystallinske solceller har dermed mer uren struktur og lavere effektivitet.

Figur 2.6 viser forskjell i utseende for mono- og multikrystallinske solcellemoduler.

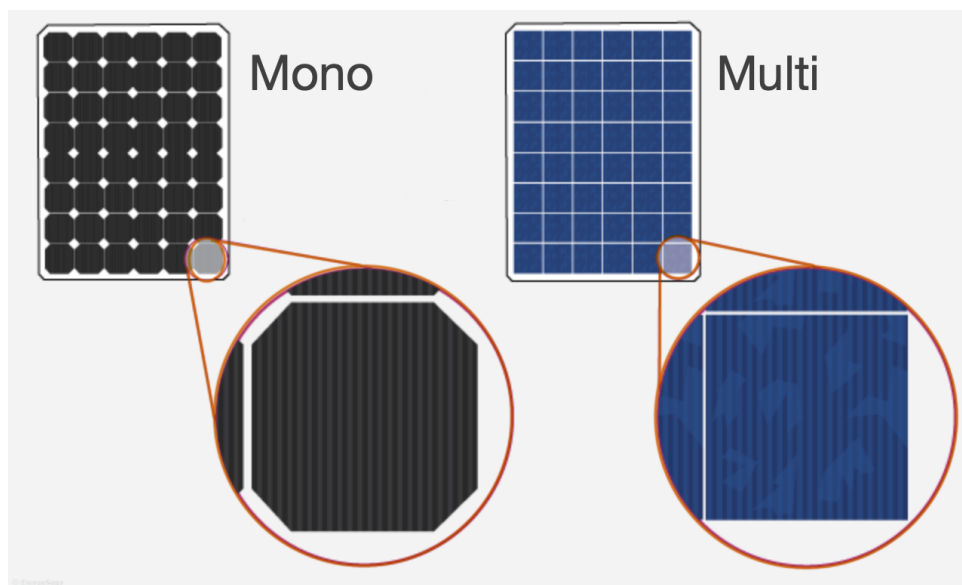


FIGURE 2.6: Svarte monokrystallinske celler laget av en enkel silisiumkrystall. Blå multikrystallinske celler laget av flere silisiumkrystaller som settes sammen. Bildet er laget med inspirasjon fra American Solar Energy society [11].

2.2.2 Bifacial solcelle

Begrepet "bifacial solcelle" stammer fra at solcellemodulen er designet for å produsere strøm fra innstråling som treffer både forsiden og baksiden av modulen [12]. I motsetning til tradisjonelle solcellemoduler med en ugjennomsiktig bakvegg består baksiden av bifacial-modulene av et gjennomsiktig materiale som tillater innstråling. Baksiden av modulen har dog vanligvis ikke lik ytelse som fremsiden. Eksempelvis kan modulene ha en tosidighetsfaktor på 80%, som vil si at baksiden har en ytelse på 80% i forhold til fremsiden. Innstrålingen på baksiden av modulen består i hovedsak av diffus stråling. Effekten er derfor sterkt avhengig av albedoen i omgivelsene. Bifacial-modulene er spesielt gunstig i områder med mye vann og snø [12]. Bifacial-moduler lages av monokrystallinsk silisium, og konfigureres med 6 substrenger hvor halvparten befinner seg i øvre del av modulen, og andre halvparten befinner seg i nederste del. To og to substrenger parallellkobles

over midten, hvor også bypassdiodene befinner seg. De tre strengene er koblet i serie.

2.3 Solcellekarakterisering

2.3.1 Hovedparametere

Det er i hovedsak 4 parametere som karakteriserer virkemåten til en solcellemodul; maksimal effekt P_{max} , kortslutningsstrøm I_{sc} , åpen krets spenning V_{oc} og fyllfaktor FF . Disse er alle mulig å finne ut fra I-V (strøm - spenning) karakteristikken til solcellen under belysning. Det er også mulig å finne konverteringseffektiviteten η til solcellen ved bruk av disse parameterne. P_{max} er den maksimale effekten som er mulig å få ut av solcellen.

Kortslutningsstrømmen I_{sc} er den maksimale strømmen som går i den ytre kretsen i modulen. Det er dog vanskelig å sammenlikne I_{sc} i ulike moduler da den er avhengig av arealet på modulen. For å måle strømmen uavhengig av arealet benyttes derfor kortslutningsstrømtettheten J_{sc} , oftest oppgitt i mA/cm^2 . Denne brukes for å beskrive den maksimale strømmen levert av en solcellemodul, og er avhengig av de optiske egenskapene til solcellen. Ideellt sett ønsker man $J_{sc} = J_{ph}$, altså at kortslutningsstrømtettheten er lik den fotogenererte strømtettheten, altså at alle eksiterte elektroner utnyttes som strøm.

Åpen krets spenning, V_{oc} , er den maksimale spenningen som kan oppnås i solcellemodulen. Den oppnås når det ikke flyter strøm gjennom kretsen, se figur 2.7 i kapittel 2.3.3. Dersom man antar $I = 0$ gjennom modulen og at $J_{sc} = J_{ph}$ kan V_{oc} uttrykkes som følgende:

$$V_{oc} \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0}\right), \quad (2.2)$$

hvor k_B er Boltzmanns konstant, T er modultemperaturen, q er elementærladningen ($1,602 \cdot 10^{-19}C$) og J_0 er mørkestrømtettheten til solcellen. Sistnevnte fører til rekombinasjon i solcellen. Det betyr derfor at V_{oc} også er avhengig av graden av rekombinasjon (også nevnt i kapittel 2.4.1). Kommersielle c-Si moduler har en typisk V_{oc} -verdi på rundt 0.6V.

Den siste parameteren, fyllfaktoren (FF), er et mål på kvaliteten til solcellemodulen. FF analyserer modulspenningen og kortslutningsstrømmen

mot maks effekt levert av modulen. Verdien for FF ligger mellom 0-1. Desto bedre kvalitet solcellen har, desto nærmere 1 vil verdien være. I realiteten er det ikke mulig å oppnå fyllfaktor lik 1 siden $I_{sc}V_{oc}$ er en teoretisk verdi. I_{sc} måles ved maks strøm gjennom kretsen mens V_{oc} måles ved null strøm i kretsen. Fyllfaktoren uttrykkes som

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}}, \quad (2.3)$$

hvor I_{sc} er kortslutningsstrømmen, V_{oc} er åpen-krets-spenningen, og P_{max} er effekten levert ved maksimal power point, altså hvor modulen leverer maksimal effekt.

Videre kan konverteringseffektiviteten η uttrykkes ved hjelp av de tidligere nevnte parameterne. Konverteringseffektiviteten defineres som andelen av innstrålt effekt som konverteres til elektrisk effekt i solcellen. Den uttrykkes som

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{I_{in}}, \quad (2.4)$$

hvor I_{in} er irradiansen.

Typiske verdier for disse parameterne for c-Si solceller er $I_{sc} = 8.8A$, V_{oc} på opp til 0.65 V, FF mellom 0.75 til 0.80 og en konverteringseffektivitet på 17-18% for multi- og mono-moduler. For bifacial-moduler er konverteringseffektiviteten på 19-21%.

2.3.2 Standard test betingelser

For å muliggjøre sammenlikning av IV-karakteristikk mellom ulike solcellemoduler brukes den internasjonale standarden "Standard Test Conditions" (STC) for å sørge for at målinger som sammenliknes er tatt ved like forhold. STC er satt av "International electrochemical commission", og er definert i International Standard IEC 60904-3 [13]. STC setter krav til irradians, modultemperatur og luftmasse ved måletidspunkt. Henholdsvis definerer standarden en irradians på $1000W/m^2$, modultemperatur på $25^{\circ}C$ og luftmasse AM1.5. AM står for air mass og beskriver solens posisjon i forhold til modulen. STC er ofte vanskelig å oppnå ved måletidspunkt. Resultatene kan derfor korrigeres ved senere behandling av data ved bruk av

IEC 60891: "Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics" [14].

2.3.3 IV-kurve

IV-kurver brukes for å karakterisere solceller, og viser hvordan strømmen I varierer ved ulik spenning V . IV-kurven brukes for å finne de optimale driftsbetingelsene for solcellen. For å utnytte solcellen best mulig er det viktig å drifte den ved "maximum power point" (MPP), som er punktet på IV-kurven hvor solcellemodulen leverer høyest effekt. Dette punktet befinner seg der verdien til P er høyest ut fra likningen

$$P = IV \quad (2.5)$$

For å påse at modulen hele tiden opererer ved maksimal effekt er det installert en MPPT (maksimal power point tracker). Denne er designet for å foreta regelmessige sveiper av IV-kurven for å forsikre at modulen opererer i det globale maksimumspunktet på effektkurven, og ikke et lokalt maksimumspunkt som kan oppstå fra ytre faktorer som delvis skygging av modulen. Fra oransje kurve på figur 2.7 er det tydelig hvordan strømmen reduseres ved økt spenning, og at strømmen til slutt går mot null når spenningen nærmer seg åpen-krets spenning.

IV-kurven for en ideell solcellemodul ville sett ut som den striplede kurven på figur 2.7. I en reell solcellemodul er det ulike former for tap som fører til en mer avrundet IV-kurve. Dette beskrives nærmere i kapittel 2.3.4.

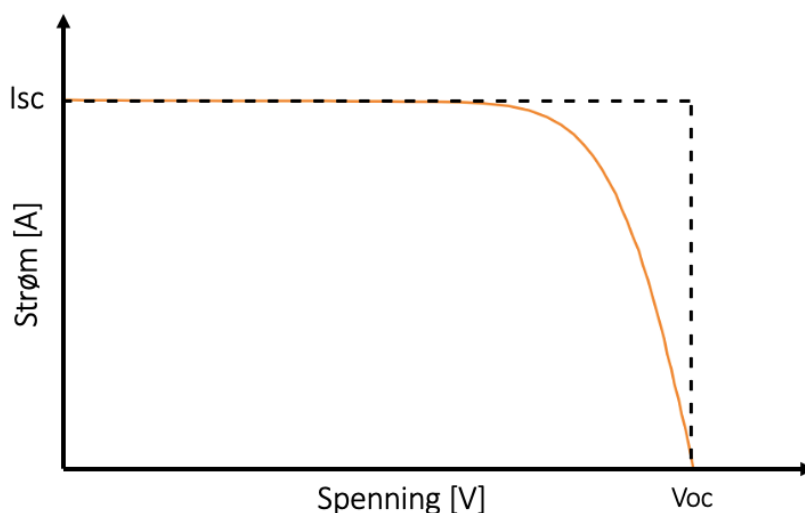


FIGURE 2.7: Sammenlikning av IV-kurve for reell og ideell solcellemodul. Oransje kurve viser IV-kurven til en reell modul, mens den striplede kurven viser hvordan IV-kurven hadde sett ut for en ideell modul uten tap. Ulike former for tap vil påvirke formen på IV-kurven slik at den blir mer avrundet.

En rekke parametere vil påvirke IV-karakteristikken. Blant disse er modultemperatur, irradians og omgivelsestemperatur.

Irradians og temperatur

To av hovedparameterne som har innvirkning på P_{max} til en solcellemodul er temperatur og irradians, som begge har naturlig variasjon. Solen beveger seg over himmelen, og ulike forhold i atmosfæren fører til ulike grader av direkte og diffus stråling, som til gjengjeld gir ulike temperaturer. En skyfri himmel gir overvekt av direkte stråling mens fullt skydekke gir diffus stråling. Dersom modultemperaturen øker vil åpen-krets-spenningen V_{oc} påvirkes negativt og reduseres. En høyere modultemperatur vil derimot føre til en økning i kortslutningsstrømmen I_{sc} . Årsaken er at båndgapet i halvledermaterialet blir mindre ved høyere temperatur [15]. Mindre båndgap krever mindre energi for at elektroner eksiteres, altså vil flere elektroner eksiteres ved samme irradians. Den potensielle energien elektronene innehar i eksitert tilstand i LB avhenger av eksitasjonsenergien, altså vil elektronene ha lavere potensiell energi ved høyere modultemperatur som gir lavere celledespenning V_{oc} .

Fra figur 2.8 kommer det tydelig frem at økt temperatur har en større negativ effekt på V_{oc} enn positiv effekt på I_{sc} . Økt temperatur er derfor ikke ønskelig

da det resulterer i at solcellemodulen genererer mindre effekt ved samme spenningsnivå.

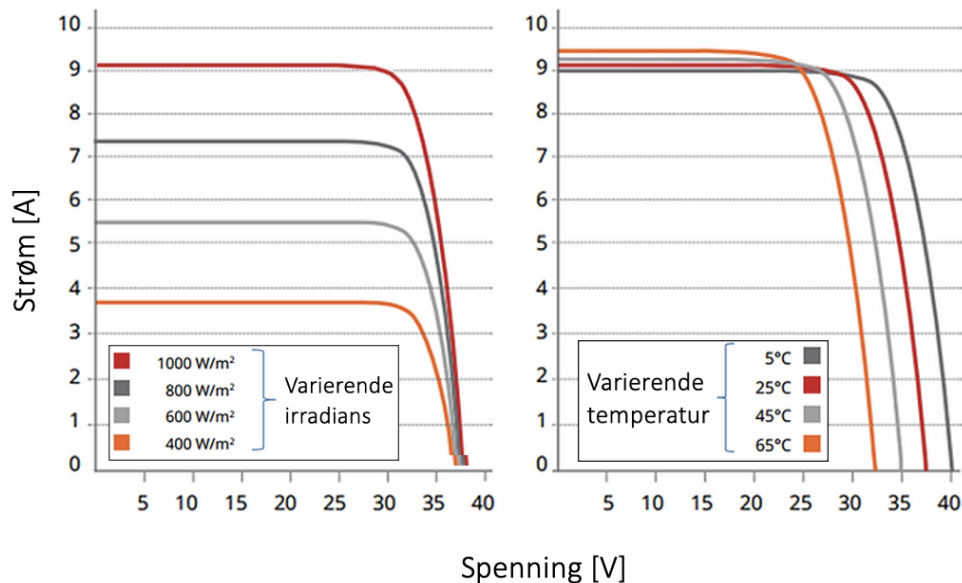


FIGURE 2.8: Påvirkningen av ulik temperatur og irradians på V_{oc} og I_{sc} . Høy modultemperatur og høy irradians gir høy I_{sc} og lav V_{oc} , mens en lav modultemperatur og irradians gir lav I_{sc} men høy V_{oc} .

Skygging

I hvor stor grad skygging vil påvirke modulen og dens IV-karakteristikk avgjøres av hvor stor del av modulen som skygges, og hvor skyggen treffer. Figur 2.9 viser hvordan delvis skygging av én streng påvirker modulen med bypassdioder installert. Dersom det ikke hadde vært installert bypassdioder i modulen ville I_{sc} vært betydelig redusert, slik kurven for de ulike gradene av skygging antyder. Eksempelvis ville I_{sc} for 10% skygging av en celle vært på omtrent 8A, mens den takket være bypassdioden økes til nesten 9A.

Verdier for spenning vil ikke påvirkes av skygging i like stor grad som strømverdiene siden cellene er seriekoblet. Som forklart i kapittel 2.2 vil seriekobling gi lik strøm gjennom alle cellene, mens verdiene for spenning adderes.

2.3.4 Ekvivalentkrets

For å studere solceller er det vanlig å forenkle dem til en ekvivalentkrets bestående av spenningskilde og diode koblet i parallell. Dioden består av

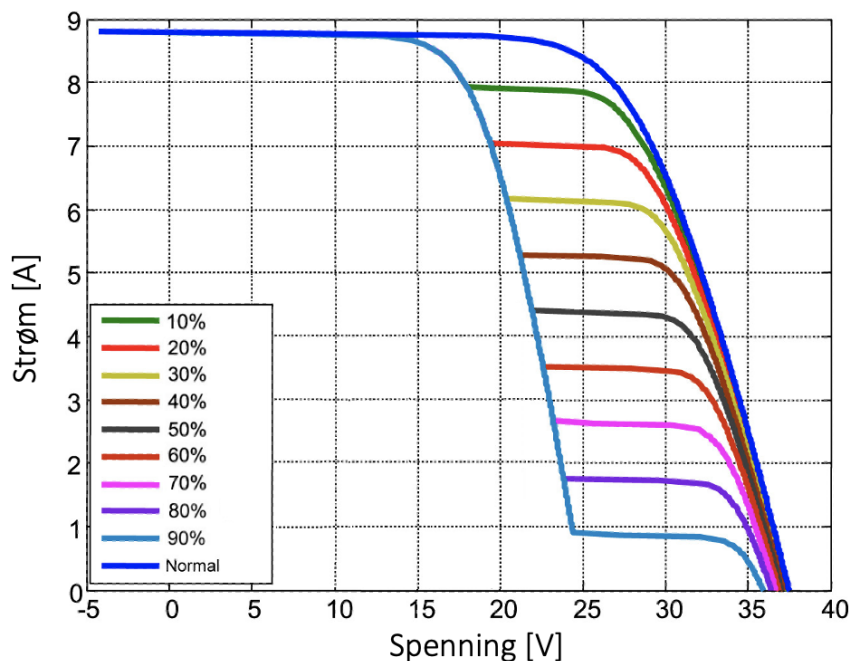


FIGURE 2.9: Varierende grad av skygging på solcellemodul med installerte bypassdioder. Her er det én bypassdiode som er forspent i lederetning. Figur laget med inspirasjon fra artikkel skrevet av Yunlin et al. [16]

en pn-overgang. Ekvivalentkretsen gjør det mulig å studere påvirkningen av individuelle parametere. I praksis påvirkes fyllfaktoren FF av både en seriemotstand R_s og en shuntmotstand R_{sh} . Disse komponentene representerer tap i modulen. Parameterne kan studeres i ekvivalentkretsen på figur 2.10 hvor I_{ph} representerer den fotogenererte strømmen, I_d er strømmen over dioden mens I er den totale strømmen gjennom modulen. V er den totale spenningen over hele modulen.

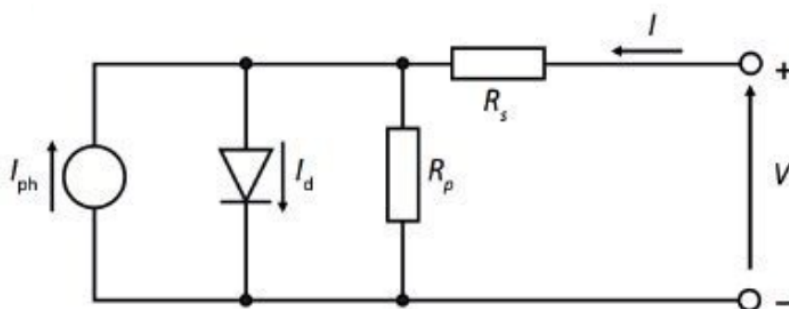


FIGURE 2.10: Ekvivalentkrets til solcelle med serie- og shuntmotstand. Illustrasjonen er hentet med tillatelse fra figur 9.3 i boken Solar Energy - The Physics and Engineering of photovoltaic conversion [8].

R_{sh} og R_s har ulik påvirkning på modulen. For optimal drift ønskes en kombinasjon av høy shuntmotstand og lav seriemotstand. Shuntmotstand kommer typisk fra defekter som oppstår under produksjon av solcellen [17]. En lav shuntmotstand fører til effekttap i solcellene. Grunnen er at lav R_{sh} gir alternative veier for den fotogenererte strømmen slik at strømmen i den ytre kretsen reduseres. Modulspenningen vil følgelig også bli lavere som vist på figur 2.11 under. Shuntmotstanden vil oppleves som større under lav belysning siden den fotogenererte strømmen er lavere [17].

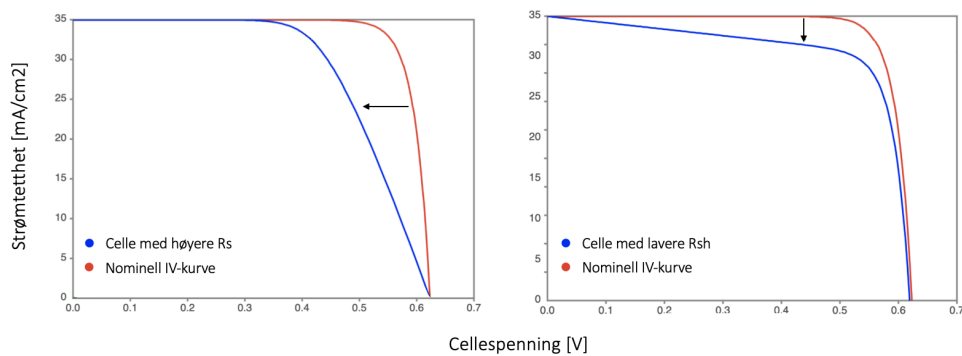


FIGURE 2.11: Effekten av en høyere seriemotstand og lavere shuntmotstand på IV-kurven. For best ytelse ønskes det en lav seriemotstand og høy shuntmotstand.

