

Degradationsuntersuchungen an Cadmiumtellurid-PV-Modulen im Rahmen des Projektes PV-FeldLab

Lukas Gerstenberg, Amélie Oberdorfer, Viktor Wesselak, Sebastian Voswinkel

Institut für Regenerative Energietechnik, Hochschule Nordhausen,

Weinberghof 4, 99734 Nordhausen

lukas.gerstenberg@hs-nordhausen.de

Abstract

Für eine reproduzierbare Vermessung der Strom-Spannungs- (IV) Kennlinie von Cadmiumtellurid- (CdTe) Dünnschicht-PV-Modulen müssen diese vor der Messung stabilisiert werden. Der in DIN EN 61215-1 definierte Ansatz zur Stabilisierung wird vorgestellt und eine daraus abgewandelte Methode auf ihre Verlässlichkeit hin überprüft. Es zeigt sich, dass bereits nach einer Bestrahlungsdauer von acht Stunden bei 1000 W/m^2 (8 kWh/m^2) und einer Temperatur von $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ein stabiler Modulzustand erreicht ist.

Bei Untersuchungen zur potentialinduzierten Degradation (PID) wird der fließende Leckstrom als ein Indikator für eine voranschreitende Schädigung der Module verwendet. Im zweiten Teil wird eine Methode zur Bestimmung der Leckstropfpfade vorgestellt. Für die verwendeten Superstrat Glas-Glas-Module fließt der wesentliche Anteil des Gesamtleckstroms durch das Frontglas. Die Bestimmung der Leckstropfpfade dient als Voruntersuchung für zukünftig folgende Freifeld- sowie Klimakammeruntersuchungen.

1. Einleitung

Die Leistung von Photovoltaik- (PV) Modulen wird in Form einer linear abnehmenden Leistungsgarantie seitens der Hersteller abgesichert. Dabei wird nach zehn Jahren Betrieb noch eine maximale Modulleistung von 90 Prozent und nach 20 Jahren noch eine maximale Modulleistung von 80 Prozent, bezogen auf die maximale Leistung im Auslieferungszustand, garantiert. Für eine Vermessung der IV-Kennlinie von PV-Modulen werden diese üblicherweise vom jeweiligen Einsatzort, sei es eine Dach- oder Freifeldanlage, zu einem Labor transportiert. Hier können reproduzierbar IV-Kennlinien, Elektrolumineszenzaufnahmen und weitere Messungen durchgeführt werden. Nach Durchführung aller Messungen werden die Module zum Einsatzort zurücktransportiert und wieder am PV-Generator montiert. Diese Prozedur verursacht neben hohen Kosten für den Transport und die Handhabung aller Module einen Ausfall des PV-Generators. Ziel des Projektes PV-FeldLab (Photovoltaik Feldlabor) ist die Entwicklung eines Gesamtkonzeptes zur reproduzierbaren Vermessung ganzer PV-Generatoren im Freifeld, wobei die Messung mit Laborgenauigkeit durchgeführt werden sollen.

An der Hochschule Coburg (HSCo) wird die Messtechnik zur Vermessung von PV-Strings weiterentwickelt. Hinzu kommt die Untersuchung der Korrelation zwischen String-IV-Messung und Thermographieaufnahmen von PV-Generatoren. An der Hochschule Nordhausen (HSN) wird die Alterung von PV-Modulen und Strings untersucht, um durch die Kenntnis des Alterungsverhaltens einen Rückschluss auf den Modulzustand zu schließen. Mit Hilfe von Freifelduntersuchungen und beschleunigten Degradationstests im Labor kann eine Bestimmung der Lebensdauer sowie eine genaue Analyse des Modulzustands erfolgen. Ebenfalls ist hier die Unterscheidung zwischen Degradation und metastabilen Zuständen bei Dünnschichtmodulen von großem Interesse. Durch eine Zusammenführung der Arbeiten beider Hochschulen wird es ermöglicht, bestehende Großanlagen mittels Freifeldmessungen in Gänze zu analysieren und schadhafte Module zu lokalisieren.

