



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Visualisering og kvantifisering av PID i solcellemoduler ved hjelp av PL-avbildning i dagslys

Visualization and quantification of PID in solar
modules using PL imaging in daylight

Mathea Salmi Marjavara

Miljøfysikk og fornybar energi

Forord

Med denne oppgaven fullfører jeg min mastergrad i Miljøfysikk og fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er skrevet i samarbeid med forskningsgruppen innenfor solenergi ved fakultet for realfag og teknologi ved NMBU, og institutt for elektroteknikk og fotonikk ved Danmarks tekniske universitet (DTU).

Jeg ønsker først å takke hovedveilederen min, Espen Olsen, og tilleggsveilederen min, Ingunn Burud, for god oppfølging og konstruktive tilbakemeldinger gjennom masterperioden. Jeg har lært mye gjennom våre samtaler og møter, og jeg setter pris på alle råd, forslag og tips de har gitt meg om hvordan denne oppgaven kunne utformes.

En stor takk rettes også til Marija Vuković, som har delt sine kunnskaper og erfaringer om fotoluminescensavbildning med meg. Jeg er veldig takknemlig for at hun har tatt seg tid i sin travle hverdag til å møte meg og hjelpe meg med å forstå temaet bedre. Takk for mange lærerike og hyggelige samtaler.

Jeg ønsker også å takke Gisele Alves dos Reis Benatto og Rodrigo Del Prado Santamaria fra DTU, for å svare på alle spørsmål jeg har stilt, og dele verdifull informasjon med meg. Det har vært til god hjelp.

Sist, men ikke minst, ønsker jeg å takke familien min, samboeren min og mine medstudenter på mastersalen, for god støtte, oppmuntring og trivelige stunder i løpet av masterperioden. Dere har gjort dette til et minnerikt og hyggelig halvår.

Ås, 13. mai 2023

Mathea Salmi Marjavara

Acknowledgements

With this thesis, I complete my Master's degree in Environmental Physics and Renewable Energy at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU). The thesis is written in collaboration with the solar energy research group at the Faculty of Science and Technology at NMBU, and the Department of Electrical and Photonics Engineering at the Technical University of Denmark (DTU).

I would like to start by expressing my gratitude to my main supervisor, Espen Olsen, and my co-supervisor, Ingunn Burud, for their excellent guidance and constructive feedback throughout the writing process. I have learned a great deal from our conversations and meetings, and I appreciate all the advice, suggestions, and tips they have given along the way.

Furthermore, I want to extend my thanks to Marija Vuković. I am grateful for her guidance, support, and willingness to share her knowledge and expertise about photoluminescence imaging. Thank you for your valuable insights.

I would also like to thank Gisele Alves dos Reis Benatto and Rodrigo Del Prado Santamaria from DTU for answering all the questions I have asked and sharing valuable information with me. Thank you for making this a fruitful collaboration.

Last but not least, I want to thank my family, my partner, and my fellow students on the master's program for their great support, encouragement, and enjoyable moments during the master's period. You have made this a memorable and enjoyable semester.

Ås, 13. mai 2023

Mathea Salmi Marjavara

Sammendrag

Denne masteroppgaven har som formål å undersøke hvilke faktorer som kan bidra til klarest mulig visualisering av potensial-indusert degradering (PID) i fotoluminescensbilder (PL-bilder) av solcellemoduler, hvor bildene er tatt utendørs i dagslys. Det er også ønskelig å undersøke om det er mulig å observere noen kvantitative kjennetegn ved degraderingen, hvor den anvendte metoden kan bidra til at man enkelt kan skille mellom modulen påvirket av PID og den friske modulen. Det skal vurderes om disse kjennetegnene kan generaliseres til å gjelde flere moduler enn de som undersøkes i studien, og om metoden dermed kan anvendes på et større kvantum av moduler, enn det antallet som undersøkes i studien.

I denne studien analyseres det bilder av to moduler, der den ene er påvirket av PID, og den andre er uten kjente defekter. Bildene tas mens inverteren utfører en IV-kurveskanning av modulene, og de opererer mellom ulike strømnivåer, slik som åpen krets, maksimalt effektpunkt og kortslutning. Avhengig av hvilken strøm modulene opererer med, sender de ut et fotoluminescenssignal (PL-signal) med ulik styrke, som er med på å avgjøre bildekvaliteten. Siden bildene tas ute i dagslys, kan dog den konstante refleksjonen fra sola forstyrre PL-signalet og forringe bildekvaliteten. For å eliminere refleksjonen fra bildene, subtraheres to bilder på to ulike nivåer fra hverandre. På denne måten produseres det et Δ PL-bilde som ikke er forstyrret av refleksjon fra sola, og hvor Δ PL-signalet gjenstår.

Etter at Δ PL-bildene er produsert, undersøkes det visuelt hvilken innvirkning de ulike strømnivåene har på Δ PL-bildene. Resultatene viser at bildekvaliteten er høyest, og visualiseringen av PID er tydeligst, i Δ PL-bilder som er produsert mellom nivåer med en strømdifferanse på større enn 9 A. Ved å ta gjennomsnittet av et ulikt antall bilder på hvert nivå i produksjonen av et Δ PL-bilde, observeres det også at bildekvaliteten er høyere når man tar et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå, istedenfor av fire bilder eller ett bilde på hvert nivå. Bildekvaliteten er også høyere når det tas bilder med en kamerafrekvens på 480 fps, sammenliknet med 120 fps. Dette gjenspeiler seg i visualiseringen av PID ved at det karakteristiske mønsteret, som oppstår på grunn av degraderingen, kommer tydelig frem. Resultatene viser at de Δ PL-bildene som tolkes å ha høyest kvalitet, også har de høyeste gjennomsnittlige signal til støy-forholdene (SNR_{AVG}), noe som kan støtte opp under funnene fra studien.

For å kvantifisere mengden degradering i modulen påvirket av PID, samt observere om

det er noen karakteristiske forskjeller mellom denne modulen og den friske modulen, analyseres det emitterte Δ PL-signalet fra begge modulene. Resultatene viser at i modulen påvirket av PID emitterer den svakeste cellen omtrent 25 til 32 % av det den sterkeste cellen emitterer. I den friske modulen emitterer den svakeste cellen omtrent 55 til 58 % av det den sterkeste cellen emitterer. Dette utgjør en differanse på 26-30 % mellom modulene. Styrken på Δ PL-signalene kan gjenkjennes i bildene som størrelsen på de gjennomsnittlige pikselintensitetene, også kalt Δ PL-verdier. Ved å lage et histogram av de gjennomsnittlige pikselintensitetene til alle pikslene i begge modulene, kan det observeres at intensitetsfordelingen til pikslene i den friske modulen er normalfordelt, mens det er større variasjoner i intensitetsfordelingen til pikslene i modulen påvirket av PID. Dette kan også observeres i et kumulativt histogram, som viser hvor stor andel av alle pikslene som har en Δ PL-verdi lavere enn den maksimale mulige Δ PL-verdien i bildet. Her viser resultatene at omtrent 60 % av pikslene i modulen påvirket av PID har en Δ PL-verdi som er lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien. For den friske modulen er det kun 15 % av pikslene som har Δ PL-verdi lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien, mens resten av pikslene har verdier som er høyere enn dette. For å avgjøre om disse karaktertrekkene og metodene kan generaliseres til å gjelde for et større kvantum moduler, må undersøkelsen utføres for flere moduler enn kun to stykk. Dersom de modulene følger samme tendenser, kan metodene anses som anvendelige for det formålet.

Abstract

The purpose of this master's thesis is to investigate which factors can contribute to the clearest possible visualization of potential-induced degradation (PID) in photoluminescence images (PL images) of solar cell modules, where the images are taken outdoors in daylight. It is also desirable to investigate whether it is possible to observe quantitative characteristics of the degradation, where the method used can help to easily distinguish between modules affected by PID and healthy modules. It will be assessed whether these characteristics can be generalized to apply to other modules than those examined in the study, and whether the method thus can be applied to a larger quantity of modules.

In this study, images of two modules are analysed, where one module is affected by PID, and the other one is healthy. The images of the modules are taken while the inverter is performing an IV curve scan of the modules, and they are operating between different current levels, such as open circuit, maximum power point and short circuit. Depending on the current that the modules operate with, they will emit different strengths of the PL signal, which can be perceived by a camera. Since the pictures are taken outside in daylight, the camera will also perceive reflection from the sun. To eliminate this reflection from the images, the images are taken while the modules are operating at two different current levels, before the images are subtracted from each other. In this way, the reflection will be eliminated, as it equal in both images, and the Δ PL signal will remain.

After the Δ PL images are produced, it is visually examined which impact the different current levels have on the Δ PL images. The results show that the image quality is highest, and the visualization of PID is clearest, in Δ PL images produced between levels with a current difference larger than 9 A. By averaging a different number of images at each level in the production of a Δ PL image, it is also observed that the image quality becomes higher when averaging ten images at each level, instead of four images or one image per level. The image quality is also higher when the camera frequency is set to 480 frames per second (fps), compared to 120 fps. This is reflected in the visualization of PID, where the characteristic pattern resulting from PID appears clearly in the Δ PL images. The results show that the images that are interpreted as having the highest quality also have the highest average signal to noise ratio (SNR_{AVG}), which can support the findings from the analysis.

To quantify the amount of degradation in the module affected by PID, as well as observe

if there are any characteristic differences between this module and the healthy module, the emitted ΔPL signal from both modules is analyzed. The results show that in a module affected by PID, the weakest cell emits about 25 to 32 % of what the strongest cell emits. In a healthy module, the weakest cell emits about 55 to 58 % of what the strongest cell emits. This amounts to a difference of 26-30 % between the modules. The strength of the ΔPL signals can be recognized in the images as the magnitude of the pixel intensities, also called ΔPL values. By creating a histogram of the average pixel intensities of all pixels in both modules, it can be observed that the intensity distribution of the healthy module is normally distributed, while there are greater variations in the intensity distribution of the module damaged by PID. This can also be observed in a cumulative histogram, which shows what proportion of all pixels that have a ΔPL value lower than the maximum possible ΔPL value in the image. Here, the results show that approximately 60 % of the pixels in the module damaged with PID have a ΔPL value lower than 44 % of the maximum possible value. For the healthy module, only 15 % of the pixels have ΔPL value lower than 44 % of the maximum possible value. In order to determine whether these characteristics and methods can be generalized to apply to a larger number of modules, the analysis must be carried out for more modules than just two. If those modules follow the same tendencies, the methods can be considered applicable for that purpose.

Innhold

Forord	i
Acknowledgements	ii
Sammendrag	iii
Abstract	v
Figurer	ix
Tabeller	xi
Forkortelser	xii
1 Introduksjon	1
2 Teori	4
2.1 Solcellens virkemåte	4
2.1.1 Krystallinsk silisium	4
2.1.2 Halvleder doping	5
2.1.3 Pn-overgang og strømmene i en solcelle	6
2.1.4 Indirekte og direkte båndgap	7
2.1.5 Rekombinasjonsprosesser i c-Si	8
2.2 Ekvivalentkrets	9
2.3 Oppbygningen av en solcelle	10
2.3.1 Konvensjonell solcelle	11
2.3.2 Tosidig ”Passivated Emitter and Rear Cell” (PERC)	12
2.4 Strøm- og spenningskurve (IV-kurve)	13
2.5 Degradering i solceller	14
2.5.1 ”Light Induced Degradation” (LID) og ”Light and elevated Temperature Induced Degradation” (LeTID)	14
2.5.2 Potensial-indusert degradering (PID)	15
2.6 Avbildning av solcellemoduler	17
2.6.1 Fotoluminescensavbildning (PL-avbildning)	17
2.7 Korrigering for varierende innstråling	19
2.8 Signal til støy-forhold (SNR)	21

3	Eksperimentelt arbeid	23
3.1	Beskrivelse av oppsettet	23
3.2	Datainnsamling	24
3.3	Videre analyse	25
3.3.1	Visualisering av PID	26
3.3.2	Kvantifisering av PID	28
4	Resultat og diskusjon	31
4.1	Korrigerings for varierende solinnstråling	31
4.2	Strømnivåer	34
4.3	Antall bildepar	39
4.4	Bildefrekvens (fps)	41
4.5	Gjennomsnittlig signal til støy-forhold (SNR_{AVG})	42
4.6	Kvantifisering av PID	44
4.6.1	Analyse av de cellene som emitterte svakest og sterkest ΔPL -signal i hver modul	44
4.6.2	Histogram av gjennomsnittlige pikselintensiteter	48
4.6.3	Kumulativt histogram av relative pikselintensiteter	51
5	Konklusjon	53
	Videre arbeid	55
	Referanser	55
	Appendiks:	59
	A: Bilde fra oppsettet	60
	B: Python-kode for å produsere ΔPL-bildene	61

Figurer

2.1.1 Valensbånd-, ledningsbånd- og båndgapsenergi	5
2.1.2 Oppbygningen av en solcelle	6
2.1.3 Indirekte og direkte båndgap	8
2.1.4 Rekombinasjonsprosesser i en solcelle	9
2.2.1 Ekvivalentkrets (endiodemodell)	10
2.3.1 Oppbygningen av en p-type solcelle av C-Si	11
2.3.2 Sammenlikning av en p-type solcelle av C-Si og en tosidig PERC-solcelle	13
2.4.1 Strøm- og spenningskurve (IV-kurve)	13
2.5.1 Potensialforskjell mellom solcellemoduler og jord	15
2.5.2 Oppbygningen av en solcellemodul påvirket av PID	16
2.6.1 Hvordan et Δ PL-bilde dannes, uten forstyrrelser fra refleksjon	18
2.6.2 Gjennomsnittlig pikselintensitet til bilder tatt gjennom en IV-kurveskanning	19
2.7.1 Eksempel på korrigering av varierende solinnstråling	20
3.1.1 Oppsett av modulene som analyseres i studien	23
3.3.1 Signalet fra modulene i bildene tatt med 480 fps	26
3.3.2 Signalet fra modulene i bildene med 120 fps	27
4.1.1 Signalet fra modulene etter korrigering for varierende innstråling (480 fps)	31
4.1.2 Signalet fra modulene etter korrigering for varierende innstråling (120 fps)	32
4.1.3 Signal fra bakgrunnsmoduler (480 fps)	32
4.1.4 Signal fra bakgrunnsmoduler (120 fps)	33
4.2.1 Strømmålinger gjennom modulene da bildene med 480 fps ble tatt	34
4.2.2 Strømmålinger gjennom modulene da bildene med 120 fps ble tatt	35
4.2.3 Δ PL ₁ og Δ PL ₂ med tilhørende strømdifferanser (480 fps)	35
4.2.4 Δ PL ₃ og Δ PL ₄ med tilhørende strømdifferanser (480 fps)	36
4.2.5 Δ PL ₅ og Δ PL ₆ med tilhørende strømdifferanser (120 fps)	36
4.2.6 Δ PL ₇ og Δ PL ₈ med tilhørende strømdifferanser (120 fps)	37
4.2.7 Sammenlikning av Δ PL ₂ og EL-bildet av samme modul	38
4.3.1 Δ PL ₂ produsert av henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå	39
4.3.2 Δ PL ₆ produsert av henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå	40
4.3.3 Δ PL ₆ produsert av ett bilde på hvert nivå, sammenliknet med EL-bildet av samme modul	40

4.4.1 Sammenlikning av 120 fps og 480 fps (ti bilder)	41
4.4.2 Sammenlikning av 120 fps og 480 fps (fire bilder)	42
4.6.1 De svakeste og sterkeste cellene i hver modul	44
4.6.2 Signalutviklingen til den svakeste og sterkeste cellen i den friske modulen	46
4.6.3 Signalutviklingen til den svakeste og sterkeste cellen i modulen påvirket av PID	46
4.6.4 Utsnitt av signalutviklingen for den svakeste cellen i modulen påvirket av PID	47
4.6.5 Stigningstallet til utviklingen av ΔPL -signalet til de svakeste og sterkeste cellene i den friske modulen, i bildene $\Delta PL_1 - \Delta PL_3$	47
4.6.6 Stigningstallet til utviklingen av ΔPL -signalet til de svakeste og sterkeste cellene i modulen påvirket av PID, i bildene $\Delta PL_1 - \Delta PL_3$	48
4.6.7 Histogram som viser antall piksler med en viss gjennomsnittlig pikselin- tensitet i bildet ΔPL_2	49
4.6.8 Kumulativt histogram som viser antall piksler med en ΔPL -verdi lavere enn den maksimale mulige ΔPL -verdien i bildet ΔPL_2	52
A.1 Bilde av oppsettet, tatt ved solcelleanlegget i Danmark	60

Tabeller

3.2.1 Datainnsamling	25
4.5.1 Δ PL-bilder med tilhørende strømdifferanser og SNR_{AVG} -verdier	43
4.6.1 Forholdet i signalstyrke mellom den svakeste og sterkeste cellen i hver modul	45

Forkortelser

Liste av forkortelser i alfabetisk rekkefølge:

- **AR6** Sjette rapport til FNs klimapanel
- **ARC** Antirefleksjonsbelegg
- **BSF** ”Back Surface Field”
- **E-felt** Elektrisk felt
- **EL** Elektroluminescens
- **fps** Bildefrekvens
- **IRENA** Det internasjonale byrået for fornybar energi
- **IV** Strøm og spenning
- **LeTID** ”Light and elevated Temperature Induced Degradation”
- **LID** ”Light Induced Degradation”
- **MPP** Maksimalt effektpunkt
- **OC** Åpen krets
- **PERC** ”Passivated Emitter and Rear Cell”
- **PID** Potensial-indusert degradering
- **PID-p** PID som følge av de-polarisasjon
- **PID-s** PID som følge av en reduksjon i shunt-resistansen (”PID shutning”)
- **PL** Fotoluminescens
- **SC** Kortslutning
- **SNR** Signal til støy-forhold
- **SNR_{AVG}** Gjennomsnittlig signal til støy-forhold
- **SRH** Shockley-Read-Hall

Kapittel 1

Introduksjon

Fra 1850-1900 til 2011-2020 steg gjennomsnittstemperaturen på jorda med 1,09 grader celsius, ifølge den sjette rapporten til FNs klimapanel (AR6) [1]. Global oppvarming fører til mer ekstremvær og vanskeligere leveforhold for jordas befolkning. En av hovedårsakene til den globale oppvarmingen er forbrenningen av fossilt brensel i energiproduksjonen, der klimagasser som karbondioksid (CO_2) slippes ut i atmosfæren. Grunnet verdens økende energietterspørsel, er det samtidig et behov for å produsere mer energi enn det produseres i dag. Sola er en energikilde som kan bidra til økt produksjon av fornybar energi, og som dermed kan bidra til at energietterspørselen møtes, samtidig som at klimagassutslippene minker. Den globale oppvarmingen og det økende energibehovet kan dermed skape et insentiv til å fokusere mer på utnyttelsen og kvalitetssikringen av solenergi.

Antall installasjoner av solcelleanlegg har vokst over hele verden og hadde en årlig vekstrate på omtrent 43 % i forrige tiår, ifølge Det internasjonale byrået for fornybar energi (IRENA) [2]. For å fortsette veksten er det viktig å ha installasjoner av høy kvalitet, som er trygge å operere og som gir høyest mulig effektproduksjon [3]. Det er dermed et behov for å detektere defekter og degradering ved modulene tidligst mulig for å kunne drive anleggene for full kapasitet [4].

Potensial-indusert degradering (PID) er et eksempel på en type degradering som kan ramme solcellemoduler. PID er forårsaket av tapsstrømmer, som følge av en stor potensialforskjell mellom modulrammene og solcellene [5]. På grunn av denne tapsstrømmen vil ioner kunne migrere inn i cellene og føre til ytterligere skader og tapsstrømmer. Dette vil dermed senke effektproduksjonen til solcelleanlegget, og i sin forskning viser Dhimish og Badran [6] at PID kan føre til en effektreduksjon i moduler på opptil 26,6 %. Hvis tidligere trender følges, vil fremtidens solcellemoduler produsere enda høyere spenning enn det dagens moduler gjør. Det er dermed nærliggende å tro at PID er et degraderingsfenomen som vil fortsette å være aktuelt i fremtiden. For å unngå produksjonstap som følge av PID er det dermed viktig å benytte seg av analysemetoder som bidrar til økt forståelse av dette degraderingsfenomenet, og som kan bidra til at man enkelt kan skille degraderte moduler fra friske moduler, i et større solcelleanlegg.

Avbildning med elektroluminescens (EL-avbildning) er en utbredt avbildningsmetode som

benyttes for å oppdage degradering i solceller. Ved EL-avbildning kobles solcellene til en ytre strømkrets, noe som får elektronene i solcellematerialet til å eksitere. Når elektronene rekombinerer med hullene igjen, vil det sendes ut energi i form av lys, som kan fanges opp av et kamera. Avbildningen foregår som regel i omgivelser med lav til ingen belysning, eksempelvis i et mørkt laboratorium, for å unngå forstyrrelser fra eksterne lyskilder. I bildet som dannes av det emitterte lyset, kan man observere solceller som ikke fungerer optimalt, ved at de fremstår som mørke partier på solcellemodulen. PID er kjent for å føre til et karakteristisk mønster av mørke og lyse celler i bilder av moduler, noe som blant annet Martinez-Moreno et al. oppdaget i sin forskning [7]. Puranik og Gupta [8] observerte også det karakteristiske mønsteret i moduler påvirket av PID, i tillegg til å oppdage at mønsteret ble avdekket tidlig når *lav EL-strøm* ble sendt gjennom modulene. Dette resultatet støttes også av Buerhop et al. [9], som i sin forskning viser at ved å minke eksitasjonskraften, som i dette tilfellet vil være EL-strømmen, vil antallet mørke celler i bildet øke. På denne måten kan man oppdage PID tidlig og dermed kunne forhindre effekttap.

En ulempe med EL-avbildning er at man må koble solcellemodulene til en ekstern strømkrets for å utføre avbildningen, noe som gjør at denne avbildningsmetoden kan kreve en del utstyr. Det krever også at man har et mørklagt sted å utføre avbildningen på. Dermed kan et alternativ til EL-avbildning være *fotoluminescens-avbildning* (PL-avbildning). PL-avbildning krever mindre utstyr, siden denne metoden utnytter det faktum at elektroner eksiteres ved hjelp av sollys. På grunn av dette, kan avbildningen skje ute i dagslys, der modulene står. PL-avbildning krever heller ikke et ekstra areal i form av et laboratorium, flytting av moduler eller ekstra øvrig utstyr, for at man skal kunne ta bilder av modulene. På grunn av dette kan PL-avbildning anses som et bedre alternativ til EL-avbildning.

PL-avbildning kan også benyttes til å detektere PID i solcellemoduler. I likhet med EL-avbildning vil antallet mørke, PID-påvirkede celler i PL-bilder øke med minkende eksitasjonskraft [9] [10], som i dette tilfellet vil være solinnstråling. Etter å ha tatt PL-bilder av en modul påvirket av PID, viste Stoicescu og Reuter [10] at flere mørke celler var synlig ved en innstråling på 50 W/m^2 , enn det var ved 400 W/m^2 . I motsetning til EL-avbildning, kan man ikke kontrollere eksitasjonskraften ved PL-avbildning. Det er derfor viktig å kunne ta PL-bilder uavhengig av mengden solinnstråling, der PID kan observeres tydelig.

Ved siden av visuell inspeksjon, kan man skille mellom moduler påvirket av PID og friske moduler ved å kvantifisere mengden degradering i modulen påvirket av PID. I sin forskning kvantifiserer Kwembur et al. [11] mengden PID i en modul ved å lage et histogram av EL-intensitetene i et EL-bilde av modulen. EL-intensiteten forteller hvor

sterkt signal som blir emittert fra solcellene og kan indikere tilstedeværelsen av defekter i materialet dersom intensiteten er lav [11]. Kwembur et al. [11] observerte to topper i histogrammene av bildene tatt av en PID-påvirket modul med lav EL-strøm (10 % av kortslutningsstrømmen). Den ene toppen representerte de mørke cellene i bildet, og den andre toppen representerte de lyse cellene i bildet. Denne *bimodale fordelingen* ble vurdert som karakteristisk for modulen påvirket av PID [11].