Seriemotstanden R_s ønskes så liten som mulig da den reduserer fyllfaktoren i solcellen, altså hvor mye effekt solcellen leverer i forhold til hvor mye innstrålt effekt den mottar. Seriemotstanden forårsakes i hovedsak av kontaktpunkter mellom ulike komponenter i modulen [18]. Det gjelder spesielt overgangen mellom metallkontaktene og silisiumet, og metallkontaktene på fremsiden og baksiden av modulen som er beskrevet i kapittel 2.2. Høye verdier av R_s reduserer kortslutningsstrømmen i modulen, men åpen-krets-spenningen derimot vil ikke reduseres. Effekten av R_s på IV-kurven kan sees på figur 2.11.

2.4 Tapsmekanismer

Det er to store hovedtapsmekanismer i solceller som er hovedårsaken til tap av innstrålt effekt. Den første årsaken er elektroner eksitert med for lav fotonenergi i forhold til båndgapet og som dermed ikke blir konvertert til elektrisk energi. Den andre årsaken er tap dersom fotonenergien er høyere enn båndgapet. I sistnevnte tilfelle vil elektronet kvitte seg med overflødig energi i form av vibrasjoner i krystallgitteret som fører til varme.

Andre årsaker til tap i solcellemodulen er ulike former for rekombinasjon og degradering.

2.4.1 Rekombinasjon

Rekombinasjon defineres som eksiterte elektroner som finner tilbake til hull slik at elektron-hull-par brytes. Dersom det ikke virker andre krefter på elektronet etter det har blitt eksitert, vil elektronene etter hvert rekombinere. Rekombinasjon er uønsket da det fører til tap av energi. Det finnes flere typer rekombinasjonsmekanismer i solceller. Hvilken rekombinasjonsmekanisme som utgjør størst tap er avhengig av en rekke faktorer, som for eksempel om solcellen er mono- eller multikrystallinsk. De tre største rekombinasjonsmekanismene er radiativ rekombinasjon, Shockley-Read-Hall rekombinasjon og Auger rekombinasjon. Radiativ rekombinasjon og Auger er avhengig av halvleder materialet i seg selv, mens SRH er avhengig av defekter og urenheter i materialet.

Radiativ rekombinasjon

Radiativ rekombinasjon betyr at det sendes ut et foton med energi tilsvarende båndgapsenergien når et elektron rekombinerer med et hull, se figur 2.12a. Radiativ rekombinasjon er den hyppigste formen for rekombinasjon i materialer med direkte båndgap, og er en iboende egenskap til materialet som avhenger av injeksjonsnivå. Det betyr at denne formen for tap ikke er til å unngå. Som bekrevet i kapittel 2.2 eksiteres elektroner i direkte båndgapsmaterialer enklere enn i indirekte båndgapsmaterialer. Det samme gjelder ved rekombinasjon. Det kreves ikke endring i bevegelsesmengde for at rekombinasjon skal forekomme. Derfor omtales radiativ rekombinasjon også som direkte rekombinasjon eller bånd-til-bånd rekombinasjon. Graden av radiativ rekombinasjon er avhengig av temperaturen til solcellemodulen, og -er umulig å unngå da rekombinasjonsraten er proporsjonal med generasjonsraten.

Avbildningsmetoden fotoluminescens som studeres i denne oppgaven utnytter radiativ rekombinasjon for avbilde solcellemoduler.

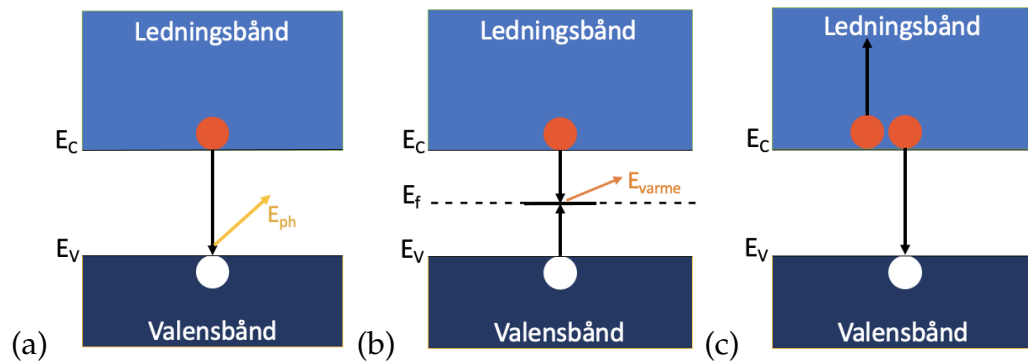


FIGURE 2.12: (a) Radiativ rekombinasjon hvor det sendes ut et foton med energi tilsvarende båndgapet når elektron-hull-paret rekombinerer. (b) Shockley-Read-Hall rekombinasjon. Her dannes det "feller" i det forbudte båndgapet hvor elektroner og hull lettere kan rekombinere. (c) Auger rekombinasjon. Auger rekombinasjon kan skje både med to hull eller to elektroner involvert. Her er det fremstilt med to elektroner og ett hull.

Shockley-Read-Hall rekombinasjon

Shockley-Read-Hall (SRH) skiller seg fra de andre rekombinasjonsmekanismene ved at det er ikke en bånd-til-bånd prosess. Denne typen rekombinasjon skjer grunnet defekter i krystallgitteret eller urenheter i metallet. SRH gjør det mulig med lovlige energinivåer E_T i det ellers forbudte båndgapet. Disse energinivåene omtales som feller. Her kan elektroner eller hull bli "fanget" og tiltrekke seg henholdsvis hull eller elektroner, og dermed rekombinere.

SRH skjer i hovedsak på overflaten til halvledermaterialene. På overflaten til silisium-materialet vil ikke valenselektronene kunne forme kovalente bånd med elektroner i andre atomer. Resultatet er såkalte "dangling bonds" - defekter som forårsaker feller i det forbudte båndgapet slik som vist på figur 2.12b. Følgelig vil det induseres SRH rekombinasjon. På grunn av dette er graden av SRH sterkt avhengig av krystallstrukturen i silisiumwaferne. Monokrystallinske solceller vil ha lavere grad av SRH enn multikrystallinske solceller på grunn av en renere struktur. Som beskrevet i kapittel 2.2.1 består multikrystallinske wafere av flere mindre silisiumkrystaller som settes sammen, altså inneholder de mange små overflater hvor fellene oppstår. For å minimere SRH-rekombinasjon utføres det overflatepassivering, hvor det deponeres et antirefleksjonbelegg på solcellen som inneholder mye hydrogen. Hydrogenet vil bilde seg til disse "dangling bonds"-ene, slik at antallet feller minimeres.

Auger

Auger rekombinasjon skiller seg fra både direkte radiativ rekombinasjon og SRH ved at prosessen involverer tre partikler, ikke bare to. Som vist på figur 2.12c er det et ekstra elektron eller hull involvert i tillegg til elektron-hull-paret. Ved Auger rekombinasjon er energien og bevegelsesmengden til elektron-hull-paret bevart ved å overføres til den tredje partikkelen.

2.5 Degradering av solceller

Degradering av solcellemoduler betyr at ytelsen til solcellene reduseres over tid. Dette er en naturlig prosess og forekommer av en rekke årsaker, eksempelvis eksponering for sollys, skiftende vær, mikrosprekker og korrosjon [19]. Degradering er derfor umulig å unngå. Det er ofte oppgitt en degradasjonsrate i databladet til modulene som angir hvor stor mye degradering som kan forventes på ett år. En typisk verdi for degradasjonsraten er 0.5%, men kan være litt høyere de første årene [20]. Generelt garanterer vanligvis produsenten at solcellene skal ha en ytelse etter 30 år på minst 80% av ytelsen de hadde som nye. Enkelte faktorer kan dog akselerere degraderingen betraktelig. Skader og defekter fører til raskere degradering enn naturlig slitasje grunnet værforhold. Eksempelvis vil et varmere klima føre til større grad av degradering enn kaldere klima. Modulene vil også være mer utsatt for skader i områder med harde værforhold.

Det er vanlig å analysere degradering i forhold til reduksjon i maksimalt levert effekt med STC-verdi for irradians, altså $1000\text{W}/\text{m}^2$, men enkelte degraderingsmekanismer reduserer ytelsen også ved lavere irradianser [21]. Da solcellene mesteparten av tiden opererer med irradians lavere enn $1000\text{W}/\text{m}^2$ er det viktig å forstå påvirkningen ved lavere irradians også. Spesielt spenningsindusert degradering har en større negativ effekt ved lavere innstråling.

2.5.1 Spenningsindusert degradering

Spenningsindusert degradering (fra engelsk PID - Potential Induced Degradation) er en degraderingsmekanisme som oppstår grunnet potensialforskjeller mellom solcellene og andre deler av modulen som rammen, festeutstyret eller glasset [22] [23]. Potensialforskjellen danner et elektrisk felt som forårsaker lekkasjestrøm mellom cellen og glasset.

Siden glasset som beskytter solcellene består av en viss mengde Na_2O , vil Na^+ -ioner samtidig drifte til solcelleoverflaten hvor de akkumuleres. Ved høy nok konsentrasjon av Na^+ -ioner ved overflaten vil de til slutt diffundere inn i pn-overgangen og forurense cellen. Na^+ -ionene danner alternative veier for elektronene å bevege seg slik at shuntmotstanden reduseres. Totalt kan resultatet være store effekttap [23]. En lavere shuntmotstand har direkte innvirkning på FF og IV-kurven.

I hvor stor grad PID påvirker ytelsen til modulen avhenger blant annet av spenningen og konfigurasjonen til anlegget, altså hvordan det er montert, rammen, og modultype (eksempelvis mono- eller multikrystallinsk). PID kan blant annet detekteres ved å analysere IV-kurven til modulen. En studie gjennomført av Kwembur et al. [22] om påvirkningen av PID på multi- og monokrystallinske Si-moduler, viser at PID resulterer i lavere R_{sh} som et resultat av økning i lekkasjestrømmer grunnet Na^+ -ionene på celleoverflaten. Dette gir alternative veier for strømmen. Lavere R_{sh} resulterer videre i lavere maksimal avgitt effekt P_{mpp} , V_{oc} og FF. PID fører også til en økning i R_s siden forurensning av cellematerialet gir høyere indre resistans. Som beskrevet i kapittel 2.3.4 avhenger effekten av en lavere R_{sh} av irradians siden lekkasjestrømmer utgjør en større del av total strøm i kretsen dersom det genereres mindre strøm totalt. Modultilstanden vil spille en rolle for påvirkningen av PID. Dersom modulen har sprekker, hotspots eller skade på bypassdioden som fører til økt temperatur i modulen kan PID akselereres. På Δ PPL-bilder vises PID som et sjakkmønster med mørke og lyse celler. PID-påvirkningen på en celle vil starte ytterst og bevege seg mot midten av cellen slik at hele etter hvert påvirkes [24].

2.5.2 Lysindusert degradering

Lysindusert degradering (LID) oppstår ved generasjon og rekombinasjon av elektron-hull-par [25]. Energi som løslates ved rekombinasjon eller ved absorpsjon av energi høyere enn båndgapet kan bryte svake Si-Si bindinger i deplesjonssonen og føre til ustabile defekter hvor rekombinasjon har lettere for å skje. Rekombinasjonen i disse defektene fører igjen til at svake Si-Si-bindinger brytes og prosessen fortsetter. Resultatet er lavere kvalitet i solcellematerialet og lavere avgitt effekt i solcellemodulen. LID oppstår gjerne de første timene solcellemodulen utsettes for sollys, men fører til lavere levert effekt gjennom hele levetiden til modulen [25]. På IV-kurven vises LID i

form av lavere kortslutningsstrøm og åpen-krets-spenning, forårsaket av økt rekombinasjon.

2.5.3 Sprekker og mikrosprekker

Gjennom solcellers levetid kan det oppstå sprekker av varierende alvorlighetsgrad. Modulene er spesielt utsatt for slike skader under produksjon, ved transport og montering. Andre faktorer som hardt vær kan også være årsak da eksempelvis sterk vind kan føre til gjenstander som treffer modulen [26]. Skiftende værforhold med vekselvis høy luftfuktighet og negative temperaturer kan føre til raskere degradering dersom det allerede er sprekker i modulen. I hvor stor grad sprekker påvirker degradering av solceller avhenger av lengden, bredden, dybden og typen sprekk. Dersom bredden på sprekken er under 30 mikrometer klassifiseres den som er mikrosprekk. Større sprekker klassifiseres som makrosprekk. Dersom formen på sprekken er en linje har den med stor sannsynlighet oppstått ved laserkutting under produksjon. Dersom modulen får et slag vil sprekken gjerne stråle ut fra samme punkt, og de vil ofte krysse hverandre. Makrosprekker klassifiseres ut fra om de oppstår på eller under overflaten av cellen, som vil påvirke modulytelsen i ulik grad. Figur 2.13 viser eksempler på ulike former for sprekker som kan oppstå i solcellene; vinkelrett sprekk i forhold til busbar, parallell sprekk med busbar, forgreinede sprekker, sprekker med flere retninger og 45 °sprekk.

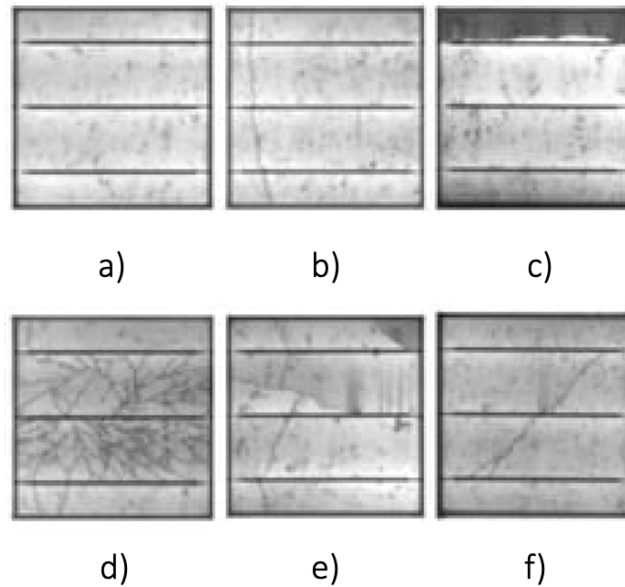


FIGURE 2.13: Eksempler på sprekker som kan oppstå i solcellene. a) ingen sprekker, b) vinkelrett sprekke i forhold til busbar, c) parallell sprekke med busbar, d) forgreinede sprekker, e) sprekker med flere retninger, f) 45 °sprekk. Figuren er gjengitt med tillatelse fra artikkelen "Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review" [27].

Sprekker fungerer som rekombinasjonssentre og fører dermed til lavere kortslutningsstrøm i modulen, lavere åpen-krets-spenning og lavere effekt [28]. I tillegg fører sprekker til reduksjon i shuntmotstand da sprekken vil indusere PID og tillate lekkasjestrømmer, og de kan føre til isolasjon av deler av celler som kan forspenne bypassdioder. Som beskrevet i kapittel 2.2 vil bypassdioden lede strøm unna strengen dersom en stor nok del av en celle ikke kan generere strøm/spenning.

2.6 Fotoluminescens

Med mindre annet spesifiseres er kilden brukt i dette delkapittelet artikkelen "Photoluminescence imaging of silicon modules in a string" [29].

Avbildningsmetoden fotoluminescens (PL - fra engelsk photoluminescence) brukes for å analysere separasjon av ladningsbærere generert fra fotoelektrisk effekt [30]. PL kommer fra radiativ rekombinasjon av slike fotogenererte elektron-hull-par. Som beskrevet i kapittel 2.4.1 vil det emitteres et foton når det eksiterte elektronet etterhvert faller tilbake til grunntilstanden. Intensiteten på PL-signalet er derfor en indikasjon på om ladningsbærerne

forblir separert eller rekombinerer. Sterkt PL-signal betyr høy forekomst av rekombinasjon mens et svakt signal indikerer lav forekomst. Siden radiativ rekombinasjon er en intrinsikk egenskap til solcellematerialer vil detektering av lave mengder rekombinasjon fra solcellene bety at de har lav strøm. Den radiative rekombinasjonen øker med økt irradians som beskrevet i kapittel 2.4.1

PL som avbildningsmetode kan brukes for å analysere og undersøke kvaliteten til siliciumsolceller [29]. Metoden brukes for å klassifisere ulike typer elektriske og mekaniske tap er beskrevet i tidligere kapitler. Grunnet utfordringer ved avbildning av modulene i direkte sollys har metoden tidligere kun vært brukt i laboratoriet med kontrollerte forhold. Hovedutfordringen med avbildning utendørs er at støy fra reflektert sollys ofte er sterkere enn PL-signalet emittert fra modulen. En løsning på dette er å lage Δ PL-bilder hvor sollyset kan elimineres. Slike Δ PL-bilder fremstilles ved å avbilde solcellemodulen ved to ulike driftspunkt, optimalt med høyest mulig differanse i emittert PL-signal. Ved å subtrahere bilder med lavt signal fra bilder med høyt signal vil støyen i bildene reduseres. Resultatet er Δ PL-bilder med informasjon om de elektriske og mekaniske egenskapene til modulen.

Forholdet mellom modulspenning og luminesens-signal ϕ er

$$\phi = e^{\frac{V}{V_T}}, \quad (2.6)$$

hvor V_T er den termiske spenningen og V er spenningen over terminalene på modulen. Det sterkeste PL-siglanet oppnås ved høyest mulig modulspenning, altså ved åpen-krets-spenning (OC) $V = V_{oc}$. I dette tilfellet vil alle fotogenererte elektron-hull-par rekombinere siden elektronene påvirkes til å gå i kretsen. Det svakeste signalet oppnås ved høyest mulig strøm gjennom modulen, altså ved $I = I_{sc}$ (kortslutning (SC)).

2.6.1 Δ PL-bilder

På Δ PL-bildene tilsvarer lyse piksler stor differanse i mengden radiativ rekombinasjon ved åpen og lukket krets, og er forventet for friske celler. Mørke piksler tilsier lav differanse i emittert PL-signal ved åpen og lukket krets, altså liten forskjell i mengden ladningsbærere som beveger seg i det spesifikke området i modulen ved null og maksimal strøm. Mørke områder på Δ PL-bildene tyder på dermed på tapsmekanismer og defekter.

For å kontrollere driftspunktet til modulen og ta bilder i dagslys uten å manuelt måtte koble av og på modulene kan det benyttes en MOSFET (metall-oksideret halvleder-felteffekttransistor). Dette er en variabel motstand og fungerer som en ekstremt hurtig bryter. Den tillater flere hundre avbildninger av modulen med tilnærmet like irradians-forhold. MOSFET-en kobles fysisk til modulen som skal avbildes og kontrolleres av triggerboksen.

Kapittel 3

Metode og eksperimentelt arbeid

Det eksperimentelle arbeidet er utført i Ås, lokalisert på Søråsjordet i nærheten av NMBU. Måling av IV-karakteristikk og PL-bilder er utført gjentatte ganger for analyse av degradering i solcellemoduler over tid. Eksperimentet består av 8 silisiummoduler med varierende skadeomfang. Under eksperimentet er det samlet inn data fra tre forskjellige typer solcellemoduler; fire av typen multikrystallinsk c-Si (levert av SweModule¹), to av typen monokrystallinsk c-Si (levert av Hunan Red Solar [31]), og to av typen bifacial (levert av JA Solar [32]). Heretter omtales modulene som henholdsvis Multi1, Multi2, Multi3, Multi4, Mono1, Mono2, Bi1 og Bi2. Figur 3.1 viser oppsettet av modulene slik de er montert. For optimal energiproduksjon er modulene montert med 42 grader helning og grader mot vest. Modulene er koblet til en inverter av typen Fronus Primo 3.0.

Denne masteroppgaven er en del av et større forskningsprosjekt på NMBU. Modulene er derfor installert før tidsrommet for oppgaven. Mono- og multimodulene ble installert i 2020, mens bifacial-modulene ble installert i 2021.

Tabell 3.1 viser oversikt over tidspunkt for gjennomførte målinger. Alle målinger er utført i solskinn med skyfri himmel, og måling av IV-kurver og PL-bilder er utført på samme dag, med ett unntak. Det ble utført PL-avbildning 04.02.21 og måling av IV-kurver 05.02.21. Værforholdene var tilnærmet like, med skyfri himmel begge dagene.

¹Databladet til moduler levert av SweModule er inkludert i vedlegg C.

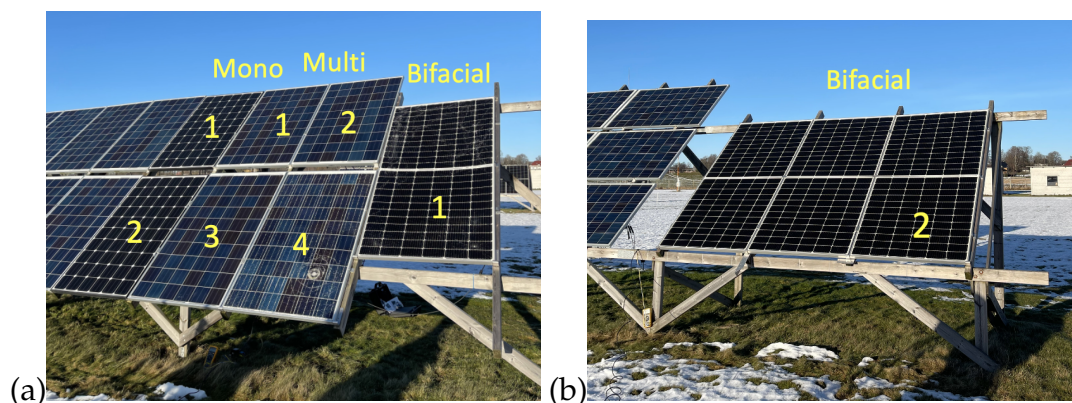


FIGURE 3.1: Oversikt over installerte moduler på a) Søråsjordet sør og b) Søråsjordet nord.