2. Metastabile Zustände von CdTe-Dünnschicht-PV-Modulen

Dünnschicht-PV-Module, insbesondere Cadmiumtellurid (CdTe) Dünnschicht-PV-Module weisen zeitlich instabile Modulparameter auf. Dies äußert sich vor allem in einer Veränderung der Leerlaufspannung von bis zu 9 Prozent und einer Änderung der Modulleistung von bis zu 20 Prozent [1]. Erschwerend kommt hinzu, dass neben den Modulparametern auch die Temperaturkoeffizienten für eine Umrechnung der IV-Kennlinie auf andere Temperaturen und Bestrahlungsstärken abhängig vom Modulzustand um bis zu 50 Prozent schwanken können [2]. Diese Metastabilen Zustände werden durch eindringendes Kupfer verursachte Defektstellen im CdTe-Absorber begründet, die eine Verschlechterung des Wirkungsgrades verursachen [3].

Für die Stabilisierung von PV-Modulen vor einer IV-Messung gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Beim Lightsoaking werden PV-Module bei einer definierten Temperatur und einer definierten Bestrahlungsstärke so lange bestrahlt, bis sich die Modulparameter nicht weiter verändern. Ähnliche Effekte lassen sich durch Bestromung der Module in Durchlassrichtung erzielen.

2.1 Lightsoaking

Eine allgemeine Vorgabe für das Lightsoaking ist in DIN EN 61215-1:2017 [4] gegeben. Die Parameter für die Bestrahlung sind wie folgt definiert:

- $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- $E = 43 \text{ kWh/m}^2$
- $\Delta P < 2 \%$
- Modulklemmen offen

Hierbei ist G die Bestrahlungsstärke, ϑ_m die Modultemperatur, E die Bestrahlungsmenge und ΔP die Leistungsänderung zwischen den Messungen. Das zu stabilisierende Modul wird zunächst im Anfangszustand vermessen. Anschließend erfolgt die Bestrahlung bei den gegebenen Parametern. Nach einer Bestrahlungseinheit von 43 kWh/m^2 wird das Modul auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt und erneut die IV-Kennlinie gemessen. Der Leistungsunterschied zur vorherigen Messung wird nach Gleichung (Gl.) (1) bestimmt. Die Prozedur wird so häufig wiederholt, bis die geforderte Leistungsänderung unterhalb des geforderten Wertes liegt.

$$\Delta P = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{mean}} \quad (1)$$

In den technologiespezifischen Teilen der Norm sind angepasste Kennwerte für unterschiedliche Technologien genannt. Für CdTe-PV-Module sind die Kennwerte nach DIN EN 61215-1-2 [5] definiert:

- $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- $E = 20 \text{ kWh/m}^2$
- $\Delta P < 2 \%$
- Modulklemmen offen
- STC Messung 30 bis 60 Minuten nach Stabilisierung

Im Gegensatz zur allgemeinen Beschreibung der Stabilisierung ist im technologiespezifischen Teil für CdTe-PV-Module die Zeit zwischen der Bestrahlung und der STC-Messung genau definiert. Eine Messung der IV-Kennlinie darf frühestens 30 Minuten nach der Bestrahlung erfolgen und muss spätestens 60 Minuten nach der Bestrahlung erfolgen. Hierdurch wird eine Abkühlung des Moduls innerhalb der 30 Minuten ermöglicht. Weiterhin wird sichergestellt, dass das Modul nicht beliebig lange dunkel gelagert wird, bis es vermessen wird.