Formålet med denne studien er å undersøke hvilke faktorer som kan bidra til klarest mulig visualisering av PID i PL-bilder, og hvordan denne degraderingen kan kvantifiseres. Det vil fokuseres på hvilke faktorer som gir høyest mulig bildekvalitet og hvordan PID synliggjøres som følge av dette. Degraderingen vil deretter kvantifiseres ved å undersøke PL-signalet sendt fra en modul påvirket av PID, og sammenlikne det med PL-signalet sendt fra en frisk modul. På bakgrunn av dette kan det stilles følgende forskerspørsmål:

- Hvordan kan man oppnå PL-bilder av PID-påvirkede moduler med høyest mulig kvalitet, slik at man kan vurdere degraderingen visuelt?
- Finnes det kvantitative kjennetegn på en modul påvirket av PID i PL-bilder, som kan bidra til at man enkelt kan skille den fra en frisk modul?
- Kan metodene anvendt for å finne de kvantitative kjennetegnene senere benyttes til å skille mellom et større kvantum med PID-påvirkede og friske moduler?

Med dette arbeidet er det ønskelig å bidra med ny innsikt, som kan bidra til å utvikle effektive metoder for detektering av PID i solcellemoduler, ved hjelp av PL-avbildning.

Kapittel 2

Teori

Dette kapitlet tar for seg teorien som oppgaven bygger på, og som er nødvendig for å forstå resultatene. Her presenteres solcellens virkemåte og prinsippene bak dette, ulike rekombinasjons- og degraderingsmekanismer, samt teorien om fotoluminescens og hvordan det kan benyttes til avbildning av solcellemoduler.

2.1 Solcellens virkemåte

En solcelle kan defineres som en halvlederdiode som absorberer sollys og konverterer det til elektrisk energi [12]. Solcellen er en halvleder fordi den kan absorbere fotoner fra sollys og overføre energien til energibærere av elektrisk strøm (elektroner og hull) [12]. Mer presist er solcellen en halvleder *diode*, fordi den kan separere og samle energibærerne, og føre strømmen i en bestemt retning. Denne strømmen kan videre benyttes som elektrisitet i blant annet husstander og industri.

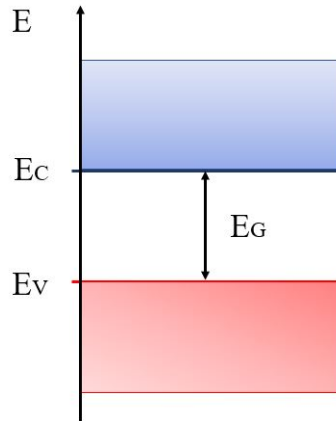
2.1.1 Krystallinsk silisium

Det mest brukte materialet til å lage solceller av, er krystallinsk silisium (c-Si). Den første suksessfulle solcellen var laget av c-Si og produksjonen av c-Si solceller fortsetter den dag i dag [13]. Fordelene med å bruke c-Si til produksjon av solceller er at det er lett tilgjengelig, kjemisk stabilt, ikke giftig og kan enkelt manipuleres for produksjon av strøm i en solcelle.

Si har totalt 14 elektroner som går i bane rundt kjernen, hvorav fire av dem er i det ytterste skallet. Disse fire elektronene kalles for valenselektroner. Ifølge oktettregelen ønsker et atom å ha åtte elektroner i sitt ytterste skall, da dette gir størst stabilitet. Dersom et Si-atom danner kovalente bindinger (bindinger mellom valenselektroner) med fire andre Si-atomer, vil oktettregelen oppfylles. Bindingene mellom Si-atomer vil på denne måten danne en krystallstruktur, som omtales som c-Si.

Ved temperaturer over 0 K vil de kovalente bindingene i c-Si brytes, som følge av absorpsjon av termisk energi [13]. De kovalente bindingene vil også kunne brytes dersom c-Si-materialet absorberer energi fra fotoner i sollyset. Dette skjer dersom fotonenergi-

en er større eller lik *båndgapsenergien* til Si. Båndgapsenergien (E_G) kan defineres som energiforskjellen mellom den maksimale mulige energien i valensbåndet (E_V) og den laveste mulige energien ledningsbåndet (E_C) [13]. Forskjellen mellom disse energiene kan observeres i figur 2.1.1.



Figur 2.1.1: Figuren illustrerer energiforskjellen mellom den laveste mulige energien i ledningsbåndet (E_C) og den maksimale mulige energien i valensbåndet (E_V), kalt båndgapsenergien (E_G). Figuren er inspirert av figur 6.5 (a) i boka *Solar Energy* av Smets et al. [13].

Si har en båndgapsenergi på 1,12 eV. Dersom innkommende fotoner har energi større enn, eller lik båndgapsenergien, vil et elektron kunne løsnes fra valensbåndet og eksiteres til ledningsbåndet. Dermed dannes det frie valenselektroner og hull, som kan bevege seg fritt i krystallgitteret. De frigjorte elektronene og hullene kalles for elektron-hull-par, og er de som videre kan benyttes til elektrisitetsproduksjon, når de inngår i en oppbygningen av en solcelle.

2.1.2 Halvleder doping

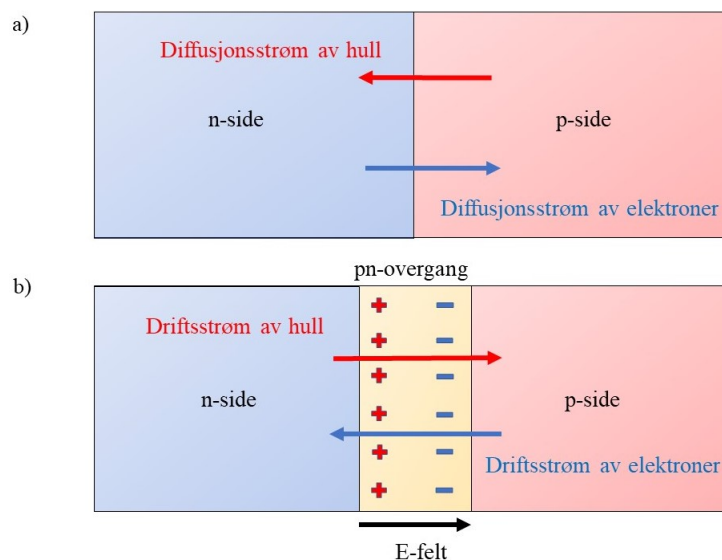
For å øke konsentrasjonen av elektron-hull-par i en solcelle, kan man dope halvleder materialet som solcellen består av. Ved å dope hver side av halvleder materialet med ulike elementer, kan man danne en *n-side* og en *p-side* i halvleder materialet. N-siden av en solcelle er dopet med elementer som har flere elektroner enn Si i valensskallet, og denne siden vil derfor ha en større konsentrasjon av elektroner. P-siden er dopet med elementer som har færre elektroner enn Si i valensskallet, og denne siden vil derfor ha en større konsentrasjon av hull.

For å øke konsentrasjonen av elektroner på n-siden, er fosfor (P) det vanligste elementet å bruke til doping [13]. P har fem valenselektroner, hvor det femte elektronet ikke kan ta del i oppfyllelsen av oktettregelen med Si. Det forblir dermed svakt bundet til P-atomet og kan enkelt bevege seg gjennom krystallgitteret [13]. Det mest vanlige elementet å dope

p-siden med, er bor (B) [13]. B har tre valenselektroner og vil dermed ikke kunne danne bindinger med alle fire naboatomene av Si for å oppfylle oktettregelen. Det kan derimot enkelt motta et elektron fra en nær Si-Si-binding, som på sin side vil føre til at det dannes et hull, som kan bevege seg fritt i krystallgitteret. N- og p-sidene kalles ofte for semipermeable membraner[13], som elektronene og hullene kan bevege seg gjennom når membranene plasseres sammen, før de vandrer ut i en ekstern elektrisk krets.

2.1.3 Pn-overgang og strømmene i en solcelle

Når to membraner av n-type og p-type materialer plasseres sammen, dannes det en pn-overgang mellom materialene, hvor selve grensesnittet kalles for en metallurgisk overgang [13]. Grunnet konsentrasjonsforskjellen mellom materialene, vil en strøm av elektroner diffundere over den metallurgiske overgangen, fra n-siden til p-siden av solcellen. På samme måte vil en strøm av hull diffundere fra p-siden over til n-siden av solcellen. Disse strømmene kalles for *diffusjonsstrømmer* og er vist i figur 2.1.2 a). Diffunderingen vil fortsette over pn-overgangen frem til det dannes et *depleksjonslag* mellom materialene, som ikke lenger inneholder noen mobile ladningsbærere [13]. I depleksjonslaget nærmest p-siden vil hull fylles opp av elektroner og danne negative ioner [13]. Dette vil føre til at denne delen av depleksjonslaget vil være negativt ladet. I depleksjonslaget nærmest n-siden vil det derimot dannes positive ioner, og denne delen av depleksjonslaget vil dermed være positivt ladet. Grunnet denne ladningsforskjellen dannes det et *elektrisk felt* over pn-overgangen, som illustrert i figur 2.1.2 b).



Figur 2.1.2: a) Illustrasjon av en solcelle hvor n-type og p-type materialer akkurat er plassert sammen, og en diffusjonsstrøm av elektroner og hull opptår over den metallurgiske overgangen. Diffunderingen vil foregå frem til overgangen ikke lenger inneholder noen mobile ladningsbærere, og det dannes et E-felt over pn-overgangen, som vist i b). I b) kan man også observere driftsstrømmen, som er strømmen av hull og elektroner som oppstår på grunn av av E-feltet.

Det elektriske feltet vil føre til at ladningsbærerne må bevege seg i motsatt retning enn konsentrasjonsgradienten [13]. En strøm som likevel kan finne sted over pn-overgangen er *driftsstrømmen*, som oppstår som følge av E-feltet i pn-overgangen.

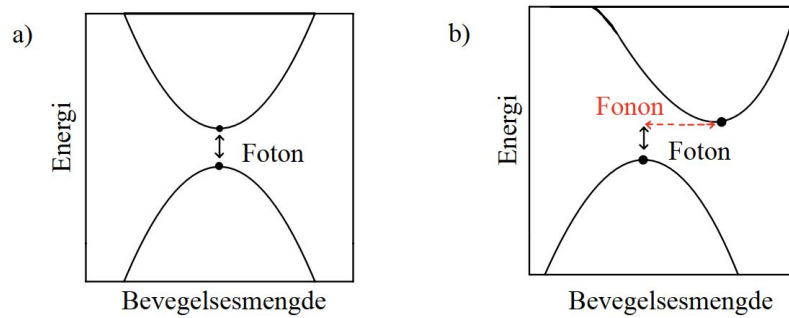
I driftsstrømmen vil hull gå med E-feltet og elektroner gå mot E-feltet, som vist i figur 2.1.2 b). Hvis solcellen ikke er koblet til en ytre krets, vil diffusjonsstrømmen og den termisk genererte driftsstrømmen føre til at totalstrømmen i solcellen er lik null, og at det oppstår en likevekt [13]. Når solcellen belyses, vil likevekten forstyrres, ved at dannes en tredje strøm, kalt for den *fotogenererte strømmen*. Den fotogenererte strømmen oppstår ved at elektronene eksiteres, som følge av at solcellematerialet absorberer fotonenergi fra sollyset [13]. Dersom solcellen er tilkoblet en ekstern krets og elektronet eksiteres på n-siden, vil elektronet kunne bevege seg ut i kretsen gjennom metallkontakten tilkoblet n-siden, mens det genererte hullet vil kunne drifte over til p-siden. Dersom et elektron eksiteres på p-siden vil hullet kunne bevege seg til metallkontakten på p-siden, mens elektronet vil kunne drifte over til n-siden, og deretter ut i kretsen.

For at elektronene og hullene skal kunne skilles av E-feltet i pn-overgangen, må deres *diffusjonslengder* være større enn avstanden til pn-overgangen. Diffusjonslengden beskriver den lengden som ladningsbærere kan diffundere før de rekombinerer [13]. Ved at elektronene har diffusjonslengde lengre enn avstanden til pn-overgangen, kan de skilles av pn-overgangen før de rekombinerer, og benyttes videre i elektrisitetsproduksjon.

2.1.4 Indirekte og direkte båndgap

Alle elektroner som eksiteres benyttes ikke videre til elektrisitet. Ved at elektronene rekombinerer med hull igjen, vil strømmen som kan benyttes videre til elektrisitet, reduseres. Avhengig av egenskapene til halvledermaterialet, vil ulike rekombinasjonsprosesser dominere [13].

Hvilke rekombinasjonsprosesser som dominerer i et halvledermateriale avhenger blant annet av om materialet har direkte eller indirekte båndgap [13]. I et direkte båndgap er det høyeste punktet til valensbåndet direkte under det laveste punktet i ledningsbåndet, som vist i figur 2.1.3 a). I et indirekte båndgap er disse ikke plassert rett ovenfor hverandre, som man kan observere i figur 2.1.3 b).



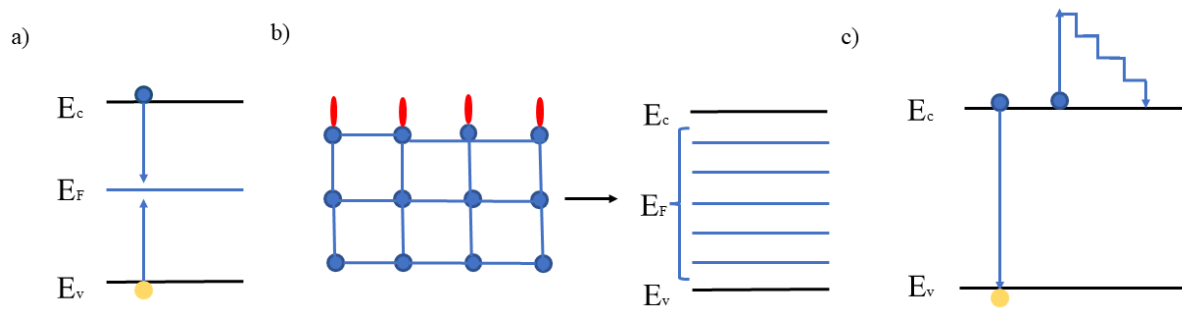
Figur 2.1.3: a) Direkte båndgap der et elektron eksiteres som følge av absorpsjon av et foton. b) Indirekte båndgap der et elektron eksiteres som følge av absorpsjon av et foton, samt en endring i bevegelsesenergi, som er gitt av et fonon. Figuren er inspirert av figur 7.1 i boka *Solar Energy* av Smets et al. [13]

Rekombinering fra båndgap til båndgap kalles for *direkte rekombinasjon*, og har høyest sannsynlighet for å skje i materialer bestående av direkte båndgap. Slike prosesser er ofte radiative, noe som betyr at et foton absorberes eller emitteres, når et elektron-hull-par genereres eller recombines [13]. Når elektroner skal eksiteres i et *indirekte båndgap* må de endre bevegelsesmengde, i tillegg til å absorbere energien fra et foton. Denne bevegelsesmengden får elektronene fra gittervibrasjonene i halvledermaterialet, kalt *fononer* [13]. Det samme prinsippet gjelder for rekombinering med hull. Dersom et elektron skal recombines med et hull i et materiale med indirekte båndgap, må det vekselvirke med et fonon, så vel som med et foton. Dette vil føre til at sannsynligheten øker for at det oppstår andre rekombinasjonsprosesser, enn kun direkte rekombinasjon, i et materiale med indirekte båndgap. c-Si er et materiale med indirekte båndgap. I neste delkapittel vil det presenteres noen vanlige rekombinasjonsprosesser som kan oppstå i c-Si.

2.1.5 Rekombinasjonsprosesser i c-Si

Alle rekombinasjonsprosesser kan finne sted i alle halvledere, selv om sannsynligheten for at de ulike prosessene oppstår, endrer seg med egenskapene til halvledermaterialet. I tillegg til radiativ bånd til bånd-rekombinasjon, er noen av de andre rekombinasjonsprosessene som kan oppstå i c-Si *Shockley-Read-Hall* rekombinasjon (SRH), *Auger* rekombinasjon og *overflaterekombinasjon*.

SRH-rekombinasjon er en rekombinasjonsprosess som ikke foregår direkte fra båndgap til båndgap [13]. SRH-rekombinasjon skjer som følge av urenheter eller gitterdefekter i halvledermaterialet, hvor det oppstår tillatte energinivåer i det forbudte båndgapet (E_F) [13]. I denne energitilstanden kan elektroner fanges og recombines med hull, som tiltrekkes det fangede elektronet [13]. Denne prosessen kan observeres i 2.1.4 a).



Figur 2.1.4: a) SRH-rekombinasjon. Et elektron i ledningsbåndet (E_C) fanges i et energinivå i det forbudte båndgapet (E_F), hvor det tiltrekker seg et hull fra valensbåndet (E_V). b) Løse bindinger på overflaten av c-Si, som fører til feller i båndgapet hvor SRH-rekombinasjon kan oppstå (kalt overflaterekombinasjon). c) Auger rekombinasjon. Et elektron som rekombinerer overfører energi til et annet elektron, som eksiteres før det faller ned igjen. Figuren er inspirert av figurene 7.3, 7.5 og 7.6 i boka *Solar Energy* av Smets et al. [13]

Den overfløydige energien fra SRH-rekombineringen vil avsettes i form av varme eller fotoner. Det skilles mellom to former for såkalte feller, kalt donor-feller og akseptor-feller. Donor-fellene er positivt ladet når et elektron ikke er fanget i fella, men nøytralt med en gang et elektron er fanget. Akseptor-fellene er nøytrale når et elektron ikke er fanget i fella, og negativt ladet når et elektron er fanget [13].

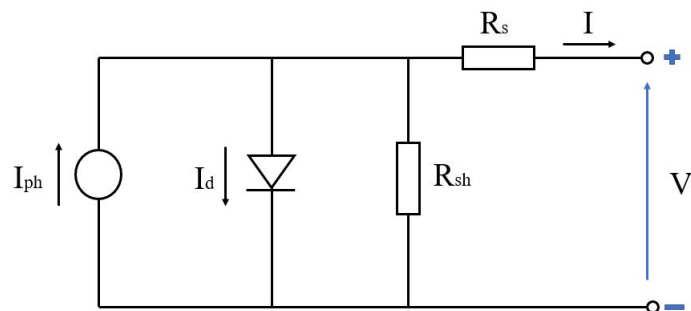
SRH-rekombinasjon kan også skje som følge av defekter på overflaten av solcellematerialet. På overflaten av c-Si er det flere valenselektroner som ikke har partnere å danne kovalente bindinger med. Dette resulterer i såkalte løse bindinger, som vist i figur 2.1.4 b). Disse løse bindingene kan føre til dannelsen av feller inne i båndgapet, hvor SRH-rekombinasjon igjen kan oppstå [13] (se figur 2.1.4 a).

En annen viktig rekombinasjonsmekanisme i materialer med indirekte båndgap er Auger rekombinasjon [13]. I denne formen for rekombinasjon er tre partikler involvert, som illustrert i figur 2.1.4 c). Når et elektron og et hull rekombinerer, vil den overfløydige energien overføres til et annet elektron eller hull. Dersom det overføres til et elektron, vil dette elektronet eksiteres, før det faller ned til ledningsbåndet igjen. Den overfløydige energien vil overføres til gitteret før det avsettes som varme [13]. Dersom energien overføres til et hull, vil dette hullet synke til lavere energinivåer, før det stiger opp igjen og overfører energien til gitteret.

2.2 Ekvivalentkrets

For å få en forståelse av de elektriske egenskapene til en reell solcelle, kan man ta utgangspunkt i en ekvivalentkrets, som vist i figur 2.2.1. Ekvivalentkretsen i figur 2.2.1

kalles for en *endiodemodell*, der strømkilden og dioden utgjør solcellen. Dioden er formet av pn-overgangen i solcellen [13]. Tilkoblet solcellen finner man en seriemotstand (R_s) og en shuntmotstand (R_{sh}), som illustrerer områdene hvor de elektriske tapene i kretsen tar sted. R_s representerer seriemotstanden i solcellen og i elektriske komponenter, slik som i ledere og kontakter, hvor det vil forekomme ohmske tap. R_{sh} representerer motstanden i de alternative rutene som strømmen kan ta over pn-overgangen, og vil dermed påvirke mengden lekkasjestrøm i solcellen. Lekkasjestrømmene oppstår som følge av urenheter i solcellen, som fører til at strømmen går gjennom urenheterne, istedenfor å gå gjennom kretsen.



Figur 2.2.1: Ekvivalentkretsen til en reell solcelle. I_{ph} representerer fotonstrømmen, I_d representerer strømmen gjennom dioden (pn-overgangen) og I representerer den totale strømmen produsert av solcellen. Av motstandene representerer R_s seriemotstanden i solcellen og elektriske komponenter tilkoblet den, mens R_{sh} representerer shuntmotstanden, som vil påvirke mengden lekkasjestrøm i solcellen.

Siden ohmske tap (P_{tap}) er gitt av

$$P_{tap} = I_s^2 R_s, \quad (2.1)$$

der I_s er strømmen gjennom seriemotstanden R_s , er det ønskelig at R_s er så liten som mulig for å unngå mest mulig tap. Siden strøm går minste motstands vei, kan man fra figur 2.2.1 se at det samtidig er ønskelig å ha en høy R_{sh} , slik at strømmen ikke velger den alternative ruten gjennom denne motstanden. På denne måten vil mest mulig strøm brukes til elektrisitet og ikke bidra til lekkasjestrømmer og effekttap.

2.3 Oppbygningen av en solcelle

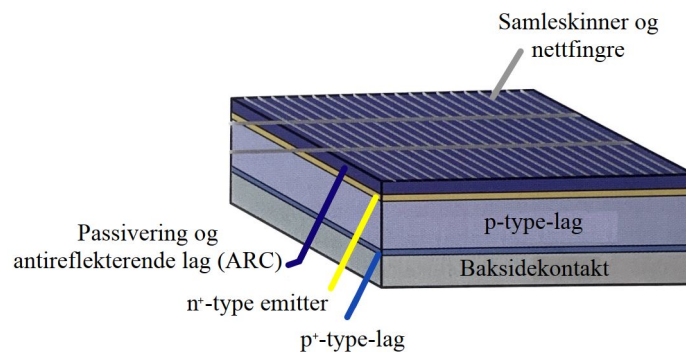
Avhengig av hvordan solcellen er bygd opp, vil rekombinasjon og effekttap skje i ulike deler av solcellen. Dette delkapittelet vil ta for seg oppbygningen av en konvensjonell solcelle av c-Si, og en tosidig solcelle kalt "Passivated Emitter and Rear Cell" (PERC), da det er disse solcellene som inngår i modulene brukt i studien.

2.3.1 Konvensjonell solcelle

Den mest konvensjonelle solcellen på markedet er av c-Si og er hovedsakelig bygd opp av et p-type materiale (heretter: p-type solcelle). P-type-materialet i en slik solcelle kalles for en *p-wafer*. Det er denne typen solcelle som dette delkapittelet skal omhandle. Solcellen er illustrert i figur 2.3.1, og vil være utgangspunktet for beskrivelsene.

2.3.1.1 Generering av ladningsbærere

I en p-type solcelle er n-type-laget mye tynnere enn p-type-laget, som man kan observere i figur 2.3.1. Ifølge Smets et al. [13] har dette n-laget normalt en tykkelse på rundt $0,3 \mu\text{m}$, mens hele waferen normalt sett har en tykkelse mellom $100 \mu\text{m}$ og $300 \mu\text{m}$. N-laget kalles ofte for emitterlaget og er definert som "n⁺-type emitter" i figur 2.3.1. Dette laget er ekstra dopet for å minke tettheten av minoritetsladningsbærere (her: hull) og dermed minke mulighetene for rekombinasjon [13]. Ved å lage emitterlaget så tynt, vil en stor andel av ladningsbærerne som genereres av det innkommende lyset, kunne dannes i nærheten av pn-overgangen [13]. Dersom de genererte ladningsbærerne har diffusjonslengder lengre enn avstanden til pn-overgangen, vil de kunne separeres av E-feltet i pn-overgangen. Elektronene vil deretter drifte over til n⁺-laget, og videre til metallkontaktene på oversiden, utgjort av samleskinner og nettfingre.