TABLE 3.1: Oversikt over datoer for utførte målinger. Tabellen viser også oversikt over spesifikke moduler som ble målt. Med mindre annet spesifiseres ble måling av alle oppgitte modultyper utført.

Dato for datainnsamling	Arbeid utført	Moduler målt
06.11.20	PL-bilder IV-kurver	Mono og multi
26.11.20	PL-bilder IV-kurver	Mono og multi
04.02.21	PL-bilder	Mono og multi
05.02.21	IV-kurver	Mono og multi
09.03.21	IV-kurver	Multi
15.04.21	PL-bilder IV-kurver	Mono og multi
10.08.21	PL-bilder IV-kurver	PL: Mono og multi IV: Multi4, Mono1, Mono2, Bi1 og Bi2
15.03.22	PL-bilder	Mono, multi og bifacial
11.10.22	PL-bilder IV-kurver	PL: Mono, multi og bifacial IV: Multi2, Multi4, Bi1 og Bi2
26.01.23	PL-bilder IV-kurver	Mono, multi og bifacial

Grunnet masteroppgavens begrensede tidsperiode er det i tillegg til egne målinger benyttet målinger utført av ansatte på Fakultet for realfag og teknologi på NMBU fra tidligere år. Målingene for 2020 og 2021 er utført

av Ingeborg Høiaas, målinger for 2022 er utført av Ingunn Burud, Espen Olsen og Torbjørn Mehl, og målinger for 2023 er utført med hjelp fra Marco Jakovljevic og medstudent Mirabai Hillestad.

Av ukjent årsak har PL-bildene for 10.08.21 blitt uleselige. For denne datoen analyseres det derfor kun IV-kurver. For enkelte datoer analyseres kun IV-kurver for noen moduler. Årsaken for dette er todelt; i noen tilfeller mangler målinger, mens i andre tilfeller er det usikkert hvilken IV-kurve som tilhører hvilken modul. Det er derfor tatt en beslutning om å droppe usikre målinger fremfor å anta hvilken modul de tilhører.

Modulspesifikasjoner for multi-moduler, mono-moduler og bifacial-moduler oppgis i henholdsvis tabell 3.2, 3.3 og 3.4.

TABLE 3.2: Modulspesifikasjoner for multi-modulene i eksperimentet.

Parameter	Verdi
Pmax [W]	250
Voc [V]	37.7
Vmpp [V]	30.3
Impp [A]	8.2
Isc [A]	8.8
FF	0.75

TABLE 3.3: Modulspesifikasjoner for mono-modulene i eksperimentet.

Parameter	Verdi
Pmax [W]	260
Voc [V]	37.9
Vmpp [V]	31.1
Impp [A]	8.35
Isc [A]	8.96
FF	Ikke oppgitt

TABLE 3.4: Modulspefikasjoner for bifacial-modulene i eksperimentet. dette er ikke rette tall

Parameter	Verdi
Pmax [W]	450
Voc [V]	49.61
Vmpp [V]	41.21
Impp [A]	10.92
Isc [A]	11.42
FF	Ikke oppgitt

3.1 Skadepåføring

For å undersøke hvordan ulike skader påvirker modulkarakteristikken og utvikles over tid, har modulene i eksperimentet skader i varierende grad. Tabell 3.5 viser oversikt over modultilstandene ved installasjon. Multi 1 er installert som referansecelle for skadede moduler.

TABLE 3.5: Oversikt over modultilstander.

Modul	Tilstand
Multi1	Ingen skader
Multi2	Mild mekanisk stress
Multi3	Hardt mekanisk stress. Glass er sprukket.
Multi4	Frisk frem til skadepåføring 26.11.20
Mono1	Skadet fra installasjon utendørs
Mono2	Skadet fra installasjon utendørs
Bi1	Hardt mekanisk stress. Påkjørt av truck.
Bi2	Frisk.

26.11.20 ble Multi4 påført skade med plasthammer med hensikt om å knuse glasset på forsiden av modulen. Grønn sirkel på figur 3.2a viser området modulen ble truffet. Påføringen er ment å tilsvare uforutsett skade oppstått fra uhell hvor modulen treffes av objekt, enten grunnet uforsiktighet fra mennesker eller fra hardt vær.

Samme dato ble også Multi3 påført skader, men med svakere kraft enn Multi4. Multi3 ble 26.11.20 truffet av tre svake slag på baksiden av modulen som vist på figur 3.3a. 16.03.21 ble samme modul igjen påført skade, denne gangen med moderate slag på baksiden i området vist på figur 3.3b. Hensikten er imitasjon av mulig skade fra installasjon med eksponert bakside. Ingen av skadene påført Multi3 er synlige for det blotte øyet.

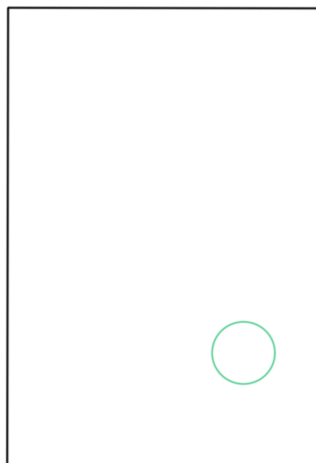


FIGURE 3.2: Skadepåføring 26.11.20 på fremsiden av Multi4, utført med en plasthammer.

Bi1 har også store skader. Modulen ble med uhell påkjørt ved lagring og veltet med fremsiden i bakken, som har ført til synlige skader på modulen i form knust glass.

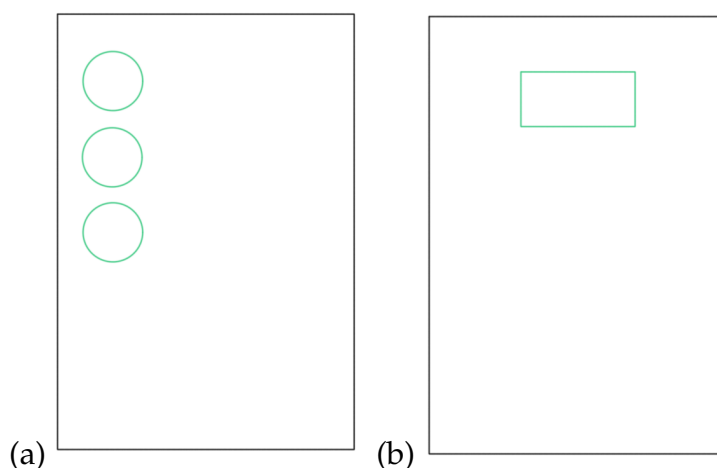


FIGURE 3.3: a) Skader på baksiden av Multi3 påført 26.11.20. b) Skader på baksiden av Multi3 påført 16.03.21

3.2 Måling av IV-kurver

For måling av IV-kurver benyttes instrumentet I-V400w, levert av HT Instruments [33]. Instrumentet tar målinger i henhold til den internasjonale standarden IEC 60904-1: "Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics" fra 2020 [14] (IEC:60904-1). Standarden fastsetter krav for temperatur og irradians slik at målte verdier kan korrigeres til STC. Standarden anbefaler irradians på $800\text{--}1200\text{W}/\text{m}^2$. I

dette eksperimentet har ikke irradians-kravet vært mulig å møte da målinger blant annet er foretatt for studie av degradering over tid. Det har derfor blitt utført målinger på vinterhalvåret med lavere irradians. Tabell 3.1 viser datoer for måling av IV-karakteristikk. For tidligere målinger er det kun utført 1 måling per modul per dato. 26.01.23 derimot ble det foretatt 3 målinger med hensyn på å regne ut gjennomsnittet av kurvene. Oppsett for målinger er vist på figur 3.4.

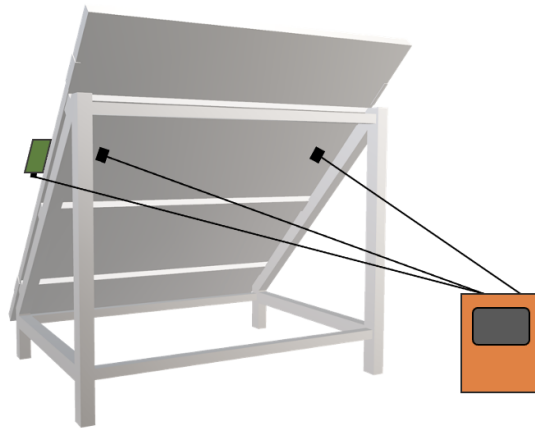


FIGURE 3.4: Oppsett ved måling av IV-karakteristikk. Referansecellen er festet på siden av modulen (grønn boks). Måleapparatet kobles til utgangene på baksiden av modulen.

Måleinstrumentet har flere innstillinger, og brukermanualen anbefaler at disse settes til "automatisk". Modultemperaturen regnes da ut fra åpen-krets-spenningen til modulen. Det er dog ikke alle tilfeller som tillater bruk av en slik automatisk innstilling. Dersom modultemperaturen er over 48 °C, noe som er typisk for skadede moduler, må modultemperaturen legges inn manuelt. For å måle irradians på modulene benyttes en referansecelle kalt HT304N, levert av HT Instruments. Denne kan kobles som referansecelle både for multi c-Si og mono c-Si. Årsaken til at det skilles mellom modultypene er ulik spektral sensitivitet. Referansecellen plasseres ved siden av modulene slik at vinkelen er lik i forhold til solinnstrålingen, se figur 3.5. Referansecellen flyttes ikke under målingene, med unntak for målinger av Bi2 da den står plassert på Søråsjordet nord mens resten av modulene står plassert på Søråsjordet sør. Søråsjordet nord er plassert bak søråsjordet sør, og er synlig i bakgrunnen av Bi1 på figur 3.1a. Referansecellen kan benyttes ved irradiansmålinger mellom 50-1400W/m², og har en usikkerhet på ± 3.0%. Måleinstrumentet inkluderer også en solskive som måler vinkelen mellom

solinnstrålingen og moduloverflaten. Standarden IEC:60904-1 stiller krav til at vinkelen ikke er for stor.



FIGURE 3.5: Referansecellen (hvit og grønn boks) festes på siden av en modul. Her er referansecellen koblet til en mono-modul.

Ved måletaking lagres IV-kurver med verdier for faktiske driftsforhold (OPC). For å muliggjøre sammenlikning av målinger tatt på forskjellige tidspunkt konverteres verdiene også automatisk til STC. Brukermanualen for måleinstrumentet oppgir at korrigeringen gjøres i henhold til prosedyre 2 i standarden IEC 60891: "Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics" [14] (IEC:60891). Som navnet på standarden tilsier består konverteringen av korrigering for temperatur og irradians. Hvert datapunkt for strøm og spenning korrigeres ved hjelp av følgende likninger:

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

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

I_2 og V_2 er henholdsvis strøm- og spenningskoordinater for den korrigerede IV-kurven. I_1 og V_1 er tilsvarende koordinater for målt IV-kurve. G_1 er irradians målt med referansecellen, mens G_2 er ønsket irradians for korrigeret IV-karakteristikk. På samme måte er T_1 kalkulert temperatur for solcellemodulen, mens T_2 er modultemperatur for korrigeret IV-karakteristikk. Som beskevet i kapittel 2.3.2 tilsvarer disse henholdsvis $1000\text{W}/\text{m}^2$ og $25\text{ }^\circ\text{C}$ for STC. Videre er V_{OC1} åpen-krets-spenning ved OPC. α_{rel} og β_{rel} er de relative strøm- og spenningstempeaturkoeffesientene for modulen målt ved STC, og er relatert til kortslutningsstrømmen og åpen-krets-spenningen ved STC. a er korreksjonsfaktoren for irradians for åpen-krets-spenning, og bestemmes av den termiske spenningen til pn-overgangen og antall celler som er seriekoblet i modulen. R_S er den indre resistansen til modulen. Til slutt er κ definert som temperaturskoeffesienten til den indre resistansen R_S .

3.2.1 Databehandling av IV-kurver

Måleinstrumentet har et tilhørende dataprogram kalt TopView hvor IV-kurvene kan plottes automatisk og studeres nærmere. Det er likevel begrensninger i programmet som ikke muliggjør fremstilling av ønskede IV-kurver i samme plott.

Det ble derfor først forsøkt manuell korrigering av verdiene til STC for å presentere kurvene i samme figur, men metoden viste seg å ikke fungere. Det ble da tatt en beslutning om å benytte bilder av plott fra TopView ved hjelp av en innebygget skjermbildefunksjon. Videre ble bildene redigert med programmet Autodesk Sketchbook (Version 8.7.0), hvor de ble importert ett og ett i egne lag for fjerning av bakgrunn på alle bilder med unntak av det første. Resultatet er ett detaljrikt plott hvor IV-kurvene fra alle datoer kommer tydelig frem.

Siden TopView mangler funksjon for utregning av gjennomsnitt av flere IV-kurver måtte det for 26.01.23 velges én av tre målinger som ble foretatt. I enkelte tilfeller var de tre målingene tilnærmet like, mens de i andre tilfeller har tydelig forskjell. I tilfeller med forskjell ble det tatt en vurdering på hvilken av de tre målingene som så ut til å være nærmest gjennomsnittet.

3.3 Innsamling av PL-bilder

For PL-avbildning er benyttet et kortbølget infrarødt kamera. For bildetakingen foretatt i 2020 og 2021 ble kameraet Xeva 320 med oppløsning på 320×256 benyttet. For 2022 og 2023 ble kameraet Raptor Photonics Owl 640S med oppløsning på 640×512 benyttet. Begge kameraene har en InGaAs detektor (optisk spekter på 1000-1700nm). For å filtrere vekk refleksjon som detekteres utenfor bølgelengdene til emittert PL-signal benyttes også et optisk båndpassfilter fra Edmund Optics som slipper gjennom lys med bølgelengder fra 1100-1150 nm og har optisk tetthet på ≥ 4.0 . Kameraet har integrasjonstid på 0.3 ms og en bildefrekvens på 167 Hz som vil si at det kan ta ett bilde per 6. ms. Dette betyr at det tas 330 bilder per måling.

Som nevnt tidligere er PL-bilder benyttet i dette eksperimentet tatt av ansatte og medstudenter ved Fakultet for realfag og teknologi på NMBU. Metoden for bildetakingen er beskrevet i artiklene "Photoluminescence imaging of silicon modules in a string" og "Noninvasive photoluminescence imaging of silicon PV modules in daylight", skrevet av M. Vucovic et al [34] [35]. Artiklene beskriver oppsettet ved bildetaking som vist på figur 3.6. Siden solcellemodulene avbildes på dagtid må det som beskrevet i kapittel 2.6 tas hensyn til støy i form av refleksjon fra sollys som interfererer med emittert PL-signal fra modulen. For å eliminere refleksjon avbildes modulene slik at det kan fremstilles Δ PL-bilder ved å variere driftstilstanden som forklart i kapittel 2.6. MOSFET-en kobles til terminalene på én modul av gangen slik som vist på figur 3.6. Som figuren viser kobles det også opp en triggerboks (svart boks) som er koblet til alle komponentene. Triggerboksen er USB-basert og kontrollerer modulspenningen, MOSFET-en, kameraet og bildetakingen. Det er også her bildene blir lagret.

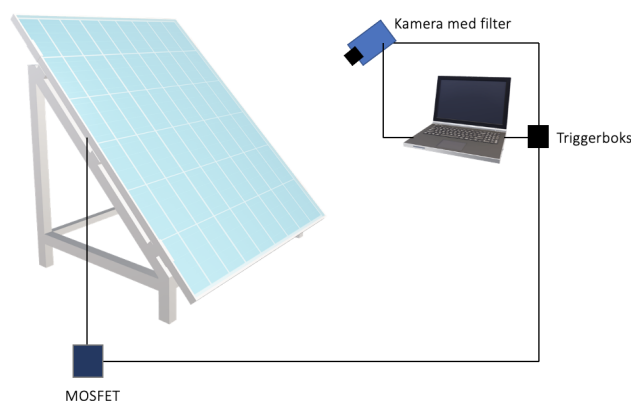


FIGURE 3.6: Oppsett for PL-avbildning av modulene.

Figur 3.7 viser hvordan MOSFET-en veksler mellom de to driftspunktene OC og SC på modulen, og hvordan triggerboksen og integrasjonstiden til kameraet er synkronisert med den.

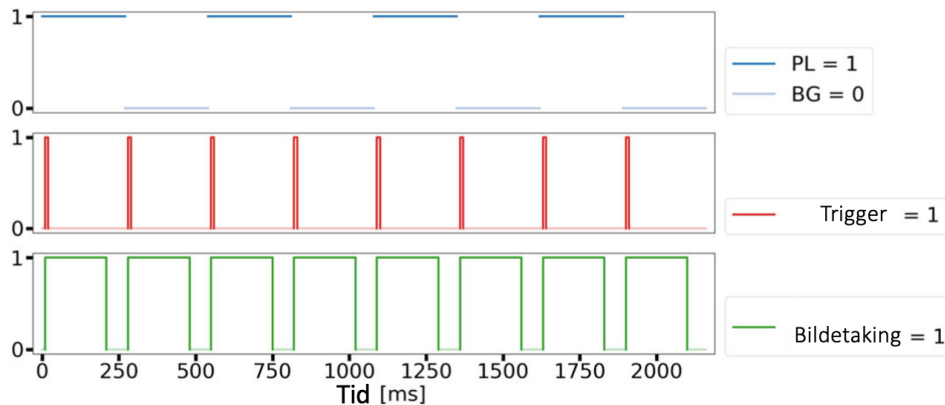


FIGURE 3.7: Grafer som fremstiller virkemåten til MOSFET. Øverste bilde viser skiftet mellom modulens to driftstilstander OC og SC ved PL-bildetaking. Midterste bilde viser kameratriggeren. Nederste bilde viser sekvenser med bildetaking, her med 200ms integrasjonstid.

3.3.1 Bildeanalyse

For å fremstille Δ PL-bilder benyttes programmet Spyder IDE (versjon 5.4.1) med Python (versjon 3.9.13) som kodespråk. Metoden for bildeanalyse beskrives via steg 1-4 under. Som nevnt må bakgrunnstøy fjernes fra bildene for analyse av emittert PL-signal. Deretter normaliseres bildene for å muliggjøre sammenlikning mellom PL-signal for målte datoer. Dette gjøres ved utvelgelse av celle som fremstår tilsynelatende frisk og konstant i alle målinger. Resultatet er Δ PL-bilder for samme modul hvor intensitetsskalaen er lik, og som viser hvor mye radiativt tap en piksel har i forhold til valgt celle. Det kan da studeres utvikling av degradering i modulen. Vedlegg A.1 viser python-kode brukt for bildeanalyse.

Steg 1

PL-bildene sorteres slik at det skilles mellom bilder tatt ved åpen og lukket krets, med henholdsvis sterkest og lavest PL-signal. Det tas annenhvert OC- og SC-bilde av modulen. Det blir så regnet ut gjennomsnitt av bildene som vist på figur 3.8. Det er ikke mulig å se forskjell på bildene med det blotte øyet. Bildene ser derfor helt like ut. Både bildene ved OC og SC inneholder bakgrunnstøy, men bilder tatt ved OC inneholder PL-signal i tillegg.

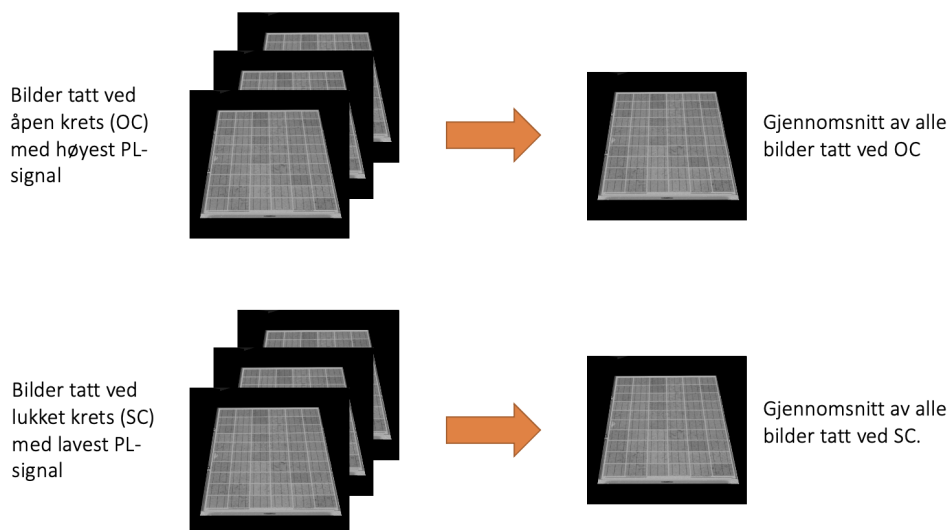


FIGURE 3.8: Steg 1 i bildeanalysen.