Häufig weichen die Herstellerempfehlungen für die Stabilisierung der Module von der vorgestellten Norm ab. Im Falle der hier verwendeten CdTe-Module werden folgende Parameter zur Stabilisierung der Module empfohlen:

Tab. 1: Herstellerempfehlung für die Stabilisierung von CdTe-Modulen

Parameter	Einheit	Minimum	Median	Maximum
Temperatur	°C	70	75	80
Zeit	h	36	40	44
Strom	A	0	0	0
Bestrahlungsstärke	W/m ²	800	1000	1050
Temperaturhomogenität	%	0	2,5	5
Lichthomogenität	%	0	5	10

Für die Vermessung der IV-Kennlinien mehrerer Module einer Versuchsreihe ist eine zügige Stabilisierung notwendig, um den Zeitaufwand der Messreihen nicht weiter zu verlängern. Es muss das Optimum aus Stabilität der Kennwerte und dem minimalen Zeitaufwand gefunden werden. Hierzu wurden CdTe-Module bei der empfohlenen Temperatur von 75 °C und der empfohlenen Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² in Abschnitten von 4 kWh (entspricht vier Stunden Bestrahlung) bestrahlt und anschließend die Kennlinie bei STC gemessen. Die gemessenen IV-Kennlinien sind beispielhaft für das Modul M2 in Abbildung (Abb.) 1 dargestellt.

Tab. 2: Leistungsänderung nach Gl.1 nach jeweils 4 kWh bei Bestrahlung eines CdTe-Dünnschichtmoduls bei 1000 W/m² und 75 °C

Bestrahlungsmenge	4 kWh/m ²	8 kWh/m ²	12 kWh/m ²
ΔP	14,9 %	1,6 %	0,8 %

Die IV-Kennlinie vor der Bestrahlung (rot) zeigt eine Leerlaufspannung des Moduls von 60,1 V. Die maximale Leistung beträgt 103,4 W und der Füllfaktor beträgt 63,9 %. Bereits nach der ersten Bestrahlungseinheit von 4 kWh ist eine Veränderung der Leerlaufspannung auf 63,5 V und eine Zunahme der Leistung auf 120,1 W zu erkennen. Die Änderung der Leistung nach Gl. (1) beträgt hier 14,8 % (Tab. 2). Nach weiteren vier Stunden Bestrahlung, also insgesamt nach acht Stunden Bestrahlung, beträgt die maximale Leistung des Moduls 122,0 W. Die Änderung der Leistung beträgt nun 1,5 %. Wendet man das Abbruchkriterium aus DIN EN 61215-1 an, so gilt das Modul bereits nach acht Stunden als stabilisiert. Bei weiterer Bestrahlung des Moduls für insgesamt zwölf Stunden zeigt sich in der IV-Kennlinie nur noch eine geringfügige Änderung der Leerlaufspannung. Die Leistungsänderung zwischen acht und zwölf Stunden beträgt noch 0,8 %. Für Messungen innerhalb von Versuchsreihen werden alle CdTe-Module für acht Stunden bei 1000 W/m² und 75 °C stabilisiert.

Insgesamt ist ein Abbruchkriterium von 2 % in Frage zu stellen, da nur die wenigsten Messeinrichtungen die Leistung eines PV-Moduls mit einer Messgenauigkeit von unter 2 % messen können.

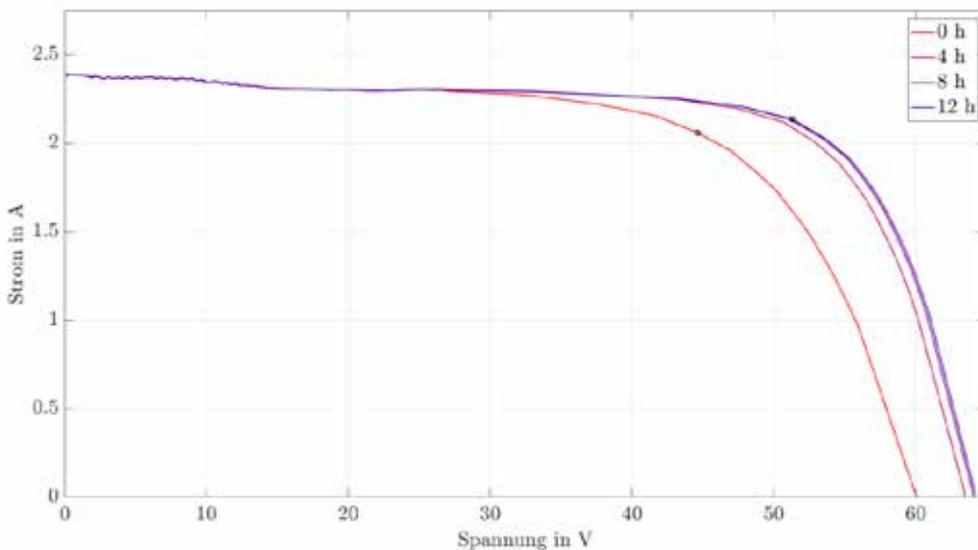


Abb. 1: IV-Kennlinien eines CdTe-Moduls nach jeweils 4 kWh/m² Lightsoaking

2.2 Bestromung

Als Alternative zum zeitintensiven Bestrahlen der Module kann eine Stabilisierung durch Bestromung der Module in Durchlassrichtung erfolgen. In [7] wurde folgender Ablauf untersucht:

- Aufheizen des Moduls auf 85 °C bei <180 K/h
- Beaufschlagung mit dem 0,9 bis 1,0-fachen der Leerlaufspannung für 1,5 h
- Bestromung beenden und Modul auf 25 °C abkühlen mit <180 K/h
- IV-Messung bei STC
- $\Delta P < 2 \%$

Der Ablauf wird wiederholt, bis sich auch hier eine Leistungsänderung von unter 2 % einstellt. Die Ergebnisse in [6] und [7] zeigen eine ähnliche Wirkung der Stabilisierung wie bei der Bestrahlung mit Licht. Allerdings verlieren die Module bei Dunkellagerung schneller und in höherem Maße an Leistung als Module, die durch Bestrahlung stabilisiert wurden. Im Projektverlauf wird dieses Verhalten durch eigene Untersuchungen überprüft. Hierbei wird die Möglichkeit überprüft, Module vor einer IV-Messung im Freifeld elektrisch zu stabilisieren. Sofern dies gelingt, kann eine Umrechnung der IV-Kennlinie auf andere Temperaturen mit geringeren Abweichungen erfolgen.

3. Leckstrompfadanalyse

3.1 Einleitung

Werden Photovoltaikmodule zu einem String in Reihe zusammengeschaltet, entstehen Systemspannungen von bis zu ± 1000 V. Zwischen der Aufständering und den aktiven Schichten eines Photovoltaikmoduls tritt eine Potentialdifferenz auf, die sich abhängig vom Wechselrichtertyp einstellt. Diese Potentialdifferenz verursacht einen Stromfluss I_{leak} , welcher als Leckstrom bezeichnet wird. Der Leckstrom, genauer gesagt die aufsummiert übertragene Ladungsmenge, wird bei Alterungsuntersuchungen als Indikator für eine voranschreitende potentialinduzierte Degradation eines Moduls verwendet.

Bei Superstrat-Dünnschicht-PV-Modulen äußert sich potentialinduzierte Degradation in Form einer TCO-Korrosion. Das transparente leitfähige Oxid (englisch: transparent conductive oxide, TCO) hat bei Superstratmodulen direkten Kontakt mit dem Frontglas. Liegt aufgrund der Anlagentopologie am Modulinneren ein negatives Potential an, so führt dies zu einer Wanderung von positiven Natrium-Ionen aus dem Frontglas in die die TCO-Schicht. Die Natrium-Ionen reagieren mit den freien Elektronen zu elementarem Natrium. Durch die Reaktion mit eindiffundiertem Wasser entsteht Natronlauge, welche

eine sichtbare Korrosion und Ablösung (Delamination) der TCO-Schicht hervorruft. Da nachgewiesen wurde, dass eine Korrelation zwischen der Höhe der beaufschlagten Spannung und dem mit der Degradation einhergehenden Leistungsverlust besteht, wird der Leckstrom als Indikator für das Voranschreiten von Mechanismen potentialinduzierter Degradation angesehen [8].