Figur 2.3.1: Illustrasjon av oppbygningen til en p-type solcelle av c-Si. Fra topp til bunn: samleskinner og nettfingre, passivering og antireflekerende lag (ARC), n⁺-type emitter, p-type-lag, p⁺-type-lag og baksidekontakt av aluminium. Figuren er en revidert versjon av figur 12.8 i *Solar Energy* av Smets et al. [13]

2.3.1.2 Passivering og antireflekerende lag (ARC)

På overflaten av solcellen kan det forekomme overflaterrekombinasjon som følge av løse bindinger, som beskrevet i delkapittel 2.1.5. For å unngå dette, kan man legge et tynt lag av et annet materiale på toppen av solcellen [13]. Dette materialet vil føre til at valenselektronene i de løse bindingene blir oppbundet til materialet, slik at de ikke kan være årsaken til feller i båndgapet og påfølgende SRH-rekombinasjon. Dette kalles for et *passiveringslag*, og er illustrert øverst i figur 2.3.1. Ett av de vanligste materialene å bruke til

passivering er silisiumnitrid med hydrogen ($\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$) [14]. $\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$ er passiverende fordi H vil binde seg til de løse bindingene på overflaten i Si. Det er også isolerende, grunnet dets faste, positive ladninger [14]. Grunnet disse ladningene, vil minoritetsladningsbærerne i n^+ -laget kunne frastøtes overflaten, og derfor minke mulighetene for rekombinasjon. På grunn av at passiveringslaget har isolerende egenskaper, må man ha penetrerende metallkontakter (nettfigre) for å oppnå elektrisk kontakt med substratet under, slik at elektronene kan bevege seg fra emitteren til metallet over [13]. I tillegg til dette, er et passiveringslag av $\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$ antireflekterende, og vil også kunne redusere tap som følge av refleksjon av sollys. Dette er illustrert av "ARC" i figur 2.3.1.

2.3.1.3 Baksiden av solcellen

I figur 2.3.1 kan man observere et ekstra dopet p-lag under den normalt dopede p-waferen, kalt for et "p⁺-type-lag". På undersiden av dette laget igjen, kan man observere baksidekontakten av solcellen. Denne baksidekontakten er som regel produsert av aluminium (Al). På samme måte som B, er Al et element som kan brukes til p-doping. p⁺-type-laget oppstår dermed som følge av at Al diffunderer inn i p-type-laget, og fører til at nederste del av p-laget blir ekstra sterkt dopet. Mellom disse lagene dannes det så en p/p⁺-overgang, som oppfører seg som en n-p-overgang [13]. På denne måten vil overgangen fremtre som en barriere, som hindrer elektroner i p-laget å diffundere til baksiden av solcellen og rekombinere med hull der [13]. Spenningen som oppstår mellom lagene vil i tillegg virke som et passiverende lag, som videre forhindrer rekombinasjon. På grunn av disse egenskapene kalles p⁺-type-lag på engelsk for "Back Surface Field" (BSF) [13].

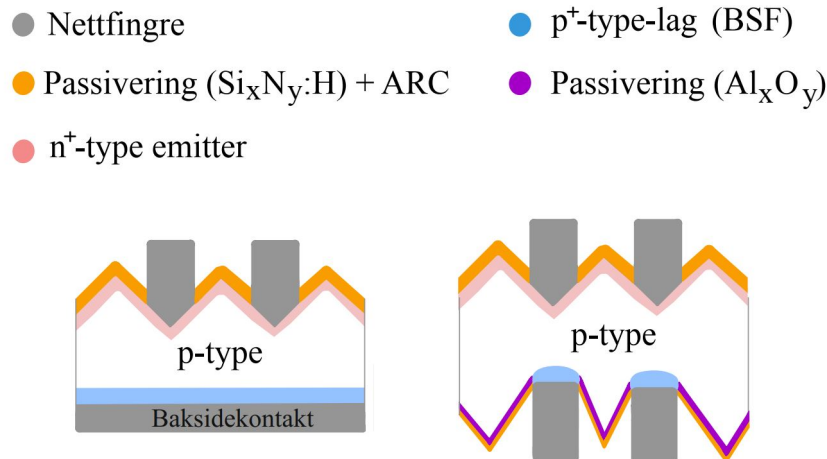
2.3.2 Tosidig "Passivated Emitter and Rear Cell" (PERC)

For å ytterligere forhindre rekombinasjon på baksiden av en solcelle, kan et passiverende lag av aluminiumoksid (Al_xO_y) legges på baksiden av solcellen. Ved å gjøre dette vil man lage en såkalt "Passivated Emitter and Rear Cell" (PERC).

Passiveringslaget på baksiden av en PERC-celle er dannet av Al_xO_y fordi det egner seg til å passivere p-type-laget. Dette er på grunn av de faste, negative ladningene i Al_xO_y [14]. På grunn av disse ladningene vil Al_xO_y kunne frastøte minoritetsladningsbærerne, som her vil være elektroner, og dermed forhindre rekombinasjon på baksiden av cellen. PERC-solcellen skiller seg dermed fra den konvensjonelle solcellen ved at rekombinasjonen på baksiden av solcellen minker ytterligere, og effektiviteten til solcellen øker.

Dersom PERC-solcellen i tillegg designes slik at den kan innhøste energi fra sola på begge sider, kalles cellen for en tosidig celle (kjent på engelsk som en "bifacial cell"). Baksiden av cellen kan innhøste energi gjennom diffus stråling fra himmelhvelvingen, eller gjennom

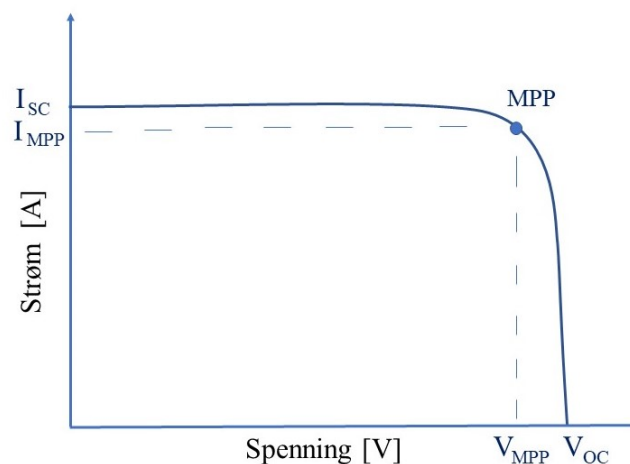
det reflekterte lyset fra omgivelsene. På denne måten vil solcellen kunne utnytte mer av solinnstrålingen enn det konvensjonelle p-type solceller kan gjøre, noe som igjen vil øke dens effektivitet. Forskjellen mellom en tosidig PERC-solcelle og en konvensjonell p-type solcelle illustreres i figur 2.3.2.



Figur 2.3.2: Illustrasjon av oppbygningen til: a) en konvensjonell p-type solcelle av c-Si, og b) en tosidig PERC-solcelle. Forskjellen mellom solcellene er baksiden, hvor PERC-solcellen er mottakelig for innstråling, og er passivert med Al_xO_y .

2.4 Strøm- og spenningskurve (IV-kurve)

Oppførselen til en belyst solcelle kan karakteriseres av en strøm- og spenningskurve, en såkalt *IV-kurve* [13]. Et eksempel på en IV-kurve er illustrert i figur 2.4.1. I IV-kurven kan man observere ved hvilken strøm og spenning cellene leverer når de opererer mellom åpen krets (*OC*), maksimalt effektpunkt (*MPP*) og kortslutning (*SC*).



Figur 2.4.1: IV-kurven til en solcelle. Fra kurven kan man avlese kortslutningsstrømmen (I_{SC}) og åpen krets-spenningen (V_{OC}), samt hvilken strøm og spenning som tilsvarer MPP (henholdsvis I_{MPP} og V_{MPP}).

Solcellene kan kobles sammen til en solcellemodul, som også vil ha en IV-kurve, karakterisert av oppkoblingen av solcellene. En inverter tilkoblet en streng av solcellemoduler kan utføre en IV-kurveskanning av de tilkoblede modulene med noen minutters mellomrom. Denne IV-kurveskanningen har som hensikt å finne MPP der modulene produserer den strøm og spenning som gir høyest mulig effekt ut fra anlegget. Etter at inverteren har utført IV-kurveskanningen, vil modulene normalt sett tvinges til å operere i MPP, for å produsere høyest mulig effekt (P_{max}).

Rekombinasjon av ladningsbærere kan føre til reduksjoner i P_{max} , I_{SC} og V_{OC} , og dermed påvirke hvordan IV-kurven til solcellene ser ut. Dette kan oppstå som følge av degradering av solcellene. I neste delkapittel vil det presenteres noen vanlige former for degradering som kan oppstå i konvensjonelle p-type solceller, og i tosidige PERC-solceller.

2.5 Degradering i solceller

Til tross for at solcellene og -modulene designes for å unngå mest mulig rekombinasjon av ladningsbærere, kan det likevel oppstå. Avhengig av hvilken type solceller en modul består av, kan det forekomme ulike former for degradering og rekombinasjon.

2.5.1 ”Light Induced Degradation” (LID) og ”Light and elevated Temperature Induced Degradation” (LeTID)

Et eksempel på en degraderingsmekanisme som kan oppstå i solceller er ”Light Induced Degradation” (LID). LID oppstår i p-type solceller, som er dopet med eksempelvis med B [15]. Kombinasjonen av oksygenet i solcellen og bordopingen fører til komplekser som fanger opp elektroner og hull, og som gjør dem utilgjengelige for energiproduksjon [15]. Det foregår altså en SRH-rekombinasjon inne i solcellen. LID oppstår de første timene av soleksponering og fører til en nedgang i solcellens effektivitet, før effektiviteten vil stabilisere seg etter en kort periode [15]. LID vil ikke oppstå i n-type solceller som følge av at de ikke inneholder B.

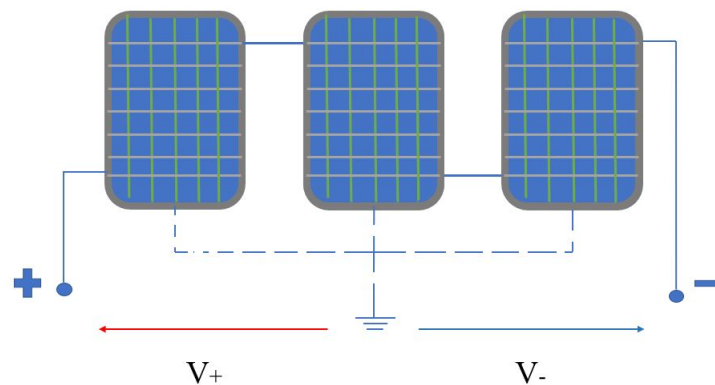
En lignende form for degradering er ”Light and elevated Temperature Induced Degradation” (LeTID). LeTID oppstår ved høy innstråling og høy temperatur, men i motsetning til LID, forekommer LeTID over mange timer med belysning [15]. LeTID er heller ikke avhengig av oksygenivået i solcellen, men er et resultat av en reaksjon mellom passiveringslagene i solcellene under høyere temperaturer [15]. LeTID forårsaker dermed spesielt degradering i Si-solceller der passiveringsteknologi er brukt, eksempelvis i PERC-solceller [15]. Studier [16] tyder på at H, i passiveringslaget bestående av $\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$, kan være årsaken til at LeTID oppstår. Ved varmebehandling av solcellen kan H migrere inn i solcellen, der den

kan danne defekter i krystallstrukturen når solcellen utsettes for innstråling og forhøyede temperaturer [16]. Dette vil igjen kunne øke rekombinasjonen av ladningsbærere.

LID og LeTID er degraderingsmekanismer forårsaket av eksponering av lys og forhøyede temperaturer. Det finnes dog en annen form for degradering, som også kan finne sted i en solcelle. Denne formen for degradering oppstår som følge av potensialforskjeller mellom solcellene og de øvrige delene av en modul, og kalles for potensial-indusert degradering (PID).

2.5.2 Potensial-indusert degradering (PID)

PID er en degraderingsmekanisme som oppstår på grunn av store potensialforskjeller mellom solcellene og modulrammene. Denne potensialforskjellen oppstår som følge av at solcellemodulene er koblet sammen i serie for å bygge opp spenningen, mens øvrige deler av modulen er jordet av sikkerhetsmessige årsaker [5]. Avhengig av hvor modulene er jordet, kan solcellene ha et stort positivt eller negativt potensiale i forhold til jord, som vist i figur 2.5.1.



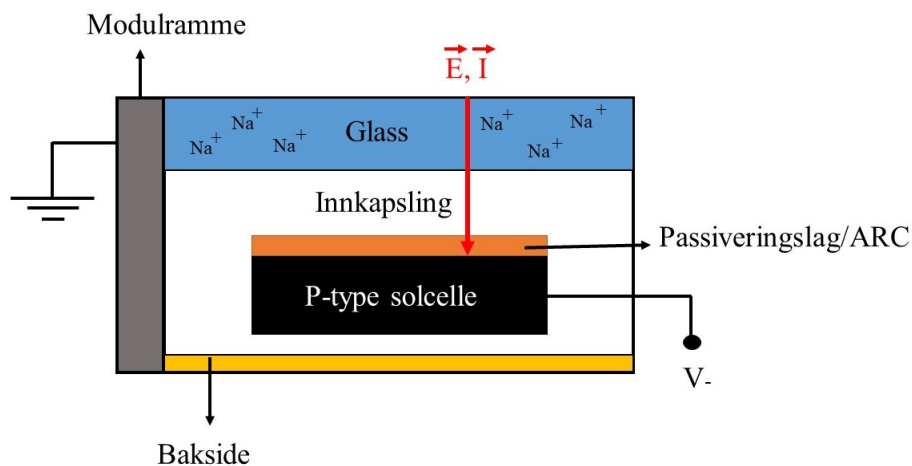
Figur 2.5.1: Illustrasjon av hvordan tre moduler er koblet opp i forhold til jord. Potensialforskjellen øker jo lengre unna modulene er fra jord. Figuren er inspirert av figur 1 i *Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review* av Luo et al. [5].

På grunn av denne potensialforskjellen kan det oppstå lekkasjestrømmer og en påfølgende migrasjon av positive eller negative ioner [5]. Dette vil føre til at cellene blir inaktive og vises som mørke ruter i bilder av modulen, nærmest likt fordelingen på et sjakkbrett. Hvilken form for PID som oppstår, avhenger av hvilken type celler modulen er bygd opp av. De neste delkapitlene vil ta for seg to vanlige former for PID, som kan oppstå i konvensjonelle p-type solceller og tosidige PERC-solceller.

2.5.2.1 Degradering som følge av en reduksjon i shunt-resistansen (PID-s)

I konvensjonelle p-type solceller er ”PID shunting” (PID-s) den vanligste formen for PID [5]. PID-s kan beskrives som degradering grunnet en reduksjon i R_{sh} . For p-type moduler er PID-s identifisert som hovedårsaken til effekttap når solcellene har et negativt potensiale i forhold til jord [17].

På grunn av den negative potensialforskjellen mellom solcellene og jord, vil natrium-ioner (Na^+) kunne migrere fra glasset til cellene [8]. Na^+ vil bevege seg gjennom passiveringslaget av $\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$ og ARC, før det når n⁺/p-overgangen (se figur 2.3.1) [5]. Akkumulering av Na^+ vil så føre til dannelsen av alternative ruter som strømmen kan ta over pn-overgangen og dermed bidra til ytterligere tapsstrømmer. Det oppstår altså en reduksjon i R_{sh} [5] og en økning i I_{sh} , som fører til økt effekttap (se figur 2.2.1). Figur 2.5.2 viser en forenklet modell av en modul påvirket av PID-s og viser en vei som Na^+ kan migrere.



Figur 2.5.2: Figuren viser en p-type modul påvirket av PID. Retningen på E-feltet og lekkasjestrømmene (I) er illustrert i rødt. Na^+ vil migrere med E-feltet, gjennom passiveringslaget og inn mot solcellen.

PID-s er mest dominant under lave innstrålingsnivåer, da effekttapene som følge av økt I_{sh} blir mer dominant, siden I_{ph} avtar [5]. PID-s kan oppstå i p-type moduler, men også på forsiden av en tosidig PERC-modul, da de har lik oppbygning på forsiden (se figur 2.3.2). På baksiden av en tosidig PERC-modul vil andre former for PID oppstå.

2.5.2.2 Degradering som følge av de-polarisasjon (PID-p)

Baksiden av tosidige moduler har vist seg å være sensitive for PID. Dette er begrunnet med at baksiden av modulene ikke er dekket av metall [18] og kan dermed være utsatt for potensialforskjellene og lekkasjestrømmene som fører til PID. Ifølge Luo et al. [17] kan det blant annet skje en degradering av overflatepassiveringen på baksiden av solcellene i disse modulene, kalt de-polarisasjon (PID-p).

Som nevnt i delkapittel 2.3.1.2 kan passiveringslaget i utgangspunktet ha isolerende egenskaper. For baksiden av en tosidig PERC-solcelle innebærer dette at Al_xO_y -laget har negativ ladning, og dermed vil frastøte minoritetsladningsbærere i p-laget, bort fra overflaten på baksiden av solcellen [17]. Dersom modulen opererer i den negative delen av strengen og har negativt potensiale i forhold til jord, vil strømmer av positivt ladede ioner kunne strømme inn i solcellene fra baksiden. Ved at disse ionene migrerer til overflaten, vil passiveringseffekten til passiveringslaget minke [17]. På overflaten kan minoritetsladningsbærerne derfor enkelt rekombinere, noe som igjen vil føre til effekttap.

For å få en økt forståelse av PID og avdekke degradering av modulene tidlig, kan man ta bilder av modulene, og analysere disse. En av avbildningsmetodene man benytte for dette formålet, er fotoluminescensavbildning (PL-avbildning). Denne formen for avbildning vil være hovedtemaet for neste delkapittel.

2.6 Avbildning av solcellemoduler

Det finnes flere metoder som kan anvendes for å oppdage degradering i solcellemoduler. PL-avbildning er én av disse metodene. Siden PL-avbildning utnytter energien fra sollyset, krever det lite utstyr, siden bildene kan tas på dagtid der modulene står. Dette gjør PL-avbildning til et godt alternativ til eksempelvis avbildning med elektroluminescens (EL-avbildning), som krever mer utstyr. I dette delkapittelet vil prinsippet bak luminescens og PL-avbildning presenteres, da det er denne avbildningsmetoden som anvendes i studien.

2.6.1 Fotoluminescensavbildning (PL-avbildning)

Luminescens i et halvledermateriale kan beskrives som prosessen der overskuddsenergien sendes ut via et foton når en ladningsbærer deeksiteres fra en høy energitilstand til en lavere energitilstand [3]. Luminescensintensiteten (I_{PL}) beskriver antall utsendte fotoner per sekund per areal, og kan uttrykkes via

$$I_{PL} = Cn_i^2 \exp \frac{V_d}{V_T}, \quad (2.2)$$

der C er en proporsjonalkonstant relatert til prøvens optiske egenskaper, n_i er den instriske bærerkonsentrasjonen, V_d er diodespenningen (spenningen over pn-overgangen) og V_T er den termiske spenningen, som normalt er 25,85 mV ved romtemperatur [3].

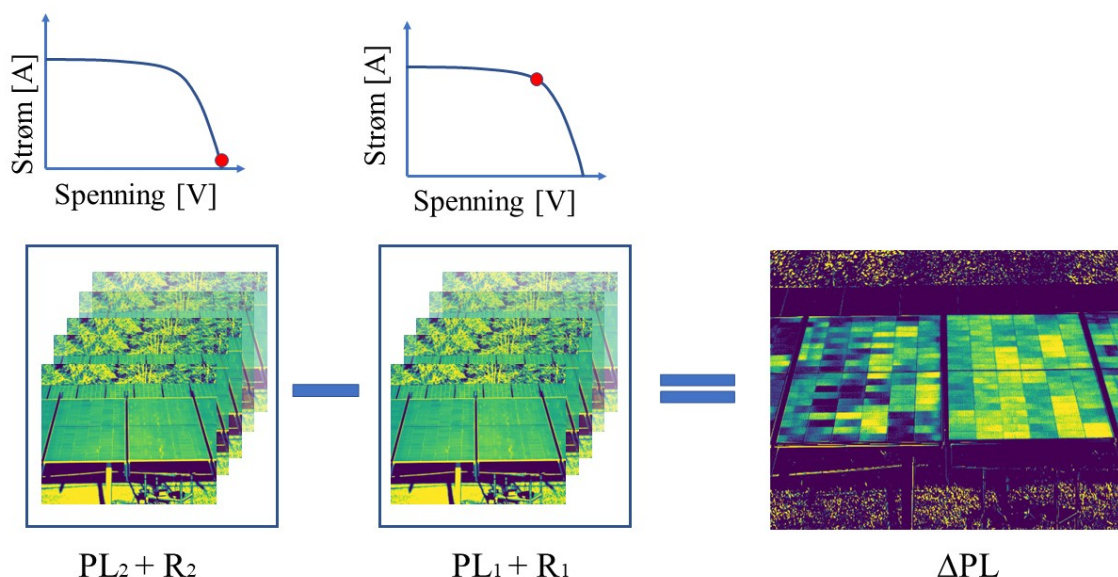
Utsendingen av et foton kan kalles for et *luminescenssignal*. Det sterkeste luminescenssignalet vil man få når V_d er høyest [19]. Dette vil være tilfelle under OC , når V_d er lik

V_{OC} . Når strømmen øker, vil spenningen minke, og dermed vil signalet minke. Signalet er minst når man har I_{sc} .

Fotoluminescens er en gren innenfor luminescens. Fotoluminescens skjer når et elektron eksiteres som følge av absorpsjon av lys, hvor overskuddsenergien blir sendt ut som lys med en lengre bølgelengde når elektronet faller ned til et lavere energinivå igjen [20]. Det foregår med andre ord en radiativ bånd- til bånd-rekombinasjon [19]. Et kamera kan brukes for å fange et bilde av den luminescerende emisjonen, som kan kalles for et *PL-signal*. Styrken på PL-signalet kan observeres gjennom pikselintensiteten til pikslene i det produserte PL-bildet, som også kan kalles for PL-verdier. Disse verdiene vil kunne variere for degraderte og friske celler.

2.6.1.1 Refleksjon fra sola og Δ PL-bilder

Refleksjon fra sola kan forstyrre luminescenssignalet som kameraet fanger opp. Dersom signalet fra refleksjonen overlapper med signalet fra den luminescerende emisjonen, må refleksjonen substraheres fra signalet for å få et klart bilde. Dette kan man gjøre ved å ta bilder ved to ulike operasjonspunkter, hvor V_d er ulik, og substrahere bildene fra hverandre [19]. Man har da produsert det som kan kalles for et Δ PL-bilde. Produksjonen av et Δ PL-bilde illustreres i figur 2.6.1. I figuren er det også tatt et gjennomsnitt av flere bilder rundt hvert operasjonspunkt, for å få et større gjennomsnittlig signal til støyforhold (SNR_{AVG}), som beskrives i delkapittel 2.8.

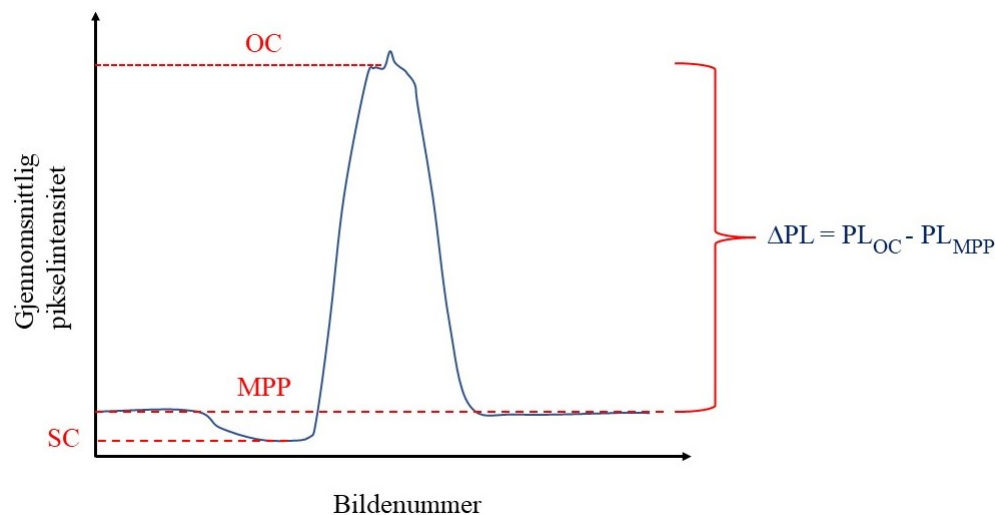


Figur 2.6.1: Illustrasjon av hvordan man lager et Δ PL-bilde uten forstyrrelser fra refleksjon. Her representerer PL_2 og PL_1 PL-signalet, mens R_2 og R_1 representerer refleksjonen. Bildene tas ved hvert sitt operasjonspunkt, henholdsvis *OC* og *MPP*. I dette tilfellet tas det et gjennomsnitt av flere bilder rundt hvert operasjonspunkt for å danne Δ PL-bildet.

Dess større forskjell det er i spenningen, jo sterkere er luminescenssignalet [19]. Siden refleksjonen fra sola er upåvirket av operasjonspunkt [21], vil man på denne måten kunne eliminere refleksjonen fra signalet, og samtidig oppnå et ΔPL -bilde av høy kvalitet.