Steg 2

Videre subtraheres gjennomsnittet av bilder tatt ved SC fra bilder tatt ved OC, se figur 3.9. Resultatet er et Δ PPL-bilde uten bakgrunnstøy.

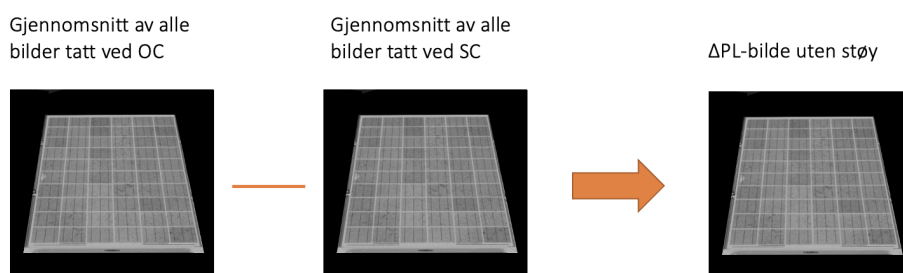


FIGURE 3.9: Steg 2 i bildeanalysen.

Steg 3

Δ PPL-bildene må deretter normaliseres for å sammenlikne bilder tatt ved ulike datoer hvor irradians har vært ulik. Dette gjøres ved utvelgelse av en tilsynelatende konstant og frisk celle hvor gjennomsnittet av pikslene i cellen regnes ut, se figur 3.10.

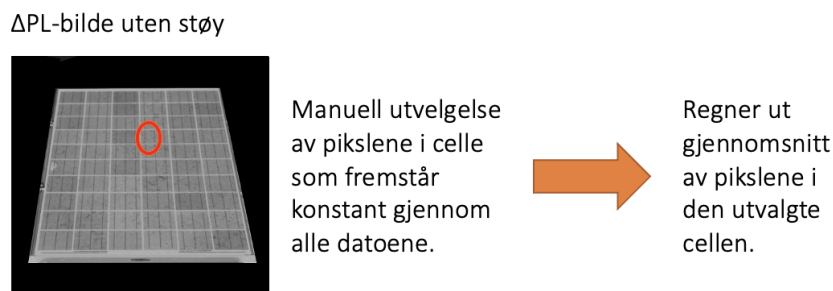


FIGURE 3.10: Steg 3 i bildeanalysen.

Steg 4

Til slutt deles pikslene i hele Δ PL-bildet på gjennomsnittet av pikslene i den utvalgte cellen, se figur 3.11. Resultatet er lik intensitetsskala på alle Δ PL-bilder for samme modul.

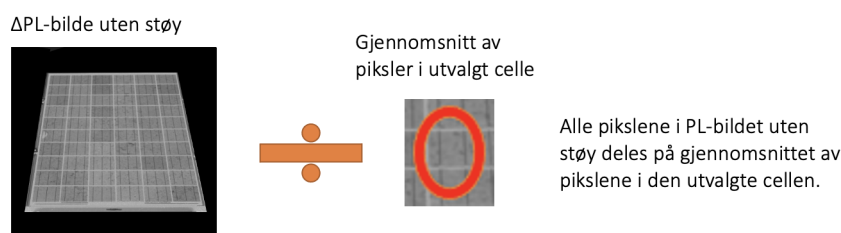


FIGURE 3.11: Steg 4 i bildeanalysen.

Kodesnutt benyttet

3.4 Visuell inspeksjon av moduler

Det ble gjennomført en visuell inspeksjon av alle moduler 05.05.23 hvor synlige skader på modulene ble avbildet. Det var dog utfordrende å avbilde Multi1 og Multi2 grunnet installasjonshøyden. Her ble det tatt bilde av modulene etter beste evne.

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

IV-karakteristikk for hver modul målt ved datoer presentert i tabell 3.1 fremstilles i samme plott for studie av degradering over tid. Alle IV-kurver er korrigert til STC for sammenlikning mellom kurver målt ved ulike forhold. Resultatene viser variasjon i kortslutningsstrøm I_{sc} for alle moduler. Som beskrevet i kapittel 2.3.3 kan endring i I_{sc} skyldes endring i irradians, men siden verdiene er korrigert til STC (altså irradians lik $1000\text{W}/\text{m}^2$) er det nærliggende å anta at variasjonene forårsakes av andre faktorer. Eksempelvis vil økt serieresistans R_s eller lysindusert degradering (LID) redusere I_{sc} . Dessverre er det en del usikkerhet i korrigeringen til STC i eksperimentet siden OPC-verdier ved måling har vært utenfor området definert i standarden IEC:60904-1. Irradiansen har typisk vært $500\text{-}600\text{W}/\text{m}^2$, altså lavere enn $800\text{W}/\text{m}^2$. Usikkerheten gjelder alle målte IV-kurver i eksperimentet, og følgelig alle parametere presentert i tabeller. Om endringen i I_{sc} skyldes degradering, annen verdi for irradians eller usikkerhet kan ikke sies med sikkerhet. Grunnet varierende verdier for irradians i målingene vil også størrelsen på usikkerheten variere. IV-karakteristikken for tilsynelatende friske moduler er spesielt utfordrende å analysere da formen på alle kurvene er tilnærmet lik. Sammenlikningsgrunnlaget for utvikling i IV-kurvene er dermed mindre enn for moduler med åpenbare skader som kan sammenliknes på andre måter.

Resultatene for IV-karakteristikken viser også verdier langt over nominell verdi for flere av målingene, spesielt for I_{sc} og P_{max} . Dette skyldes sannsynligvis også feil i korrigering grunnet driftsforhold utenfor anbefalt område ved måling. Likevel antas det at IV-karakteristikkene er sammenliknbare siden dette gjelder for alle målinger. Det observeres også at fyllfaktoren ligger innenfor forventet område for modultypene, som underbygger antakelsen om at IV-kurvene er sammenliknbare.

For å studere endring i Δ PPL-bildene for sammenlikning med IV-karakteristikken presenteres første og siste bilde i samme figur. Δ PPL-bilder for alle datoer er inkludert i vedlegg B.

Tilhørende karakteriseringsparametere for modulene presenteres i tabell med verdier korrigert til STC.

Bilder tatt ved visuell inspeksjon gir kun informasjon om synlige skader i modulen da mengden skit og støv endres konstant. Synlig skit og støv kommenteres eller diskuteres derfor ikke i resultatene. For optimal analyse av modulen i forhold til ytre faktorer skulle visuell inspeksjon vært utført ved hver måling.

For å undersøke om det er korrelasjon mellom skader og andre effekttap som kan detekteres på Δ PPL-bilder og IV-kurven til modulen, analyseres disse mot hverandre for hver modul. Fra resultatene kommer det frem at IV-karakteristikken til Multi1, Multi2, Multi3 og Bi1 er tilnærmet lik nominell kurve for alle målingene, og at Δ PPL-bildene for de respektive modulene ser relativt friske ut. Derfor tar diskusjonen for seg disse modulene først. Deretter diskuteres Mono1 og Mono2 med relativt like resultater. Til slutt diskuteres modulene Multi4 og Bi1 som begge har tydelig endring i IV-karakteristikken og Δ PPL-bilder med åpenbare skader.

4.1 Multi1

Figur 4.1 viser IV-karakteristikken til Multi1 over tid. Nominell kurve (svart graf) er inkludert for sammenlikning. Det er tydelig at IV-kurvene for de ulike datoende er tilnærmet konstant med unntak av målingen utført 05.02.21.

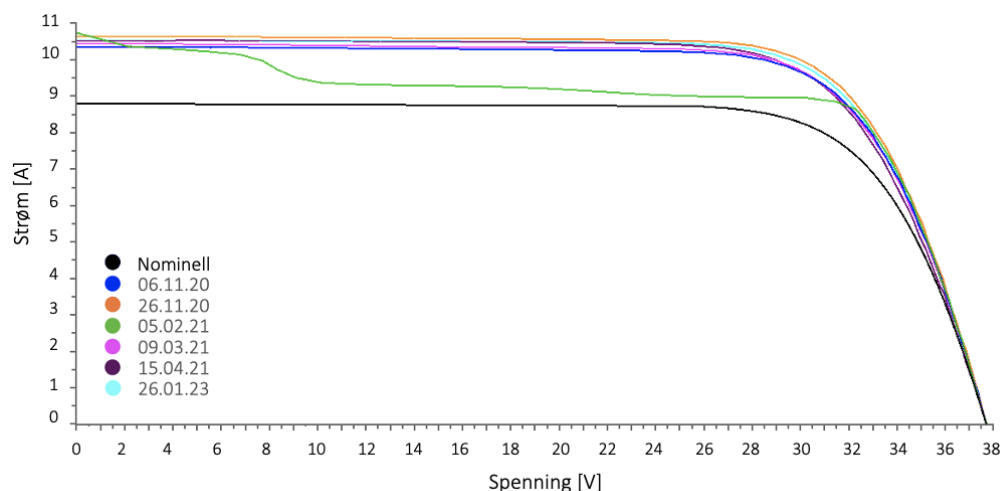


FIGURE 4.1: Utvikling av IV-karakteristikk for Multi1 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

Som beskrevet i kapittel 3 var Multi1 frisk ved installasjon med hensikt om å være referansemodul for skadede moduler. Fra resultatene på figur 4.1 er det tydelig at modulen ikke har pådratt seg store skader over tid, siden formen på IV-kurvene med unntak av måling foretatt 05.02.21 er tilnærmet lik nominell kurve. Det er ikke mulig å fastslå årsaken til avvik fra nominell form for IV-kurven, men ved sammenlikning med figur 2.9 i kapittel 2.3.3 likner den IV-kurver ved delvis skygging. Det kan argumenteres for at formen heller skyldes variasjon i irradians under måling, men det ville da vært nærliggende å anta at flere av kurvene ville hatt liknende variasjon. Grunnet høyden for installasjon kan det utelukkes skygging fra mennesker eller utstyr, men det er mulig at det har vært blader eller større mengder skit/støv på modulen. Dessverre ble det ikke foretatt visuell inspeksjon av modulen 05.02.21 som kunne bekreftet/avkreftet dette. Figur 2.5 viser typisk form på IV-kurve med én bypassdiode forspent i lederetning. Siden formen på IV-kurven målt 05.02.21 har en knekk i kurven tidligere enn vist i figuren kan det ser ut at det for Multi1 er to forspente bypassdioder. Videre kan det ved sammenlikning med figur 2.9 antas at rundt 10% av modulen skygges da strømverdien ikke reduseres mer enn ca. 1.7A.

Karakteriseringsparameterne for Multi1 fremstilles i tabell 4.1.

TABLE 4.1: Karakteriseringsparametere for Multi1. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	290.03	37.69	30.17	9.61	10.34	0.74
26.11.20	299.74	37.73	29.84	10.05	10.63	0.75
05.02.21	278.88	37.69	32.39	8.63	10.43	0.71
09.03.21	291.09	37.69	29.82	9.76	10.43	0.74
15.04.21	291.55	37.69	29.87	9.76	10.53	0.73
26.01.23	295.83	36.68	30.47	9.71	10.53	0.75

Karakteriseringsparametere for Multi1 viser heller ikke uforventede verdier, med unntak av allerede diskutert måling for 05.02.21. Parameterne tyder ikke på nevneverdig degradering i modulen da verdiene fluktuerer rundt forventet verdi. Det er heller ikke er trend at verdiene reduseres for senere datoer. Fra IV-kurvene kan det se ut til å være forskjell i R_s fra måling til måling, men siden utviklingen ikke viser en konsekvent økning kan dette eksempelvis skyldes usikkerhet i korrigeringen til STC.

Figur 4.2 viser Δ PPL-bilde for første og siste avbildning av Multi1. Alle bilder er normalisert ved hjelp av referansecelle markert med rosa på figur 4.3. Alle irregulareteter er markert med oransje. Δ PPL-bilder med flest detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.39-1.0.

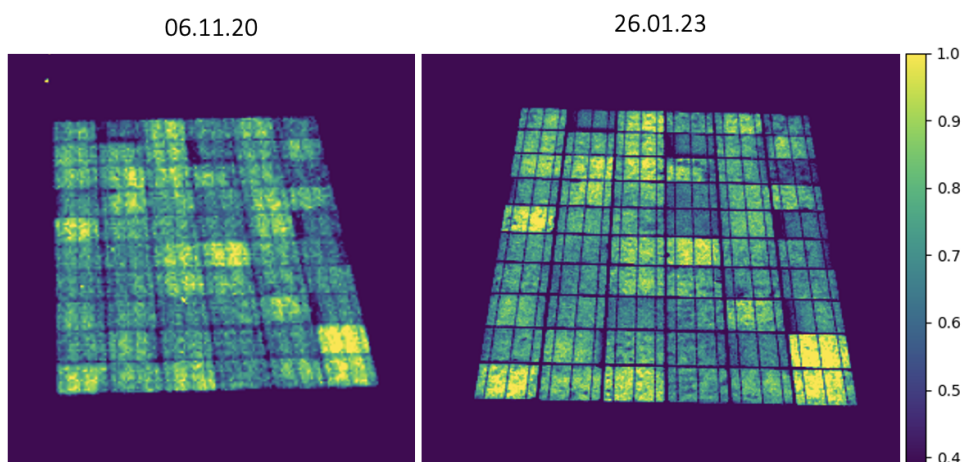


FIGURE 4.2: Δ PPL-bilde for første og siste avbildning av Multi1.

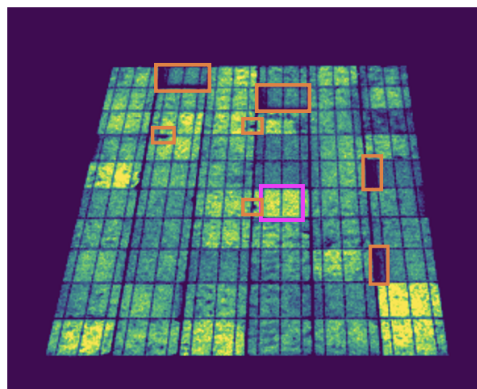


FIGURE 4.3: Δ PL-bilde hvor irregulariteter på Multi1 er markert med oransje. Referansecelle benyttet til normalisering er markert med rosa.

Δ PL-bildene for Multi1 (figur 4.2) viser tydelig lavere emittert PL-signal (mørke piksler) for deler av cellen for både første og siste avbildning. Celler med delvis mørke områder er markert med store oransje firkanter på figur 4.3. Som forklart i kapittel 2.6 tilsvarer mørke piksler liten forskjell i mengden radiativ rekombinasjon ved åpen og lukket krets, som betyr at få fotogenererte ladningsbærere vandrer til kretsen og heller rekombinerer i cellen. Grunnet mangel på andre typer bilder for sammenlikning er det vanskelig å fastslå nøyaktig årsak til lavt PL-signal i cellene, men generelt tyder det på sprekker i halvledermaterialet som kan isolere området fra resten av cellen, eller dårlig kobling mellom busbar/nettfingre og cellen. En kombinasjon er også vanlig da sprekker ofte fører til dårlig kobling, men dette kommer an på posisjonen til sprekken. På Δ PL-bildene for Multi1 er det også tre mindre områder markert med små oransje firkanter på samme figur. Disse områdene emitterer enda lavere PL-signal. Kun én av irregularitetene er synlig som mørkt område ved visuell inspeksjon. Misfargingen av cellen ser ut til å være forårsaket av korrosjon, se figur 4.4a og 4.4b. Siden alle markerte områder i Δ PL-bildene er synlig for alle datoer antas det at de ikke forekommer av støy. I tilfellene hvor skarp kant skiller mørk og lys del av cellen skyldes lavt PL-signal med stor sannsynlighet mikrosprekk. Grunnet installasjonshøyden er det ikke mulig med nærinspeksjon. Et typisk tegn på sprekker i modulen er økning i serieresistans R_s og reduksjon i shuntmotstand R_{sh} , men grunnet størrelsen på antatte sprekker forventes det ikke tydelig endring i IV-karakteristikken.

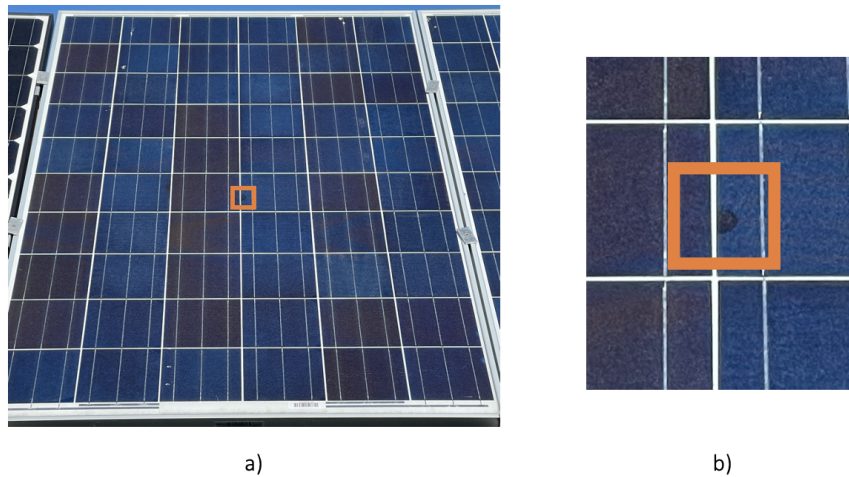


FIGURE 4.4: a) Visuell inspeksjon av Multi1 som viser tydelig misfarging på én av cellene i modulen. b) Større bilde av misfargingen.

Da både IV-karakteristikken og Δ PL-bildene klassifiserer Multi1 som tilsynelatende frisk antas det å være korrelasjon mellom karakteriseringsmetodene. Som diskutert observeres ikke tydelige skader på hverken Δ PL-bilder eller IV-kurver for modulen.

4.2 Multi2

Utvikling av IV-karakteristikk for Multi2 presenteres i figur 4.5. Nominell kurve (svart graf) er inkludert for sammenlikning. Det er tydelig at IV-kurvene tilnærmet konstant med unntak av målinger utført 05.02.21 og 11.10.21. Målingen utført 11.10.21 er som beskrevet i kapittel 3.2 utført med "manuell" innstilling på måleinstrumentet i motsetning til "automatisk" som for resten av datoene.

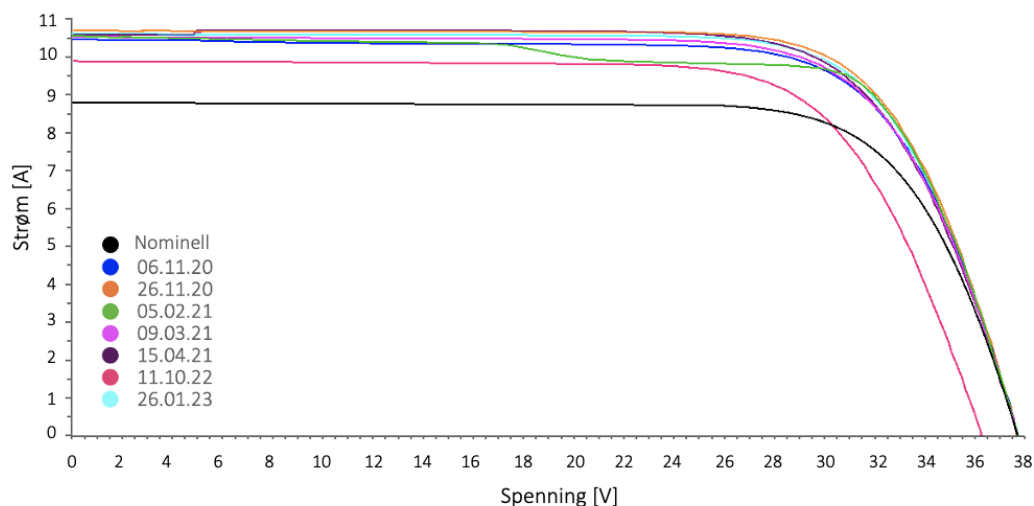


FIGURE 4.5: Utvikling av IV-karakteristikk for Multi2 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

Multi2 er som beskrevet i tabell 3.5 kategorisert som en modul med mildt mekanisk stress. Fra IV-kurvene på figur 4.5 er det tydelig at de fleste kurver har tilnærmet lik nominell form, men at det for 05.02.21 (samme som for Multi1) og 11.10.22 observeres irregulareteter. Det antas at irregulareteten for 05.02.21 skyldes samme årsak som for Multi1, men at kun én bypassdiode leder strøm. I tillegg ser det ut til at en mindre del av modulen skygges. Som nevnt er IV-karakteristikken for 11.10.22 utført med "manuell" innstilling for modultemperatur og ikke "automatisk", selv om en automatisk innstilling anbefales av produsenten. Årsaken til "manuell" innstilling i dette tilfellet var misforståelse ved utførelse av målingen. Det ble lagt inn en temperatur på 12°C, som tyder på det er lagt inn omgivelsestemperatur fremfor modultemperatur. IV-kurven for 11.10.22 har en nominell form, men lavere I_{sc} og V_{oc} enn forventet. Modultemperaturen til Bi2 kalkulert fra IV-karakteristikk målt samme dag med automatisk innstilling er 25.1°C, altså mer enn dobbelt så høy som for Multi2. Siden modultemperaturen ble satt til 12 °C kan derfor en manuell innstilling på måleinstrumentet forklare hvorfor IV-kurven har lavere verdier enn forventet, og hvorfor den skiller seg fra resten av målingene.

