



Projektabschlussbericht (gemeinsamer Bericht aller Partner)

Zuwendungsempfänger: Hochschule Ulm Manz CIGS Technology GmbH, ZSW Stuttgart	FKZ 0325148D/E/F
„Reliability von CIS-Dünnschichtsolarzellen“ RECIS II	
Laufzeit des Vorhabens:	01.11.2012 – 31.10.2015 (kostenneutral verlängert bis 30.4.2016)
Berichtszeitraum:	01.11.2012 – 30.04.2016

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung zu:.....	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	3
1.2.	Voraussetzungen, untern denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2.	Eingehende Darstellung	10
2.1.	Detaildarstellung der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
2.2.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	33
2.3.	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	34
2.4.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	34
2.5.	Veröffentlichungen	35
3.	Schlusswort und Ausblick	36
4.	Abbildungsverzeichnis.....	37

1. Kurze Darstellung zu:

1.1. Aufgabenstellung

Übergeordnete Ziele des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel ist – wie bereits beim Vorgängerprojekt RECIS I - die Minimierung der Herstellkosten durch Weiterentwicklung der bestehenden Technik und innovative Lösungen. Gleichzeitig soll das Langzeitverhalten der Module sichergestellt werden. Dies beinhaltet sowohl die STC Leistung als auch den für den Kunden relevanten Jahresenergieertrag.

Aufgrund des – im Vergleich zum kristallinen Silizium - noch geringen Reifegrades der CIGS-Technologie und des immer noch höchst innovativen Charakters der CIGS-Technologie sind die Potentiale bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Zur weiteren Etablierung der CIGS-Technik als marktgängiges PV-Produkt sind diese Weiterentwicklungen und Innovationen notwendig. Damit ist die Notwendigkeit verknüpft, die Produktqualität abzusichern, um im weltweiten Wettbewerb bestehen zu können.

RECIS II

Ein zentraler Punkt für die Wettbewerbsfähigkeit sind neben der Kostenstruktur die erzielten Modulwirkungsgrade, das Ertragsverhalten sowie die Zuverlässigkeit dieser Materialien. Daraus ergeben sich folgende Rahmenbedingungen:

- Hoher Kostendruck und damit hoher Innovationsdruck.
- Rigorose Zuverlässigkeitsanforderungen unter harten Umweltbedingungen im Feld.
- Geforderte Betriebsdauer > 20 Jahre (Tendenz zunehmend).
- Bei Nichterfüllung der Zuverlässigkeitsanforderungen drohen Imageverlust und Rückrufaktionen.
- Die Produktentwicklungszyklen bzw. die Einführung neuer Prozesse sind deutlich kürzer als die geforderten Lebensdauern, sodass eine eigentliche Verifikation der geforderten Lebensdauer während eines Produktzyklus nicht darstellbar ist. Die notwendige Konsequenz hieraus ist die Entwicklung von Zuverlässigkeitstests und Lebensdauermodellen, die über Beschleunigungsfaktoren Aussagen über das Langzeitverhalten und somit über die Zuverlässigkeit ermöglichen.

Im Rahmen des Vorgängerprojektes „RECIS“ konnten einerseits bereits erste wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Diese sind in den entsprechenden Projektberichten ausführlich beschrieben. Andererseits ergeben sich aus dem RECIS neben der Fortführung der bisherigen sinnvollen Aufgaben auch weiter gehende Aufgaben und Notwendigkeiten, die im RECIS II bearbeitet werden sollten. Ein weiteres Themenfeld ergab sich aus dem Langzeit-Thema „PID“ (Potential Induced Degradation).

Dieses Thema hat beim kristallinen Silizium in den letzten Jahren zunehmend an Brisanz gewonnen. Im Bereich Dünnschicht gibt es bereits etliche Untersuchungen, hier i.w. allerdings für das amorphe Silizium. Untersuchungen im Labor auf Modulebene waren bereits in einem BMU geförderten Projekt (CISeffTec) angesiedelt. In Abgrenzung dazu **sollten im hier beantragten Projekt gezielt die tieferen physikalischen und chemischen Zusammenhänge, zunächst auf Zellebene untersucht werden.** Hierzu sollten sowohl aufwändige Analytik als auch die Simulation des Bauelements herangezogen werden.

Daraus ergaben sich folgende Aufgaben und Ziele für **RECIS II**:

- Definition der Langzeitanforderungen aus aktueller Sicht (⇒ AP 1)
- Herstellung von CIGS Solarmodulen unter Verwendung innovativer Prozessschritte (⇒ AP 2)
- Durchführung von Stresstests und Dauerläufen (auch Kombinationen von unterschiedlichen Belastungen) an CIS-Dünnschichtsolarzellen, Bestimmung von Parameterdriften und Analyse der Fehlerbilder. Die Experimente sollen mit einer ausreichenden Anzahl an Testmustern (⇒ Automatisierung / Parallelisierung der Tests) durchgeführt werden, so dass eine sichere Aussage möglich ist. (⇒ AP 3)
- Evaluierung der physikalischen und ggf. chemischen Ursachen für Parameterdriften (Grenzflächenphänomene, thermisch aktivierte Prozesse etc.). (⇒ AP 4)
- Entwicklung von Lebensdauermodellen, die eine Extrapolation der Zuverlässigkeit unter realen Feldbedingungen erlauben. (⇒ AP 4)
- Charakterisierung und Bewertung neuer Prozesse und neuer Materialien in Hinblick auf die Zuverlässigkeit. (⇒ AP 5)
- Aufnahme von Lastprofilen im Feld bzw. Verwendung von externen Datensätzen. (⇒ AP 6)
- Verifikation der Modelle anhand von CIS-Modulen - gleicher Bauart, wie im Labor untersucht – im Feldtest. (⇒ AP 6)
- Entwicklung schneller Bauteiltests, die produktionsbegleitend Aussagen über das Langzeitverhalten und die Zuverlässigkeit liefern (⇒ AP 7)

Die übergeordneten Entwicklungsthemen bedeuten eine Optimierung über die gesamte Prozesskette.

1.2. Voraussetzungen, untern denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Partner und deren technologische wie auch messtechnische Ausstattung einerseits sowie das tiefe technologische Know How im Bereich der CIS-Dünnschicht-Technologie ergaben eine gute Grundlage für den Projekterfolg.

Die Partner verfügen über eine mehr als 25-jährige Erfahrung in der Entwicklung von CIGS-Solarzellen. Das ZSW bearbeitete dieses Projekt im Kontext eines Geflechts anderer parallel

laufender Vorhaben, u.a. „CISEffTec“ (FKZ 0329585G), „CISProTec“ (FKZ 0325715) und „CISProTec II“ (FKZ 0325715A). Die Hochschule Ulm verfügt mit Prof. Th. Walter über einen ausgesprochenen Experten auf dem Gebiet der CIGS–Dünnschichttechnologie, der außerdem in der Wissenschaftswelt hervorragend vernetzt ist. Die MCT verfügt ebenso über eine hohe und langjährige Expertise im Bereich der CIGS–Dünnschichttechnik und ergänzt das Wissen der wissenschaftlichen Partner um produktionstechnische und anwendungstechnische Themen.

RECIS II war das Anschlussvorhaben von RECIS, welches eine Laufzeit von 01.08.2009 – 31.10.2012 hatte und mit der gleichen Konstellation von Partnern durchgeführt wurde.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In der folgenden Tabelle sind die Arbeitspakete mit der jeweiligen Zeitplanung (Stand Antrag) dargestellt.

WP #	Thema	WP-Leader	YEAR I				YEAR II				YEAR III			
			QI	QII	QIII	QIV	QI	QII	QIII	QIV	QI	QII	QIII	QIV
			Nov. 12	Feb. 13	Mai. 13	Aug. 13	Nov. 13	Feb. 14	Mai. 14	Aug. 14	Nov. 14	Feb. 15	Mai. 15	Aug. 15
AP1	Spezifikation	Manz												
AP2	Präparation	ZSW												
AP3	Analytik	HSU												
AP4	Modelle / Simulation	HSU												
AP5	Def. Testablauf	ZSW												
AP6	Felddaten	Manz												
AP7	Transfer	Manz												
AP8	Koordination	Manz												

Im Weiteren werden die Arbeitspakete stichpunktartig vorgestellt. Für eine ausführlichere Darstellung sei aus Platzgründen auf den Antrag verwiesen.

AP1: Spezifikation:

Inhalt und Ziele:

- Spezifikation der Zielgrößen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen
- Spezifikation der zu untersuchenden Materialien und Prozesse

Im AP1 werden die Zielgrößen der Zuverlässigkeit für die im Projekt durchzuführenden Dauerläufe und Stresstests erstellt. Insbesondere werden Zuverlässigkeitsparameter, die sich im

Vorläuferprojekt als kritisch herausgestellt haben, selektiert. Weiterhin werden die zu untersuchenden CIS-Solarzellen sowie alternative Prozesse und Materialien definiert. Die Spezifikation soll nach der Hälfte der Projektlaufzeit überprüft und ggf. aktualisiert werden.

AP2: Präparation

Inhalt und Ziele

Im Rahmen des Projektes sollen folgende zwei grundsätzlich unterschiedliche Probenarten präpariert werden.

- Proben, die an Anlagen zur großflächigen Abscheidung hergestellt wurden. Ziel ist, die in der Umsetzung befindlichen neuen Prozesse im Vergleich zum Standard im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit zu untersuchen. Diese Proben werden bei der Firma Manz hergestellt.
- Proben, die – auf Laborebene hergestellt - innovative Teilprozess-Variationen enthalten.
- Als Benchmark sollen Höchsteffizienzellen beim ZSW hergestellt werden.
- In enger Abstimmung mit AP3 und AP4 sollen die Erkenntnisse bei den Stresstests und deren Interpretation in eine verbesserte Präparation münden.

AP3: Analytik / Stresstests

Inhalt und Ziele

Analytik:

- Standardanalytik wie Strom-Spannungskennlinie (IU), Quanteneffizienz (QE) und Kapazitäts-Spannungsmessung (CV)
- Spezialanalytik, die sich unterteilen lässt in elektro-optische Methoden wie Dark Lock-In Thermographie (DLIT), Elektrolumineszenz (EL) und temperaturabhängige IU bzw. CV-Messungen sowie Materialanalytik wie z.B. Rasterelektronenmikroskopie (REM), Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX), Röntgenbeugung (XRD), Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS), Sekundärionen Massenspektrometrie (SIMS) und Glimmentladungsspektroskopie (GDOES).

Stresstests

- Potential Induced Degradation (PID) –Messung an Modulen und Zellen von MCT und ZSW mit eigenem Teststand
- Dauerläufe (d.h. thermisches annealing im Dunkeln ev. unter zusätzlichem Anlegen eines positiven oder negativen Spannungsbias)

AP4: Auswertung, Simulation und Modelle

Inhalt / Ziele:

Auswertung:

- Extraktion von Aktivierungsenergien und Zeitkonstanten aus Parameterdriften
- Design of Experiments (DOE) zur Klärung der Ursachen für die Degradation der Zellparameter
- Auswertung mit statistischen Methoden
- Simulation und Modellierung von CIS-Dünnschichtsolarzellen zur Interpretation von Degradationsmechanismen (SCAPS)
- Simulation der elektrostatischen Feldverteilung zur Interpretation von PID.
- Identifikation kritischer Zuverlässigkeitsparameter

Simulation und Modelle

- Nachbildung des beobachteten Verhaltens mittels Modellierungssoftware
- Plausibilitätsprüfung der Modellvorstellungen anhand von Gegenexperimenten oder Bezug zu anderen Proben

AP5: Definition Testablauf

Inhalt / Ziele:

- Definition des Prüflingsdesigns unter Einbeziehung der Fragestellungen (z.B. Einfluss Rückkontakt, Einfluss Interconnect, Einfluss Verkapselung,...)
- Definition, Dokumentation und Überwachung von standardisierten Testabläufen
- Enge Abstimmung mit AP3 und AP4, so dass Erkenntnisse bei den Messungen und deren Interpretation in einen verbesserten Testablauf / ein verbessertes Probendesign münden.

AP6: Felddaten

Inhalt / Ziele:

- Bereitstellung und Aufbereitung von externen Mess-Datensätzen für die Modellbildung der Degradationsmechanismen von CIS-Dünnschichtmodulen (möglichst incl. PID (Potential induced Degradation)). Datensätze (Modul-Leckströme, komplette Klimadaten) möglichst aus unterschiedlichen Klimazonen.
 - Leckstrom- und Klimadaten des ZSW sollen als Datenbasis in die Modellierung einfließen

- Ggf. externe Daten von Dritten
- Aufbau eines Outdoor-Testplatzes bei Manz. Monitoring der Modul-Kennlinien mit dem Ziel, diese Daten mit Indoor Stresstests zu korrelieren.

AP7: Transfer

Inhalt / Ziele:

- Entwicklung schneller Bauteiltests für Zuverlässigkeitsparameter
- Anwendbarkeit von Burn-In-Tests
- Implementierung in der Innovationslinie von Manz CIGS-Technology

AP8: Koordination

Inhalt / Ziele:

- Koordination des Projektes
- Organisation der Projekttreffen
- Controlling der Meilensteine
- Ansprechpartner und Kommunikation mit Projektträger
- Koordination der Berichte

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aktueller Stand im Vorläuferprojekt RECIS I zu Beginn des RECIS II.

In RECIS stehen folgende Fragestellungen im Mittelpunkt:

- Kritische Betriebsbedingungen für die Zuverlässigkeit von CIGS-Dünnschichtsolarzellen.
- Identifikation von Degradationsmechanismen.
- Optimierung der Prozessführung.
- Erstellung von Modellen, welche das Langzeitverhalten vorhersagen.
- Bewertung der Zuverlässigkeit.

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse aus RECIS I (als Ausgangspunkt für das RECISII) dargestellt und bewertet:

- Kritisch für die Stabilität der Zellen und Module ist die Spannung, welche über der Diode entsteht oder abfällt. Signifikante negative Parameterdriften wurden beobachtet, falls sich die Zelle im Kurzschluss (über lange Zeit) befindet. Unter Betriebsbedingungen – d.h. am MPP (positive Spannung an der Diode) – verhalten sich die Zellen und Module stabil. Insbesondere tritt zu Beginn eine graduelle Verbesserung der Parameter auf („light soaking“,

„current soaking“). Es konnte gezeigt werden, dass eben diese Spannung und nicht die Lichtabsorption an sich für die Stabilisierung verantwortlich ist.