2.6.1.2 Avbildning under IV-kurveskanning

Ved å ta bilder av en solcellemodul når inverteren utfører en IV-kurveskanning, kan man innhente bilder gjennom hele IV-kurven, og dermed når cellene og modulen opererer ved ulike strøm- og spenningsnivåer. Ulike operasjonspunkt tilsvarer ulike styrker på PL-signalet emittert fra cellene og er dermed med på å bestemme kvaliteten på bildene. På denne måten kan man hente ut de ΔPL -bildene som vil gi høyest mulig bildekvalitet, ved spesifikke strøm- og spenningsnivåer. Figur 2.6.2 illustrerer hvordan den gjennomsnittlige pikselintensiteten (signalstyrken) varierer med OC , MPP og SC i et gjennomsnitt av et visst antall bilder, og gir et eksempel på hvor man kan produsere et ΔPL -bilde (her produsert mellom OC og MPP).



Figur 2.6.2: Figuren viser hvordan den gjennomsnittlige pikselintensiteten (signalstyrken) i bildene varierer med OC , MPP og SC , og gir et eksempel på hvor man kan hente ut et ΔPL -bilde, her produsert mellom OC og MPP .

Fordelene med å ta bilder under en IV-kurveskanning er at man får et spenn av bilder å velge mellom og man trenger lite utstyr. I utgangspunktet er det kun et bildeapparat og en eventuell strømmåler som er nødvendig å ta med til anlegget [22].

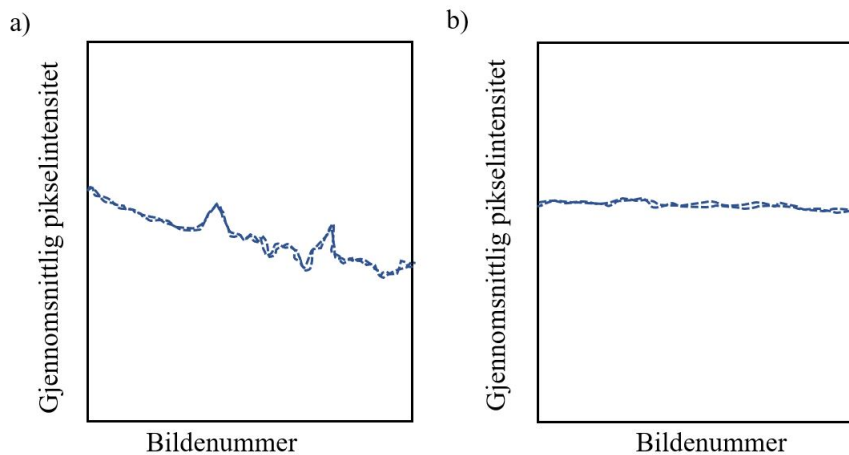
2.7 Korrigering for varierende innstråling

Ved å analysere ΔPL -bilder ved ulike solinnstrålinger, eksempelvis ved 50 W/m^2 og 400 W/m^2 [10], kan man undersøke innvirkningen de ulike innstrålingene har på bildene. Dersom

dette ikke er formålet, kan man istedenfor korrigerer for den varierende innstrålingen, for å gi bildene et bedre sammenlikningsgrunnlag.

Dersom solinnstrålingen varierer mens man tar bilder av en solcellemodul, kan det påvirke pikselintensiteten til bildene, som illustrert i figur 2.7.1 a). Ved å korrigerer for den varierende innstrålingen kan bildeintensiteten utjevnes, som illustrert i 2.7.1 b). På denne måten kan man korrigerer for usikkerhetene som dannes av den varierende solinnstrålingen.

Bildekorrigeringen baserer seg på pikselverdiene til en *hvitreferanse*, som tas i samme bilde som modulene [19]. Dette kan eksempelvis være et hvitt areal i bildet. Bhoopathy [21] viser til at dette ikke nødvendigvis trenger å være et hvitt areal, så lenge det er noe som kalles for et *umodulert* område. Dette beskriver et område hvor luminescenseemisjon ikke er forventet, og som dermed er en direkte måling av solintensiteten.



Figur 2.7.1: a) Signal som ikke er korrigerert for varierende solinnstråling. b) Signal etter korrigering av varierende solinnstråling.

Det korrigererte bildet kan kalkuleres som Vukovic et al. beskriver i artikkelen ”*Photoluminescence imaging of silicon modules in a string*” [19], vist i likning 2.3

$$img_{i,j,corr} = \frac{img_{i,j}}{\frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L img_{wr}}, \quad (2.3)$$

der img_{corr} er det korrigererte bildet, img er det originale bildet, img_{wr} er en del av det originale bildet som representerer hvitreferansen, $i = 1, \dots, N$ og $j = 1, \dots, M$, hvor N og M er dimensjonene til bildet, $k = 1, \dots, K$ og $l = 1, \dots, L$, hvor K og L er dimensjonene til hvitreferansen [19].

I likning 2.3 dividerer man alle pikslene i hvert bilde med gjennomsnittet av de pikslene som kun reflekterer sollys i det bildet. Da er hvert bilde korrigerert for hver piksel.

2.8 Signal til støy-forhold (SNR)

For å vurdere kvaliteten på Δ PL-bildene, kan man kalkulere signal til støy-forholdet (SNR) til bildene. EL-standarden [23] definerer SNR som forholdet mellom brukbart og ubrukelig signal, hvor det ubrukelige signalet stammer fra bakgrunnsstøy. Det er dermed ønskelig med en relativ høy SNR -verdi, da det representerer et bilde av relativ høy kvalitet. Et kvalitetskriterium etablert av EL-standarden [23] er SNR_{50} , som vist i likning 2.4

$$SNR_{50} = \frac{\sum_k (0,5 \cdot (EL_1(k) + EL_2(k)) - BG(k))}{\sum_k (|EL_1(k) - EL_2(k)| \cdot \sqrt{0,5} \cdot (\frac{2}{\pi})^{-0,5})}, \quad (2.4)$$

der k er pikselindeksen, EL_1 og EL_2 er to EL-bilder av en modul og BG er et bakgrunnsbilde.

Da EL-standarden ikke forklarer likning 2.4 i dybden, vil følgende forklaring basere seg på forklaringen gitt i Mantel et al. [24]. SNR_{50} beregnes ved hjelp av to elementer: den estimerte styrken av signalet og styrken til støyen. I telleren til likning 2.4 oppgis estimatet av styrken til signalet som gjennomsnittet av to EL-bilder, minus ett bakgrunnsbilde. Nevneren til likning 2.4 inneholder uttrykket for støy, og er absoluttforskjellen mellom de to EL-bildene, skalert med en konstant.

Dette kriteriet kan overføres til PL-bilder ved å bytte ut EL-størrelsene med PL-størrelser. For bilder tatt utendørs, vil et sett bestående av tre bilder være for støyete til å kunne gi en relativ høy SNR_{50} -verdi [24]. På grunn av dette har Mantel et al. [24] foreslått en utvidelse av likningen, der bildene innhentes som sekvenser. Ved å ta gjennomsnittet av disse sekvensene, istedenfor av kun to til tre enkeltbilder, vil man kunne oppnå en høyere SNR -verdi. Denne SNR -verdien vil heretter defineres som SNR_{AVG} og presenteres i likning 2.5

$$SNR_{AVG} = \frac{\sum_k (avg_{i \in N} (EL_i(k) - BG_i(k)))}{\sum_k (|avg_{i \in N_1} (EL_i(k)) - avg_{j \in N_2} (EL_j(k))| \cdot K)}, \quad (2.5)$$

der K er $\sqrt{0,5} \cdot (\frac{2}{\pi})^{-0,5}$, N_1 representerer oddetall mellom 1 og $|N|$ og N_2 representerer partall [24].

Likning 2.5 gjelder for bildesekvenser der man bytter på å ta ett og ett bilde med høyt signal og bakgrunnsignal, i en lengre sekvens av bilder. Dersom man istedenfor tar et helt bildesett av først N bilder med høyt signal, og deretter N bilder med bakgrunnsignal, vil N_1 og N_2 i likning 2.5 representere gjennomsnittet av hver halvpart av bildene med høyt signal.

En grense for minimal akseptabel SNR_{50} -verdi er satt til å være ≥ 5 av EL-standarden [23]. Dette kan overføres til å også gjelde for beregnede SNR_{AVG} -verdier.

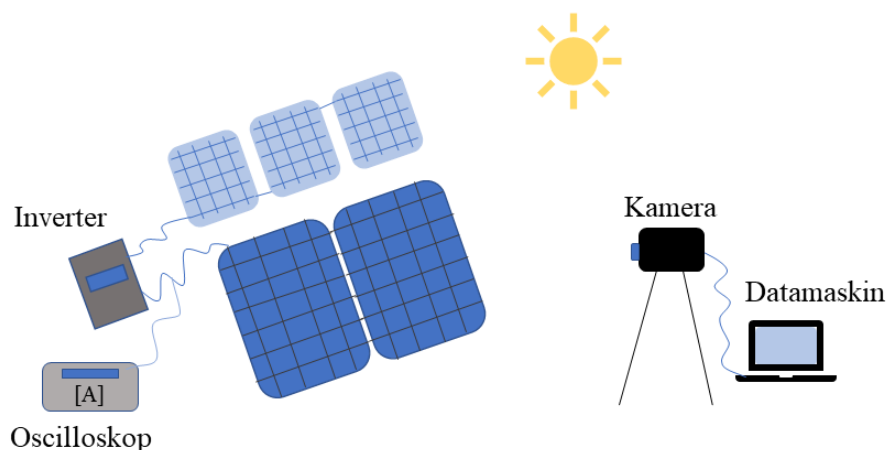
Kapittel 3

Eksperimentelt arbeid

I denne studien analyseres det Δ PL-bilder av to moduler, der den ene modulen er uten kjente defekter, mens den andre modulen er påvirket av PID. Modulene tilhører et solcelleanlegg som driftes av det Danske Tekniske Universitet (DTU) i Danmark. Ansatte ved DTU har satt opp utstyret og samlet inn dataene, som behandles og analyseres videre i denne studien. I dette kapittelet vil informasjonen om oppsettet og bildeinnsamlingen gjengis etter beste evne, før det gis en gjennomgang av hvordan bildebehandlingen og analysen er utført.

3.1 Beskrivelse av oppsettet

Modulene som analyseres i denne studien er av typen *PERC bifacial* Risen 595 W-moduler og er tilkoblet en streng bestående av totalt 26 moduler. Inverteren, som er tilkoblet strengen, er av typen Huawei SUN2000-30KTL-M3. Til inverteren er det koblet totalt fem antall strenger. Figur 3.1.1 viser en illustrasjon av oppsettet brukt i forsøket.



Figur 3.1.1: Oppsettet for analysen. I forgrunnen: modulene som analyseres. Modulen til venstre er defekt med PID, mens modulen til høyre er uten kjente defekter. I bakgrunnen: moduler i en annen streng, som benyttes til korrigerende av varierende solinnstråling. Tilkoblet modulene ser man inverteren og et oscilloskop. Til høyre i figuren ser man kameraet brukt for å ta bilder av modulene, og datamaskinen som er trådløst tilkoblet inverteren.

I forgrunnen av figur 3.1.1 kan man se en illustrasjon av de to modulene som analyseres,

hvor den til venstre er defekt med PID, og den til høyre er uten kjente defekter. Tilkoblet strengen som modulene tilhører, kan man observere inverteren og et oscilloskop. Oscilloskopet benyttes for å observere strømmen gjennom modulene som undersøkes. I bakgrunnen av figur 3.1.1 ser man tre av modulene i én av de fire andre strengene, som også er tilkoblet inverteren. Disse brukes for å korrigere for varierende innstråling, som beskrevet senere i metoden. Til høyre i illustrasjonen kan man se kameraet brukt for å ta bilder av modulene, og datamaskinen, som er tilkoblet inverteren trådløst via internett. Figur A.1 i appendiks A viser et bilde av oppsettet, tatt ved solcelleanlegget i Danmark.

Et kamera av modellen C-RED 3 fra *First Light Imaging* ble benyttet for å ta bilder av modulene. Kameraet kan ta opp mot 600 bilder per sekund (fps) og ble stilt rett foran modulene når bildene ble tatt, som illustrert i figur 3.1.1. Bildene ble tatt under direkte sollys, mens innstrålingen varierte mellom 493-550 W/m². Eksponeringstiden til kameraet ble satt til 2 ms for å unngå metning fra det reflekterte sollyset. Det ble brukt et optisk filter med en båndbredde på 25 nm, sentrert på 1150 nm.

Inverteren ble beordret til å utføre en IV-kurveskanning av strengen tilhørende de to modulene via en Python-kode. Dette ble gjort på en datamaskin, som var trådløst tilkoblet inverteren. Da inverteren utførte IV-kurveskanningen, ble det samtidig tatt bilder av modulene. Det ble antatt at bakgrunnsmodulene var umodulerte områder, som kunne brukes til korrigerende for varierende innstråling. Det ble brukt et oscilloskop for å observere strømmen gjennom modulene, slik at man kunne verifisere når IV-kurveskanningen startet.

Fra databladet [25] kan man avlese forventet strøm-, spenning- og effektproduksjon fra modulene under "Standard Test Conditions" (STC). Da disse verdiene gjelder for en innstråling på 1000 W/m², må de skaleres med hensyn til innstrålingen da forsøket ble gjennomført, for å kunne sammenlikne målingene med forventede verdier fra forsøket. Det kan avleses at nominell effekt under STC er oppgitt å være $P_{max} = 595$ W, noe som tilsvarer V_{MPP} og I_{MPP} på henholdsvis 34,60 V og 17,20 A. Spenningen og strømmen i åpen krets og kortslutning er noe høyere, med henholdsvis $V_{OC} = 41,50$ V og $I_{SC} = 18,21$ A. Virkningsgraden til forsiden av modulen er oppgitt å være $\eta = 21,0$ %, mens "bifacial factor" er oppgitt å være 70 % \pm 5.

3.2 Datainnsamling

Bildene ble tatt mens inverteren utførte 15 ulike IV-kurveskanninger, som resulterte i totalt 15 bildesett. Bildesettene ble tatt med ulik bildefrekvens (bilder per sekund (fps)), som varierte mellom 120 fps og 480 fps. Tre og tre bildesett hadde samme bildefrekvens,

som vist i tabell 3.2.1. Det var ønskelig å observere om bildefrekvensen hadde noen innvirkning på bildekvaliteten og visualiseringen av PID. For å undersøke dette ble bildesettene med 120 fps og 480 fps brukt for videre analyse, da de representerte ytterpunktene for bildefrekvensene brukt. Det ble også fokusert på ett bildesett av hver bildefrekvens, herav kalt eksperiment 3 (480 fps) og eksperiment 14 (120 fps), markert i grått i tabell 3.2.1. For å forsikre om at bildesekvensene dekket IV-kurveskanningen, ble det tatt bilder i omtrent seks sekunder hver gang. Dermed ble det samlet inn 800 bilder per bildesett tatt med 120 fps, og 3000 bilder per bildesett tatt med 480 fps.

Tabell 3.2.1: Tabellen viser dataene innsamlet i forbindelse med studien. Det ble tatt 15 ulike sett med bilder, hvor tre og tre sett hadde lik bildefrekvens, og opptakstiden var omtrent seks sekunder hver gang. Dette resulterte i et totalt antall bilder som varierte mellom 800 og 3000 stk. per bildesett.

Eksperimentnr.	Bildefrekvens [fps]	Opptakstid [s]	Totalt antall bilder
1	480	6,25	3000
2	480	6,25	3000
3	480	6,25	3000
4	300	6,67	2000
5	300	6,67	2000
6	300	6,67	2000
7	250	6	1500
8	250	6	1500
9	250	6	1500
10	150	6,67	1000
11	150	6,67	1000
12	150	6,67	1000
13	120	6,67	800
14	120	6,67	800
15	120	6,67	800

3.3 Videre analyse

Etter at råbildene var samlet inn, ble de behandlet videre i Python. Her ble Δ PL-bilder produsert, og ulike faktorer som kunne påvirke bildekvaliteten og visualiseringen av PID, ble testet og justert. Δ PL-bildene av modulen som var påvirket av PID ble sammenliknet

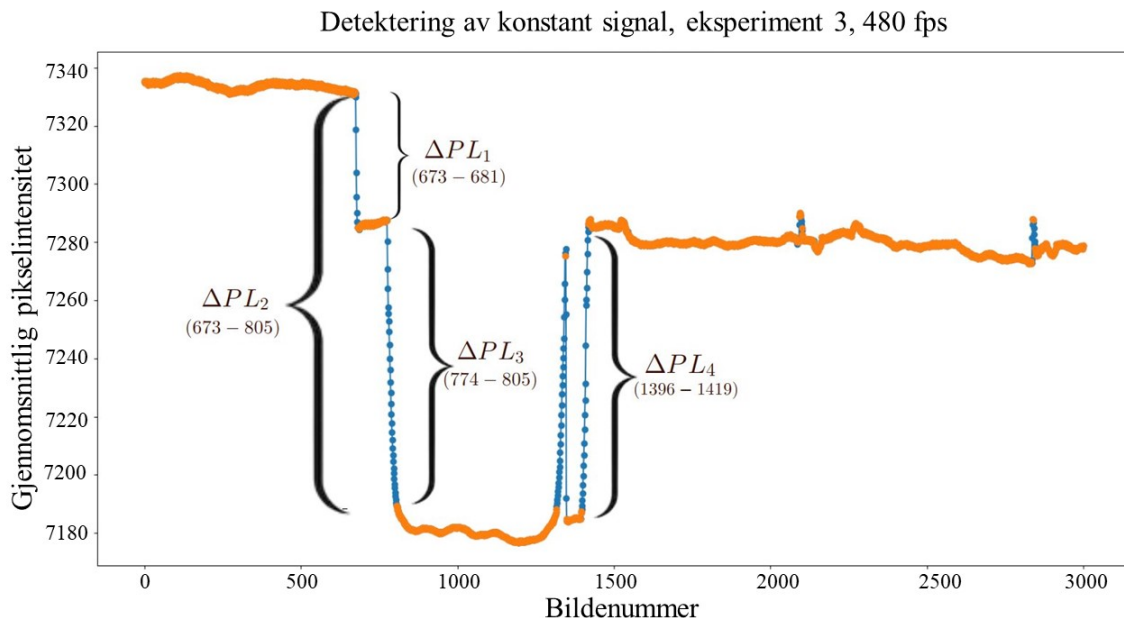
med et EL-bilde av samme modul, for å ha et ytterligere sammenlikningsgrunnlag. Etter at ΔPL -bildene var analysert visuelt, ble det undersøkt hvordan degraderingen i modulen påvirket av PID, kunne kvantifiseres. I appendiks B kan man se et utsnitt av Python-koden som ble brukt til å produsere ΔPL -bildene.

3.3.1 Visualisering av PID

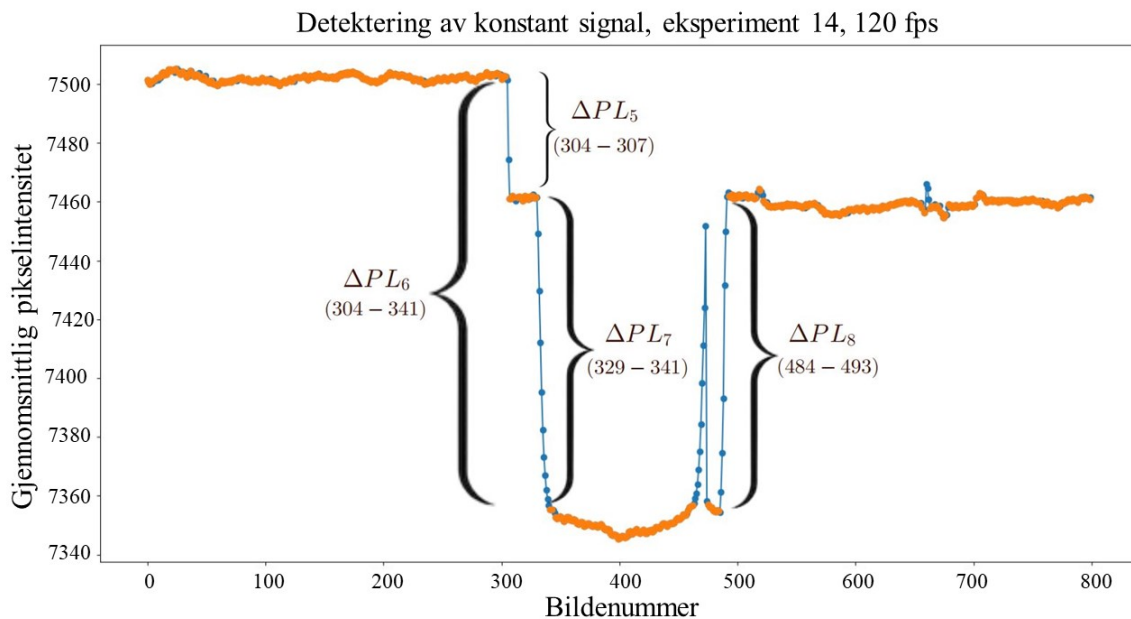
3.3.1.1 Strømdifferanser, PL-signal og ΔPL -bilder

Siden det ble tatt bilder i omtrent seks sekunder hver gang inverteren utførte en IV-kurveskanning, resulterte dette i et bredt spekter med bilder tatt før, underveis og etter at inverteren hadde utført skanningen. Det viste seg at modulene opererte med konstante strømnivåer over visse tidsperioder, noe som korresponderte med konstante PL-signaler emittert fra modulene. Det var mellom disse konstante signalene (heretter: nivåene) de ulike ΔPL -bildene ble produsert mellom. Selve IV-kurveskanningen resulterte ikke i konstante strømnivåer, og ble dermed ikke brukt videre i analysen.

Nivåene det ble tatt utgangspunkt i er representert i oransje i figurene 3.3.1 og 3.3.2. Her er gjennomsnittssignalet til modulene i hvert bilde representert av y-aksen, mens bildenumrene i de respektive bildesettene er representert av x-aksen. Toppene markert i blått før ΔPL_4 og ΔPL_8 er de utelatte IV-kurveskanningene.



Figur 3.3.1: Visualisering av PL-signalet fra modulene i bildene tatt med 480 fps, samt en illustrasjon av hvilke nivåer ΔPL -bildene ble produsert mellom. De oransje linjene illustrerer områdene der signalet fra modulene var konstant. For 480 fps ble det produsert fire bilder, kalt ΔPL_1 - ΔPL_4 . Tallene i parentes under bildenavnene viser mellom hvilke bildenummer bildene ble produsert.



Figur 3.3.2: Visualisering av PL-signalet fra modulene ved 120 fps, samt en illustrasjon av hvilke nivåer ΔPL -bildene ble produsert mellom. I likhet med bildene tatt med 480 fps, ble det produsert fire bilder tatt med 120 fps, kalt for ΔPL_5 - ΔPL_8 .

Fire av ΔPL -bildene ble produsert ved 480 fps og er kalt ΔPL_1 til ΔPL_4 i figur 3.3.1. De resterende fire ΔPL -bildene ble produsert ved 120 fps og er kalt ΔPL_5 til ΔPL_8 i figur 3.3.2. Det var ønskelig å undersøke hvilke nivåer og tilhørende strømdifferanse som ga høyest kvalitet på ΔPL -bildene, og dermed best visualisering av PID. Dette ble gjort ved å visuelt vurdere klarheten i ΔPL -bildene, mengden støy i dem og hvor tydelig det karakteristiske mønsteret grunnet PID opptrådte i bildene.

3.3.1.2 Korrigerende for varierende solinnstråling

Før ΔPL -bildene ble produsert, var det ønskelig å se om signalene i figurene 3.3.1 og 3.3.2 kunne bli mer utjevnet ved hjelp av solkorrigerende. I denne studien varierte solinnstrålingen mellom 493 W/m^2 til 550 W/m^2 . Sammenliknet med innstrålingen da Stoicescu og Reuter [10] utførte sin forskning, hvor innstrålingen varierte mellom 50 W/m^2 og 400 m^2 , vurderes ikke forskjellen i innstråling her å utgjøre en stor nok differanse til at man tydelig kan visualisere en forskjell i hvordan PID utvikler seg med ulike innstrålinger. Dermed ble variasjonen i innstråling istedenfor forsøkt korrigerende for, slik at bildene kunne få et bedre sammenlikningsgrunnlag. Likning 2.3 ble anvendt i et forsøk på å korrigerende for den varierende solinnstrålingen. Gjennomsnittet av arealet til to av bakgrunnsmodulene i figur 3.1.1 ble brukt som korrigeringsfaktor, da bildene ikke inneholdt et hvitt areal som kunne brukes som hvitreferanse. Det var antatt at modulene i bakgrunnen ikke skulle emittere luminescenssignal og dermed kunne anses som umodulerte områder, som beskrevet i delkapittel 2.7.

3.3.1.3 Antall bildepar og bildefrekvens (fps)

Etter at det var vurdert hvilken innvirkning de ulike nivåene med tilhørende strømdifferanse hadde på Δ PL-bildene, var det ønskelig å undersøke hvilken innvirkning det hadde å ta et gjennomsnitt av et ulikt antall bilder på hvert nivå, i produksjonen av et Δ PL-bilde. Det ble tatt et gjennomsnitt av henholdsvis ett, fire og ti bilder på hvert nivå, før de ulike Δ PL-bildene ble produsert.

For å eksempelvis produsere bildet Δ PL₁ av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå, ble det først tatt et gjennomsnitt av bildene med nummer 663-673, før de ble subtrahert med gjennomsnittet av bildene med nummer 681-691. På denne måten ble det dannet et Δ PL₁-bilde uten påvirkning av refleksjon. Samme prosedyre ble fulgt for å produsere de resterende Δ PL-bildene. Etter at alle bildene var produsert, ble de sammenliknet med hverandre, i tillegg til at Δ PL-bildene av den PID-påvirkede modulen ble sammenliknet med EL-bildet av samme modul.

Til slutt ble bildene tatt med 120 fps og 480 fps sammenliknet med hverandre. På denne måten kunne man undersøke hvilken innvirkning kameraets bildefrekvens hadde på bildekvaliteten og visualiseringen av PID.

3.3.1.4 Gjennomsnittlig signal til støy-forhold (SNR_{AVG})

Etter at det var vurdert hvilke Δ PL-bilder som hadde høyest kvalitet og hvilke faktorer som bidro til dette, ble SNR_{AVG} -verdier beregnet for hvert Δ PL-bilde, for å undersøke om SNR_{AVG} -verdiene samsvarte med resultatene. Det ble undersøkt om Δ PL-bildene med høyest kvalitet også hadde de høyeste SNR_{AVG} -verdiene, og om Δ PL-bildene med lavest kvalitet hadde de laveste SNR_{AVG} -verdiene. For å beregne SNR_{AVG} ble likning 2.5 anvendt. Bildene på nivået med sterkest signal utgjorde $EL_{i,j}$ og bildene på nivået med svakest signal utgjorde BG_i . På hvert nivå ble det tatt utgangspunkt i ti bilder, slik at $N = 10$, $N_1 = 5$ og $N_2 = 5$ i likning 2.5.

3.3.2 Kvantifisering av PID

Etter at bildene var visuelt vurdert, var neste mål å undersøke hvordan degraderingen kunne kvantifiseres. For å utføre denne delen av analysen ble det kun tatt utgangspunkt i bildene fra eksperiment 3 (480 fps).

3.3.2.1 Analyse av de cellene som emitterte svakest og sterkest Δ PL-signal i hver modul

Den første delen av den kvantitative analysen gikk ut på å undersøke forskjellen i gjennomsnittlig signalstyrke mellom de solcellene som emitterte henholdsvis svakest og sterkest Δ PL-signal, i hver modul. Solcellene som emitterte de svakeste og sterkeste Δ PL-signalene ble visuelt plukket ut på bildene som henholdsvis de mørkeste og lyseste cellene. Dette ble gjort for alle Δ PL-bildene i eksperiment 3 (480 fps).

For å beregne gjennomsnittlig signalstyrke ble det først tatt et gjennomsnitt av pikselintensiteten i radene til de respektive solcellene. Deretter ble det tatt et gjennomsnitt av pikselintensiteten i kolonnene, slik at man endte opp med et gjennomsnittlig punktsignal fra hver solcelle. Etter dette ble punktsignalet til den svakeste cellen i én modul dividert med punktsignalet til den sterkeste cellen i den samme modulen. På denne måten kunne man undersøke hvor sterkt gjennomsnittlig signal, kalt Δ PL-signal, den svakeste cellen emitterte i forhold til den sterkeste cellen. Dette ble gjort for begge modulene i forsøket.

Ved å gjøre dette, kunne man undersøke om det var en karakteristisk forskjell mellom Δ PL-signalene emittert fra de svakeste og sterkeste solcellene i de ulike modulene. På denne måten kunne man observere hvor stor innvirkning PID hadde på prestasjonen til solcellene i den defekte modulen, sammenliknet med hva solcellene ideelt burde prestert. Her vurderes den ideelle prestasjonen som det Δ PL-signalet som de friske solcellene emitterte. Ved å undersøke signalforholdet i alle Δ PL-bildene kunne man samtidig observere om PID påvirket forholdet når bildene ble produsert mellom nivåer med ulike strømdifferanser.

3.3.2.2 Histogram av gjennomsnittlige pikselintensiteter

Den andre delen av den kvantitative analysen gikk ut på å undersøke den gjennomsnittlige pikselintensiteten til *alle* pikselene i begge modulene, i bildet Δ PL₂ fra eksperiment 3 (480 fps). Ved å lage et histogram av den gjennomsnittlige pikselintensiteten til alle pikslene i hver modul, kunne man undersøke hvordan intensitetsfordelingen så ut for en frisk modul, kontra en modul påvirket av PID. Det ble tatt utgangspunkt i bildet Δ PL₂ produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå. Histogrammet viser gjennomsnittlig pikselintensitet på x-aksen og antall piksler på y-aksen. Det ble deretter evaluert om dette kunne være en effektiv metode som kunne brukes for å skille mellom modulen påvirket av PID og den friske modulen, samt om karakteristikkene og metoden kunne videreføres til å gjelde for flere moduler.

3.3.2.3 Kumulativt histogram av relative pikselintensiteter

Avslutningsvis ble det produsert et kumulativt histogram av alle pikslene i modulene fra bildet ΔPL_2 . Her var igjen bildet ΔPL_2 produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå. I det kumulative histogrammet var det ønskelig å undersøke hvor stor andel av alle pikslene som hadde en ΔPL -verdi lavere enn den maksimale mulige ΔPL -verdien til modulen i bildet.

For å lage det kumulative histogrammet ble alle de gjennomsnittlige pikselintensitetene tilhørende hver av modulene i bildet ΔPL_2 , dividert med maksimalverdien til hver av modulene i bildet. På denne måten fikk man en skala mellom 0 og 1 på x-aksen, som viste relativ ΔPL -verdi i forhold til maksimalverdien til modulen i det bildet. Y-aksen viste hvilken andel piksler, relativt til maksimalt antall piksler til modulen i bildet, som hadde verdier tilsvarende ΔPL -verdien på x-aksen.

Ved å lage det kumulative histogrammet kunne man undersøke om det var en karakteristisk forskjell mellom ΔPL -verdiene i modulen påvirket av PID, kontra den friske modulen. Det ble også her vurdert om dette kunne være en effektiv metode for å skille mellom modulene på, og om karakteristikkene og metoden kunne videreføres til å gjelde for flere moduler.

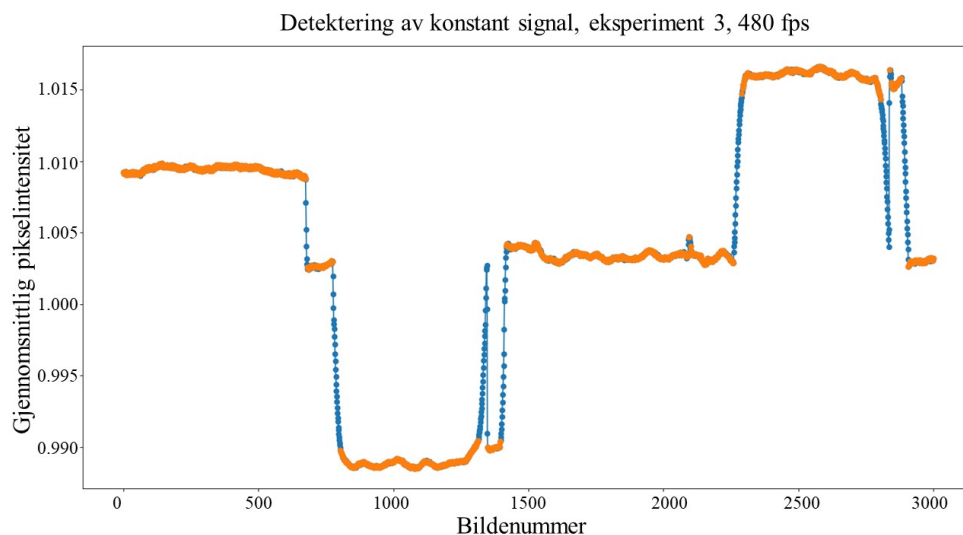
Kapittel 4

Resultat og diskusjon

I dette kapitlet vil det først presenteres hvordan signalet fra modulene så ut etter korrigering for varierende solinnstråling, og om dette hadde ønsket innvirkning på signalet. Etter dette vil strømnivåene, som signalene i figur 3.3.1 og figur 3.3.2 har tatt utgangspunkt i, presenteres. Her vil kvaliteten på bildene og visualiseringen av PID evalueres i samsvar med de ulike nivåene og strømdifferansen mellom dem. Deretter vil det presenteres hvordan bildekvaliteten og visualiseringen av PID varierer med antall bildepar og bildefrekvens, før resultatene fra SNR_{AVG} -beregningene og den kvantitative analysen presenteres.

4.1 Korrigering for varierende solinnstråling

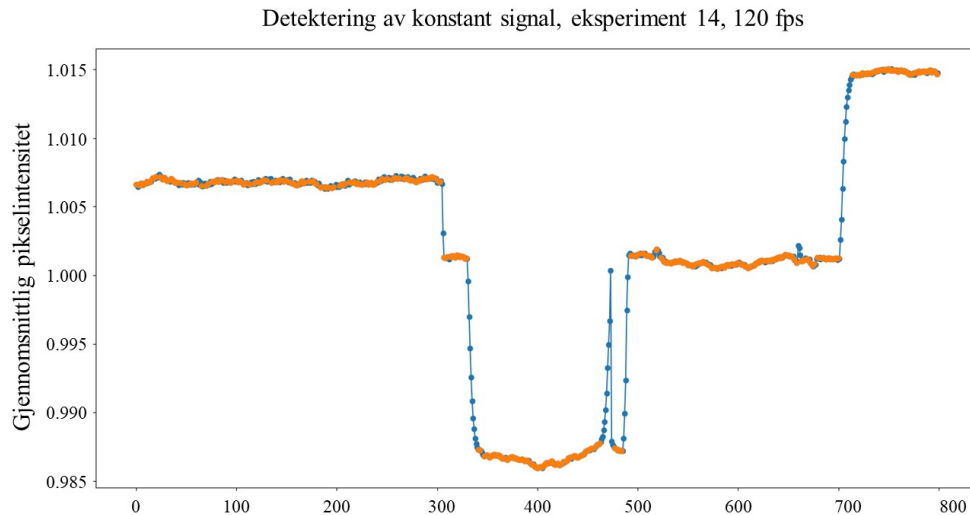
For å minke usikkerheter i analysen var det ønskelig å korrigere for varierende solinnstråling. Figur 4.1.1 viser hvordan signalet fra modulene så ut i eksperiment 3 (480 fps) etter korrigeringen.



Figur 4.1.1: Signalet fra modulene etter at det var forsøkt å korrigere for varierende innstråling. I figuren kan man se at den gjennomsnittlige pikselintensiteten øker i verdi mot slutten av signalet, før det synker igjen, noe som ikke skjedde i det opprinnelige signalet. Dette tyder på at korrigeringen ikke fullstendig oppfylte sin hensikt.

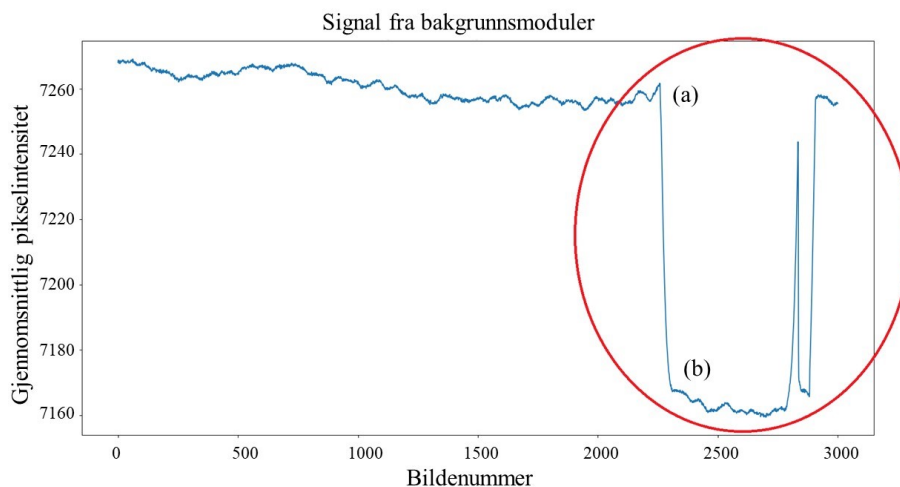
I figur 4.1.1 kan det observeres at det korrigerede signalet øker i gjennomsnittlig pikselintensitet mot slutten av signalet, noe som ikke opprinnelig skjedde i det originale signalet.

Dette skjer omtrent etter bilde 2200 for bildesekvensen tatt med 480 fps. Samme tendens kan observeres i figur 4.1.2, som viser det korrigerte signalet for bildesekvensen tatt med 120 fps, hvor det korrigerte signalet øker i gjennomsnittlig pikselintensitet etter omtrent bilde nummer 700.

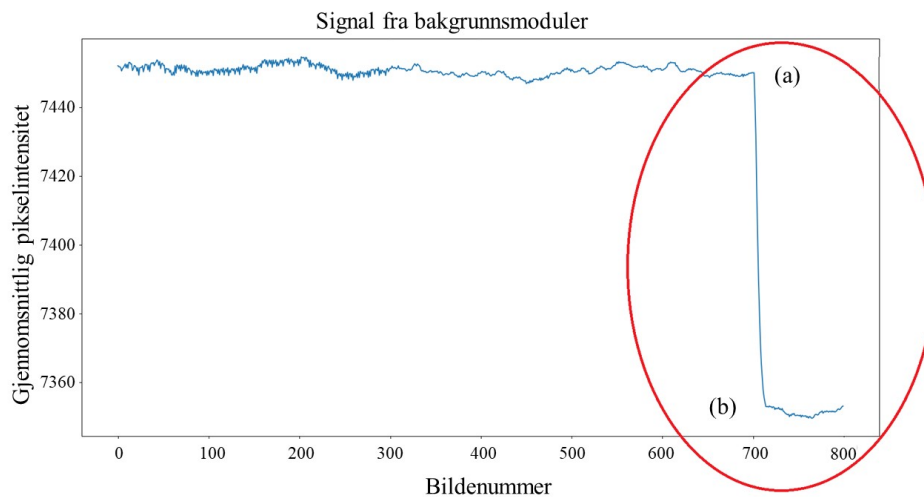


Figur 4.1.2: Signalet fra modulene etter at det var forsøkt å korrigere for varierende innstråling. I likhet med signalet fra eksperiment 3 (480 fps) kan man observere at den gjennomsnittlige pikselintensiteten øker mot slutten av signalet, før den synker igjen, noe som tyder på at korrigeringen ikke fullstendig oppfylte sin hensikt.

Siden de korrigerte signalene var produsert ved å bruke arealet til to bakgrunnsmoduler som korrigeringsfaktorer, ble det undersøkt om modulene muligens kunne emittere et forstyrrende PL-signal som resulterte i økningen i gjennomsnittlig pikselintensitet mot slutten av de korrigerte signalene. Ved nærmere inspeksjon kunne man observere at bakgrunnsmodulene så ut til å gjennomgå en egen IV-kurveskanning under bildetakingen, som er markert i rødt i figurene 4.1.3 og 4.1.4.



Figur 4.1.3: PL-signal fra bakgrunnsmodulene, som ble brukt til korrigering av varierende innstråling. Modulene ser ut til å gjennomgå en IV-kurveskanning, som er markert i rødt.



Figur 4.1.4: PL-signal fra bakgrunnsmodulene, som ble brukt til korrigering av varierende innstråling. Modulene ser ut til å gjennomgå en IV-kurveskanning, som er markert i rødt.

Dette skjedde til tross for at inverteren ikke ble beordret til å gjennomgå en IV-kurveskanning av strengen tilhørende bakgrunnsmodulene, og modulene var antatt å representere et umodulert område. Siden bakgrunnsmodulene gjennomgikk en egen IV-kurveskanning, emitterte de et varierende PL-signal som så ut til å forstyrre PL-signalet oppfattet av kameraet. Det var dermed tenkelig at PL-signalet emittert fra bakgrunnsmodulene kunne påvirke pikselintensiteten i bildene som skulle analyseres, og dermed vurderingen av PID, da PID skulle kvantifiseres med en undersøkelse av pikselintensitet.

I tillegg til å emittere PL-signal under IV-kurveskanningen, kan det også tolkes som at bakgrunnsmodulene emitterte luminescenssignal *før* de gjennomgikk IV-kurveskanningen. Dette er på grunn av forskjellen i pikselintensitet mellom nivåene (a) og (b) i figurene 4.1.3 og 4.1.4. Mellom disse nivåene i figur 4.1.3 er forskjellen omtrent 110 i gjennomsnittlig pikselintensitet, mens forskjellen mellom disse nivåene i figur 4.1.4 er omtrent 100 i gjennomsnittlig pikselintensitet. Hvis man sammenlikner dette med de opprinnelige signalene fra modulene i forgrunnen (se figur 3.3.1 og 3.3.2), ser man at forskjellen er omtrent lik den forskjellen som er mellom det midterste- og nederste nivået i disse signalene. I figurene 3.3.1 og 3.3.2 er forskjellene omtrent 100 i gjennomsnittlig pikselintensitet. Da modulene i forgrunnen opererte med disse nivåene, emitterte de luminescenssignal. Det er dermed nærliggende å tro at bakgrunnsmodulene gjorde det samme, også før de gjennomgikk en egen IV-kurveskanning.

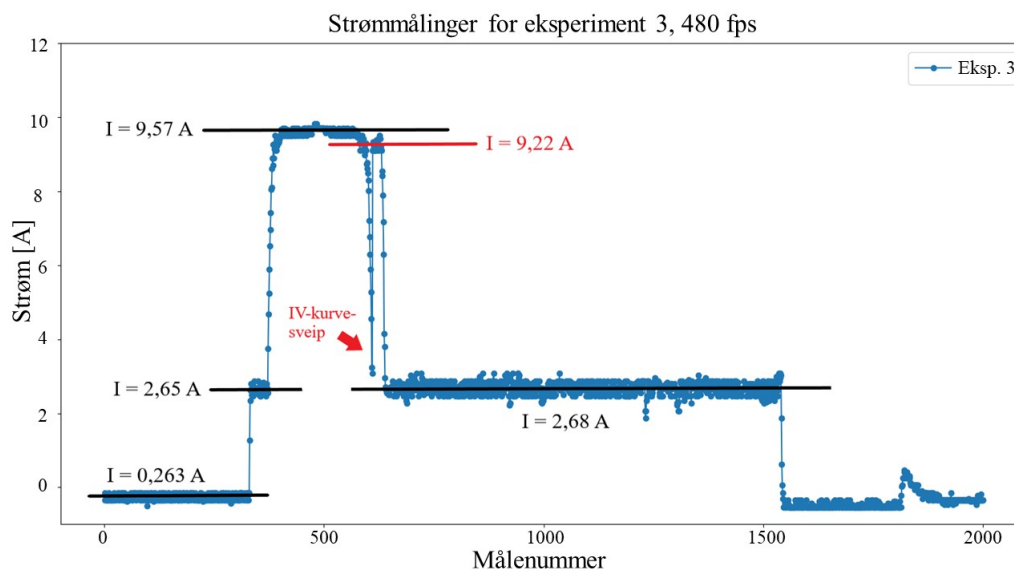
Ifølge Bhoopathy [21] skal korrigeringen for varierende solinnstråling basere seg på umodulerte områder, hvis man ikke bruker hvitreferanser i form av et hvitt areal. Selv om signalet kan antydes å være *noe* utjevnet etter korrigering sammenliknet til det opprinnelige signalet, vurderes det ikke som at arealet i bakgrunnsmodulene kan være en troverdig

korrigeringsfaktor, da området ikke kan tolkes som et umodulert område. PL-signalet emittert fra bakgrunnsmodulene kan tolkes å ha forstyrret PL-signalet oppfattet av kameraet og dermed pikselintensitetene i bildene. Signalet ble også forsøkt korrigert med andre faktorer i bildet som kunne tolkes som umodulerte områder, uten en forbedring i signalet. Grunnet dette ble bildebehandlingen utført med signalene uten korrigering for varierende innstråling.

4.2 Strømnivåer

I dette delkapittelet presenteres figurene (heretter: strømfigurene) som viser hvilken strøm som gikk gjennom modulene da de emitterte PL-signalene presentert i figurene 3.3.1 og 3.3.2. Nivåene i strømfigurene følger likt mønster som nivåene for signalet, bare at de er rotert 180 grader. Fra disse figurene kan man dermed observere strømdifferansen mellom nivåene som ΔPL -bildene ble dannet mellom.

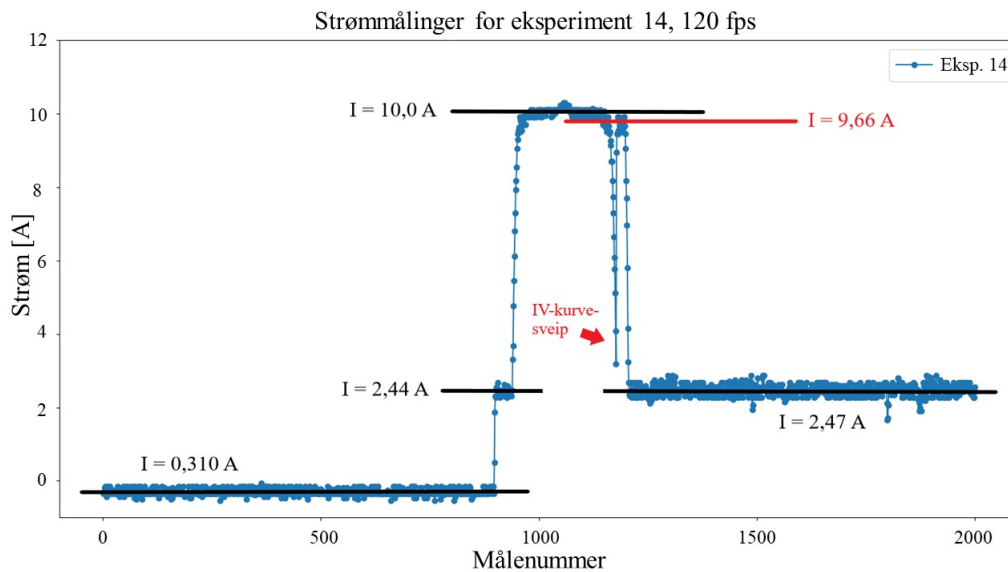
Strømmen gjennom modulene da bildene med 480 fps ble tatt, kan observeres i figur 4.2.1. Her er $I_{SC} = 9,57 \text{ A}$ og $I_{OC} = 0,263 \text{ A}$, og det er mellom disse nivåene at ΔPL_2 ble produsert. Ved å sammenlikne strømfigur 4.2.1 med signalet fra modulene i figur 3.3.1, kan man også observere at ΔPL_1 ble produsert mellom I_{OC} og $I = 2,65 \text{ A}$. På samme måte kan man se at ΔPL_3 ble produsert mellom $I = 2,65 \text{ A}$ og I_{SC} , mens ΔPL_4 ble produsert mellom I_{SC} og $I = 2,68 \text{ A}$.



Figur 4.2.1: Visualisering av strømmen gjennom modulene når bildene med 480 fps ble tatt.

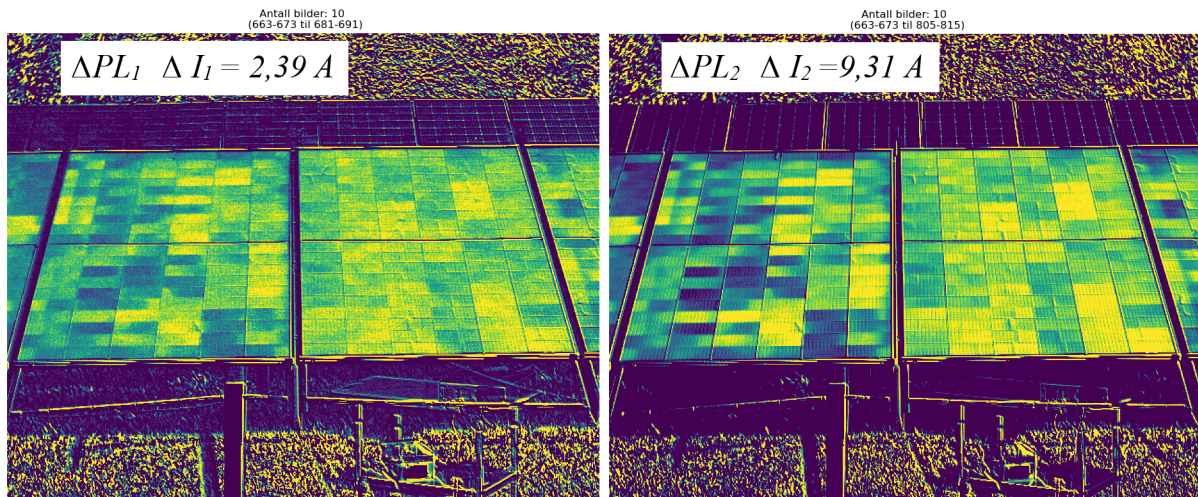
Strømmen gjennom modulene da bildene med 120 fps ble tatt, kan observeres i strømfigur 4.2.2. Her er $I_{SC} = 10,0 \text{ A}$, og $I_{OC} = 0,310 \text{ A}$, og det er mellom disse nivåene at ΔPL_6 ble produsert. Ved å sammenlikne figur 4.2.2 og 3.3.2 kan man også observere at ΔPL_5

ble produsert mellom I_{OC} og $I = 2,44$ A, mens ΔPL_7 ble produsert mellom $I = 2,44$ A og I_{SC} . Til slutt ble ΔPL_8 produsert mellom I_{SC} og $I = 2,47$ A.

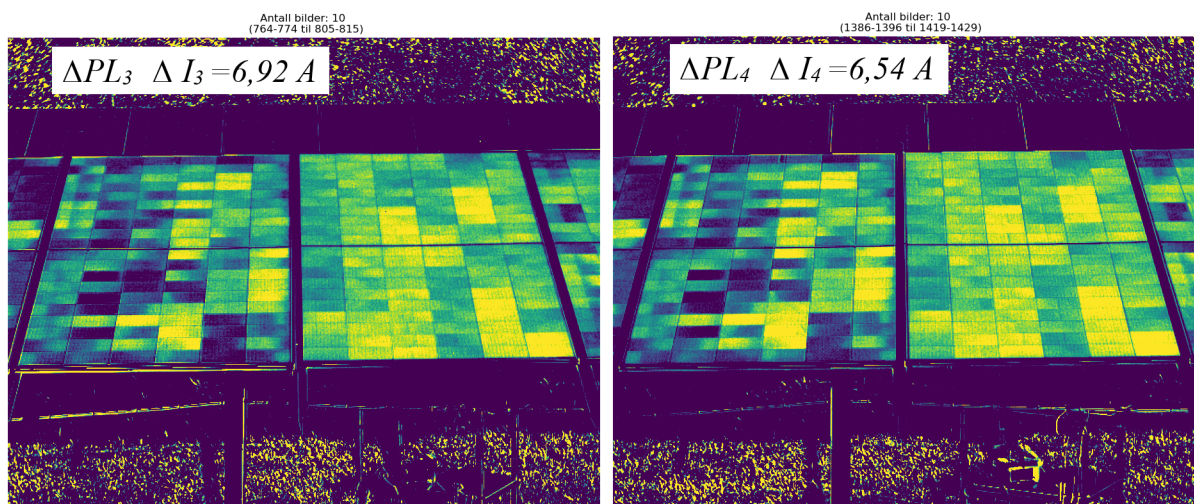


Figur 4.2.2: Visualisering av strømmen gjennom modulene når bildene med 120 fps ble tatt.

Det var ønskelig å undersøke hvordan bildekvaliteten og visualiseringen av PID varierte med strømdifferansen mellom nivåene. For å undersøke dette ble bildene i figurene 4.2.3 - 4.2.6 analysert. De to første figurene viser ΔPL -bildene tatt med 480 fps, samt strømdifferansene mellom nivåene som bildene ble produsert mellom.

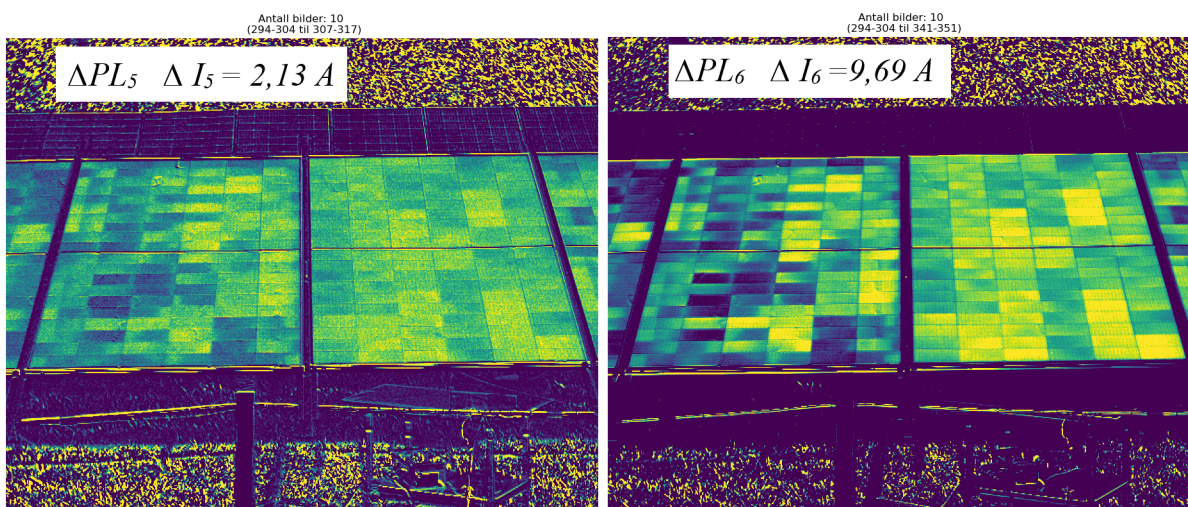


Figur 4.2.3: Bildene ΔPL_1 og ΔPL_2 , produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå. Fargeskalaen er optimalisert i hvert bilde for å få klareste mulige bilder, og vil derfor variere. Lys gul farge illustrerer solcellene med sterkest ΔPL -signal, og mørk grønn illustrerer solcellene med svakest ΔPL -signal.

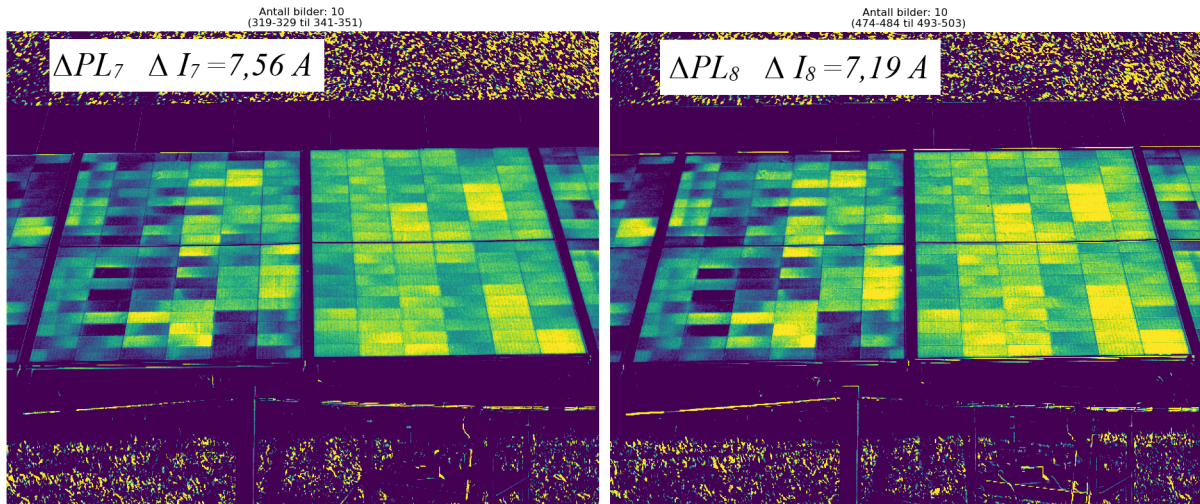


Figur 4.2.4: Bildene ΔPL_3 og ΔPL_4 , produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå. I likhet med figur 4.2.3, er fargeskalaen optimalisert i hvert bilde for å få klareste mulige bilder, og vil derfor variere.

De neste to figurene (4.2.5 og 4.2.6) viser bildene tatt med 120 fps, hvor man kan observere strømddifferansen mellom nivåene som disse bildene ble produsert mellom.



Figur 4.2.5: Bildene ΔPL_5 og ΔPL_6 tatt med 120 fps, hvor det er tatt et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå. I likhet med figurene 4.2.3 og 4.2.4 er fargeskalaen optimalisert for hvert bilde og vil derfor variere.



Figur 4.2.6: Bildene ΔPL_7 og ΔPL_8 tatt med 120 fps, hvor det er tatt et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå. I likhet med figurene 4.2.3, 4.2.4 og 4.2.5 er fargeskalaen optimalisert for hvert bilde og vil derfor variere.

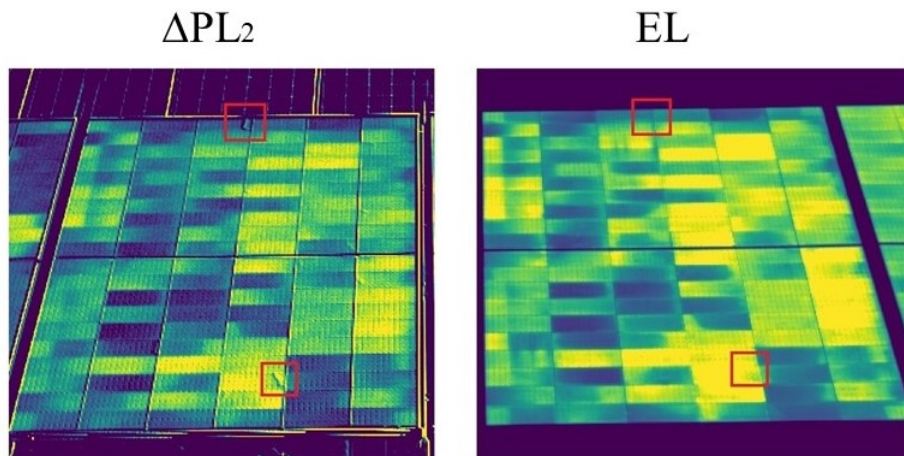
Fra figurene 4.2.3 til 4.2.6 kan man observere at bildene som ble produsert mellom de nivåene som tilsvarte en strømdifferanse $\geq 6-7$ A, har høyere kvalitet enn de resterende bildene. Bildene ΔPL_2 og ΔPL_6 ser ut til å ha de aller høyeste bildekvalitetene, og det er også disse bildene som er produsert mellom nivåer med størst strømdifferanse, på henholdsvis $\Delta I = 9,31$ A og $\Delta I = 9,69$ A.

Siden ΔPL_2 og ΔPL_6 er produsert mellom nivåer med størst strømdifferanse, er de også produsert mellom nivåer med størst forskjell i spenning. Som nevnt i delkapittel 2.6.1 får man det sterkeste luminescenssignalet når forskjellen i spenningen er størst [19], noe som gjenspeiler seg i resultatene fra denne analysen. PID ser også ut til å være tydeligere i bildene som ble produsert mellom nivåene med en strømdifferanse på større enn 9 A, ved at rutenettet og fargene kommer tydelig frem. De loddrette strekene i den friske modulen tolkes som støy, da de ikke er tilstede på alle bildene, og denne modulen ikke skal ha noen kjente sprekker eller defekter. Det kan være tenkelig at disse har oppstått grunnet en pikselforskyvning i bildene.

Det karakteristiske mønsteret som PID medfører kan tydelig observeres i disse ΔPL -bildene. Innledningsvis ble det nevnt at antall mørke celler påvirket av PID øker med minkende solinnstråling [9] [10]. Stoicescu og Reuter [10] observerte flere mørke celler i PL-biler tatt ved en innstråling på 50 W/m^2 , enn det som ble observert i bildene tatt ved en innstråling på 400 W/m^2 . I denne studien ble bildene tatt mens innstrålingen varierte mellom 493 og 550 W/m^2 . Likevel kan det karakteristiske mønsteret som følge av PID tydes klart i disse bildene. En forklaring på dette kan være at degraderingen i studiens moduler har kommet lengre enn det den hadde kommet i modulene studert av

Stoicescu og Reuter [10], og at degraderingen dermed også er fremtredende ved en høyere innstråling. Uavhengig av dette, viser resultatene at det er mulig å få ΔPL -bilder av høy kvalitet der PID synlig visualiseres, med en direkte innstråling på 493-550 W/m².

Selv om ΔPL_2 er tolket som ett av bildene med høyest kvalitet, finnes det også noen uregelmessigheter i dette bildet, som ikke er synlig på alle de andre ΔPL -bildene. For å vurdere om dette er defekter i modulen eller grunnet støy, kan man sammenlikne bildene med EL-bildet av modulen, som er vist i figur 4.2.7.



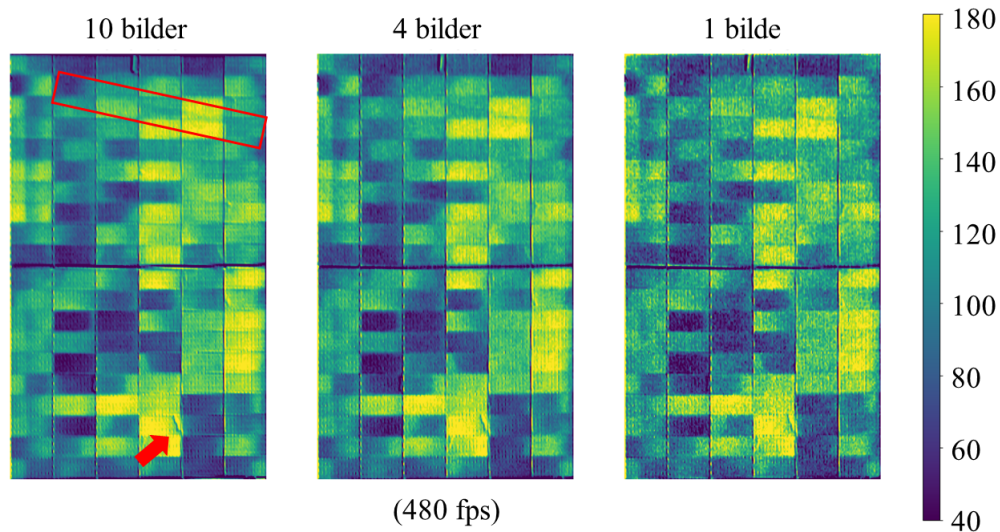
Figur 4.2.7: Sammenlikning av ΔPL_2 og EL-bildet av samme modul. Fra bildet kan man se uregelmessigheter i ΔPL_2 -bildet, markert i rødt, som ikke synes de samme stedene i EL-bildet.

Fra EL-bildet i figur 4.2.7 kan det se ut som at modulen ikke inneholder de samme uregelmessighetene som kan observeres i bildet ΔPL_2 . Det er dermed nærliggende å tro at de fleste uregelmessighetene eksempelvis har oppstått som følge av kameravibrasjoner eller andre forstyrrelser, og kan karakteriseres som støy.

Det er likevel observerbart at noen av uregelmessighetene har oppstått der det er forskjeller i fargen *innad* noen av cellene. Disse fargeforskjellene kan tolkes å eksempelvis ha oppstått som følge av ujevnheter i passiveringslaget, hvor elektronene har rekombinert på deler av overflaten grunnet SRH-feller, og dermed ført til et svakere PL-signal. Det kan også være at PID ikke enda hadde påvirket hele cellen da bildene ble tatt. Selv om noen av uregelmessighetene oppstår der det er slike fargeforskjeller, tolkes de fortsatt som støy, siden de ikke opptrer i alle bildene som har fargeforskjeller innad i cellene. Til tross for dette, tolkes ΔPL_2 fortsatt å være ett av bildene med høyest bildekvalitet.

4.3 Antall bildepar

Det var også ønskelig å observere hvilket gjennomsnittlig antall bilder på hvert nivå som bidro til å produsere ΔPL -bilder med høyest kvalitet, og som dermed førte til klartest mulig visualisering av PID. I figur 4.3.1 kan man observere transformerte ΔPL_2 -bilder av modulen påvirket av PID, der det ble tatt et gjennomsnitt av henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå, for å produsere varianter av bildet.

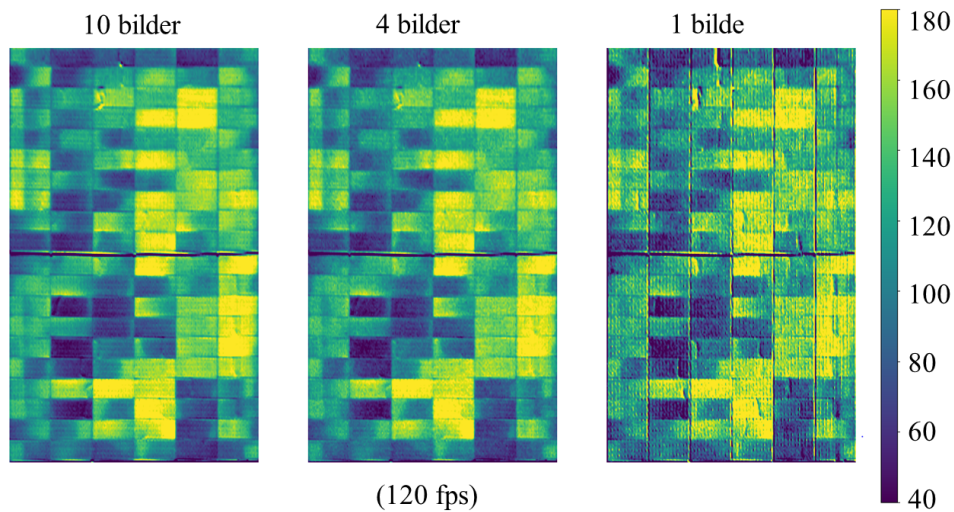


Figur 4.3.1: ΔPL_2 -bilder tatt med 480 fps, hvor bildene er produsert ved å ta et gjennomsnitt av henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå.

Fra figur 4.3.1 kan det observeres at bildene ser ut til å få høyere kvalitet jo flere bilder det er tatt gjennomsnitt av på hvert nivå. I bildet til venstre (produsert av gjennomsnittlig ti bilder) kan man blant annet observere en svak, diagonal strek i øverste delen av modulen, som ikke er like synlig på de andre bildene. Dette kan eksempelvis være en sprekke, som kommer tydeligere frem grunnet den høyere bildekvaliteten. I nedre delen av modulen kan man fortsatt observere en uregelmessighet, som også var synlig i ΔPL_2 -bildet i figur 4.2.7. Denne uregelmessigheten tolkes fortsatt som støy.

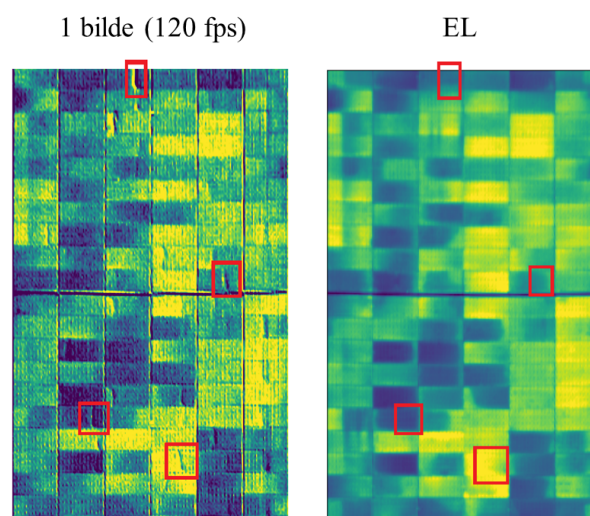
Totalt sett betraktes bildekvaliteten å være høyere når det tas et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå, sammenliknet med når det tas et gjennomsnitt av fire bilder og ett bilde på hvert nivå. Dette var det forventede resultatet, etter beskrivelsen gitt av Mantel et al. [24] angående bilder tatt utendørs: et sett med tre bilder blir for støyete. Når det tas et gjennomsnitt av flere bilder, er det dermed nærliggende å tro at bildekvaliteten blir bedre.

I bildene tatt med 120 fps var ikke resultatet like tydelig som for bildene tatt med 480 fps, som vist i figur 4.3.2.



Figur 4.3.2: ΔPL_6 -bilder tatt med 120 fps, hvor bildene er produsert ved å bruke henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå.

I figur 4.3.2 kan man observere varianter av bildet ΔPL_6 , der det er tatt et gjennomsnitt av henholdsvis ti bilder, fire bilder og ett bilde på hvert nivå. Fra figuren kan det se ut som at bildene får høyest kontrast når det kun er brukt ett bilde på hvert nivå til å produsere bildet, og at kontrasten blir dårligere jo flere bilder det tas gjennomsnitt av. Dette er på grunn av at uregelmessighetene, og skillene mellom cellene, kommer tydeligere frem i bildet produsert av kun ett bilde på hvert nivå. Disse blir mer utvisket når det tas et gjennomsnitt av flere bilder. Det tolkes likevel ikke som at bildet produsert av ett bilde på hvert nivå har bedre kvalitet av den grunn, da de fleste uregelmessighetene kan antas å være støy, og noe som ikke gir et reellt bilde av modulen. Dette er fordi de fleste uregelmessighetene ikke oppstår i alle ΔPL -bildene, og heller ikke i EL-bildet, som vist i figur 4.3.3.



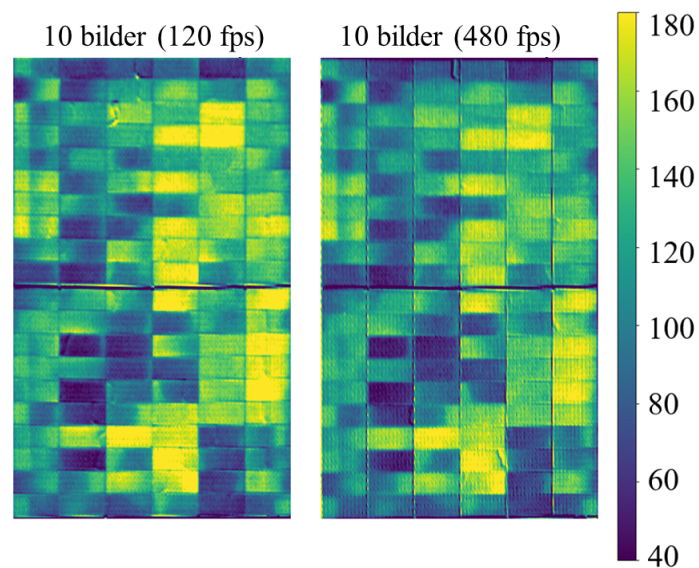
Figur 4.3.3: Sammenlikning av bildet ΔPL_6 , produsert av ett bilde på hvert nivå, og EL-bildet av den samme modulen. Uregelmessighetene i bildet er markert med rødt.

Det er nærliggende å tro at uregelmessighetene i bildet til venstre i figur 4.3.3 har oppstått på samme måte som det er foreslått at de fleste uregelmessighetene i ΔPL_2 -bildet fra figur 4.2.7 har gjort, eksempelvis på grunn av kameravibrasjoner. Disse uregelmessighetene har i større grad blitt filtrert bort når det er tatt et gjennomsnitt av flere bilder på hvert nivå, selv om dette kan ha gått på bekostning av at skillene mellom cellene ikke lengre er like tydelige.

Til tross for noen uregelmessigheter i bildene, tolkes det som at ΔPL -bilder produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå, gir bedre kvalitet og derav klarest visualisering av PID, enn bilder produsert av gjennomsnittlig fire bilder eller ett bilde på hvert nivå.

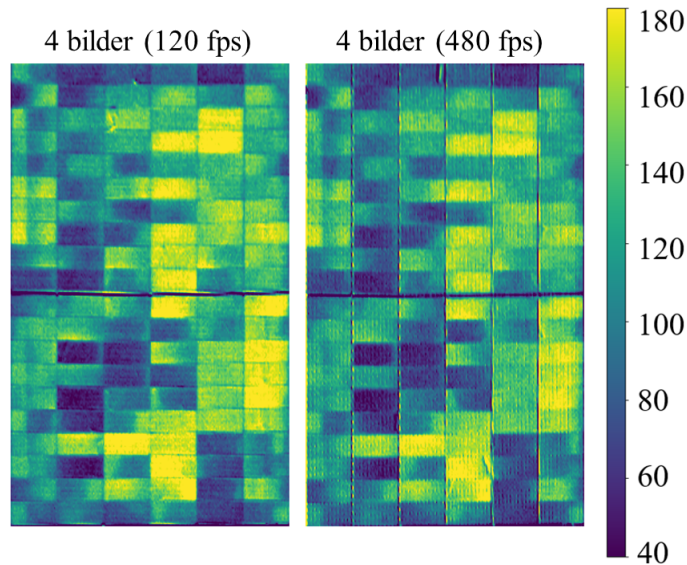
4.4 Bildefrekvens (fps)

Resultatene hittil kan ha gitt et inntrykk av om bildefrekvensen har hatt noe å si for bildekvaliteten og visualiseringen av PID. For å undersøke dette nærmere, kan man observere bildene i figur 4.4.1, hvor bildene ΔPL_6 og ΔPL_2 sammenliknes. Her er bildene produsert ved å ta et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå.



Figur 4.4.1: Til venstre: ΔPL_6 -bilde tatt med 120 fps og ti bilder i gjennomsnitt. Til høyre: ΔPL_2 -bilde tatt med 480 fps og ti bilder i gjennomsnitt.

I figur 4.4.2 kan man observere forskjellen mellom bildene tatt med 120 fps og 480 fps, der det er tatt et gjennomsnitt av fire bilder ved hvert nivå.



Figur 4.4.2: Til venstre: ΔPL_6 -bilde tatt med 120 fps og fire bilder i gjennomsnitt. Til høyre: ΔPL_2 -bilde tatt med 480 fps og fire bilder i gjennomsnitt.

Fra figurene 4.4.1 og 4.4.2 kan man observere at det er noe høyere kvalitet på bildene tatt med 480 fps, enn på bildene tatt med 120 fps. Dette gjelder uansett hvor mange bilder det tas gjennomsnitt av, hvis man tolker de tidligere omtalte uregelmessighetene som støy. Årsaken til dette kan være at bildene tatt med 480 fps representerer et mer nøyaktig øyeblikksbilde av modulen, da bildene er tatt tettere enn de er tatt ved en bildefrekvens på 120 fps. For å forsikre seg om at man produserer bilder av høyest mulig kvalitet, kan man dermed benytte seg av en bildefrekvens på 480 fps istedenfor 120 fps. Til tross for dette, tolkes begge bildefrekvenser å gi bilder av høy kvalitet, der PID kan observeres tydelig i de ulike cellene.

4.5 Gjennomsnittlig signal til støy-forhold (SNR_{AVG})

For å undersøke om tolkningene av resultatene hittil kan antas å være korrekte, ble SNR_{AVG} beregnet for hvert bilde. Tabell 4.5.1 viser resultatene av beregningene. I tabellen kan man observere sammenhengen mellom strømdifferansene (ΔI) til de ulike ΔPL -bildene, og de beregnede SNR_{AVG} -verdiene. For å beregne SNR_{AVG} ble det tatt utgangspunkt i ΔPL -bildene der det var tatt et gjennomsnitt av ti bilder på hvert nivå. Dette er fordi det var de bildene som ble tolket å ha høyest kvalitet.

Tabell 4.5.1: Tabellen viser sammenhengene mellom de ulike ΔPL -bildene, strømforskjellene mellom nivåene brukt for å produsere bildene (ΔI), og de beregnede SNR_{AVG} -verdiene.

fps	ΔPL -bilde	ΔI [A]	SNR_{AVG}
480	ΔPL_1	2,39	5,38
	ΔPL_2	9,31	16,47
	ΔPL_3	6,92	13,47
	ΔPL_4	6,54	15,61
120	ΔPL_5	2,13	4,72
	ΔPL_6	9,69	16,64
	ΔPL_7	7,56	11,82
	ΔPL_8	7,19	12,07

De beregnede SNR_{AVG} -verdiene fulgte for det meste forventet resultat. ΔPL_2 og ΔPL_6 ble produsert mellom nivåer med høyest strømdifferanse og ble tolket som de bildene som hadde høyest kvalitet. Fra tabell 4.5.1 kan man se at disse bildene også hadde de høyeste verdiene av SNR_{AVG} . Bildene som ble produsert mellom nivåer med lavere strømdifferanse, hadde igjen lavere SNR_{AVG} -verdier. Dette kan man også se gjenspeilet seg i bildekvaliteten i figurene 4.2.3 til 4.2.6.

De ΔPL -bildene som hadde de laveste beregnede SNR_{AVG} -verdiene var ΔPL_1 og ΔPL_5 . Fra tabell 4.5.1 kan man observere at disse bildene hadde SNR_{AVG} -verdier på henholdsvis 5,38 og 4,72. Førstnevnte er 0,38 høyere enn den minimale akseptable grensen for bilder tatt utendørs, bestemt av EL-standarden [23]. Sistnevnte er 0,28 *under* grensen. Det er også disse bildene som er mest kornete og har dårligst kvalitet, som vist av tidligere resultater. De resterende ΔPL -bildene har SNR_{AVG} -verdier som er dobbelt så høye som grensen gitt av EL-standarden, og er med på å illustrere hvorfor det er ønskelig med en større strømdifferanse for å oppnå høyere bildekvalitet og høyere verdier av SNR_{AVG} .

En kommentar til tabell 4.5.1 må gjøres angående SNR_{AVG} -verdiene beregnet for bildene ΔPL_3 , $_{-4}$, $_{-7}$ og ΔPL_8 . Av disse fire bildene, ser det ut til at bildene produsert mellom nivåer med en lavere strømdifferanse, har høyere beregnede SNR_{AVG} -verdier. ΔPL_4 og ΔPL_8 har verdier som er 2,14 og 0,25 høyere enn verdiene beregnet for henholdsvis ΔPL_3 og ΔPL_7 . Dette ser ut til å være tilfellet selv om sistnevnte er produsert mellom nivåer med høyere strømdifferanser. Dette kan tyde på at selv om disse bildene ved første øyekast ser ut til å være tilnærmet like, og det er tenkelig at bilder produsert mellom nivåer med

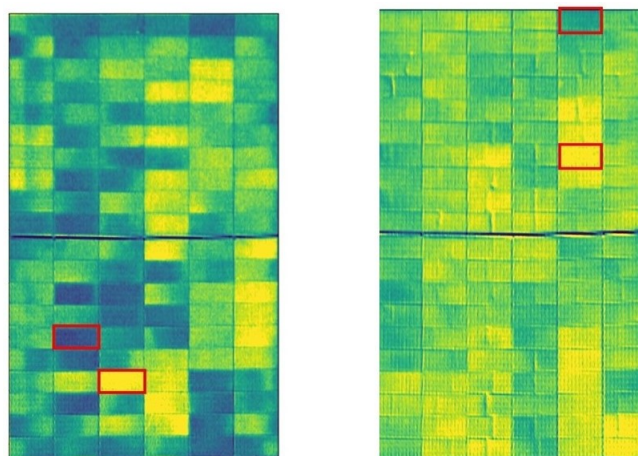
høyere strømdifferanse skal ha høyere kvalitet, kan det være noe støy i bildene ΔPL_3 og ΔPL_7 som blir fanget opp i beregningene av SNR_{AVG} og ikke ved visuell inspeksjon. Det kan eksempelvis være at refleksjonen ikke har blitt eliminert like godt i disse tilfellene og at det gjenspeiles i beregningene.

4.6 Kvantifisering av PID

I dette delkapittelet skal resultatene fra den kvantitative analysen presenteres. Formålet med den kvantitative analysen var å kvantifisere degraderingen i modulen påvirket av PID, og samtidig undersøke om det fantes noen kjennetegn ved degraderingen, som kunne skille den PID-påvirkede modulen fra den friske modulen. Det ble samtidig vurdert om de anvendte metodene senere kan brukes på et større kvantum med moduler, for å skille friske moduler fra moduler påvirket av PID. For den kvantitative analysen er det tatt utgangspunkt i eksperiment 3 (480 fps), da dette var den bildeserien med gjennomgående høyest kvalitet.

4.6.1 Analyse av de cellene som emitterte svakest og sterkest ΔPL -signal i hver modul

Det var ønskelig å observere hvordan ΔPL -signalet fra den svakeste og sterkeste cellen i modulen påvirket av PID utviklet seg i de ulike ΔPL -bildene, sammenliknet med cellene i en frisk modul. Som nevnt i metoden, representerer den mørkeste cellen den cellen som emitterte det svakeste ΔPL -signalet, mens den lyse cellen representerte den cellen som emitterte det sterkeste ΔPL -signalet. Hvilke celler som ble valgt ut som den mørkeste og lyseste i hver modul, kan observeres i figur 4.6.1.



Figur 4.6.1: Til venstre vises modulen påvirket av PID. Her er den mørkeste og lyseste cellen markert i rødt, og representerer de cellene som emitterer henholdsvis det svakeste og sterkeste ΔPL -signalet. Til høyre vises den friske modulen. Her er også den mørkeste og lyseste cellen markert i rødt.

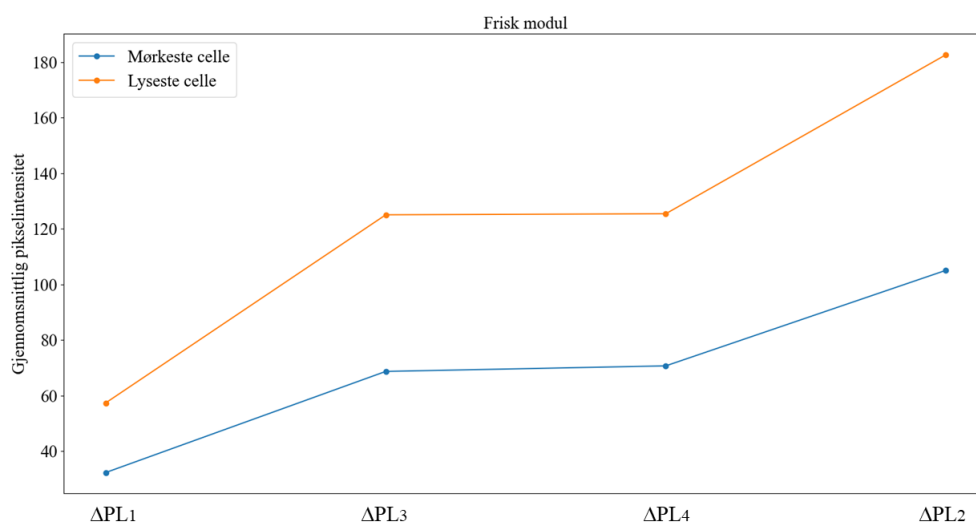
Ved å beregne forholdet mellom det emitterte ΔPL -signalet fra den svakeste og sterkeste cellen i modulen påvirket av PID, kunne det kvantifiseres hvor mye svakere ΔPL -signal en celle påvirket av PID emitterte i forhold til en celle som ikke var (like) sterkt påvirket av PID. Det ble også undersøkt om dette forholdet var konstant i de ulike ΔPL -bildene, og dermed over ulike strømdifferanser. Disse forholdstallene ble deretter sammenliknet med forholdstallene beregnet for den sterkeste og svakeste cellen i den friske modulen. Resultatet av beregningene vises i tabell 4.6.1.

Tabell 4.6.1: Tabellen viser forholdet mellom emittert ΔPL -signal fra den svakeste og sterkeste cellen i hver modul ($\frac{\Delta PL_{svak}}{\Delta PL_{sterk}}$), i de ulike ΔPL -bildene for eksperiment 3 (480 fps).

ΔPL -bilde	Frisk modul ($\frac{\Delta PL_{svak}}{\Delta PL_{sterk}}$)	PID-modul ($\frac{\Delta PL_{svak}}{\Delta PL_{sterk}}$)
ΔPL_1	0,563	0,318
ΔPL_2	0,575	0,282
ΔPL_3	0,549	0,248
ΔPL_4	0,563	0,270

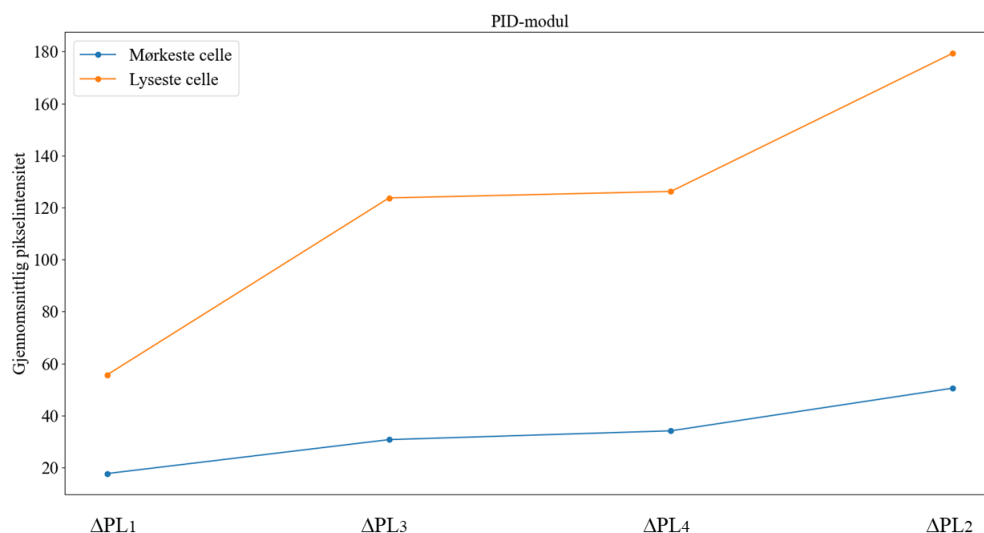
Fra tabellen kan man observere at den svakeste cellen i den friske modulen emitterer omtrent 55 til 58 % av det den sterkeste cellen gjør, i alle ΔPL -bildene. Den svakeste cellen i modulen påvirket av PID, emitterer derimot kun omtrent 25 til 32 % av det den sterkeste cellen i modulen gjør. Dette utgjør en differanse på 26 til 30 % mellom modulene. Til tross for dette, kan man se at forholdet mellom ΔPL -signalet emittert fra den svakeste og sterkeste cellen i hver modul er relativt like i de ulike bildene, og dermed også over de ulike strømdifferansene. Dette kan man også observere ved å plote gjennomsnittssignalet til de svakeste og sterkeste cellene i hver modul, i de ulike ΔPL -bildene.

Figur 4.6.2 viser signalutviklingen til den svakeste og sterkeste cellen i den friske modulen. Fra figuren kan man se at cellene følger tilnærmet lik utvikling i de ulike ΔPL -bildene.



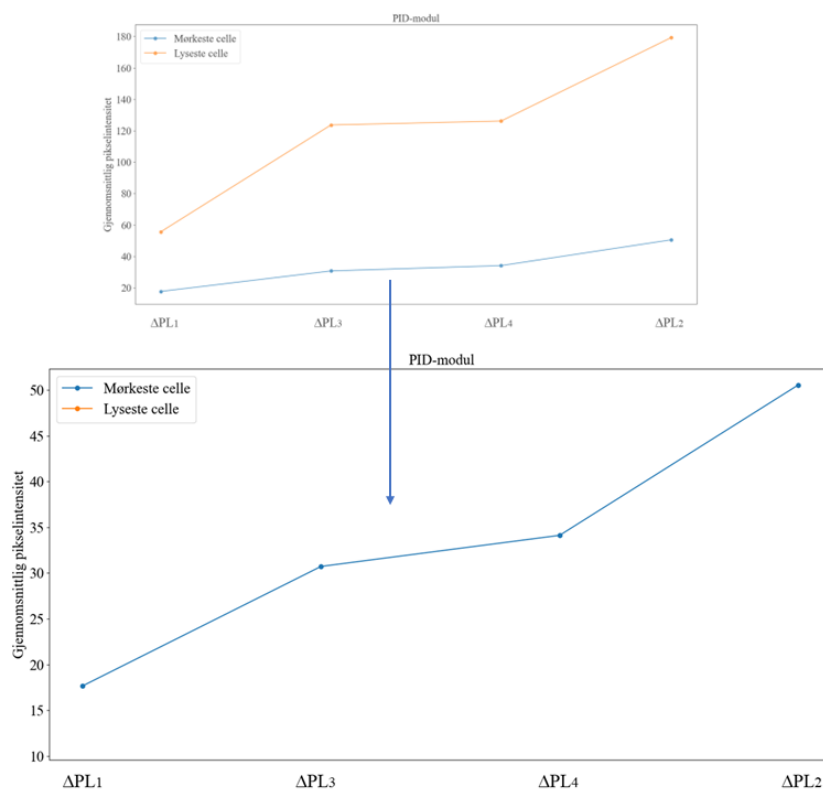
Figur 4.6.2: Utviklingen av ΔPL -signalet til de mørkeste og lyseste cellene i den friske modulen. Den mørkeste cellen er representert av blå graf, og den lyseste cellen er representert av oransje graf. ΔPL -signalene er sortert i stigende rekkefølge.

Dette er dog ikke like synlig i figur 4.6.3, som viser signalutviklingen til den svakeste og sterkeste cellen i modulen påvirket av PID. Dette tolkes å være fordi den blå grafen utvikler seg på lavere verdier på y-aksen (gjennomsnittlig pikselintensitet), enn det den oransje grafen gjør.



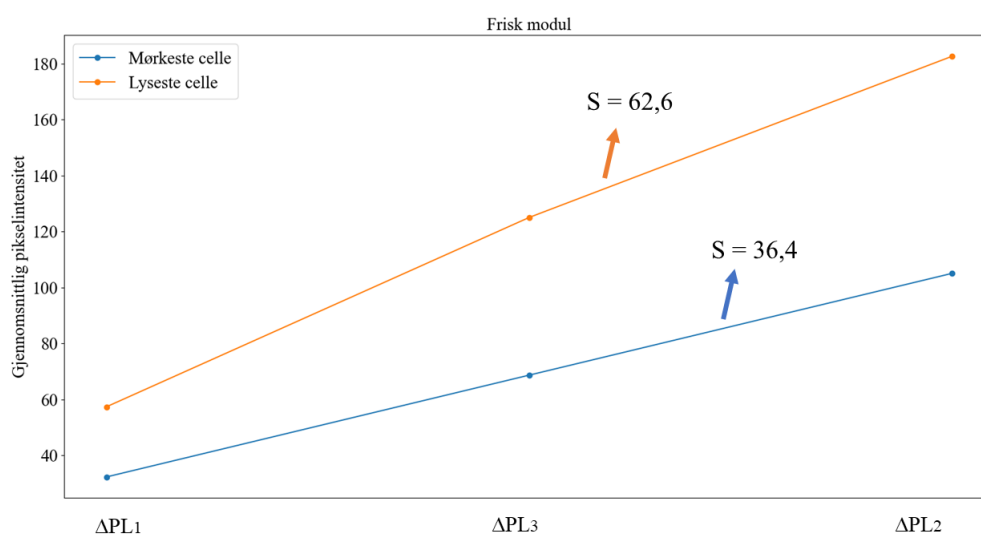
Figur 4.6.3: Utviklingen av ΔPL -signalet til de mørkeste og lyseste cellene i modulen påvirket av PID. Den mørkeste cellen er representert av blå graf, og den lyseste cellen er representert av oransje graf. ΔPL -signalene er sortert i stigende rekkefølge.

For å kunne observere signalutviklingen til den svakeste cellen i figur 4.6.3 nærmere, kan man forstørre grafen, slik det er gjort i figur 4.6.4.

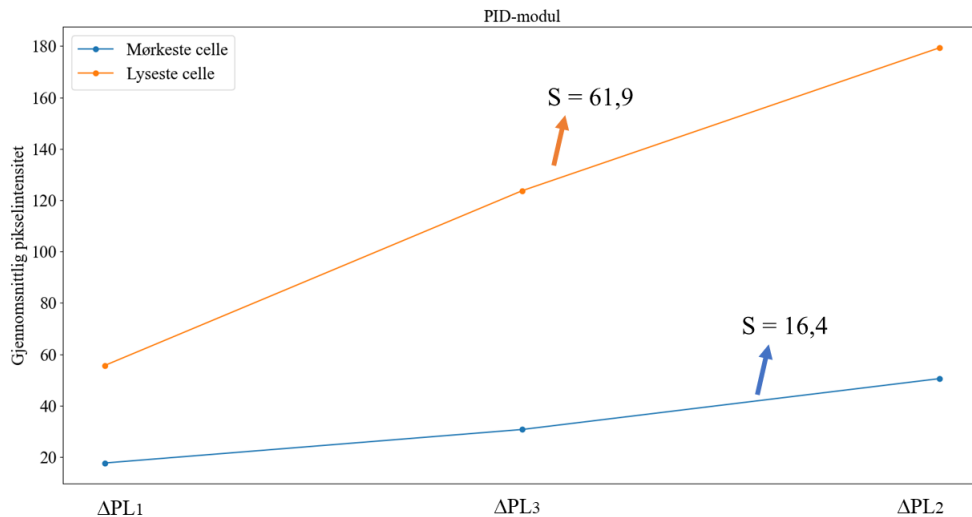


Figur 4.6.4: Utsnitt av signalutviklingen til den mørkeste cellen i modulen påvirket av PID.

For å tallfeste utviklingen, kan man beregne stigningstallet til signalutviklingen til de ulike cellene. Her tas ikke ΔPL_4 med i beregningene, da det bildet er produsert mellom tilnærmet like nivåer som ΔPL_3 . Resultatene kan observeres i figur 4.6.5 og 4.6.6, hvor stigningstallene er representert av S .



Figur 4.6.5: Utviklingen av ΔPL -signalet til de mørkeste og lyseste cellene i den friske modulen, i bildene $\Delta PL_1 - \Delta PL_3$. ΔPL -signalene er sortert i stigende rekkefølge og stigningstallet til hver graf er representert av S .



Figur 4.6.6: Utviklingen av ΔPL -signalet til de mørkeste og lyseste cellene i modulen påvirket av PID, i bildene ΔPL_1 - ΔPL_3 . ΔPL -signalene er sortert i stigende rekkefølge og stigningstallet til hver graf er representert av S .

Fra figurene 4.6.5 og 4.6.6 kan man se at de sterkeste cellene i begge modulene følger omtrent lik utvikling i de ulike bildene, med et stigningstall på rundt 62. Forskjellen ligger hovedsakelig i emittert ΔPL -signal fra de svakeste cellene i hver modul. Her er stigningstallet omtrent 16 i modulen påvirket av PID, mens det er omtrent 36 i den friske modulen. Dette kan være med på å illustrere hvor mye svakere en celle presterer når den er sterkt påvirket av PID, sammenliknet med hva en frisk celle presterer. Her vurderes prestasjonen som den mengden ΔPL -signal cellene klarer å emittere.

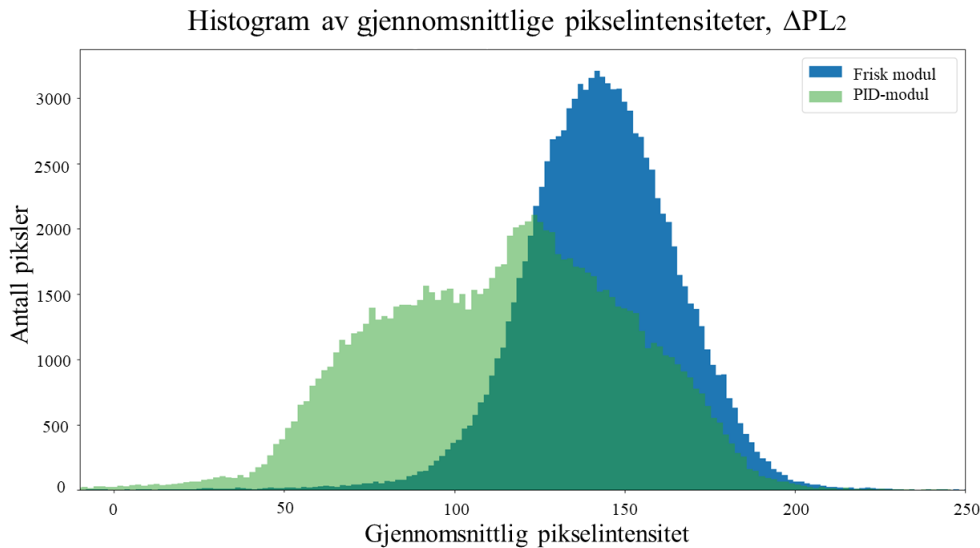
Selv om denne metoden kan gi et tall på hvor stor forskjell i ΔPL -signal man kan forvente mellom cellene i en modul påvirket med PID, kontra en frisk modul, vurderes ikke dette som en effektiv metode for å skille mellom moduler på. Det kan være tidskrevende å skulle plukke ut en av de svakeste og sterkeste cellene i flere bilder av ulike moduler, for å se om modulene er påvirket av PID eller ikke. For å lettere kunne observere dette kan man istedenfor anvende metodene som resultatene i neste delkapittel baserer seg på.