Tabell 4.2 viser karakteriseringsparameterne for Multi2. Her kommer det også tydelig frem at parameterne målt 11.10.22 er lavere enn for resten av datoene. Ellers er parameterne relativt konstant med naturlig variasjon, noe som tyder

på at skadene klassifisert som "mildt mekanisk stress" ikke har stor betydning for IV-karakteristikken til modulen.

TABLE 4.2: Karakteriseringsparametere for Multi2. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	289.58	37.70	30.22	9.58	10.44	0.74
26.11.20	301.34	37.69	29.90	10.08	10.69	0.75
05.02.21	294.20	37.69	30.85	9.54	10.52	0.74
09.03.21	291.98	37.73	29.84	9.79	10.52	0.74
15.04.21	296.03	37.72	29.87	9.91	10.58	0.74
11.10.22	259.69	36.26	28.50	9.11	9.88	0.72
26.01.23	297.74	37.65	29.95	9.94	10.60	0.75

Første og siste Δ PL-bilde for Multi2 presenteres i figur 4.6. Bildene er normalisert med referansecellen markert med rosa på figur 4.7. Oransje firkanter på samme figur markerer irregulareteter i Δ PL-bildene. Δ PL-bildene med flest detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.47-1.1.

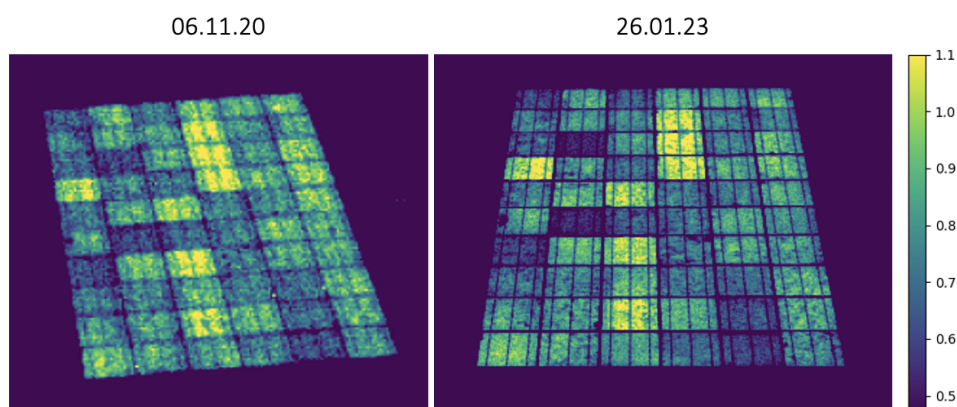


FIGURE 4.6: Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Multi2.

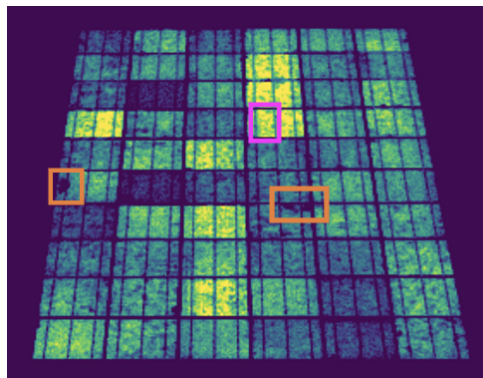


FIGURE 4.7: Δ PL-bilde hvor irregulariteter på Multi2 er markert med oransje. Referansecelle benyttet til normalisering er markert med rosa.

Δ PL-bildene for Multi2 viser enkelte hele celler med lavere PL-signal. Dette kommer tydelig frem på figur 4.6 hvor spesielt to av cellene er veldig mørke. Enkelte av cellene har også mørkere områder markert på figur 4.7. Det er heller ikke for Multi2 mulig å fastslå nøyaktig årsak for mørkere områder, og som beskrevet i metoden var det utfordrende med visuell nærinspeksjon av modulen grunnet installasjonshøyden. Visuell inspeksjon viser ingen synlige skader, se figur 4.8.



FIGURE 4.8: Visuell inspeksjon av Multi2. Støv og skit på glasset kan ikke korreleres til IV- eller PL-bilder grunnet datoen den ble utført. Ingen synlig skader på glass eller celler.

Ved sammenlikning av Δ PL-bildene med IV-karakteristikken til modulen er det ikke tydelige tegn på hva som forårsaker mørke områder. Likevel kan det være nærliggende å anta at de skyldes sprekker, dårlig kobling mellom cellen og busbarene eller PID. Spesielt de to mørkeste cellene til venstre for midten og de tre mørke cellene i nederste høyre hjørne på figur 4.6 er som beskrevet i kapittel 2.5.1 klassiske eksempler på PID. PID fører til redusert shuntmotstand i cellene siden Na^+ -ioner gir alternative veier for fotogenererte ladningsbærere å bevege seg utenom kretsen. Grunnet

reduksjon i R_{sh} reduseres også P_{max} , I_{sc} , V_{oc} og FF . I tilfellet for Multi2 er det dog ingen tydelige tegn til reduksjon av parameterne i tabell 4.3 og figur 4.9, men som nevnt er det store usikkerheter knyttet til målingene.

Grunnet ingen tydelige tegn til skader på hverken IV-karakteristikken eller ΔPL -bildene til modulen kan det også for Multi2 antas å være korrelasjon mellom IV-kurvene og ΔPL -bildene.

4.3 Multi3

IV-karakteristikk for Multi3 presenteres i figur 4.9, hvor nominell kurve er inkludert for sammenlikning. IV-kurvene for alle datoer, med unntak av 26.01.23, har tilnærmet nominell form. Irregulariteten i kurven for 26.01.23 har tilsvarende form som måling utført 05.02.21 for Multi2, men avviker i mindre grad fra nominell kurve. Karakteriseringsparameterne for Multi3 er inkludert i tabell 4.3.

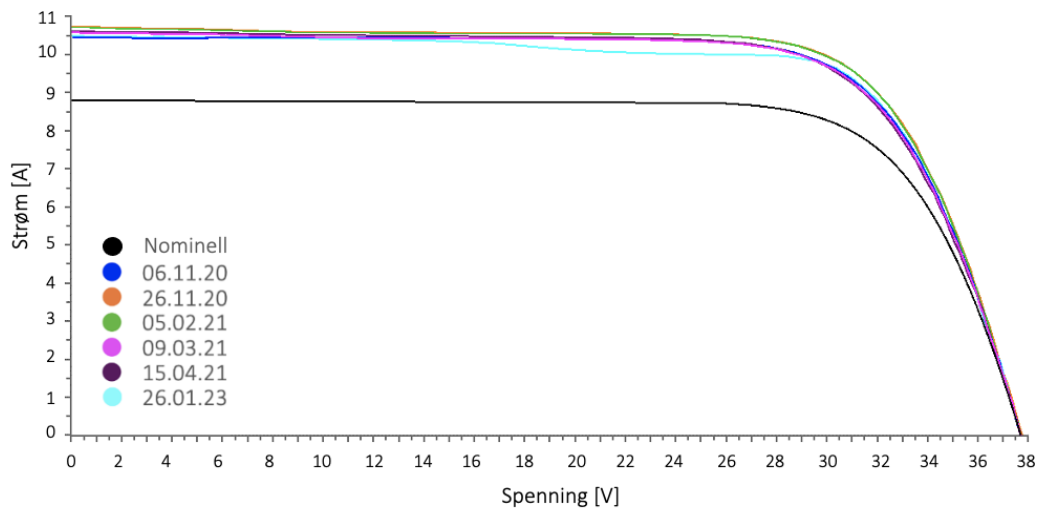


FIGURE 4.9: Utvikling av IV-karakteristikk for Multi3 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

TABLE 4.3: Karakteriseringsparametere for Multi3. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	292.00	37.68	30.27	9.65	10.43	0.74
26.11.20	299.74	37.73	29.84	10.05	10.63	0.75
05.02.21	298.81	37.66	30.45	9.81	10.69	0.74
09.03.21	290.83	37.69	29.75	9.78	10.53	0.73
15.04.21	290.56	37.73	29.89	9.72	10.57	0.73
26.01.23	292.84	37.73	30.36	9.65	10.46	0.74

Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Multi3 er inkludert i figur 4.10. Δ PL-bilder med mest mulig detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.5-1.05.

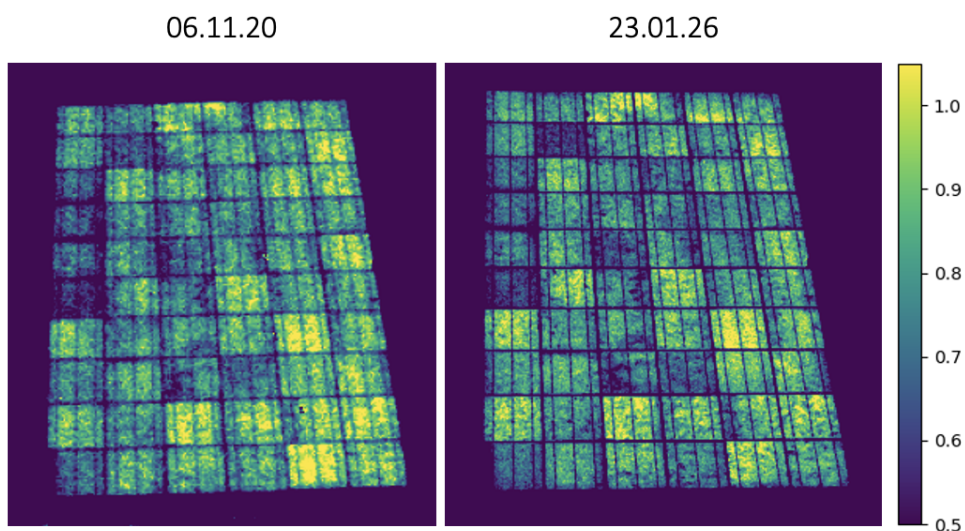


FIGURE 4.10: Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Multi3.

I likhet med resten av modulene er irregulareteter i Δ PL-bildene markert med oransje og referansecellen markert med rosa. Rød firkant markerer skader synlig ved visuell inspeksjon.

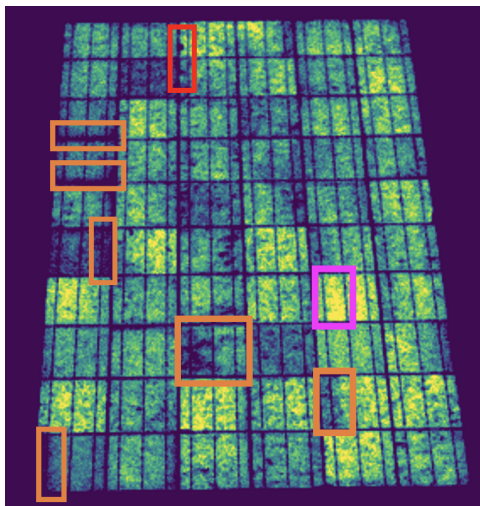


FIGURE 4.11: Δ PL-bilde hvor irregulariteter på Multi3 er markert med oransje. Referansecelle benyttet til normalisering er markert med rosa.

Figur 4.12 viser Δ PL-bilde hvor område for moderat skadepåføring er markert i hvitt.



FIGURE 4.12: Δ PL-bilde hvor område for skadepåføring er markert i hvitt.

De mørkeste områdene på Δ PL-bildene for Multi3 gjenspeiler områder for skadepåføring. Grunnet skadepåføring er det nærliggende å anta at mørke områder skyldes sprekker og dårlig kobling mellom cellen og busbars/nettfigre. Rød firkant på samme figur markerer to mørke flekker synlig ved visuell inspeksjon. Ved analyse av flekkene kan det tyde på korrosjon av cellen/nettfigrene fra fukt eller oksygen, men det observeres

ikke synlig sprekk i glasset. De synlige skadene vises på figur 4.13a og 4.13b. Sistnevnte er redigert for økt kontrast for å tydeliggjøre flekkene.

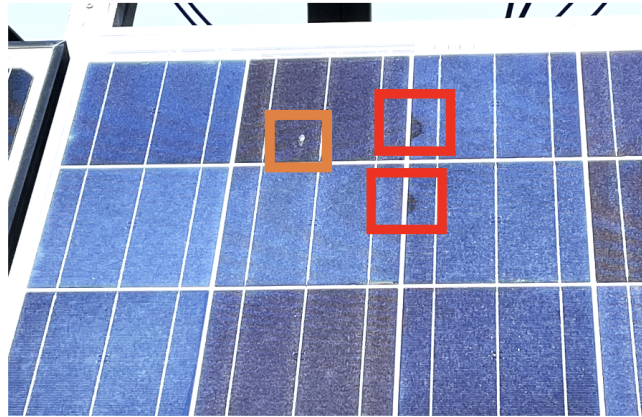


FIGURE 4.13: Visuell inspeksjon av Multi3 med to synlige mørke flekker. Bildet er redigert for økt kontrast for å tydeliggjøre flekkene.

Selv om det er kjent at Multi3 er påvirket av hardt mekanisk stress antyder både IV-karakteristikken og Δ PPL-bildene at modulen tilsynelatende er frisk. Det kan dermed også for Multi3 antas å være korrelasjon mellom IV-karakteristikken og Δ PPL-bildene.

4.4 Bi2

Figur 4.14 viser IV-karakteristikken til Bi2 over tid. Nominell kurve (svart graf) for modulen er inkludert for sammenlikning. Det er tydelig at IV-karakteristikken er tilnærmet lik nominell kurve for alle målinger.

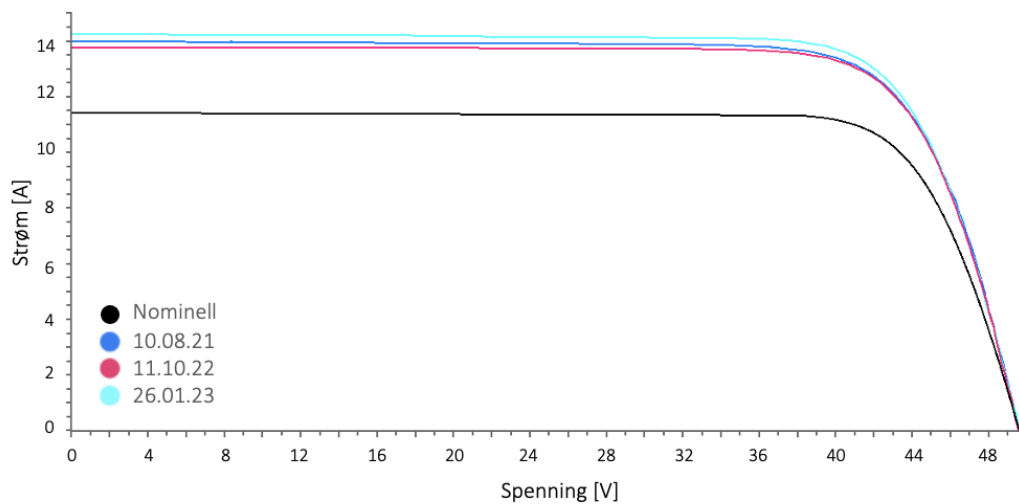


FIGURE 4.14: Utvikling av IV-karakteristikk for Bi2 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

Karakteriseringsparametere for Bi2 er inkludert i tabell 4.4. Tabellen viser som forventet relativt konstante verdier.

TABLE 4.4: Karakteriseringsparametere for Bi2. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
10.08.21	538.99	49.57	41.01	13.14	13.97	0.78
11.10.22	535.25	49.60	40.75	13.14	13.75	0.78
26.01.23	550.59	49.60	40.58	13.57	14.24	0.78

Utviklingen av Δ PL-bilder over tid for Bi2 presenteres i 4.15. Alle bildene er normalisert ved hjelp av referansecelle markert med rosa på figur 4.3. Alle irregulariteter er markert med oransje. Δ PL-bilder med flest detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.87-1.18. Δ PL-bildene for Bi2 viser sterkere PL-signal for øverste del av modulen.

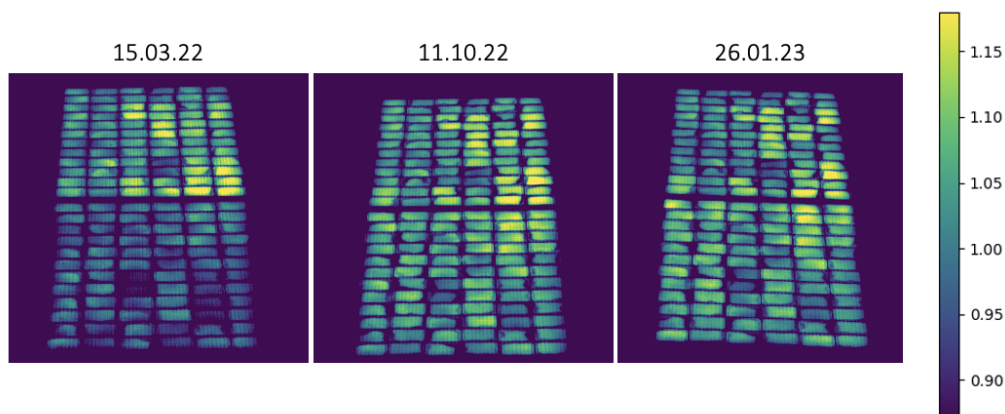


FIGURE 4.15: Δ PL-bilde for Bi2 som viser utvikling over tid.

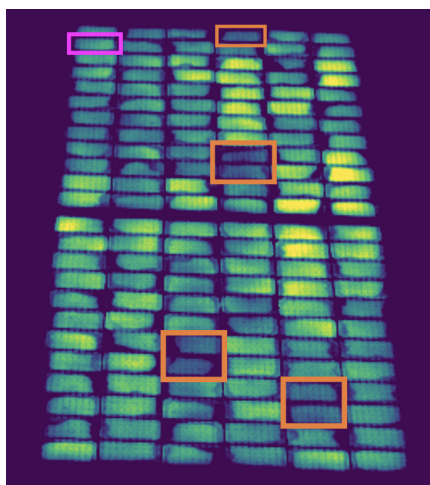


FIGURE 4.16: Δ PL-bilde av Bi2 hvor oransje firkant markerer celler med lavest PL-signal. Rosa firkant markerer referansecelle benyttet for normalisering.

Gjennom analyse av IV-karakteristikken og Δ PL-bildene til Bi2 i henholdsvis figur 4.14 og 4.15 fremstår modulen frisk, og i løpet av tiden for eksperimentet kan det ikke detekteres tydelig degradering av modulen. Ved analyse av parameterne for modulen i tabell 4.4 er det heller ingen tegn til degradering. Produsenten av modultypen oppgir en degraderingsrate på 0.45% per år. Selv om degraderingsraten gjerne er høyere de første årene (som nevnt i kapittel 2.5) vil det være vanskelig å detektere degraderingen etter kun 2 år. Grunnet usikkerheter i målingene er det også vanskelig å fastslå om eventuell endring i IV-kurven skyldes degradering eller avvik ved korrigerings.

Selv uten tydelige skader på Bi2 observeres det fra Δ PL-bildene at PL-signalet er lavere mot ytterkanten av cellene. Det er ikke mulig å fastslå spesifikk årsak til dette, men det kan tenkes at en ujevn overflatepassivering vil fremstå slik.

Som beskrevet i kapittel 2.4.1 benyttes overflatepassivering for å minimere feller på overflaten av materialet. For bifacial-modulene ser det ut til å ha vært ujevn deponering av antirefleksjonsbelegget. Det kan tenkes at dette fører til høyere grad av SRH-rekombinasjon på celleoverflaten som ikke detekteres av kameraet.

Grunnet antatt ujevn deponering er det mulig å se hvordan cellene er installert vekselvis på modulen. Selv om Δ PL-bildene på Bi2 ikke viser tydelige skader, er det likevel enkelte hele celler markert på figur 4.16 som emitterer lavere PL-signal enn resten. Mulige forklaringer kan også i dette tilfellet være mikrosprekker, dårlig kobling mellom celler og busbars/netttingre, eller PID. Δ PL-bildene for Bi2 viser sterkere PL-signal for øverste del av modulen. Dette kan forklares ved at øvre del av modulen mottar mer diffus stråling siden refleksjonsarealet for strålingen er større i høyden.

Visuell inspeksjon av modulen viser ingen skader, se figur 4.17.



FIGURE 4.17: Visuell inspeksjon av Bi2. Bildet viser ingen synlige skader, bare skit og støv på modulen.

Siden IV-kurvene til Bi2 ser frisk ut med tilnærmet nominell form og Δ PL-bildene ikke viser tydelige tegn til skader, antas det å være korrelasjon mellom IV-kurvene og Δ PL-bildene for Bi2.

Siden Mono1 og Mono2 klassifiseres som moduler med skader oppstått fra installasjon utendørs og resultatene ser ut til å vise samme typer skader diskuteres modulene sammen.

4.5 Mono1 og Mono2

Utvikling i IV-karakteristikken til Mono1 og Mono2 presenteres i henholdsvis figur 4.18 og 4.19. Det er tydelig at modulene er påvirket av degradering da kurvene avviker fra nominell form (svart kurve). Det er også stor variasjon i kurvene, noe som også gjenspeiles i karakteriseringsparameterne presentert i tabell 4.5 og 4.6 for de respektive modulene .

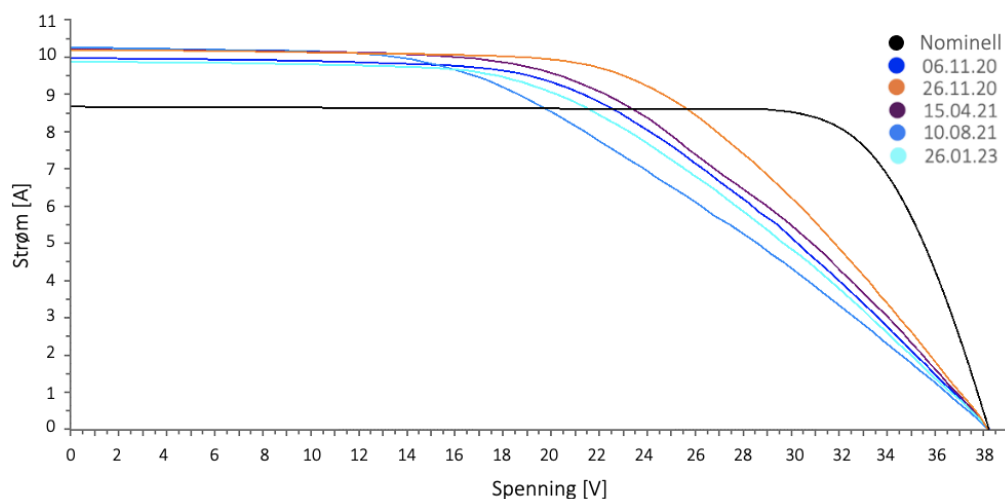


FIGURE 4.18: Utvikling av IV-karakteristikk for Mono1 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

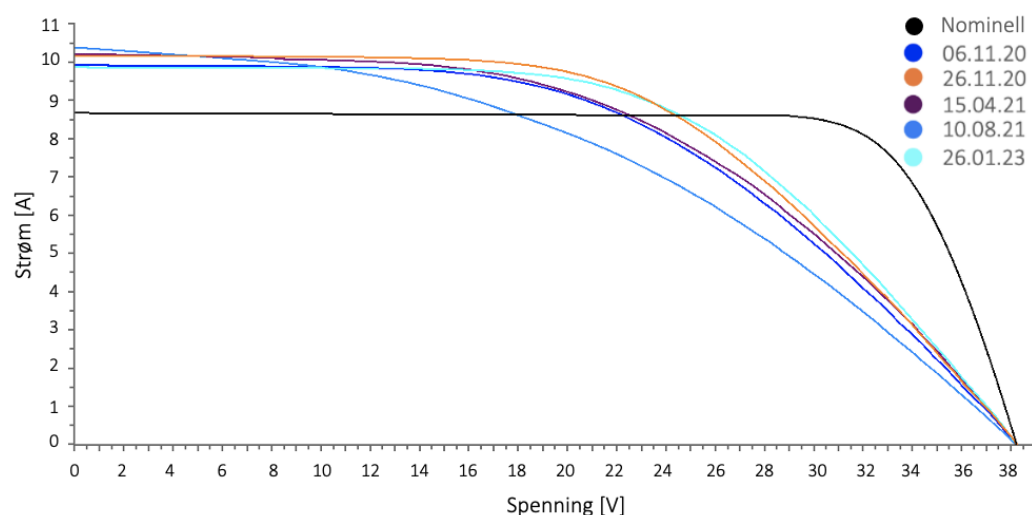


FIGURE 4.19: Utvikling av IV-karakteristikk for Mono2 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

TABLE 4.5: Karakteriseringsparametere for Mono1. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	194.32	38.21	22.85	8.50	9.96	0.51
26.11.20	221.94	38.22	24.92	8.91	10.20	0.57
15.04.21	201.28	38.22	23.50	8.57	10.17	0.52
10.08.21	171.24	38.26	21.44	7.99	10.21	0.44
26.01.23	186.14	38.23	22.85	8.15	9.89	0.49

TABLE 4.6: Karakteriseringsparametere for Mono2. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	192.76	38.27	23.65	8.15	9.91	0.51
26.11.20	209.71	38.21	24.04	8.73	10.17	0.54
15.04.21	195.58	38.26	23.73	8.23	10.13	0.50
10.08.21	167.49	38.19	22.43	7.47	10.16	0.43
26.01.23	211.58	38.27	24.55	8.62	9.87	0.56

For begge moduler ser det ut til at endring i IV-karakteristikk i hovedsak skyldes redusert shuntmotstand R_{sh} som er typisk ved sprekker og PID. Som forklart i kapittel 2.5.1 kan PID akselereres av sprekker. En kombinasjon er derfor rimelig å anta. Det er tydelig at usikkerheten ved korrigering til STC har stor betydning for resultatene da parameterne til modulene fluktuerer fra dato til dato. Det er vanskelig å trekke slutninger om årsaken til variasjonen i målingene nettopp grunnet usikkerheten.

I Δ PL-bildene for Mono1 og Mono2 på henholdsvis figur 4.20 og 4.22 observeres celler med sterkere PL-signal og celler med lavere PL-signal enn andre. Som beskrevet i kapittel 2.5.1 og diskutert tidligere er dette typisk for PID. PID-mønsteret er best synlig for Mono1. Siden modulen har flere celler med lavere PL-signal enn resten, og tilsynelatende sprekker i flere av cellene markert på figur 4.21 og 4.23, er PID nærliggende å anta.

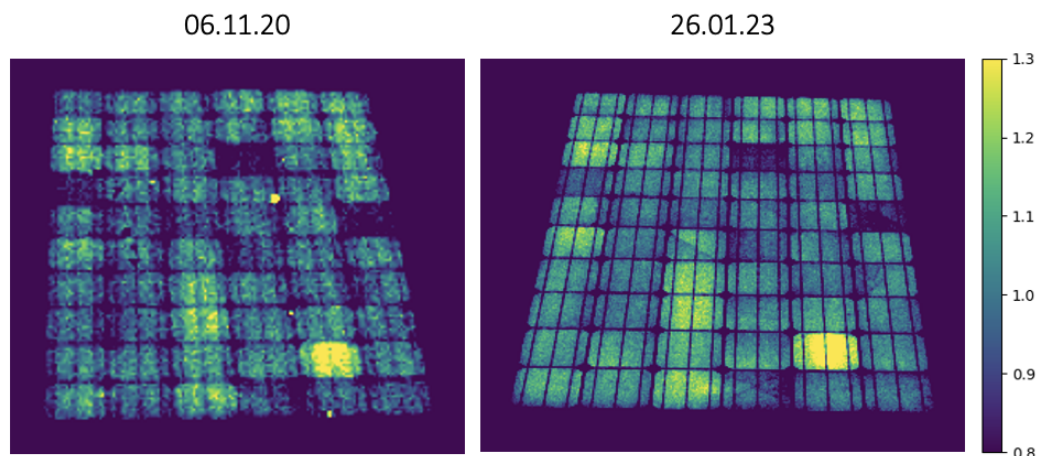


FIGURE 4.20: Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Mono1.

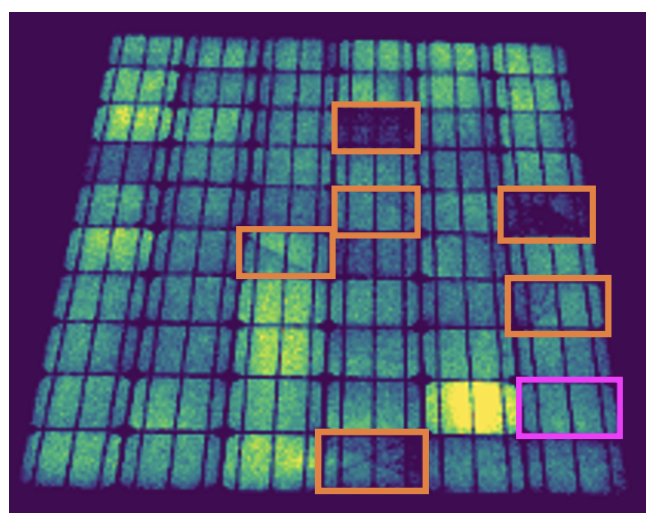


FIGURE 4.21: Δ PL-bilde hvor irregulariteter på Mono1 er markert med oransje. Referansecelle benyttet til normalisering er markert med rosa.

Første og siste Δ PL-bilde for Mono2 vises på figur 4.22. På figur 4.23 er celler som ser ut til å ha sprekker markert med oransje, mens referansecellen benyttet til normalisering er markert i rosa. Rød firkant markerer bulk observert ved visuell inspeksjon. Δ PL-bilder med størst variasjon i PL-signal for Mono2 ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.65-1.3.

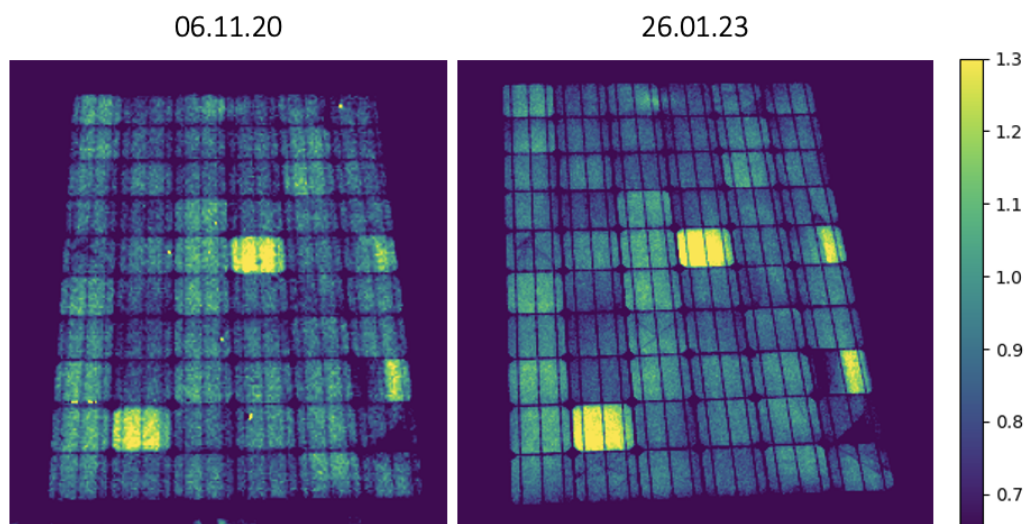


FIGURE 4.22: Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Mono2.

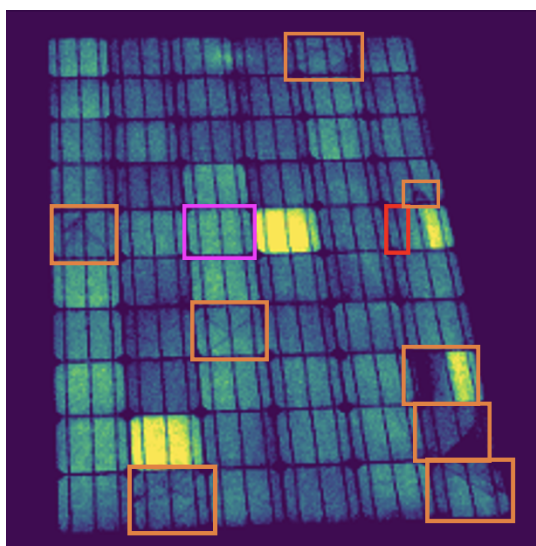


FIGURE 4.23: Δ PL-bilde hvor irregulariteter på Mono2 er markert med oransje. Referansecelle benyttet til normalisering er markert med rosa. Rød firkant markerer området på baksiden av modulen hvor det befinner seg en bulk.

Enkelte deler av cellene med sprekker i Mono2 er isolert fra resten. Fra visuell inspeksjon av Mono2 er det ingen tydelige skader på fremsiden, men på baksiden observeres en liten bulk under busbaren som likner en boble. Bulken er markert i rødt på figur 4.23 og 4.24a, og er avbildet med nærbilde på figur 4.24b. Fra figur 4.23 tyder det på at bulken forårsaker dårlig kobling mellom cellen og nettfingrene/busbaren da halve cellen emitterer lavere PL-signal enn resten. Dette gjelder også flere av cellene. Mørke områder med skarpe kanter

mot høyere PL-signal tyder på sprekker som forårsaker brudd i koblingen mellom cellen og nettfingrene/busbarene.

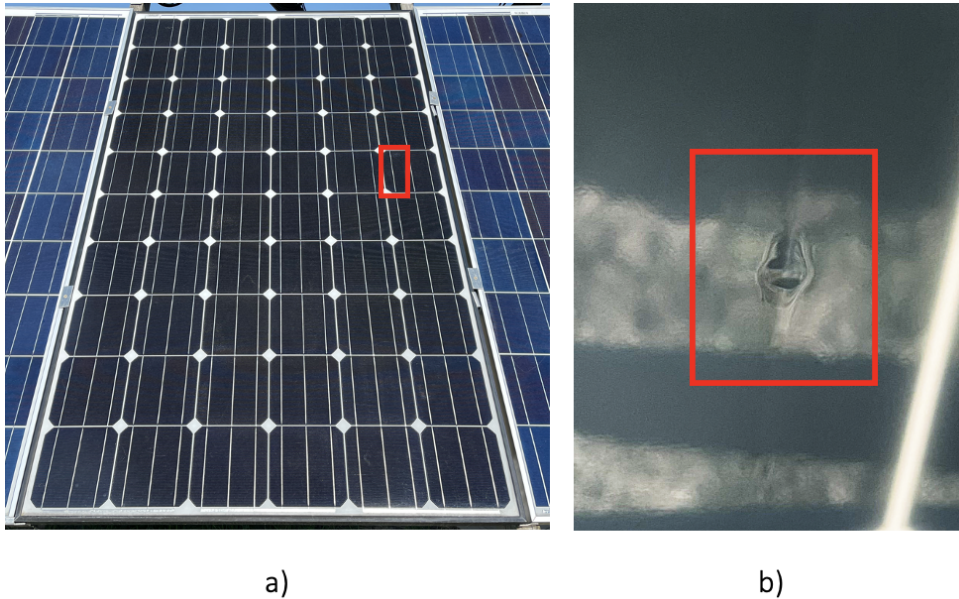


FIGURE 4.24: a) Visuell inspeksjon av Mono2 uten tydelige skader på fremsiden, men hvor det befinner seg en bulk på baksiden i området markert i rødt. b) Nærbilde av bulk på baksiden av modulen.

For Mono1 og Mono2 antas det å være korrelasjon mellom IV-karakteristikken og Δ PL-bildene siden Δ PL-bildene viser tydelige skader på modulene og IV-kurvene viser relativt store tap sammenliknet med nominell kurve.

De neste modulene som diskuteres har store skader med betydelig redusert ytelse.

4.6 Multi4 og Bi1

Figur 4.25 viser utvikling i IV-karakteristikken til Multi4, som tydelig endres umiddelbart etter skadepåføring 26.11.20. Videre presenteres karakteriseringsparameterne til modulen i tabell 4.7. Tabellen viser at P_{max} , I_{mpp} , I_{sc} og FF reduseres betraktelig.

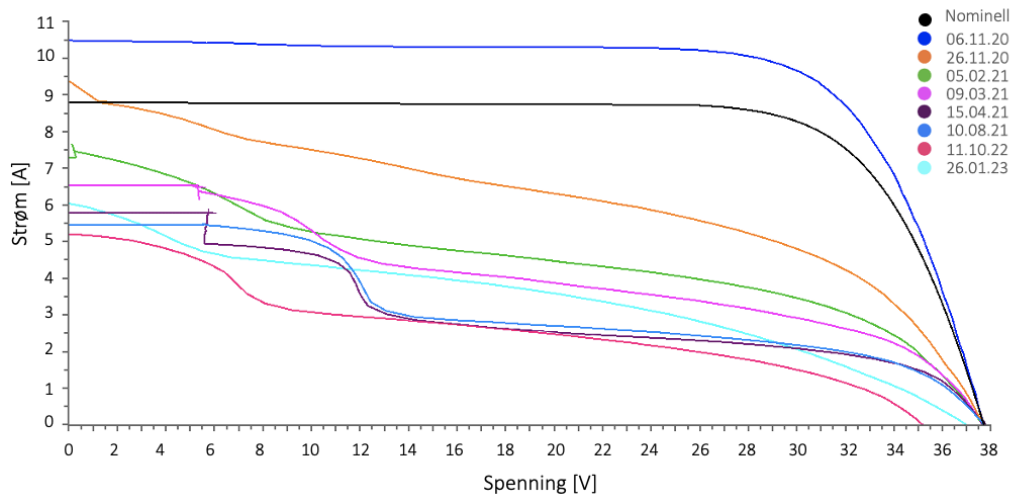


FIGURE 4.25: Utvikling av IV-karakteristikk for Multi4 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

TABLE 4.7: Karakteriseringsparametere for Multi4. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
06.11.20	289.97	37.69	30.18	9.61	10.44	0.74
26.11.20	146.30	37.72	27.46	5.33	8.92	0.43
05.02.21	104.95	37.69	28.01	3.75	7.82	0.38
09.03.21	88.72	37.69	28.18	3.15	6.54	0.36
15.04.21	62.50	37.70	30.15	2.07	5.79	0.29
10.08.21	65.24	37.70	30.26	2.16	5.45	0.32
11.10.22	51.99	35.17	24.52	2.12	5.15	0.29
26.01.23	74.63	36.98	23.55	3.17	6.53	0.31

Som nevnt i kapittel 2.3.1 er FF et forhold mellom maksimalt levert effekt og den teoretiske maksimale ytelsen til modulen, altså indikerer reduksjon i FF på lavere effektivitet. Den negative trenden i IV-karakteristikken fortsetter til og med for målingen utført 10.08.21, men dersom målingene utført 11.10.22 og 26.01.23 hadde vært foretatt med automatisk innstilling kan det antas at verdiene ville vært ytterlig redusert. En manuelt valgt temperatur på 12 °C for 11.10.22 har resultert i at IV-kurven på figur 4.25 og tilhørende verdier i tabell 4.7 er de laveste blant målingene. Også for Multi4 er det lagt inn omgivelsestemperatur i stedet for modultemperatur, som åpenbart har stor

betydning for korrigeringen av verdiene til STC. En manuelt valgt temperatur på 25 °C for 26.01.23 gir mer normale verdier lik nærliggende kurver, men også denne temperaturen har totalt sett resultert i verdier blant de laveste som er målt. Likevel gir dette mening grunnet negativ trend i målingene. At modultemperaturen lagt inn for 26.01.23 er høyere enn for 11.10.22 gjenspeiles i parameterne hvor verdiene for P_{max} , I_{mpp} , I_{sc} og FF øker igjen for 26.01.23. Fra resultatene for Multi4 er det stor antydning til at skaden i hovedsak er lokalisert på to av strengene i modulen. IV-kurven utvikles gradvis mot formen på figur 2.9 med bypassdiode forspent i lederetning. Formen på kurvene for Multi4 tyder dog på at det er to bypassdioder som forspennes siden knekken i IV-kurven oppstår ved lavere spenningsverdi enn på figuren.

IV-karakteristikken for Bi1 vises på figur 4.26 og avviker åpenbart fra modultypens nominelle kurve allerede fra første måling. Også for Bi1 observeres det reduksjon i P_{max} , I_{mpp} , I_{sc} og FF . Målinger utført 11.10.22 og 26.01.23 er foretatt med "manuell" innstilling på måleinstrumentet i stedet for "automatisk". Det ble også her manuelt lagt inn temperatur på 12 °C for 11.10.22 og 25 °C for 26.01.23. Siden det for Bi1 kun er målt fire IV-kurver og to av dem er med manuell innstilling er det spesielt utfordrende å sammenlikne målinger for Multi4.

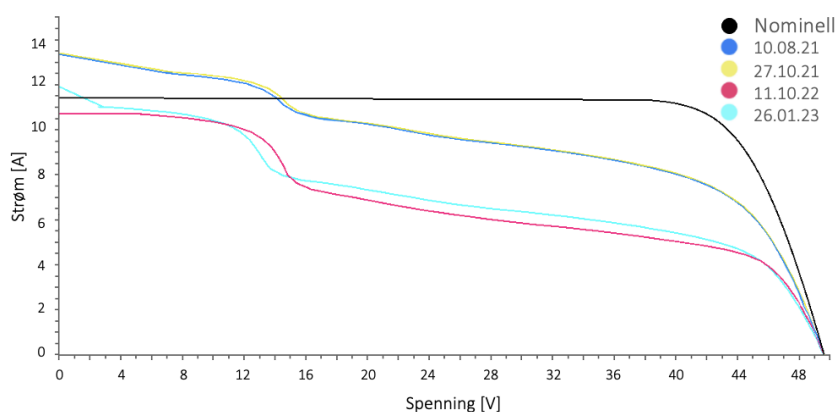


FIGURE 4.26: Utvikling av IV-karakteristikk for Bi1 målt ved datoer oppgitt i tabell 3.1. Alle verdier er korrigert til STC. Nominell kurve er inkludert for sammenlikning.

TABLE 4.8: Karakteriseringsparametere for Bi1. Alle verdier er korrigert til STC.

Dato	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Impp [A]	Isc [A]	FF
10.08.21	321.07	49.60	39.82	8.06	12.69	0.51
27.10.21	322.55	49.65	39.91	8.08	12.72	0.51
11.10.22	202.80	49.60	41.60	4.88	10.71	0.38
26.01.23	216.61	49.64	40.33	5.37	11.17	0.39

Også for Bi1 kan det tolkes som at IV-kurven viser stor skade i tilsynelatende to av strengene. Som nevnt i kapittel 2.2 er bifacial-modulene konfigurert med 6 substrenger som parallellkobles over midten. Dersom det oppstår skade i to substrenger koblet i parallell vil det på IV-kurven se ut som én streng. Ved å sammenlikne IV-karakteristikken med Δ PL-bildene for Bi1 i figur 4.30 underbygges hypotesen om at det i hovedsak er 4 av 6 substrenger som er skadet, og at to og to av disse kobles i parallell. Det er følgelig sannsynlig at substrengene fremstår som to strenger på IV-kurvene. Ved å studere IV-kurvene er det tydelig gradvis degradering av modulen over tid, og siden grafene har tilnærmet lik form tyder det på at det er de samme skadene som forverres.

Visuell inspeksjon av Multi4 og Bi1 på henholdsvis figur 4.28 og 4.32 viser totalskadet glass på begge modulene. Likevel er det stor forskjell i andel celler med skadet halvledermateriale. Fra Δ PL-bilder til Multi4 på figur B.4 er det tydelig at skadepåføringen har ført til sprekker i de fleste celler. Bildene er normalisert ved hjelp av referansecellen markert med rosa på figur 4.29. Oransje firkanter på samme figur markerer for Multi4 cellene med minst skader. Hvit ring markerer området modulen fikk påført gjentakende, harde slag 26.11.20. Δ PL-bilder for Multi4 med flest detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.25-1.42.

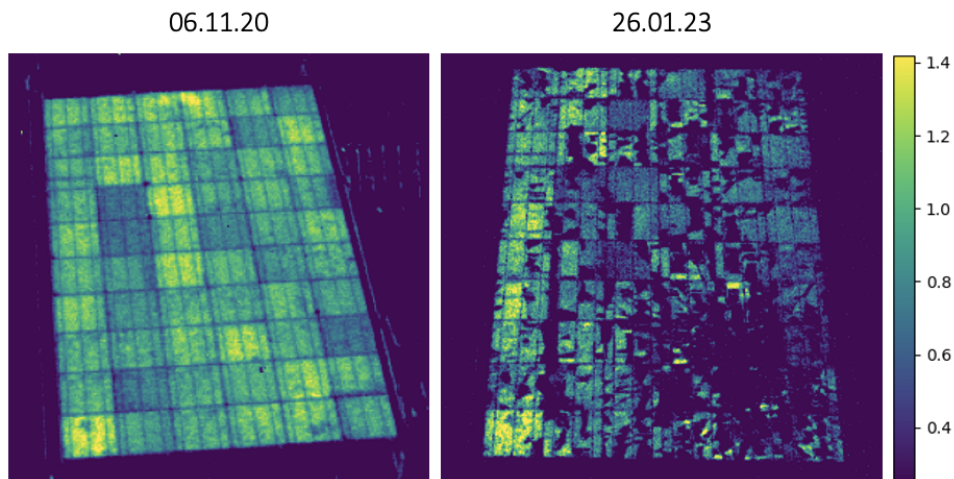


FIGURE 4.27: Δ PL-bilde for første og siste avbildning av Multi4.

Visuelle skader på Multi4

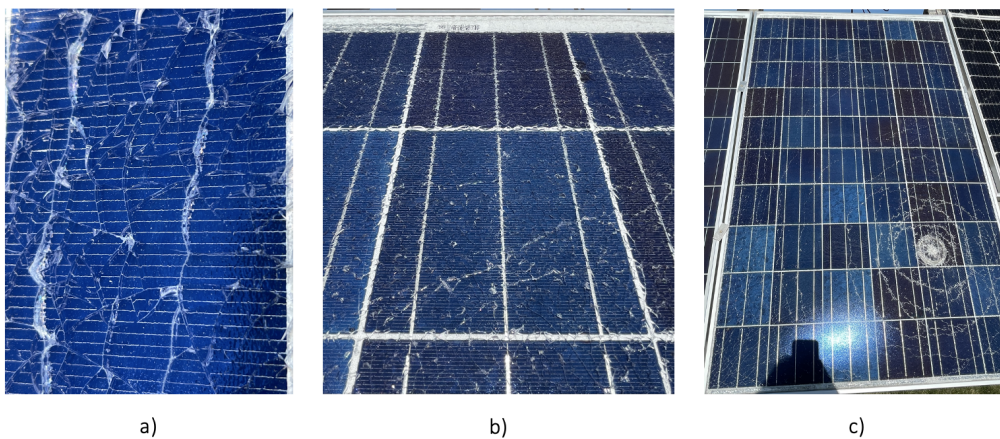


FIGURE 4.28: Fysiske skader på Multi4. a) viser nærbilde av knust glass, b) viser knust glass i større område, c) viser hele modulen med unntak av nederste høyre hjørne. Det er tydelig hvor modulen fikk påført skade.

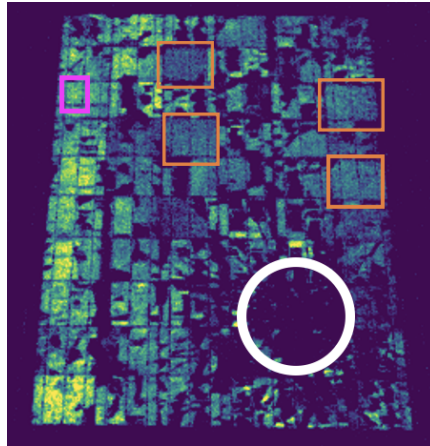
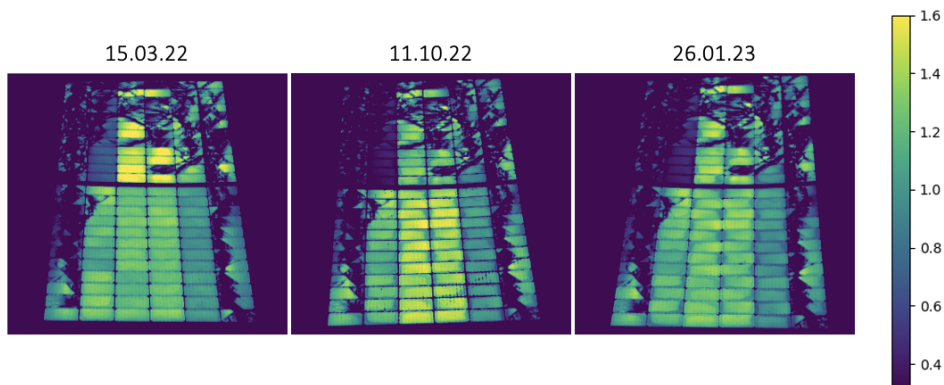
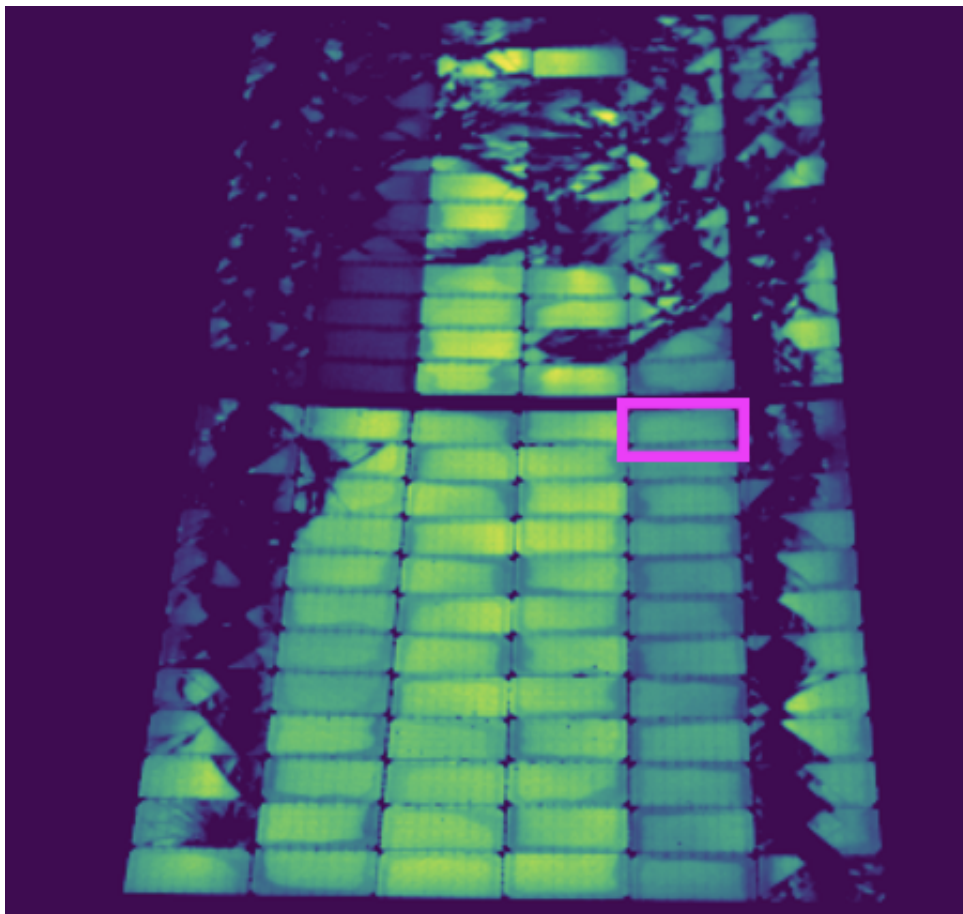


FIGURE 4.29: Δ PL-bilde av Multi4 hvor de friskeste cellene er markert i oransje. Rosa firkant viser referansecellen benyttet for normalisering. Hvit ring markerer området påført harde, gjentakende slag.

Skaden påført modulen 26.11.20 ser ut til å utvikles gradvis. Cellene markert i oransje på figur 4.29 ser ut til å være de friskeste i Multi4, men de emitterer likevel lavt PL-signal. Grunnet manglende informasjon er det ikke mulig å determinere direkte årsak for det lavt PL-signal, men siden cellene er lokalisert i strenger med mest skade er det som diskutert for IV-kurvene til modulen sannsynlig at bypassdiodeene for begge strengene er forspent i lederetning. Det er også sannsynlig med dårlige kobling mellom cellen og busbars/nettfingre siden modulen er truffet av harde, gjentakende slag. Som beskrevet i kapittel 2.5.1 kan mikrosprekker indusere PID, som drastisk reduserer shuntmotstanden i cellen slik at den degraderes raskere. IV-karakteristikken til Multi4 viser følgelig redusert kortslutningsstrøm I_{sc} og lavere maksimal effekt P_{max} , som naturlig gir lavere FF .

For Bi1 derimot viser Δ PL-bildene tilsynelatende friske celler i rundt 50% av modulen selv med totalskadet modulglass. Utvikling i Δ PL-bildene for Bi1 presenteres i 4.30. Alle bildene er normalisert ved hjelp av referansecellen markert med rosa på figur 4.31. Δ PL-bilder med mest mulig detaljer ble oppnådd med intensitetsskala fra 0.32-1.6.

FIGURE 4.30: Δ PL-bilder for Bi1 som viser utvikling over tid.FIGURE 4.31: Δ PL-bilde hvor referansecelle benyttet for normalisering er markert med rosa.

Det ser er i hovedsak kun cellene rundt kanten og i øvre del av Bi1 som er skadet. Δ PL-bildene for Bi1 underbygger dermed hypotesen diskutert for IV-karakteristikken om at det i hovedsak er to skadede strenger. Fra visuell inspeksjon av Bi1 er det enkelt å se sprekker i halvledermaterialet

grunnet oppbyggingen av modulen. Prinsippet for bifacial-moduler med glass både foran og bak gjør det mulig å se sprekker hvor lyset trenger gjennom halvledermaterialet, se figur 4.32.

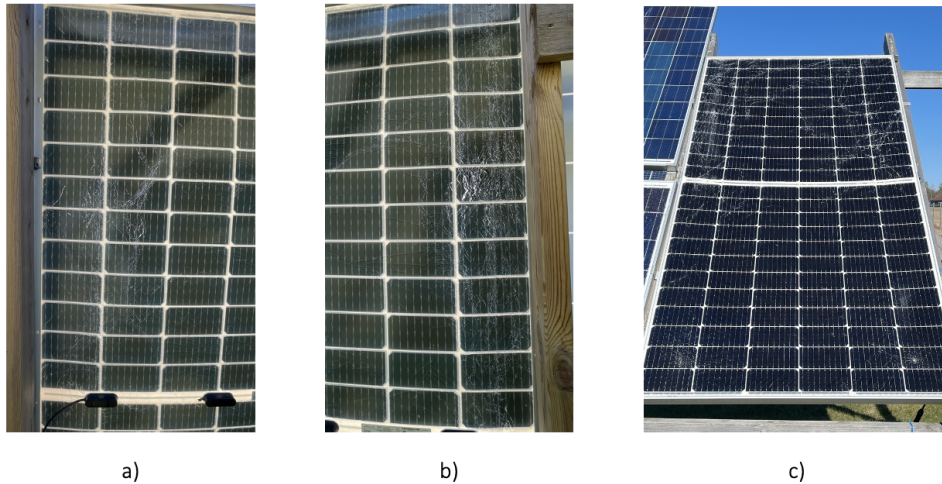


FIGURE 4.32: Visuelle skader på Bi1. a) viser skader bakfra på øvre høyre side av modulen. b) viser skader bakfra på øvre venstre side da module. c) viser skadene på modulen fra fremsiden.

Ved analysere av IV-karakteristikken og Δ PL-bildene for Multi4 og Bi1 er det tydelig korrelasjon mellom IV-kurvene og Δ PL-bildene for de respektive modulene. Δ PL-bildene indikerer tydelige skader og formen på IV-kurvene avviker betraktelig fra nominell form.

Kapittel 5

Konklusjon

Bakgrunnen for oppgaven har vært å analysere korrelasjon mellom IV-karakteristikk og Δ PL-bilder i arbeid mot løsning for overvåkning av solparker. Måleinstrumentet HT Instruments I-V400w er benyttet for måling av IV-karakteristikk, og kameraene Xeva 320 og Raptor Photonics Owl 640S i kombinasjon med MOSFET er benyttet for PL-avbildning i direkte sollys. IV-karakteristikken er automatisk korrigert til STC mens det er gjennomført bildebehandling i Python for fjerning av støy i form av refleksjon og normalisering av PL-bildene.

Resultatene fra eksperimentet antyder sterk korrelasjon mellom IV-karakteristikk og Δ PL-bilder. For modulene Multi1, Multi2, Multi3 og Bi1 hvor Δ PL-bildene ikke viser tydelige skader, underbygger IV-karakteristikken at modulen er tilsynelatende frisk. For Mono1 og Mono2 hvor Δ PL-bildene tyder på skader i kun enkelte celler, underbygger IV-karakteristikken tilstanden til modulen med redusert effekt, men ikke store nok skader til at bypassdioder forspennes i lederetning. For Multi4 og Bi1 hvor visuell inspeksjon viser totalskadet modulglass bekrefter Δ PL-bildene at en stor andel av cellene er skadet, og IV-karakteristikken viser tydelig redusert strøm og effekt hvor bypassdioder ser ut til å forspennes i lederetning. For Multi4 med utførte målinger både før og etter skadepåføring observeres det korrelasjon mellom IV-karakteristikken og Δ PL-bildene gjennom skadeutviklingen, hvor det detekteres større skader og redusert effekt for 26.01.23 enn før skadepåføring 06.11.20 og umiddelbart etter skadepåføring 26.11.20.

Kapittel 6

Videre arbeid

For videre arbeid bør Δ PL-bilder for respektive moduler normaliseres med referansecelle fra samme måling slik at endring i PL-signal er i forhold til samme utgangspunkt. Da vil små endringer i signalet være lettere å observere, og følgelig kan degradering analyseres bedre. Det kan også benyttes maskinlære for detektering av mindre endringer i PL-signal.

For IV-karakteristikken bør det utføres målinger innenfor definert område i standarden IEC:60904-1. På den måten vil usikkerheter minimeres, og eventuell variasjon i IV-kurver kan studeres med større sikkerhet årsaken til tap.

Det er også interessant med videre studie av degradering av skadede moduler. For Multi4 og Bi1 er det interessant å undersøke om degraderingen vil stagnere, og for Mono1 og Mono2 er det interessant å se om eksempelvis PID vil føre til en økt degradering i nær fremtid. Modulene har tydelige sprekker men ikke drastisk redusert effekt. Det ville derfor vært interessant å studere utviklingen av sprekkenes for å se om deler av cellene etterhvert isoleres fra resten.

Referanser

- [1] Klimagassutslipp – Store norske leksikon, mai 2023. [Online; hentet 14. mai 2023].
- [2] Stoppe klimaendringene - FN Sambandet, 2023. [Online; hentet 2. mai 2023].
- [3] Klima og miljødepartementet. Internasjonale klimaforhandlinger. *Regjeringen*, October 2021. [Online, hentet 15. april].
- [4] COP26 - Greenpeace Norge, January 2023. [Online; hentet 24. Jan. 2023].
- [5] Statsministerens Kontor. Nytt norsk klimamål på minst 55 prosent - Regjeringen. November 2022.
- [6] Kraftproduksjon - Energifakta Norge, mai 2022. [Online; hentet 2. mai 2023].
- [7] Solkraft - NVE, January 2023. [Online; hentet 24. Jan. 2023].
- [8] *Solar Energy - The Physics and Engineering of photovoltaic conversion*. January 2023. [Online; hentet 24. Jan. 2023].
- [9] Fredrik Arnesen Stulen. *LAB 1: Solcellefysikk- og karakteristik*. FYS376: Solenergi, Fakultetet for realfag og teknologi, Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet, Ås, Norge, 2022.
- [10] Jacob Marsh. Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels: which is the best for you? *EnergySage*, January 2023.
- [11] Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels | American Solar Energy Society, March 2023. [Online; hentet 28. Mar. 2023].
- [12] Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1533–1549 10.1016/j.rser.2016.03.041, February 2023. [Online; hentet 23. Feb. 2023].

-
- [13] IEC 60904-3:2019, Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data, February 2019. [Online; hentet 27. Apr. 2023].
- [14] IEC 60891 International Standard. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. December 2009.
- [15] Bhalachandra V Chikate, Y Sadawarte, and BDCOE Sewagram. The factors affecting the performance of solar cell, 2015.
- [16] The output characteristics of KC50T-1 PV Module under shading, May 2023. [Online; accessed 15. May 2023].
- [17] Shunt Resistance | PVEducation, March 2023. [Online; hentet 23. Mar. 2023].
- [18] Series Resistance | PVEducation, March 2023. [Online; hentet 23. Mar. 2023].
- [19] M Aghaei, A Fairbrother, A Gok, S Ahmad, S Kazim, K Lobato, G Oreski, A Reinders, J Schmitz, M Theelen, et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159:112160, 2022.
- [20] Fabian Carigiet, Christoph J Brabec, and Franz P Baumgartner. Long-term power degradation analysis of crystalline silicon pv modules using indoor and outdoor measurement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144:111005, 2021.
- [21] The Impact of Cracked Solar Cells on Solar Panel Energy Delivery. 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) | 10.1109/pvsc45281.2020.9300743, April 2023. [Online; hentet 22. Apr. 2023].
- [22] E.E. van Dyk F.J. Vorster I.M. Kwembur, J.L. Crozier McClelland. Detection of Potential Induced Degradation in mono and multi-crystalline silicon photovoltaic modules, *Physica B: Physics of Condensed Matter* (2020), doi, April 2023. [Online; hentet 21. Apr. 2023].
- [23] Princesse Kombé. Potential Induced Degradation (PID) – What is it? - Greensolver. November 2021. [Online, hentet 28. april].

- [24] Vishal E. Puranik and Rajesh Gupta. Analysis and insight of electroluminescence imaging in the assessment of potential-induced degradation in crystalline silicon photovoltaic module. *Eng. Fail. Anal.*, 134:106027, April 2022.
- [25] Edson L Meyer and E Ernest Van Dyk. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters, 2004.
- [26] Michelle Kitayama da Silva. Photovoltaic Module Degradation. *Michelle Kitayama da Silva*, December 2021.
- [27] Lamprini Papargyri, Marios Theristis, Bernhard Kubicek, Thomas Krametz, Christoph Mayr, Panos Papanastasiou, and George E Georghiou. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review. *Renewable Energy*, 145:2387–2408, 2020.
- [28] Dong C Nguyen, Yasuaki Ishikawa, and Yukiharu Uraoka. Recover possibilities of potential induced degradation caused by the micro-cracked locations in p-type crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(4):423–432, 2021.
- [29] Marija Vuković, Ingeborg Eriksdatter Høiaas, Marko Jakovljević, Andreas Svarstad Flø, Espen Olsen, and Ingunn Burud. Photoluminescence imaging of silicon modules in a string. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 30(4):436–446, April 2022.
- [30] Photoluminescence - an overview | ScienceDirect Topics, April 2023. [Online; hentet 29. Apr. 2023].
- [31] Data Sheet Hunan Red Solar, ZKX-260D-24.
- [32] Data Sheet JaSolar, JAM72D20.
- [33] May 2023. [Online; accessed 15. May 2023].
- [34] M Vuković, M Jakovljević, A S. Flø, E Olsen, and I Burud. Noninvasive photoluminescence imaging of silicon pv modules in daylight. *Applied Physics Letters*, 120(24):244102, 2022.
- [35] Jakovljevic M Svarstad Flo A Olsen E Burud I. Vukovic M, Eriksdatter Hoiaas I.

Vedlegg A

Python-kode

```
# Importerer bilder
filelist = os.listdir(r'/Volumes/Harddisk/Master/Field/Longterm_experiment/PL-bilde

# Bildene sorteres
n = sorted(filelist, key=lambda x: int(os.path.splitext(x)[0][4:7]))

# Lager array av bilder
img = np.array([skimage.io.imread(n[i]).astype(np.int16) for i in range(len(n))])

# Plotter arrayen av bilder for å se om oc eller sc er først
plt.figure()
plt.plot((img.mean(axis=(1,2))))
plt.figure()

# Sorterer bildene i array med oc og sc.
oc = np.array([img[i] for i in range(1, len(img), 2)])
sc = np.array([img[i] for i in range(0, len(img), 2)])

# Lager deltaPL-bilde
resultat = np.mean(oc, axis=0) - np.mean(sc, axis=0)

# Plotter bildet
plt.figure()
plt.imshow(resultat, clim=(2, 10))
plt.colorbar()
plt.axis('off')

# Manuell utvelgelse av pixler brukt som referansecelle
opåvirket_celle = resultat[192:218, 330:346]

plt.figure()
plt.imshow(opåvirket_celle)
# Finner gjennomsnittet av cellen
gj_snitt_celle = np.mean(opåvirket_celle)

# Normaliserer hele bildet ved å dele på gjennomsnitt av referansecellen
normalisert_bilde = resultat/gj_snitt_celle

# Plotter normalisert bilde og finner intensitetsskala som
# gir best variasjon i modulen
plt.figure()
plt.title('Multi 2, 11.10.22')
plt.imshow(normalisert_bilde, clim=(0.47, 1.1))
plt.colorbar()
plt.axis('off')
```

FIGURE A.1: Python-kode for Multi2.

Vedlegg B

Utvikling i PL-bilder

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Multi1

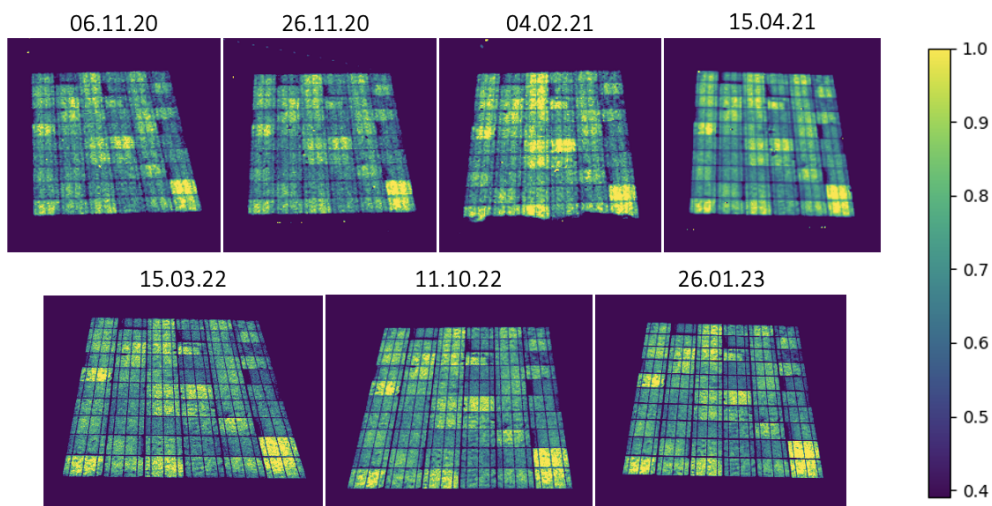


FIGURE B.1: Δ PL-bilder for Multi1 som viser utvikling over tid.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Multi2

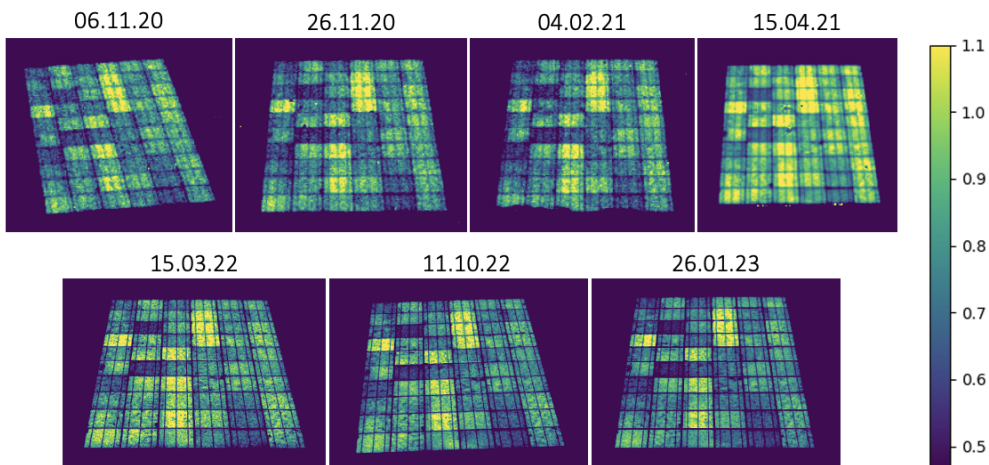
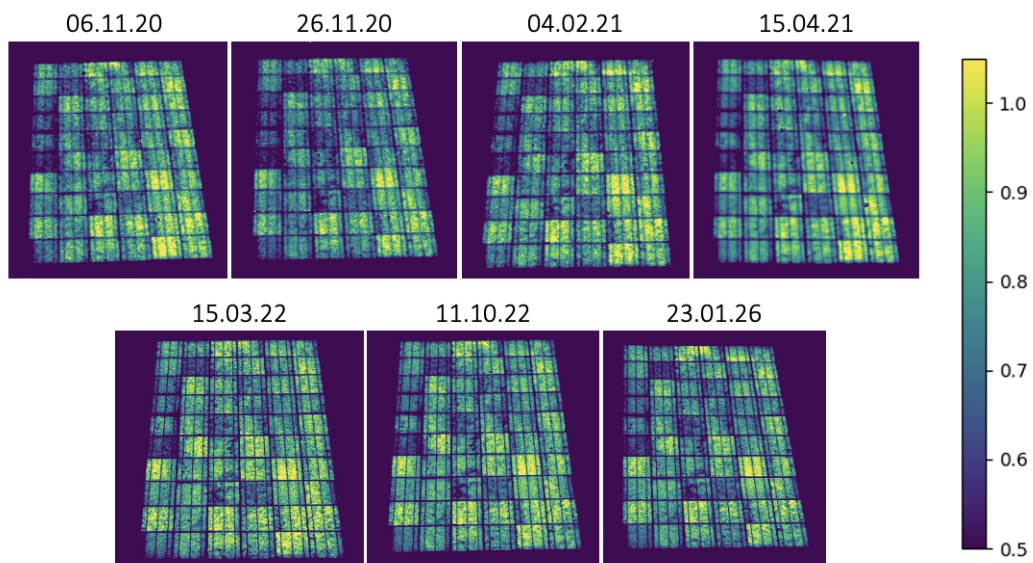
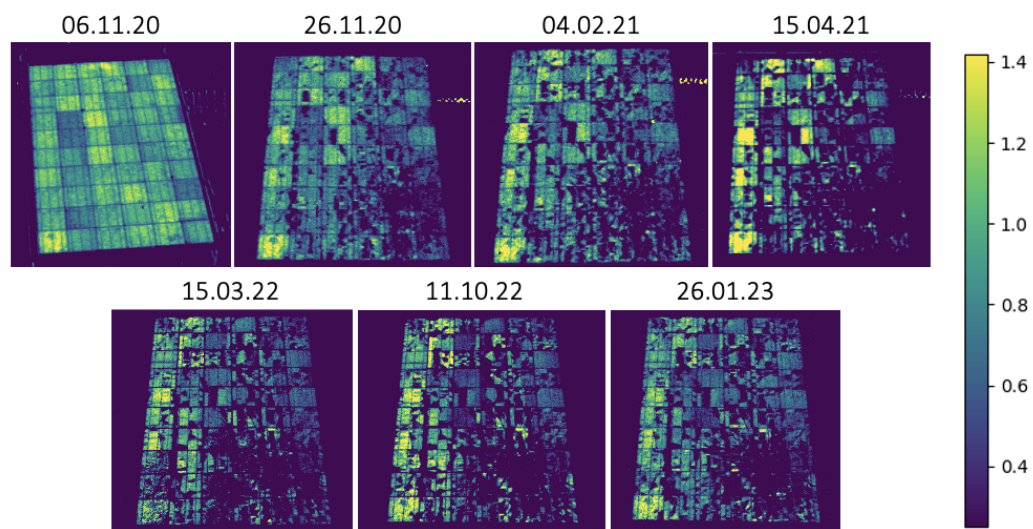
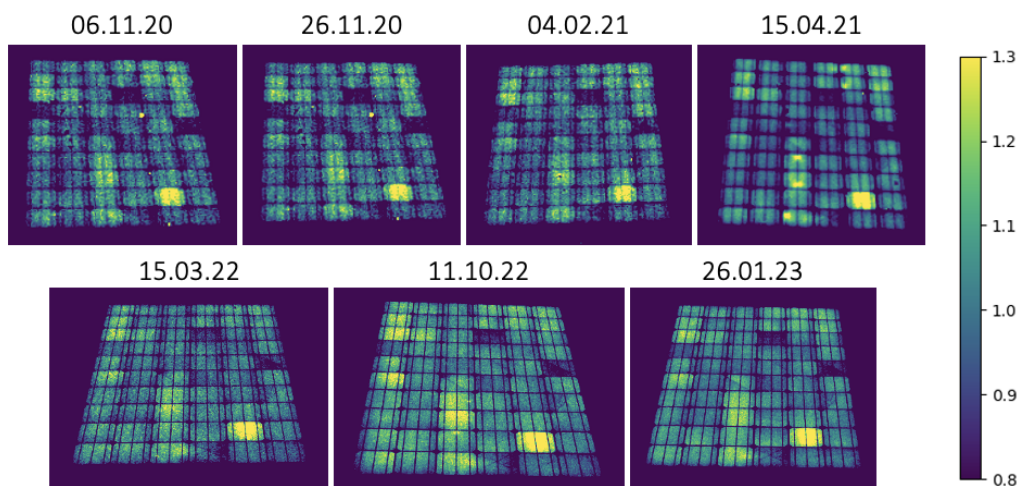
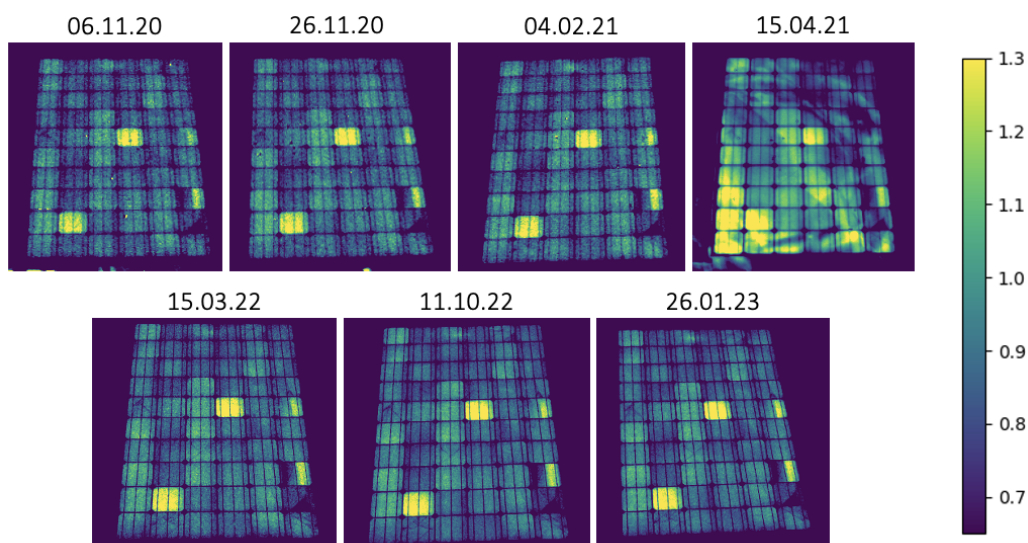


FIGURE B.2: Δ PL-bilder for Multi1 som viser utvikling over tid.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Multi3FIGURE B.3: Δ PL-bilder for Multi1 som viser utvikling over tid.**Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Multi4**FIGURE B.4: Δ PL-bilder for Multi4 som viser utvikling over tid.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Mono1FIGURE B.5: Δ PL-bilder for Mono2 som viser utvikling over tid.

Det har tydelig vært forstyrrelse under måling PL-bilder tatt 15.04.21. Δ PL-bildet fra denne datoen ses dermed bort fra.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Mono2FIGURE B.6: Δ PL-bilder for Mono2 som viser utvikling over tid.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Bi1

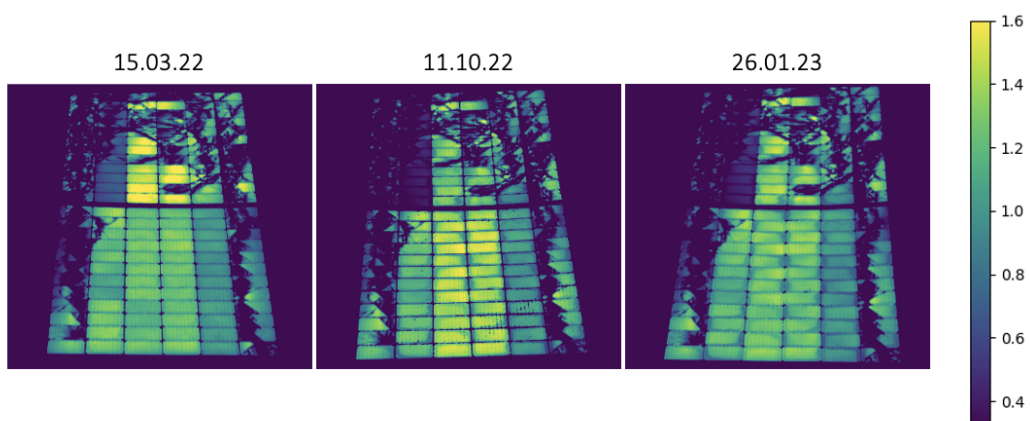


FIGURE B.7: Δ PL-bilder for Bi1 som viser utvikling over tid.

Utvikling i Δ PL-bilder over tid for Bi2

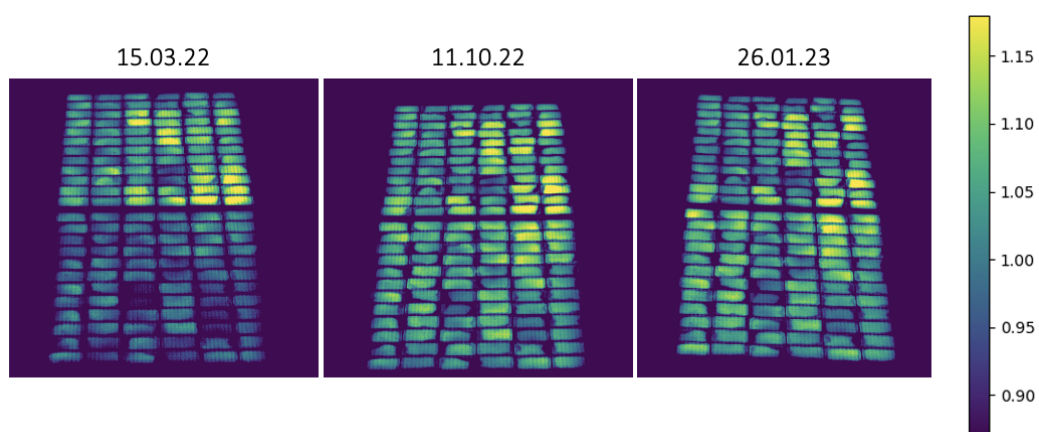


FIGURE B.8: Δ PL-bilder for Bi2 som viser utvikling over tid.

Vedlegg C

Datablad SweModule

Connection of plug connectors

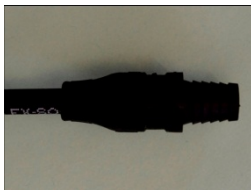
All connections should be secure and tight and electrically and mechanically sound. The modules can be delivered with MC3 (illustration 7) or MC4/KSK4 (illustration 8) type of connectors.

Minus



Illustration 7

Plus



Minus



Illustration 8

Plus



Accessories and materials

UV-resistant cables and connectors approved for outside use shall be used. Ensure that they are electrically and mechanically sound. Cable cross sectional diameters shall be chosen so as to ensure that DC power losses (voltage drop) is less than 1%. National electrical codes and regulations need to be referred to when selecting cables. For field connections, use minimum 4 mm² or no.11 AWG copper wires insulated for a minimum of 90°C.

Protecting the cables

Cables should be secured to the array mounting system using UV-resistant cable ties. Loose and unsecured cables should be protected from mechanical damage (laid in plastic conduit or pipes). Avoid, as far as possible, exposing the cables to direct sunlight.

Grounding

Module frames should be connected to an earth ground. See Module installation for further information.

Module ratings

Temperature ratings (measured at TÜV)

Nominal operation cell temperature (NOCT):	47,5	(°C)
Temperature coefficient of Pmpp:	-0,382	(% / K)
Temperature coefficient of Voc:	-0,320	(% / K)
Temperature coefficient of Isc:	0,077	(% / K)
Temperature coefficient of Impv:	-0,046	(% / K)

Fire rating

Class C

The fire rating of this module is valid only when mounted in the manner specified in the mechanical mounting instructions, see section "Module Installation."

Electrical ratings

Series resistance of module 305 (mΩ)

Electrical characteristics

General module characteristics:

Number of cells: 60
Bypass diode rating: 2x15A in each diode package.
Bypass diode rating for junction box: 10A
Number of diodes: 3
Rated surge voltage (junction box): 8000V
IEC rated system voltage: 1000V maximum
UL rated system voltage: 600V maximum
Over current protection rating: 20A
Temperature rating of cables: -40°C...90°C
Maximum module in series configuration: 21
Modules in parallel configuration: 1

Values at Standard Test Conditions:

Irradiance level 1000W/m², Cell temperature 25°C, spectrum AM 1,5.

Module type	Electrical data							
	Multi-crystalline cells				Mono-crystalline cells			
Nominal power (P mpp)	240	245	250	255	260	265	270	275
Power sorting from nominal (Wp)	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5
Maximum power voltage V mpp (V)	29,8	30,0	30,3	30,6	30,9	31,2	31,5	31,8
Maximum power current I mpp (A)	8,1	8,2	8,2	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5
Open circuit voltage Voc (V)	37,1	37,5	37,7	38,0	38,3	38,6	38,9	39,1
Short circuit current I sc (I)	8,6	8,7	8,8	8,8	8,9	8,9	9,0	9,0
Cell efficiency (%)	16,4	16,8	17,1	17,4	17,8	18,1	18,4	18,7
Fill factor	0,75	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79
Power output tolerance P mpp (%)	±5							

Values at NOCT:

NOCT = 47,5°C

The NOCT (nominal operating temperature) is the cell temperature at an irradiation of 800W/m², at an environment temperature of 20°C and a wind speed of 1m/s.

Irradiance level 800W/m², spectrum AM 1,5, wind velocity 1m/s, T_{amb} 20°C.

Module type	240Wp	250Wp	260Wp	270Wp
Pmpp (Wp)	173,6	179,6	186,2	-
Impv (A)	6,48	6,52	6,71	-

Normal operating conditions:

Under normal conditions, a photovoltaic module is likely to experience conditions that produce more current and/or voltage than rated at standard test conditions. Accordingly, the values of Short Circuit Current I_{sc} and Open Circuit Voltage V_{oc} marked on this module should be multiplied by a factor of 1,25 when determining component voltage ratings, conductor current ratings, fuse size, and size of controls connected to the PV output.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway