

ELEKTROLUMINESZENZ ZUR DIAGNOSE AN PV MODULEN

Christof Sumeder

FH JOANNEUM, Institut Energie-, Verkehrs- und Umweltmanagement
8605 Kapfenberg, Werk-VI-Straße 46, 0316 8543 6359,
christof.sumeder@fh-joaanneum.at, www.fh-joaanneum.at

Kurzfassung: Die ersten PV-Anlagen sind vorüber 20 Jahren in Betrieb gegangen. Durch die Betriebsbelastung und äußere Einflüsse kommt es zur Degradation der Module bzw. zu Fehlern an einzelnen Zellen, wodurch eine Ertragsminderung einher geht. Für die Zustandsbewertung wurden bisher elektrische Parameter oder thermografische Methoden eingesetzt, wodurch die Funktionstüchtigkeit einzelner Module nur unzureichend bestimmt wurde. In der Regel wurden degradierte Module ohne weitere Untersuchungen demontiert und entsorgt. Im Rahmen des Projektes PV DiKlaWi wird nun ein selektiveres Diagnoseverfahren basierend auf Elektrolumineszenzphotografie und Bilderkennung mittels KI entwickelt, um das vorzeitige Ausscheiden von funktionstüchtigen Photovoltaikmodulen zu verhindern.

Keywords: PV, EAG, KI, Zustandsdiagnose

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Der massive Ausbau der Photovoltaik zur Erreichung der Ziele des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (zusätzlich 11 TWh Strom aus Photovoltaik bis 2030) steht im Kontrast zum vorzeitigen Austausch oder Rückbau von noch funktionsfähigen Photovoltaikmodulen. Das Projekt PV DiKlaWi adressiert diese Problematik und verfolgt das Ziel, die Lebensdauer von Photovoltaikmodulen durch ein innovatives Diagnoseverfahren auf Basis von Elektrolumineszenzphotografie in Kombination mit Fehlerklassifizierung durch Künstlicher Intelligenz zu verlängern.

Die Diagnose mittels Elektrolumineszenz ermöglicht eine detaillierte Zustandsbewertung der Module, die wiederum eine gezielte Klassifizierung und differenzierte Weiterverwendung der Module ermöglicht. So können Module je nach Zustand im Betrieb verbleiben, für eine Zweitnutzung (Second Life) genutzt oder für ein stoffliches Recycling vorgesehen werden. Diese ressourcenschonende Strategie trägt zur nachhaltigen Nutzung von Photovoltaikanlagen bei und leistet somit einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele.

2 Elektrolumineszenzmethode und Drohnensetup

Die Inspektion von Photovoltaik-Systemen mittels Infrarotkameras zur Detektion von Hotspots stellt den aktuellen Stand der Technik dar. Diese Methode ist jedoch anfällig gegenüber Umgebungsparametern und ermöglicht lediglich die Identifizierung von Heißstellen, ohne jedoch dessen Ursache zu kennen. Demgegenüber ist die elektrolumineszenzbasierte

Diagnostik eine wesentlich sensitivere Methode, bei der sich auch typische Fehler an PV-Modulen bzw. Zellen unterscheiden lassen.

Bei der Elektrolumineszenzmessung werden die Module im Durchlassbereich mit einer Spannung beaufschlagt, wodurch diese Licht bei einer Wellenlänge zwischen etwa 0,9 und 1,3 μm abstrahlen (Lumineszenz). Da diese Strahlung schwach ist, funktioniert diese Methode nur in der Dämmerung bzw. bei Dunkelheit. Erschwerend hinzu kommt, dass die Lumineszenzstrahlung nicht im sichtbaren Bereich liegt. Daher benötigt man eine Kamera mit optischen Filtern für die relevanten Wellenlängen. Die Aufnahmen visualisieren die Fehlerstellen wie Rissen, Brüchen und Delaminationen der Solarzellen.