- Ursachen für diese Parameterdriften liegen in einer Umverteilung der Ladung im Heteroübergang begründet. Geringe Dotierungen am Rückkontakt führen zu internen Barrieren, welche sowohl die Leerlaufspannung als auch den Füllfaktor negativ beeinflussen können („Phototransistor“). Eine Änderung der Dotierung im Bereich der Raumladungszone beeinflusst primär die Leerlaufspannung, während Barrieren an der Grenzfläche zu Einbußen im Füllfaktor und zur „blauen Metastabilität“ führen. Diese physikalischen Ursachen konnten größtenteils durch Simulationen mit SCAPS verifiziert werden.
- Über Kreuzversuche mit unterschiedlichen Absorber- und Fensterschichten konnte der Einfluss auf die Zuverlässigkeit untersucht werden. Es zeigte sich hierbei, dass sowohl die Prozessführung des Absorbers wie auch des Fensters einen signifikanten Einfluss ausüben. Die am ZSW gefertigte Weltrekordzelle wies eine ausgezeichnete Stabilität auf.
- Aus Dauerläufen bei unterschiedlichen Temperaturen wurden Aktivierungsenergien extrahiert, womit auf das Langzeitverhalten unter Betriebsbedingungen extrapoliert werden konnte. Es konnte gezeigt werden, dass die Entwicklung von Barrieren an der Grenzfläche und die Reduzierung der Dotierung am Rückkontakt mit sehr langen Zeitkonstanten einhergehen und von daher als unkritisch (unter realen Betriebsbedingungen) einzuschätzen sind. Die Änderung der Dotierung in der Raumladungszone, welche primär die Leerlaufspannung beeinflusst, läuft hingegen auf einer deutlich kürzeren Zeitskala ab. Für diese Parameterdriften wurde eine anliegende Spannung, wie am MPP gegeben, als stabilisierende Maßnahme erkannt.
- Generell konnte gezeigt werden, dass sich CIGS-Module gerade unter realistischen Betriebsbedingungen stabil verhalten. Die Kombination verschiedener Stressbedingungen und neue Degradationsmechanismen werden in RECIS II adressiert.
- Eine sogenannte Kleinzellenlinie für die Herstellung von hocheffizienten CIGS-Zellen. In dieser Linie konnte der Weltrekordwirkungsgrad für CIGS-Solarzellen realisiert werden. Im Projektzeitraum konnte dieser von 20.3% (2012) auf 22.6% (2016) gesteigert werden.
- Eine Modullinie für Substrate der Größe bis zu 30x30cm². Damit war es möglich, Kleinmodule (10x10cm²) mit Wirkungsgraden bis 16,8% bzw. mehrere Testzellen homogen mit einem Wirkungsgradniveau bis 19,6% herzustellen. Auch die von MCT für Kreuzversuche bereitgestellten Proben konnten in der ZSW-Modullinie problemlos weiter verarbeitet werden.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektarbeiten wurden zum größten Teil – auch aufgrund der notwendigen Vertraulichkeit – ausschließlich innerhalb des Konsortiums durchgeführt. Das dazu notwendige Know How war bei den Projektpartnern verfügbar.

Parallel fand bei Teilaspekten ein – aufgrund der guten Vernetzung effektiver - Austausch mit der Wissenschaftswelt statt.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Detaildarstellung der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Projektes – sofern sinnvoll und möglich – nach Arbeitspaketen gegliedert vorgestellt.

Um den Bericht möglichst schlüssig, verständlich und kurz zu halten, werden die Arbeitspakete AP2 (Durchführung von Dauerläufen) und AP3 (Analyse von Fehlerbildern und Parameterdriften) inclusive einer weiterführenden Analytik in einem gemeinsamen Kapitel vorgestellt.

2.1.1. Spezifikationen (AP1)

Die Lebensdaueranforderungen wurden i.W. vom Vorgängerprojekt übernommen.

Die geforderten Zuverlässigkeitsparameter wurden im Projekt definiert. Die Anteile der verschiedenen Schädigungsmechanismen hängen allerdings sicherlich auch noch von der betrachteten Klimazone ab. Ein Beispiel: in einer feuchten und eher kühlen Witterung wird der PID-Effekt dominieren, während die Alterung aufgrund eines Wärmeeintrages eine untergeordnete Rolle spielt.

An dieser Stelle müssen wir uns eingestehen, dass wir mit den Arbeiten noch relativ am Anfang stehen. Für eine gute wissenschaftliche Aussage müssen die Aktivierungsenergien für jeden einzelnen Schädigungsprozess zunächst separat ermittelt werden. Darüber hinaus müssen mögliche Kreuzkorrelationen berücksichtigt werden.

2.1.2. Präparation (AP2)

Im Rahmen des Projektes wurden bei den Partnern ZSW und MCT eine Vielzahl an Proben präpariert. Hierbei handelt es sich sowohl um Standardpräparationen als auch Sonderpräparationen (speziell für die PID-Untersuchungen)

Sofern ein Prozess vom Standardablauf abwich, wurden vorab meist bereits entsprechende Vorversuche gefahren.

2.1.3. Dauerläufe, Analyse und Modellvorstellungen von Fehlerbildern und Parameterdriften (AP3 und AP4)

Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen RECIS II lag aufgrund des Marktdruckes bei den PID-Untersuchungen. Ziel hierbei ist, ein tieferes Verständnis für die Vorgänge im Halbleiter / im Zellaufbau zu gewinnen. Verbesserungsmaßnahmen im Bereich der Modultechnik wurden im Rahmen dieses Projektes nicht näher betrachtet.

Neben den PID-Untersuchungen wurden zudem Dauerläufe bei erhöhter Temperatur, Einstrahlung und ggf. Vorspannung durchgeführt. Die Fehlerbilder beider Belastungsszenarien werden miteinander verglichen.

In diesem Abschnitt werden in Unterkapitel 2.1.3.1 zunächst die an der HSU durchgeführten Dauerläufe und die im Anschluss daran durchgeführte Analyse der Fehlerbilder und Parameterdriften vorgestellt.

Im sich anschließenden Kapitel 2.1.3.2 wird dann die im Rahmen des Probendurchlaufs abgesprochene begleitende und weiterführende Analytik am ZSW vorgestellt.

2.1.3.1. Dauerläufe und Analyse von Fehlerbildern und Parameterdriften an der HSU (AP3 und AP4)

I. Dauerläufe unter angelegter Spannung

Im Vorgängerprojekt RECIS I war erkannt worden, dass die untersuchten CIGS-Zellen empfindlich auf Dauerläufe unter angelegter negativer Spannung reagieren. Diese Dauerläufe wurden in RECISII wiederaufgegriffen, um einerseits diesen Sachverhalt zu verifizieren und um andererseits eine größere Statistik zu erhalten. Weiterhin sollten evtl. Auswirkungen von Prozessänderungen beim Projektpartner Manz untersucht werden. In Abbildung 1 bis Abbildung 5 sind Parameterdriften bei Dauerläufen (105 °C) unter angelegter Spannung (+0.4 V, -0.4 V, ub (unbiased)) dargestellt.

Die Leerlaufspannung (ub und +0.4 V) weist nur geringe Parameterdriften auf, während ein negativer bias von -0.4 V zu einem signifikanten Absinken dieses Parameters führt. Der Füllfaktor weist einen ähnlichen Verlauf auf, wohingegen der Photostrom nur bei positivem bias (+0.4 V) sinkt, was über eine erhöhte Dotierung und reduzierter Weite der Raumladungszone erklärt werden kann. Der in Abbildung 5 dargestellte Verlauf der Kapazität bei 0 V verdeutlicht diese Interpretation. Unter positivem bias während des Dauerlaufes steigt die Sperrschichtkapazität signifikant, während sie bei negativem bias bis zur geometrischen Kapazität absinkt. D.h. die Raumladungszone reicht bis zum Rückkontakt. Diese Ergebnisse bestätigen in weiten Bereichen die Erkenntnisse aus RECIS. Allerdings sind die Parameterdriften wohl aufgrund von Prozessänderungen beim Partner Manz weniger signifikant, was insbesondere auf Parameterdriften der Leerlaufspannung zutrifft. Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass ein negativer bias während der Dauerläufe als kritischer

Zuverlässigkeitsparameter angesehen werden muss, der insbesondere die Dotierung und wohl als Konsequenz ebenfalls die Leerlaufspannung beeinflusst.

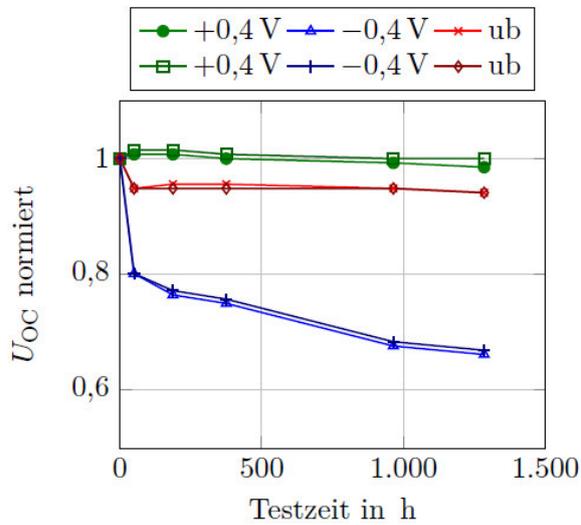


Abbildung 1: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: Voc

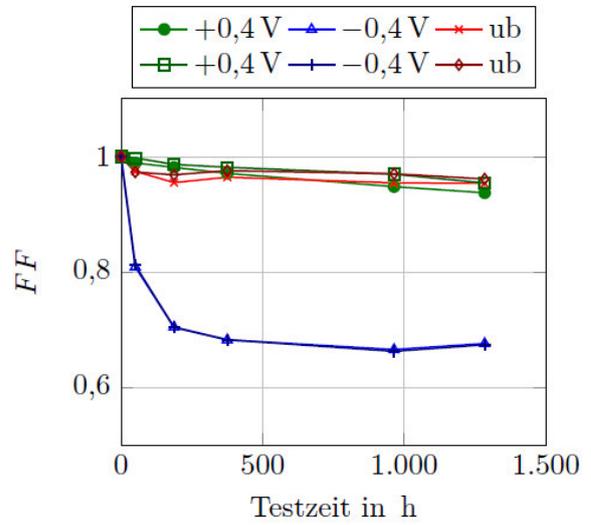


Abbildung 2: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: ff

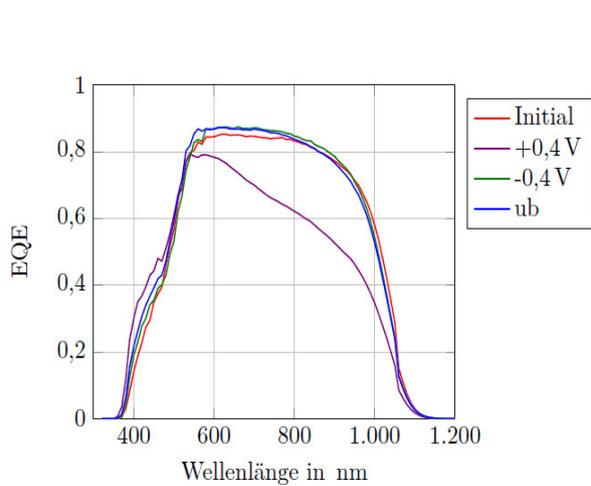


Abbildung 3: EQE vor und nach den Dauerläufen unter verschiedenen Bedingungen

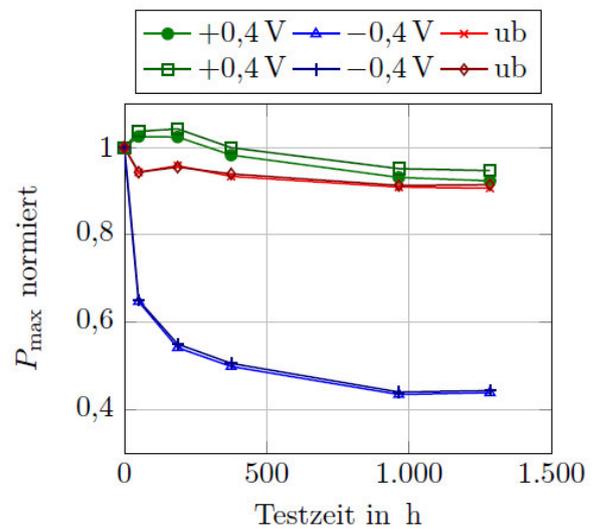


Abbildung 4: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: Pmax

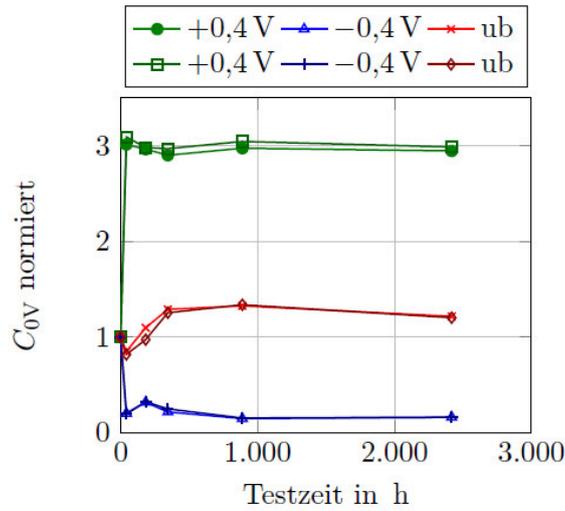


Abbildung 5: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: C0V

In einem weiteren Dauerlauf wurde die Reversibilität der Parameterdrift unter negativem bias (-1 V bei 145 °) untersucht. In Abbildung 6 wurde zunächst -1 V angelegt, was mit einer signifikanten Abnahme der Leerlaufspannung einherging. Nach einer gewissen Zeit (Pfeile in Abbildung 6) wurde die Polarität des bias auf +1 V geändert, wodurch die Leerlaufspannung wieder auf den Wert der Referenzmessung stieg. Eine weitere Änderung der Polarität auf -1 V führte in Konsequenz zum Abfall der Leerlaufspannung auf einen niedrigen Wert. Offensichtlich hängt der Wert der Leerlaufspannung vom angelegten bias ab. Je nach Polarität und Wert dieses bias stellt sich ein relativ stabiler Wert der Leerlaufspannung ein, wobei diese Parameterdriften i.W. als reversibel anzusehen sind.

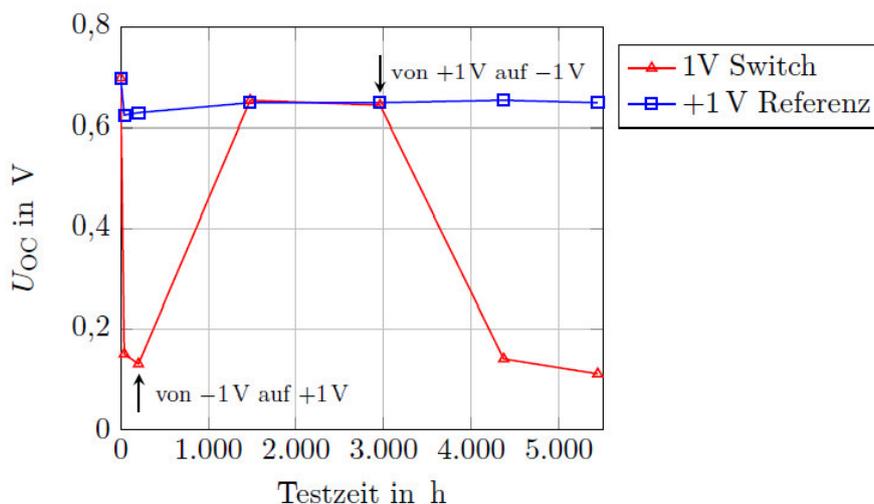


Abbildung 6: Dauerläufe unter bias: Wechsel der Polarität

Abbildung 7 zeigt Hell- und Dunkelkennlinie vor und nach einem Dauerlauf unter angelegtem negativem bias. Die Hellkennlinie ist zu kleineren Spannungen verschoben, was konsistent mit dem

Modell einer reduzierten Dotierung ist. Die Dunkelkennlinie hingegen wird zu größeren Spannungen hin verschoben, was auf Barrieren an der Grenzfläche hindeuten könnte, welche unter Beleuchtung dann verschwinden und zu einem crossover führen. Die Veränderung der Hellkennlinien bei Dauerläufen unter bias und 145 °C sind in Abbildung 8 dokumentiert. Unbiased und positiver bias sind mit nur geringen Parameterdriften verbunden, während ein negativer bias zu signifikanten Parameterdriften führt. Interessant hierbei ist die Tatsache, dass nach einem kurzen Dauerlauf unter negativem bias ein deutlich höherer Diodenfaktor / höherer Serienwiderstand zu beobachten ist. Hierauf wird im Kapitel über die Rückkontakt-Diode eingegangen werden.

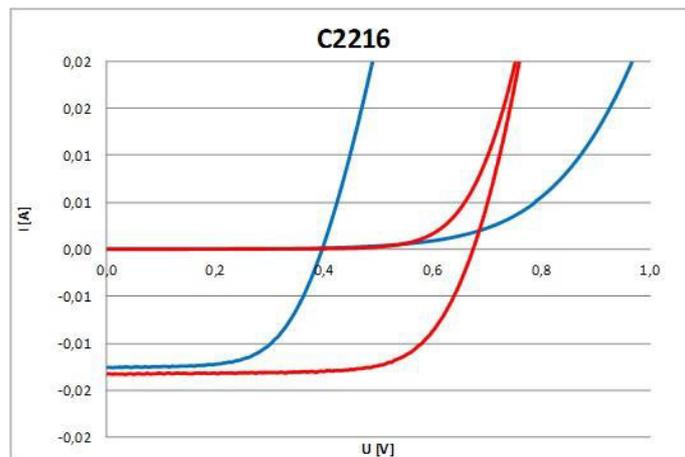


Abbildung 7: Hell- und Dunkelkennlinien vor und nach Dauerlauf unter negativem bias

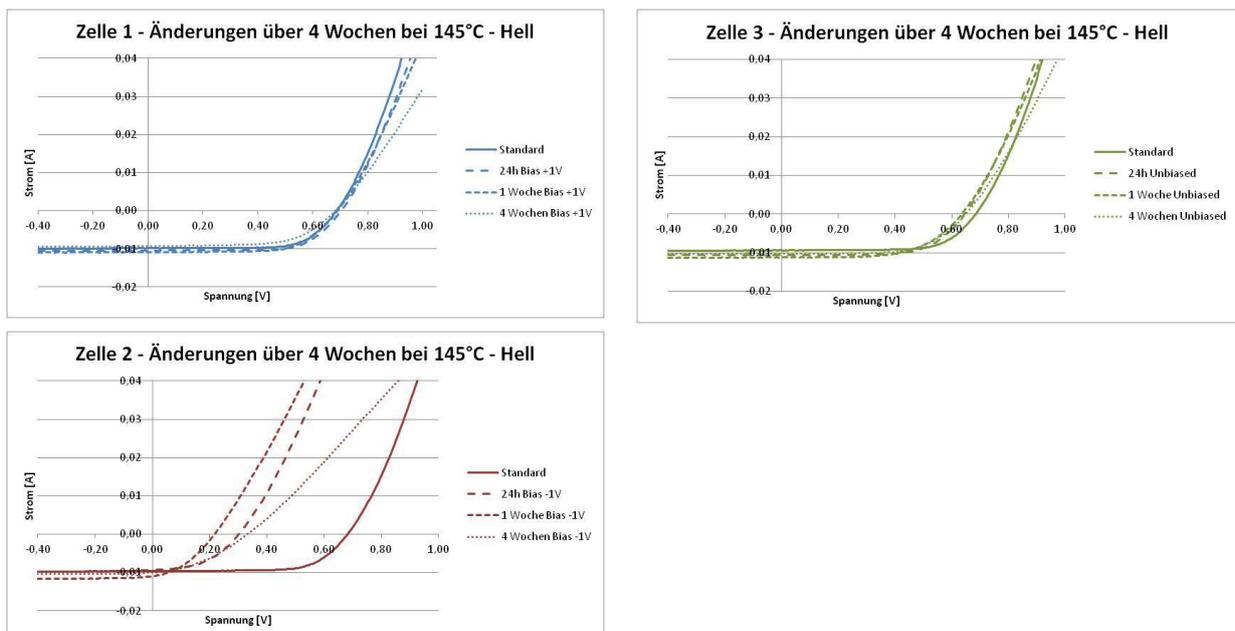


Abbildung 8: Hellkennlinien nach Dauerläufen unter bias bei 145 °

Die korrespondierenden CV-Kennlinien sind in Abbildung 9 dargestellt. Die oben dargelegte Abhängigkeit vom angelegten bias ist hier klar ersichtlich. Beim negativen bias verdeutlicht die Spannungsunabhängigkeit der Sperrschichtkapazität nochmals den Befund, dass nach derartigen Dauerläufen die Raumladungszone bis zum Rückkontakt reicht und somit die geometrische Kapazität gemessen wird.

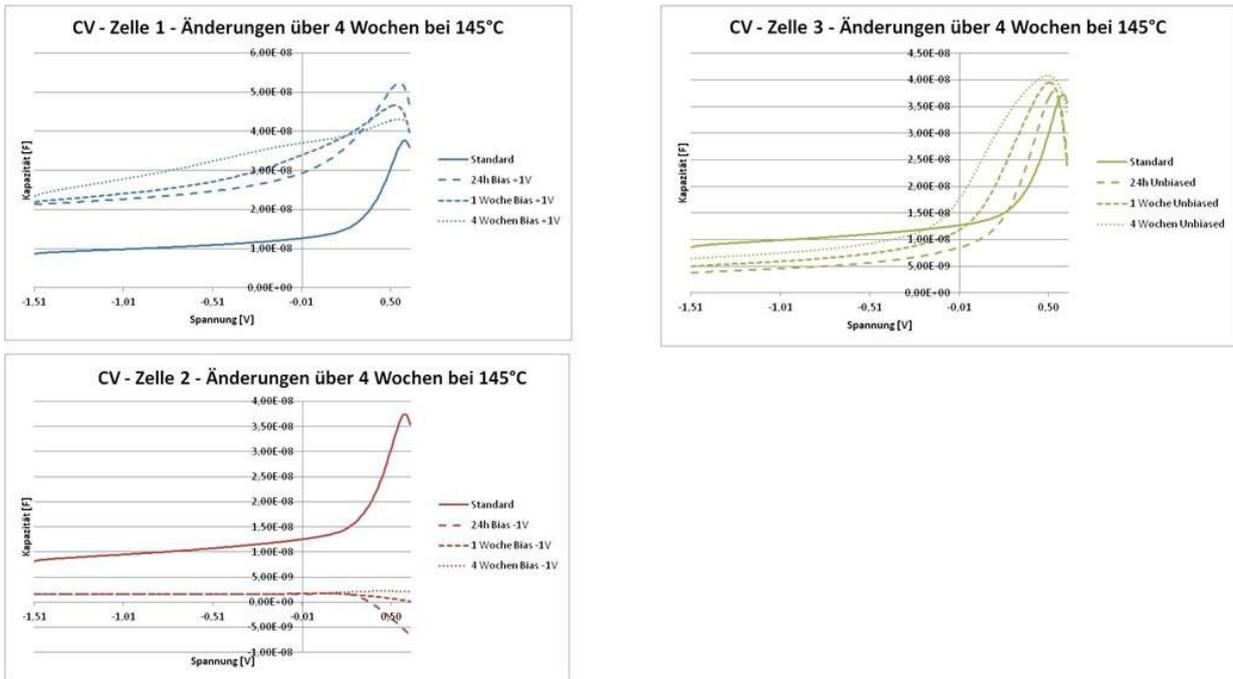


Abbildung 9: CV-Kennlinien bei Dauerläufen unter bias bei 145 °C

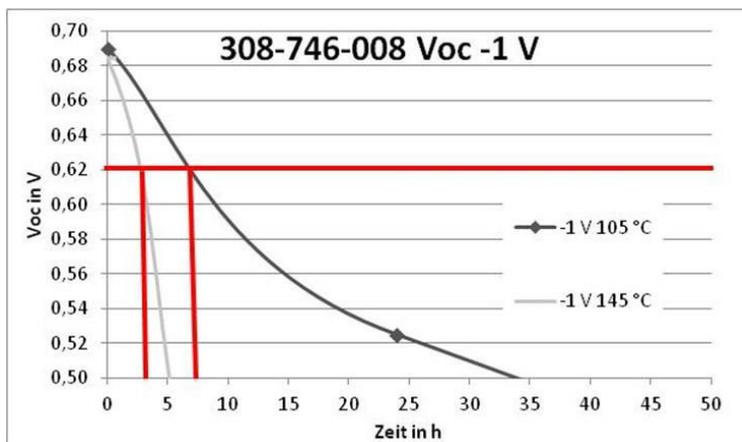


Abbildung 10: Bestimmung der Aktivierungsenergie bei negativem bias

Für den Verlauf der Leerlaufspannung unter negativem Bias wurde aus Dauerläufen bei zwei unterschiedlichen Temperaturen eine Aktivierungsenergie bestimmt (Abbildung 10). Eine Extrapolation der Parameterdriften zu einer Temperatur von 45 °C (NOCT) lieferte eine Zeitkonstante von ca. 41 h, nach der die Leerlaufspannung auf 90 % des Anfangswertes gefallen war. Dieser Parameter – Anlegen einer negativen Spannung – ist sicher als kritisch einzustufen. Im Abschnitt über

PID wird aufgezeigt, dass zwischen Dauerläufen bei negativem bias und ebenen PID sehr ähnliche Parameterdriften zu beobachten sind.

Generell ist festzustellen, dass im Vergleich zu älteren Proben vom Projektpartner Manz eine deutlich verbesserte Stabilität für den unbiased Fall zu beobachten war. Allerdings war der bis dato sehr ausgeprägte „hot current soak“ Effekt wenn dann nur sehr schwach ausgeprägt.

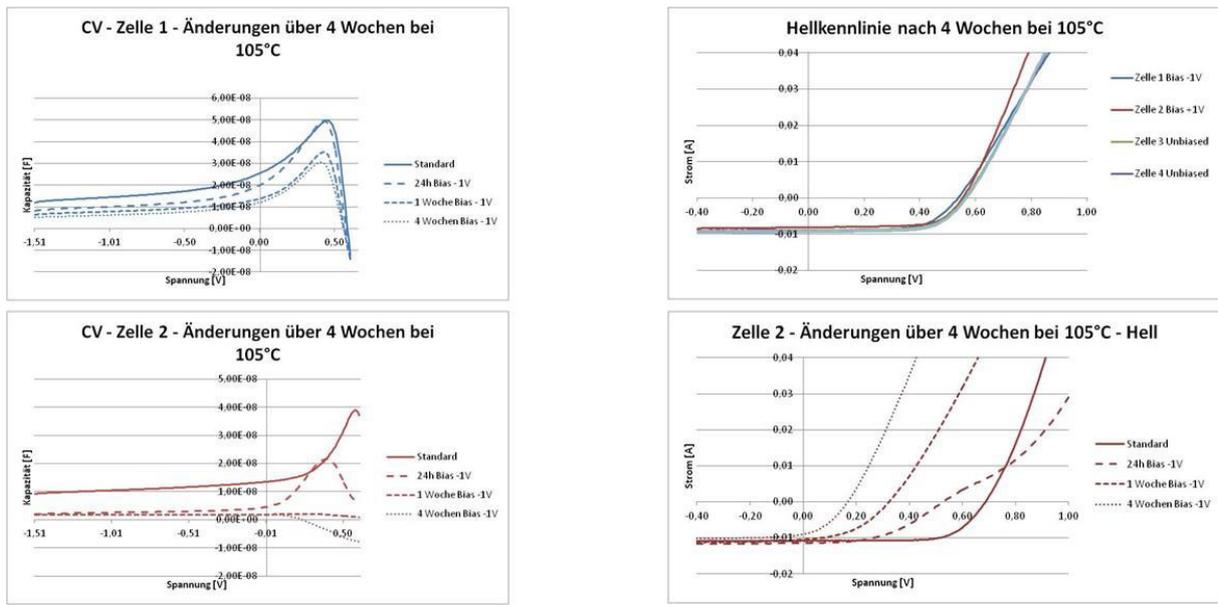


Abbildung 11: Dauerläufe unter negativem bias: Vergleich sequentieller Prozess (oben), Simultanverdampfung (unten)

In Abbildung 11 ist ein Vergleich zwischen sequentiellen Prozess und Simultanverdampfung, was den Einfluss einer negativen Spannung während des Dauerlaufes anbelangt, zu sehen. Offensichtlich ist der sequentielle Prozess wesentlich unempfindlicher gegenüber einem negativen bias. Dies deckt sich, was die Immunität gegenüber PID anbelangt. Die Ursachen hierfür sind nicht bekannt.

II. Rückkontakt-Diode

In RECISII wurden über die Existenz einer Rückkontakt-Diode und deren Signatur wesentliche wissenschaftliche Erkenntnisse jedoch mit praktischer Relevanz gewonnen. Im Abschnitt über Modellbildung und Simulation wird das zugrundeliegende Modell eingehend erläutert.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind typische Hell-Kennlinien bei HT und LT dargestellt (verschiedene Beleuchtungsintensitäten). Während bei den hohen Temperaturen das erwartete Kennlinienfeld mit gültigem Überlagerungssatz zu sehen ist, ergibt sich bei den tiefen Temperaturen eine gänzlich unterschiedliche Situation. Das Überlagerungsprinzip ist nicht mehr gültig (crossover); die Leerlaufspannung hängt nicht von der Beleuchtungsintensität ab und im Bereich oberhalb der Leerlaufspannung sättigt der Strom. In diesem Bereich ähnelt die Kennlinienschar der eines Bipolartransistors. Eine weitere Signatur ist in Abbildung 14 zu erkennen. In der Shockley'schen Diodentheorie extrapoliert die Leerlaufspannung bei 0 K unabhängig von der Intensität zur Bandlückenenergie. Dies ist in Abbildung 14 allerdings nur oberhalb von ca. 200 K gegeben. Im

unteren Temperaturbereich sättigt die Leerlaufspannung und wird – wie oben beschrieben – intensitätsunabhängig. Extrapoliert man diesen Temperaturbereich zu 0 K, erhält man einen Wert, welcher deutlich unter der Bandlückenenergie liegt. Es konnte gezeigt werden, dass diese Differenz der Barriere der Diode am Rückkontakt entspricht. Über eine Messung der Leerlaufspannung über der Temperatur lässt sich somit auf die Barriere am Rückkontakt auch quantitativ schließen.

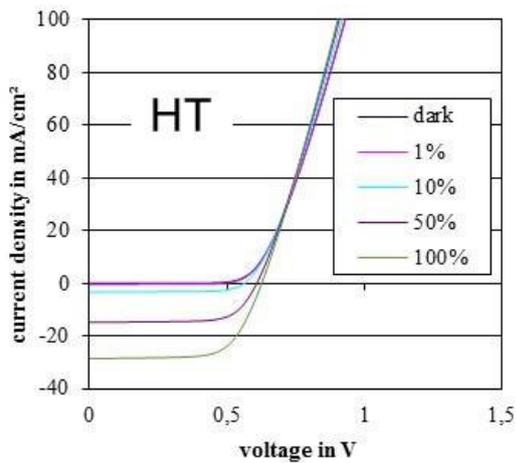


Abbildung 12: HT-Kennlinien bei unterschiedlichen Intensitäten

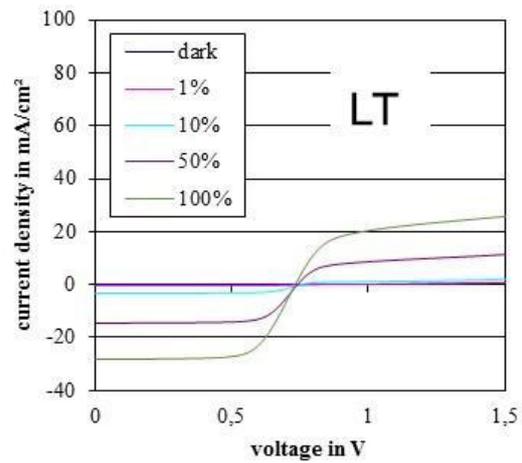


Abbildung 13: LT-Kennlinien bei unterschiedlichen Intensitäten

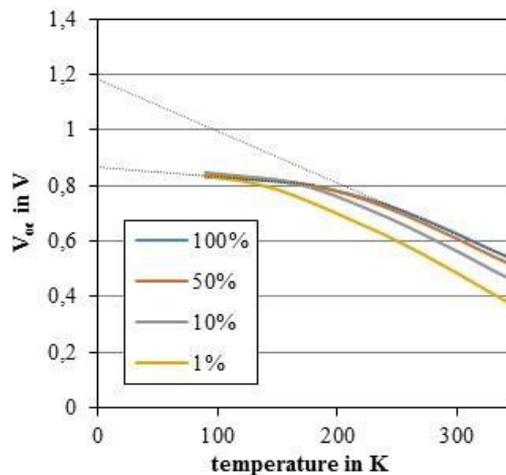


Abbildung 14: Voc(T) bei verschiedenen Intensitäten

Zusätzlich wurden temperatur- und frequenzabhängige Kapazitätsmessungen (Admittanzspektroskopie) vorgenommen, um einen potenziellen Zusammenhang zwischen einer auftretenden Kapazitätsstufe, die sich mit der Temperatur verschiebt, und einer aus den IV-Kennlinien ersichtlichen Rückkontaktdiode zu erkennen.

Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen temperaturabhängige IV- und Admittanzmessungen an coverdampften Absorbern. Deutlich zu erkennen ist die temperaturabhängige Kapazitätsstufe und das Sperrverhalten der IV-Kennlinien bei tiefen Temperaturen. Zum Vergleich sind in Abbildung 17

und Abbildung 18 die entsprechenden Kennlinien für einen sequentiell hergestellten Absorber zu sehen. Hierbei korrespondiert ein fehlendes Sperrverhalten bei tiefen Temperaturen mit der Nichtexistenz einer Kapazitätsstufe. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die bisherigen Messungen klar dafür sprechen, dass der N1-Defekt mit einer Diode am Rückkontakt korreliert. Mit dem N1-Defekt wird die Existenz einer Stufe im Kapazitätsspektrum verbunden.

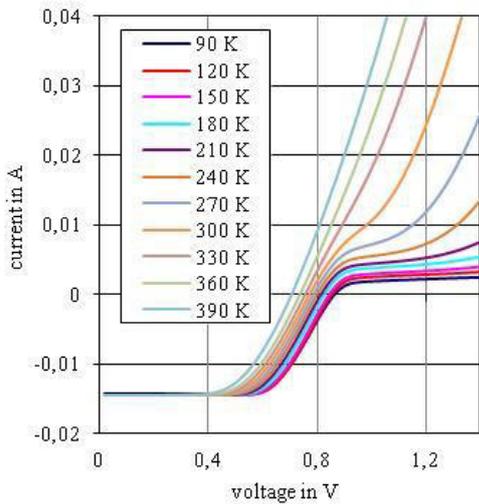


Abbildung 15: Temperaturabhängige Hellkennlinien (mit Rückkontakt-Diode)

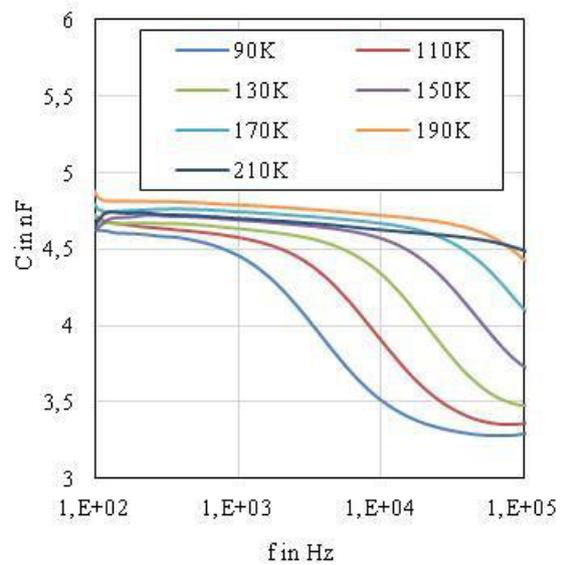


Abbildung 16: Zugehöriges Admittanzspektrum (mit Rückkontakt-Diode)

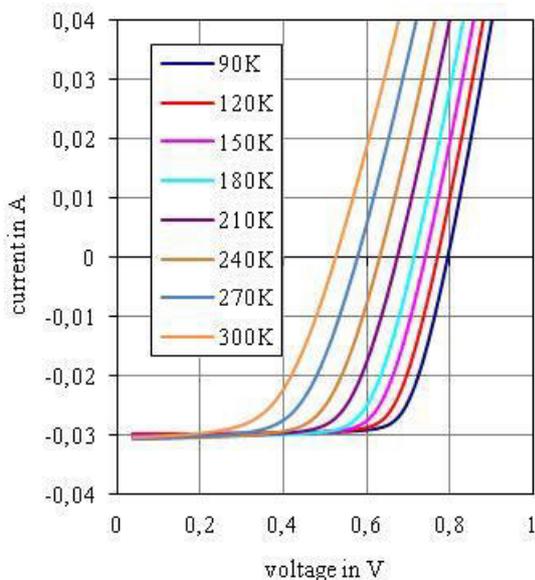


Abbildung 17: Temperaturabhängige Hellkennlinien (ohne Rückkontakt-Diode)

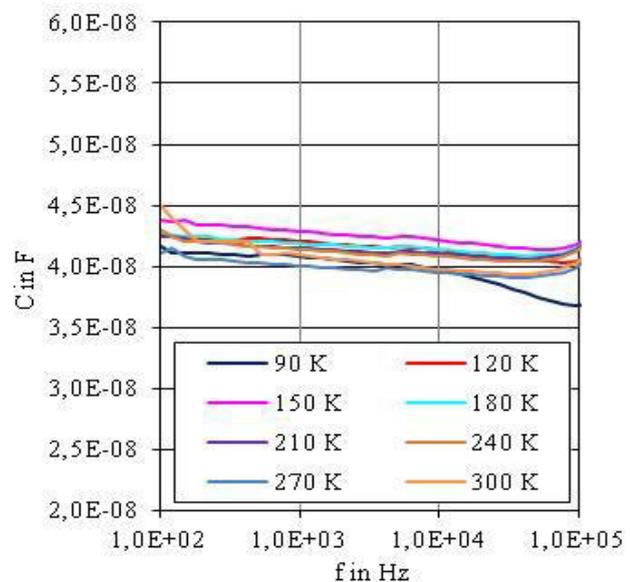


Abbildung 18: Zugehöriges Admittanzspektrum (ohne Rückkontakt-Diode)

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass Signaturen für die Existenz einer Diode am Rückkontakt aufgedeckt und mit Simulationen hinterlegt werden konnten. Eine nähergehende

Analyse, ob diese Rückkontakt-Diode relevant für die Performance bei Raumtemperatur sein könnte, ergab, dass selbst nach Alterung, was zu einer Erhöhung dieser Barriere führt, ein Einfluss bei Raumtemperatur nicht zu erwarten sein sollte.

III. PID (Potential Induced Degradation)

In einem ersten Schritt wurde ein Messplatz entwickelt und in Betrieb genommen, mit welchem Driften der Solarzellen-Parameter bei PID-Schädigung periodisch gemessen und mit der geflossenen Ladung korreliert werden konnte. Neben Hell- und Dunkelkennlinie wurde die CV-Charakteristik stündlich gemessen. Abbildung 19 zeigt den entwickelten PID-Messplatz, welcher sich in einer Klimakammer befindet. Die HV-Spannung wird zwischen einer Cu-Folie auf der Rückseite des Glassubstrates und dem Mo-Rückkontakt angelegt. Es werden einzelne Zellen gemessen, wobei durch die Kontaktierung (Mo-Mo) jeweils ein Interconnect und somit auch ein P1 beinhaltet sind. Die geflossene Ladung wird durch zeitliche Integration des HV-Stromes bestimmt.

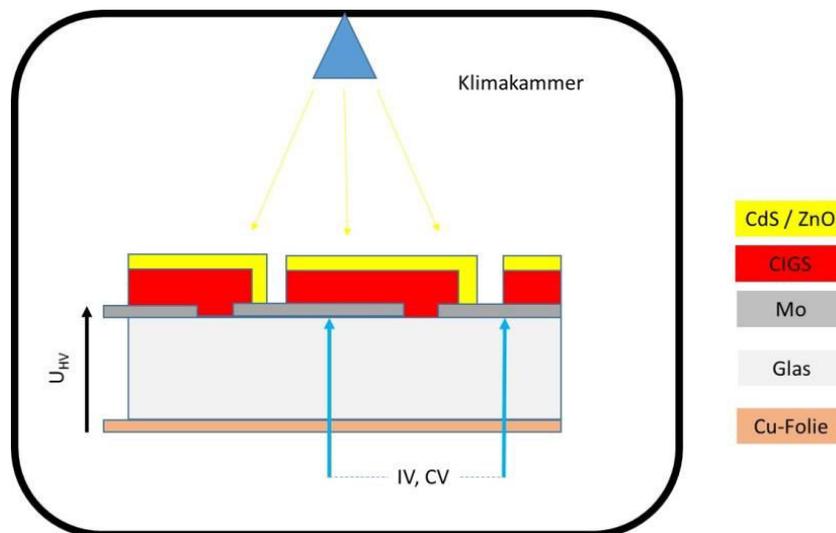


Abbildung 19: PID-Messplatz

IV. Detailanalytik

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Untersuchungen zum Einfluss von PID auf Parameterdriften (auf Zellebene) durchgeführt. Neben der Bestimmung von IV-Kennlinien wurden die Kapazität des Heteroüberganges, die PL-Charakteristik sowie die Thermographie-Charakteristika untersucht.

V. Modelle und Simulation

PID:

Für Parameterdriften aufgrund von PID wurden erste Modelle entwickelt, deren Verifikation allerdings noch aussteht.

Rückkontakt-Diode:

Weiterhin wurde in RECISII das Modell eines Phototransistors entwickelt, um das Tieftemperaturverhalten im Kontext einer Rückkontakt-Diode zu erklären. Abbildung 20 veranschaulicht das Bänderdiagramm mit einer Schottky-Diode am Rückkontakt. Im Modell eines npn-Phototransistors wirkt n-ZnO als Emitter, p-CIGS bildet die Basis und die Schottky-Diode den Kollektor. Die Funktion eines Bipolartransistors ist allerdings nur dann gegeben, falls die Diffusionslänge im Bereich der Basisweite liegt. Somit ist mit solchen Effekten bei der Verbesserung der Materialqualität verstärkt zu rechnen. Abbildung 21 zeigt simulierte Kennlinien bei HT und LT sowie den Verlauf der Leerlaufspannung über der Temperatur bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten. Wie in den Messungen ist zu erkennen, dass sich die simulierte Solarzelle bei HT wie eine Solarzelle sowie bei LT wie ein Transistor verhält. Die Leerlaufspannung extrapoliert nur im oberen Temperaturbereich zur Bandlückenenergie (Extrapolation zu 0 K). Im unteren Temperaturbereich extrapoliert die Leerlaufspannung zu einem kleineren Wert, welcher – was auch analytisch gezeigt werden konnte – der um die Barriere reduzierten Bandlückenenergie entspricht. Durch Bestimmung der beiden Extrapolationswerte kann somit die Barrierenhöhe am Rückkontakt bestimmt werden. Letztendlich lässt sich dies über die Leerlaufspannungen der beiden Dioden erklären und plausibilisieren. Die Hauptdiode extrapoliert zur Bandlückenenergie, die Rückkontakt-Diode mit inverser Polarität zur Barrierenhöhe, wodurch der extrapolierte Spannungswert der Solarzelle den Differenzbetrag annimmt.

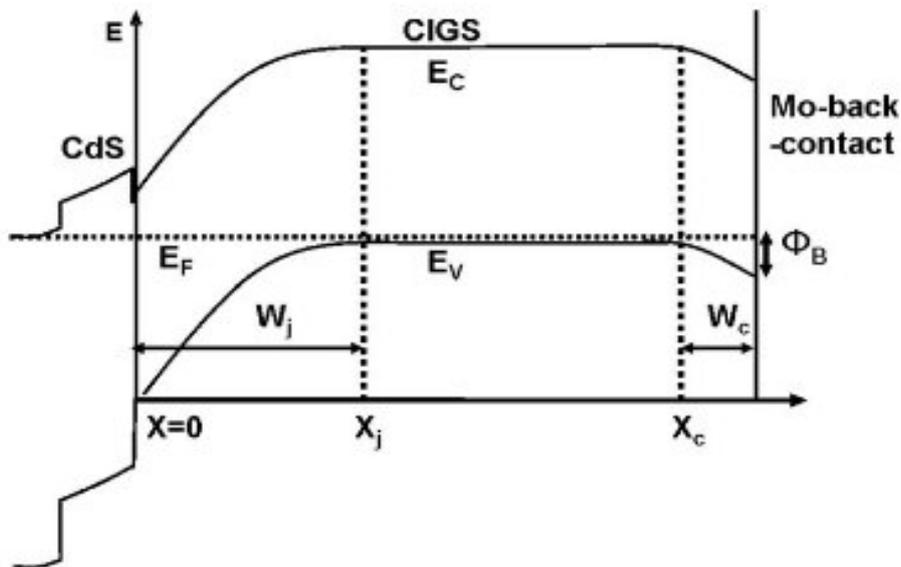


Abbildung 20: Bänderdiagramm Phototransistor

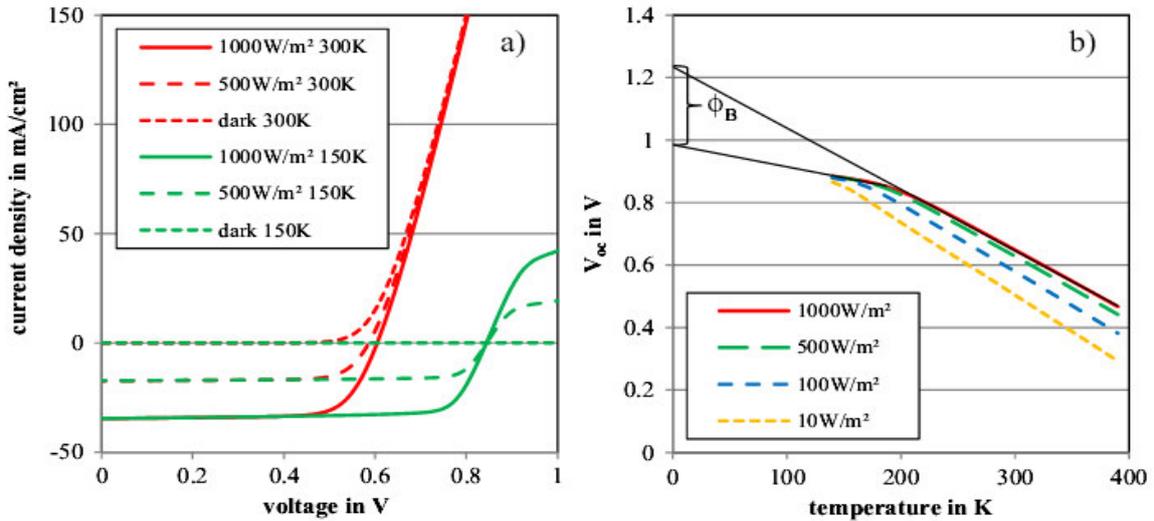


Abbildung 21: Simulierte LT- und HT-Kennlinien sowie Voc(T)

Im AP5 wurde das Phototransistormodell für geringe Absorberdotierungen weiterentwickelt. Insbesondere wurde die Situation betrachtet, falls sich die beiden Raumladungszonen berühren, was bei geringen Dotierungen und / oder dünnen Absorbern eintreten kann. Abbildung 22 zeigt simulierte Bänderdiagramme für unterschiedliche Absorberdotierungen. Aus diesem Bänderdiagramm geht hervor, dass bei der geringeren Dotierung die Raumladungszone bis an den Rückkontakt reicht.

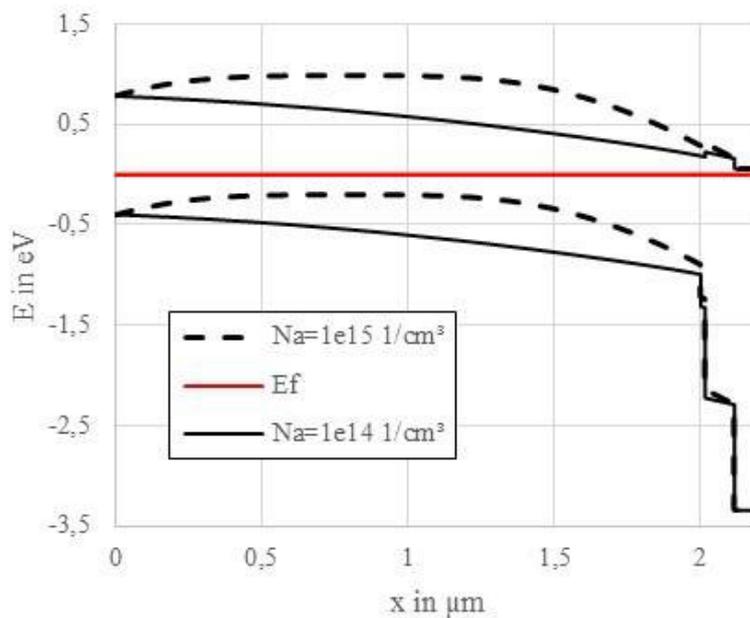


Abbildung 22: Simuliertes Bänderdiagramm bei unterschiedlichen Dotierungen und Rückseitenkontaktbarriere

Die Konsequenz aus diesem Durchgreifen der Raumladungszone bis an den Rückkontakt wird bei Transistoren als Punchthrough-Effekt beschrieben. In einer solchen Situation steigt der Kollektorstrom rapide an, da der Transistor seine Sperreigenschaften verliert. Abbildung 23 zeigt simulierte Kennlinien mit unterschiedlicher Dotierung. Während bei der höheren Dotierung der Transistoreffekt klar erkennbar ist, führt die niedrigere Dotierung zu einem Verschwinden des Sperrverhaltens verbunden mit einer extrem niedrigen Leerlaufspannung, was mit dem oben beschriebenen Punchthrough-Effekt zusammenhängt.

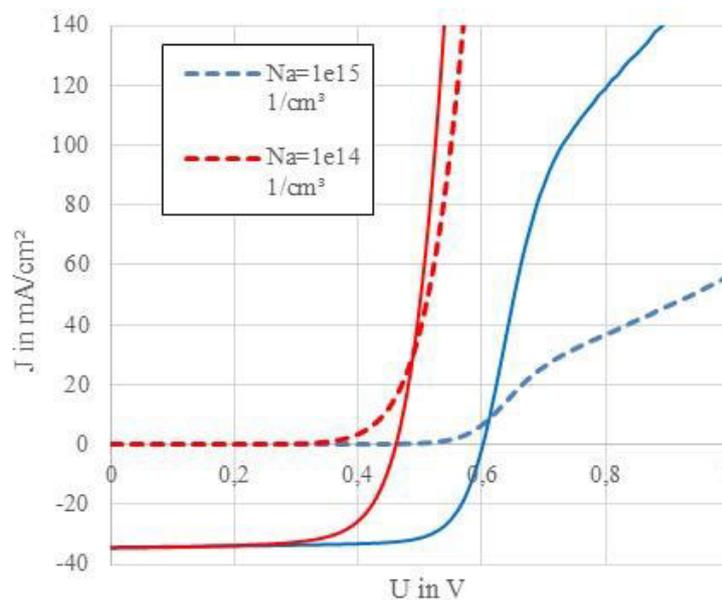


Abbildung 23: Simulierte Kennlinien und Punchthrough-Effekt

Zur Verifikation dieses Modelles wurden Dauerläufe mit angelegtem negativem Bias durchgeführt, da diese Dauerläufe zu einer äußerst niedrigen Dotierung führen, sodass die Raumladungszone (aus CV-Messungen) bis an den Rückkontakt reicht. Abbildung 24 zeigt IU-Kennlinien vor und nach den geschilderten Dauerläufen unter angelegter negativer Spannung. In einem ersten Schritt wird der Dunkelstrom nahezu blockiert (24 h). Weitere Dauerläufe führen zu einer Reduktion der Stromblockade im Dunkeln zusammen mit einer extrem niedrigen Leerlaufspannung. Eine mögliche Interpretation dieser Messergebnisse beruht auf dem oben erklärten Punchthrough-Effekt. Dies kann die beobachtete Empfindlichkeit von CIGS-Zellen gegenüber angelegten negativen Spannungen erklären. Eine Konsequenz aus diesem Modell liegt in der Kombination dünner Absorber mit einer Rückkontaktbarriere, da hierbei diese Effekte verstärkt auftreten können, was zu einer deutlichen Abnahme der Leerlaufspannung insbesondere bei niedrigen Dotierungen führt.

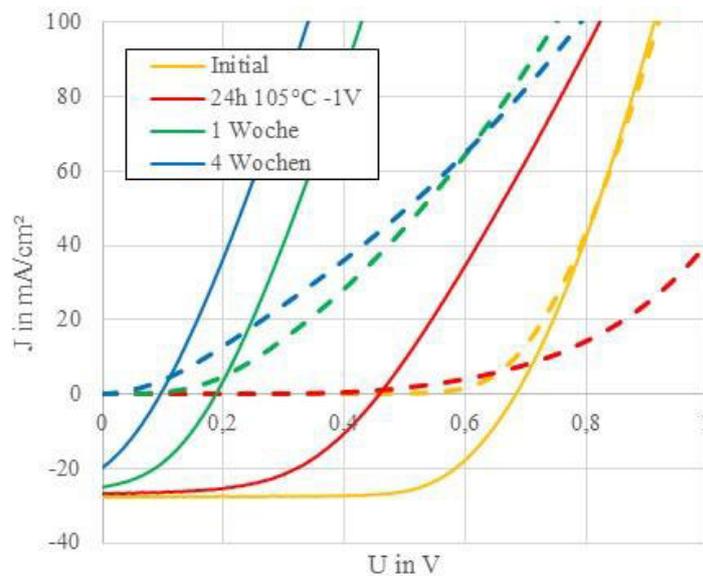


Abbildung 24: Gemessene Kennlinien und Punchthrough-Effekt

2.1.3.2. Weiterführende Analytik am ZSW

Im Folgenden werden Detailuntersuchungen an Proben vorgestellt, die einen Temperatur-Stresstest unter verschiedenen Bedingungen (Temp. , Vorspannung) durchlaufen haben. Hier steht insbesondere die Frage nach der Elementverteilung vor / nach einer derartigen Behandlung im Vordergrund.

VI. Stresstest „Dark Anneal mit elektrischem Bias“

a. Präparation und Prüflingsdesign

Neben der Präparation für die Untersuchung von PID wurden Teststreifen (TS) für die Untersuchung der Degradation durch dark anneal mit oder ohne angelegten elektrischen Bias am ZSW hergestellt. Ein Teststreifen besteht dabei aus 10 einzelnen, nicht verschalteten Zellen mit einer Fläche von je 0,5 cm². Jede Zelle auf dem Teststreifen besitzt ein aufgedampftes Grid für die Kontaktierung der Frontseite (Minuspol). Alle Zellen teilen sich den Molybdän-Rückkontakt (Pluspol) und sind untereinander durch eine P3 Strukturierung getrennt. Dies ist das Standarddesign des ZSW in der Materialentwicklung. Zellen mit diesem Design wurden am ZSW und der HSU für die Degradation durch Dark Anneal (Erhitzen im Dunkeln) und elektrischem Bias (im Bereich von einigen 100 mV) verwendet. Insbesondere für die HSU wurden dabei eine Alkalibariere zwischen Glas und Molybdän sowie eine nachträgliche Alkalidotierung in der Molybdänschicht in allen Variationen kombiniert (mit Barriere und mit Alkalidotierung, mit Barriere und ohne Alkalidotierung, ohne Barriere und mit Alkalidotierung sowie ohne Barriere und ohne Alkalidotierung, wobei dies dem Standard entsprach). Ebenso wurden Proben aus dem damaligen Weltrekordprozess aus der Kleinzellenlinie geliefert

(Weltrekord damals 20,8%), bei dem nach der CIGS Abscheidung eine Alkalidotierung in einem sog. Post-deposition Treatment (PDT) in den Absorber eingebracht wurde.

b. Materialanalytik und Modellvorstellung des ZSW

Einige der in Abschnitt a hergestellten Proben, sowie Module von MCT wurden nach einem Dark-Anneal-Stresstest mit und ohne angelegter Spannung einer SIMS Materialanalyse am ZSW zugeführt um herauszufinden, ob die beobachteten elektrischen Parametervariationen durch Materialveränderungen hervorgerufen wurden. Die 3 untersuchten Variationen waren:

1. Dark Anneal (105°C für 7 Tage) ohne angelegte Spannung
2. Dark Anneal (105°C für 7 Tage) mit +1V
3. Dark Anneal (105°C für 7 Tage) mit -1V

Variation 1 wurde mit dem Ausgangszustand (as grown) verglichen um den Effekt des Dark Anneal allein zu betrachten, während Variation 2 und 3 mit 1 verglichen wurden um den Unterschied nur auf den angelegten Bias zurückzuführen zu können.

Die SIMS Spektren gehen über die CIGS und Mo Schicht und sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt. Abbildung 25 enthält zusätzlich die IU-Kennlinien, die vor und nach dem Stresstest gemessen wurden. Durch den Dark Anneal steigen alle Signale in Abbildung 25 außer Kupfer deutlich in Richtung der Heterogrenzfläche (links) hin an. Die IU-Kennlinienparameter Voc und FF werden durch die Behandlung deutlich verringert, was sich auch in einer verringerten Dotierdichte und einer vergrößerten Raumladungszone ausdrückt. Die letzten 2 Parameter wurden aus CV-Messungen extrahiert (nicht gezeigt). IU- und CV-Messungen zeigen somit dasselbe Verhalten wie bereits in vergangenen Berichten von der HSU erwähnt.

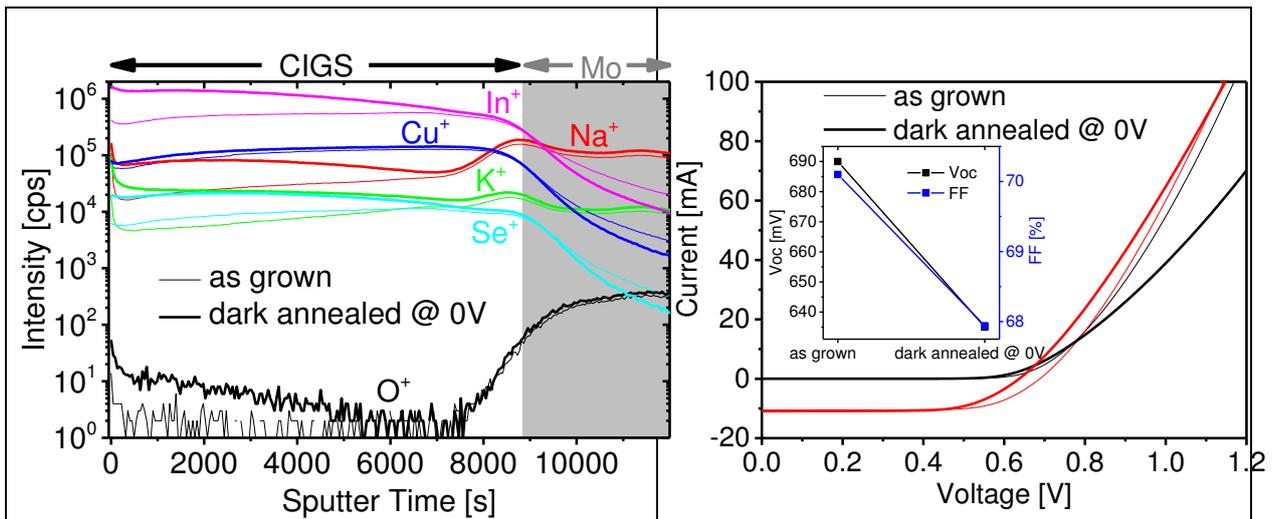


Abbildung 25: SIMS Spektren (links) und IU Kennlinien (rechts), jeweils vor „as grown“ und nach „dark annealed“ @0V 7 Tagen bei 105°C ohne angelegte Spannung.

Es ist unwahrscheinlich, dass die Veränderung der Intensitäten am Heterokontakt wirklich eine Wanderung der Ionen zugrunde liegt. Es ist wahrscheinlicher, dass es sich hier um den sog. Matrixeffekt handelt. Dieser ist typisch für SIMS und verhindert im Allgemeinen, dass die Spektren

zur quantitativen Bestimmung herangezogen werden können. Er besagt, dass die gemessene Intensität von der chemischen Umgebung abhängt, aus der das Ion herausgelöst wird. Oder anders formuliert: Die Ionisierungswahrscheinlichkeit ist von der Umgebung des Ions abhängig. Speziell elektronegative Elemente wie Sauerstoff erhöhen die positive Ionisierungswahrscheinlichkeit und damit die gemessene Intensität. Dies lässt sich sehr gut in Abbildung 25 (links) beobachten: Durch das Annealing an Luft diffundiert Sauerstoff von vorne (aus Richtung des Fensters) in den Absorber, wahrscheinlich zuerst entlang der Korngrenzen. Der Anstieg ist im Spektrum gut zu sehen. Allerdings ist die Gesamtintensität sehr niedrig, da die Anzahl positiver Sauerstoffionen sehr gering ist. Für CIGS wird normalerweise der positive SIMS Modus gewählt, bei dem die positiven Ionen nachgewiesen werden. Hier wäre es von Vorteil eine separate Messung der negativen Ionen durchzuführen. Der Sauerstoff scheint mit allen Matrix- und Alkalielenenten zu reagieren, außer mit Kupfer. Dies mag aber auch daran liegen, dass Korngrenzen und Heterogrenzfläche von CIGS kupferverarmt sind.

Wendet man diese Annahme weiter auf die SIMS Spektren eines Dark Anneals mit Spannung in Abbildung 26 an, so ergibt sich für positive Spannungen, dass der Sauerstoff genauso in den Absorber eindiffundiert wie ohne, dass dieser aber keinen Matrixeffekt ausübt und daher nicht an die gezeigten Elemente gebunden ist. Er könnte z.B. an eine positiv geladene Vakanz oder einen Defektkomplex gebunden sein, die sich unter dem Einfluss der positiven Spannung bildet. Dies könnte auch erklären, warum die Degradation durch einen Dark Anneal durch einen lightsoak oder einen positiven Spannungsbias wieder rückgängig gemacht werden kann: Der zuvor an die Matrix-/Alkalielenente (außer Kupfer) gebundene Sauerstoff könnte dann bevorzugt eine Verbindung mit dieser/diesem entstehenden Vakanz/Defektkomplex ausbilden.

Bei einer negativen Spannung scheint die Sauerstoffdiffusion verstärkt zu sein und auch der Matrixeffekt ist dadurch noch etwas stärker und daher auch die SIMS Intensität in der Nähe des Heterokontakts. Allerdings kann durch diese relativ geringen Veränderungen nicht der starke Einbruch in den IU- (v.a. V_{oc}) und CV- (v.a. die Dotierung) Parametern erklärt werden. Es scheint also, dass bei dieser Behandlung noch etwas auftritt, was durch die SIMS Messungen nicht erfasst wird.

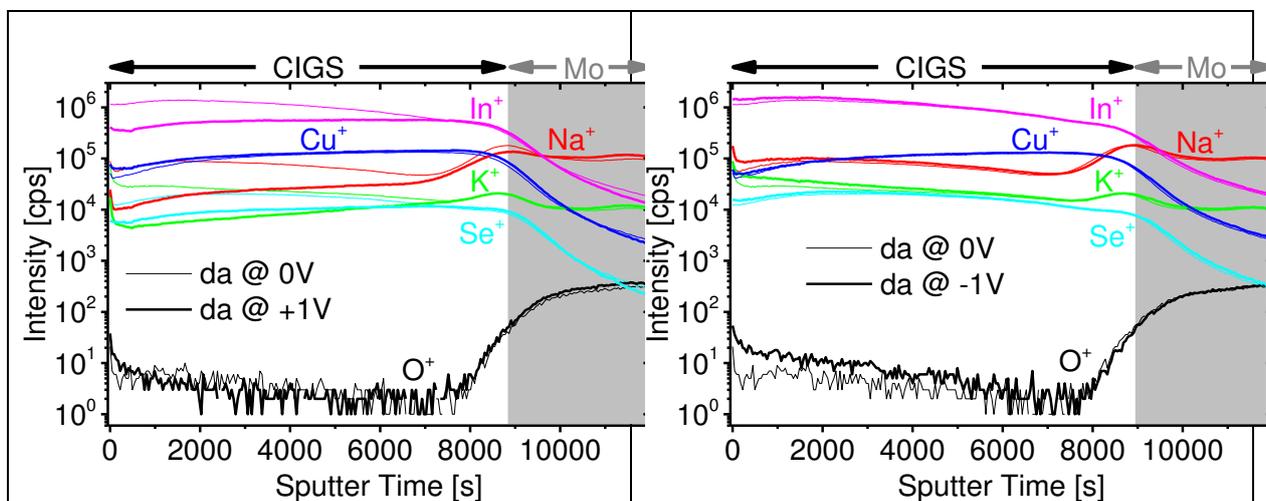


Abbildung 26: SIMS Spektren, jeweils nach 7 Tage dark anneal (da) bei 105°C ohne und mit +1V (links) bzw. -1V (rechts) angelegter Spannung.

c. Ausblick

Die Nutzung des Matrixeffekts zur Interpretation von SIMS Ergebnissen wie in Abschnitt II.b wurde am ZSW bisher noch nicht versucht und ist deswegen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

2.1.4. Testablauf (AP5)

Das ZSW entwickelte in AP 5 ein Design, welches sich im Laufe des Vorhabens bewährte und für alle vom ZSW hergestellten PID-Proben verwendet wurde. Abbildung 27 zeigt die Vorderseite dieses Designs. Es besteht aus einem 10x10 cm² großen Glassubstrat, welches sowohl einen 6x4cm² großen Modulbereich mit 11 monolithisch verschalteten Zellen, als auch einen Bereich mit 9 6x9 mm² kleinen, nicht verschalteten Zellen enthält. Die Zellen des Moduls sind dabei in Reihe geschaltet. Die Details der monolithischen Strukturierung sowie die Bezeichnung der Strukturierungslinien P1, P2 und P3 ist in Abbildung 28 gezeigt. Die unverschalteten Zellen teilen sich den Molybdän Rückkontakt, während alle weiteren Schichten mit einem P3 Strukturierungsschritt voneinander getrennt werden. Modul- und Zellbereich sind durch Sandstrahlen voneinander getrennt und die Graphitfläche auf der Rückseite ist genauso groß wie die nach Sandstrahlen noch übrig bleibende Fläche auf der Vorderseite. Die Hochspannung wird beim Modulbereich zwischen dem –Pol und der Graphitrückseite, und beim Zellbereich zwischen dem –Pol einer Zelle und dem entsprechenden Graphitbereich auf der Rückseite angelegt. Die Berücksichtigung von unverschalteten Zellen wurde notwendig, nachdem der Einfluss der P1 Strukturierungslinie auf PID erkannt wurde (siehe Kapitel 2.1.3.1) diese Linie ist bei unverschalteten Zellen nicht vorhanden.

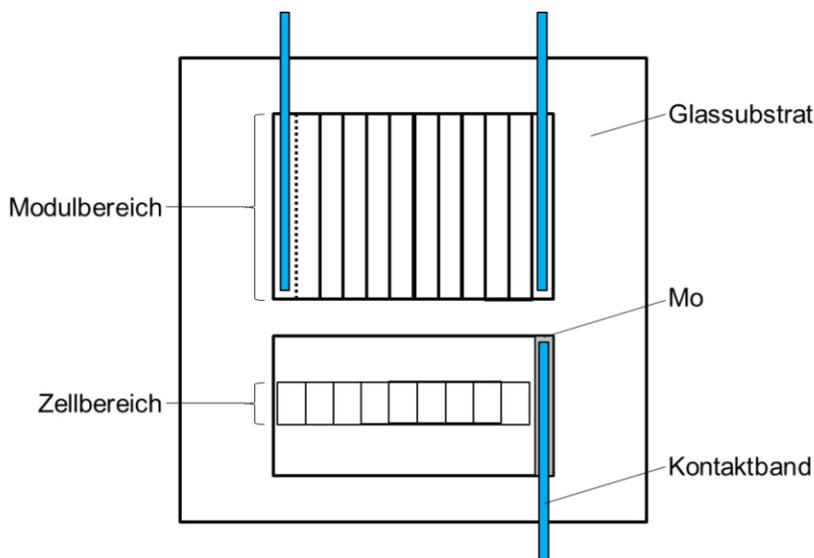


Abbildung 27: Vom ZSW verwendetes Prüflingsdesign für PID Tests. Typischerweise werden 2 Zellen des Zellbereichs ebenfalls mit einem Kontaktband kontaktiert (nicht gezeigt), wobei die Hochspannung nur an eine angelegt wird.

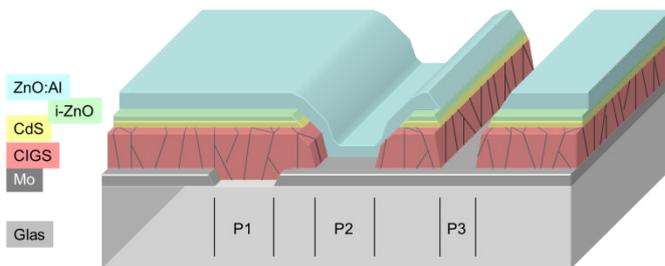


Abbildung 28: Bezeichnung der Strukturierungslinien P1, P2 und P3 bei einem CIGS Modul mit monolithischer Serienverschaltung. Unverschaltete Zellen werden nur durch eine P3 Strukturierung voneinander getrennt.

Folgende Proben mit diesem Design wurden im Rahmen des Vorhabens hergestellt:

- Variationen des Molybdän Rückkontakts (Dicke, Substrattemperatur, verschiedene Anlagen)
- Variationen der P1 Strukturierung (lithographisch oder mit Laser durch Glassubstrat)
- Variation des Substrates (verschiedene Glassorten)
- Kreuzversuche, wobei ein Teil der Schichten am ZSW und der Rest bei MCT präpariert wurde oder umgekehrt.
- Standardmodule ohne absichtliche Variation, die als Referenz für Versuche oder zur Überprüfung des Status quo dienen

2.1.5. Felddaten (AP6)

Die im Projekt ursprünglich vorgesehene Beschaffung des Outdoor-Einzelkennlinien-Messplatzes bei der MCT wurde aufgrund der wirtschaftlichen Situation nicht sofort zu Beginn des Projektes durchgeführt. Hierüber soll zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal befunden werden. Nachdem Anfang 2015 die endgültige Entscheidung fiel, dass nicht in einen derartigen Messplatz investiert werden kann, wurde mit dem offiziellen Änderungsantrag vom 26.5.2015 an das PTJ eine entsprechende Mittelverschiebung beantragt und in der Folge genehmigt.

In diesem Arbeitspaket wurde über die Projektlaufzeit im Wesentlichen an zwei großen Themenblöcken gearbeitet.

Der im Folgenden vorgestellte erste - und größere – Themen-Block stellt die Arbeiten im Rahmen der PID-Aktivitäten bei MCT dar. Zunächst wird die Verbesserung des Messaufbaus vorgestellt sowie die mit dem verbesserten Aufbau durchgeführten ersten Messungen. Im Weiteren werden dann die Schritte der Lebensdauerberechnung vorgestellt. Ausgangspunkt ist dabei die Auswertung und Bewertung der am ZSW-Widderstall gemessenen und zur Verfügung gestellten Leckstromdaten von MCT Modulen. In einem weiteren Schritt wurden externe Klima- und Modultemperaturdaten verschiedener Standorte weltweit beschafft und ausgewertet. Aufbauend auf dieser Datenbasis wurde ein Modell entwickelt, das für charakteristische Standorte eine erste Abschätzung für die PID-Lebensdauer ergibt.

Der zweite Themenkomplex des AP6 hat das Ziel, mittels Erfassung von Outdoordaten von Modulen im Feld (Kennlinienmessungen) eine Korrelation zum Verhalten in beschleunigten Alterungstests herzustellen.

2.1.5.1. PID-Leckstromdaten und Lebensdauerberechnung

Die PID-Degradation wird bei der CIGS-Dünnschichttechnik im Fall von PID-empfindlichen Zellen durch ein negatives Potential am Rückkontakt verursacht. Diese Degradation korreliert stark mit der geflossenen Ladung.

Die PID-Stabilität unter realen Bedingungen im Feld ist aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren allerdings schwer einzuschätzen. Der im Normungskreis als Draft vorgeschlagene PID Test (IEC62804) kann wegen seiner u.E. nicht gegebenen Relevanz für das Feldverhalten als nicht zielführend eingestuft werden (s. Lechner et . al. PVSEC 2016, Hamburg).

Um eine PID-Degradation auszuschließen, gibt die MCT daher bisher eine Erdung des negativen Pols vor.

Als ergänzende Messung zu den Leckstromdaten des ZSW-Widderstall (Outdoor) wurden bei MCT Leckstromdaten im Klimaschrank aufgenommen. Ziel hierbei war, herauszufinden, ob die Situation im Feld mit einem Indoor-Test zuverlässig nachgebildet werden kann.

Für die Aufnahme der Leckströme bei MCT musste zunächst der Messaufbau komplett überarbeitet werden. Es zeigte sich bei den ersten Messungen mit dem bestehenden Aufbau nämlich, dass das Rauschen und der Offset (s. Abbildung 29) für diese Messaufgabe viel zu groß (Rauschen im Bereich 1µA --> dies hat sich für die Messungen bei niedriger Temperatur und geringer Feuchte als nicht ausreichend erwiesen) für eine sinnvolle Auswertung war.

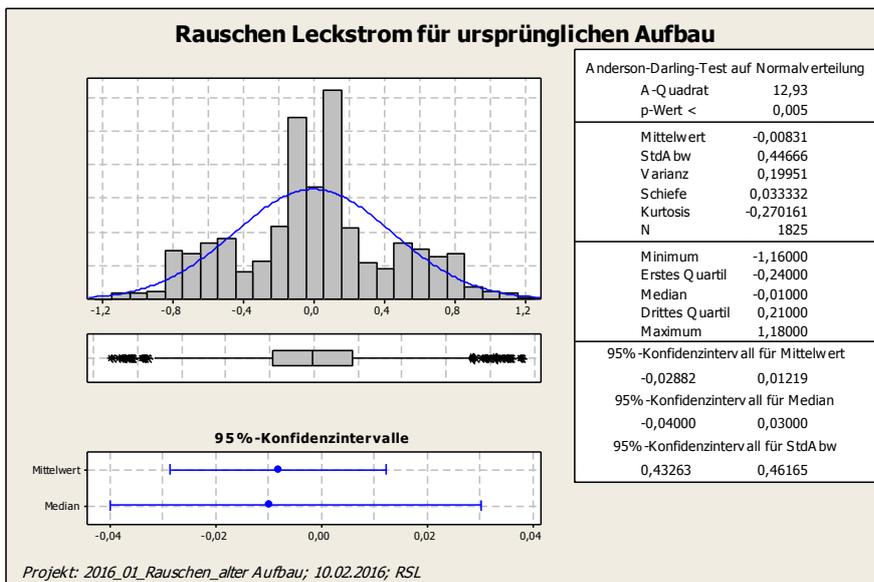


Abbildung 29: Rauschen für ursprünglichen PID-Aufbau

In der Folge wurde zum einen die Software angepasst (Rauschunterdrückung, Mittelung); zum anderen wurde die komplette Messmimik wegen eines Übersprechens der Kanäle neu aufgebaut (--> bessere Kanaltrennung). Die Messgeräte konnten weiter verwendet werden. Mit dem optimierten Aufbau können nun drei Kanäle mit einem Rauschlevel von ca. 1nA (s. Abbildung 30) gemessen werden.

Die folgende Abbildung 31 zeigt die Verteilung des Leckstrom-Rauschens sowie den Offset für den optimierten Aufbau wie auch den bisherigen Aufbau.

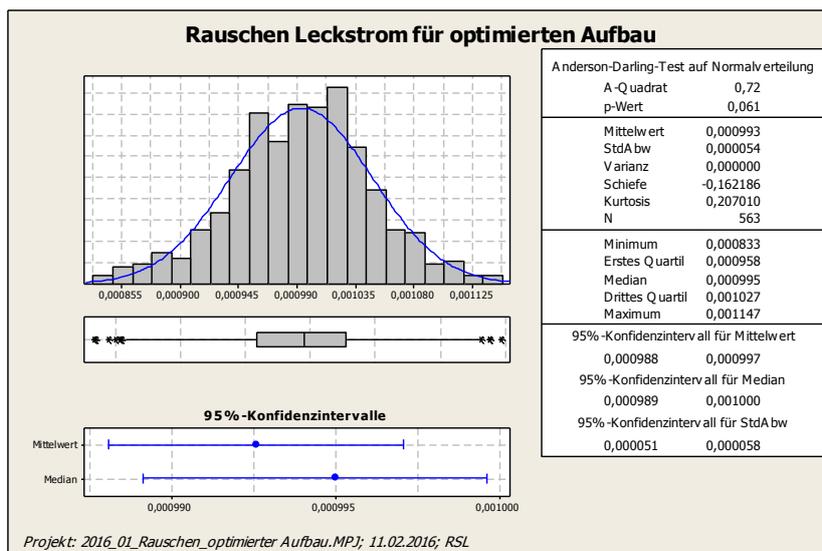


Abbildung 30: Rauschen und Offset für optimierten PID-Aufbau

Mit diesem verbesserten Aufbau konnte nun die Leckstrommatrix für Standardmodule aufgenommen werden, die mit unterschiedlichen Klemmen gehalten wurden.

Die folgende Abbildung 31 zeigt einen Überblick über die ersten relevanten Messungen. Ein Vergleich der Daten mit Messungen am ZSW/MSA ergab noch Abweichungen bei einigen Varianten.

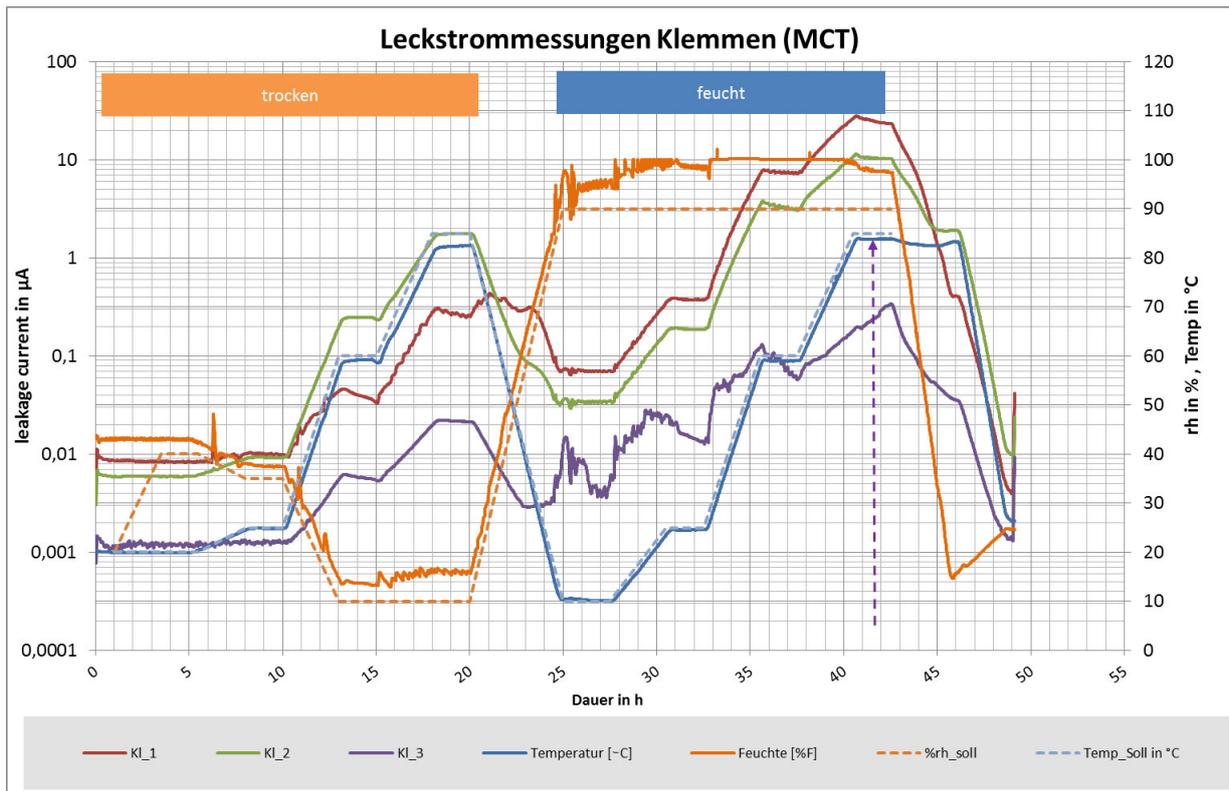


Abbildung 31: Leckstrommatrix für verschiedene Modulsituationen bei charakteristischen Klimata

Die Ursache hierfür ist noch nicht abschließend geklärt. Es wird allerdings vermutet, dass – speziell im Bereich hoher Feuchten – eine kleine Änderung der lokalen Feuchte einen großen Einfluss auf den Leckstrom hat. Bei den hohen Feuchten zeigte insbesondere auch der für das Datenlogging herangezogene Feuchtesensor Schwächen (s. Differenz zw. Feuchte (%) und %rh_Soll (=Sollwert) im obigen Schaubild). Eine Kalibrierung des Klimaschrankherstellers stellte dann klar, dass der Sollwert (eingebauter Feuchtesensor des Klimaschranks, der allerdings nicht mit geloggt werden kann) die genauere Größe darstellt.

Beim nochmaligen Vergleich der Indoor und Outdoor-Messungen kamen wir zu dem Schluss, dass die Outdoordaten von höherer Relevanz für die PID-Lebensdauerberechnung sind, da im Feld auch kondensierende Bedingungen erfasst werden. Ein guter Klimaschrank hingegen lässt kondensierende Bedingungen nicht zu (--> es ist uns auch nicht gelungen).

Um die PID-Lebensdauer besser einschätzen zu können, wurde bei MCT ein Modell entwickelt, das folgende Schritte beinhaltet.

- **PID-Tests an 60x120cm² Modulen im Klimaschrank:** diese Messungen dienen der Abschätzung der kritischen Ladung (= Ladung, bei der die Modulleistung auf 90% resp. 80% abgesunken ist)
- **Leckstromdaten des ZSW-Widderstall an MCT-CIGS Modulen:** Die Daten wurden im Rahmen eines anderen Förderprojektes generiert und wurden MCT zur Verfügung gestellt. Im Teilbericht 1 HJ 2014 wurde exemplarisch ein erster Datensatz vorgestellt; das Monitoring

wurde fortgeführt. Die Daten wurden entsprechend gefiltert und bewertet (Ausreißer und Fehlmessungen eliminiert). Hierbei war insbesondere auch das Verhalten bei Kondensation ein wichtiger Aspekt, da dieser Zustand der Kondensation in künstlichen Alterungstests im Klimaschrank nicht erreicht werden kann (Klimaschränke lassen diesen Betriebszustand nicht zu). Mit diesem Datensatz erhält man das spezifische Leckstrom-Verhalten der MCT-CIGS Module in Abhängigkeit der Umweltbedingungen. Es wird davon ausgegangen, dass dieses grundsätzliche Verhalten auch auf andere Standorte übertragen werden kann.

- **Klimadaten und Moduldaten verschiedener Klimazonen:** Um den für den Standort Widderstall generierten Zusammenhang zw. Umweltbedingungen und Leckstrom (bzw. geflossener Ladung) auf andere charakteristische Standorte übertragen zu können, werden detaillierte Klimadaten von charakteristischen Standorten benötigt. Für eine zuverlässige Berechnung der rel. Feuchte am Modul und insbesondere der Kondensation am Modul werden auch Modultemperaturen von CIS Modulen an den verschiedenen Standorten benötigt. Dies bedeutet allerdings auch, dass Standard Klimadatensätze (DWD,...) nicht verwendet werden können.

In einem ebenfalls geförderten Projekt werden unterschiedliche Module (u.a. auch MCT-CIGS-Module) an verschiedenen Standorten auf der Welt gemonitort. An jedem Standort werden neben den Kennliniendaten auch umfangreiche Klimadaten aufgenommen, die für interne Zwecke von MCT genutzt werden können. Der Datensatz umfasst folgende Messgrößen.

- fünf Standorte (verschiedene Klimazonen):
- Folgende Daten werden erfasst:
 - Umgebungstemperatur
 - Modultemperatur: --> 2 Modultemperaturen (Manz PV-Modul)
 - Einstrahlung:
 - Globalstrahlung geneigt
 - Globalstrahlung horizontal
 - Diffusstrahlung horizontal
 - Direktstrahlung
 - Relative Luftfeuchte
 - Niederschlag
 - APE
 - Windrichtung
 - Windgeschwindigkeit

2.1.5.2. Kennlinienmessungen von exponierten Modulen

Alternativ zu den ursprünglich im Projekt vorgesehenen Einzelkennlinienmessungen (--> Einzelkennlinienmessplatz sollte beschafft werden) wurde eine größere Anzahl von Modulen in der Freifläche bei MCT exponiert und in regelmäßigen Abständen nachgemessen.

Um die Messunsicherheiten bei den Nachmessungen möglichst gering zu halten, läuft der komplette Prozess nach einer festgelegten Routine ab (--> Arbeitsanweisung). Um z.B. den sog. „dark anneal-Effekt“ zu vermeiden, werden die Module direkt nach dem Abbau auf die fabrik-interne Light-Soak-Strecke (ca. 200W/m², 20Minuten, Leuchtstoffröhren) gelegt. Bei Verschmutzung werden die Module vor der Messung gereinigt. Um ein vollständigeres Bild der Module zu erhalten, wird zusätzlich zur Kennlinienmessung (bei 1000W/m², 700W/m², 200W/m² und 100W/m²) für jedes Modul noch eine Elektrolumineszenz-Messung durchgeführt.

Die folgenden Schaubilder zeigen – als ein Ausschnitt der Aktivitäten – einen Moduldatensatz von 12 Modulen, die über die Projektlaufzeit regelmäßig gemessen wurden.

Abbildung 32 zeigt den Verlauf der elektrischen Kenndaten bei STC bezogen auf die für das Labelling relevante Ausgangsmessung. Nach drei Jahren liegt der Mittelwert der relativen Modulleistungen bei 100,3%. Der anfängliche Lightsoak-Effekt von in diesem Fall ca. 6..7% in der Modulleistung ist offensichtlich wieder abgeklungen. Die negative Steigung der Leistungs-Kurve hat sich deutlich abgeflacht. Allerdings sind Effekte in der Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Füllfaktor zu erkennen, die sich in der Summe kompensieren. Diese Effekte sollen weiter untersucht werden. Ziel dabei ist eine Zuordnung zu Halbleiterphysikalischen Effekten in den Einzelschichten der Solarzelle.

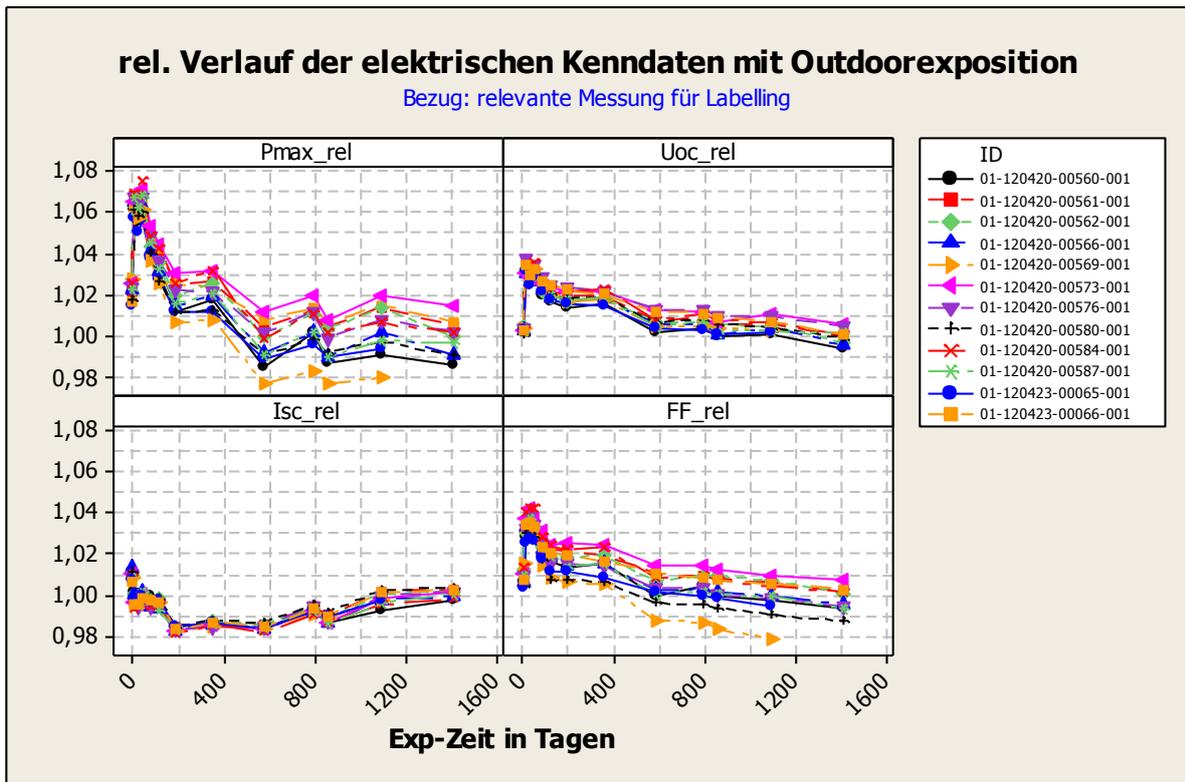


Abbildung 32: Nachmessung von im Feld exponierten Modulen

Es deutete sich bei diesem Experiment eine Abhängigkeit von P_{max_rel} vom Schwachlichtverhalten an.

Die aus den Nachmessungen gewonnenen Ergebnisse bilden einen wertvollen Baustein in der Bewertung des Langzeitverhaltens der MCT Module. Es wird jeweils versucht, Änderungen im Langzeitverhalten auf Prozessänderungen zurückzuführen.

2.1.6. Transfer (AP7)

Ein Transfer der beschleunigten Alterungstests der HSU zur MCT kann grundsätzlich vorgenommen werden. Eine entsprechende Dokumentation müsste noch erstellt werden. Es ist allerdings auch zu erwähnen, dass im Rahmen des Projektes keine Investitionsmittel für einen derartigen Messplatz vorgesehen waren. Im Zuge der Auflösung der Bosch CISTech hat sich die MCT trotzdem bemüht, einen entsprechenden Messplatz in einer Auktion zu ersteigern; allerdings ohne Erfolg, da die Auktion letztendlich kurzfristig abgesagt wurde.

2.1.7. Koordination (AP7)

Die Koordination des Projektes war – wie auch bereits im Vorläuferprojekt – aufgrund der in den wichtigen Punkten sehr guten und konstruktiven Zusammenarbeit zwischen den Partnern problemlos.

Die Prioritäten der Arbeiten wurden in gegenseitiger Absprache und in Abstimmung mit den MCT-Wichtigkeiten gesetzt. Es wurden daher zum einen Proben aus der laufenden Fertigung der MCT, zum anderen Entwicklungsprozesse des ZSW untersucht, die ein hohes Potential zur industriellen Umsetzung haben.

2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten halten wir aufgrund der eingangs erwähnten hohen Relevanz der zu bearbeitenden Themen für absolut notwendig.

Die im Rahmen des Projektes geleistete Arbeit war insgesamt qualitativ hochwertig. Die Arbeiten orientierten sich an den dargelegten Projektzielen. Wir halten die im Rahmen des Projektes geleistete Arbeit für angemessen.

2.3. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

ZSW:

Die Belastungstests an Zellen und Kleinmodulen leisteten einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der die Zuverlässigkeit von CIGS-Modulen bestimmenden Mechanismen. Die Ergebnisse kommen in erster Linie der Firma Manz zugute.

HSU:

In RECISII konnten an der HSU wesentliche Erkenntnisse zu relevanten Schädigungsmechanismen gewonnen werden. Auch wurden Mess- und Testverfahren entwickelt, die wesentlich zu einer Stabilitäts- und Qualitätskontrolle beitragen. Durch Publikation verschiedener Ergebnisse, wurde die Sichtbarkeit der HSU deutlich erhöht. Auch konnten mit optiCIGS und proCIGS Projekte gewonnen werden, welche die Kompetenz deutscher Institute im Bereich CIGS erhalten und ausbauen insbesondere durch die hiermit erzielte Kontinuität.

MCT:

Die im Rahmen des Projektes generierten Ergebnisse (insbesondere die Arbeiten im Bereich der PID-Schädigung sowie die ganzheitliche Betrachtung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen (gibt es Gemeinsamkeiten? --> u.U. gemeinsame Ursachen?)) werden als wichtig im Hinblick auf eine weitere Verbesserung der Langzeitstabilität eingestuft.

2.4. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Durchführung des Vorhabens sind folgende Aspekte von externen Institutionen als Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens zu nennen:

- Am ISE (Freiburg) wurden im Rahmen eines EU-Projektes (Performance) mathematische Formulierungen für das Degradationsverhalten von Solarzellen allgemein entwickelt (Gruppe um M.Köhl). Diese Formulierungen wurden für RECIS adaptiert.
- Veröffentlichungen des HZB Berlins (Gruppe um Th. Unold) indizierten eine Rückkontaktdiode zur Interpretation insbesondere von Admittanzmessungen. Dieses Modell wurde innerhalb von RECIS zu einem Phototransistormodell erweitert, womit Degradationsmechanismen bei Alterungstests erklärt werden konnten.
- Innerhalb von RECIS wurde PID als möglicher Degradationsmechanismus bei CIGS-Modulen identifiziert. In RECIS II wurden weitergehende Analysen vorangetrieben.

2.5. Veröffentlichungen

Journals

Ott, T.; Walter, T. und Unold, T.:

Phototransistor Effects in Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells.

In: *Thin Solid Films*, 2013, 535, S. 275-278.

Ott, T.; Walter, T.; Hariskos, D.; Kiowski, O. und Schöffler, R.:

Accelerated Ageing and Contact Degradation of CIGS Solar Cells.

In: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, Vol. 3, S. 515-519.

Ott, T.; Schönberger, F.; Walter, T.; Hariskos, D.; Kiowski, O.; Salomon, O. und Schöffler, R.:

Verification of Phototransistor Model for Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells.

In: *Thin Solid Films*, 2015, Vol. 582, S. 392-396.

Konferenzbeiträge

O. Kiowski, J. Hanisch, T. Ott, and T. Walter:

SIMS/SNMS Measurements on CIGS Solar Cells after Dark Anneal and Electrical Bias Conditions,

Poster at European Photovoltaics and Solar Energy Conference, 2015, Hamburg

Ott, T.; Schönberger, F.; Walter, T.; Hariskos, D.; Kiowski, O. und Schöffler, R.:

Long term endurance test and contact degradation of CIGS solar cells.

In Proceedings: SPIE Optics Photonics, San Diego, USA, 2013.

Schönberger, F.; Lutz, S.; Ott, T.; Walter, T. und Schöffler, R.:

Spectral Luminescence Imaging for Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Modules.

In Proceedings: 28th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Paris, Frankreich, 2013.

Ott, T.; Lavrenko, T.; Walter, T. und Schöffler, R.:

On the Importance of the Back Contact for Cu(In,Ga)Se₂.

In Proceedings: 29th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Amsterdam, Niederlande, 2014.

Ott, T.; Walter, T. und Schöffler, R.:

On the Interpretation of Admittance and IV(T) Measurements of CIGS Thin Film Solar Cells.

In Proceedings: 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Deutschland, 2015.

Kiowski, O.; Lämmle; Salomon, O.; Ott, T. und Walter, T.:

Voltage-bias-induced migration of elements in CIGS solar cells.

In Proceedings: 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Deutschland, 2015.

Ott, T.; Walter, T.; Schöffler, R. und Fecht, H.-J.:

Punch-Through Effect in CIGS Thin Film Solar Cells.

In Proceedings: 32th European Photovoltaic Solar Energy Conference, München, Deutschland, 2016.

3. Schlusswort und Ausblick

Insgesamt kann auf ein Projekt mit einigen aufschlussreichen Ergebnissen und einer vertrauensvollen Zusammenarbeit zurückgeblickt werden. Für eine endgültige Bewertung des PID-Verhaltens sind allerdings noch etliche Arbeiten notwendig. Hierzu zählt u.a. auch die Entwicklung eines feldrelevanten PID-Tests zur Absicherung des Verhaltens im Feld.

Aufgrund der Wichtigkeit der Stabilitätsthemen soll auf jeden Fall konsequent weiter an einer nachhaltigen Lösung auf Zellebene gearbeitet werden.

Wir bedanken uns für die Möglichkeit, die Arbeiten im Rahmen der Förderung durchführen zu können.

4. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: Voc	12
Abbildung 2: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: ff.....	12
Abbildung 3: EQE vor und nach den Dauerläufen unter verschiedenen Bedingungen	12
Abbildung 4: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: Pmax	12
Abbildung 5: Dauerläufe unter bias bei 105 °C: COV.....	13
Abbildung 6: Dauerläufe unter bias: Wechsel der Polarität.....	13
Abbildung 7: Hell- und Dunkelkennlinien vor und nach Dauerlauf unter negativem bias.....	14
Abbildung 8: Hellkennlinien nach Dauerläufen unter bias bei 145 °	14
Abbildung 9: CV-Kennlinien bei Dauerläufen unter bias bei 145 °C.....	15
Abbildung 10: Bestimmung der Aktivierungsenergie bei negativem bias	15
Abbildung 11: Dauerläufe unter negativem bias: Vergleich sequentieller Prozess (oben), Simultanverdampfung (unten)	16
Abbildung 12: HT-Kennlinien bei unterschiedlichen Intensitäten	17
Abbildung 13: LT-Kennlinien bei unterschiedlichen Intensitäten	17
Abbildung 14: Voc(T) bei verschiedenen Intensitäten	17
Abbildung 15: Temperaturabhängige Hellkennlinien (mit Rückkontakt-Diode).....	18
Abbildung 16: Zugehöriges Admittanzspektrum.....	18
Abbildung 17: Temperaturabhängige Hellkennlinien (ohne Rückkontakt-Diode).....	18
Abbildung 18: Zugehöriges Admittanzspektrum.....	18
Abbildung 19: PID-Messplatz	19
Abbildung 20: Bänderdiagramm Phototransistor	20
Abbildung 21: Simulierte LT- und HT-Kennlinien sowie Voc(T).....	21
Abbildung 22: Simuliertes Bänderdiagramm bei unterschiedlichen Dotierungen und Rückseitenkontaktbarriere	21
Abbildung 23: Simulierte Kennlinien und Punchthrough-Effekt	22
Abbildung 24: Gemessene Kennlinien und Punchthrough-Effekt.....	23
Abbildung 25: SIMS Spektren (links) und IU Kennlinien (rechts), jeweils vor „as grown“ und nach „dark annealed“ @0V) 7 Tagen bei 105°C ohne angelegte Spannung.	24
Abbildung 26: SIMS Spektren, jeweils nach 7 Tage dark anneal (da) bei 105°C ohne und mit +1V (links) bzw. -1V (rechts) angelegter Spannung.	25

Abbildung 27: Vom ZSW verwendetes Prüflingsdesign für PID Tests. Typischerweise werden 2 Zellen des Zellbereichs ebenfalls mit einem Kontaktband kontaktiert (nicht gezeigt), wobei die Hochspannung nur an eine angelegt wird..... 26

Abbildung 28: Bezeichnung der Strukturierungslinien P1, P2 und P3 bei einem CIGS Modul mit monolithischer Serienschaltung. Unverschaltete Zellen werden nur durch eine P3 Strukturierung voneinander getrennt. 27

Abbildung 29: Rauschen für ursprünglichen PID-Aufbau..... 28

Abbildung 30: Rauschen und Offset für optimierten PID-Aufbau..... 29

Abbildung 31: Leckstrommatrix für verschiedene Modulsituationen bei charakteristischen Klimata . 30

Abbildung 32: Nachmessung von im Feld exponierten Modulen 32

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Öffentlicher Abschlussbericht
3. Titel RELIABILITY VON CIS-DÜNNSCICHTSOLARZELLEN (RECIS II)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Schäffler, Raymund Kiowski, Oliver Walter, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2016
	6. Veröffentlichungsdatum Februar 2017
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Manz CIGS Technology GmbH Alfred-Leikam-Str. 25 74523 Schwäbisch Hall Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) Industriestraße 6 70565 Stuttgart Hochschule Ulm Albert-Einstein-Allee 55 89081 Ulm	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 0325148D/E/F
	11. Seitenzahl 38
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 0
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Im Laufe der Projektarbeiten von RECIS wurde erkannt, dass PID (Potential Induced Degradation) sowie eine Rückwärtsspannung an der Zelle relevante Degradationsmechanismen für CIGS Dünnschichtsolarmodule darstellen. Die Untersuchungen wurden durch Temperaturerhöhung beschleunigt und die Ergebnisse am ZSW und an der HSU analysiert. Dabei wurden an der HSU Ähnlichkeiten zwischen beiden Degradationsmechanismen festgestellt sowie das Modell eines Phototransistors entwickelt. Am ZSW wurden die Parameterdriften materialanalytisch untersucht. MCT lieferte zusammen mit dem ZSW über die Vorhabenslaufzeit Module und Einzelschichten. Daneben konnten bei MCT nach einer Optimierung des Aufbaus der Leckstrommessung PID-Untersuchungen an 60 x 120 cm² Modulen in einer Klimakammer durchgeführt werden. Leckstromdaten des ZSW Outdoorstandorts Widderstall flossen in das Projekt ein. Mit Hilfe der verfügbaren Leckstromdaten wurde ein erstes Lebensdauermodell entwickelt, das allerdings noch verfeinert werden muss. Für die Betrachtung verschiedener Klimazonen fließen ferner entsprechende Klimadaten ein. Zur Verifikation von im Labor beobachteten Parameterdriften wurden bei MCT in regelmäßigen Abständen Kennlinienmessungen an Module von der Freifläche durchgeführt.

19. Schlagwörter

Zuverlässigkeit, CIGS, PID, Reliability, Dark Anneal

20. Verlag

-

21. Preis

-