Es bilden sich verschiedene Pfade innerhalb des Moduls aus, über welche der Leckstrom fließen kann. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Pfade. Dazu zählen:

- die Modulbauweise (ob mit Rahmen oder Rahmenlos),
- die Anordnung des Systems (Systemtopologie),
- die Verkapselungsmaterialien und die Antireflexbeschichtung,
- die Erdungsbedingungen des DC-Strangs und des Wechselrichters,
- Temperatur, Feuchtigkeit und Kondensation. [9]

Eine Leckstrompfadanalyse erlaubt eine Aussage über das Schadenspotential der einzelnen Leckstrompfade. Zusammen mit den Degradationsraten von beschleunigten künstlichen Alterungstests im Vergleich zum real auf dem Freifeld gemessenen Leckstrom ist eine Berechnung der Lebensdauer möglich.

3.2 Versuchsaufbau

Untersucht wurden im Rahmen des Projekts PV FeldLab die Leckstrompfade eines CdTe Moduls. Das Modul ist rahmenlos und besitzt eine Kantenversiegelung aus Butyl. In Abb. 2 sind die möglichen Leckstrompfade durch das Glas-Glas-Modul dargestellt. Als Kontaktpunkt für die Spannungsquelle ist eine Klemme eingezeichnet. Der Leckstrompfad I_1 führt von der Modulklemme über das Frontglas in die Zelle. Der Strompfad I_4 führt von der Klemme über das Rückglas durch die Verkapselung in die Zelle. Die Pfade I_2 und I_3 führen von dem Modulrand in die Zelle, wobei I_3 an der Grenzfläche zwischen Frontglas und Verkapselung bzw. Kantenversiegelung verläuft und I_2 sowohl die Kantenversiegelung als auch die Verkapselung durchdringt.

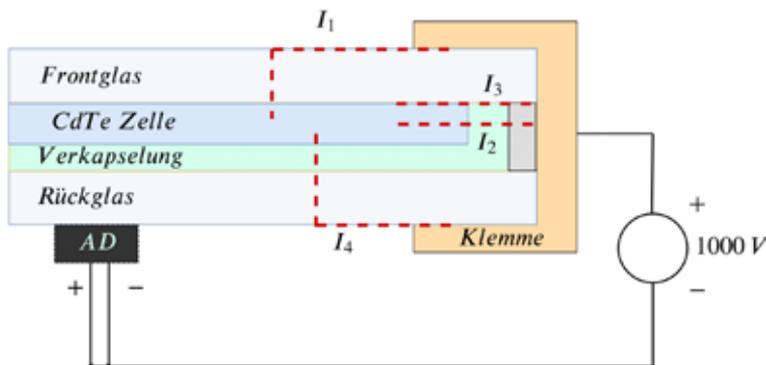


Abb.2: Leckstrompfade durch das Superstrat Glas-Glas-Modul

Zur gezielten Aktivierung der einzelnen Leckstrompfade wird ein Versuchsaufbau mit einem temperierten demineralisierten Wasserbad verwendet. Der Minuspol einer Gleichspannungsquelle wird mit den kurzgeschlossenen Modulklemmen verbunden und der positive Pol der Spannungsquelle wird mit dem Wasserbad verbunden. Der positive Pol des Spannungsnetzteils wird geerdet. Das Modul wird entweder mit dem Front- oder Rückglas oder komplett in das Wasserbad getaucht. Durch die vollflächige Kontaktierung des Frontglases, welche mit der Verwendung von Wasser gewährleistet ist, kann der Strompfad I_1 aktiviert werden, durch die vollflächige Kontaktierung des Rückglases der Leckstrompfad I_4 . Über das vollständige Eintauchen des Moduls lässt sich der Gesamtleckstrom I_{leak} messen. Bei diesem Laboraufbau lassen sich die Ströme über den Modulrand I_2 und I_3 nicht einzeln messen. Die Summe aus I_2 und I_3 ergibt sich nach Gl. (2).

$$I_2 + I_3 = I_{\text{leak}} - I_1 - I_4 \quad (2)$$

Da der Stromfluss temperaturabhängig ist, wird versucht, während der einzelnen Messung eine konstante Temperatur zu halten. Über den Leckstrom der einzelnen Pfade bei unterschiedlichen Temperaturen kann die Aktivierungsenergie E_A der einzelnen Leckstrompfade bestimmt werden. Die Aktivierungsenergie ist die notwendige Mindestenergie, die überschritten werden muss, damit die Reaktionspartner den energetisch günstigeren Zustand einnehmen können. Diese Energiebarriere muss bei vielen chemischen und physikalischen Reaktionen überwunden werden. Wird der Leckstrom logarithmisch über der inversen Temperatur aufgetragen, ist aus der Steigung des Arrheniusgraphen die Aktivierungsenergie ablesbar. Es wurden mehrere Temperaturen zwischen 15 °C und 50 °C eingestellt, um die Temperaturabhängigkeit auswerten zu können.

Die negative Spannung wurde bei der Untersuchung der einzelnen Leckstrompfade jeweils fünf Minuten eingeschaltet, sodass sich ein konstanter Strom einstellen konnte. Eine Kreislumpumpe sorgte für eine gleichmäßige Temperaturverteilung des Wassers und somit für eine homogene Temperatur des Moduls.

3.3 Ergebnisse der Leckstrompfadanalyse

In Abb. 3 sind die verschiedenen Stromverläufe bei einer Modultemperatur von $\vartheta_M = 30\text{ °C}$ dargestellt. Der Strom I_1 durch das Frontglas ist in blau abgebildet. In rot ist der Strom I_4 durch das Rückglas zu erkennen. Über den Gesamtstrom I_{leak} , welcher gelb eingezeichnet ist, sind die Ströme I_2 und I_3 berechenbar. Ein stabiler Strom stellt sich erst nach einigen Minuten ein. Die stationären Stromwerte der einzelnen Messungen sind in Tab. 3 aufgeführt. Es fällt auf, dass der Strom bei Kontaktierung des Rückglases signifikant geringer ist als bei Kontaktierung des Frontglases. Der Strompfad I_1 durch das Frontglas ist demzufolge ausgeprägter als der Strompfad I_4 durch das Rückglas. Zu begründen ist das mit dem Vorhandensein der Verkapselungsfolie. Die Strompfade I_2 und I_3 durch den Rand des Moduls scheinen ein höheres Schadenspotential als der Strompfad I_4 zu haben, wobei dieser Effekt durch wiederholte Messungen zu bestätigen ist.

Tab. 3: Messwerte der Leckströme und Temperaturen bei der Leckstrompfadanalyse eines CdTe-Moduls. Stationärer Wert nach Einschwingvorgang aus Abb. 3

Strompfad	Strom in μA	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$
I_{leak}	8,76	34,3
I_1	6,72	33,5
I_4	0,15	33,0
$I_2 + I_3$	1,89	-

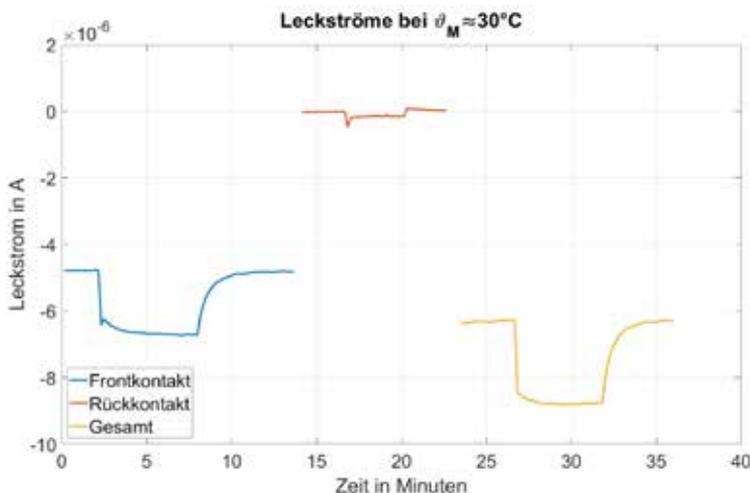


Abb. 3: Leckströme durch das CdTe-Modul. I_1 durch das Frontglas rot. I_4 durch das Rückglas gelb. Gesamtstrom I_{leak} blau

Bei der Installation der Module im Freifeld werden diese von Kautschukklemmen in Aluminiumschienen gehalten. Dabei hat die Klemme Kontakt zu allen Seiten des Moduls, insbesondere dem Frontglas. Die

Größe des Leckstroms bei Kontaktierung mit den Klemmen im Vergleich zum Leckstrom im Laborversuch müssen untersucht werden. Es ist davon auszugehen, dass eine Schädigung des Moduls durch potentialinduzierte Degradation an den Kontaktpunkten zwischen Modul und Klemme beginnt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung der CdTe-Module hinsichtlich der Stabilisierung hat gezeigt, dass die Module nach achtstündiger Bestrahlung mit 1000 W/m^2 bei $75 \text{ }^\circ\text{C}$ stabile Parameter aufweisen. Für zukünftige Laboruntersuchungen wie Klimakammertests und Zwischenmessungen von Modulen aus einem Freifeldaufbau kann so für jedes Modul reproduzierbar in verhältnismäßig kurzer Zeit eine IV-Kennlinie bei STC gemessen werden. Hierbei wird auf eine Umrechnung auf andere Temperaturen verzichtet. Im weiteren Verlauf wird eine Stabilisierung mittels Bestromung untersucht werden. Dieses Verfahren kann direkt im Freifeld eingesetzt werden, um Module vor einer IV-Messung im Freifeld zu stabilisieren. Durch die Leckstropfpfadanalyse der CdTe-Module wurde der Leckstropfpfad I_1 als wesentlicher Pfad mit dem höchsten Schadenspotential bestimmt. Bei Langzeituntersuchungen im Freifeld und bei beschleunigten Alterungstests in der Klimakammer wird diese Annahme überprüft werden. Weiterhin wird der Leckstromfluss bei einer Kontaktierung mit Modulklemmen ebenfalls im Laboraufbau überprüft und die Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit ermittelt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Cornaro, C. et al.: Outdoor characterization of CdTe technology and seasonal performance analysis at different latitudes in Europe. In: 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2017
- [2] Deline C. et al.: Transient response of cadmium telluride modules to light exposure. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, pp. 3113-3118, 2011
- [3] Guo, D. et al.: Cu Migration and its Impact on the Metastable Behavior of CdTe Solar Cells. MRS Proceedings, 2015
- [4] Norm DIN EN 61215-1:2017. Terrestrische Photovoltaik- (PV) Module – Bauarteignung und Bauartzulassung. Teil 1: Prüfanforderungen
- [5] Norm DIN EN 61215-1-2:2017. Terrestrische Photovoltaik- (PV) Module – Bauarteignung und Bauartzulassung. Teil 1-2 Besondere Anforderungen an die Prüfung von Photovoltaik(PV)-Dünnschichtmodulen aus Cadmiumtellurid (CdTe)
- [6] Deline, C. et al.: Metastable electrical characteristics of polycrystalline thin-film photovoltaic modules upon exposure and stabilization. In: J. Photon. Energy, 2012
- [7] Silverman, T. et al.: Performance Stabilization of CdTe PV Modules Using Bias and Light. 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2015
- [8] Lechner, P. et al.: Estimation of time to PID-failure by characterization of module leakage currents. In: Proc. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib., 2012, pp. 3152–3156
- [9] Luo, W. et al.: Potential-Induced degradation in photovoltaic modules: A critical review. Energy Environ. Sci., 2016