Anhand von gealterten PV-Modulen, die von Anlagenbetreibern gesammelt wurden, konnte die umgebaute Elektrolumineszenzkamera getestet werden. Bei unterstützenden Unternehmen, die eine PV-Anlage betreiben, wurden gealterte PV-Module gesammelt und vermessen. Es erfolgte eine Aufnahme der Strom-Spannungs-Charakteristik durch Messung mittels einer Gleichspannungsquelle. Diese sogenannten Dunkelkennlinien lassen einen ersten Schluss über den Zustand der Module zu. Baugleiche Module konnten verglichen und gealterte Stränge identifiziert werden. In Abbildung 1 ist der Laboraufbau schematisch dargestellt. Im Diagramm rechts sind die gemessenen Kennlinien zu sehen, gealterte Module sind daran zu erkennen, dass sie signifikant abweichen (wellige Linien, flacherer Verlauf).

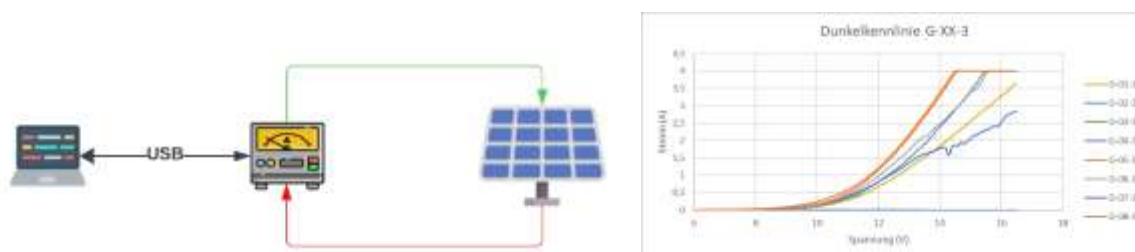


Abbildung 1: Messung der Dunkelkennlinie an einem PV-Modul im Labor (Masterarbeit M. Hollinger [1])

In einem weiteren Schritt wurde das thermische Verhalten mit der IR-Kamera der Drohne und der EL-Kamera aufgenommen. Damit können thermische Heißstellen ausfindig und Fehlstellen sichtbar gemacht werden, wie in der Abbildung 2 ersichtlich ist. Die beiden Messungen wurden jeweils am selben PV-Modul durchgeführt. Das Wärmebild rechts zeigt Siliziumzellen, die auffällig warm werden (stark gelblich). Links in der EL-Aufnahme ist zu erkennen, dass die Zellen eine unterschiedliche Abstrahlung aufweisen, einige Zellen weisen lediglich einen schwachen Lichtpunkt in einer Ecke auf. Diese und weitere Indikatoren sollen im nächsten Projektverlauf als Kriterium für die Klassifizierung der PV-Module herangezogen werden.

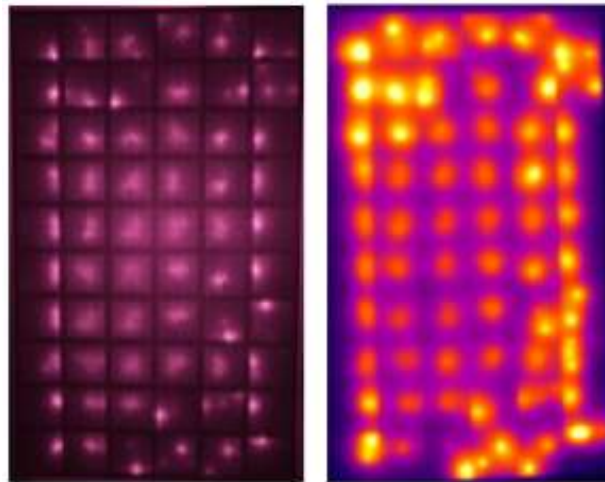


Abbildung 2: EL- und IR-Messung an einem PV-Modul im Labor (Masterarbeit M. Hollinger)

Für die EL-Aufnahmen im Flug wurde ein Trägersystem mit einem fernsteuerbaren Gimbal für die EL-Kamera konstruiert, damit auch mit der Drohne Aufnahmen gemacht werden können. Die Testflüge konnten erfolgreich durchgeführt und erste EL-Aufnahmen im Flug durchgeführt werden. Mit der Drohne wurde mehrere große PV-Anlagen befliegen und der Aufbau optimiert. In der Abbildung 3 sind Aufnahmen von Drohnenbefliegungen und Messungen mittels Wärmebildkamera dargestellt. Im normalen Bild können nur schwerwiegende Fehlerstellen (zerborstene Glasscheiben, abgebrannte Stellen udg.) erkannt werden. Mit der Wärmebildkamera können Fehlerstellen aufgrund der unterschiedlichen Farbskalierung relativ einfach lokalisiert werden.



Abbildung 3: Freiflächen PV-Anlage (oben) und Floating PV-Anlage (unten)

Für die Optimierung des Drohnen-Setups konnte die Infrastruktur des Flugplatz Kapfenberg, der unmittelbar neben dem FH Campus Kapfenberg liegt, genutzt werden. Die Fotografietechnik im Drohnenflug ist vielfach komplexer als unter Laborbedingungen. Die EL-

Kamera musste an einem separaten Gimbal unterhalb der Drohne befestigt werden. Für EL-Fotos im Flug musste einerseits die Drohne und andererseits die Kamera zur Fokussierung und Einstellung der Belichtungsdauer und Blende als auch der Gimbal zur Positionierung des Blickwinkels ferngesteuert werden. Um ein scharfes Foto zu erhalten war es wichtig die Belichtungsdauer so kurz wie möglich zu halten, was eine möglichst stabile Flugposition der Drohne erfordert. Des Weiteren musste die Blendenöffnung wegen der Dunkelheit möglichst groß sein. Die Drohne, der Gimbal und die EL-Kamera können ferngesteuert werden, was jedoch mindestens 2 Personen für die Bedienung erfordert. Zusätzlich muss die Prüfspannung in die PV-Module eingespeist werden. Es stellte sich daher heraus, dass es zwar möglich ist EL-Fotos mit der Drohne anzufertigen, dies jedoch sehr aufwändig ist.

3 Fehlerklassifikation mittels Domain-Informed KI

Im ersten Schritt wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt, um aktuelle Methoden im Bereich Fehlererkennung sowie Fehlertypklassifikation von PV-Modulen unter Verwendung von Machine Learning (ML) und im speziellen Deep Learning (DL) zu vergleichen. Der Fokus lag auf Klassifikationsmethoden basierend auf Elektrolumineszenzdaten. So konnte ein Überblick über den aktuellen State-of-the-Art in diesem Bereich gewonnen werden. Zusätzlich wurden offen verfügbare Elektrolumineszenzdaten von PV-Fehlern gesucht, die als Trainingsdaten verwendet werden können. ML-basierte Methoden haben hohe Anforderungen an Datenqualität und -verfügbarkeit. Dies erschwert deren Anwendung mit den in diesem Projekt erhobenen Daten. Ziel ist deshalb eine Kombination aus offenen Daten und Daten aus den durchgeführten Drohnenbefliegungen. Aus den Erfahrungen erster Versuche mit offenen Datensätzen konnten wichtige Anforderungen an den Versuchsaufbau der Drohnenbefliegung abgeleitet werden. Für die Fehlerdetektion wurden unterschiedliche Architekturen neuronaler Netzwerke verglichen, etwa klassische Autoencoder, Convolutional Neural Networks sowie Inception Modelle. Die entwickelten Modelle bieten State-of-the-Art Klassifikationsgenauigkeit (Abbildung 4) und sollen in den nächsten Schritten noch verbessert werden.

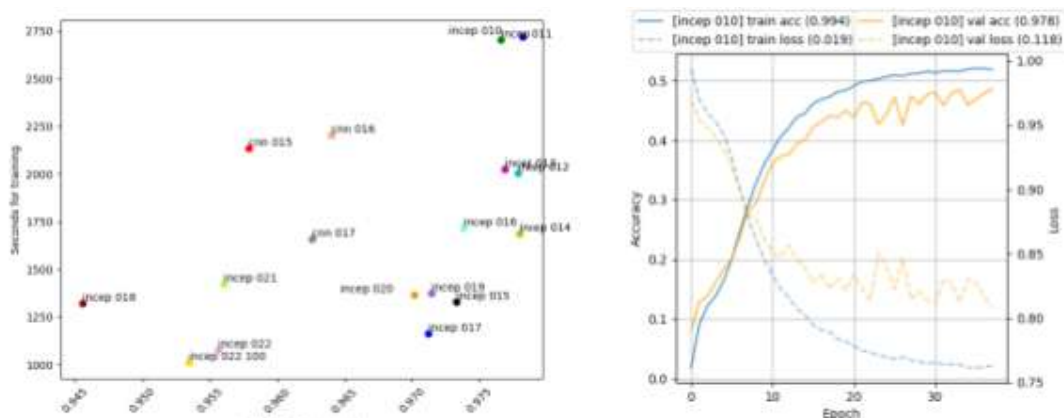


Abbildung 4: Validationsgenauigkeit und Trainingsdauer der verwendeten Modelle (links), Genauigkeiten für Trainings- und Validationsdatensätze für das beste Modell (rechts).

Zusätzlich wurde ein Konzept für ein multi-step Verfahren zur Fehlerklassifikation entwickelt (Abbildung 5). Der Grund dafür ist die benötigte Genauigkeit von Elektrolumineszenzbildern, um eine verlässliche Klassifikation des Fehlertyps zu ermöglichen. Um die Befliegungen effizient durchführen zu können, sollen Fehlererkennung und Klassifikation des Fehlertyps getrennt werden. Im ersten Schritt werden basierend auf Befliegungsdaten Fehler in PV-Modulen entdeckt. Hierfür sollen ML- oder Expertensysteme herangezogen werden. Ziel ist außerdem die Einbindung von zusätzlichen Datenquellen wie Spannungsverläufe etc., um die Fehlerentdeckung zu verbessern. Wird ein Modulfehler erkannt, soll im zweiten Schritt eine genaue Klassifikation des Fehlertyps erfolgen. Die Schwierigkeit liegt hierbei in der Datengrundlage, da durch Befliegungen im Rahmen des Projekts nicht genug Daten zu Fehlern in PV-Modulen gesammelt werden können. Ziel ist die Entwicklung eines Modells basierend auf offenen Datensätzen, welche auch bei Daten aus den Befliegungen hohe Genauigkeit erzielen. Die Frage der Transferierbarkeit von Modellen ist hierbei ein sehr relevantes Thema in der aktuellen Forschung.

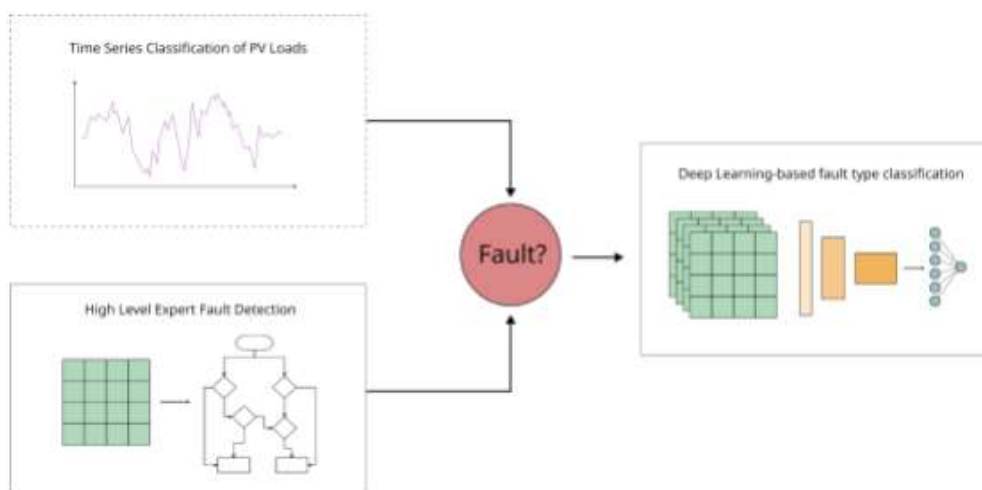


Abbildung 5: Two-step classification Konzept unter Einbindung unterschiedlicher Klassifikationsansätze.

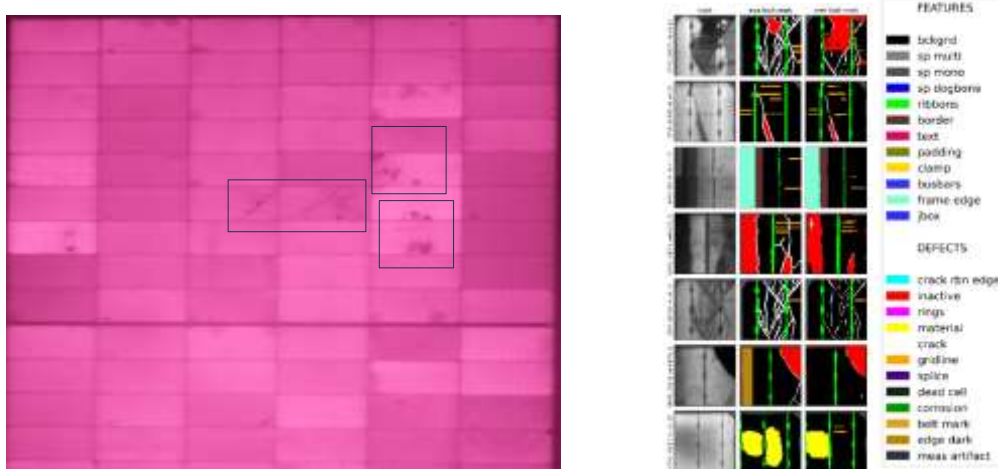


Abbildung 6: EL-Aufnahme eines fehlerhaften Moduls, Zellbrüche und inaktive Bereiche gekennzeichnet (links) Fehlererkennung und -klassifizierung (rechts).

Die Fehlererkennung und -klassifizierung erfolgt in mehreren Stufen: Die aufgenommenen EL-Fotos werden in Einzelfotos der PV-Zellen mit 256x256 Pixel skaliert. Danach erfolgt die Erkennung von möglichen Fehlerstellen mittels KI-Algorithmus, die betroffenen Stellen werden farblich gekennzeichnet. Im nächsten Schritt werden die erkannten Zellbereiche nach einem Fehlerkatalog analysiert und klassifiziert. Diese drei Schritte sind in der Abbildung 6 dargestellt.

4 Ergebnisse und Ausblick

Zuerst wurde eine EL-Kamera gebaut, die Diagnosemethode im Labor entwickelt und getestet, bevor sie an bestehenden PV-Anlagen validiert wurde. Zur Erreichung einer effizienten Inspektion auch an schwer zugänglichen Stellen befindet sich eine Drohne mit ferngesteuerter EL-Kamera im Testeinsatz. Parallel dazu wurde ein System entwickelt, das in Kombination mit Domain-Informed KI-Algorithmen eine zuverlässige Zustandsdiagnose der Module ermöglicht. Die Kombination von Drohnentechnologie und KI-gestützter Auswertung ermöglicht eine umfassende Schadensanalyse.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts "Diagnose, Klassifikation und Wiederverwertung von PV-Modulen" (kurz PV DiKlaWi [2]) durchgeführt, welches aus Mitteln des Zukunftsfonds Steiermark gefördert wurden.

Ein großer Dank auch an die Projektpartner, Forschungsbereich Integrale Gebäudetechnik der TU Wien, Gerald Schweiger und Johannes Exenberger

Literatur

[1] Hollinger Marc: „Drohnenassistierte Fehlerdiagnose von Photovoltaikmodulen mittels Elektrolumineszenz“, Masterarbeit 2023, FH Joanneum: <https://epub.fh-joanneum.at/obvfjhjs/download/pdf/9227556>

[2] DiKlaWi Projektseite: <https://www.fh-joanneum.at/projekt/diagnose-klassifikation-und-wiederverwertung-von-photovoltaiksystemen/>