4.6.2 Histogram av gjennomsnittlige pikselintensiteter

Å lage et histogram av de gjennomsnittlige pikselintensitetene i et ΔPL -bilde av en modul kan gi et inntrykk av hvor sterkt ΔPL -signal modulen emitterer. Det er nærliggende å tro at en modul påvirket av PID vil ha en annen fordeling enn det en frisk modul vil ha, slik som det innledningsvis ble nevnt at Kwembur et al. [11] oppdaget ved å lage et histogram av EL-intensitetene til en modul påvirket av PID. For å undersøke om dette også stemte for den PID-påvirkede modulen avbildet med PL i denne studien, ble det

produsert et histogram av de gjennomsnittlige pikselintensitetene til modulene i bildet ΔPL_2 , da dette er vurdert som ett av bildene med høyest kvalitet.

Figur 4.6.7 viser antall piksler i modulene som har en viss gjennomsnittlig pikselintensitet i bildet ΔPL_2 . I figuren kan man se fordelingen til den friske modulen i blått og modulen påvirket av PID i grønt.



Figur 4.6.7: Intensitetsfordelingen til pikslene i bildet ΔPL_2 . Fordelingen til den friske modulen er markert i blått, mens fordelingen til modulen påvirket av PID er markert i grønt.

Fra figur 4.6.7 kan man se at den friske modulen har en normalfordeling av antall piksler med en viss gjennomsnittlig pikselintensitet, mens modulen påvirket av PID har en større spredning i intensiteter. Fra histogrammet i grønt kan man observere at det er flere piksler med en lavere gjennomsnittlig pikselintensitet enn det er i det blå histogrammet. Det grønne histogrammet følger heller ikke en normalfordeling, men kan karakteriseres ved å ha to toppen ved omtrent $x = 80$ og $x = 130$. Piksler med gjennomsnittlig pikselintensitet $x \leq 80$ kan tolkes å representere de pikslene som tilhører de mørkeste cellene på bildet, mens pikslene med en gjennomsnittlig pikselintensitet rundt $x = 100$ kan tolkes å representere de pikslene som tilhører de lyseste cellene på bildet. Toppen på histogrammet til den friske modulen har en gjennomsnittlig pikselintensitet på omtrent $x = 150$. Det vil si at pikslene har en gjennomsnittlig verdi på omtrent 150, noe som er høyere enn gjennomsnittsverdiene for pikslene i de to toppene i histogrammet til modulen påvirket av PID. Dette stemmer godt med de visuelle observasjonene av ΔPL -bildene, da den friske modulen ikke har like store variasjoner i fargeintensiteten, som det modulen påvirket av PID har. Dette er dermed med på å symbolisere at modulen påvirket av PID inneholder flere svake, degraderte celler, som vil vise seg som mørke celler i bildet.

For å avgjøre om dette er en metode som kan anvendes for å enkelt skille friske moduler fra moduler påvirket av PID i et større solcelleanlegg, måtte man ha gjort undersøkelsen for flere moduler enn kun to stykk. Det er nærliggende å tro at intensitetsfordelingen vil se nogenlunde lik ut for flere moduler påvirket av PID, da disse modulene karakteriseres av sine mørke og lyse celler, noe som kan føre til de to toppene i figur 4.6.7. Det er likevel tenkelig at størrelsen på toppene kan variere med progresjonen av PID i modulene, da en sterkt degradert modul kanskje har enda flere mørke celler, mens en friskere modul har flere lysere celler. Likevel er det tenkelig at modulene ikke vil ha en normalfordeling av pikselintensiteter, slik den friske modulen er vist å ha i figur 4.6.7.

Noe som likevel kan bidra til de to toppene man kan observere i det grønne histogrammet i figur 4.6.7, er andre mørke områder i Δ PL-bildet som ikke kan forklares av PID. I sin forskning viser Kwembur et al. [11] at toppene eksempelvis kan skyldes områdene mellom cellene, samleskinnene eller andre defekter, som fremtrer som mørke partier i bildet. I bildene av den monokrystallinske p-type-modulen som Kwembur et al. [11] analyserer, er dette svært fremtredende. Grunnet sprekker, urenheter og defekter [11] oppstår det mørke partier i bildene, som ikke kan forklares av PID. Slike mørke partier er ikke synlig i bildene av de monokrystallinske cellene analysert i denne studien, og det er dermed tenkelig at disse cellene kan være av høyere kvalitet enn de som ble brukt i forskningen til Kwembur et al. [11]. Områdene mellom cellene og samleskinnene fremtrer heller ikke som tydelige mørke partier i bildene brukt i denne studien, slik som de fremtrer i bildene til Kwembur et al. [11]. Dersom det skulle være andre defekter som kunne ha bidratt til de mørke partiene i bildene fra denne studien, må undersøkelsen utvides, slik at metoden tydeligere kan skille på dette og PID. Fra denne analysen ser det dog ikke ut som at de mørke partiene stammer fra noe annet enn PID, og at de bimodale toppene dermed kan skyldes denne degraderingsmekanismen.

Det kan også være at noen celler som er påvirket av PID ikke kommer like tydelig frem i Δ PL-bildet eller histogrammet, siden innstrålingen kan tolkes å være relativ høy (493-550 W/m²) i dette forsøket. Da Stoicescu og Reuter [10] observerte flere mørke celler i bilder av en PID-påvirket modul ved lav innstråling, enn ved høy innstråling, varierte innstrålingen mellom 50 W/m² og 400 W/m². Dette er noe Kwembur et al. [11] også kommenterer i sin forskning, da det ble produsert histogrammer av den PID-påvirkede modulen: de bimodale toppene ble mer adskilt når de baserte seg på bilder som ble tatt mens EL-strømmen var lav (10 % av I_{SC}). Dette var noe som kunne karakterisere PID, til tross for de tidligere nevnte forstyrrelsene, siden de mørke cellene grunnet PID ble mer fremtredende ved lav eksitasjonskraft. Dermed kan det være tenkelig at toppene i det grønne histogrammet i figur 4.6.7 kunne vært enda mer adskilt dersom PL-avbildningen hadde blitt foretatt ved lav innstråling.

Til tross for dette, tolkes PID å være fremtredende i histogrammene i denne studien. Dette er først og fremst fordi formen på histogrammet til den PID-påvirkede modulen avviker tydelig fra normalfordelingen til den friske modulen, noe som tolkes å hovedsakelig stamme fra de mørke cellene påvirket av PID. Selv om noen PID-påvirkede celler ikke skulle ha kommet like tydelig frem i histogrammet grunnet den relativt høye innstrålingen, avviker formen likevel nok fra normalfordelingen til den friske modulen, til at det kan anses som karakteristisk for PID. De mørke cellene kan tolkes å fremtre tydelig i denne studien uavhengig av innstråling, siden de er mer degraderte enn det de eksempelvis er i Stoicescu og Reuter [10] sin forskning. Dersom metoden skal anvendes på moduler som er mindre degraderte, kan det vurderes å ta bilder mens det er lavere innstråling. På denne måten kan man undersøke om histogrammet får enda tydeligere bimodale topper.

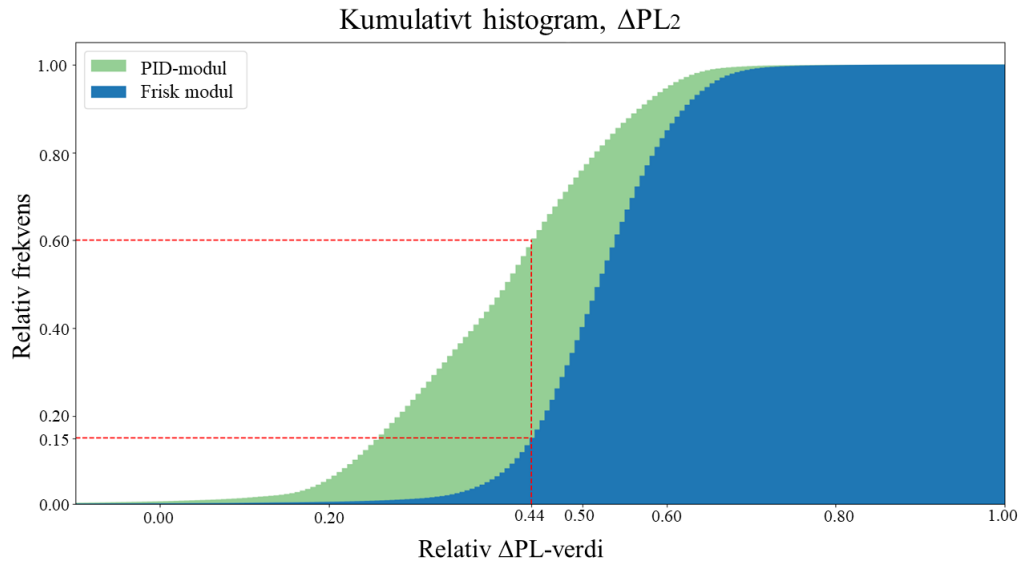
Metoden anses å gi et godt grunnlag for om man kan skille en PID-påvirket modul fra en frisk modul, selv om den kan videreutvikles for å være enda mer nøyaktig.

4.6.3 Kumulativt histogram av relative pikselintensiteter

For å undersøke forskjellene i pikselintensitetene nøyere, ble det avslutningsvis laget et kumulativt histogram av pikselintensitetene til modulene (her kalt ΔPL -verdier). På denne måten kunne man også undersøke om det var noen kvantitative kjennetegn ved modulen påvirket av PID, sammenliknet med den friske modulen.

Det kumulative histogrammet i figur 4.6.8 viser hvilken andel av pikslene i ΔPL_2 -bildet av modulene, som har en ΔPL -verdi lavere enn den maksimale mulige verdien i bildet. I det kumulative histogrammet viser y-aksen den relative frekvensen av piksler, mens x-aksen viser den relative ΔPL -verdien.

Fra figuren kan man observere fordelingen til den PID-påvirkede modulen i grønt og den friske modulen i blått. Fra fordelingene kan man se at omtrent 60 % av pikslene i modulen påvirket av PID har en ΔPL -verdi som er lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien. For den friske modulen er det kun 15 % som har en ΔPL -verdi lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien. Resten av pikslene har verdier som er høyere enn dette. Dette kan tolkes å samsvare godt med tidligere resultater, som har vist at modulen påvirket av PID har flere svakere celler enn det den friske har.



Figur 4.6.8: Figuren viser den relative frekvensen av piksler (y-aksen) som har en ΔPL -verdi lavere enn den høyeste mulige ΔPL -verdien i bildet av modulen (x-aksen). Den blå grafen representerer den friske modulen, mens den grønne grafen representerer modulen påvirket med PID.

I likhet med histogrammene, kan det være noen usikkerhetsfaktorer i denne analysen. Dersom det er andre defekter som fører til at noen piksler har lav ΔPL -verdi, vil ikke resultatet fra denne kvantitative analysen nødvendigvis være karakteristisk kun for PID. Likevel, sett i sammenheng med ΔPL -bildene fra den visuelle analysen, tolkes det som at forskjellene i dette tilfellet hovedsakelig ser ut til å stamme fra PID. Dersom det skulle blitt avgjort om denne metoden kan anvendes for å skille mellom PID-påvirkede moduler og friske moduler i en større skala, måtte analysen blitt fullført for flere moduler enn kun to stykk. Dersom frekvensen av de relative ΔPL -verdiene hadde fulgt samme trend for flere moduler, kan det tolkes som at metoden er anvendelig for å skille mellom flere PID-påvirkede og friske moduler.

Kapittel 5

Konklusjon

Denne studien hadde som formål å undersøke hvilke faktorer som kunne bidra til klareste mulig visualisering av PID i PL-bilder, og hvordan degraderingen kunne kvantifiseres. Det var ønskelig å undersøke om det var noen kvantitative kjennetegn ved degraderingen, som kunne bidra til at man enkelt kunne skille mellom den PID-påvirkede modulen og den friske modulen. Det ble vurdert om disse kjennetegnene kunne generaliseres til å gjelde for flere moduler enn de som ble undersøkt i studien, og om metoden dermed kan anvendes på et større kvantum av moduler.

PL-signalet fra modulene ble forsøkt korrigert for varierende innstråling før Δ PL-bildene ble produsert. Dette ble gjort med bakgrunnsmoduler i en annen streng som korrigeringsfaktorer. Det viste seg at dette ikke bidro til å nevneverdig utjevne PL-signalet, da korrigeringsfaktoren ikke kunne tolkes som et umodulert område. Bildebehandlingen og analyseringen ble dermed utført på ukorrigerede bilder.

Δ PL-bildene produsert mellom nivåer med strømdifferanse > 9 A ble vurdert å ha høyest kvalitet. Δ PL-bildene hadde også høyest kvalitet da de ble produsert av gjennomsnittlig ti bilder på hvert nivå, og når bildene ble tatt med en bildefrekvens på 480 fps. Dette gjenspeilet seg i visualiseringen av PID ved at det karakteristiske mønsteret grunnet PID var tydelig observerbart, og at det var en stor kontrast mellom fargene til de degraderte og friske cellene. Man kunne også observere fargeforskjeller innad noen celler i Δ PL-bildene med høyest kvalitet. Vurderingen av bildekvalitetene samsvarte med beregnede SNR_{AVG} -verdier, da bildene med høyest kvalitet, også hadde de høyeste SNR_{AVG} -verdiene.

Resultatene fra den kvantitative analysen viste at modulen påvirket av PID hadde noen karakteristiske trekk som kunne skille den fra den friske modulen. I den friske modulen emitterte den svakeste cellen mellom 55 og 58 % av det den sterkeste cellen gjorde, i Δ PL-bildene med høyest kvalitet. I modulen påvirket av PID, emitterte den svakeste cellen derimot kun mellom 25 og 32 % av det den sterkeste cellen gjorde, i de samme bildene. Dette utgjør en differanse mellom modulene på 26-30 %. Det var også en merkbar forskjell mellom intensitetsfordelingen til pikslene i modulen påvirket av PID og den friske modulen. I histogrammet som viste intensitetsfordelingene, nådde fordelingen til modulen påvirket av PID, to topper. Disse toppene kan symbolisere de pikslene som tilhører de

cellene som er henholdsvis mest og minst påvirket av PID. For den friske modulen var intensitetsfordelingen derimot normalfordelt. I det kumulative histogrammet viste det seg at omtrent 60 % av pikslene i den PID-påvirkede modulen hadde en ΔPL -verdi som var lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien. For den friske modulen var det kun 15 % som hadde lavere enn 44 % av den maksimalt mulige verdien, mens resten av pikslene hadde verdier som er høyere enn dette.

Avslutningsvis kan man besvare forskningsspørsmålene, som ble stilt innledningsvis, følgende:

- Ved å ta bilder av en modul med en bildefrekvens på 480 fps, og produsere ΔPL -bilder mellom nivåer der modulene opererer med størst mulig strømdifferanse, vil man kunne produsere ΔPL -bilder av høy kvalitet. Ved å ta et gjennomsnitt av flere bilder på hvert nivå, vil støy minimeres og bildekvaliteten økes ytterligere. Dette vil gjenspeiles i visualiseringen av PID, ved at rutenettet kommer tydelig frem og at det er mulig å visuelt analysere celle for celle.
- Ved å undersøke ΔPL -signalet emittert fra cellene i en modul påvirket av PID, kan man observere kvantitative kjennetegn ved signalet, som kan skille modulen fra en frisk modul. Det er også mulig å skille en modul påvirket av PID fra en frisk modul ved å produsere et histogram av de gjennomsnittlige pikselintensitetene i et ΔPL -bilde av modulene. Forskjellene mellom modulene vil også kunne vise seg i et kumulativt histogram, som viser hvor stor andel av alle pikslene som har en ΔPL -verdi lavere enn den maksimale mulige ΔPL -verdien i bildet. Den PID-påvirkede modulen vil trolig prestere dårligere enn den friske modulen i alle tilfeller.
- For å avgjøre om kjennetegnene og metodene fra denne studien kan generaliseres til å gjelde for et større kvantum moduler, må undersøkelsen utføres for flere moduler enn de to modulene som undersøkes i studien. Det er tenkelig at metodene også bør utvides for å omfavne flere PID-påvirkede moduler, med ulik grad av degradering. Dersom modulene følger samme tendenser, kan metodene anses som anvendelige for dette formålet.

Videre arbeid

Et videre arbeid av denne studien bør hovedsakelig gå ut på å undersøke flere moduler med metodene anvendt, hvor det undersøkes om funnene er samsvarende med denne studiens resultater. Metodene kan utvides til å inkludere moduler som også er påvirket av andre defekter enn PID, for å undersøke innvirkningen dette har på formen til histogrammene. Undersøkelsene kan i tillegg utføres ved lavere innstråling, for å observere om mindre degraderte moduler også kan fanges opp ved bruk av studiens metoder. Ved å gjøre dette kan man samtidig observere om de mindre degraderte modulene viser samme karaktertrekk som denne studiens moduler. Årsaken bak hvorfor forholdstallene mellom de svakeste og sterkeste cellene i hver modul i de ulike Δ PL-bildene er tilnærmet like, kan også undersøkes mer. Før Δ PL-bildene produseres og analyseringen starter, bør det vurderes å korrigere for varierende innstråling ved bruk av en hvitreferanse, istedenfor et antatt umodulert område. Dette, til tross for at bildekvalitetene og karaktertrekkene til PID var godt synlige i denne studien, uten korrigeringen.

Referanser

- [1] D. Chen mfl. “Framing, Context, and Methods”. I: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Red. av V. Masson-Delmotte mfl. 147–286. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.003.
- [2] IRENA. “2.2 Solar PV outlook to 2050”. I: *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)* (2019). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [3] O. Kunz mfl. “Outdoor luminescence imaging of field-deployed PV modules”. I: *Progress in Energy* 4.4 (2022). 042014. DOI: 10.1088/2516-1083/ac9a33.
- [4] R. Bhoopathy mfl. “Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation”. I: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26.1 (2018). 69-73. DOI: 10.1002/pip.2946.
- [5] W. Luo mfl. “Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review”. I: *Energy & Environmental Science* 10.1 (2017). 43–68. DOI: 10.1039/C6EE02271E.
- [6] M. Dhimish og G. Badran. “Field Study of Photovoltaic Systems with Anti-Potential-Induced-Degradation Mechanism: UVF, EL, and Performance Ratio Investigations”. I: *Photonics*. Bd. 10. 2. 225. MDPI. 2023. DOI: 10.3390/photonics10020225.
- [7] F. Martinez-Moreno, G. Figueiredo og E. Lorenzo. “In-the-field PID related experiences”. I: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174 (2018). 485–493. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.09.037.
- [8] V.E. Puranik og R. Gupta. “Analysis and insight of electroluminescence imaging in the assessment of potential-induced degradation in crystalline silicon photovoltaic module”. I: *Engineering Failure Analysis* 134 (2022). 106027. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106027.
- [9] C. Buerhop mfl. “Influence of the Irradiance on the Detection and Performance of PID-Affected PV-Modules”. I: 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Sep. 2018. DOI: 10.4229/35thEUPVSEC20182018-6DV.1.18.

- [10] L. Stoicescu og M. Reuter. “Daysy contactless measurements of pid shunt resistance in installed pv modules”. I: *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 1337–1339. 2018.
- [11] I.M. Kwembur mfl. “Detection of potential induced degradation in mono and multi-crystalline silicon photovoltaic modules”. I: *Physica B: Condensed Matter* 581 (2020). 411938. DOI: 10.1016/j.physb.2019.411938.
- [12] J.L. Gray. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition*. John Wiley Sons, 2011. Kap. 3: *The Physics of the Solar Cell*.
- [13] A. Smets mfl. *Solar energy - The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. UIT Cambridge, England, 2016, s. 23, 47–50, 58–59, 65–78, 84–85, 93–95, 117–118 og 160–165.
- [14] S. Banerjee og M.K. Das. “A review of Al₂O₃ as surface passivation material with relevant process technologies on c-Si solar cell”. I: *Optical and Quantum Electronics* 53.1 (2021). 60. DOI: 10.1007/s11082-020-02689-8.
- [15] REC group. *Combatting LeTID in solar panels: How testing has demonstrated the high resistance of REC solar panels to LeTID degradation, ensuring long term power for lasting performances*. 2020.
- [16] J. Schmidt, D. Bredemeier og D.C. Walter. “On the defect physics behind light and elevated temperature-induced degradation (LeTID) of multicrystalline silicon solar cells”. I: *IEEE Journal of Photovoltaics* 9.6 (2019). 1497–1503. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2937223.
- [17] W. Luo mfl. “Elucidating potential-induced degradation in bifacial PERC silicon photovoltaic modules”. I: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26.10 (2018). 859–867. DOI: 10.1002/pip.3028.
- [18] K. Sporleder mfl. “Root cause analysis on corrosive potential-induced degradation effects at the rear side of bifacial silicon PERC solar cells”. I: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 201 (2019). 110062. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110062.
- [19] M. Vuković mfl. “Photoluminescence imaging of silicon modules in a string”. I: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 30.4 (2022). 436–446. DOI: 10.1002/pip.3525.
- [20] T. Holtebekk. “*fotoluminescens*”. I: *Store Norske Leksikon (SNL)* (2020). Sist lest 11.04.2023.
- [21] R. Bhoopathy mfl. “Outdoor photoluminescence imaging of solar panels by contactless switching: Technical considerations and applications”. I: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 28.3 (2020). 217–228. DOI: 10.1002/pip.3216.

- [22] M. Vuković mfl. “Noninvasive photoluminescence imaging of silicon PV modules in daylight”. I: *Applied Physics Letters* 120.24 (2022). 244102. DOI: 10.1063/5.0097576.
- [23] International Electrotechnical Commission mfl. “Photovoltaic Devices-Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules”. I: *IEC TS* (2018). 60904–13.
- [24] C. Mantel mfl. “SNR study of outdoor electroluminescence images under high sun irradiation”. I: *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*. 3285–3289. IEEE. 2018. DOI: 10.1109/PVSC.2018.8548264.
- [25] Risen Energy. *High performance bifacial perc monocrystalline module (RSM120-8-585BMDG-605BMDG)*. Tashan Industry Zone, Meilin, Ninghai 315609, Ningbo. 2020.

Appendiks

A: Bilde fra oppsettet



Figur A.1: Bilde fra solcelleanlegget, som viser oppsettet for PL-avbildningen. Merk at bildet ble tatt etter at dataene var ferdig innsamlet og været var blitt noe mer overskyet.

B: Python-kode for å produsere Δ PL-bildene

```
""" ----- Produksjon av et utvalg delta PL-bilder ----- """

# I disse kodesnuttene substraheres et gjennomsnitt av ti og ti bilder
# fra hverandre på de respektive nivåene.
# "images" inneholder alle 15 bildesettene, hvor tellingen starter på 0.
# images[2] er dermed bildesett 3 (eksperiment 3, 480 fps),
# mens images[13] er bildesett 14 (eksperiment 14, 120 fps).
```

```
""" ----- 480 fps ----- """
```

```
# Delta PL1
plt.figure()
plt.imshow(np.mean(images[2][673-10:673],axis=0)-
           np.mean(images[2][681:681+10],axis=0),
           clim=(0,58))
plt.title('Antall bilder: 10 \n (663-673 til 681-691)')
plt.colorbar()
plt.axis('off')

# Delta PL2
plt.figure()
plt.imshow(np.mean(images[2][673-10:673],axis=0)-
           np.mean(images[2][805:805+10],axis=0),
           clim=(40,180))
plt.title('Antall bilder: 10 \n (672-673 til 805-806)')
plt.colorbar()
plt.axis('off')
```

```
""" ----- 120 fps ----- """
```

```
# Delta PL5
plt.figure()
plt.imshow(np.mean(images[13][304-10:304],axis=0)-
           np.mean(images[13][307:307+10],axis=0),
           clim=(0,60))
plt.title('Antall bilder: 10 \n (294-304 til 307-317)')
plt.colorbar()
plt.axis('off')

# Delta PL6
plt.figure()
plt.imshow(np.mean(images[13][304-10:304],axis=0)-
           np.mean(images[13][341:341+10],axis=0),
           clim=(50,185))
plt.title('Antall bilder: 10 \n (294-304 til 341-351)')
plt.colorbar()
plt.axis('off')
```



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway