

Hochschule Ulm



**manz**

CIGS Technology GmbH



Gemeinsamer öffentlicher Abschlussbericht des Entwicklungsprojektes

## „Optimierte Qualitätsanalyse von CIGS-Modulen mittels bildgebender Messtechnik und Spektroskopie“

### optiCIGS

<p><b>Zuwendungsempfänger:</b></p> <p>Manz CIGS Technology GmbH (MCT) --&gt; ab 1.2.2018 Nice Solar Energy GmbH (NSE)</p> <p>Bosch Solar CISTech GmbH (BSCT, ausgeschieden 06/2016)</p> <p>Forschungszentrum Jülich (FZJ)</p> <p>Hochschule Ulm (HSU)</p> <p>Universität Oldenburg (UOL)</p> <p>ZAE Bayern</p>	<p>FKZ 0325724</p>
<p>Laufzeit des Vorhabens:</p>	<p>01.09.2014 – 31.08.2017</p>
<p>Das Projekt wurde - mit Schreiben vom 28.6.2017 - bis zum 28.2.2018 kostenneutral verlängert</p>	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhalt

1. Kurze Darstellung: .....	3
1.1. Aufgabenstellung.....	3
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2. Eingehende Darstellung .....	8
2.1. Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	8
2.1.1. Koordination (AP0) .....	8
2.1.2. Probenpräparation (AP1) .....	9
2.1.3. IR-Analytik (AP2).....	12
2.1.4. PL-Analyse (AP3).....	32
2.1.5. Differentielle Analytik (AP4) .....	49
2.1.6. Nichtdestruktive Versagensanalytik (AP5) .....	62
2.1.7. Begleitende Detailanalytik (AP6).....	81
2.1.8. Modellbildung und Simulation (AP7) .....	110
2.1.9. Bildgebender Auswertalgorithmus (AP8).....	127
3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	134
4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	134
5. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes .....	134
6. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens .....	135
7. Veröffentlichungen.....	135
8. Schlusswort und Ausblick .....	139
9. Abbildungsverzeichnis.....	141

## 1. Kurze Darstellung:

### 1.1. Aufgabenstellung

Die deutsche PV-Industrie und der deutsche PV-Anlagenbau standen bereits zu Projektbeginn vor großen Herausforderungen. Einerseits sind die Modulpreise durch weltweite Überkapazitäten stark gesunken, wodurch nur Technologien mit hohem Kostenreduktionspotenzial überlebensfähig sind. Andererseits sind Alleinstellungsmerkmale primär gegenüber Wettbewerbern essentiell für dieses Überleben. Betrachtet man die Situation für die CIGS-Technologie, so ist klar festzustellen, dass Deutschland auch aufgrund langjähriger Fördermaßnahmen eine weltweit führende Rolle sowohl im Bereich der Technologieentwicklung als auch im Anlagenbau einnimmt. So konnte der Projektpartner MCT/NSE mit Modulwirkungsgraden von – zu Projektbeginn - knapp über 15% demonstrieren, dass die CIGS Dünnschicht hinsichtlich des Wirkungsgrades zum Polysilizium aufgeschlossen hat. Inzwischen sind in einzelnen Versuchen gut über 16% erreicht. An weiteren Verbesserungen - sowohl im Bereich der Verbesserung der reinen Zelle als auch an der Modultechnik - wird gearbeitet.

Ziel von optiCIGS ist es, den erwähnten Technologiestand weiter zu verbessern. Das **industriengeführte Projekt optiCIGS bündelt zudem die auf diesem Gebiet führenden Institute. Die Koordination wird von der Fa. MCT/NSE übernommen**, um die industrielle Führung des Projektes sichtbar zu machen und die Ergebnisse einer direkten industriellen Verwertung zuzuführen. Als weiterer Industriepartner ist die Fa. Bosch Solar CISTech (BSCT) in Brandenburg beteiligt. Insbesondere aufgrund der damit einhergehenden Erweiterung der Materialsysteme - neben dem bei MCT/NSE etablierten ko-verdampften CIGS soll das bei BSCT in einem sequentiellen Prozess hergestellte und um die Materialkomponente Schwefel erweiterte CIGS<sub>Se</sub> untersucht werden - werden wertvolle Impulse für das Projekt erwartet. Das Projekt soll damit im Erfolgsfall die Tauglichkeit der entwickelten Analysemethoden für beide, die CIGS-Dünnschichttechnik dominierenden Herstellungsrouten demonstrieren.

Durch diese Materialvielfalt wird ein schnellerer Erkenntnisgewinn erwartet. Außerdem gibt es in beiden Firmen ähnliche Fragestellungen, die in dem **gemeinsamen Projekt fördertechnisch gebündelt werden sollen**.

Dünnschichtsolarmodule auf der Basis von CIGS als absorbierendes Material haben – neben CdTe, das allerdings aufgrund seines Cd-Anteils aus umweltpolitischen Gründen umstritten ist – das höchste Wirkungsgradpotential aller Dünnschichttechnologien, verbunden mit einem signifikanten Kostenreduktionspotenzial. Die vollständige Erschließung dieses Potenzials erfordert eine möglichst präzise und lückenlose Kontrolle des Produktionsprozesses. **Bildgebende Verfahren auf der Basis von Lumineszenz und Thermografie** sind innerhalb der Modul-Serienfertigung potentiell sehr mächtige Instrumente zur Qualitätskontrolle für nahezu alle Produktionsschritte. Die inhärent-komplementäre Qualität beider Verfahren ist bedingt durch die Art ihrer Bildentstehung (Abbildung der strahlenden Rekombination von Ladungsträgern, bzw. Abbildung der lokalen Verluste durch Wärmedissipation). Eine konsequente quantitative Umsetzung einer Qualitätskontrolle durch diese

Verfahren ist somit für alle Produktionstechnologien in der Photovoltaik von höchster Relevanz. Dies gilt insbesondere für die CIGS Technologie, um die besonders große **Lücke zwischen Labor- und industriellen Wirkungsgraden bei Sicherstellung hoher Produktionsausbeuten zu schließen**.

Aufgabe des Projekts ist zum einen die Entwicklung von grundsätzlich automatisierbaren, inlinefähigen Bildgebungsverfahren zur Qualitätskontrolle für unterschiedliche Teilschritte des CIGS Produktionsprozesses. Die **Analysemethoden sollen die Weiterentwicklung der CIGS Technologie bei den Industriepartnern (MCT/NSE und BSCT) substantiell unterstützen** und daher zunächst für die Charakterisierung von kommerziellen Modulen der Abmessungen 60 (50) cm x 120 cm geeignet sein. **Die grundsätzliche Eignung der Methoden zur Analyse von Modulen mit noch größeren Abmessungen (im Bereich 1,6m<sup>2</sup>) muss dabei gegeben sein**. Das Ziel ist somit ein verbesserter Wirkungsgrad der Module sowie Material- und Kosteneinsparung durch effizientere und frühzeitigere Qualitätskontrolle. Zu diesem Zweck müssen die Messmethoden die quantitative Bestimmung der Schicht- bzw. Modulqualität (Wirkungsgrad, Modulleistung, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom) ermöglichen, d.h. inklusive lokaler Defekte und lateraler Inhomogenitäten. In einem weiteren Schritt sollen die Moduleigenschaften auch nach Abzug der Beiträge der Defekte und Inhomogenitäten bestimmt werden, um herauszuarbeiten, welches Potential das entsprechende Modul hinsichtlich obiger Kenndaten hat.

In einem weiteren Schwerpunkt soll das für das Modulverhalten im Feld relevante Rückwärtsverhalten im Detail untersucht werden. Hintergrund ist, dass im Fall einer lokalen Abschattung des Moduls die abgeschatteten Zellen teilweise in den Rückwärtsbetrieb gehen und damit potentiell durchbruchgefährdet sind. Hier gilt es, die für das Feld relevanten Bedingungen zu definieren sowie eine Bestandsaufnahme des Rückwärtsverhaltens zu machen.

Um die elektrischen Verluste in der Modulperformance zu quantifizieren, welche durch die Serienverschaltung, Schichtdefekte und laterale Inhomogenitäten verursacht werden, soll in einem weiteren Schwerpunkt des Projektes das Wirkungsgradpotential auf der Skala einzelner Solarzellen flächenstatistisch und unter Berücksichtigung lateraler Inhomogenitäten und chemischer Gradienten durch Kombination von Experiment (CV, IV, QE, Admittanzspektroskopie, DLTS, TR-PL) und Devicesimulation (SCAPS) bestimmt werden. Speziell kann die Erfassung dominierender Verlustmechanismen (insbesondere Volumen- und Grenzflächenrekombination) dazu beitragen, die mit bildgebenden Verfahren generierten Ergebnisse physikalisch konsistent interpretieren zu können.

Das Projekt **entwickelt die erfolgversprechendsten Methoden aus dem Vorläufer-Projekt PV-IR-EL (mit den Partnern ZAE, MCT/NSE, FZJ) weiter**, greift darüber hinaus aber auch zusätzliche wichtige Fragestellungen zur Vorhersage der Stabilität von CIGS Solarmodulen auf und verfolgt zudem **völlig neue Ansätze zur Qualitätskontrolle (e.g. differentielle Methoden)**. Detaillierte Simulationen und Modellierungen helfen, die Prüfverfahren zu validieren und zu verfeinern. Alle Methoden sollen auf ihre Inline-Fähigkeit überprüft werden. **Mindestens eines dieser Verfahren soll an einer relevanten Zahl von Modulen unter Produktionsbedingungen getestet werden (→ Proof of Concept Phase)**. Die

Verfahren sind zudem für die Bewertung von Einzelzellen und Modulen anderer Technologien geeignet und somit auch technologieunabhängig verwertbar.

## **1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das industriegeführte Projekt optiCIGS bündelt die auf diesem Gebiet führenden Institute. Mit Prof. U. Rau (Forschungszentrum Jülich) und Prof. Th. Walter (Hochschule Ulm) beteiligen sich zwei Wissenschaftler, die diese Technologie seit den Anfängen vorangetrieben haben. Weiterhin bringen das Bayrische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE, Erlangen) und die Univ. Oldenburg ihre langjährigen Expertisen ein.

Seitens der Industrie beteiligen sich die Fa. Manz CIGS Technologie GmbH (MCT) (Koordinator) und die Fa. Bosch Solar CISTech (BSCT) / Brandenburg. Damit waren zu Projektbeginn die zwei führenden Herstellverfahren (thermisches Verdampfen sowie sequentieller Prozess) der CIS-Dünnschicht repräsentiert. Leider hat der Partner Bosch Solar CISTech aufgrund der Unternehmensaufgabe zum 15.6.2016 das Projekt verlassen. Damit war das Projekt insgesamt zwar nicht gefährdet; die Vielfalt und die ergänzenden Informationen zum sequentiellen Prozess allerdings fehlten. Die Fa. MCT wurde aufgrund einer Änderung der Mehrheitsverhältnisse in die NICE Solar Energy GmbH (NSE) Schwäbisch Hall umfirmiert (Bekanntgabe mit Schreiben vom 2.2.2018). Der Partner MCT wird daher im vorliegenden Abschlussbericht auch als MCT/NSE bezeichnet.

## **1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

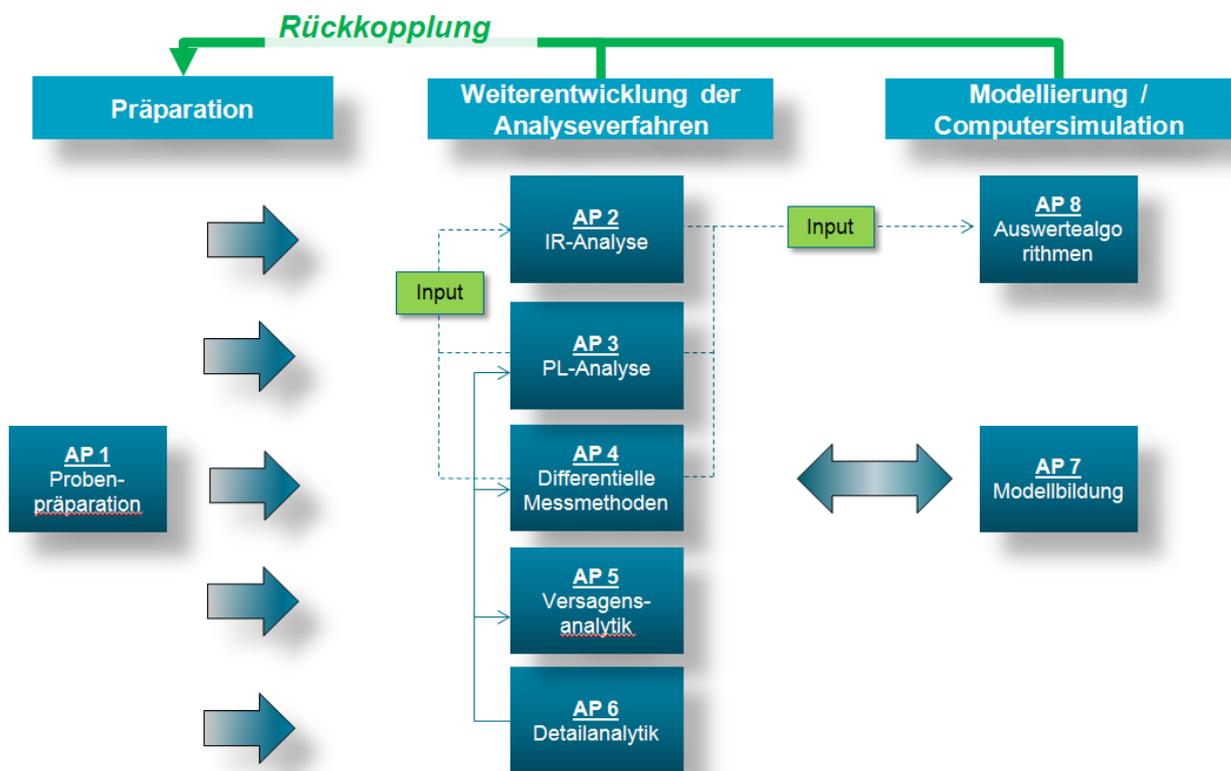
### **Einleitung und Struktur des Projektes:**

Basierend auf dem Projektstrukturplan werden die einzelnen Arbeitspakete entsprechend dem Antrag im Folgenden inhaltlich beschrieben. Weiterhin werden die verantwortlichen Projektpartner (für das jeweilige Arbeitspaket) benannt. Die Mitarbeit der Projektpartner in den jeweiligen Arbeitspaketen ist aus der Aufgabenteilung ersichtlich. Der Projektstrukturplan und die Vernetzung der Arbeitspakete und Partner sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Die insgesamt sieben wissenschaftlichen Arbeitspakete (AP2-AP8) sind in zwei Teilprojekte aufgeteilt. Teilprojekt 1 umfasst die Weiterentwicklung der Analyseverfahren (AP 2–6), Teilprojekt 2 die Modellierung; vor allem mit Computersimulationen (AP 7-8). Die Koordination des Projektes erfolgt durch den Industriepartner MCT/NSE (AP 0). Das Arbeitspaket AP1 beinhaltet die Präparation der Proben bei den Industriepartnern inkl. des Einsatzes hauseigener Analytik zur Grundcharakterisierung des Probenmaterials.

Mindestens eine Methodik aus AP2 (IR-Messungen), AP3 (Photolumineszenz) sowie AP4 (differentielle EL/IR) soll in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit in einer Proof-of-Concept-Phase auf die Tauglichkeit für den Einsatz in einer Produktions- bzw. Entwicklungslinie getestet werden. Die dazu nötigen Untersuchungen sollen an einer statistisch relevanten Anzahl von Modulen idealerweise direkt im Produktionsprozess durchgeführt werden. Die systematischen Fehlerquellen – wie z.B. der Einfluss der Beleuchtungshomogenität bei lichtangeregten Methoden – werden im

Vorfeld für die infrage kommenden Methoden geklärt und in einem Kurz-Bericht dargestellt. Die Module sollen dabei halbautomatisch vermessen werden, d.h. die Module werden dem laufenden Produktionsprozess entnommen, vermessen und danach möglichst wieder manuell in den Produktionsprozess eingeschleust. Alternativ kann eine statistisch relevante Anzahl an Modulen auch an einem dafür aufgebauten Messplatz bei einem der Forschungsinstitute vermessen werden. Bei den Untersuchungen sollen auch Versuchsmodule mit bewussten Prozessvariationen in der Schichtabscheidung oder Strukturierung verwendet werden. Die Rahmenbedingungen für diese Proof-Of-Concept-Phase werden von den Industriepartnern in Absprache mit den Instituten festgelegt.



**Abbildung 1: Strukturplan und Vernetzung des Projektes**

Der zeitliche Ablauf ist in Tabelle 1 dargestellt.

		Entwicklung Messmethoden					Methodenoptimierung und Untersuchungen					Proof of Concept	
		Jahr 1		Jahr 2			Jahr 3			2017			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
Arbeitspaket	Kurzbeschreibung	Verantw.											
AP0	Koordinat	MCT											
AP1	AP 1.1	MCT	Probenpräparation										
	AP 1.2	BSC	Probenpräparation										
AP2	AP 2.1	ZAE	IR an Kleinmodulen	M2.1									
	AP 2.2	ZAE	IR Analytik (ILIT, DLIT)			Pmp (IR) Kleinmodule				M2.2			
	AP 2.3	ZAE	IR Analytik (ILIT, DLIT)							Machbarkeit IR Großmodule		M2.3	
	AP 2.4	ZAE	IR Analytik (ILIT, DLIT)										
AP3	AP 3.1	HSU	PL-Absorber										
	AP 3.2	HSU	PL-Absorber										
	AP 3.3	HSU	PL-Absorber										
	AP 3.4	HSU	PL-Absorber										
AP4	AP 4.1	FZJ	Differentielle EL/IR										
	AP 4.2	FZJ	Differentielle EL/IR										
AP5	AP 5.1	FZJ	Versagensanalytik										
	AP 5.2	FZJ	Versagensanalytik										
AP6	AP 6.1	UOL	Begleitende Charakterisierung										
	AP 6.2	UOL	Begleitende Charakterisierung										
AP7	AP 7.1	FZJ	Simulation und Fit										M7.1
	AP 7.2	FZJ	Simulation und Fit										M7.2
AP8	AP 8.1	ZAE	Auswerteargorithmen										
	AP 8.2	ZAE	Auswerteargorithmen										
	AP 8.3	MCT	Auswerteargorithmen										Produktionstest M8.3

Tabelle 1: Arbeitsplan mit den Meilensteinen

## 1.4. 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.

Am 18.2.2016 fand an der Hochschule Ulm ein eintägiger Workshop zur Interpretation transienter PL-Messungen (TRPL) gemeinsam mit Forschern von der Universität Halle Wittenberg statt (Prof. Roland Scheer). Während dieses Treffens wurden Ergebnisse aus optiCIGS mit den Forschern aus Halle eingehend diskutiert, bewertet und mit Ergebnissen aus Halle verglichen.

Darüber hinaus wurden auch Kontakte zu anderen Dünnschicht-Solar-Firmen gepflegt.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1. Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

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

#### 2.1.1. Koordination (AP0)

Die Prioritäten der Arbeiten wurden in gegenseitiger Absprache und in Abstimmung mit den Wichtigkeiten der Industriepartner gesetzt. Es wurden Proben der beiden Industriepartner MCT/NSE und BSCT untersucht, die eine hohe industrielle Relevanz haben.

Die gemeinsamen Berichte wurden vom Koordinator auf Grundlage der Partner-Teilberichte zusammengestellt. Die Beiträge der einzelnen Partner wurden jeweils ausgewiesen. Dieses Vorgehen war mit der Projektbegleitung des PTJ abgesprochen.

Für einen möglichst transparenten und nachvollziehbaren Probenaustausch wurde zu Beginn vereinbart, dass alle Probenlieferungen mit einem begleitenden Lieferschein mit klarer Beschreibung der Proben sowie einer Angabe, was mit den Proben passieren soll bzw. was das Ziel der Untersuchung ist, versandt werden sollen.

Von Seiten des Koordinators wurde ein sftp-Server für den Austausch von Daten, Berichten und Informationen bereitgestellt. Temporär war die Verfügbarkeit des Servers aufgrund von IT-

Problemen der Manz AG leider eingeschränkt. Im letzten Projektdrittel wurde daher ein neues System aufgesetzt und zur Verfügung gestellt.

Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Meetings wurden im Rahmen des Projektes abgehalten. Die inhaltlichen Themen der Statusmeetings wurden von Seiten der Projektleitung koordiniert. Die der Workshops vom jeweiligen AP-Leiter.

Treffen	Datum	Partner	Ort
Antrag-Meeting	31.01.2014	MCT/NSE	Schwäbisch Hall
Kick-Off	13.10.2014	MCT/NSE	Schwäbisch Hall
Workshop Simulation	23.03.2015	FZJ	Jülich
Statustreffen 1/14	30.03.2015	BSCT	Brandenburg
Workshop PVMOS	01.10.2015	FZJ	Jülich
Statustreffen 1/15	15.10.2015	UOL	Oldenburg
Statustreffen 1/16	29.02.2015	FZJ	Jülich
Workshop PL	18.02.2016	HSU	Ulm
Workshop Rückwärtsverhalten	23.08.2016	UOL	Oldenburg
Statustreffen 2/16	11.10.2016	ZAE	Erlangen
Statustreffen 1/17	15.03.2017	HSU	Ulm
Statustreffen 2/17	17.10.2017	ZAE	Erlangen
Abschlussstreffen	22.02.2018	MCT/NSE	Schwäbisch Hall

Die Koordination des Projektes war aufgrund der in den wichtigen Punkten sehr guten und konstruktiven Zusammenarbeit zwischen den Partnern problemlos.

### 2.1.2. Probenpräparation (AP1)

Das Projekt wurde von den beiden Industriepartnern BSCT und MCT/NSE mit industrierelevantem Probenmaterial bestückt. Es sei an dieser Stelle noch einmal angemerkt, dass der Partner Bosch CISTech das Projekt im Juni 2016 wegen Unternehmensaufgabe leider verlassen hat. Das verbliebene Probenmaterial sowie eigens kurz vor Ausstieg noch zur Verfügung gestelltes Material erschienen den Projektpartnern allerdings ausreichend, um die Projektziele weiter verfolgen zu können. Im Folgenden werden die Präparationsaktivitäten der beiden Industriepartner dargelegt.

**2.1.2.1. Partner MCT/NSE (AP1.1)**

Der Partner MCT/NSE hat im Verlauf des Projektes eine große Vielzahl und Vielfalt (spezielle Präparationen) an unterschiedlichen Proben für die Projektpartner bereitgestellt. Die Sonderpräparationen wurden in Anbetracht des teils deutlich erhöhten Aufwandes in der Fertigung im Vorfeld möglichst detailliert besprochen.

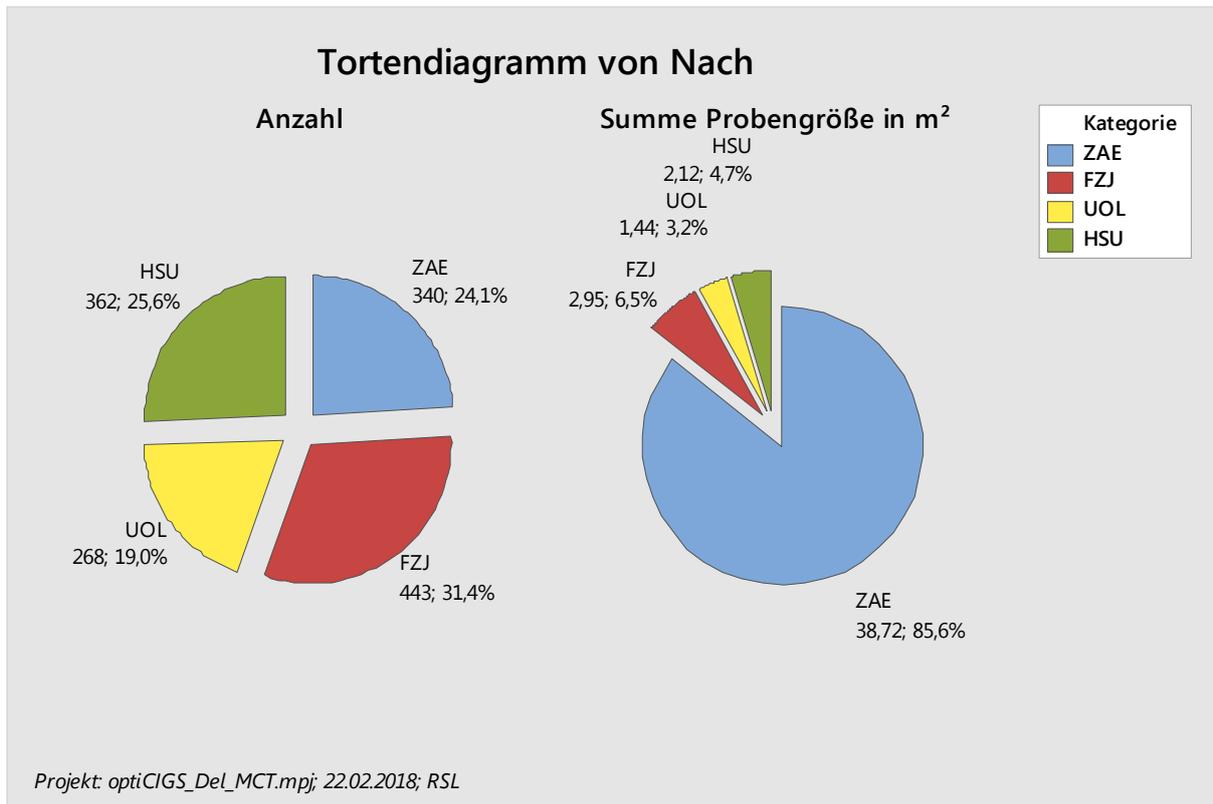
Zunächst ein Überblick (s. Tabelle 2) über die insgesamt 1413 von MCT/NSE hergestellten und verschickten Proben. Für alle Probenlieferungen existieren hinterlegte Lieferscheine. Teilweise waren noch Vorversuche notwendig, weshalb die insgesamt hergestellte Probenanzahl noch einmal höher liegt.

**Tabelle 2: Probenübersicht MCT/NSE**

Zeilenbe- schriftungen	Spaltenbeschriftungen				Gesamt ergebnis
	FZJ	HSU	UOL	ZAE	
2014	72		44	218	334
2015	54	168	66	72	360
2016	133	194	138	10	475
2017	184		20	40	244
<b>Gesamt ergebnis</b>	<b>443</b>	<b>362</b>	<b>268</b>	<b>340</b>	<b>1413</b>

Jahr	FZJ	HSU	UOL	ZAE
2014	72	0	44	218
2015	54	168	66	72
2016	133	194	138	10
2017	184	0	20	40

Die folgende Abbildung 2 zeigt die MCT/NSE-Probenlieferungen nach Partner und Probengröße. Die flächenmäßig deutlich erhöhte Menge an Modulen an das ZAE resultiert aus der Proof of Concept Phase mit dem Ziel der Validierung der geeignetsten Messmethode.



**Abbildung 2: MCT/NSE Probenlieferungen nach Partner und Probengröße**

Im Folgenden seien einige der Probenlieferungen - thematisch gebündelt - exemplarisch herausgegriffen:

- I. Simulation: Molybdän Variationen für die Überprüfung der simulierten (PVMOS) Abhängigkeit des Mo-Rückkontaktes auf die Shuntwirksamkeit von lokalen Defekten auf die Modulperformance
- II. Performancevorhersage aus bildgebender Analytik: Verschiedenste größere und kleinere Module (verkapselt und unverkapselt) mit Variation der Defektdichten zur Untersuchung des Einflusses der Verkapselung sowie der Defektdichten auf die Vorhersagegenauigkeit der elektrischen Moduleigenschaften mittels bildgebender Verfahren.
- III. Absorberqualität: Variationen von Schichtaufbau und der Pufferschichten für PL-Untersuchungen mit dem Ziel einer validen Bestimmung der Minoritätsladungsträgerlebensdauer als Merkmal für die Absorberqualität
- IV. Rückwärtsverhalten: Präparation einer großen Anzahl von sehr vergleichbaren Proben (verkapselt und unverkapselt) für die statistische Untersuchung des Rückwärtsverhaltens. Ziel war die Erfassung der Durchbruchstatistik nach Ort (in Zelle, an P1, an P3) und Art (abhängig von Rampensteilheit, von Vorbehandlung, von Beleuchtungsbias,...)

### 2.1.2.2. Partner BSCT (AP1.2)

Bis zum offiziellen Ausstieg im Juni 2016 hat die BSCT das Projekt mit Probenmaterial versorgt, das i.W. für die PL-Analytik (sowohl bei BSCT intern als auch an der HSU) verwendet wurde.

Alles Material entspringt dem Produktlinienprozess der BSCT, wie er in einer letztjähriger Veröffentlichung (V. Probst et al., IEEE Journal of Photovoltaics, 4(2), p.687, 2014) beschrieben ist. Die kompletten Module sind IEC (TÜV Süd) und DIBT-zertifiziert und stellen den Bestand aus dem BSCT vergangene und bis zum Ausstieg aktuelle Pilotprojekte (Fassadenintegration, Aufdachanlagen) bestückte.

Die Probensätze umfassten Mini-Module, Laborzellen mit Grid und unstrukturiertes Halbzeug (voll ausgebaut bis AZO, aber ohne P1-P3 oder Grid), zunächst alle im Format 5x5cm<sup>2</sup>.

Die Mini-Module (ID 366752) und das unstrukturierte Material (ID 374270) kommen beide aus Produktchargen mit 13% Modulwirkungsgrad (Apertur),  $U_{oc} \sim 585 \text{ mV/cell}$ ,  $FF \sim 69\%$ ,  $j_{sc} \sim 34 \text{ mA/cm}^2$ , die Laborzellen liegen bei 14% Aperturwirkungsgrad (bei ca. 10% Gridfläche) und  $U_{oc} \sim 590\text{-}600 \text{ mV}$ .

Eine weitere detailliertere Projektbeschreibung kann aufgrund des Ausstieges des Partners BSCT an dieser Stelle nicht mehr geleistet werden.

### 2.1.3. IR-Analytik (AP2)

#### Beitrag ZAE:

In „AP2: IR Analytik“ war das Ziel, die im Vorläufer-Projekt PV-IR-EL entwickelte Methode zur Bestimmung der Modulleistung weiterzuentwickeln, um eine genauere Bestimmung der Modulpeakleistung zu ermöglichen. Dabei sollte die **intrinsische Absorberqualität mittels EL** ermittelt werden, wohingegen der **Einfluss der Defekte durch IR-Messungen** (genauer Dark-Lock-in-Thermography, DLIT) bestimmt werden sollte.

In AP2 konnte das Verfahren aus PV-IR-EL signifikant verbessert werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich Defekte im Wesentlichen durch ihren Einfluss auf die „offene-Klemmen-Spannung“,  $V_{oc}$ , und den Füllfaktor,  $FF$ , auf die Modulleistung auswirken. Dabei wird der Einfluss der Defekte vernachlässigbar für steigende Einstrahlungsintensitäten, die gegen  $1000 \text{ W/m}^2$  streben. Weiter konnte gezeigt werden, dass sich auf Basis einer kombinierten IR- und EL-Messung die  $V_{oc}$  für alle Einstrahlungsintensitäten mit einer Genauigkeit von bis zu  $2,5\%$ <sup>1</sup> aus den IR- und EL-Messungen vorhersagen lässt. Auch für den  $FF$  ist dies über weite Einstrahlungsbereiche möglich, jedoch überwiegt für höhere Einstrahlungsbereiche der Einfluss des Serienwiderstandes gegenüber dem der

---

<sup>1</sup> Für kleinere Einstrahlungsintensitäten steigt die relative Abweichung.

Relative Differenz der  $V_{oc}$ :  $10 \text{ W/m}^2 - 82,9\%$ ;  $30 \text{ W/m}^2 - 27,2\%$ ;  $100 \text{ W/m}^2 - 13,8\%$ ;  $300 \text{ W/m}^2 - 3,8\%$   
 $1000 \text{ W/m}^2 - 2,5\%$

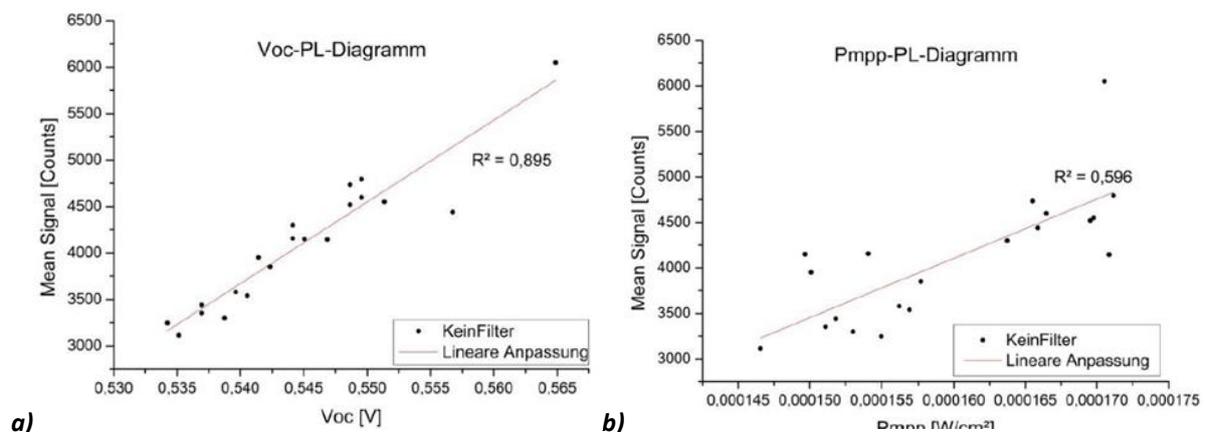
Defekte. Dieser konnte wiederum in einer separaten Messung aus den bildgebenden Messungen lokal aufgelöst bestimmt werden. Somit konnten alle für die Modulleistung relevanten Größen für sämtliche relevante Einstrahlungsbereiche aus bildgebenden Messungen bestimmt werden. Im Falle der  $V_{OC}$  konnte sogar ein geschlossener Formalismus zur  $V_{OC}$ -Vorhersage abgeleitet werden.

Bevor nun die einzelnen Teilergebnisse, die zu diesen Gesamtergebnissen führten, im Detail beschrieben werden, werden zunächst die zu erreichenden Meilensteine geschildert. **Anschließend werden diese nach der Beschreibung der Teilergebnisse zu diesen in Bezug gesetzt.**

In AP2 waren folgende Meilensteine zu erreichen:

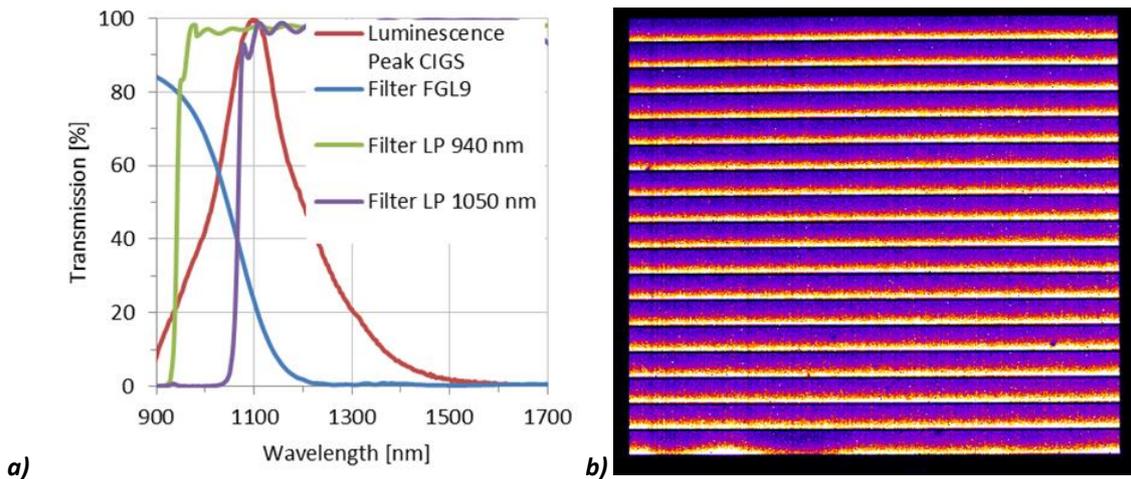
- M2.1: Optimierung der IR-Analyse an Kleinmodulen
- M2.2: Konzept zur Ausleuchtung großer Flächen ist erarbeitet
- M2.3: Modulpeakleistung wird berührungslos unter Schwachlichtbedingungen vorausgesagt
- M2.4: Machbarkeit der Voraussage der Modulpeakleistung für Großmodule ist erörtert (60x 120 cm<sup>2</sup>)

Bestimmung der planaren Absorberqualität: In AP2 konzentrierten sich die Arbeiten zu Anfang des Projektes zunächst auf defektfreie kleinformatige (30 x 4 mm<sup>2</sup>) Proben, die aus speziell strukturierten MCT/NSE-Proben (Auslassen jeder zweiten P3-Linie) hergestellt wurden. Die Defektfreiheit wurde durch Charakterisierung der Proben mit Dark-Lock-in-Thermographie (DLIT) [Mittlinfrarot Kamera, Equus 327kNM, IRcam, Deutschland] sichergestellt. Für diese wurde ein spezieller Probenhalter konstruiert, der den Kontaktwiderstand bei der Probenkontaktierung zur Zellcharakterisierung minimiert. Diese Proben wurden zunächst mittels Photolumineszenz (PL) [Nahinfrarot Kamera, Equus 327kN, IRcam, Deutschland] charakterisiert. Dabei wurde eine sehr gute Korrelation der integrierten Lumineszenzintensität und der  $V_{OC}$  festgestellt. Die Modulleistung unter Standardtestbedingungen (STC) korrelierte jedoch nur sehr schwach zu dieser Intensität (s. Abbildung 3). Die Verwendung der Intensität hat dabei den Vorteil, dass sich daraus direkte ein bildgebendes Verfahren ableiten lässt, das eine Aussage über die lokale und integrale Qualität eines CIGS-Absorbers erlaubt.



**Abbildung 3: a) Korrelation zwischen integrierter PL und VOC für kleinformatige defektfreie CIGS-Proben; b) Korrelation zwischen integrierter PL und Leistungsdichte für kleinformatige defektfreie CIGS-Proben unter STC**

Im weiteren Verlauf zeigte sich jedoch, dass die Intensität der PL eine ungeeignete Größe für die Qualitätskontrolle der CIGS-Absorber und Module darstellt, da sie eine hohe Probe-zu-Probe-Variation aufweist. Insbesondere weisen Bereiche in der Nähe von Strukturierungslinie oder solche mit einer Vielzahl an lokalen Defekten eine deutlich geringere Intensität auf. Somit ist eine solche Methode nicht geeignet, die intrinsische Absorberqualität auf Basis von Spezifikationswerten zu kontrollieren und diese vom Einfluss der lokalen Defekte zu trennen.



**Abbildung 4:** a) Transmission verschiedener Filter im Vergleich zur Intensität des Lumineszenzpeaks dargestellt; b) Resultierendes Lumineszenzbild (hier: Lock-in EL, ELLI) eines CIGS-Minimoduls

In der Folge wurde ein „semi-spektraler“ Ansatz gewählt, um die intrinsische Absorberqualität bildgebend zu messen: Hierzu wurde eine Nahinfrarot-Kamera [Equus 327kN, IRcam, Deutschland] mit verschiedenen optischen Filtern ausgestattet, die jeweils nur einen Teil des EL-Spektrums passieren lassen. Auf diese Weise führt eine in der Absorberqualität begründete Verschiebung des Lumineszenzpeaks zu einer Intensitätsänderung. Somit kann wiederum bildgebend eine Veränderung der Absorberqualität bzw. der Bandlücke, die durch das Ga:In-Verhältnis im CIGS bestimmt ist, bildgebend gemessen werden. Die Bildgebung wird dabei entweder durch die Differenzbildung zweier Bilder mit verschiedenen Langpassfiltern oder durch Verwendung eines „flach“ abfallenden Kurzpassfilters in einem einzigen Bild realisiert. In Abbildung 4 ist in a) die Transmission verschiedener Filter im Vergleich zur Intensität des Lumineszenzpeaks dargestellt, wohingegen in b) das resultierende Lumineszenzbild (hier: Lock-in EL, ELLI<sup>2</sup>) eines CIGS-Minimoduls dargestellt ist. Aus Abbildung 4b) wird jedoch bereits direkt der Nachteil dieser Methode ersichtlich: Trotz der Verwendung der optischen Filter bleibt die Methode intensitätsabhängig; so ist in Abbildung 4b) ein Intensitätsverlauf erkennbar, der reproduzierbar von einer Strukturierungslinie zur nächsten zu- bzw. abnimmt. Dieser ist jedoch nicht durch eine Variation der Zusammensetzung des Absorbers, sondern im Serienwiderstand der transparenten Frontelektrode begründet, die im Falle einer ELLI-Messung zu einer Signalreduktion entlang der Stromrichtung führt. Aus diesem Grunde wurde die

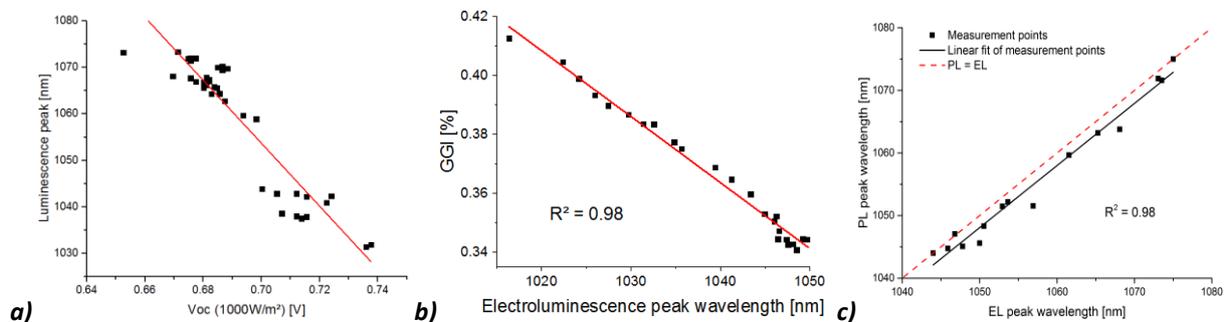
<sup>2</sup> Abschlussbericht PV-IR-EL, FKZ: 0325149A, 0325149B

intensitätsbasiert bildgebende Messung zur Bestimmung der Absorberqualität bzw. der Absorberzusammensetzung nicht weiterverfolgt.

Vielmehr wurde in der Folge eine spektrale Lumineszenzmethode verwendet, bei der das Lumineszenzsignal fasergekoppelt in ein Spektrometer geleitet wird. Hierbei wird ein Messfleck von bis zu 1 mm Durchmesser verwendet. Mit diesem können dann beliebig viele Messpunkte über die Probe verteilt geprüft werden (z. B. neun symmetrisch verteilte Punkte auf 8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup> Mini-Modul). Die Zentralwellenlänge des Lumineszenzpeaks korreliert dabei hervorragend mit der  $V_{OC}$  (Abbildung 5a)). Es ergibt sich dabei der folgende Zusammenhang für defektfreies Material:

$$V_{OC_{mat}} = 1,322 \frac{V}{eV} * \frac{1240 \text{ eV} * \text{nm}}{\lambda_{Zentral}} - 0,856 \text{ V} \quad \text{Gleichung (1)}$$

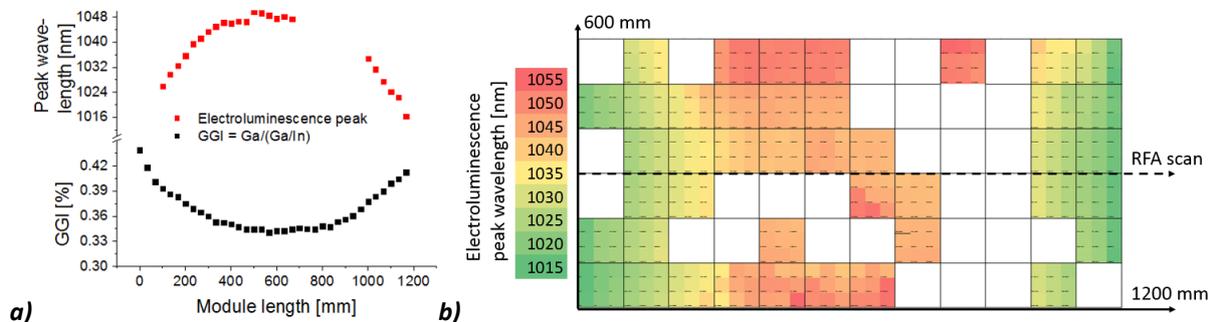
Dieser liegt darin begründet, dass sie direkt aus der Bandlücke des CIGS-Materials, das wiederum durch das Ga:In-Verhältnis bestimmt ist, folgt. Dies wurde anhand von Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bei MCT/NSE verifiziert (Abbildung 5b)). Im Rahmen der in der Produktion relevanten Ga:In-Verhältnisse, ist dieser Zusammenhang mit der  $V_{OC}$  in guter Näherung linear. In Abbildung 5c) ist zudem ersichtlich, dass diese Methodik sowohl für PL als auch für EL gültig ist. Die detektierten Zentralwellenlängen sind für EL lediglich um wenige nm hin zu längeren Wellenlängen verschoben, was evtl. in einer erhöhten Proben temperatur aufgrund der Bestromung begründet liegt. Im Folgenden wurde ausschließlich EL zur Anregung verwendet, da hier mit der vorhandenen Hardware einfacher eine homogene Anregung für größere Proben realisiert werden konnte.



**Abbildung 5: Korrelation der Lumineszenzzentralwellenlänge zu verschiedenen Parametern: a) zur unter STC gemessenen  $V_{OC}$ ; b) zum mittels Röntgenfluoreszenz bestimmten [Ga]/ ([Ga]+[In])-Verhältnis, GGI; c) PL vs. EL bestimmte Lumineszenzzentralwellenlänge**

Mittels dieser Methodik konnte dann die Homogenität der Materialzusammensetzung durch EL untersucht werden. Hierzu wurde von MCT/NSE ein unverkapseltes Standardmodul aus der Produktion (60 x 120 cm<sup>2</sup>) in 72 8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup> Mini-Module unterteilt. Diese wurden zunächst mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bei MCT/NSE (Linien scan) charakterisiert und anschließend mit der o. g. EL-Methode am ZAE Bayern untersucht (42 der 72 Module; Rest wurde für andere Experimente herangezogen). Abbildung 6a) zeigt die Verteilung beider Messergebnisse entlang der parallel zur langen Modulseite verlaufenden Mittelachse des Moduls. Beide Methoden erfassen den Kompositionsgradienten, der sich aufgrund der Koverdampfungs-technologie bei der Absorberherstellung ergibt, deutlich. Diese Ergebnisse zeigen, dass die hier abgeleitete EL-Methodik

(nach entsprechender Kalibrierung) eine zerstörungsfreie, äquivalente Methode zur Bestimmung des Kompositionsverlaufes darstellt. Aus Abbildung 6b) wird ebenfalls ersichtlich, dass entlang der kurzen Modulseite (Durchlaufrichtung Koverdampfung) kein Gradient auftritt.



**Abbildung 6: a) Vergleich von EL- und RFA-Messung entlang der parallel zur langen Modulseite verlaufenden Mittelachse; b) Verteilung der Kompositionshomogenität über das Gesamtmodul, gemessen mit der hier beschriebenen spektralen EL-Messung**

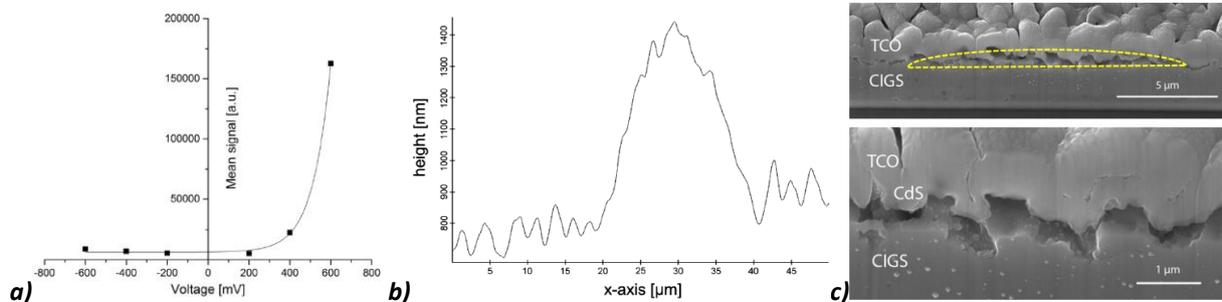
Die hier beschriebene Messung der Kompositionshomogenität mittels spektraler EL wurde ebenfalls auf Fullsize-Module angewendet. Da diese Messung, isoliert betrachtet, jedoch keine neuen Erkenntnisse lieferte, sondern erst im Zusammenspiel mit der Defektcharakterisierung, wird der im Projekt realisierte Messaufbau für Fullsize-Module erst in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Defektcharakterisierung: Um komplementär zur Charakterisierung der planaren Kompositionshomogenität der Absorber den Einfluss der lokalen Defekte auf die Modulperformance zu erfassen bedurfte es zunächst einer Methode, die sensitiv für die Defekte ist, jedoch von den großflächigen Kompositionsänderungen weitgehend unabhängig ist. Hierzu bietet sich die IR-Thermographie (IR) an. Aus Gründen der Praktikabilität wurde in diesem Projekt zumeist Dark-Lock-in-Thermographie (DLIT) verwendet, bei der das Modul oder die Zelle periodisch im Dunkeln bestromt wurde und das entsprechende Thermographiesignal mittels Thermokamera detektiert wird. Sofern nicht anders erwähnt handelt es sich bei allen folgenden Thermographie-Messungen um DLIT-Messungen.

Bei der Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Defektcharakterisierung stellte sich zunächst das Problem, wie der Einfluss der Defekte isoliert erfasst werden kann, da elektrische Messungen an defektbehafteten Proben stets zu Messergebnissen führen, die sowohl durch die Absorberzusammensetzung als auch durch die lokalen Defekte beeinflusst werden. Daher wurde in diesem Projekt der Ansatz gewählt, in die oben erwähnten defektfreien Einzelzellen künstlich Defekte einzubringen<sup>3</sup>. Somit kann der Effekt der Defekte auf die Leistung durch einfache „vorher-nachher-Messungen“ isoliert quantifiziert werden. Hierzu wurden zwei Methoden verfolgt: Am ZAE Bayern wurden mit einem Femto-Sekunden-Laser (532 nm, 200 mW) kreisförmige Defekte eingefügt, während an der Universität Oldenburg (Partner im Projekt) Defekte mit einem „Focused Ion Beam“ eingebracht wurden. Während die am ZAE Bayern erzeugten Defekte schwach diodisch waren

<sup>3</sup> A. Vetter et al., Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 24, pp. 1001–1008, 2016

(Abbildung 7a)), handelte es sich bei Letzteren um klassische ohmsche Kurzschlüsse („Shunts“). Die am ZAE Bayern induzierten Defekte wurden mittels Rasterkraftmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie charakterisiert. Es zeigte sich, dass diese Defekte in einer thermisch induzierten Aufwölbung des TCO-Frontkontakts (hier: ZnO) bestehen, die zu einem Hohlraum zwischen Frontkontakt und Absorber führt.



**Abbildung 7:** a) *Spannungsabhängigkeit des DLIT-Signals eines Laser-induzierten Defekts*; b) *Rasterkraftmikroskopie-Messung der Topologie des Laser-induzierten Defekts*; c) *Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des Laser-induzierten Defektes (gelbe Linie markiert die Laser-induzierte Aufwölbung).*

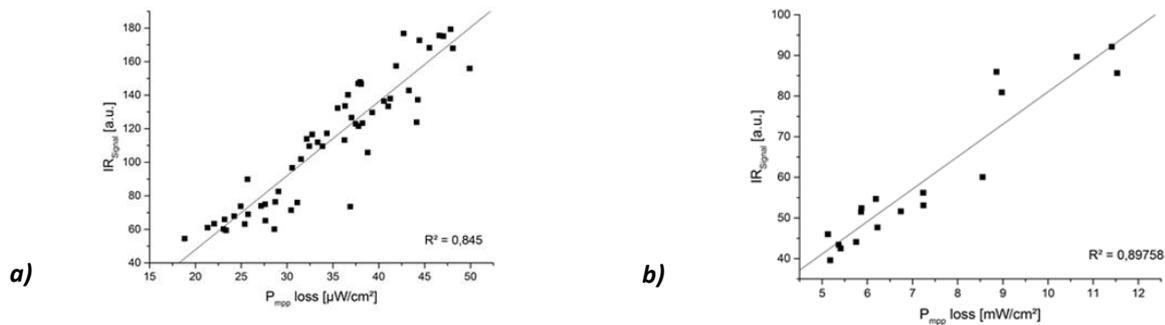
Der Effekt beider Defektarten wurde anschließend mit Illuminated-Lock-in-Thermography (ILIT) untersucht, um anschließend das ILIT-Signal zur elektrischen Performance der entsprechenden Proben (einzelne ursprünglich defektfreie Zellen, 30 x 4 mm<sup>2</sup>) zu korrelieren. Aus diesen Messungen konnte der sogenannte „IR-Parameter“ ( $IR_{\text{Parameter}}$ ) abgeleitet werden, der sich hervorragend eignet, um den „Grad des Defektbefalls“ zu quantifizieren. Der  $IR_{\text{Parameter}}$  ist als Funktion der IR-Intensität  $I(i,j)$  jedes Pixels der Position  $(i,j)$  definiert als:

$$I_1(i,j) = I_0(i,j) - I_{\text{Gesund}} \tag{Gleichung 2}$$

$$I_2(i,j) = \begin{cases} I_1(i,j) & \text{if } I_1(i,j) > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{Gleichung 3}$$

$$IR_{\text{Parameter}} = \sum_{k \in \text{Defect}} I_2(k) \tag{Gleichung 4}$$

Er beschreibt das kumulative Defektsignal bezogen auf eine am defektfreien Bereich bestimmten Baseline. Durch letztere Referenzierung wird das Signal unabhängig von integralen bzw. großflächigen Änderungen der Materialeigenschaften. Dabei ist der  $IR_{\text{Parameter}}$  in gleicher Weise für ILIT- und DLIT-Messungen verwendbar. Für ursprünglich defektfreie Zellen ergibt sich für beide Arten von induzierten Defekten eine signifikante Korrelation zwischen  $IR_{\text{Parameter}}$  und Leistungsminderung (Leistung vor Defekteinbringung – Leistung nach Defekteinbringung), die in Abbildung 8 (a: diodische Defekte, b: ohmsche Defekte) gezeigt ist.



**Abbildung 8: a) Korrelation zwischen  $IR_{\text{Parameter}}$  und Leistungsminderung „ $P_{\text{mpp loss}}$ “ für laserinduzierte diodische Defekte; b) Korrelation zwischen  $IR_{\text{Parameter}}$  und Leistungsminderung „ $P_{\text{mpp loss}}$ “ für FIB-induzierte ohmsche Defekte**

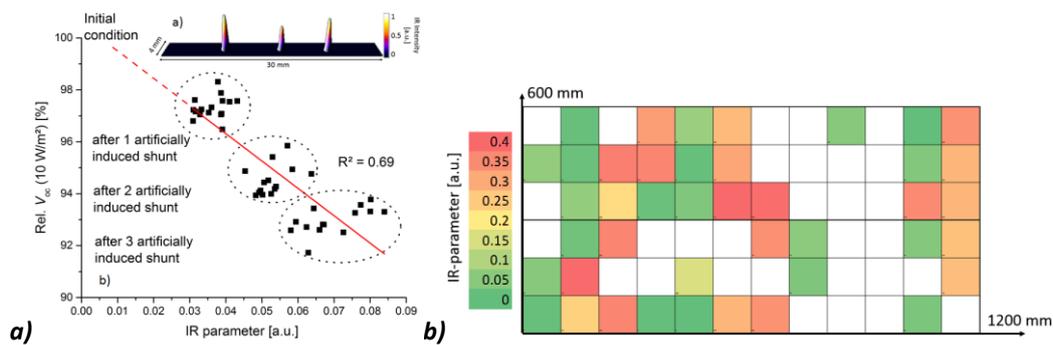
Gleichzeitig lässt sich aus diesen Messungen jedoch auch schon ein mögliches Problem für die Charakterisierung größerer Module mit „natürlich“ eingebrachten Defekten erkennen. Beide Defektarten weisen deutlich unterschiedliche Korrelationen zwischen  $IR_{\text{Parameter}}$  und Leistungsminderung „ $P_{\text{mpp loss}}$ “ auf, sodass eine Charakterisierung ggf. uneindeutig sein könnte. Zudem ist bei diesen Messungen zu beachten, dass es sich um „Vorher-Nachher“-Messungen bei künstlich erzeugten Defekten handelt. Eine Prozesskontrolle muss jedoch die Auswirkung der Defekte auch ohne „Vorher-Messung“ bestimmen können. Diese Messungen sind somit eher als Nachweis einer (ggf. defektabhängigen) Korrelation zu interpretieren. Zur Entwicklung einer als Prozesskontrolle nutzbaren Methode waren jedoch weitere Analysen notwendig.

Aus diesem Grunde wurde im weiteren Projektverlauf entschieden, zunächst die Auswirkungen der Defekte auf die einzelnen PV-Parameter separat zu untersuchen. Hierbei wurde besonders im Fall der  $V_{\text{oc}}$  eine klare Korrelation ermittelt, die in Kombination mit der oben beschriebenen Analyse der Kompositionshomogenität eine zuverlässige Vorhersage der  $V_{\text{oc}}$  erlaubte (s. u.). Im Folgenden soll daher zunächst auf diesen Zusammenhang eingegangen werden. Im Anschluss werden dann die Korrelationen mit dem Füllfaktor  $FF$  und der Leistung  $P_{\text{mpp}}$  diskutiert.

Um den  $IR_{\text{Parameter}}$  in eine dimensionslose Größe zu überführen, wurde der aus Gleichung 4 abgeleitete Parameter  $IR$  als das Verhältnis der integrierten DLIT-Intensität der Defekte und der integrierten Intensität des Gesamtmoduls eingeführt:

$$IR = \frac{\int \text{Intensity}_{\text{Defect}}}{\int \text{Intensity}_{\text{Module}}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Mittels dieser Größe konnte in der Folge gezeigt werden, dass die Größe  $IR$  eine Abhängigkeit von der Anregungsspannung bei der DLIT-Aufnahme aufweist. Gleichzeitig sollte die DLIT-Akquisitionszeit minimiert werden, um ein möglichst inline-taugliches Messverfahren zu entwickeln. Letztlich wurde eine Anregungsspannung (nahe  $V_{\text{oc}}$ ) von 11000 mV für Mini-Module mit jeweils 16 Zellen bei einer Akquisitionszeit von 30 s als Optimum identifiziert und für alle weiteren DLIT-Messungen verwendet. In der Folge wurde die Defektabhängigkeit der  $V_{\text{oc}}$  durch Einbringung einzelner Defekte untersucht. Abbildung 9a) zeigt hierzu die Änderung der relativen  $V_{\text{oc}}$  (nach/vor Defekt) für die sukzessive Einbringung von Defekten.  $V_{\text{oc}}$  wurde hierbei bei einer Beleuchtungsstärke von  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  gemessen:



**Abbildung 9: a) Darstellung des linearen Zusammenhanges zwischen relativer  $V_{OC}$  (bei  $10 \text{ W/m}^2$ ) und dem Parameter  $IR$  bei sequentieller Einbringung Laser-induzierter Defekte in eine CIGS-Probe. b) Verteilung des Parameters  $IR$  auf einem Fullsize-Modul (identisch zu Abbildung 6b)).**

In Abbildung 9b) ist dagegen die örtliche Verteilung der Defekte – ausgedrückt durch die  $IR$ -Werte für je ein  $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$ -Minimodul – gezeigt. Es handelt sich dabei um das identische Modul wie in Abbildung 6b). Hieraus werden zwei Erkenntnisse deutlich: i) die Defekte sind in Ihrer räumlichen Verteilung unabhängig von dem Kompositionsgradienten, der oben beschrieben wurde; ii) Beide Messungen, d.h. die Messung der örtlichen Kompositionshomogenität mittels Lumineszenz und die Bestimmung der Defekte mittels DLIT liefern voneinander unabhängige Ergebnisse, sodass beide Ergebnisse kombiniert werden können, um die Module ganzheitlich zu charakterisieren. Im Folgenden sollen daher beide Verfahren kombiniert werden, um zunächst eine Vorhersage der  $V_{OC}$  für defektbehaftete „reale“ Module zu bestimmen. Anschließend soll die Korrelation zu dem Füllfaktor  $FF$  und der Leistung  $P_{mpp}$  diskutiert werden.

Ableitung der  $V_{OC}$  für reale defektbehaftete CIGS-Module: Nachdem gezeigt wurde, dass die Defektcharakterisierung und die Bestimmung der Kompositionsinhomogenität unabhängig voneinander sind, galt es nun, einen gemeinsamen Zusammenhang für die resultierende reale  $V_{OC}$  zu bestimmen, die sowohl durch Defekte als auch durch die Komposition beeinflusst ist. Mittels dieses Zusammenhanges kann dann allein aus der Messung eine Vorhersage für  $V_{OC}$  abgeleitet werden. Wie bereits erwähnt, soll in optiCIGS nicht nur eine Aussage für Schwachlichtbedingungen abgeleitet werden, sondern für möglichst alle relevanten Beleuchtungsbedingungen. Deshalb wurden 42 Minimodule bei diversen Beleuchtungsstärken elektrisch vermessen ( $10, 30, 100, 300, 1000 \text{ W/m}^2$ ) und mittels EL und DLIT charakterisiert. Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen der  $V_{OC}$  und der Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  bzw. dem Parameter  $IR$  bestimmt, indem beide Größen in einem 3D-Diagramm gegen  $V_{OC}$  aufgetragen werden. Der resultierende Zusammenhang wird durch eine Regressionsebene bestimmt, wie dies in Abbildung 10 gezeigt ist. Analog hierzu sind in Abbildung 11 exemplarisch die jeweils zweidimensionalen Zusammenhänge für  $V_{OC}$  und  $\lambda_{\text{Zentral}}$  bzw. dem Parameter  $IR$  für  $10 \text{ W/m}^2, 100 \text{ W/m}^2$  und  $1000 \text{ W/m}^2$  dargestellt<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Die „Zweiteilung“ der Datenpunkte konnte nicht abschließend geklärt werden. Da alle Minimodule aus demselben Fullsize-Module entnommen wurden, könnten lokale, prozessbedingte Inhomogenitäten die Ursache für die niedrige Performance der entsprechenden Minimodule darstellen.

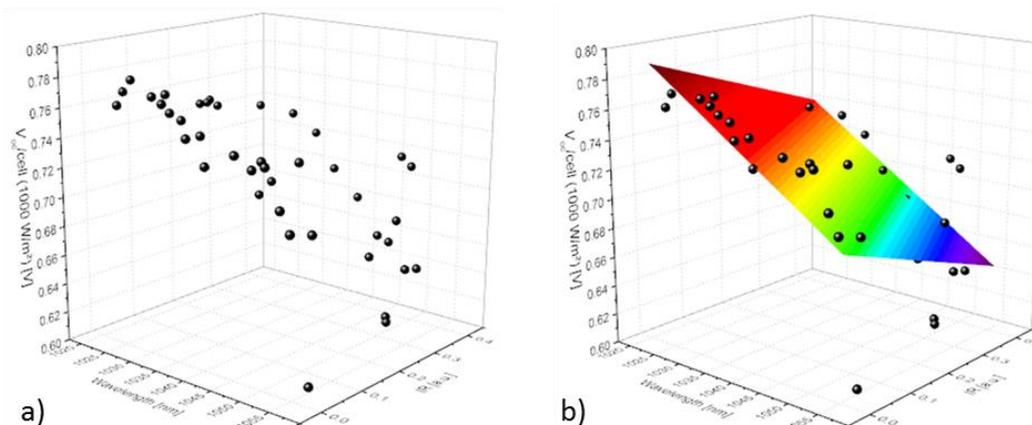


Abbildung 10: a) Auftragung der Zentralwellenlänge  $\lambda$ -Zentral und dem Parameter IR gegen die VOC (bei  $1000 \text{ W/m}^2$ ); b) Bestimmung des Zusammenhanges für die VOC-Vorhersage durch eine Regressionsfläche (Farbskala: VOC).

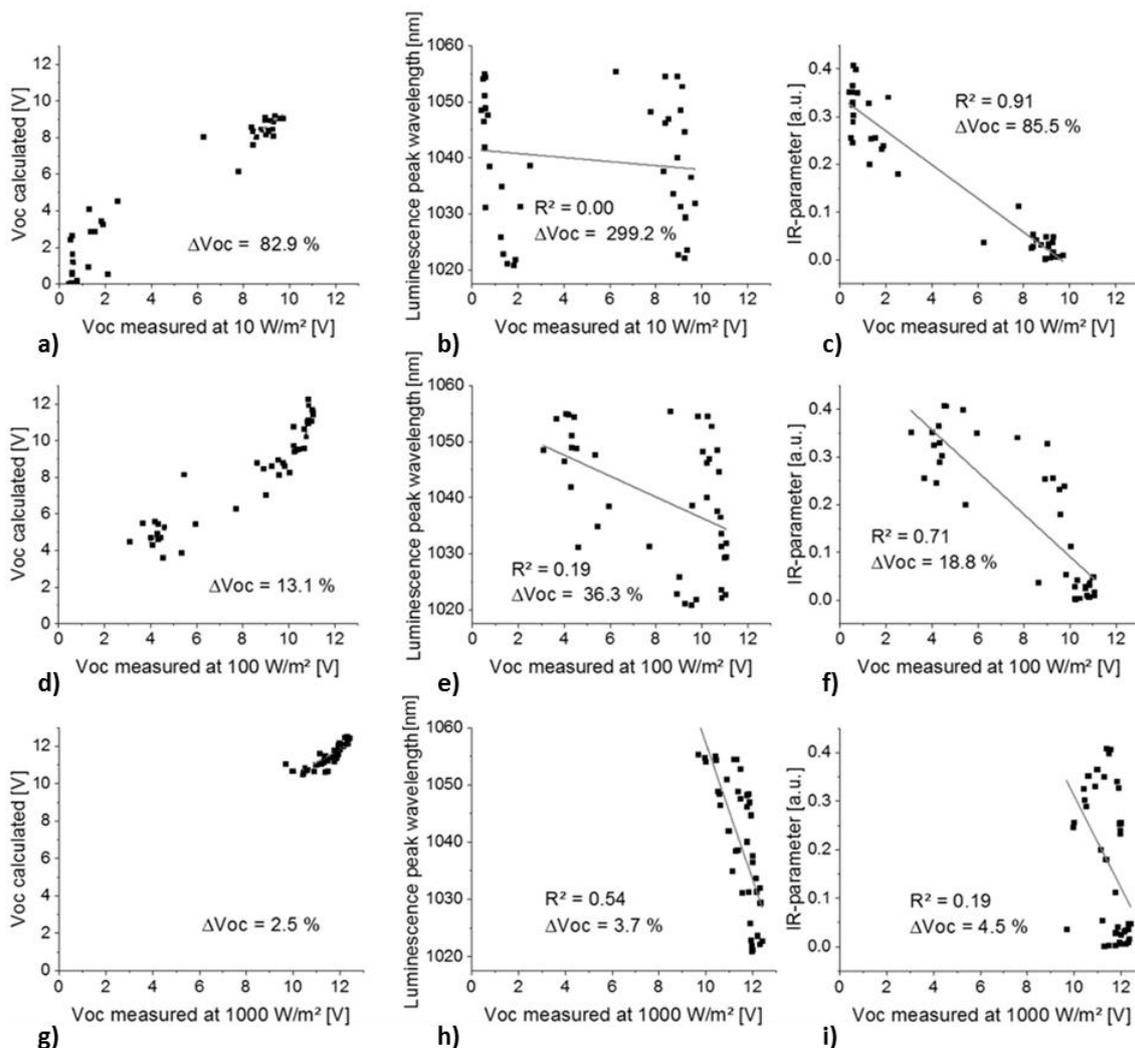
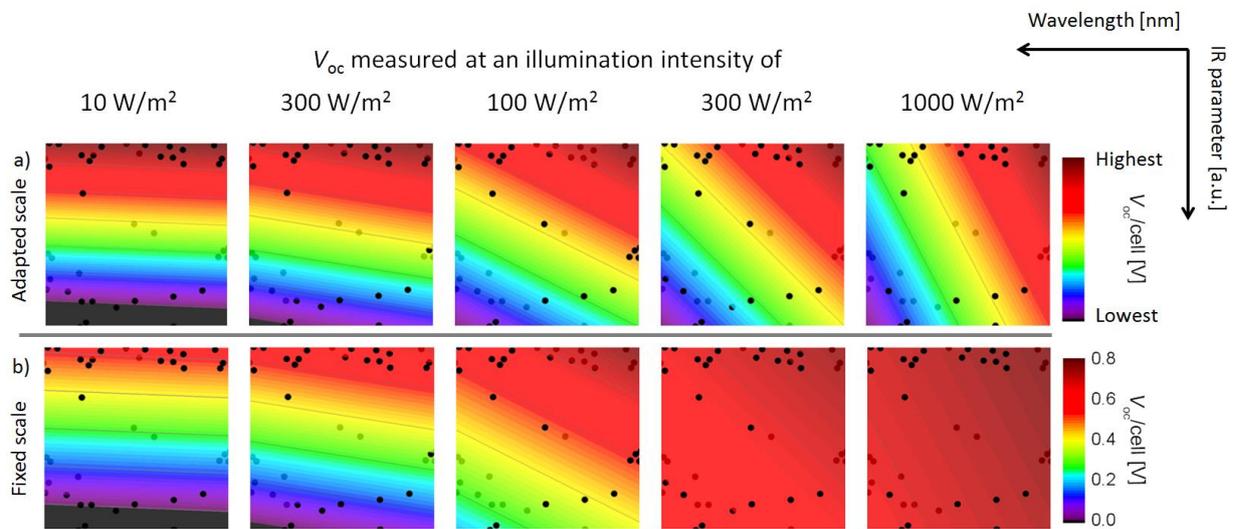


Abbildung 11: Darstellung der Korrelation zwischen vorhergesagter und gemessener  $V_{oc}$  (a, d, g) sowie der zweidimensionalen Zusammenhänge für  $V_{oc}$  und  $\lambda_{\text{Zentral}}$  (b, e, h) bzw. dem Parameter IR (c, f, i) für  $10 \text{ W/m}^2$  (a-c),  $100 \text{ W/m}^2$  (d-f) und  $1000 \text{ W/m}^2$  (g-i).

Es ist klar ersichtlich, dass bei niedrigen Beleuchtungsstärken die  $V_{OC}$  im Wesentlichen durch die Defekte (IR) bestimmt wird, wohingegen bei hohen Beleuchtungsstärken der Einfluss der Komposition dominiert ( $\lambda_{Zentral}$ ). Weiterhin wird jedoch auch deutlich, dass in allen Fällen der gefundene Zusammenhang eine gute Vorhersage für die  $V_{OC}$  ermöglicht. Der Fehler der Vorhersage liegt hierbei zwischen  $\Delta V_{OC} \leq 83\%$  bei  $10\text{ W/m}^2$  und  $\Delta V_{OC} \leq 3\%$  für  $1000\text{ W/m}^2$ . Dabei ist der Fehler bei  $10\text{ W/m}^2$  wesentlich durch die Streuung der Werte selbst und weniger durch die Güte der Regressionsfläche bestimmt. In Abbildung 12 ist noch einmal für alle o. g. Beleuchtungsebenen die Projektion der Regressionsfläche auf die  $\lambda_{Zentral}$ -IR-Fläche dargestellt und entsprechend des  $V_{OC}$ -Wertes eingefärbt. Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass mit zunehmender Beleuchtungsstärke einerseits eine kontinuierliche Verschiebung des Einflusses der Defekte hin zur Kompositionshomogenität vorliegt und andererseits die Streuung der Werte selbst abnimmt.



**Abbildung 12: Projektion der Regressionsebene (eingefärbt nach  $V_{OC}$ ) auf die  $\lambda_{Zentral}$ -IR-Fläche: a) relative  $V_{OC}$ -Skala für jede Beleuchtungsstärke; b) identische  $V_{OC}$ -Skala für alle Beleuchtungsstärken**

In Gleichung 6 ist der prinzipielle abgeleitete Zusammenhang für die Beleuchtungsstärken  $10\text{ W/m}^2$ ,  $100\text{ W/m}^2$  sowie  $1000\text{ W/m}^2$  dargestellt. Die jeweiligen aus Ebenen-Fits abgeleiteten Parameter für die verschiedenen Beleuchtungsstärken sind in Tabelle 3 dargestellt.

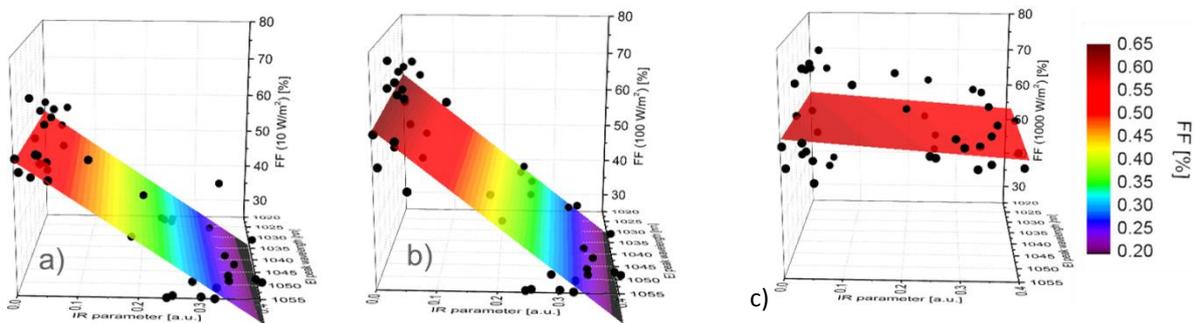
$$V_{oc} = a - b \cdot \lambda_{Zentral} - c \cdot IR \tag{Gleichung 6}$$

**Tabelle 3: Empirisch bestimmte Parameter für die in Gleichung 6 dargestellte  $V_{OC}$ -Vorhersage für die Beleuchtungsstärken  $10\text{ W/m}^2$ ,  $100\text{ W/m}^2$  sowie  $1000\text{ W/m}^2$**

Beleuchtungsstärke	$a$	$b$	$c$
$10\text{ W/m}^2$	1.39	$0.78 \cdot 10^{-3}$	1.60
$100\text{ W/m}^2$	6.80	$5.89 \cdot 10^{-3}$	0.98
$1000\text{ W/m}^2$	3.60	$2.75 \cdot 10^{-3}$	0.12

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch die Arbeiten in optiCIGS eine zerstörungsfreie, inline-fähige bildgebende Messmethode entwickelt wurde, die für sämtliche Beleuchtungsstärken mit hoher Zuverlässigkeit eine Vorhersage für die  $V_{OC}$  des jeweiligen Moduls erlaubt. Im Folgenden soll nun erörtert werden, inwieweit dies auch für den Füllfaktor  $FF$  und die Leistung gilt.

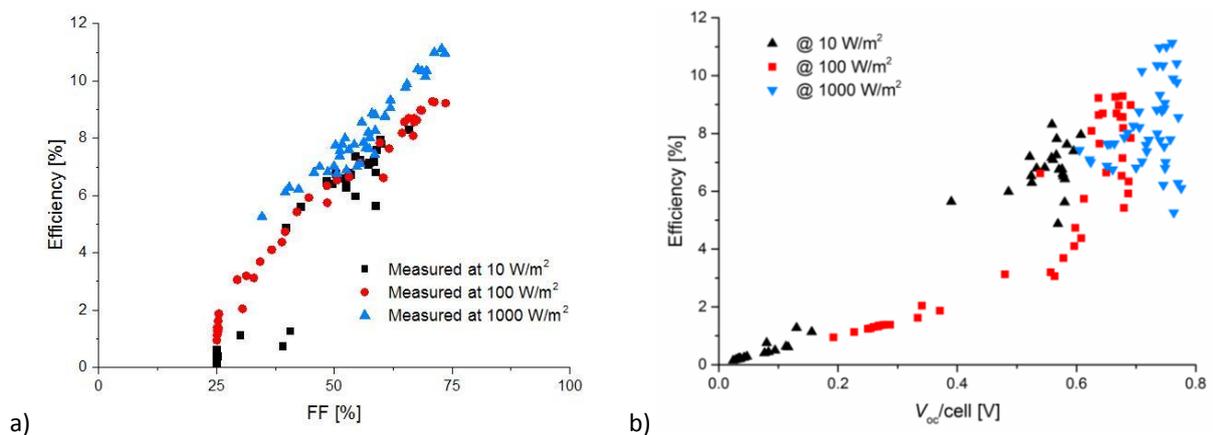
Korrelation zu weiteren elektrischen Kenngrößen realer defektbehafteter CIGS-Module: Zunächst wurde die oben beschriebene Korrelation zur Abhängigkeit des Füllfaktors  $FF$  näher untersucht. Hierzu wurden ähnlich wie oben für die  $V_{OC}$  die bei den untersuchten Beleuchtungsstärken gemessenen  $FF$ -Werte gegen die Zentralwellenlänge des EL-Signals die  $\lambda_{Zentral}$  sowie den Parameter  $IR$  in Form eines 3D-Diagramms aufgetragen. Die entsprechenden Diagramme sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13:** 3D-Diagramme der bei verschiedenen Beleuchtungsstärken bestimmten  $FF$ -Werte für  $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$  CIGS-Minimodule: a)  $10 \text{ W/m}^2$ , b)  $100 \text{ W/m}^2$ , c)  $1000 \text{ W/m}^2$

Aus diesen Darstellungen ist klar ersichtlich, dass der Füllfaktor einerseits in keiner Weise mit der Zentralwellenlänge des EL-Signals die  $\lambda_{Zentral}$  korreliert und dass andererseits für niedrige Beleuchtungsstärken ( $10 \text{ W/m}^2$  und  $100 \text{ W/m}^2$ ) eine sehr gute Korrelation des Parameters  $IR$  mit dem Füllfaktor zu beobachten ist, wohingegen bei  $1000 \text{ W/m}^2$  keinerlei Korrelation mehr zu beobachten ist. Letzteres ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die stark defektbehafteten Minimodule (hohe Werte für  $IR$ ) bei hohen Beleuchtungsstärken deutlich höhere  $FF$ -Werte aufweisen als bei niedrigen. Dies ist dadurch begründet, dass bei hohen Beleuchtungsstärken die diodischen Stromanteile in einer Solarzelle überwiegen, sodass der Strom über den von den Defekten bestimmten Parallelwiderstand vernachlässigbar wird. Die IV-Kennlinie wird daher wesentlich stärker vom Serienwiderstand bestimmt. Bei niedrigen Beleuchtungsstärken wird dagegen der Einfluss des Parallelwiderstandes dominierend, d. h. die IV-Kennlinie und hier der Füllfaktor im Besonderen werden bei hohen Beleuchtungsstärken durch den Serienwiderstand  $R_s$  bestimmt. Die Tatsache, dass die  $FF$ -Werte für hohe Beleuchtungsstärken keine Korrelationen zu den Größen  $IR$  und  $\lambda_{Zentral}$  aufweisen, wirkt sich auch direkt auf die Vorhersagbarkeit der Moduleleistung,  $P_{mpp}$ , bzw. der Moduleffizienz aus.

In Abbildung 14 sind hierzu die gemessenen Effizienzen der CIGS-Minimodule als Funktion der  $FF$ - (a)) und  $V_{OC}$ -Werte (b)) dargestellt.



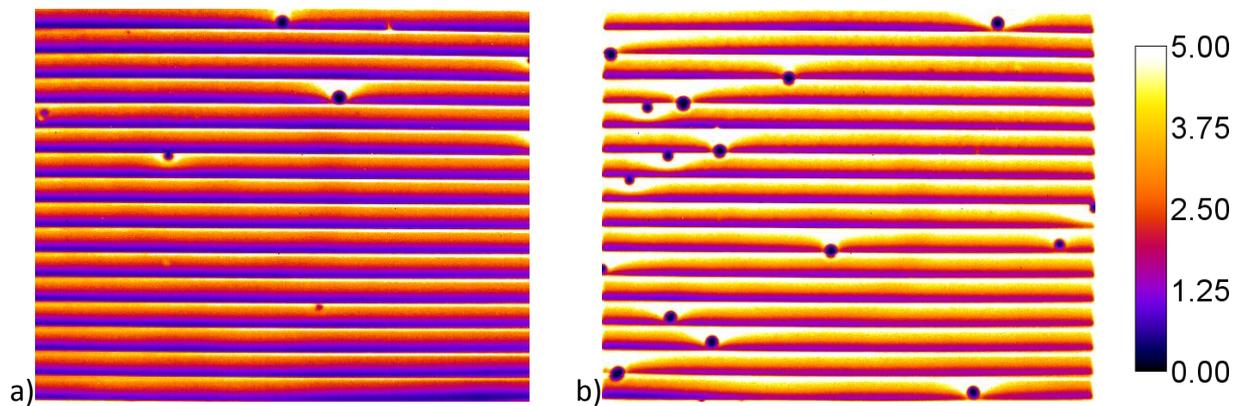
**Abbildung 14: Einfluss der FF- (siehe a)) und  $V_{oc}$ -Variation (siehe b)) auf die Effizienz der untersuchten CIGS-Mini-Module für  $10 \text{ W/m}^2$ ,  $100 \text{ W/m}^2$  und  $1000 \text{ W/m}^2$ .**

Es ist ersichtlich, dass die FF-Werte für alle Beleuchtungsstärken eine ähnliche Verteilungsbreite darstellen, wohingegen die  $V_{oc}$ -Werte für hohe Beleuchtungsstärken auf einen relativ schmalen Wertebereich von ca. 0,6 - 0,8 V pro Zelle verteilt sind. Die Effizienzen werden daher für  $1000 \text{ W/m}^2$  im Wesentlichen von der Variation des Füllfaktors bestimmt. Dabei ist zu bemerken, dass die Stromdichten (normiert auf die Beleuchtungsstärke) nahezu jeweils konstant für alle drei Beleuchtungsstärken waren (hier nicht dargestellt). Somit ist die o.g. Methode zur Vorhersage der  $V_{oc}$  in guter Näherung auch auf die Effizienzen für geringe Beleuchtungsstärken ( $10 \text{ W/m}^2$ ,  $100 \text{ W/m}^2$ ) übertragbar. Für STC ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) ist dies jedoch nicht mehr gegeben, da die Variation des Füllfaktors bei STC nicht von o. g. Verfahren erfasst wird. Im Folgenden wurden daher weitere Methoden untersucht, die es erlauben sollten, auch unter STC eine Leistungsvorhersage zu machen. Da die oben gezeigten Daten nahelegten, dass die mangelnde Korrelation zwischen IR- und EL-Signal und Leistung darauf zurückzuführen ist, dass der Einfluss des Serienwiderstandes bei STC nicht erfasst wird, wurde untersucht, inwieweit eine bildgebende Methode entwickelt werden kann, die sensitiv für den Serienwiderstand,  $R_s$ , der CIGS-Module ist.

Ermittlung des Serienwiderstandes von CIGS-Minimodulen: Zunächst wurde an den defektfreien CIGS-Einzelzellen die Korrelation des elektrisch bestimmten  $R_s$  zum EL- und DLIT-Signal untersucht. Hier zeigte sich anfangs eine vielversprechende Korrelation zwischen  $R_s$  und dem absoluten DLIT-Signal bei Anregung mit konstanter Spannung. Im weiteren Verlauf stellte sich jedoch heraus, dass dieses Verfahren lediglich sensitiv für den Gesamtwiderstand der Probe ist. Eine Differenzierung nach Serien- und Shuntwiderstand war hierbei nicht möglich. Im Folgenden wurde daher ein aus der Literatur bekannter Ansatz zur bildgebenden Detektion des  $R_s$  übernommen<sup>5</sup>. Grundlage dieses Ansatzes ist die Anregung des Moduls in separaten EL und DLIT-Messungen. Aus der DLIT-Messung folgt dabei die dissipierte Leistung, wohingegen die EL-Messung die innere Spannung am pn-Übergang liefert. Unter Verwendung der angelegten Spannung kann dann die lokale Spannung berechnet werden, aus der wiederum mithilfe der dissipierten Leistung der lokale

<sup>5</sup> Ramspeck et al., Appl. Phys. Lett. 90, 153502 (2007)

Rekombinationsstrom berechnet werden kann (detaillierte Herleitung s. Ramspeck et al.). Letztlich kann dann aus Spannung und Strom der Serienwiderstand orts aufgelöst hergeleitet werden. In optiCIGS konnte die Methode erfolgreich auf die Anwendung auf CIGS übertragen werden. In Abbildung 15 sind die bildgebenden  $R_S$ -Messungen zweier CIGS-Minimodule gezeigt.



**Abbildung 15:** Ergebnis der bildgebenden Messung des Serienwiderstandes  $R_S$  mittels DLIT und EL an zwei unterschiedlichen CIGS-Minimodulen. Die Einfärbung gibt den  $R_S$  in  $\Omega\text{cm}^2$  an.

Aus Abbildung 15 wird die Variation des Serienwiderstandes von Probe zu Probe deutlich. Des Weiteren werden auch die Kurzschlusswirkung sowie die räumliche Begrenzung der Auswirkung der Defekte sehr deutlich. Es bleibt jedoch zu bemerken, dass diese Messung des  $R_S$  stets der elektrischen Kontaktierung bedarf. Sie ist daher, anders als die oben beschriebene Methodik zur  $V_{OC}$ -Bestimmung, nicht ohne weiteres in eine kontaktlose Messung überführbar (durch Verwendung von ILIT und PL). Allerdings konnten Trupke et al.<sup>6</sup> für Silizium-Solarzellen auch eine komplett PL-basierte  $R_S$ -Messung realisieren. Inwieweit diese Methode auf CIGS übertragbar ist, konnte im Rahmen von optiCIGS nicht mehr untersucht werden. Es bleibt außerdem zu vermerken, dass aus der lokalen  $R_S$ -Messung nicht direkt der integrale Serienwiderstand des Moduls abgeleitet werden kann. Jedoch bietet die Methode in Ergänzung zur o. g. Methode zur Vorhersage der  $V_{OC}$  die Möglichkeit in einer weiteren Methode den  $R_S$  bildgebend zu bestimmen, sodass beide Messungen zusammen eine umfassende Charakterisierung der CIGS-Module auch für STC-Bedingungen erlauben, auch wenn die Leistung nicht direkt als einzelner Parameter abgeleitet werden kann. Neben der erfolgten Erzielung aller in optiCIGS gesetzten Meilensteine (s. u.) bildet dies eine hervorragende Ausgangsposition für die Quantifizierung des defektinduzierten Leistungsverlustes im bereits beantragten Nachfolgeprojekt optiCIGS II.

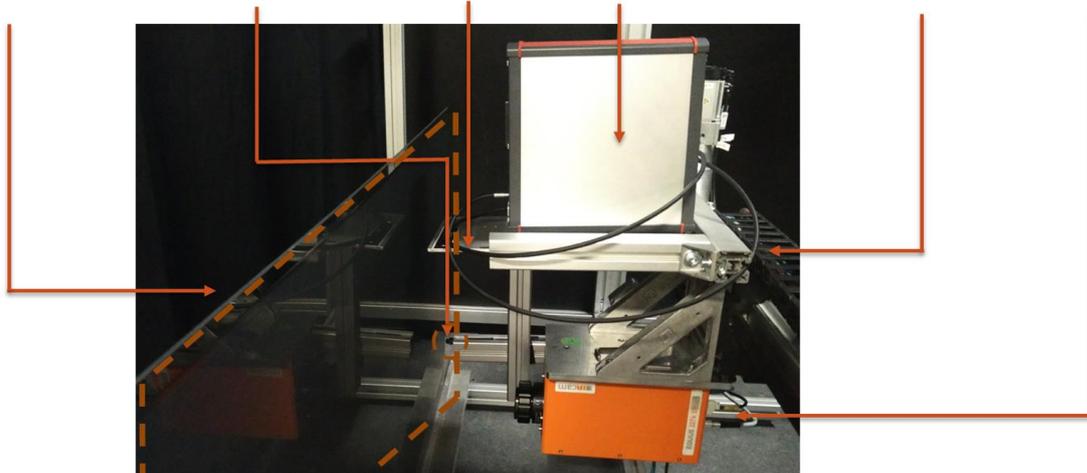
Nachdem durch diese Ergebnisse die prinzipiellen Ziele von AP2 in optiCIGS erreicht worden sind, soll im Folgenden die Übertragbarkeit der beschriebenen Methoden auf Fullsize-Module untersucht werden, um die Anwendbarkeit als Qualitätskontrolle in der Produktion zu evaluieren.

Übertragbarkeit auf Fullsize-Module (60 x 120 cm<sup>2</sup>): Um die oben beschriebene Methode von Einzelzellen und Minimodulen (8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup>) auf die Größe von Fullsize-Modulen von MCT/NSE zu

<sup>6</sup> Trupke et al., *Appl. Phys. Lett.* 90, 093506 (2007)

übertragen und damit den Proof-of-Principle zu erbringen, wurde ein entsprechender Teststand in der Dunkelkammer des ZAE Bayern eingerichtet. Dieser ist in Abbildung 16 dargestellt:

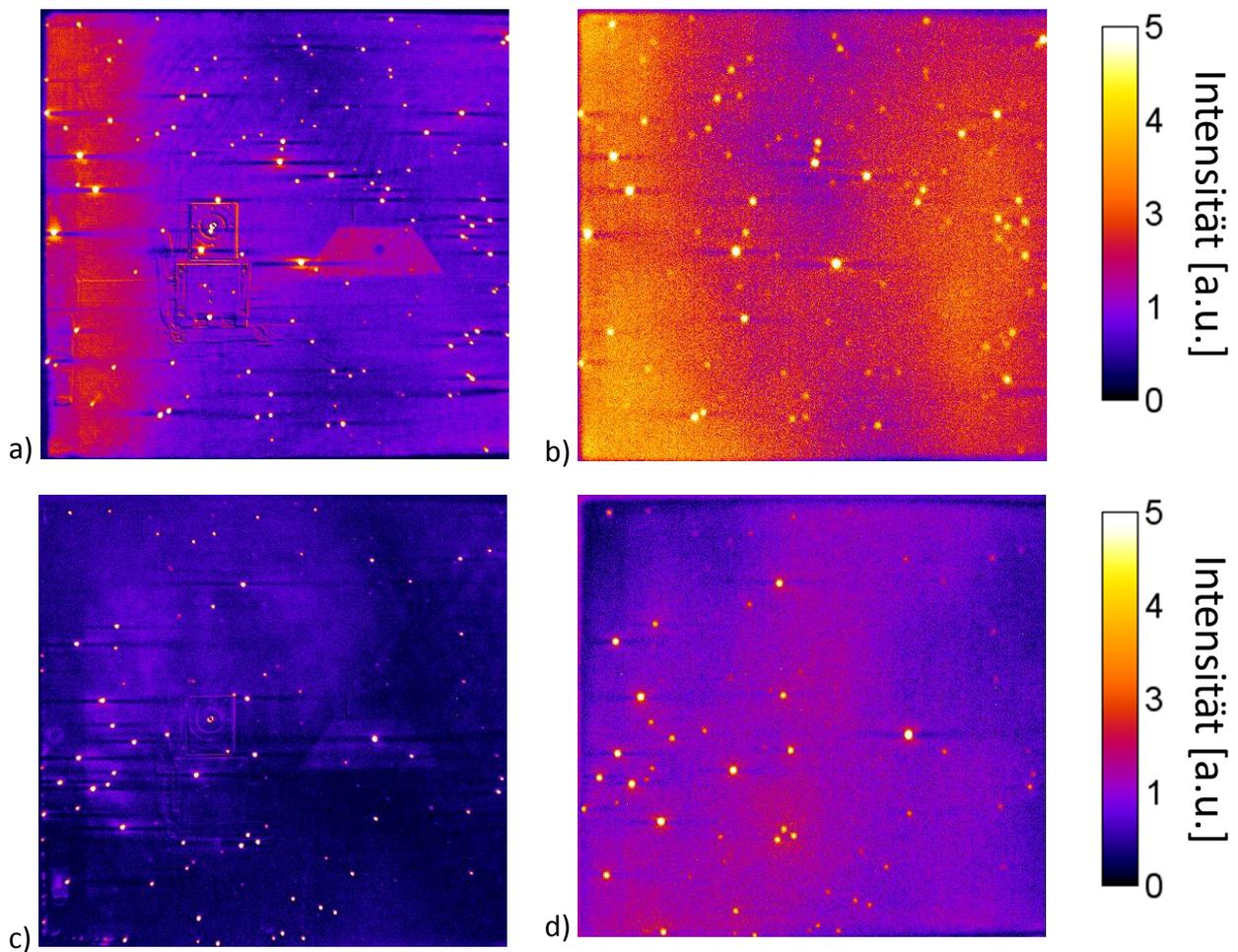
CIGS module – collimator – fiber cable – spectrometer – xyz moving robot – IR camera



**Abbildung 16: Messaufbau für "Proof of principle" an 60 x 120 cm<sup>2</sup> Fullsize-CIGS Modulen**

Der Teststand bestand aus einem extern fernsteuerbaren xyz-Roboter, der das fasergekoppelte Spektrometer und die IR-Kamera relativ zum Modul verschieben kann, um so beliebige Modulbereiche zu charakterisieren. Das Modul selbst wurde quer in eine angepasste Modulhalterung eingespannt und elektrisch kontaktiert. Prinzipiell war dieser Aufbau geeignet, das gesamte Modul in einer einzigen Aufnahme zu charakterisieren. Aufgrund der begrenzten Auflösung der verwendeten IR-Kamera (640 x 512 Pixel) wurde jedoch entschieden, zwei Modulhälften in separaten Messungen zu erfassen, um auch kleine Defekte erfassen zu können. Da die hier entwickelte Methodik prinzipiell sowohl für unverkapselte (d. h. ohne Deckglas) als auch für vollständig prozessierte Module in der Produktion einsetzbar sein soll, wurden in diesem Projekt beide Fälle untersucht. Insbesondere wurden in Zusammenarbeit mit MCT/NSE Module zunächst unverkapselt am ZAE Bayern vermessen und anschließend bei MCT/NSE in der Produktion laminiert, wobei zwei verschiedene Deckgläser – eines mit und eines ohne Antireflex-Beschichtung (ARC) – verwendet wurden. Auf diese Weise konnte direkt die Sensitivität der Defekterkennung untersucht werden.

Die Messergebnisse von zwei exemplarischen DLIT-Messungen an zwei CIGS-Modulen sind in Abbildung 17 dargestellt. Aus Abbildung 17 wird deutlich, dass prinzipiell dieselben Defekte detektiert werden, diese werden jedoch aufgrund der thermischen Barriere, die das Deckglas darstellt, etwas verschwommener detektiert.

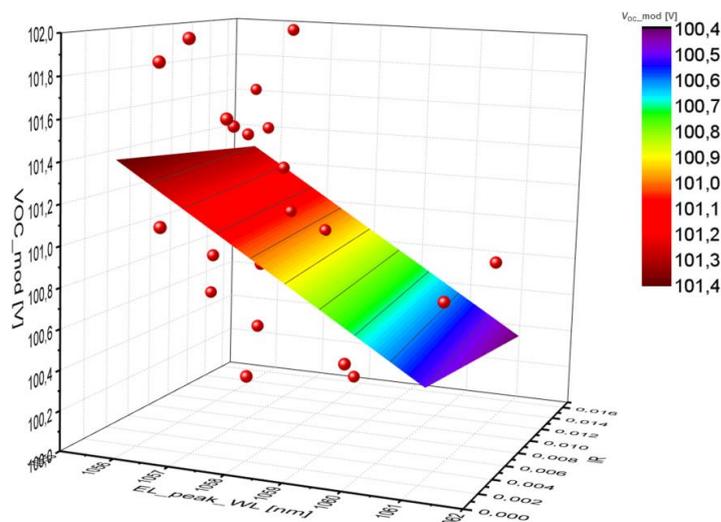


**Abbildung 17: DLIT Aufnahme von CIGS Modulen ( $120 \times 60 \text{ cm}^2$ ): Modul A: a) vor / b) nach Verkapselung mit glattem Weißglas; Modul B: a) vor / b) nach Verkapselung mit mattem ARC-Glas (Abbild der Kamera auf unverkapselten Modulen ist auf eine reale Erwärmung durch Reflexion der abgestrahlten Strahlung an der Kamera bedingt).**

Dieses Verschwimmen führt auch dazu, dass sehr kleine Defekte nicht mehr detektiert werden können. Zusätzlich ist durch die thermische Masse des Glases eine größer Inhomogenität des Hintergrundes festzustellen, die ggf. die Genauigkeit des bestimmten Parameters  $IR$  beeinträchtigen könnte. Allgemein ist jedoch eine sehr gute Übereinstimmung beider Messungen zu konstatieren. Auch die an den Fullsize-Modulen entsprechend der o. g. Methode durchgeführten EL-Messungen führten zu Ergebnissen, die konsistent mit den Messungen an unverkapselten Minimodulen und einzelnen Solarzellen waren. Es wurde dabei lediglich eine minimale aber konsistente Verschiebung des EL-Peaks um  $1.5 \text{ nm}$  festgestellt, die jedoch gemäß (I) nur zu einer nicht signifikanten Änderung der  $V_{oc}$  im Bereich von  $2\text{-}3 \text{ mV}$  führt. Inwieweit es sich dabei um eine laminierbedingte Materialveränderung (z. B. durch Eindiffusion von  $\text{Cu}$  in die Pufferschicht<sup>7</sup>) oder einen rein optischen Effekt handelt, konnte im Rahmen dieses Projektes nicht weiter untersucht werden. Vielmehr lag der Fokus nach dieser Demonstration der Übertragbarkeit der o. g. Messmethoden darauf zu überprüfen, inwieweit auch für Fullsize-Module eine Vorhersage der Modul- $V_{oc}$  auf Basis der EL- und DLIT-

<sup>7</sup> Pistor et al., Phys. Status Solidi A 206, No. 5 (2009)

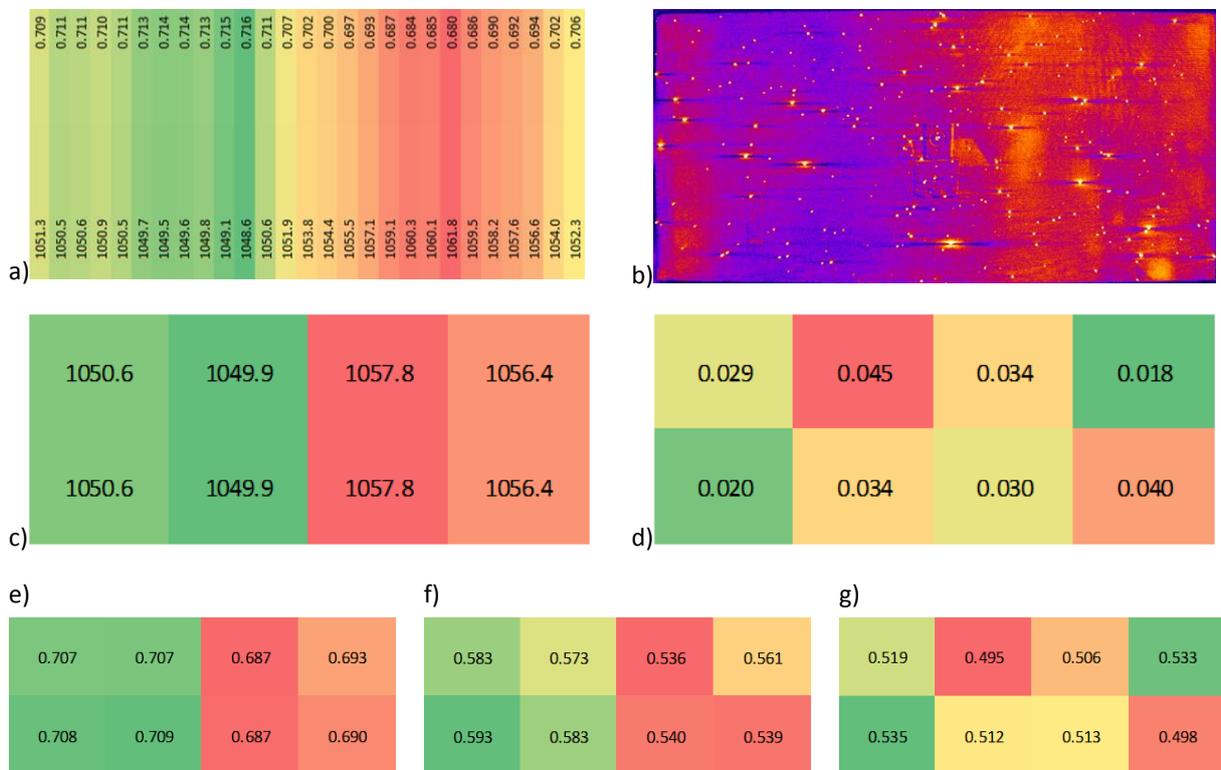
Messung möglich ist. Hierzu wurden 42 Fullsize-Module aus der laufenden Produktion von MCT/NSE entnommen und mit dem in Abbildung 16 abgebildeten Messaufbau charakterisiert. Hierzu wurden an 30 Positionen EL-Messungen durchgeführt und hieraus die mittlere Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  bestimmt. Der Parameter IR wurde ebenfalls aus den für beide Modulhälften ermittelten Werten gemittelt. Somit konnte die in Abbildung 10a) und b) ermittelte Korrelation auch für Fullsize-Module überprüft werden. Aufgrund der unterschiedlichen optischen Eigenschaften wurden die Ergebnisse für Module mit Deckglas mit und ohne ARC separat ausgewertet. Das Ergebnis dieser Messung für Module mit ARC (28 Stk.) ist in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Auftragung der Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  und dem Parameter IR gegen die  $V_{\text{OC}}$  (bei  $1000 \text{ W/m}^2$ ) für 28 Fullsize-CIGS-Module mit ARC. Zusätzlich gezeigt ist die Bestimmung des Zusammenhanges für die  $V_{\text{OC}}$ -Vorhersage durch eine Regressionsebene (Farbskala:  $V_{\text{OC}}$ )**

Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass bei Fullsize-Modulen eine ähnliche Korrelation wie bei den  $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$ -Mini-Modulen beobachtet werden kann, wobei jedoch die Streuung der Messpunkte deutlich größer ist als dies in Abbildung 10: a) Auftragung der Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  und dem Parameter IR gegen die  $V_{\text{OC}}$  (bei  $1000 \text{ W/m}^2$ ); b) Bestimmung des Zusammenhanges für die  $V_{\text{OC}}$ -Vorhersage durch eine Regressionsebene (Farbskala:  $V_{\text{OC}}$ ). der Fall ist. Dies liegt darin begründet, dass die Modul-zu-Modul-Variation in der MCT/NSE-Produktion sehr gering ausfällt: Die  $V_{\text{OC}}$ -Variation der 28 Module ist dabei kleiner als  $2 \text{ V}$  ( $0,015 \text{ V}$  pro Zelle) (bzw.  $<2 \%$ ), wohingegen bei den Mini-Modulen, die ebenfalls aus einem einzigen Fullsize-Modul präpariert wurden, eine Variation  $>30 \%$  auftrat. Es ist somit festzustellen, dass die Variation der Materialeigenschaften und der daraus resultierenden theoretischen lokalen  $V_{\text{OC}}$  für die hier untersuchten Module deutlich größer ist als die Variation zwischen den integralen Eigenschaften unterschiedlicher Module. Bei signifikanten Abweichungen ist jedoch davon auszugehen, dass ähnlich wie in Abbildung 10: a) Auftragung der Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  und dem Parameter IR gegen die  $V_{\text{OC}}$  (bei  $1000 \text{ W/m}^2$ ); b) Bestimmung des Zusammenhanges für die  $V_{\text{OC}}$ -Vorhersage durch eine Regressionsebene (Farbskala:  $V_{\text{OC}}$ ). ein deutlicher Zusammenhang zwischen der  $V_{\text{OC}}$ , dem Parameter IR und der Zentralwellenlänge  $\lambda_{\text{Zentral}}$  auftritt. Im relevanten Projektzeitraum waren jedoch keine entsprechenden Module mit großen Abweichungen von der Standardproduktion verfügbar. Diese Ergebnisse legen nahe, dass mehr Wert

auf die Kontrolle / Optimierung der „Qualitätsverteilung“ innerhalb eines Moduls gelegt werden muss und weniger auf die Unterschiede zwischen den einzelnen Modulen. Da es als nicht zielführend angesehen wurde, künstlich Abweichungen herbeizuführen, die außerhalb der zu erwartenden Produktionsverteilung liegen, exemplarisch für ein industrielles Modul die  $V_{oc}$  an unterschiedlichen Stellen im Modul ermittelt, um deren Verteilung aus einer Einzelmessung zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 19 dargestellt. Aus dieser Darstellung wird klar, dass sowohl bzgl. der Homogenität der Materialzusammensetzung ( $\Delta V_{oc} \approx 5\%$ ) als auch unter Berücksichtigung des Defekteinflusses ( $\Delta V_{oc}^{@1000W/m^2} \approx 5\%$ ,  $\Delta V_{oc}^{@100W/m^2} \approx 10\%$ ,  $\Delta V_{oc}^{@100W/m^2} \approx 8\%$ ) noch signifikante Inhomogenitäten vorliegen, die durch die hier entwickelte Methode quantifiziert werden können, um entsprechende Prozessoptimierungen zu initiieren und zu validieren.



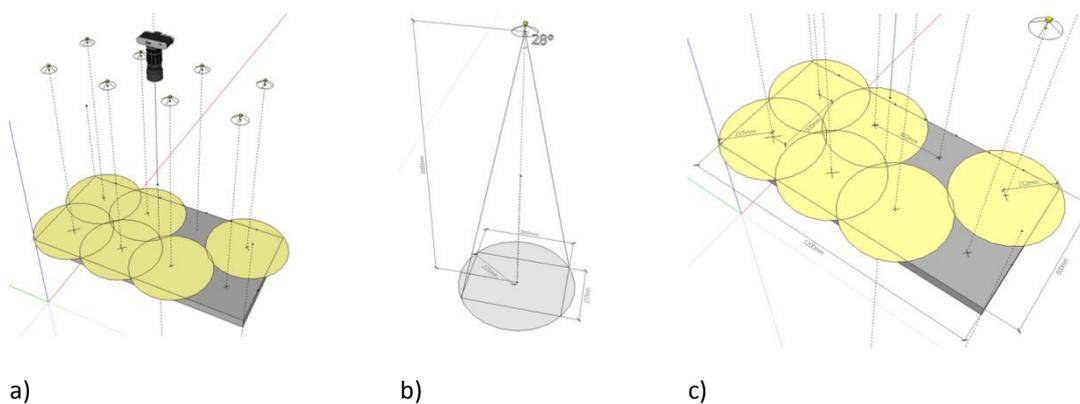
**Abbildung 19: Lokale  $V_{oc}$ -Verteilung (pro Zelle) innerhalb eines CIGS-Moduls: a) EL-Zentralwellenlänge  $\lambda_{zentral}$  (unten) und der abgeleiteten theoretischen  $V_{oc}$  (oben, ohne Einfluss der Defekte); b) IR-Aufnahme des Moduls; c) EL-Zentralwellenlänge  $\lambda_{zentral}$  für ein theoretisch geachteltes Modul; e-g) Vorhersage der  $V_{oc}$ /Zelle für die theoretischen Achtel-Module für Beleuchtungsstärken von  $1000\text{ W/m}^2$  (e),  $100\text{ W/m}^2$  (f),  $10\text{ W/m}^2$  (g).**

Entwicklung eines Konzeptes für großflächige Lichtanregung der Module als Produktionskontrolle:

Wie bereits erwähnt ist unter Produktionsbedingungen nicht nur eine vollständig berührungslose Detektion, sondern auch Anregung, der Messungen wünschenswert. Bei der o. g. Messung handelte es sich um eine Messung mittels EL und DLIT – somit war lediglich die Detektion, nicht aber die Anregung berührungslos. Jedoch können EL-Messungen (wie oben gezeigt) prinzipiell durch vollständig kontaktlose PL-Messungen und DLIT-Messungen durch vollständig kontaktlose ILIT-Messungen ersetzt werden. Dies erfordert jedoch eine homogene Lichtanregung der Module. Da im Projekt die die prinzipielle Entwicklung einer Methodik im Vordergrund stand, nicht aber deren vollständige technische Implementierung, wurde ein Konzept für die großflächige Lichtanregung

entwickelt, im Projekt selbst jedoch mit EL und DLIT gearbeitet. Das Konzept soll im Folgenden kurz skizziert werden. Insbesondere sollte hier abgewogen werden, welche Kosten für die Konstruktion eines geeigneten Setups erforderlich sind.

Es konnte gezeigt werden, dass ein hinreichend homogenes Setup bereits für unter 1.000 € realisierbar wäre. Hierbei kann ausgenutzt werden, dass die Defekte auch bei geringer Einstrahlung hinreichend gut auflösbar sind. Somit sollte bereits bei einer Beleuchtungsstärke von  $10 \text{ W/m}^2$  eine hinreichende Anregung bereitstellen. Dieses Niveau kann mittels handelsüblicher LEDs bereits mit acht Hochleistungs-LEDs (z. B. Nichia Chip on Board Modul Series 8, warm weiß) erreicht werden. In Abbildung 20 ist der prinzipielle Aufbau in Form von Konstruktionszeichnungen erläutert. Sowohl das Beleuchtungsniveau als auch die Homogenität können dabei durch eine höhere Anzahl an LEDs erhöht werden. Prinzipiell ist der hier gezeigte Aufbau für ILIT-Messungen ausgelegt. Jüngste Arbeiten des ZAEs (außerhalb von optiCIGS) zeigen jedoch, dass auch PL-Aufnahmen unter inhomogenen Ausleuchtungsbedingungen und bei einer Beleuchtungsstärke von einigen  $10 \text{ W/m}^2$  möglich sind<sup>8</sup>.



**Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau eines Aufbaus zur Beleuchtung von Fullsize-CIGS-Modulen mittels LEDs: Gesamtlayout mit acht LEDs und Kamera; b) Ausleuchtung für ein LED-Element; c) dimensionierte Ausleuchtung eines Moduls**

Auf Basis der in Abbildung 20 dargestellten Konstruktion ergeben sich die in Tabelle 4 aufgeführten Kosten für die entsprechende Beleuchtungseinheit zur Modulanregung. Ergänzend zu diesen Angeboten sei erwähnt, dass in am ZA Bayern diverse Lampenfelder als Sonnensimulator für Siliziummodule (ca.  $100 \times 160 \text{ cm}^2$ ;  $1000 \text{ W/m}^2$ ) betrieben werden, die zwar keine simultane bildgebende Messung erlaubten und daher in optiCIGS nicht einsetzbar waren, jedoch als gute Abschätzung für die Konstruktion eines Aufbaus mit größerer Homogenität dienen können. Hier konnte ein Aufbau für ca. 10.000 € mit sechs Metalldampflampen realisiert werden<sup>9</sup>. Ein Angebot der Firma FutureLED für ein Setup derselben Größe bot einen Betrag von 37.000 € an. Es ist somit deutlich, dass selbst bei deutlich erhöhter Beleuchtungsstärke und Homogenität Kosten  $\ll 50.000 \text{ €}$  realistisch sind.

<sup>8</sup> Doll et al., 7th WCPEC, Hawaii, USA, 2018, accepted

<sup>9</sup> Doll et al., 32nd EUPVSEC, pp. 2173–2176, Munich, Germany, 2016

**Tabelle 4: Komponenten für eine Beleuchtungseinheit für Fullsize-Module auf Basis von acht Hochleistungs-LEDs. Die Preisangaben beziehen sich dabei - sofern nicht anders angegeben - auf Angebote der Firma Lumitronix.**

Bezeichnung	Stück	Einzelpreis	Gesamtpreis
Nichia Chip on Board Modul Series 8, warm weiß	8	12,99 €	103,92 €
Ledil Reflector 70mm for Nichia COBs, 28°	8	4,95 €	39,60 €
Connector element for Nichia COB	8	4,95 €	39,60 €
Connector element for Nichia 216, 130, 108 (alternative)	8	1,49 €	11,92 €
ArcticSilver thermal adhesive (2x 3.5g)	2	12,90 €	25,80 €
Kühlkörper 1.2 K/W (L x B x H) 80 x 75 x 87 mm	8	23,40 €	187,20 €
LED-SNT,IP65,155W,74-148V/1050mA (Reichelt.de)	2	59,90 €	119,80 €
		<b>GESAMT</b>	<b>527,84 €</b>

Zusammenfassend konnte somit in AP2 eine zerstörungslose auf DLIT und EL basierende Methode zur Vorhersage der  $V_{OC}$  von industriell gefertigten CIGS-Modulen entwickelt und validiert werden. Die Methode erlaubt die Vorhersage über sämtliche relevanten Beleuchtungsstärken. Für Schwachlichtbedingungen korrelieren die Ergebnisse ebenfalls stark mit der Modulleistung im MPP, Für STC ist diese Korrelation jedoch nicht mehr gegeben, da der Einfluss der Defekte vernachlässigbar wird. In diesem Regime ist der Füllfaktor daher von dem Serienwiderstand bestimmt, der von der hier beschriebenen Methode zunächst nicht erfasst wird. Es wurde jedoch gezeigt, dass dieser orts aufgelöst bestimmt werden kann, sodass alle für die Leistung relevanten Parameter erfasst werden. Lediglich eine quantitative Aussage für die Modulleistung ist auf dieser Basis für STC nicht möglich.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Methode zur  $V_{OC}$ -Bestimmung prinzipiell auf Fullsize-Module übertragbar ist. Gleichzeitig zeigte sich jedoch auch, dass die Schwankung der lokalen  $V_{OC}$  innerhalb eines Einzelmoduls deutlich größer ist als die Modul-zu-Modul-Schwankung. Die Methode ist somit sehr gut zur Prozessoptimierung geeignet. Zuletzt konnte im Rahmen des vorliegenden Projektes auch ein Setup designt werden, das es erlaubt, die Messungen auch völlig berührungslos, d. h. mittels Lichtanregung, durchzuführen.

Zusammenfassung der experimentellen Bedingungen für AP2 und AP8: Im Folgenden werden als Ergänzung zu diesem Ergebnisteil die wichtigsten verwendeten Geräte und die ermittelten optimierten Messbedingungen zusammengefasst.

Elektrische Anregung:

- Einzelzellen und Mini-Module: SAB Verstärkersystem TYP S08-OM, IED GmbH, Hamburg, Deutschland
- Industrielle Module: LAB/HP101000, ET system electronic GmbH, Altlußheim, Deutschland

Optische Anregung:

- Einzelzellen und Mini-Module (punktuell): MLL-FN-532-800 mW, Roithner Lasertechnik, Wien, Österreich
- Einzelzellen und Mini-Module (flächig): Prototyp LED Modul 532 nm, FutureLED, Berlin, Deutschland

Detektion:

- EL: Spektrometer mit InGaAs-Detektor: AvaSpecNIR256-1.7, Avantes, Niederlande
- DLIT: Equus 327kNM, IRCAM, Deutschland (InSb-Detektor; 1 $\mu$ m-5 $\mu$ m)

Messparameter:

- EL: angelegte Spannung: 1 V/Zelle, 20 Mittelungen/Spektrum mit Belichtungszeit von 0.1s.
- DLIT: 30 Perioden/Bild; Frequenz: 30 Hz

Erreichung der Meilensteine: In diesem Abschnitt wird die Erreichung der verschiedenen o. g. Meilensteine diskutiert und erläutert. Dabei wird auf die oben geschilderten Messungen, die das jeweilige Erreichen des Meilensteines darstellten, eingegangen.

### **M2.1: Optimierung der IR-Analyse an Kleinstmodulen**

Kleinstmodule bieten die Möglichkeit, defektfreies CIGS-Material photovoltaisch zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurden Einzelzellen verwendet. Zunächst wurde an defektfreien Einzelzellen die o. g. EL-Methodik entwickelt (s. Abbildung 5). Anschließend konnte an den defektfreien Einzelzellen die Auswirkung von künstlich eingebrachten Defekten untersucht (s. Abbildung 8 und Abbildung 9 a)). Aus diesen Messungen wurde der Parameter IR abgeleitet. Somit wurde die IR-Analyse an Einzelzellen optimiert und der Meilenstein erreicht. Das Verfahren wurde anschließend erfolgreich auf die 8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup>-Mini-Module übertragen.

### **M2.2: Konzept zur Ausleuchtung großer Flächen ist erarbeitet**

Das Konzept ist oben in einem gesonderten Abschnitt geschildert (s. Abbildung 20 und Tabelle 4). Der Meilenstein wurde somit erreicht.

### **M2.3: Modulpeakleistung wird berührungslos unter Schwachlichtbedingungen vorausgesagt**

In diesem Projekt wurde für die  $V_{oc}$  ein Zusammenhang ermittelt, der ihre Vorhersage für alle Beleuchtungsstärken (s. Abbildung 11 a), d), g)) auf Basis von EL und DLIT-Messungen erlaubt. Zusätzlich konnte auch für den Füllfaktor eine klare Abhängigkeit für Schwachlichtbedingungen (10 W/m<sup>2</sup> und 100 W/m<sup>2</sup>) identifiziert werden (s. Abbildung 13). Für Schwachlichtbedingungen sind somit alle Korrelationen bekannt, um eine Vorhersage für die Leistung zu treffen (s. Abbildung 14).

Analog zu den hier gezeigten DLIT- und EL-Messungen sind auch mittels ILIT und PL vollständig berührungslose Messungen durchführbar. Der Meilenstein wird somit als erreicht angesehen.

Unter STC ist keine direkte Leistungsvorhersage möglich, da hier der  $FF$  nicht mehr von den Defekten, sondern von dem Serienwiderstand abhängt. Dieser kann jedoch ortaufgelöst messtechnisch bildgebend ermittelt werden, sodass auch untere STC alle Informationen vorhanden sind, um die Leistung zu beurteilen, jedoch nicht quantitativ vorherzusagen.

#### **M2.4: Machbarkeit der Voraussage der Modulpeakleistung für Großmodule ist erörtert (60 x 120 cm<sup>2</sup>)**

Das an 8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup>-Mini-Modulen entwickelte Verfahren zur Vorhersage der  $V_{OC}$  ist prinzipiell auf Großmodule übertragbar (s. Abbildung 18). Da jedoch die hierfür entscheidenden Parameter  $IR$  und  $\lambda_{\text{zentral}}$  innerhalb eines Moduls deutlich stärker variieren, als von Modul zu Modul sind auch die lokalen  $V_{OC}$ -Schwankungen innerhalb des Moduls größer als von Modul zu Modul. Die  $V_{OC}$ -Schwankung von Modul zu Modul ist daher so gering, dass eine genaue Korrelation für Großmodule nicht hergeleitet werden konnte. Die Daten deuten dabei aber an, dass bei größeren Prozess- und  $V_{OC}$ -Schwankungen eine ähnliche Korrelation wie für die Mini-Module zu erwarten ist. Die Methode eignet sich jedoch hervorragend, um Schwankungen innerhalb des Moduls sichtbar zu machen und ist somit zur Prozessoptimierung prädestiniert. Für die Vorhersagbarkeit der Modulpeakleistung gelten die gleichen Einschränkungen wie bei M2.3. Der Meilenstein ist somit erreicht.

### **2.1.4. PL-Analyse (AP3)**

#### **Beitrag HSU:**

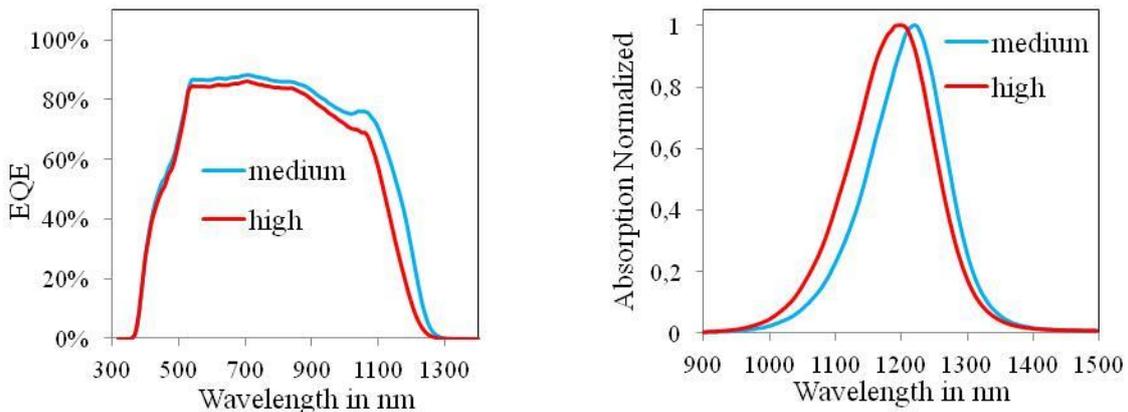
Im AP3 lag der Fokus primär auf der Interpretation von PL-Messungen (sowohl steady state als auch transient (TRPL)). Hierfür wurden folgende Fragestellungen adressiert:

- Korrelation spektrale PL-Messungen und EQE
- Transiente PL-Messungen und Transportphänomene
- Steady state PL-Messungen und Bandverbiegungen
- Transiente PL-Messungen und Prozessvariationen
- Interpretation transientser PL-Messungen

#### **2.1.4.1. Korrelation spektrale PL-Messungen und EQE**

Ein wesentlicher Parameter bei der Bewertung der Absorberqualität beim Partner BSCT betraf die Ausbildung und Kontrolle von Kompositionsgradienten bei sequentiell hergestellten Materialien. Die HSU ging hierbei der Fragestellung nach, ob spektrale PL-Messungen (an Zellen) Verschiebungen dieser Gradienten widerspiegeln. Hierfür wurde die Diffusionszeit variiert, was zu einer Veränderung des Ga/(In+Ga)-Gradienten führte. Die Zellen wurden anschließend mit EQE und eben spektraler PL charakterisiert (*spektrale PL-Messungen wurden beim Partner Bosch durchgeführt*).

Abbildung 21 zeigt die erzielten Ergebnisse. Eine längere Diffusionszeit führte zu einer gewissen Verschiebung der Absorptionskante (aus EQE) hin zu größeren Energien. In die gleiche Richtung ging die Verschiebung der spektralen PL, was über das Reziprozitätstheorem plausibel wird. Andererseits zeigt dieses erste Ergebnis, dass spektrale PL-Messungen geeignet sind, wichtige Qualitätsparameter abzubilden.

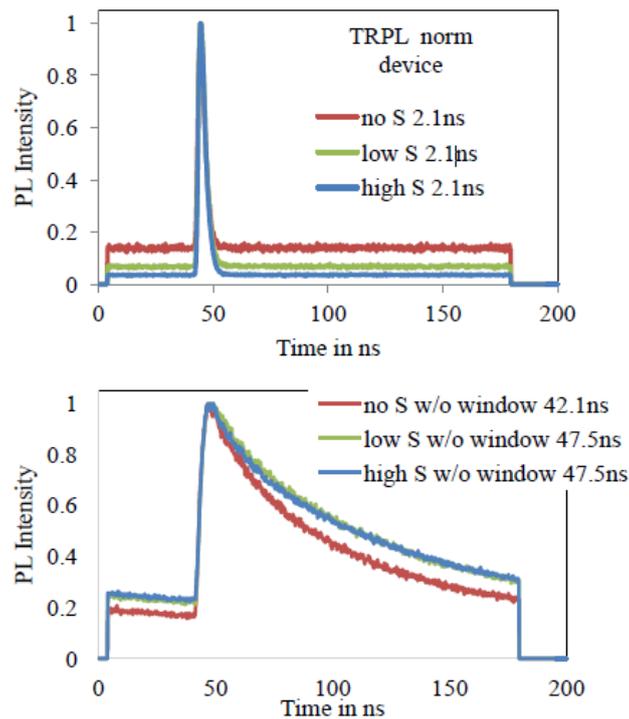


**Abbildung 21 EQE und spektrale PL**

In einer Fertigung ist es notwendig, die spektrale Absorption zu kennen und zu kontrollieren. Allerdings ist es nicht praktikabel, an einem Modul die spektrale Quantenausbeute (EQE) zu ermitteln. Über den Umweg spektrale PL sowie das Reziprozitätstheorem ist es somit möglich, die EQE zu bestimmen. Gerade bei sequentiell hergestellten Absorbern mit ausgeprägten Kompositionsgradienten sind derartige Verfahren wichtig in der Produktion. Äquivalente Messungen bei der S-Diffusion ergaben kein Schieben der Emissionswellenlänge und der Absorptionskante in der EQE, da Schwefel nur an der Oberfläche eingebaut wird, wodurch die spektrale Photostromsammlung nicht beeinflusst wird. Allerdings steigt die Leerlaufspannung, wodurch eine gewisse Entkopplung der Bandlücke für die Photostromsammlung von der Bandlücke für die Leerlaufspannung gezeigt werden konnte.

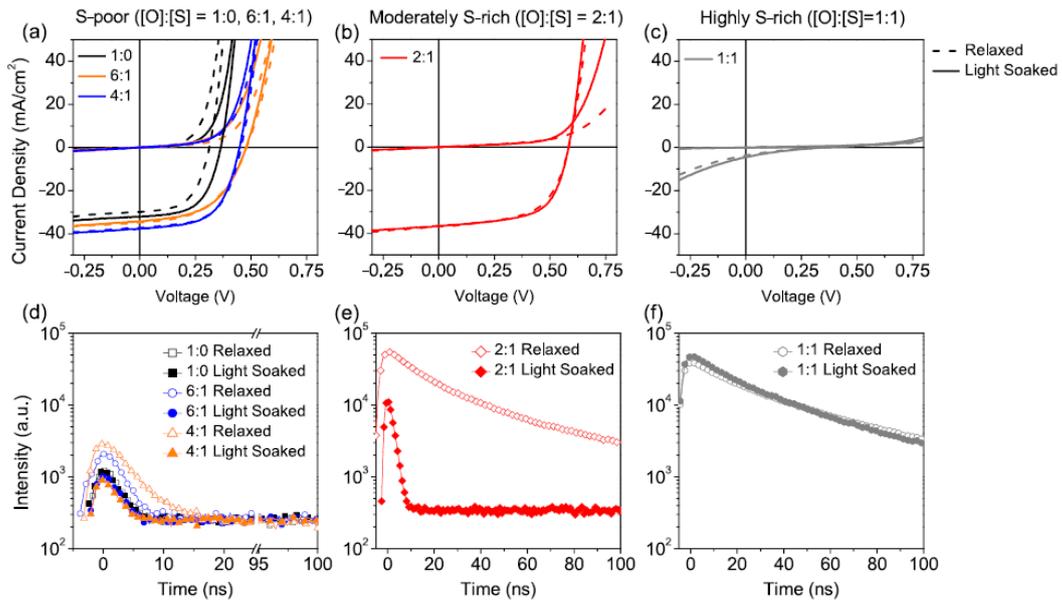
### Transiente PL-Messungen und Transportphänomene

In einem ersten Schritt ging es um die Korrelation zwischen transienten PL-Messungen und Transportphänomenen im Heteroübergang. Hierfür wurden beim Projektpartner Bosch transiente PL-Messungen (TRPL) an Absorber (& Puffer) und Zellen durchgeführt. Abbildung 22 zeigt gemessene Transienten an Absorbern und Zellen (*diese Messungen wurden beim Partner BSCT durchgeführt*). Zellen weisen Transienten mit Zeitkonstanten im Bereich von wenigen ns auf, während am Absorber Lebensdauern im Bereich von 40 - 100 ns gemessen wurden. Diese signifikanten Unterschiede können über die Ladungsträgertrennung im elektrischen Feld des Heteroüberganges erklärt werden. Die kleinen Lebensdauern in der Zelle korrelieren mit der Driftzeit im elektrischen Feld, welches die Rekombination (auch strahlende) im Absorber verhindert. Im Absorber findet diese schnelle Ladungsträgertrennung nicht statt, sodass längere Lebensdauern (und größere Amplituden) beim TRPL-Signal beobachtet werden.



**Abbildung 22: TRPL-Ergebnisse an der Zelle (oben); am Absorber (unten)**

Abbildung 23 zeigt TRPL-Messungen sowie korrespondierende IV-Messungen an Zellen mit unterschiedlichen S-Gehalten im Zn(O,S)-Puffer (*Messungen beim Partner BSCT*). Diese Ergebnisse wurden während eines Gastaufenthaltes einer Wissenschaftlerin von Bosch / Singapore an der HSU erzielt und zwischenzeitlich in APL (Applied Physics Letters) veröffentlicht. Die Zelleigenschaften hängen stark vom S-Gehalt des Puffers ab. Geringe S-Gehalte führen zu „normalen“ Zellen, während hohe S-Gehalte zu einer Barriere am Heteroübergang führen verbunden mit schlechtem Photostromtransport. Die Korrelation zwischen TRPL-Ergebnissen und Transporteigenschaften lässt sich an Abbildung 23 ablesen. Bei geringem S-Gehalt und „normalen“ Transporteigenschaften erhält man eine kurze Lebensdauer, während ein reduzierter Photostromtransport zu längeren Lebensdauern führt, was konsistent mit obiger Interpretation ist. Interessant ist der mittlere S-Gehalt, da hierbei über „dark anneal“ bzw. „lightsoak“ die Transporteigenschaften verändert werden können, wie die „dunkle“ IV-Charakteristik (mittleres Diagramm) veranschaulicht. Hierzu korrespondiert eine Veränderung der Lebensdauer aus TRPL. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass elektrische Felder die gemessenen Lebensdauern signifikant beeinflussen.

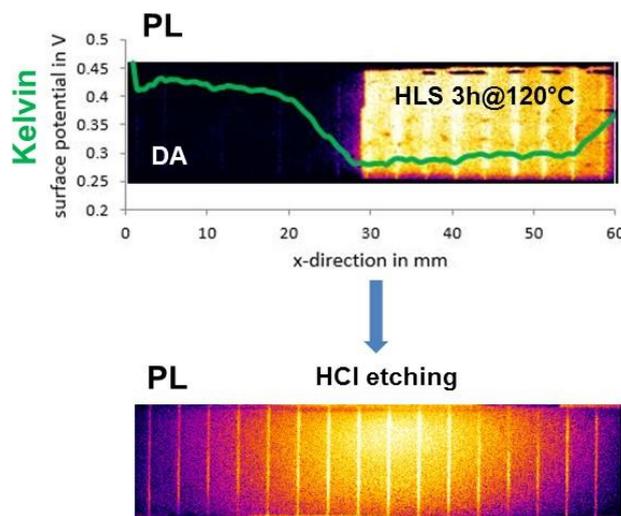


**Abbildung 23: TRPL- und IV-Ergebnisse an Zellen mit unterschiedlichem S-Gehalt im Zn(O, S)-Puffer**

Hieraus folgt, dass transiente PL-Messungen ohne Fenster erfolgen müssen, um Zugang zu dem essentiellen Parameter der Minoritätslebensdauer zu erhalten.

**Steady State PL-Messungen und Bandverbiegungen**

Im Projektzeitraum wurden Untersuchungen zum Einfluss der CdS-Schicht auf steady state PL, TRPL sowie auf Messungen des Oberflächenpotenzials mit Kelvin-Probe durchgeführt. Abbildung 24 zeigt PL-Images einer CIGS/CdS-Schicht, wobei die Hälfte der Schicht durch ein spezielles Temperverfahren degradiert wurde.



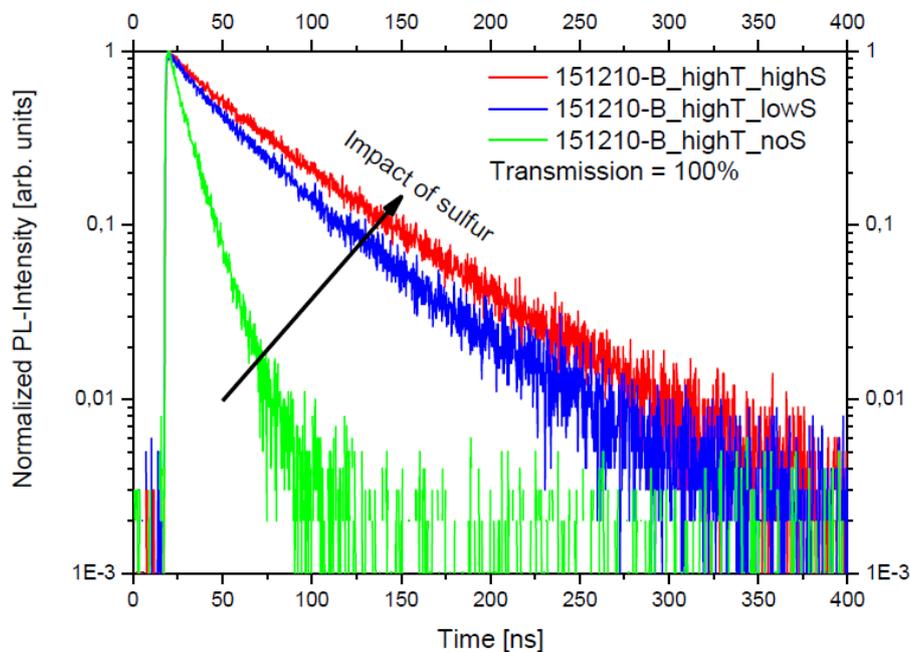
**Abbildung 24: PL und CdS**

Deutlich zu erkennen ist der geschädigte Bereich an einer signifikant reduzierten PL-Intensität. Weiterhin gibt es einen deutlich sichtbaren Unterschied, was das mittels Kelvin-Probe bestimmte

Oberflächenpotenzial anbelangt. Die Situation bzgl. des PL-Images ändert sich vollständig nachdem das CdS durch HCl entfernt wurde. Nach diesem Ätzschritt ist die PL-Intensität für beide Bereiche nahezu konstant. Die Interpretation dieses Verhaltens basiert auf einer Bandverbiegung an der Oberfläche, wodurch es zur Trennung photogener Ladungsträger mit reduzierter strahlender Rekombination kommt. Somit kann postuliert werden, dass die Temperbehandlung zu einer Bandverbiegung an der Oberfläche führt, welche mit Ladungen im CdS zusammenhängt. Deshalb misst man mit steady state PL nicht die Lebensdauer photogener Ladungsträger sondern Ladungsträgertrennung aufgrund von Bandverbiegungen.

**Transiente PL-Messungen und Prozessvariationen**

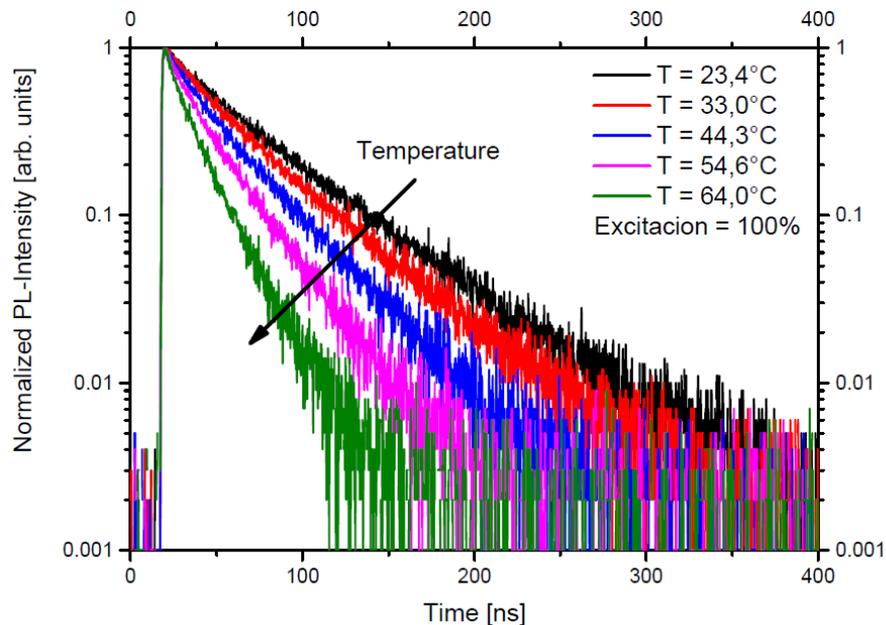
Im Projektzeitraum konzentrierte sich die HSU auf das AP3 mit dem Ziel, die Interpretation von PL-Messungen (steady state und TRPL) voranzubringen. An der Universität Halle (nach Ausscheiden von Bosch) wurden hierzu transiente PL-Messungen an Proben vom Partner BSCT durchgeführt, diskutiert und ausgewertet. Insbesondere sollte geklärt werden, ob PL-Transienten Lebensdauern oder die Emission aus Traps darstellen. Hierzu wurden die Messungen bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Anregungsintensitäten durchgeführt. Abbildung 25 zeigt PL-Transienten für verschiedene S-Gehalte im Absorber (*Prozessvariation des Projektpartners Bosch*). Die Probe ohne S besitzt eine schnellere Transiente, während die S-haltigen Absorber längere Transienten beinhalten. Über temperaturabhängige Messungen sollte geklärt werden, ob Traps diese Transienten wesentlich beeinflussen.



**Abbildung 25 PL-Transienten mit unterschiedlichem S-Gehalt**

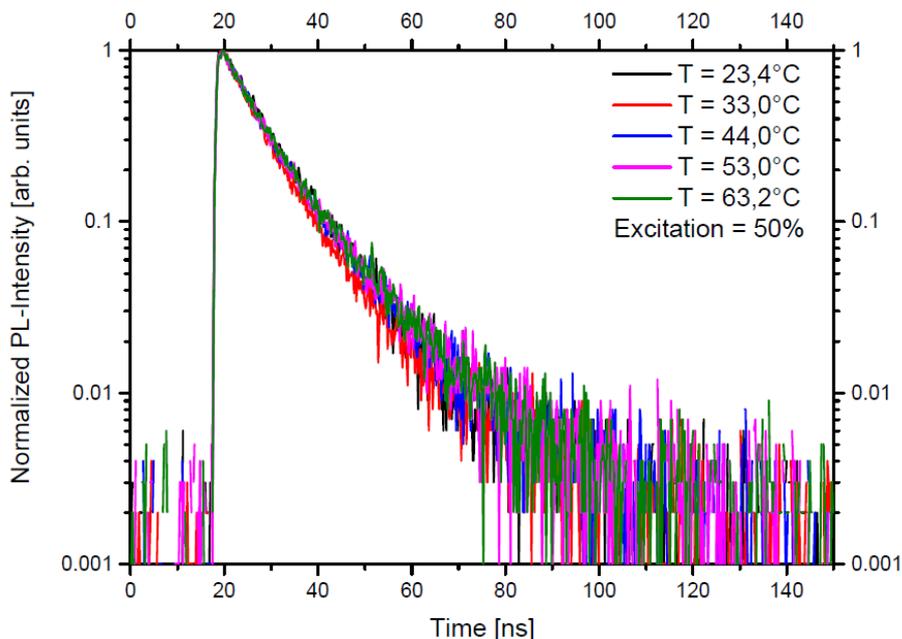
Abbildung 26 zeigt die Temperaturabhängigkeit bei hohem S-Gehalt. Mit steigender Temperatur wird die Transiente kürzer, was auf die thermische Emission aus Traps hindeuten könnte. Die aus dieser

Abbildung ermittelbare Aktivierungsenergie entspricht dann dem Abstand des Traps vom Leitungsband.



**Abbildung 26 Temperaturabhängigkeit bei hohem S-Gehalt**

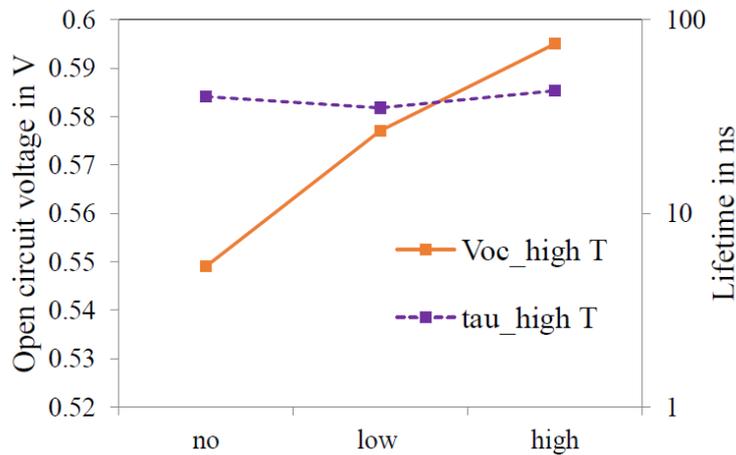
Abbildung 27 zeigt diese Temperaturabhängigkeit bei S-freien Proben. Die hieraus erkennbare Unabhängigkeit von der Temperatur lässt darauf schließen, dass die gemessene Transiente der echten Lebensdauer der Minoritäten entspricht.



**Abbildung 27 Temperaturabhängigkeit ohne S**

In Abbildung 28 sind die gemessenen Lebensdauern mit Leerlaufspannungen bei verschiedenen S-Gehalten (andere Prozessbedingungen verglichen mit den oben angeführten Ergebnissen) korreliert.

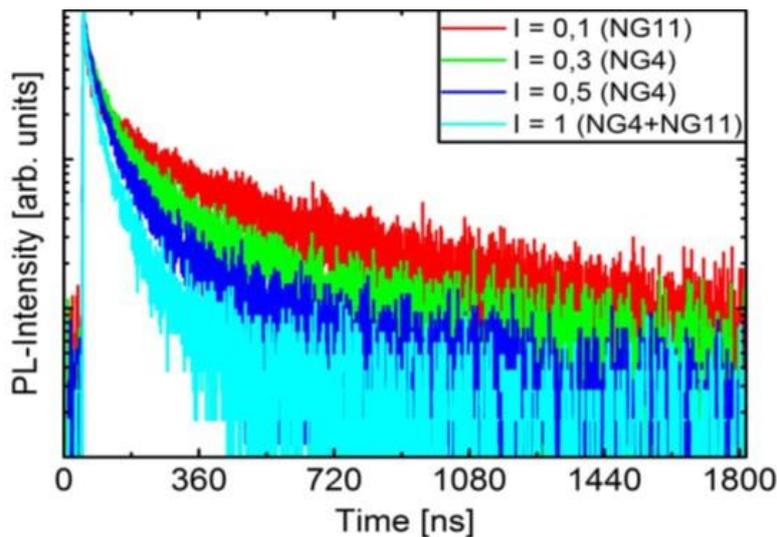
Die Lebensdauer hängt anscheinend kaum vom S-Gehalt ab. Voc hingegen steigt mit höher werdendem S-Gehalt. Es konnte gezeigt werden, dass diese Voc-Erhöhung primär durch eine Vergrößerung der für die Rekombination verantwortlichen Bandlücke zu erklären ist. Dies ist nunmehr konsistent mit Abbildung 28, da Voc trotz gleich bleibender Lebensdauer steigt, was eben auf einen Bandlückeneffekt schließen lässt.



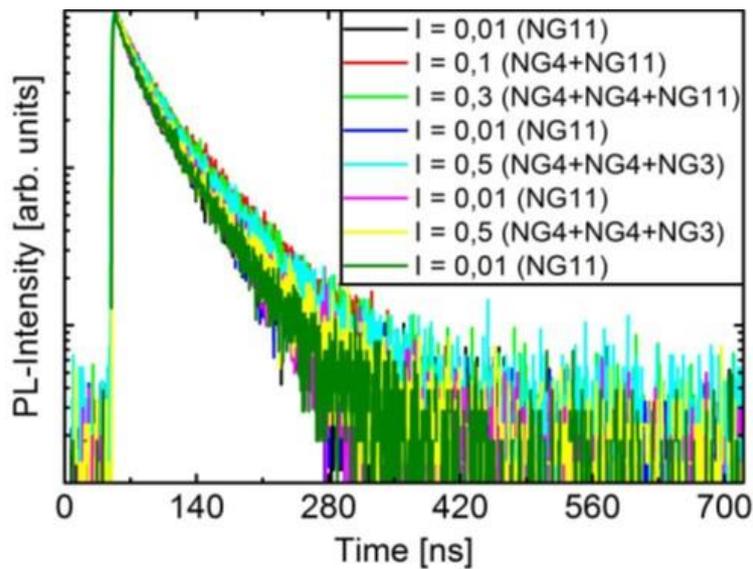
**Abbildung 28 Korrelation Voc und Lebensdauer (für verschiedene S-Gehalte)**

**Interpretation transienter PL-Messungen**

Abbildung 29 zeigt TRPL-Messungen an einer CIGS/CdS-Schicht mit verschiedenen Intensitäten in der Anregung. Deutlich zu erkennen sind zumindest zwei Transienten, wobei die längere signifikant von der Anregungsintensität abhängt. Diese Intensitätsabhängigkeit deutet nach Maiberg ebenfalls auf Bandverbiegungen an der Oberfläche hin.



**Abbildung 29: TRPL CIGS / CdS**



**Abbildung 30: TRPL CIGS**

Nach dem Entfernen der CdS-Schicht durch HCl ist ein monoexponentielles Verhalten mit minimaler Intensitätsabhängigkeit erkennbar (Abbildung 30). In der eingefügten Tabelle sind die extrahierten Lebensdauern in Abhängigkeit der Intensität dargestellt. Intensitätsunabhängig wurden Werte im Bereich von 40 ns festgestellt.

Intensity	0.01	0.1	0.3	0.5	1.0
$\tau_1$ , ns	33.1	42.4	42	40.1	34.2

**Fazit:**

Sowohl steady state als auch transiente PL-Messungen werden von Bandverbiegungen an der Oberfläche, welche über Ladungen im CdS hervorgerufen werden können, beeinflusst. Von daher ist eine sinnvolle Bestimmung der Ladungsträger-Lebensdauer nur am unbeschichteten Absorber möglich. Lebensdauern im Bereich von 40-100 ns sind konsistent mit gemessenen Lebensdauern, Bestimmte Prozessvariationen (S-Diffusion) führen zu Traps, was über die Temperaturabhängigkeit der PL-Transienten plausibilisiert werden kann. Über die Intensitätsabhängigkeit kann auf Bandverbiegungen geschlossen werden.

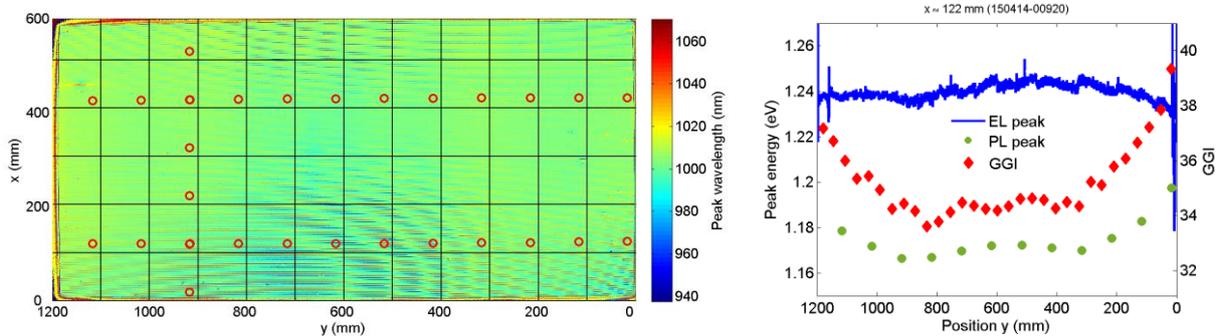
**Beitrag UOL**

**2.1.4.2. EL-Peak-Methode: Validierung mittels PL**

Beim Projektpartner MCT/NSE wurde die von der HSU entwickelte Methode zur bildgebenden Darstellung von spektralen Elektrolumineszenzpeaks implementiert. Dabei werden zwei EL-Bilder

eines Moduls mit und ohne RG9-Farbfiler aufgenommen, so dass unter Kenntnis des Filtertransmissionsspektrums auf das spektrale EL-Maximum zurückgerechnet werden kann. Diese Implementierung wurde im Folgenden durch einen Vergleich mit Messungen der spektralen Photolumineszenz (PL) an der UOL verifiziert.

Dazu wurde ein Modul (01-150414-00920) bei MCT/NSE mit o.g. Methode vermessen und anschließend in  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  großen Stücken an die UOL verschickt, wo an mehreren Positionen PL-Spektren aufgenommen wurden. Die laterale Verteilung des EL-Maximums ist in Abbildung 31 (links) farbkodiert über das Modul zusammen mit den PL-Messpunkten (Kreise) dargestellt. Der Verlauf des EL-Maximums über einen Zellstreifen ist zudem in Abbildung 31 (rechts) als durchgezogene Linie eingezeichnet. Zusätzlich sind in Abbildung 31 die aus den PL-Spektren abgelesenen Energien am Maximum als Kreise gezeigt.



**Abbildung 31: Verifizierung der Filter-EL-Methode. Links: Verteilung der EL Peak-Wellenlänge über das Modul. Kreise markieren Stellen, an denen PL-Spektren gemessen wurden. Rechts: Laterale Variation der Peak-Energie aus EL und PL bzw. des Ga-Gehalts aus RFA.**

Beim Vergleich der EL- und PL-Energien am Maximum fallen in erster Linie zwei Unterschiede auf: Zum einen liegen die PL-Maxima bei ca. 60 meV niedrigeren Energien als die EL-Maxima. Ein Teil dieser Diskrepanz lässt sich ggf. mit der fehlenden Korrektur der PL-Spektren bzgl. der spektralen Empfindlichkeit des PL-Messplatzes erklären; dies sollte jedoch nicht mehr als ca. 10 meV ausmachen. Zum anderen zeigen beide Methoden in der Mitte des Moduls einen sehr ähnlichen Verlauf, zu den Rändern hin steigt die Energie des PL-Maximums jedoch an, was bei der EL-Messung nicht der Fall ist. Dieses Verhalten konnte in einem weiteren Zellstreifen bestätigt werden. Eine Auswertung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) eines benachbarten Moduls hinsichtlich des Ga-Gehalts (GGI) zeigt in Übereinstimmung mit den PL-Daten ebenfalls einen Anstieg des GGI (Rauten in Abbildung 31) – und damit auch der Bandlücke – in Richtung der Ränder.

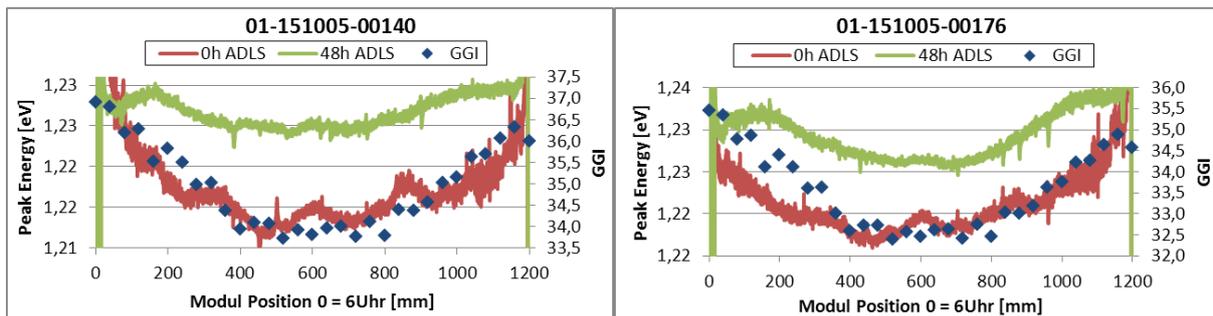
## Beitrag MCT/NSE

Validierung der Filter-EL Methode: Nachdem die Filter-EL Methode eine wertvolle Möglichkeit darstellt, Eigenschaften vom Absorber auch nach Laminierung und Fertigstellung des Moduls zu untersuchen, wurden Bestrebungen durchgeführt diese Methode mit einer größeren Anzahl an Modulen und unter unterschiedlichen Präparationsbedingungen zu beleuchten.

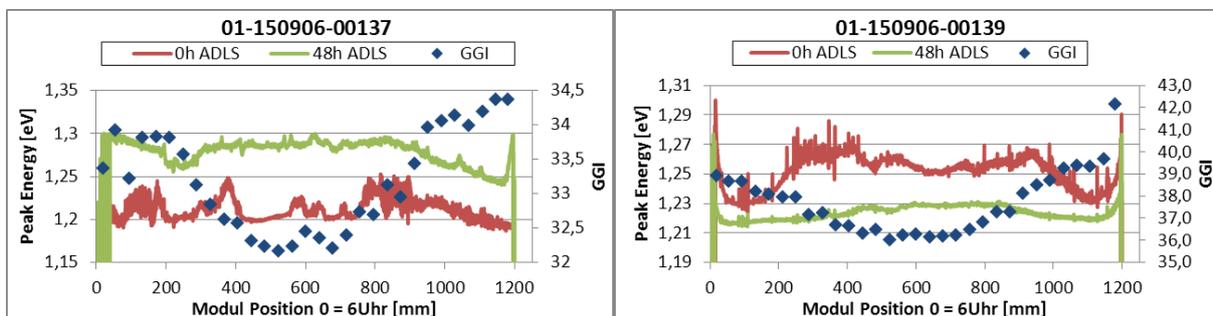
Die Untersuchung umfasst zwei Versuchsgruppen. In der ersten Versuchsgruppe (V1626) besitzen die Module eine kurze Wartezeit zwischen CBD und i-ZnO von ca. 20h, wurden verkapselt und die RFA Werte nur indirekt bestimmt. In der zweiten Versuchsgruppe (V1188) ist die Wartezeit zwischen dem CBD- und i-ZnO Prozess von ein paar Tagen relativ lang, wurden nicht verkapselt und die RFA-Werte direkt gemessen. Der GGI der Substrate variiert hierbei zwischen 0,31 und 0,38.

Bei der Betrachtung der lateralen Variation der Peak-Energie aus EL und des GGI-Verhältnisses aus RFA von der ersten Versuchsgruppe (V1626, kurze Wartezeit + laminiert) in Abbildung 32 ist eine akzeptable Übereinstimmung des GGI und EL-Verlaufs für den Zustand „Vor ADLS“ zu erkennen. Der 48h ADLS Prozess besitzt einen sichtbaren Einfluss auf die elektrische Konfiguration des Solarmoduls, welcher in eine höhere EL Peakenergie resultiert. Dieses Verhalten ist im Allgemeinen als Lightsoak bekannt und geht i.d.R. mit einer leichten Erhöhung der Leerlaufspannung einher.

Bei der zweiten Versuchsgruppe (V1188, lange Wartezeit + unlaminiert) können die lateralen Verläufe der Peakenergie aus EL im Zustand „Vor ADLS“ und des GGI-Verhältnisses in Abbildung 33 in keine gute Übereinstimmung gebracht werden. Es wäre denkbar, dass sich der Feuchtigkeitsgehalt der CdS-Schicht durch die lange Wartezeit, als auch sich Oberflächenzustände vom Cadmiumsulfid ändern, welche eine Änderung des EL-Emissionsspektrums hervorrufen.



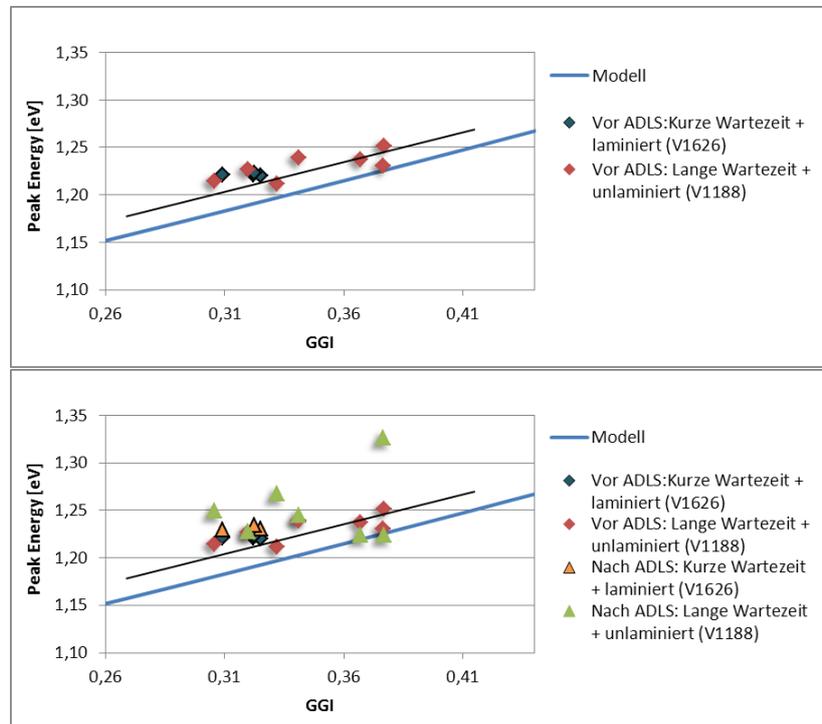
**Abbildung 32: V1626: Kurze Wartezeit (nach CdS) + laminiert: Zwei exemplarische Abbildungen der laterale Variation der Peak-Energie aus EL, bzw. des GGI-Verhältnisses aus RFA.**



**Abbildung 33: V1188: Lange Wartezeit (nach CdS) + unlaminiert: Zwei exemplarische Abbildungen der laterale Variation der Peak-Energie aus EL, bzw. des GGI-Verhältnisses aus RFA.**

Zur Betrachtung der Absolutwerte wurden Mittelwerte vom GGI und der Bandlückenergie gebildet und gegeneinander aufgetragen. Im Zustand „Vor ADLS“ kann man erkennen dass die Datenpunkte der beiden Versuchsgruppen gut ineinander übergehen. Die Datenpunkte ergeben einen linearen

Trend, dessen Gerade parallel um ca. 0,02 eV versetzt zum Modell<sup>10</sup> liegt. Die Datenpunkte der zweiten Versuchsgruppe V1188 weichen nach ADLS teilweise stark von den ursprünglichen Werten ab, was vermutlich der fehlenden Verkapselung zuzuordnen ist.



**Abbildung 34: Gegenüberstellung der EL Peak Energie mit dem GGI Verhältnis vom RFA von beiden Versuchsgruppen.**

Aufgrund der Diskrepanz wurde die Methode bei MCT/NSE im weiteren Projektverlauf nicht weiter verfolgt und zurückgestellt.

## Beitrag UOL

### 2.1.4.3. Einfluss des Abätzens der ZnO-Schicht auf die Photolumineszenz

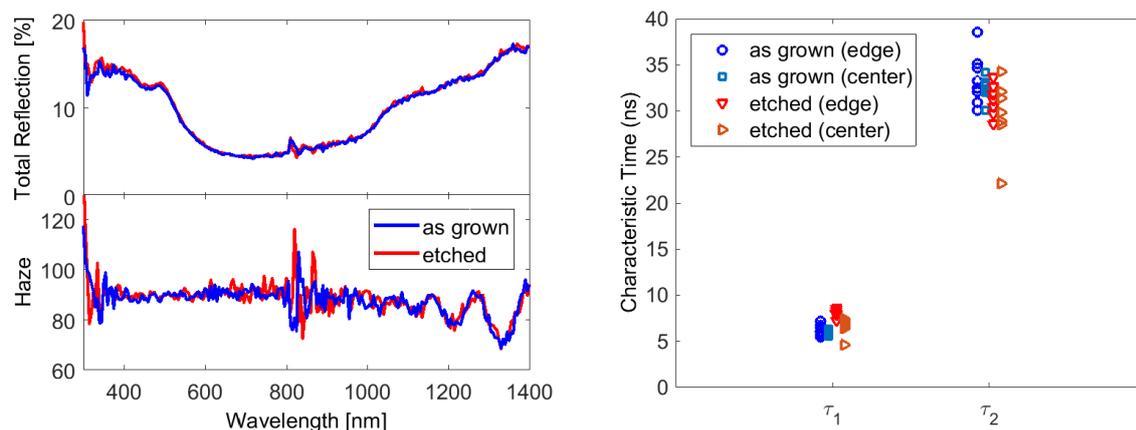
Für Messungen der Photolumineszenz (PL) von CIGSe-Absorbermaterial bietet es sich an, nur den Schichtstapel Mo/CIGSe/CdS anstelle der gesamten Solarzelle (Mo/CIGSe/CdS/i-ZnO/Al:ZnO) zu betrachten. In der gesamten Solarzelle ist nämlich der PL-Zerfall nach transienter Anregung (TRPL) von der Ladungsträgertrennung am Heterokontakt dominiert. Dies führt zu einem dazu, dass Aussagen über die Rekombinationsdynamik des Absorbers so nur schwer möglich sind, und zum anderen, dass die PL-Ausbeute um 1–2 Größenordnungen niedriger ist, so dass ein sehr viel niedrigeres Signal-Rausch-Verhältnis besteht und eine breitere Variation der Anregungsleistung schwer möglich ist.

<sup>10</sup> M. Bär et al., J. Appl. Phys. 96, 3857-3860 (2004)

Die ZnO-Schichten werden üblicherweise nasschemisch mit einer 5%-igen Essigsäurelösung selektiv entfernt. In der folgenden Untersuchung sollte nun geklärt werden, ob die geätzten Proben sich so verhalten wie solche, bei denen noch kein ZnO aufgebracht worden ist, oder ob es Einflüsse des Ätzprozesses bzw. des ZnO-Depositionsprozesses auf die CdS-Schicht gibt, die im PL-Signal sichtbar sind. Dazu wurden MCT/NSE-Proben, die nur bis zur CdS-Schicht prozessiert wurden, mit nominell gleichen Proben verglichen, die vollständig bis zur Al:ZnO-Schicht prozessiert und anschließend geätzt worden sind.

Die direkte Reflexion von geätzten und bis CdS prozessierten Proben ist identisch (s. Abbildung 35). In der diffusen Reflexion treten jedoch minimale Unterschiede zutage, die auch erklären könnten, warum bereits mit dem Auge leichte Farbunterschiede zwischen den Probentypen zu erkennen sind. Dies deutet auf leichte Variationen in der Oberflächenmorphologie der CdS-Schicht hin. Um diese auf mikroskopischer Skala zu untersuchen, wurden SEM-Aufnahmen beider Probensysteme gemacht, die jedoch keine systematischen Unterschiede zeigen.

Für den Vergleich der zeitaufgelösten PL wurden je acht Stellen auf zwei 10×10 cm<sup>2</sup>-Kacheln von unterschiedlichen Stellen des Moduls (Rand bzw. Mitte) untersucht. PL-Transienten wurden bei 1050 nm (Maximum des PL-Spektrums) bei einer konstanten Anregung von 760 μW auf ca. 3 mm<sup>2</sup> (Pulslänge ~9 ps) und 650 nm aufgenommen. Um die TRPL-Kurven der besseren Vergleichbarkeit halber mittels weniger skalarer Größen zu beschreiben, wurden sie mit einer biexponentiellen Zerfallsfunktion gefittet, da dieser empirische Modellansatz die Daten am besten beschreiben konnte. In Abbildung 35 sind die resultierenden Zerfallskonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  mit der Standardabweichung für alle vier Konfigurationen dargestellt.



**Abbildung 35: Bis CdS prozessierte Proben (blau, Modul 01-141205-00764) vs. mit Essigsäure geätzte Proben (rot, Modul 01-141205-00762). Links: Totale (oben) bzw. diffuse (unten) Reflexionsspektren. Rechts: Statistik der PL-Zerfallskonstanten einer Probe von der Mitte (Position 400/800) und vom Rand (Position 100/800) des Moduls.**

Zunächst ist kein deutlicher Unterschied zwischen Proben vom Rand (Quadrate) und Proben von der Mitte des Moduls (Kreise) zu erkennen. Ebensovienig gibt es signifikante Abweichungen zwischen den geätzten (rötlich) und den bis CdS prozessierten Proben (bläulich).

Leichte Tendenzen lassen sich erkennen: So sind die Zerfallskonstanten  $\tau_1$  der geätzten Proben etwas länger als die der bis CdS prozessierten, wobei dies bei  $\tau_2$  entgegengesetzt ist. Des Weiteren haben bei den geätzten Proben diejenigen vom Rand des Moduls etwas längere  $\tau_1$  als die aus der Mitte. Darüber hinaus sind keine Unterschiede in der PL-Ausbeute zwischen den Probentypen zu erkennen.

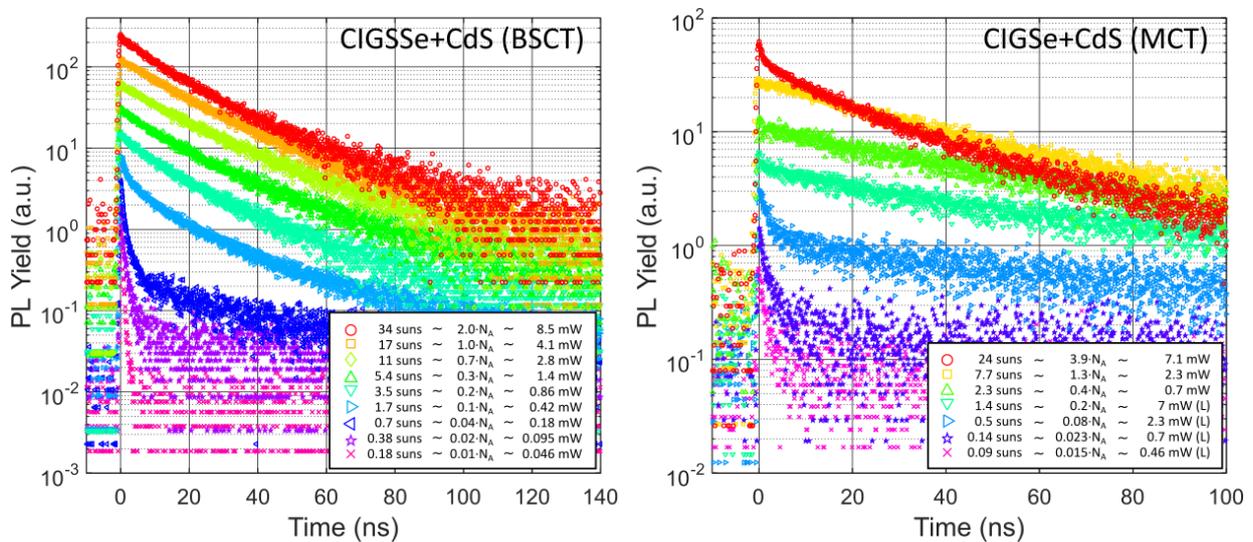
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es zwar minimale Unterschiede zwischen geätzten und bis CdS prozessierten Proben in den optischen Eigenschaften der CdS-Oberfläche gibt, sich die PL-Zerfallskurven zwischen beiden Probentypen jedoch nicht signifikant unterscheiden. Damit scheint das Abätzen der ZnO-Schicht zugunsten eines höheren PL-Signals eine probate Methode, um das Rekombinationsverhalten im Absorber zu untersuchen.

#### **2.1.4.4. Ladungsträgertrennung in der TRPL von CIGSSe-Solarzellen**

Die zeitaufgelöste Photolumineszenz (TPRL) von CIGSSe-Proben hängt wesentlich davon ab, welches Schichtsystem untersucht wird: die gesamte Zelle (CIGSSe+CdS+ZnO), die passivierte Absorberschicht (CIGSSe+CdS) oder die reine Absorberschicht (CIGSSe). Während das TRPL-Signal von reinem und passiviertem Absorber allgemein als identisch und primär bestimmt durch Volumeneigenschaften des Absorbers angesehen wird (z.B. Shirakata 2013, *Phys. Status Solidi A* 210, 1322), wird das TRPL-Signal der gesamten Zelle meist von der Ladungsträgertrennung am Heteroübergang dominiert. Dort werden die photogenerierten Elektronen und Löcher durch die Gradienten ihrer jeweiligen Fermi-Niveaus (in erster Linie ist dies das elektrische Feld am Heteroübergang) in unterschiedliche Richtungen aus der Raumladungszone getrieben und stehen dann für die strahlende Rekombination nicht mehr zur Verfügung (Würfel et al. 2015, *IEEE Journal of Photovoltaics* 5, 461). Dies äußert sich in der transienten PL-Messung als schneller Abfall des PL-Signals, zumindest bei niedrigen bis mittleren Anregungsdichten (bezogen auf die Dotierkonzentration  $N_A$ ). Zu hohen Anregungsdichten ( $\Delta n > N_A$ ) wird das elektrische Feld mehr und mehr durch die generierten Ladungsträger abgeschirmt, so dass der PL-Zerfall sich dem des reinen Absorbers annähert (Metzger et al. 2009, *Thin Solid Films* 517, 2360).

Die Voraussetzungen für Ladungsträgertrennung (Gradienten der Quasi-Fermi-Niveaus am Heteroübergang sowie die angrenzenden selektiv Löcher- bzw. Elektronen-leitenden Schichten) sind jedoch nicht nur in der vollständigen Zelle, sondern grundsätzlich auch im CdS-passivierten Absorber gegeben, wenn auch in schwächerer Form. Das Ziel des hier beschriebenen Experiments war es, Ladungsträgertrennung auch im CdS-passivierten Absorber nachzuweisen. Dazu wurde TRPL an je einer Probe der Projektpartner BSCT und MCT/NSE als Funktion der Anregungsdichte untersucht. TRPL wurde sukzessive an der gesamten Zelle, dem passivierten Absorber und dem reinen Absorber gemessen, wobei letztere durch chemisches Ätzen mit Essig- bzw. Salzsäure präpariert wurden. Um möglichst niedrige relative Anregungsdichten  $\Delta n/N_A$  zu erreichen, wurden zum einen die Proben für 15h bei 90°C mit einer Sonne belichtet (light-soaking), um  $N_A$  zu erhöhen; zum anderen wurde die Laseranregung nicht nur durch Neutralfilter, sondern auch durch eine Defokussierung des Strahls abgeschwächt (Reduktion von  $\Delta n$ ).

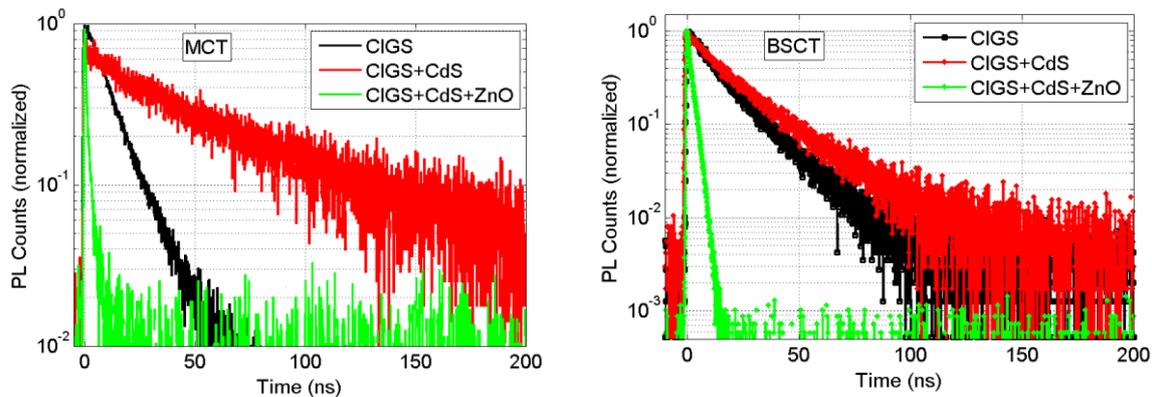
Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 gezeigt. Beide Probentypen zeigen qualitativ dasselbe Verhalten: Bei Anregungsdichten im Bereich von ca. 0.3–1.3  $N_A$  ist der typische, relativ langsame, durch Trapping bestimmte Zerfall (Maiberg et al. 2014, *J. Appl. Phys.* 118, 105701) und keine nennenswerte Abhängigkeit von der Anregungsdichte zu sehen. Bei den niedrigsten Anregungsdichten ( $<0.1 N_A$ ) ist die erste Abklingzeit jedoch deutlich reduziert. Dieses Verhalten tritt im reinen Absorber nicht auf (nicht gezeigt; siehe hierfür: Heise & López Salas 2017, *Thin Solid Films* 633, 35), was dafür spricht, dass die Ursache hierfür in der Ladungsträgertrennung liegt. Bei der höchsten Anregungsdichte wird der PL-Zerfall etwas schneller (dies tritt auch im reinen Absorber auf); Ursachen hierfür könnten lokale Erwärmung und die damit einhergehende Verstärkung von nichtstrahlender Rekombination oder Trapemission sein.



**Abbildung 36: TRPL-Signal als Funktion der Anregungsdichte (farbkodiert) für zwei CdS-beschichtete Absorber aus unterschiedlicher Herstellung (links: BSCT, 377131-P45-Z8; rechts: MCT/NSE, 150923-00270\_150/300, aus: Heise & López Salas 2017, *Thin Solid Films* 633, 35.**

Es lässt sich also festhalten, dass bei zwei verschiedenen Probentypen (sequentieller Prozess bzw. Koevaporation) nicht nur in der gesamten Zelle, sondern auch im CdS-beschichteten, passivierten Absorber erstmals Ladungsträgertrennung im TRPL-Signal nachgewiesen werden konnte. Daraus folgt insbesondere auch, dass die TRPL des CdS-beschichteten Absorbers nicht grundsätzlich mit der des reinen Absorbers identisch ist. Zur Illustration dieses Effekts ist in Abbildung 37 exemplarisch das TRPL-Signal für die zwei Probentypen für die verschiedenen Schichtsysteme bei fester Anregungsdichte dargestellt. Während bei der BSCT-Probe (Abbildung 37 rechts) die CdS-Schicht kaum einen Effekt auf das TRPL-Signal zeigt, tritt bei der MCT/NSE-Probe (Abbildung 37 links) der langsamere Zerfall des PL-Signals des CdS-beschichteten Absorbers im Vergleich zum reinen Absorber besonders deutlich zutage. Zeitaufgelöste Device-Simulationen (s. Heise & López Salas 2017, *Thin Solid Films* 633, 35) zeigen, dass hier nach der zunächst stattfindenden räumlichen Trennung von Elektronen und Löchern, die zum beobachteten steilen Abfall zu Beginn des TRPL-Signals führt, später mit der Abnahme der Überschussladungsträgerkonzentration die in Richtung CdS-Schicht getriebenen Elektronen nach und nach wieder ins Volumen freigesetzt werden, wo sie rekombinieren. Dadurch ist die strahlende Rekombinationsrate effektiv verlangsamt gegenüber der

Situation im reinen Absorber, wo keine Ladungsträgertrennung stattfindet, so dass überall  $\Delta n = \Delta p$  und somit die strahlende Rekombinationsrate ( $R \propto n \cdot p$ ) höher ist.



**Abbildung 37:** Vergleich des TRPL-Signals bei fester Anregungsleistung ( $\approx 2.5$  mW) für das vollständige Zellsystem (grün), die CdS-beschichtete Absorberschicht (rot) und die reine Absorberschicht (schwarz). Links: MCT/NSE-Probe (150923-00270\_150/300). Rechts: BSCT-Probe (377131-P45-Z8).

Diese Untersuchungen zeigen zum einen, dass die aufgrund von Degradationsproblemen gerne vorgenommene Ersetzung von reinen durch passivierte Absorber bei TRPL-Messungen im Einzelfall für die jeweiligen Messbedingungen hinsichtlich ihrer Validität geprüft werden muss. Zum anderen ergibt sich durch die zum Teil massive Beeinflussung des TRPL-Signals durch den Heteroübergang prinzipiell die Möglichkeit, die Eigenschaften des Heteroübergangs wie beispielsweise die Größe des elektrischen Feldes oder das Verhältnis der Dotierkonzentrationen der n- und p-Schichten mittels TRPL zu studieren.

#### 2.1.4.5. Zusammenhang zwischen $V_{oc}$ und PL-Lebensdauer

Damit die kontaktlose Methode der TRPL für die inline-Qualitätskontrolle in Frage kommen kann, ist es notwendig, einen Zusammenhang zwischen aus TRPL-Messungen extrahierten Lebensdauern und Kenngrößen der Solarzelle herstellen zu können. In der Literatur wird zum Teil von einem logarithmischen Zusammenhang zwischen der Leerlaufspannung  $V_{oc}$  und PL-Lebensdauer berichtet (z. B. Repins et al. 2010, *IEEE T. Electron. Dev.* 57, 2957), zum Teil sind die Korrelationen jedoch weniger deutlich (Maiberg et al. 2017, *Thin Solid Films* 633, 208) bzw. negativ (Heise et al. 2017, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 163, 270). Um hier zu einem tieferen Verständnis über den Zusammenhang der beiden Größen zu gelangen, wurde ein Simulationsmodell angepasst an MCT/NSE-Zellmaterial in Sentaurus TCAD implementiert, das in der Lage ist, sowohl stationäre Messungen wie IV und EQE, als auch zeitaufgelöste TRPL-Messungen zu simulieren (López Salas et al. 2017, *J. Appl. Phys.* 122, 203103). Mit Hilfe dieses Simulationswerkzeugs wurden anschließend gezielt einzelne Absorber-Materialparameter variiert und ihr jeweiliger Einfluss auf die  $V_{oc}$  bzw. die PL-Lebensdauer analysiert. Darüber hinaus geben die Ergebnisse Hinweise darauf, welche Parameter für eine Erhöhung der  $V_{oc}$  bzw. der Lebensdauer in Frage kommen.

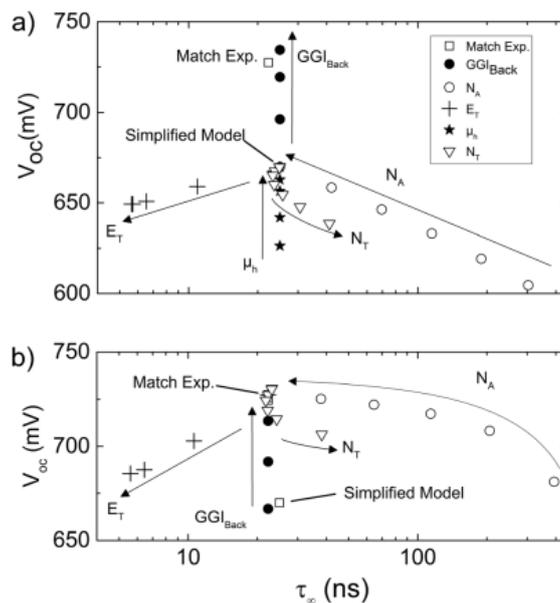
Da das PL-Abklingverhalten im Allgemeinen nicht multiexponentiell ist und somit die häufig zur Beschreibung verwendeten exponentiellen Zeitkonstanten ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ) nicht für alle TRPL-Kurven geeignet

sind, galt es zunächst eine skalare Größe für die Quantifizierung der Lebensdauer aus einer TRPL-Kurve zu ermitteln. Wir betrachten im Folgenden daher den Sättigungswert  $\tau_\infty$  der sogenannten instantanen Lebensdauer

$$\tau_{inst}(t) = \left( \frac{1}{Y_{PL}(t)} \frac{dY_{PL}(t)}{dt} \right)^{-1}.$$

Die Größe  $\tau_{inst}(t)$  gibt im Wesentlichen die Steigung der transienten PL-Ausbeute  $Y_{PL}(t)$  für jeden Zeitpunkt an und stimmt im Falle eines monoexponentiellen Abklingens mit der exponentiellen Abklingkonstante ( $\tau_1$ ) überein. Die Lebensdauer  $\tau_\infty$  wurde definiert als der Wert, dem sich  $\tau_{inst}(t)$  für  $t \rightarrow \infty$  annähert. Dieser Ansatz wurde gewählt, da der vordere Abschnitt der TRPL-Kurve häufig durch Diffusion bzw. Ladungsträgertrennung dominiert ist und daher keine direkte Aussage über die Ladungsträgerlebensdauer erlaubt. Der spätere Abschnitt der TRPL-Kurve ist jedoch im Allgemeinen von der Rekombinationslebensdauer bestimmt, und im analytischen Falle reiner Rekombination stimmt  $\tau_\infty$  mit der Minoritätenlebensdauer überein.

In Abbildung 38 ist die  $V_{OC}$  der Zelle über  $\tau_\infty$  des Absorbers für verschiedene Parametervariationen aufgetragen. Als Startpunkt diente dabei in Teil a) ein idealisierter Absorber ohne Ga-Gradient und ohne Defektniveaus in der Bandlücke.



**Abbildung 38: Zusammenhang zwischen  $V_{OC}$  und  $\tau_\infty$  für Variationen des Galliumgradienten  $GGI$  (0.22...0.5), der effektiven Dotierkonzentration  $N_A$  ( $10^{15}$ ... $2 \cdot 10^{16}$   $cm^{-3}$ ), der Defektdichte  $N_T$  (0... $1.4 \cdot 10^{16}$   $cm^{-3}$ ), der Defektenergie  $E_T$  (94...500 meV) und der Löchermobilität  $\mu_h$  (0.01...5  $cm^2/(Vs)$ ) im Absorber. Der Ausgangspunkt der Variationen ist in a) ein vereinfachtes idealisiertes Modell, in b) ein Parametersatz, mit dem die Simulation IV-, EQE- und TRPL-Messungen abbildet.**

Als Beispiel für einen realistischen Absorber ist ein experimenteller Datensatz in Abbildung 38 eingezeichnet. Um die Effekte auf  $V_{OC}$  zu verstehen, wird im Folgenden die jeweilige Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus (QFN) im Absorber betrachtet (vgl. López Salas et al. 2017, *J. Appl. Phys.* 122, 203103). Mit wachsendem Ga-Gehalt an der Rückseite des Absorbers wird dort auch die Bandlücke

größer, was zu einer Erhöhung der QFN-Aufspaltung und damit auch der  $V_{OC}$  führt. Auf die Lebensdauer  $\tau_{\infty}$  hat der Ga-Gradient aber keinen Einfluss: Eine Variation des Ga-Gradienten ändert das elektrische Feld, das die Elektronen zum Heterokontakt treibt und damit der Diffusion der an der Vorderseite angeregten Überschusselektronen Richtung Rückkontakt entgegenwirkt. Diese Dynamik ist aber nur im ersten Teil des PL-Abklingverhaltens zu sehen und wird daher in  $\tau_{\infty}$  nicht abgebildet. Ganz analoge Ergebnisse erhält man durch eine Reduktion der Löchermobilität  $\mu_h$ .

Eine Variation der p-Dotierkonzentration  $N_A$  im Absorber hat mehrere Effekte: Eine Erhöhung von  $N_A$  hat einerseits eine größere Aufspaltung der QFNs zur Folge, da das Löcher-QFN näher ans Valenzband rückt. Andererseits wird die Raumladungszone reduziert, so dass weniger Ladungsträger eingesammelt werden können, was den Kurzschlussstrom  $J_{SC}$  etwas verringert. Schließlich wird auch die strahlende Lebensdauer verkürzt, da  $\tau = 1/N_A B_r$  (mit  $B_r$  dem strahlenden Rekombinationskoeffizienten). Insgesamt ergibt sich damit eine negative Korrelation zwischen  $V_{OC}$  und  $\tau_{\infty}$ .

Führt man nun ein Defektniveau mit der Dichte  $N_T$  ein, müssen zwei Mechanismen berücksichtigt werden: Zum einen nichtstrahlende SRH-Rekombination über das Defektniveau und zum anderen der Einfang von Elektronen in das Defektniveau mit anschließender Reemission ins Leitungsband (Trapping). SRH-Rekombination verkürzt die Lebensdauer, Trapping hingegen vergrößert  $\tau_{\infty}$ . Da der Einfangsquerschnitt für Löcher kleiner gewählt wurde als der für Elektronen ( $\sigma_e = 10^{-14} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_h = 10^{-15} \text{ cm}^2$ ), sättigt die SRH-Rekombination ab einer Defektkonzentration  $N_T$  von  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  und die Reemission von Elektronen findet verstärkt statt. In beiden Fällen (Rekombination & Trapping) ist jedoch die Elektronendichte im Leitungsband verringert, so dass die Aufspaltung der QFNs und somit die  $V_{OC}$  mit steigendem  $N_T$  kleiner wird. Bei einer Vergrößerung des Abstands des Defektniveaus  $E_T$  vom Leitungsband, wird die Wahrscheinlichkeit für die Reemission von Elektronen geringer und somit die für SRH-Rekombination höher, so dass zum einen  $\tau_{\infty}$  abnimmt und zum anderen die QFN-Aufspaltung und somit die  $V_{OC}$  reduziert wird. Damit ist die Defektenergie  $E_T$  der einzige der hier untersuchten Parameter, der zu der in der Literatur teilweise berichteten logarithmischen Abhängigkeit zwischen  $V_{OC}$  und  $\tau$  führt (man beachte die logarithmische  $\tau_{\infty}$ -Achse in Abbildung 38). Eine solche Abhängigkeit ist allerdings auch als das Ergebnis einer Überlagerung von Variationen verschiedener Parameter denkbar, was die große Streuung in der Korrelation zwischen  $V_{OC}$  und  $\tau$  in der Literatur erklären könnte. Auf der anderen Seite bedeutet dies aber auch, dass in TRPL-Experimenten möglichst der Beitrag der SRH-Rekombination zur Lebensdauer identifiziert werden muss, um von der Lebensdauer auf die  $V_{OC}$  schließen zu können.

Bei einer Änderung des Startpunkts der Parametervariationen auf einen Satz, bei dem die Simulation an experimentelle Ergebnisse von IV, EQE und TRPL-Messungen angepasst war, ergeben sich nur geringe Änderungen im  $V_{OC}(\tau_{\infty})$ -Verhalten (Abbildung 38b). Qualitativ bleiben die ausgehend von einem idealisierten Absorber gefundenen Zusammenhänge gültig und sind somit auf ein breites Spektrum von CIGSe-Materialsystemen anwendbar.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass es viele denkbare Szenarien gibt, in denen eine Vergrößerung von  $V_{OC}$  nicht notwendigerweise mit einer längeren PL-Lebensdauer einhergeht, so dass für eine

Vorhersage der photovoltaischen Absorberqualität aus TRPL-Messungen zumindest der GGI und die Dotierkonzentration separat abgeschätzt werden müssen.

## 2.1.5. Differentielle Analytik (AP4)

### Beitrag FZJ

Wesentliche Teile der Resultate aus diesem Arbeitspaket sind in der Doktorarbeit von Vito Huhn<sup>11</sup> zusammengefasst. Diese wurde Ende Mai an der RWTH Aachen eingereicht.

Schwachpunkt aller bisherigen bildgebenden Analyseverfahren durch Thermographie und Lumineszenz ist die Notwendigkeit von komplexer physikalischer Modellierung oder phänomenologischer Verfahren zur Bewertung der Relevanz für die Leistungsfähigkeit von Solarmodulen. Ein vom FZJ patentiertes Messverfahren beschreibt die Gewinnung und Aufarbeitung von Bildinformation, so dass die lokale Information direkt zur Bewertung der lokalen wie der globalen photovoltaischen Leistungsfähigkeit verwendet werden kann. Diese Verfahren wurden sowohl für die EL als auch für die IR Analyse von Solarmodulen weiterentwickelt und an industriell hergestellten CIGS Mini-Modulen evaluiert.

Zur besseren Übersicht ist dieses Kapitel in die beiden Themen differentielle Lumineszenz Methode und differentielle Thermografie Methode unterteilt. Generell sind Lumineszenzmethoden aufgrund der kurzen Messzeiten und vor allem der weitaus günstigeren Kameras differenziellen Thermografie Methoden überlegen – für Lumineszenz Messungen werden üblicherweise kostengünstige Silizium basierte CCD Sensoren oder wie im Falle der vorliegenden Arbeit eine hochauflösende InGaAs Kamera verwendet. Die Lumineszenz liefert eine Aussage über die lokale Junction-Spannung der Diode und kann somit indirekt zur Bestimmung von Leistungsverlusten beispielsweise verursacht durch parasitäre Serienwiderstände benutzt werden und die Auswirkung von shuntartigen Defekten untersucht werden. Thermografie Messungen eignen sich hingegen vor allem zur Detektion von Defekten (Lokalisation und Intensität).

Die Elektrolumineszenz wird üblicherweise bei konstanter Stromeinprägung gemessen. Durch Anwendung differentieller Messungen – durch Überlagerung eines konstanten Stroms mit einer periodischen Kleinsignal-Modulation, lässt sich durch klassische Lock-In Technik ein differentielles Messsignal an beliebigen Arbeitspunkten, d.h. auch unter Beleuchtung, generieren. Durch diese Kleinsignalanalyse wird die Empfindlichkeit der EL-Technik bedeutend erhöht. Durch geeignete Auswertemethoden lassen sich aus den EL-Bildern quantitative Parameter der photovoltaischen Leistungsfähigkeit gewinnen. Nach Integration dieser Kennzahl über die Modulfläche lässt sich direkt ein Maß für die Fehlerhaftigkeit eines Moduls bestimmen.

---

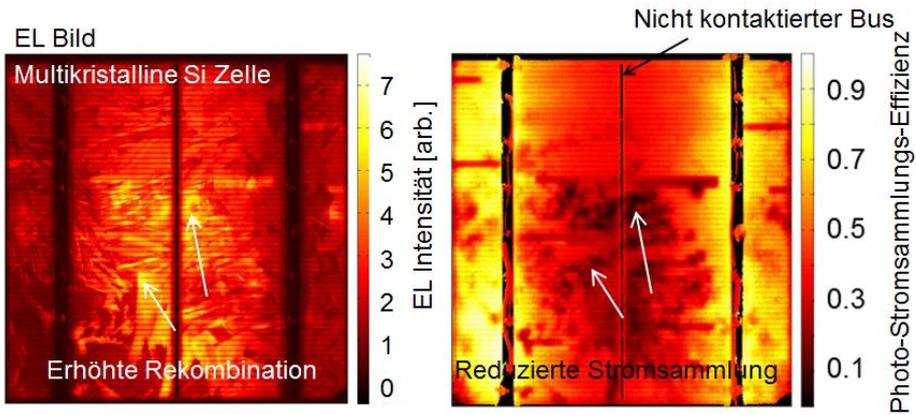
<sup>11</sup> Vito Huhn: "Quantitative Luminescence Imaging of Solar Cells", Doktorarbeit RWTH Aachen, eingereicht im Mai 2018.

Eine ähnliche Argumentation gilt auch für die IR-Messtechnik. Hier wird zwar die Lock-In Technik bereits eingesetzt, das volle Potential kombinierter gepulster und konstanter Anregung an verschiedenen Arbeitspunkten wird bisher allerdings nicht voll ausgeschöpft. Mit einer erweiterten differentiellen Thermografie lassen sich elektrische Leistungsverluste an verschiedenen Arbeitspunkten untersuchen. Mit einer solchen Methode kann die Leistungsfähigkeit eines Moduls unter verschiedenen Beleuchtungsstärken direkt aus den IR-Bildern bewertet werden.

### **2.1.5.1. Differentielle Lumineszenz Analyse: Current Collection Efficiency**

Das entwickelte differentielle Lumineszenzverfahren erlaubt die Bestimmung der lokalen Stromsammlungseffizienz aus einer Serie von Lumineszenz-Messungen. Das hier zugrunde liegende Mess- und Analyseverfahren wird im Folgenden verkürzt dargestellt.

Die Stromsammlung  $f_{PC}$  gibt an, wie effektiv ein an einer Stelle  $(x_0, y_0)$  generierter Strom zu den Terminals (Kontakten) geleitet wird und ist damit ein direktes und bewertbares Maß für die Güte einer Solarzelle. Das Verfahren beruht auf der Erstellung und Differenzen- und Quotienten-Bildung mehrerer PL Bilder einer Solarzelle an unterschiedlichen Arbeitspunkten. Abbildung 39 zeigt schematisch die Berechnung eines Stromsammlungsbildes aus PL-Einzelbildern. Die Stromsammlungswahrscheinlichkeit  $f_{PC}$  lässt sich mathematisch als Quotient zweier Differenz-Lumineszenz Bilder, einem Groß- und einem Kleinsignal-Differenzbild darstellen. Das Großsignal-Differenzbild  $L_{cam}$  wird aus dem Lumineszenzbild am Arbeitspunkt  $V_{AP}$  (z.B. *MPP*) und dem Lumineszenzbild bei  $V_{ext}=0V$  (Kurzschluss) gebildet (siehe Diagramm in Abbildung 39 rechts). Das Kleinsignalbild  $I_{cam}$  wird aus zwei Lumineszenzbildern mit einer Kleinsignalspannung oberhalb und unterhalb des Arbeitspunktes *VAP* berechnet. Abbildung 39 links zeigt die PL-Aufnahme einer polykristallinen Silizium Solarzelle am *MPP*. Die Probe wurde über die beiden Kontaktstreifen links und rechts im Bild kontaktiert, man erkennt schwach die Kontaktstifte, die auf den Kontaktstreifen aufliegen. Der Kontaktstreifen in der Mitte wurde nicht kontaktiert. In dem Lumineszenzbild sind deutlich die polykristalline Struktur der Probe, die Korngrenzen, sowie die Kontaktfinger (horizontale laufende dunkle Linien) sichtbar. Die Bereiche mit erhöhter Intensität in der Mitte (markiert mit Pfeilen) zeigen auf Gebiete mit erhöhter Rekombination. In Abbildung 39 rechts ist die berechnete laterale Stromsammlungseffizienz  $f$  der gleichen Probe am *MPP* gezeigt. Durch die Quotienten-Bildung verschwinden die polykristallinen Artefakte (Korngrenzen, verschiedene Kristallorientierungen, etc.), da diese offensichtlich keinen Einfluss auf die Stromsammlung haben. Man erkennt aber deutlich die Auswirkung gebrochener Finger und das Nichtkontaktieren des mittleren Kontaktstreifens, denn in diesem Bereich gelangen aufgrund des lateralen Widerstands Ladungen nur unzureichend zu den Kontakten. In der Mitte der Probe (s. Pfeile) sieht man nun, dass eine erhöhte Rekombination von Ladungsträger dazu führt, dass diese nicht zu den Kontakten gelangen und die Sammlungseffizienz in diesem Bereich deutlich erniedrigt ist.

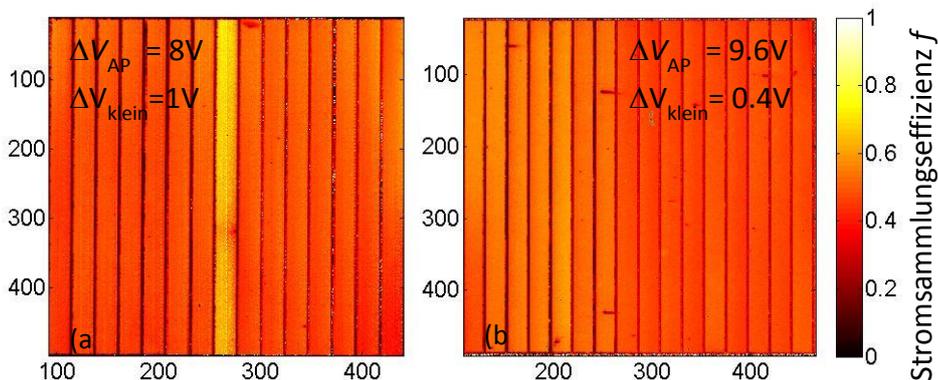


**Abbildung 39: Vergleich zwischen einem EL Bild und einem Photostromsammelungs-Effizienz Bild.**

Das Besondere an dieser neuen Analysemethode ist nun, dass sie nicht nur in sehr kurzer Zeit durchführbar ist, sondern vielmehr ein bewertbares Bild erzeugt, welches auch potentiell automatisiert bewertbar ist (für inline Prozessanalytik).

Die hier skizzierte Methode wurde im ersten Projektjahr erfolgreich auf CIGS Minimodule erweitert und angepasst. Durch die Serienschaltung zu einem Dünnschicht Modul wird die Interpretation der berechneten Stromsammelungs-Effizienz-Bilder allerdings deutlich komplizierter.

Ein Vorteil dieser Methode ist (neben einem bewertbaren Bild), dass sie an beliebigen Arbeitspunkten funktioniert. In Abbildung 40 sind die Stromsammelungs-Bilder einer CIGS Probe an zwei verschiedenen Arbeitspunkten, unterhalb von MPP und am MPP gezeigt. Man erkennt deutlich den Einfluss eines Shunts auf die Stromsammelungs-Effizienz an den beiden gezeigten Arbeitspunkten. Zurzeit wird an der Interpretation dieser berechneten Bilder gearbeitet und der Einfluss einzelner Messgrößen, wie z.B. der Kleinsignalspannung  $\Delta V_{\text{klein}}$  untersucht.



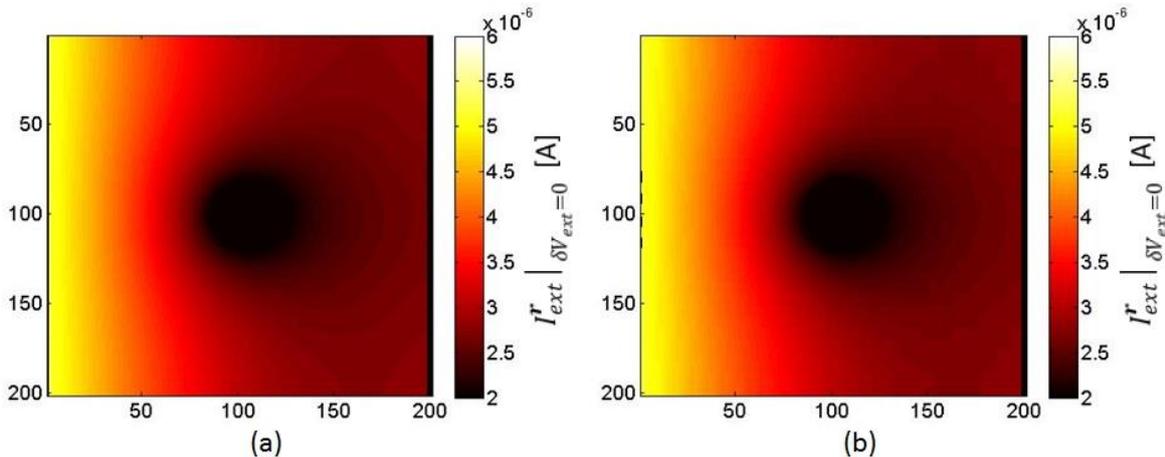
**Abbildung 40: Stromsammelungs-Bilder eines CIGS-Moduls der Firma MCT/NSE bei unterschiedlichen Arbeitspunkten.**

Der Photostromsammelungskoeffizient  $f_{pc}$  kann als  $\delta I_{ext} / \delta I_L^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$  definiert werden. Hierin ist  $\delta I_{ext}$  die externe Änderung des Stroms,  $\delta I_L^r$  die Änderung des lokalen Stroms an der Stelle  $r$ . Es ist

also eine differentielle Größe, die die Änderung des externen Stroms beschreibt, wenn sich der lokale Photostrom ändert. Die Photostromsammlungskoeffizienten können mit Hilfe von differentiellen Lumineszenzmessungen bestimmt werden.

Es gibt nun zwei Ansätze (die sich gegenseitig nicht ausschließen) wie sich der Photostromsammlungskoeffizient auf absolute quantitative Größen ausweiten lässt. Eine Idee ist, dass wenn  $\delta I_L^r$ , also die Änderungen des lokalen Photostroms, lokal sehr eingegrenzt ist,  $\delta I_L^r$  bzw.  $\delta I_{ext}$  immer klein ist und  $\delta V_{ext} = 0$  gilt, egal wie groß die Änderungen der lokalen Photostromdichte ist. D.h. dass die Photostromsammlungskoeffizienten auch die Änderung des externen Stroms beschreiben, nicht nur bei einer Änderungen des lokalen Photostroms, sondern auch dann, wenn man lokal eingegrenzt die Photostromdichte komplett gleich null setzt. Oder anders gesagt, multipliziert man den Photostromsammlungskoeffizienten eines kleinen Ortes mit dem lokalen Photostrom, erhält man genau den Strom, den man verlieren würde, wenn derselbe Ort komplett nicht mehr beleuchtet würde. Wir bezeichnen diesen Parameter mit  $I_{ext}^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$  damit klar ist, dass es der lokal extrahierte Photostrom ist, welcher aber nur für den Fall gilt, dass sich der Rest des Systems nicht ändert.

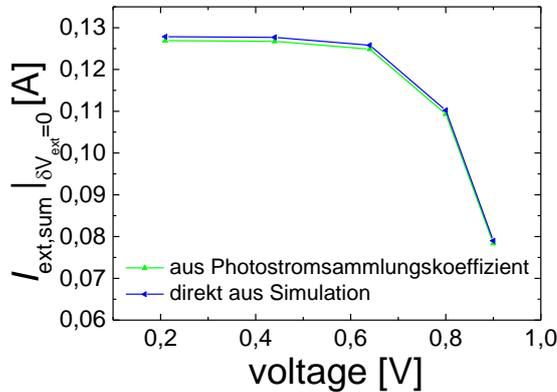
Dies wurde beispielhaft in Abbildung 41 simuliert. Für die Simulationen wurde PVMOS benutzt (welches in AP 7 weiter entwickelt wurde, mehr Informationen findet sich hierzu in der Zusammenfassung von AP7 in diesem Schlussbericht). Für eine  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  große Zelle mit einem Kurzschluss in der Mitte wurden die lokalen Photostromsammlungskoeffizienten aus den Spannungen bestimmt und daraus zusammen mit dem lokalen Photostrom  $I_{ext}^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$  berechnet.



**Abbildung 41:** (a) lokaler Photostromsammlungskoeffizient multipliziert mit dem lokalen Photostrom zur Bestimmung des extrahierten Photostroms. (b) Extrahierter Photostrom von jedem Ort bestimmt indem in der Simulation der Photostrom jedes Ortes zu null gesetzt wird und die Differenz zum ursprünglichen Strom bestimmt wird.

Zusätzlich wurde  $I_{ext}^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$  direkt bestimmt indem für jeden Ort auf der Zelle der Photostrom zu Null gesetzt wurde und die Differenz zum ursprünglichen Strom der Zelle bestimmt wurde. Beide Berechnungsmethoden liefern gleiche Ergebnisse.

Abbildung 42 zeigt die Summe der mit beiden Methoden berechneten lokalen  $I_{ext}^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$  zu  $I_{ext,sum} \big|_{\delta V_{ext}=0}$  aufgetragen gegen die Spannung. Man sieht, dass auch bei unterschiedlichen Spannungen beide Bestimmungsmethoden übereinstimmen.



**Abbildung 42: Summe des extrahierten Photostroms bestimmt aus dem Photostromsammlungskoeffizienten (grün) und direkt aus Simulationen (blau).**

Diese Simulationen unterstreichen die Annahme zur Bedeutung des Photostromsammlungskoeffizienten als absoluten Parameter. Auch wenn die erste Idee dem differentiellen Photostromsammlungskoeffizienten eine absolute Bedeutung gibt, bringt Sie ansonsten keine zusätzlichen Informationen.

Der lokale Photostrom ist im Experiment unbekannt, und so kann der absolute Strom, den man verlieren würde, wenn man eine Stelle nicht mehr beleuchtet nicht berechnet werden. Die zweite Idee nutzt, dass der gesamte gesammelte Photostrom  $I_{ext,total}$  einfach messbar ist, um mit Hilfe des Photostromsammlungskoeffizienten jedem Teil des gesamten Photostroms einen „Ursprungsort“ zuzuordnen. Hierfür machen wir zunächst die Annahme:

$$(1) \quad \sum_r f_{pc,r} * \delta I_L^r = \delta I_{ext,total}$$

D.h. wenn wir annehmen, dass die Änderung des lokalen Photostroms überall gleich ist, beschreibt die Summe aller lokal gemessener Photostromsammlungskoeffizienten das Verhältnis der Beleuchtungsänderung zur Änderung des externen Stroms ( $\sum_r f_{pc,r} = \delta I_{ext,total} / \delta I_L^r$ ). Nun ist die lokale Photostromänderung bei Änderung der Beleuchtung im Experiment unbekannt (auch wenn wir annehmen, dass sie überall ungefähr gleich ist). Sie lässt sich aus der Rechnung folgendermaßen entfernen:

$$(2) \quad \frac{f_{pc,r}}{\sum_r f_{pc,r}} = \frac{\delta I_{ext}}{\delta I_{ext,total}}$$

Und da  $\delta I_{ext,total}$  einfach messbar ist lässt sich somit auch  $\delta I_{ext}$  bestimmen, was die wirkliche Änderung des externen Stroms beschreibt wenn sich lokal die Beleuchtung ändert. Zur Klarstellung:  $\delta I_{ext,total}$  beschreibt die Änderung des externen Stroms, wenn sich die Beleuchtung der kompletten

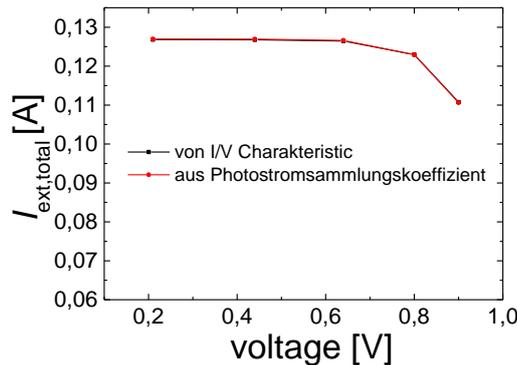
Probe ändert, während  $\delta I_{ext}$  die Änderung des externen Stroms beschreibt wenn sich nur die Beleuchtung lokal ändert (es ist in dem Sinne also eine lokale Größe bzw. eine Größe die einem Ort zugeordnet wird). Man beachte, dass die obigen Überlegungen nur für kleine globale Beleuchtungsänderungen gelten. Denn Annahme 1 gilt nur solange  $f_{pc,r}$  durch die Beleuchtungsänderung wenig beeinflusst wird.

Nun lässt sich also  $\delta I_{ext}$  für unterschiedliche Arbeitspunkte und Beleuchtungsstärken bestimmen. Es liegt nahe, dass es somit auch möglich sein sollte  $I_{ext}$  zu bestimmen, d.h. den gesamten gesammelten Photostrom der von einem bestimmten Ort auf einem Modul kommt. Dies schafft man in dem man  $\delta I_{ext}$  für verschiedenen Beleuchtungsintensitäten  $l$  zwischen keiner Beleuchtung und dem gewünschten Messpunkt misst und aufaddiert:

$$(3) \quad \sum_l \delta I_{ext,l} = I_{ext}$$

wobei gilt dass  $\sum_r I_{ext} = I_{ext,total}$ . Es lässt sich somit mit Lumineszenzmessungen bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten bestimmen, wieviel Strom eine Region einer Solarzelle zu dem gesamten gesammelten Photostrom beiträgt. Es ist wichtig festzuhalten, dass  $I_{ext,sum} \Big|_{\delta V_{ext}=0}$  in der Regel nicht gleich  $I_{ext,total}$  ist.

Die zweite Idee wurde für dasselbe System wie oben getestet und zwar in dem  $\delta I_{ext,total}$  mit Hilfe von Formel (1) bestimmt wurde und verglichen wurde mit dem  $\delta I_{ext,total}$  welches man direkt aus der  $I/V$  Charakteristik der simulierten Zelle bestimmt. Zusätzlich wurde aus den einzelnen  $\delta I_{ext,total}$  noch  $I_{ext,total}$  bestimmt durch Simulationen bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten. Abbildung 43 zeigt dass  $I_{ext,total}$  bestimmt aus den lokalen Photostromänderungen und des



**Abbildung 43: Gesamter gesammelter Photostrom bestimmt mittels zweier Methoden im Vergleich.**

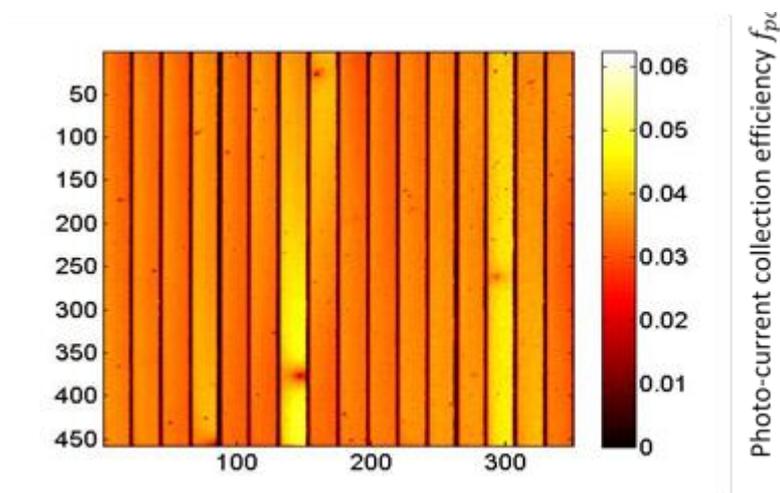
Photostromsammlungskoeffizienten bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten sehr genau dem gesamtem gesammelten Photostrom entspricht, welchen man aus der  $I/V$  Charakteristik entnimmt.

Daher scheint Annahme 1 richtig und der lokale absolute Betrag zum gesammelten Photostrom  $I_{ext}$  sollte mit Hilfe von Formel (2) und (3) auch experimentell bestimmbar sein. Im weiteren Projektverlauf wird diese Methode weiter überprüft und getestet.

Im Folgenden wird der Photostromsammlungskoeffizient anhand eines CIGS Moduls mit Shunt interpretiert. Dazu wird das bisherige Modell um ein quantitatives Modell erweitert. Abbildung 44 zeigt den aus mehreren Lumineszenzaufnahmen an verschiedenen Arbeitspunkten berechneten Photostromsammlungskoeffizienten  $f_{pc}$  (current collection efficiency) eines CIGS Moduls.

Das abgebildete CIGS Modul hat mehrere kleine Shunts, die als dunkle runde Stellen in Erscheinung treten. Diese weisen folgerichtig eine deutlich erniedrigte Stromsammlung auf. Auffällig ist hingegen, dass ein Shunt zur Folge hat, dass die restliche Zelle eine deutlich erhöhte Stromsammlungseffizienz zeigt.

Es stellte sich die Frage warum Zellen mit einem Kurzschluss eine größere Photostromsammlung zeigen als Zellen ohne einen Kurzschluss, wenn sie in einem Modul in Serie verschaltet werden.



**Abbildung 44: Photostromsammlungskoeffizient eines CIGS Minimoduls. Die Zellen mit einem Kurzschluss zeigen eine vergrößerte Photostromsammlung.**

Diesen Effekt kann man erklären, indem man modellhaft annimmt, dass sich der in der kurzgeschlossenen generierte Photostrom aufteilt in Strom  $\delta I_L^{shc}$ , der innerhalb der Zelle rekombiniert, und Strom  $\delta I_{ext}$ , der über alle restlichen Zellen zu den Kontakten fließt und somit gesammelt wird. Das Verhältnis der beiden Ströme ist gleich mit Photostromsammlungskoeffizienten  $f_{PC}$  und kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$(4) \quad \frac{\delta I_{ext}}{\delta I_L^{shc}} = f_{PC} = \frac{1}{1 + \frac{(n-1)r_{nshc}}{r_{shc}}}$$

Hier, beschreibt  $r_{nshc}$  den differentiellen Widerstand der nicht kurzgeschlossenen Zellen und  $r_{shc}$  den differentiellen Widerstand der kurzgeschlossenen Zellen. Die Größe  $n$  beschreibt die Anzahl an Zellen in dem Modul. Nach Formel (4) zeigt der Photostromsammlungskoeffizient einer kurzgeschlossenen Zelle nun verschiedenes Verhalten abhängig von den differentiellen Widerständen der Zellen im Modul, welche wiederum abhängig vom Arbeitspunkt des Moduls sind. Das Verhalten kann in drei Arbeitspunkte Bereiche aufgeteilt werden:

1.  $r_{shc} \ll r_{nshc}$ : Bei niedrigen Spannungen ist der Widerstand der kurzgeschlossenen Zellen deutlich niedriger, als der Widerstand der restlichen Zellen und die Photostromsammlung der kurzgeschlossenen Zelle geht gegen 0.
2.  $r_{shc} > r_{nshc}$ : Steigt die externe Spannung fällt der Widerstand über die nicht kurzgeschlossenen Zellen deutlich schneller als der Widerstand der kurzgeschlossenen Zelle. Der Photostromsammlungskoeffizient der kurzgeschlossenen Zelle wird größer als der Koeffizient der restlichen Zellen in dem Modul wie in Abbildung 44 zu sehen.
3.  $r_{shc} = r_{nshc}$ : Wird die Spannung weiter erhöht gleichen sich die Widerstände der kurzgeschlossenen und nicht kurzgeschlossenen Zellen an und der Photostromsammlungskoeffizient der kurzgeschlossenen Zellen fällt wieder auf das Niveau der restlichen Zellen in dem Modul.

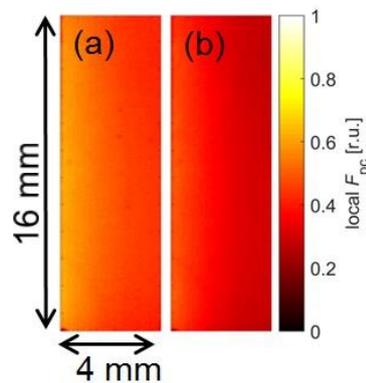
Das Verhalten beschrieben durch Formel (4) wurde zusätzlich mit Simulationen verifiziert. Als nächstes wurde untersucht, inwiefern sich differenzielle Thermographie und Lumineszenzanalyse-Verfahren für orts-aufgelöste quantitative Qualitäts-Bestimmungen eignen. Dabei wurde untersucht, ob sich zusätzliche quantitative Informationen mit Hilfe des sogenannten Photostromsammlungskoeffizienten bestimmen lassen. Der Photostromsammlungskoeffizient  $f_{pc}$  ist definiert als  $\delta I_{ext} / \delta I_L^r \big|_{\delta V_{ext}=0}$ . Es ist also eine differentielle Größe, die die Änderung des externen Stroms beschreibt, wenn sich der lokale Photostrom ändert.

Es wurden Messungen des differentiellen Photostromsammlungskoeffizienten  $f_{pc,loc}$  genutzt um den totalen Photostromsammlungskoeffizienten  $F_{pc,loc}$  lokal aufgelöst zu bestimmen:

$$(5) \quad F_{pc,loc}(\mathbf{r}, \Phi_{exc}, V_{ext}) = \frac{1}{J_{sc}(\Phi_{exc})} \int f_{pc,loc}(\mathbf{r}, \Phi_{exc}, V_{ext}) dJ_{sc}$$

Um  $F_{pc,loc}$  zu bestimmen wird mittels Lumineszenz Messungen zunächst  $f_{pc,loc}$  für den Arbeitspunkt  $V_{ext}$  bestimmt an dem man interessiert ist. Dieser Vorgang wird für verschiedenen Beleuchtungsintensitäten  $\Phi_{exc}$  zwischen 0 und dem Arbeitspunkt an dem man interessiert ist wiederholt um das Integral in Gleichung (4) ausrechnen zu können. Für die experimentellen Messungen ist es besonders wichtig durch eine entsprechende Temperatur Kontrolle die Temperatur der Proben während den verschiedenen Beleuchtungsintensitäten konstant zu halten. Außerdem wird extern die Kurzschlussstromdichte  $J_{sc}$  der Probe unter den verschiedenen Beleuchtungsintensitäten gemessen.

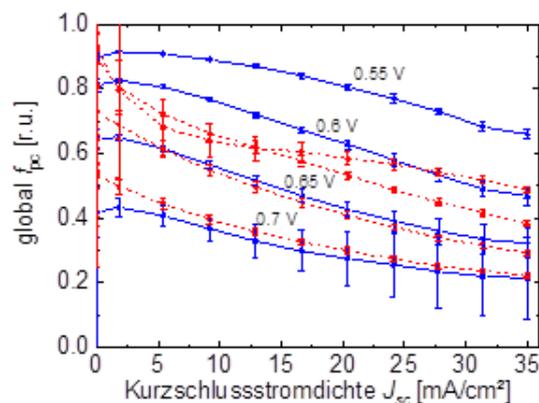
Die Methode wurde getestet in dem der globale differentielle Photostromsammlungskoeffizient jeweils aus Lumineszenz Bildern und aus externen elektrischen Messungen bestimmt wurde. Für die elektrischen Messungen werden die gesamten Stromänderungen der Zelle, welche aus einer Beleuchtungsänderung resultieren, an einem bestimmten Arbeitspunkt  $V_{ext}$  gemessen und geteilt durch die Änderung des Kurzschlussstroms, welche aus derselben Beleuchtungsänderung resultiert. In Abbildung 45 werden beide Messungen verglichen. Bei 0.65 V und 0.7 V liegen beide Messungen nah beieinander. Dies zeigt, dass die neue Methode bei diesen Spannungen gut funktioniert.



**Abbildung 45: Totale Photostromsammlungskoeffizienten Bilder gemessen an einer CIGS Zelle bei verschiedenen Spannungen und einer Beleuchtungsintensität äquivalent zu 1.15 Sonnen. (a) 0,65V, (b) 0,70V**

Jedoch liegen die Resultate bei geringeren Spannungen weiter auseinander. Hier scheint die Methode weniger gut zu funktionieren. Die Gründe dafür konnten mit elektrischen Netzwerk Simulationen nicht nachvollzogen werden. Im Folgenden wird eingegangen auf diese Diskrepanz zwischen dem elektrisch gemessenem Photostromsammlungskoeffizienten  $f_{pc}$  und dem Photostromsammlungs-koeffizienten, der durch Lumineszenz Bildgebung gewonnen wurde.

In Abbildung 46 ist das Verhalten der genannten Koeffizienten abgebildet. Es ist zu sehen wie diese beiden Koeffizienten sich bei kleinen Spannungen unterscheiden, obwohl die Theorie vorhersagt, dass die beiden Messungen äquivalente Ergebnisse liefern sollten. Es konnte durch Simulationen der Solarzelle mit dem Programm SCAPS das Ergebnis qualitativ reproduziert werden. Eine

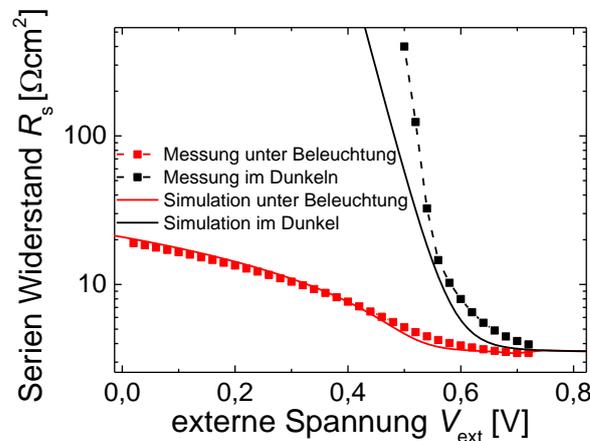


**Abbildung 46: Globaler diff. Photostromsammlungskoeffizient gemessen mit Lumineszenz Messungen (rot) und externe Strom Messungen (blau) bei verschiedenen Spannungen und Beleuchtungsintensitäten.**

weiterführende Analyse hat ergeben, dass sich die Diskrepanz vermutlich durch den Transport der Ladungsträger durch die CIGS Solarzelle erklären lässt.

Aufgrund der geringeren Mobilität und Ladungsträgerdichte im Hauptteil der Solarzelle erscheinen diese Transporteigenschaften wie ein Widerstand, der von dem Arbeitspunkt der Solarzelle abhängig

ist. Diese Abhängigkeit konnte experimentell mittels Lumineszenz Messungen und in der Simulation gezeigt werden (s. Abbildung 47).



**Abbildung 47: Arbeitspunkt Abhängigkeit des Serien Widerstandes einer CIGS Solarzelle.**

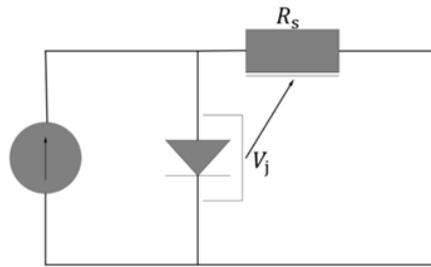
Des Weiteren wurde im Projektzeitraum auch mathematisch gezeigt, dass die Formel  $f_{pc} = \frac{\delta I_T}{\delta I_L(x,y)} \Big|_{\delta V_T=0} = \frac{\delta V_j(x,y)}{\delta V_T} \Big|_{\delta I_L=0}$ , welche in [Wong]<sup>12</sup> hergeleitet wurde und Grundlage der Bestimmung des Photostromsammlungskoeffizienten ist, so nicht mehr gilt wenn ein Serienwiderstand, welcher sich mit dem Arbeitspunkt der Solarzelle ändert, das Verhalten der Solarzelle dominiert.

Somit liefert die untersuchte Methode zur lokal aufgelösten Bestimmung des Photostromsammlungskoeffizienten in CIGS Solarzellen in der genannten Form zumindest bei kleinen Spannungen nicht das gewünschte Ergebnis. Dies trifft auch bei anderen Solarzellen Technologien zu in denen ähnliche Abhängigkeiten der Transporteigenschaften zu erwarten sind, wie z.B. organischen Solarzellen. Nichtsdestotrotz, durch die Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass ein Arbeitspunkt abhängiger Widerstand eine bedeutende Rolle in industriellen CIGS Solarzellen spielt. Er kann nicht nur bildgebende Verfahren, sondern auch die elektrische Leistungsfähigkeit beeinflussen (z.B. könnte so ein Widerstand auch eine Spannungsabhängigkeit des Photostroms erklären). Dadurch trägt das Ergebnis zu einem besseren Verständnis von CIGS Solarzellen bei. Die Resultate aus dieser Arbeit wurden auf der PVSC Konferenz in 2017 vorgestellt<sup>13</sup>. Die Arbeiten zum spannungsabhängigen Serienwiderstand wurden weiter ausgebaut.

Ein Ersatzschaltbild wurde entwickelt, welches die Spannungs- und Beleuchtungsabhängigkeit des Widerstandes beinhaltet. Eine Skizze des Schaltbildes ist in Abbildung 48 dargestellt.

<sup>12</sup> J. Wong and M. A. Green, *Phys. Rev. B* 85, 235205 (2012)

<sup>13</sup> V. Huhn, A. Gerber, B.E. Pieters, U. Rau, *PVSC-44 conference, Washington, (2017)*.



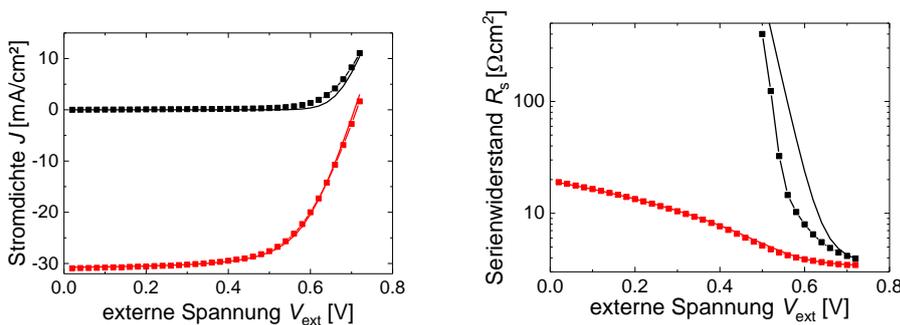
**Abbildung 48: Skizze eines Ersatzschaltbildes, welches die Spannungs- und Beleuchtungsabhängigkeit eines Serienwiderstandes beinhaltet, wie sie im Experiment gefunden wurde.**

Das Schaltbild basiert auf einem normalen 1-Dioden Modell, außer dass der Serienwiderstand  $R_s$  über die folgende Formel von dem Spannung über die Diode ( $V_j$ ) abhängig ist:

$$(6) \quad R_s = R_c + R_0 \exp\left(-\frac{eV_j}{kT}\right)$$

Der Parameter  $R_c$  ist ein konstanter Ohm'scher Serienwiderstand wie er auch in einem normalen 1-Dioden Modell vorhanden ist und  $R_0$  ist ein Parameter, der wesentliche Eigenschaften des Transports durch den CIGS Absorber beinhaltet. Da der Serienwiderstand von  $V_j$  und nicht von der externen Spannung abhängig ist, wird auch die Beleuchtungsabhängigkeit des Serienwiderstandes korrekt wieder gegeben wird. Denn unter Beleuchtung erhöht sich  $V_j$  aufgrund der Existenz des Serienwiderstandes, wodurch wiederum der Serienwiderstand reduziert wird.

Genau dieses Verhalten wurde auch in experimentellen Messungen gesehen. Die Parameter des Ersatzschaltbildes, inklusive  $R_c$  und  $R_0$ , wurden an die experimentellen Messungen angepasst (siehe Abbildung 49). Das Ersatzschaltbild, kann die experimentellen Ergebnisse reproduzieren. Zuvor wurde dies nur mit einem Device Simulator (SCAPS) erreicht.



**Abbildung 49: Experimentelle Messungen (Rechtecke) und Berechnungen mit dem Ersatzschaltbild (Linien) der Strom/Spannungskennlinien (links) und der Spannungsabhängigkeit des Serienwiderstandes (rechts) unter Beleuchtung (rot) und im Dunkeln (Schwarz).**

Der Vorteil, einen spannungsabhängigen Serienwiderstand nun auch mit einem Ersatzschaltbild beschreiben zu können liegt zum einem darin, dass es die mathematische Erklärung von Effekten, die aus einem spannungsabhängigen Serienwiderstand entstehen, vereinfacht. Zum anderen könnte das

Ersatzschaltbild auch in Netzwerksimulationen (PVMOS) zum Einsatz kommen, um Lumineszenz Bilder von CIGS Solarzellen genauer zu simulieren.

### 2.1.5.2. Differentielle Thermografie Methode

Die dissipierte Leistung  $P_{diss}$  eines Moduls oder Zelle kann als Differenz zwischen der absorbierten Leistung  $P_A$  der eingestrahlten Leistung und der an den elektrischen Kontakten extrahierten Leistung  $P_{ext}$  dargestellt werden. Es gilt:

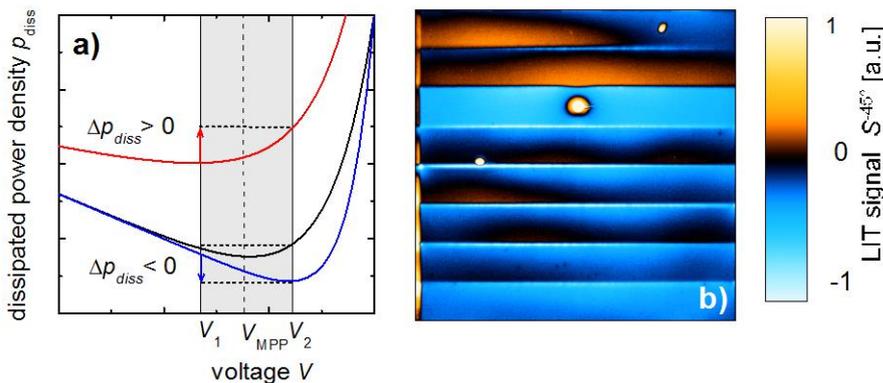
$$(7) \quad P_{diss} = \int_A p(x, y) dx dy = P_A - P_{ext},$$

worin  $p(x, y)$  die lokale Leistungsdicht ist. Hierin sind  $x, y$  Orts-Koordinaten. Gleichung (7) liefert die Basis zur Berechnung der Leistungsverluste einer Solarzelle oder Modul unter relevanten Arbeitsbedingungen (insbesondere Mpp), siehe auch Isenberg und Warta<sup>14</sup>. Durch Anlegen einer kleinen Spannungsvariation  $\Delta V$  an eine Solarzelle oder Modul unter konstanter Beleuchtung und gleichzeitiger konstanter Biasspannung  $V_{dc}$  im maximalen Arbeitspunkt,  $V = V_{MPP}$ , führt zu einer interessanten Signalantwort. Am maximalen Arbeitspunkt gilt unter der Voraussetzung:

$$(8) \quad \left. \frac{d}{dV} P_{ext} \right|_{V_{DC}=V_{MPP}} = - \int_A \left. \frac{d}{dV} p(x, y) dx dy \right|_{V_{DC}=V_{MPP}} \equiv 0.$$

Somit ist das differentielle Signal  $p'(x, y) = dp/dV$  bei  $V_{dc}=V_{MPP}$  entweder überall auf der Probe Null oder besteht aus gleichen Bereichen mit positiven und negativen Anteilen.

Abbildung 50a zeigt schematisch die dissipierte Leistungsdichte  $p_{diss}$  in einem Modul unter Beleuchtung (schwarze Kurve).



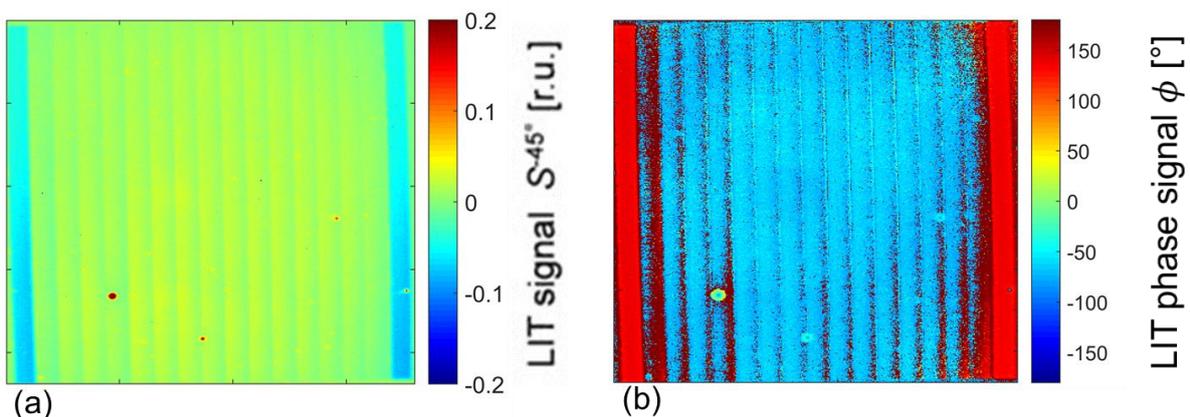
**Abbildung 50: (a) Schematische Darstellung der Leistungsdissipation in Abhängigkeit der Spannung (b) Voltage-moduliertes LIT Bild eines a-Si:H mini-Moduls unter LED Beleuchtung von 450 nm.**

<sup>14</sup> J. Isenberg and W. Warta, Realistic evaluation of power losses in solar cells by using thermographic methods. J. Appl. Phys. 95, (2004)

Das Minimum der dissipierten Leistung  $p_{diss}^{\min} = p_{diss}(V_{MPP})$  liegt am maximalen Arbeitspunkt  $V_{mpp}$ . Stellen wir uns nun ein Kleinsignalspannung um  $V_{mpp}$  vor, mit  $p_{diss}^{avg}(V_1) \approx p_{diss}^{avg}(V_2)$ , dann resultiert ein Differenzbild  $\Delta p_i = p_{diss}^i(V_2) - p_{diss}^i(V_1)$  mit einem negativen Signal  $\Delta p_i$  für ein Pixel  $i$  mit lokalem MPP größer als der Mittelwert (blaue Kurve). Entsprechend erhalten wir ein positives Signal, wenn der lokale MPP an der Stelle  $i$  kleiner ist als der mittlere MPP (rote Kurve).

Abbildung 50b zeigt ein Spannungsmoduliertes LIT Bild eines a-Si:H Mini-Moduls unter Beleuchtung (450nm). Die Kleinspannung beträgt  $\pm 0.5$  V um die MPP Spannung von  $V_{MPP} = 3.8$  V. Wie erwartet erhält man ein positives Signal in Bereichen mit einem Shunt (1., 3., und 4. Zelle von oben). Das Signal in den Zellen 4-7 ist hingegen abgesehen von einigen Abweichungen, die auf resistive Verluste zurückführbar sind, fast null. Die Zellen 1 und 2 zeigen ein positives Signal, und damit ein geringeres  $V_{MPP}$  als im Mittel, die Zellen 3 und 8 zeigen ein negatives Signal (entsprechend ist hier  $V_{MPP}$  lokal größer als im Mittel)

Abbildung 51 zeigt exemplarisch eine differentielle LIT Messung an einem CIGS Modul der Firma MCT/NSE. Hier wurde als Arbeitspunkt wiederum der durchschnittliche  $V_{mpp}$  gewählt. Dieser wurde zuvor aus einer IV Kennlinienmessung unter Beleuchtung bestimmt. Als Modulationsspannung wurde 0,6V verwendet. Abbildung 51a zeigt das  $S^{45^\circ}$  LIT Bild. Die meisten Stellen dieser Probe arbeiten im durchschnittlichen MPP (Pixelwert null), nur die drei kleinen Shunts (rote Punkte) zeigen ein Signal größer null. Die differentielle Kleinsignal Thermografie Methode um  $V_{mpp}$  eignet sich um ein bewertbares Bild eines Solarmoduls oder Zelle zu erstellen. Allerdings ist diese Methode auch sehr empfindlich bezüglich der Homogenität der benutzen Beleuchtung. Aufgrund langer Integrationszeiten (Messdauer) eignet sich diese Methode nicht für eine automatisierte Inline-Qualitätskontrolle.



**Abbildung 51: (a) Spannungsmoduliertes LIT Bild eines MCT/NSE CIGS Moduls am MPP und einer Spannungsmodulation von 0,6V. (b) LIT Phasenbild bei sonst gleichen Einstellungen.**

## **Kurzzusammenfassung der wissenschaftlichen Ergebnisse**

Über die Projektlaufzeit wurden zwei Verfahren entwickelt, die quantitative Beurteilungen von Dünnschicht Solarmodulen erlauben. Die Stromsammelungs-Effizienz gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit an einer Stelle in einem Modul generierten Ladungsträger an den Modulkontakten gesammelt werden. Dadurch lässt sich die Qualität eines Moduls direkt anhand eines Bildes interpretieren.

Detaillierte Untersuchungen insbesondere an Arbeitspunkten mit kleinen Spannungen (unterhalb vom  $V_{mpp}$ ) haben deutliche Unterschiede zur Theorie gezeigt, die sich auf die Auswirkung eines spannungsabhängigen Serienwiderstands (Arbeitspunkt abhängig) zurückführen lassen.

Somit liefert die Methode zur lokal aufgelösten Bestimmung des Photostromsammelungskoeffizienten in CIGS Solarzellen in der genannten Form zumindest bei kleinen Spannungen nicht das gewünschte Ergebnis. Dies trifft auch bei anderen Solarzellen Technologien zu in denen ähnliche Abhängigkeiten der Transporteigenschaften zu erwarten sind, wie z.B. organischen Solarzellen. Nichtsdestotrotz, durch die Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass ein Arbeitspunkt abhängiger Widerstand eine bedeutende Rolle in industriellen CIGS Solarzellen spielt. Dadurch trägt das Ergebnis zu einem besseren Verständnis von CIGS Solarzellen bei.

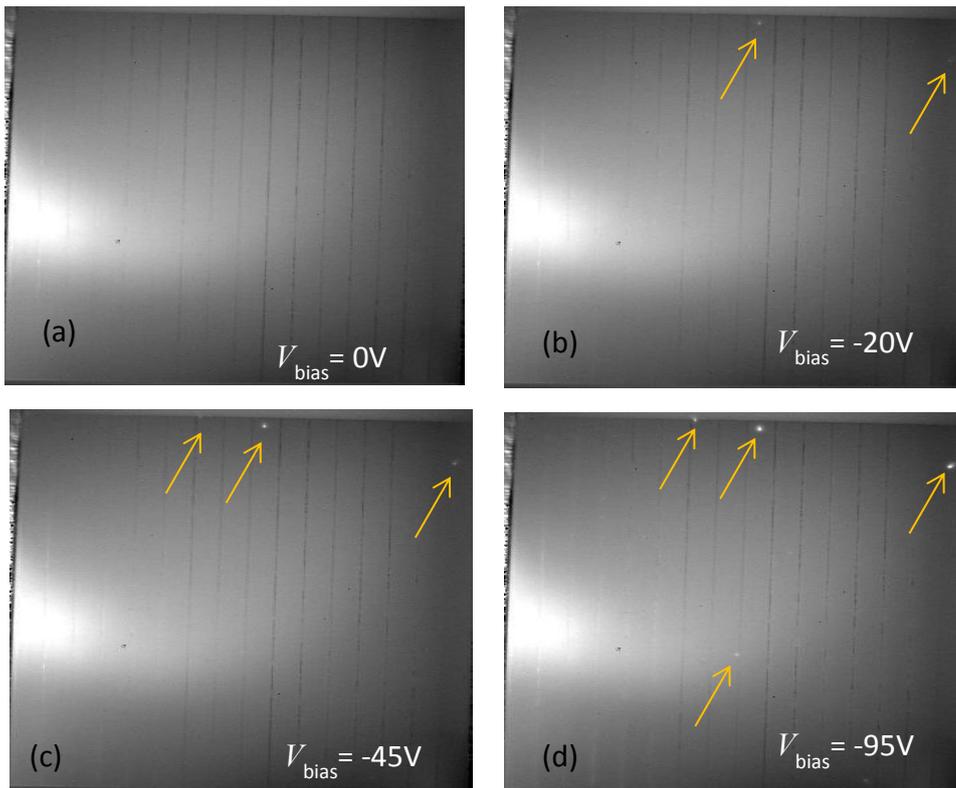
### **2.1.6. Nichtdestruktive Versagensanalytik (AP5)**

#### **Beitrag FZJ:**

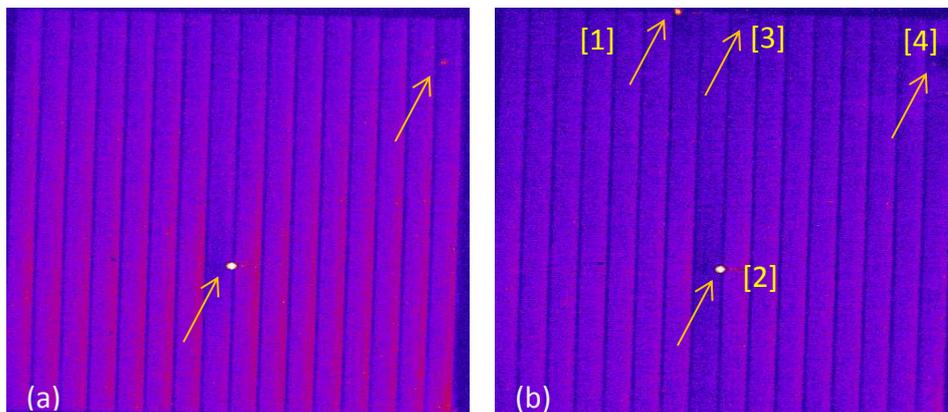
Der lokale nichtreversible Durchbruch unter Rückwärtsspannung ist ein bekannter, praxisrelevanter Versagensmechanismus für alle Arten von photovoltaischen Bauelementen. Das Verständnis dieses Mechanismus für CIGS Solarzellen und -module, insbesondere über den Zusammenhang zwischen Moduleigenschaften und Durchbruchwahrscheinlichkeit, ist noch wenig entwickelt.

Im Arbeitspaket wurden zunächst nichtdestruktive, bildgebende Verfahren entwickelt, die durch Abbildung des Vordurchbruchsverhaltens durch gepulste Thermographie eine Vorhersage über die Stabilität eines Moduls unter Praxisbedingungen ermöglichen sollen. Ziel war es Vordurchbruchstellen reversibel zu detektieren ohne die Stellen dauerhaft zu verändern, um sie weitergehend untersuchen zu können.

Zunächst wurde das Verhalten der CIGS Module mittels DC Thermografie und gepulster Lock-in Thermografie in Rückwärtsrichtung in einem moderaten Spannungsbereich untersucht. Dazu wurde eine Spannungsrampen zwischen 0V und -95V an das Modul angelegt und zeitgleich ein Thermografie Video aufgezeichnet. Abbildung 52 zeigt Einzelbilder bei unterschiedlichen Biasspannungen.



**Abbildung 52: Wärmebild eines CIGS Moduls unter verschiedenen Bias-Spannungen in Rückwärts-Richtung. Erst bei einer Spannung von -20V werden erste Shunts sichtbar (b). Mit steigender Rückwärtsspannung nimmt die Anzahl der Shunts zu (c)-(d).**



**Abbildung 53: Lock-in Thermografie Bild des CIGS Moduls in Vorwärtsrichtung bei  $I = 33 \text{ mA}$ ,  $10 \text{ V}$  (a) vor und (b) nach dem Anlegen der Spannungs-Rampe in rückwärts Richtung.**

Zusätzlich wurden Lock-in Thermografie Untersuchungen der Probe vor dem Anlegen der Rückwärtsspannungsrampe (Abbildung 53 (a)) und nach Anlegen der maximal Spannung von  $V_{\text{bias}} = -95 \text{ V}$  (im Mittel  $5.9 \text{ V}$  pro Zelle) (Abbildung 53 (b)) durchgeführt. Vergleicht man diese Bilder, so ist deutlich erkennbar, dass neue Shunts entstanden sind. Ein Shunt ist auf beiden Bildern mit gleicher

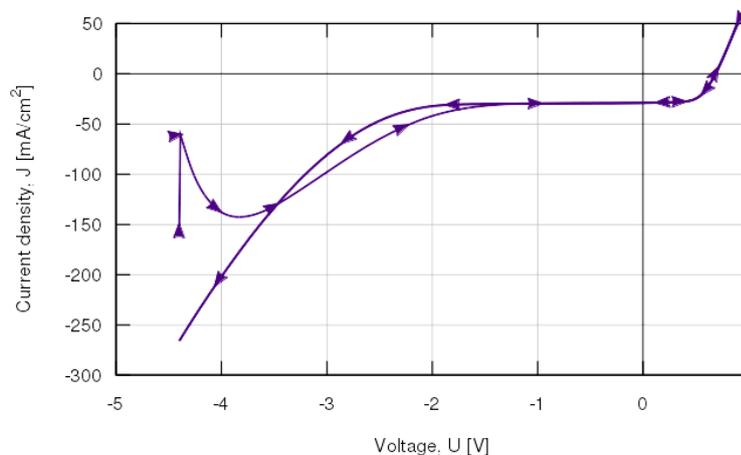
Intensität vorhanden, ein weiterer erscheint in der Intensität schwächer ([4]). Eine Erklärung könnte das sogenannte „Shunt Busting“ sein, welches bei Si-Dünnschicht Solarzellen zum „wegbrennen“ von Shunts genutzt wird. Ein weiterer Shunt ist zwar im Wärmebild bei  $V_{\text{bias}}=-95\text{V}$  gut sichtbar, hingegen nicht in Abbildung 53 (b). Es könnte sich hierbei um eine reversible Vordurchbruchsstelle handeln. Diese ersten Ergebnisse zeigten, dass schon geringe Spannungen ausreichen, um neue Shunts in Modulen zu erzeugen.

### 2.1.6.1. Rückwärtsstrom $J/V$ Charakteristik von MCT/NSE CIGS Zellen

In einer weiteren Studie untersuchten wir elektrische Durchbrüche Rückwärtsrichtung in auf nicht destruktive Weise. Diese wurde an Zellen MCT/NSE CIGS Zellen durchgeführt (Zellgröße  $1,6 \times 0,4 \text{ cm}^2$ ). Um den Einfluss von Metastabilitäten auf die Messungen möglichst gering zu halten, wurden die Proben zuvor durch Anlegen einer positive Spannung von  $0,5\text{V}$  unter AM1.5 Beleuchtung am Sonnensimulator stabilisiert. Während dessen wurde die Stromdichte kontrolliert und gewartet bis die Stromdichtenänderung auf eine Rate unter  $1\%$  pro Minute fällt. Direkt daran anschließend wurden  $J/V$  Kurven in Rückwärtsrichtung gemessen.

Nach einer  $J/V$  Messung wurde der eben beschriebene Stabilisierungsvorgang wiederholt. Mit diesem Vorgehen wollen wir gewährleisten, dass alle Messungen in einem definierten Anfangsstadium beginnen und somit die Messungen vergleichbar sind. Darüber hinaus können wir bei den Stabilisierungsmessungen erkennen, ob bei einer  $J/V$  Messungen in Rückwärtsrichtung die Zelle bereits geschädigt wurde.

In Abbildung 54 sind zwei  $J/V$  Charakteristiken der gleichen CIGS Zelle dargestellt. Die Messungen wurden sowohl von positiven zu negativen, als auch umgekehrt von negativen zu positiven Spannungswerten durchgeführt. Die Pfeile zeigen die Richtung der  $J/V$ -Rampe an. Wir beobachteten eine auffällige Differenz dieser beiden Kurven in der Nähe von  $-3,8\text{V}$ .



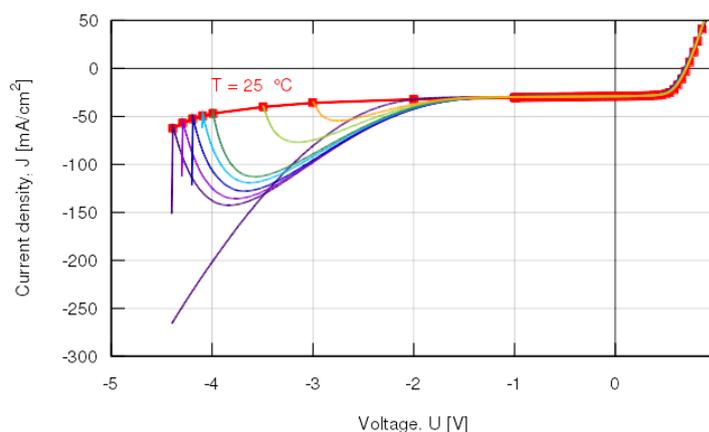
**Abbildung 54:  $J/V$  Charakteristik einer CIGS Zelle in zwei Durchlaufrichtungen. Es wurden dabei auffällige Unterschiede zwischen diesen Kurven beobachtet (Erklärung siehe Text).**

Hier bildet sich in Maximum in Vorwärtsrichtung (sweep-up) aus, jedoch nicht in Rückwärtsrichtung (sweep-down). Ab etwa -1V bis +1V liegen dann beide Kurven übereinander. Zudem ist in Vorwärtsrichtung (sweep-up) zwischen den ersten beiden Messpunkten ein deutlicher Abfall des Stroms zu beobachten. Wir führen dies auf kapazitive Effekte zurück.

Aus der Literatur ist bekannt, dass elektrische Durchbrüche in Rückwärtsrichtung eine starke Temperatur- und Beleuchtungsintensitätsabhängigkeit zeigen. So ist der Temperatur-koeffizient für diese Durchbrüche positiv, d.h. der Rückwärtsstrom steigt mit zunehmender Temperatur. Aus diesem Grunde nehmen wir an, dass die beobachteten Artefakte auf lokale Erwärmung an Durchbruchstellen zurückgehen.

In „sweep-up“ Richtung startet die Messung zwar bei Raumtemperatur (25°C), aber im Verlauf der nächsten Spannungsschritte erwärmen sich Durchbruchstellen und der Strom nimmt zunächst zu, obwohl die Spannung schrittweise reduziert wird. Für den umgekehrten Fall, der „sweep-down“ Richtung startet die Messung zwar ebenfalls bei Raumtemperatur, die Probe erwärmt sich aber gleichmäßig und erreicht eine maximale Temperatur bei der höchsten negativen Spannung. Dabei führen sowohl die betragsmäßige Spannungserhöhung, als auch eine Temperaturerhöhung zu einer Erhöhung der Stromdichte bei. Das Maximum in der sweep-up Richtung lässt sich dadurch verstehen, dass die Probe generell bei einer tieferen Temperatur ist, während die Durchbruchstellen bereits bei einer deutlich höheren Temperatur liegen. Bei positiven Spannungen sehen wir keine Unterschiede zwischen den beiden Kurven was ebenfalls darauf hinweist, dass es sich um einen sehr lokalen Effekt handelt und nicht um ein generelles Erwärmen der Zelle.

Wir wiederholten diese Messungen mit unterschiedlichen Start-End-Spannungen. Auf diesem Wege können wir die Rückwärtskennlinie ohne Einfluss der Temperatur rekonstruieren. In Abbildung 55 sind diese Messungen illustriert.



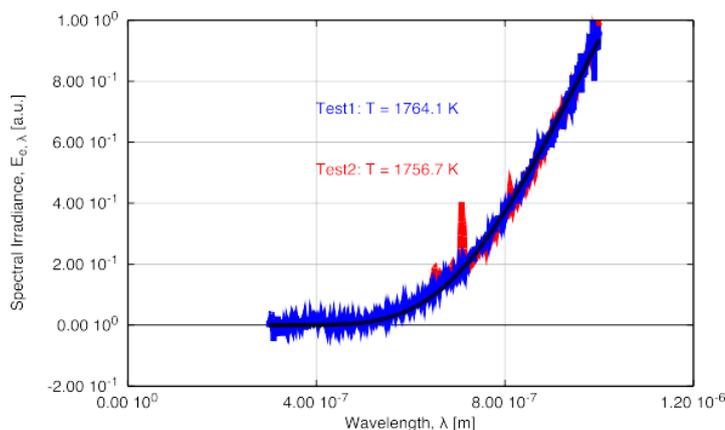
**Abbildung 55: Reverse Bias Messungen bei unterschiedlichen Start- und End-Spannungen. Dadurch kann eine Rückstrom Kennlinien Charakteristik rekonstruiert werden ohne Einfluss von Temperatureffekten während der Messung.**

### 2.1.6.2. Temperatur während der Shuntentstehung

Die Shuntentstehung durch Rückwärtsbestromung kann mit bloßem Auge als rot-weißliches Leuchten wahrgenommen werden. Dies legt nahe, dass bei der Shuntentstehung hohe Temperaturen vorliegen. Durch Messung der Schwarzkörperstrahlung sollte es möglich sein, die Temperatur aus einem Fit an die Emissionskurve zu bestimmen.

Für dieses Experiment benutzen wir ein Substrat mit strukturierten Einzelzellen ( $1,6 \times 0,4 \text{ cm}^2$ ) von MCT/NSE. Die kontaktierte Zelle wurde mit der Rückseite (Molybdänschicht) auf die Einkoppelöffnung der Ulbrichtkugel des Spektrometers (300nm-1200nm) der Firma Instrument Systems gelegt. Das Spektrometer schaut somit durch das Glas direkt auf die Molybdänschicht der CIGS Zelle. Es wurde eine Spannung von -20V für ca. 1 Sekunde angelegt und synchron das Spektrum bei der Entstehung des Defekts gemessen. Anschließend wurde aus einem Fit der Schwarzkörperstrahlung an das gemessene Spektrum die Temperatur während des Durchbruchs bestimmt.

Abbildung 56 zeigt exemplarisch die Messungen zweier Spektren. Die Schwarzkörper-Fits ergeben eine Temperatur während der Defektentstehung von ca. 1760K. Es sei nochmals daran erinnert, dass die Temperatur von der Rückseite der Zelle gemessen wurde, d.h. vom Molybdän Rückseitenkontakt. Dass die beiden bestimmten Temperaturen nur geringfügig unterschiedlich sind, könnte an einem unterliegenden physikalischen Prozess liegen – z.B. ein Schmelz- oder Verdampfungsprozess.



**Abbildung 56: Zwei während der Shuntentstehung gemessene Spektren. Die beiden Spektren sind mehr oder weniger identisch (ein Schwarzkörperstrahlung Fit führt auf ca. 1760K).**

Die Schmelztemperatur für Molybdän beträgt etwa 2896K. Diese ist deutlich höher als die beobachtete Temperatur. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Molybdän nicht signifikant von der Temperatur beeinflusst wird. ZnO hat einen Schmelzpunkt von etwa 2248K und sollte ebenfalls nicht bei den beobachteten Temperaturen schmelzen. Anders sieht dies bei CIGS mit einer Schmelztemperatur von etwas 1260K aus.

Auf Basis der oben beschriebenen Thermal-Runaway Experimente wurde eine Methode zur Detektion von Vordurchbruchstellen entwickelt. Bei der Standard Lock-in Thermografie von Solarzellen werden gepulste Rechtecksignale im Frequenzbereich von wenigen Hertz bis zu 0,1 Hertz

mit einem Duty-cycle von 50% verwendet. Dieses Signal liegt dann je nach Dauer der Messung bis zu einigen zehn Minuten an.

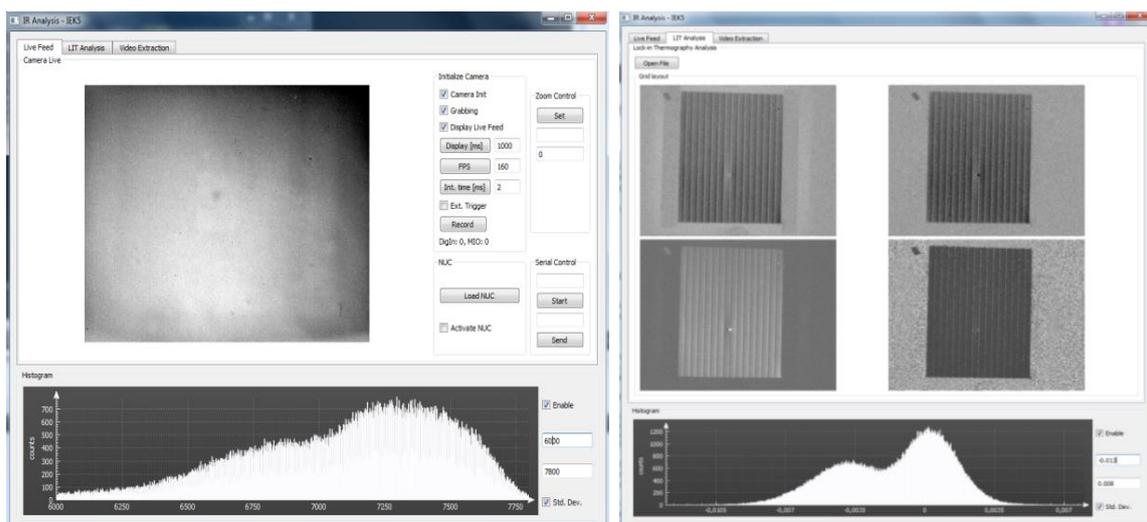
In den Experimenten zur elektrischen Charakterisierung des Durchbruchs wurde in der sweep-up Richtung die Auswirkung eines Thermal Runaway Effekts beobachtet (siehe Abbildung 55). Durch Anwendung sehr kurzer Spannungspulse soll nun ein solcher Thermal-Runaway Prozess aktiviert werden, aber durch die kurze Pulsdauer nicht zu einer irreversiblen Schädigung führen. Dazu musste das Thermografiesystem zunächst erweitert werden, da die Systemsoft- und Hardware derartige Ansteuerungen nicht zuließen. Es wurde eine Software entwickelt die Einzelpulse über einen Funktionsgenerators mit nachgeschaltetem Leistungsverstärker (Kepco) an eine Probe anlegt und synchron Einzelbilder mit der Thermografiekamera aufgezeichnet.

Die neu entwickelte Software Ansteuerung und Auswertung erfüllt die folgenden Spezifikationen:

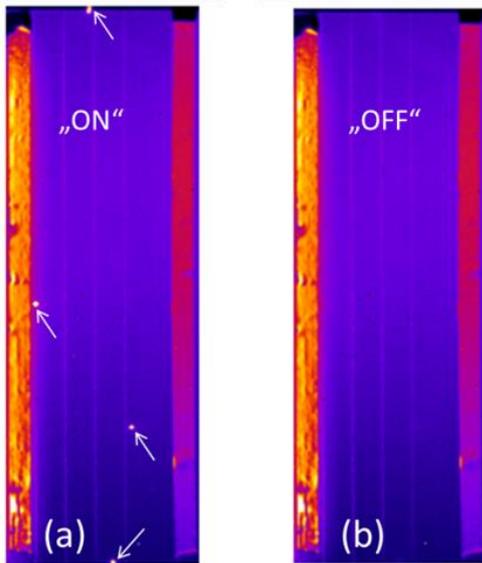
- Direkte Speicherung der Bilder auf Festplatte (keine 2GB RAM Begrenzung)
- Speicherung bis zu 100Mb/s der Daten
- Metadaten der Einzel-Bilder können ausgelesen und weiter verarbeitet werden
- Direkte Verbindungen mit externe Geräte (über GPIB, Serial, VXI)
- Experimentsteuerung durch implementierte Skriptsprache.

Auswertelgorithmen: quasi Lock-in Algorithmus (Differenzbilder: On-OFF Zustände)

Abbildung 57 sind Screenshots der Software gezeigt. In Abbildung 58 ist eine exemplarische reverse Bias Testmessung an einem CIGS Minimodul von MCT/NSE gezeigt.



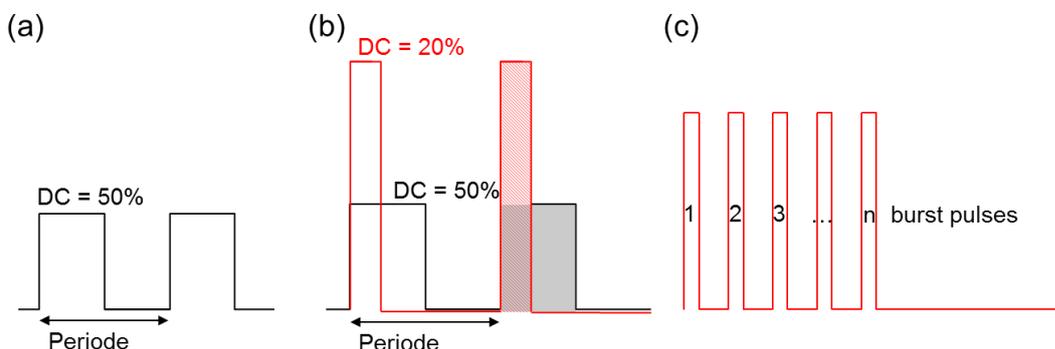
**Abbildung 57: Links: Reiter mit dem Live-Bild und Kameraeinstellungen. Rechts: Lock-In Auswertung mit 0°, 90°, Amplituden und Phasenbild.**



**Abbildung 58: Reverse Bias Puls Experiment.** An ein CIGS Minimodul wurde eine Gesamtspannung von -25V angelegt (entspricht einer Zellspannung von -6.25V). Die Pulsbreite der Anregung betrug 1ms, die Kamerafrequenz 1Hz. Das linke Bild (a) zeigt die Mittelung über viele „On“ Zustände, Bild (b) zeigt die Mittelung über die „OFF“ Zustände.

Die Pulsbreite betrug 1ms, die Kamerafrequenz 1Hz (Integrationszeit 1ms), die angelegte Spannung -25V, entspricht einer Zellspannung von -6.25V. Die Thermografieaufnahme (a) zeigt die Mittelung über viele Einzel-Pulsmessungen (5min) im „ON“ Zustand (-6.25V/Zelle) und (b) die Mittelung über die „OFF“ Zustände (0V). Im Folgenden wurden zahlreiche Experimente mit unterschiedlichen Pulsbreiten durchgeführt und das System soweit erweitert, dass auch Burstpulse verwendet werden können.

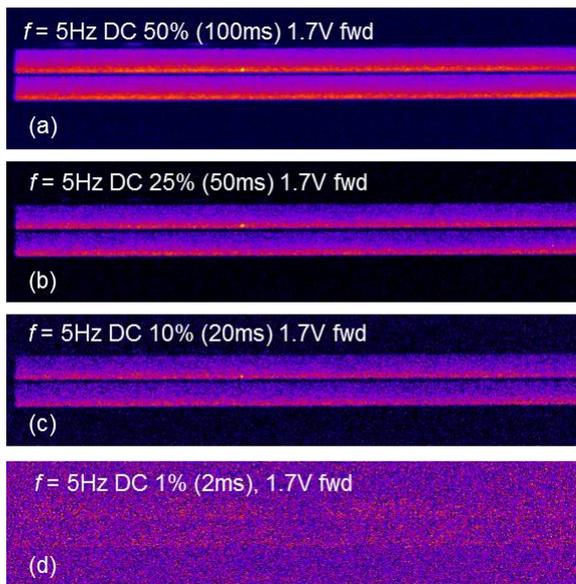
Abbildung 59 zeigt die unterschiedlichen Pulse die als Anregungssignal getestet wurden. Die linke Skizze zeigt den Signalverlauf bei einer Standard Lock-in Thermografie Messung, in der Mitte ist ein Signalverlauf mit einem Dutycycle von 25% bei gleicher Leistung gezeigt (daher höhere Amplitude). Das rechte Bild zeigt Burst Signal mit vielen Kurzpulsen in der „on“ Phase einer Periode.



**Abbildung 59: (a) Anregungssignal bei der Standard Thermografie (Rechtecksignal mit einem DC (Duty Cycle) von 50%). (b) Anregungssignal mit deutlich reduziertem DC Wert (hier 20%). (c) Schematische Darstellung eines Burst Signals.**

Teilweise wurden die Messungen in Zusammenarbeit mit Steve Johnston am NREL (Renewable Energy Laboratory in Golden, Colorado, USA) durchgeführt.

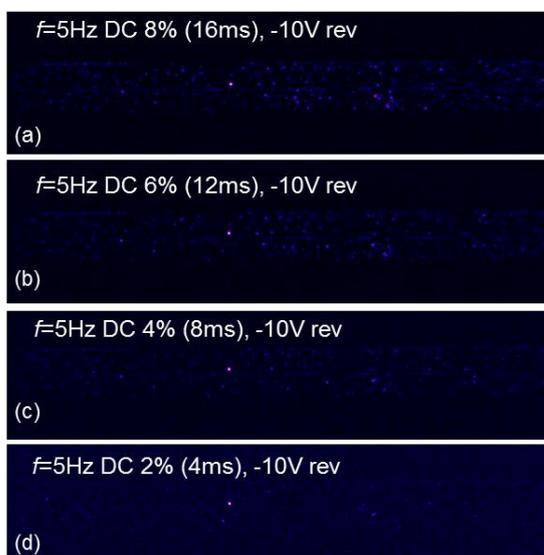
Abbildung 60 zeigt exemplarisch den Einfluss der Pulsbreite des Anregungssignals auf das Signal zu Rauschverhältnis. In diesem Experiment wurde in vorwärts Richtung eine Amplitude von 1,7V bei einer Frequenz von  $f = 5\text{Hz}$  gewählt. Alle Aufnahmen wurden mit der gleichen Integrationszeit



**Abbildung 60: Lockin Thermografie Messungen eines Minimodul ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) mit zwei kontaktierten Zellstreifen in vorwärts Richtung (Erläuterungen siehe Text).**

gemessen. Abbildung 60 zeigt die Standard Lockin Messung mit einem DC von 50%. Abbildung 60b) bis d) wurde der DC auf 1%, entsprechend 2ms Pulsdauer verringert. Diese Messungen machen deutlich, dass bei sehr kleinen Pulsdauern extrem lange Integrationszeiten notwendig werden. Aus diesem Grunde wurde die Burst-Puls-Methode (siehe Abbildung 59) entwickelt.

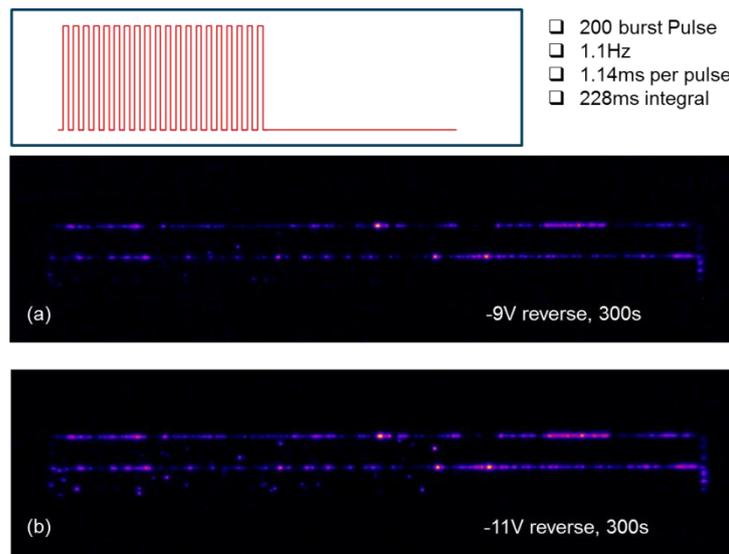
Abbildung 61 zeigt entsprechende Messungen bei unterschiedlichen DC in rückwärts Richtung. Für die Burst Pulsmethode musste das Lockin System am NREL modifiziert werden.



**Abbildung 61: Lockin Thermografie Messungen an einem Minimodul ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) mit zwei kontaktierten Zellstreifen bei einer Spannung von -10V in rückwärts Richtung.**

Das Burst Puls Signal wurde mithilfe eines Funktionsgenerators programmiert und anschließend an einen analogen Leistungsverstärker weitergeleitet (Kepco). Dieser verstärkt das Signal auf die entsprechende gewünschte Spannung (Amplitude). Zusätzlich musste das Kamerasignal und das Burst Signal über einen Systemtrigger synchronisiert werden.

In Abbildung 62 ist eine erfolgreiche quasi Lockin Messung mit einem Burst Signal bestehend aus 200 Pulsen mit einer Pulsbreite von ja ca. 1ms dargestellt. Die Signalfrequenz betrug 1,1 Hz. Gezeigt sind zwei Aufnahmen bei  $V = -9V$  und  $V = -11V$ .



**Abbildung 62: Realisierung der Burst Puls Methode. In diesem hier gezeigten Experiment wurde an eine CIGS Probe ein Anregungssignal mit einer Frequenz von  $f=1,1\text{Hz}$  und 200 Burst Pulsen angelegt.**

Diese Burst Pulsmethode wurde anschließend in Jülich auf das Thermografie System erfolgreich übertragen. Anschließend wurde die Korrelation zwischen Hotspots in Burst Puls Thermografie-Bildern und tatsächlichen Durchbruchsorten (gemessen über eine Spannungs- bzw. Stromrampe untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass es nicht möglich ist in einem ausreichenden Maße (besser 90%) Durchbruchstellen vorherzusagen. Aus diesem Grunde wurde die Methode während des Projekts nicht offensiv weiterverfolgt. Die Arbeiten hierzu sind allerdings noch nicht abgeschlossen und werden zurzeit in einer statistischen Studie fortgesetzt. Zudem gibt es neue vielversprechende Ansätze, die ebenfalls noch überprüft werden. Die Ergebnisse der Arbeiten können dann allumfassend veröffentlicht werden.

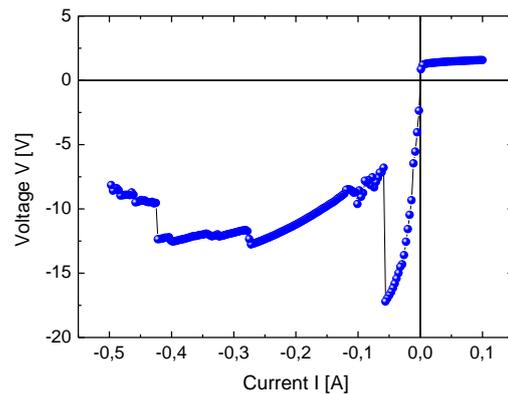
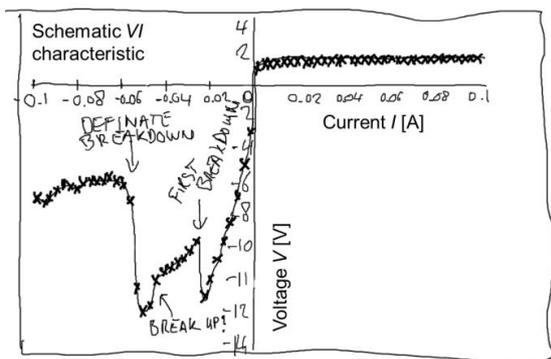
### **2.1.6.3. Untersuchung der Defektentstehung**

In diesem Abschnitt werden die Experimente zur Untersuchung der Defektentstehung durch Rückwärtsbestromung zusammengefasst. Ziel dieser Untersuchung war es zum einen die Orte der Durchbrüche zu lokalisieren, d.h. zu erfassen ob eine statistische Häufung von Durchbrüchen (Shunts) an bestimmten Orten wie Laserlinien, Strukturierungsgräben etc. auftritt. Da insbesondere Teilabschattungen (Abschattungen einzelner bzw. weniger Zellstreifen) zu Shunts führen können, ist

die Strom getriebene Stabilität entscheidend. Entsprechend wurden nicht Spannungs-getriebene  $I(V)$  Kennlinien in Rückwärtsrichtung bis zum Durchbruch analysiert, sondern Strom-getriebene  $V(I)$  Kennlinien.

Während einer Shuntbildung können sehr hohe Temperaturen entstehen, infolge dessen es zu Abdampfungen auch von Cd-haltigen Verbindungen kommen könnte. Aus diesem Grunde wurde aus Vorsichtsmaßnahme in diesem Berichtszeitraum ein Verfahren zur Laminierung von CIGS Minimodulen am IEK5 etabliert. Aufgrund der hohen Temperaturen während der Defektentstehung reicht eine kostengünstige InGaAs Kamera (im Vergleich zu einer In Sb Thermografiekamera) zur Beobachtung der Defekt-Entstehung aus.

Ein Durchbruchexperiment wurde wie folgt durchgeführt: Es wurden jeweils zwei in Serie verschaltete Zellen eines CIGS Minimoduls von MCT/NSE kontaktiert. Anschließend wurde eine Strom-Spannungskennlinie in negativer Stromrichtung gemessen. Parallel dazu wurde mit einer Si-CCD Kamera ein Video aufgezeichnet und später mit der  $V(I)$  Kennlinie abgeglichen.



(a)

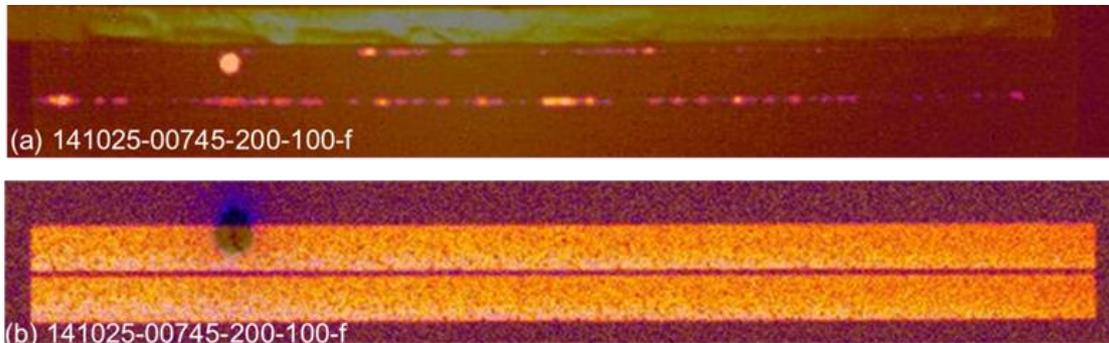
(b)

**Abbildung 63: a) Schematische Darstellung einer typischen „Durchbruch“- $V(I)$  Kurve. (b) zeigt eine typische Durchbruch-Messung an zwei verschalteten Zellstreifen.**

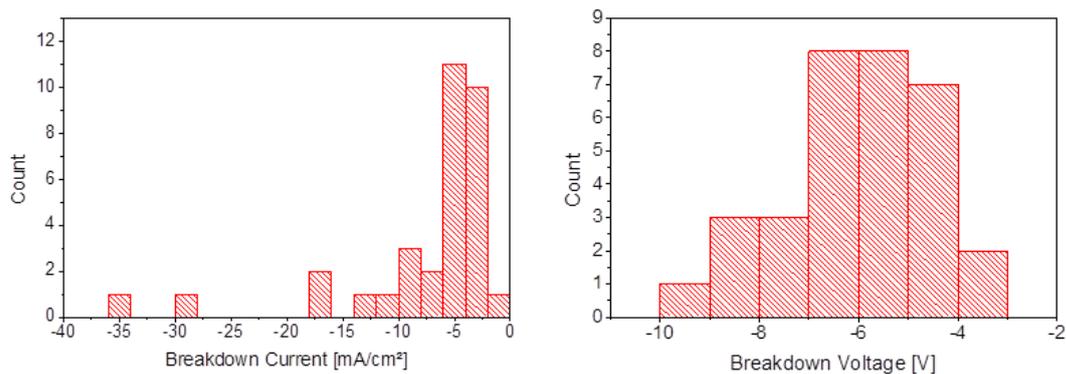
Abbildung 63: a) Schematische Darstellung einer typischen „Durchbruch“- $V(I)$  Kurve. (b) zeigt eine typische Durchbruch-Messung an zwei verschalteten Zellstreifen. (a) zeigt den schematischen Verlauf einer typischen  $I/V$  ( $V(I)$ ) Kennlinie. Bei Erhöhung des Stroms durch einen Zellstreifen erhöht sich die Spannung bis zu einer ersten irreversiblen Veränderung (bezeichnet als „first Breakdown“), die Spannung sinkt abrupt auf ein niedrigeres Niveau. Die maximale Spannung vor dem Durchbruch wird als Durchbruchspannung definiert. Wird der Strom weiter erhöht kann es zu weiteren Durchbrüchen kommen. Abbildung (b) zeigt eine Messung an zwei Zellstreifen.

Abbildung 64 (a) zeigt eine DLIT Aufnahme in Rückwärtsrichtung bei -2V. Zur besseren Interpretation wurde ein optisches Bild über das DLIT Bild gelegt. Dadurch lässt sich die Lage der Shunts besser beurteilen. Abbildung 64 (b) zeigt ein überlagertes EL Bild mit einem Durchbruchbild (aufgenommen während der Stromrampe im Dunkeln). Man erkennt deutlich an welcher Stelle der Durchbruch

stattfindet (großer Shunt in (a)). Die zahlreichen Durchbruchsexperimente wurden statistisch ausgewertet. Dazu wurden sowohl die Kennlinien analysiert, als auch Video Daten ausgewertet. Abbildung 65 zeigt die statistische Analyse der Durchbruchsspannungen und der Durchbruchströme.

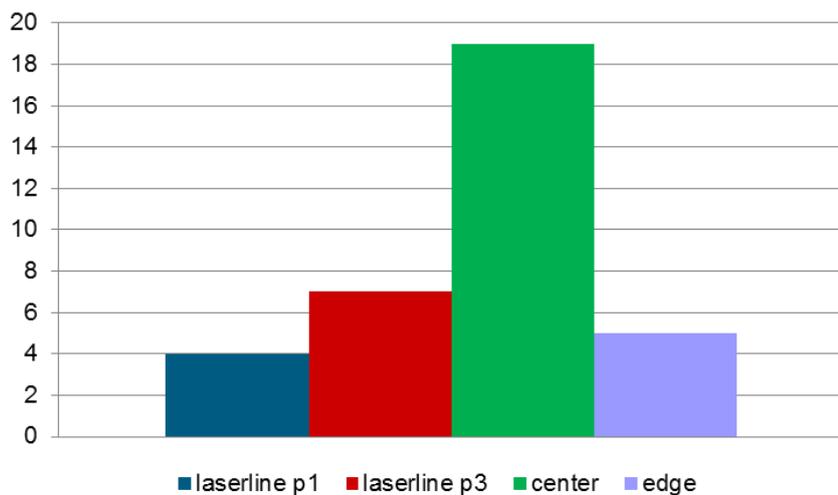


**Abbildung 64:** a) DLIT Bild bei -2V überlagert mit einem optischen Bild. Dadurch lässt sich die Lage der Shunts besser ermitteln. (b) Überlagertes vorwärts EL Bild mit dem Durchbruchbild.



**Abbildung 65:** Auswertung der ersten Durchbruchserie. Es wurden hier die  $V(I)$  Kennlinien ausgewertet. Es sind die Häufigkeiten der Durchbruchströme und - Spannungen aufgetragen.

Die große Standardabweichung des Durchbruchstroms resultiert von Proben, die bereits geshuntete Zellen aufwiesen. Neben den elektrischen Parametern wurde auch der Ort der Durchbrüche analysiert und statistisch ausgewertet. Dabei wurde Durchbrüche an Strukturierungslinien (P1, P2, P3 und Edge) und Zellfläche unterschieden. Abbildung 66 zeigt das Ergebnis dieser Analyse.



**Abbildung 66:** Auftragung der Häufigkeit von Defekten an verschiedenen Positionen innerhalb einer Zelle und Strukturierungslinien (p1, p3). Unter „Center“ sind Defekte (Durchbrüche) gezählt, die innerhalb einer Zelle liegen. „Edge“ sind Durchbrüche, die am kurzen Rand der Zelle liegen, also nicht an den Strukturierungslinien liegen.

#### 2.1.6.4. Analyse aller Durchbruchdatensätze

Es wurden Durchbruchversuche in Rückwärtsrichtungen von verschiedenen Projektpartnern an MCT/NSE Minimodulen oder MCT/NSE Einzelzellen durchgeführt. Dabei wurde auf unterschiedliche Dinge fokussiert. Die Experimente wurden zudem teilweise sehr unterschiedlich durchgeführt. Das FZJ hat alle Daten der Partner analysiert. Die Ergebnisse sind nun hier zusammen gestellt. Es gibt zwei größere Datensätze und einen kleineren (HSU).

Die Daten wurden weiter untersucht mit Methoden der Clusteranalyse. Ziel dieser Analyse ist das Aufdecken von Korrelationen zwischen Modulparametern, Durchbruchspannungen, Strömen, sowie Modulbatches und Position der untersuchten Probe innerhalb eines Modules.

Jülich:

- Stromrampe bis Durchbruch, alle Messungen sind Strom getrieben
- Je 2 in Serien verschaltete Zellen (aus Minimodulen)
- Akkurate Bestimmung von Ort des Durchbruchs Anfang (mit Kamera ermittelt)
- Erfassung des Spannungs-Sprungs, i.e. Größe des Spannungseinbruch im Moment vor dem Durchbruch
- Daten von folgenden Modulen:
  - Modul 0: 01-141025-00745
  - Modul 1: 01-161201-0041
  - Modul 2: 01-161201-0045
  - Modul 3: 01-161201-0049

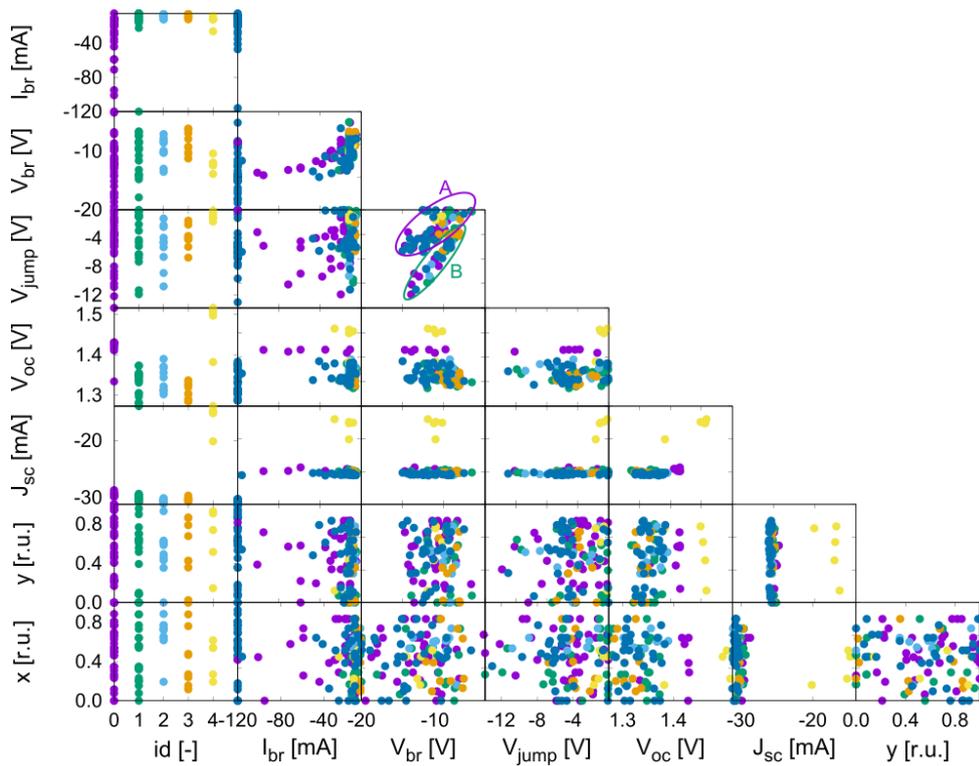
- Modul 4: 01-161201-0058
- Modul 5: 01-170325-00693

UOL:

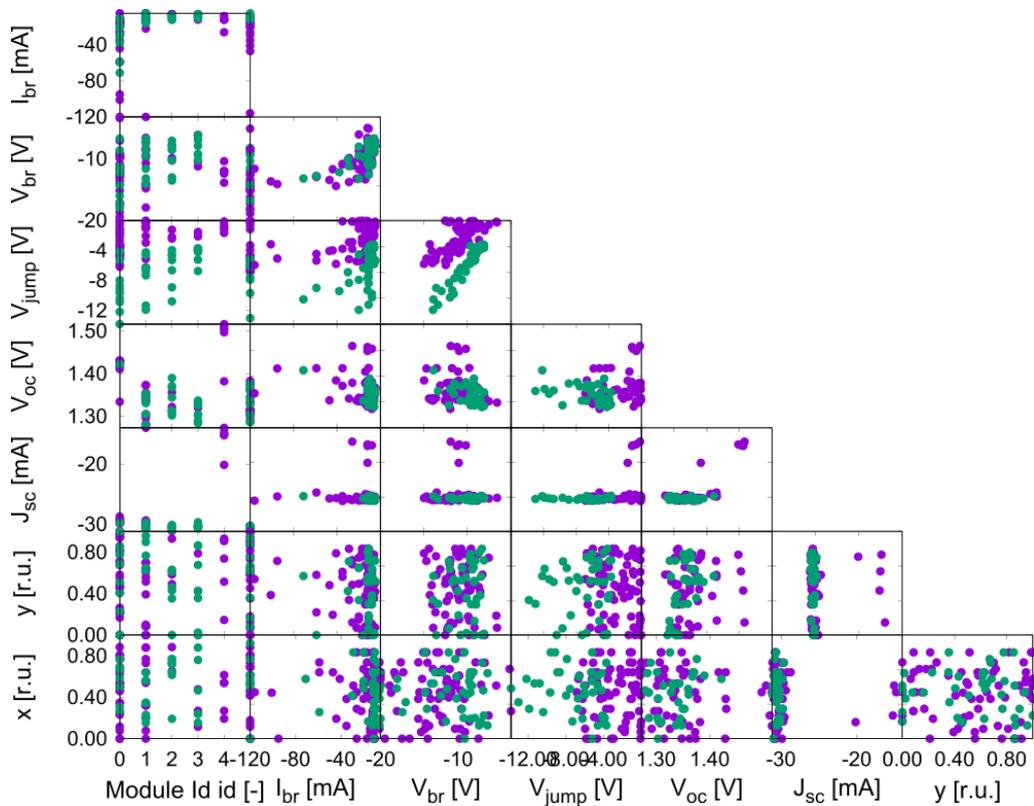
- Strom oder Spannungsrampe bis Durchbruch, sowohl Strom- als Spannungsgetriebe Experimente
- Einzelne, kleine Zellen (0.4x1.6 cm)
- Sowohl im Dunkel als unter Beleuchtung
- Sowohl mit als ohne Prekonditionierung
- Grobe Abschätzung des Durchbruchsortes, am P1, Mitte, oder am P3 (ermittelt nach Ablauf des Experimentes)
- Alle Daten stammen von einem Modul (01-130316-00567)

Abbildung 67 zeigt die Clusteranalyse der in Jülich generierten Daten für die nicht reversiblen Durchbruch Experimente. Die gleiche Analyse wurde auch an Daten der Projektpartner durchgeführt. Die Ergebnisse sind zusammengefasst:

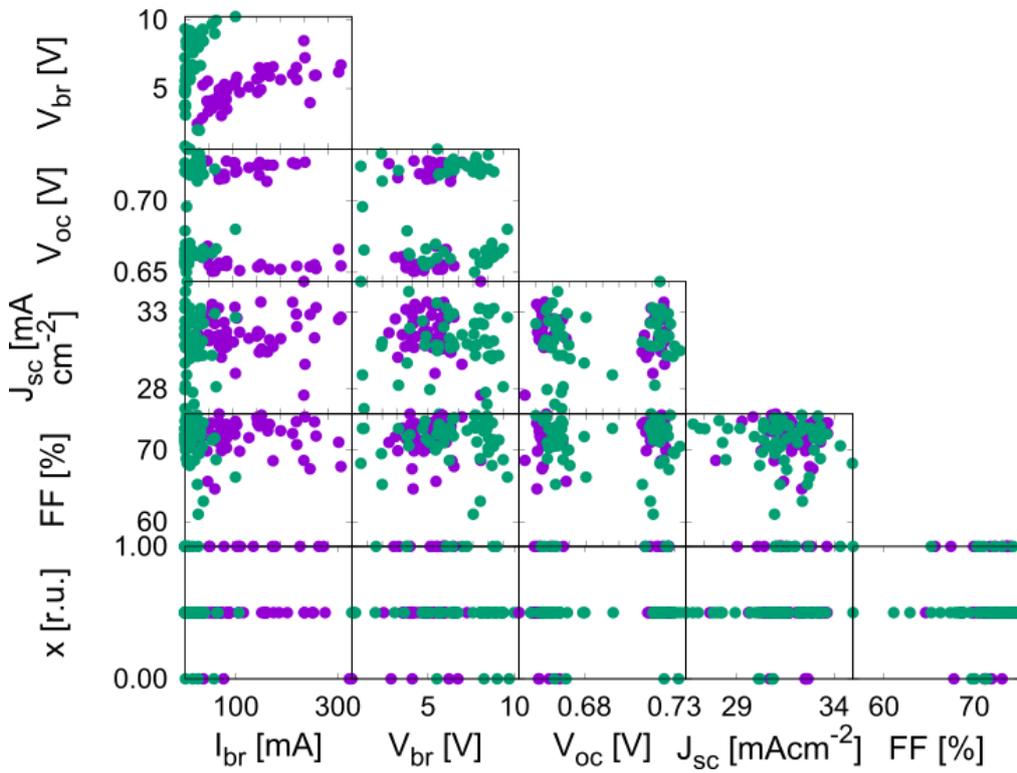
- Es gibt keine Korrelation zwischen dem Ort des Durchbruchs und anderen Durchbruch Parametern
- Die Streuung der Durchbruch-Spannungen und -Ströme ist unterschiedlich für unterschiedliche Module
- Durchbrüche entstehen schon bei relativ kleinen Strömen, die maximalen Ströme liegen bei 100mA (im Dunkeln).
- Der Spannungssprung am Durchbruch ist proportional zur Durchbruchspannung. Interessanter Weise können wir zwei „Cluster“ in diesem Plot identifizieren, allerdings zeigen diese zwei „Klassen“ keine Korrelation mit anderen Durchbruchparametern.
- Wir beobachten kleine Unterschiede zwischen Stromgetriebenen und Spannungsgetriebenen Experimenten.
- Nur kleine Effekte durch Präkonditionierung. Im Dunkeln führt dies zu geringfügig höheren Durchbruchströmen und bei Präkonditionierung im Hellen führt dies zu leicht höheren Durchbruchspannungen.



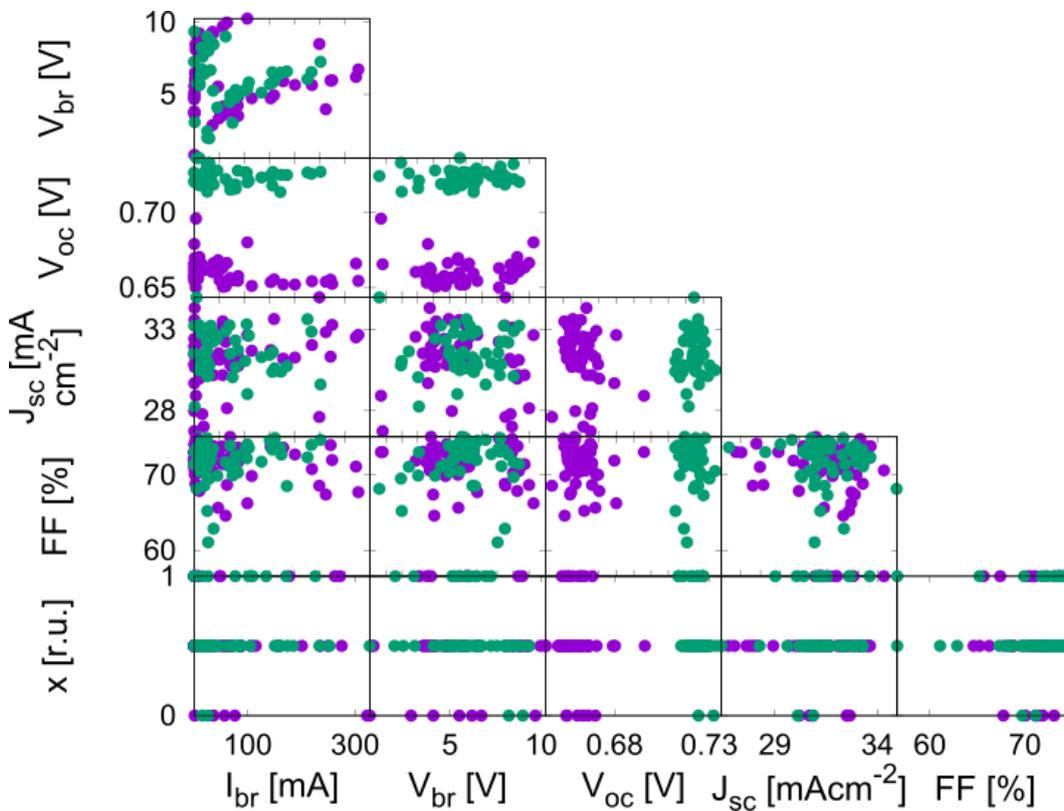
**Abbildung 67: Ergebnis-Plot der Clusteranalyse der FZJ Daten. Die Punkte sind gefärbt nach den Modul IDs.**



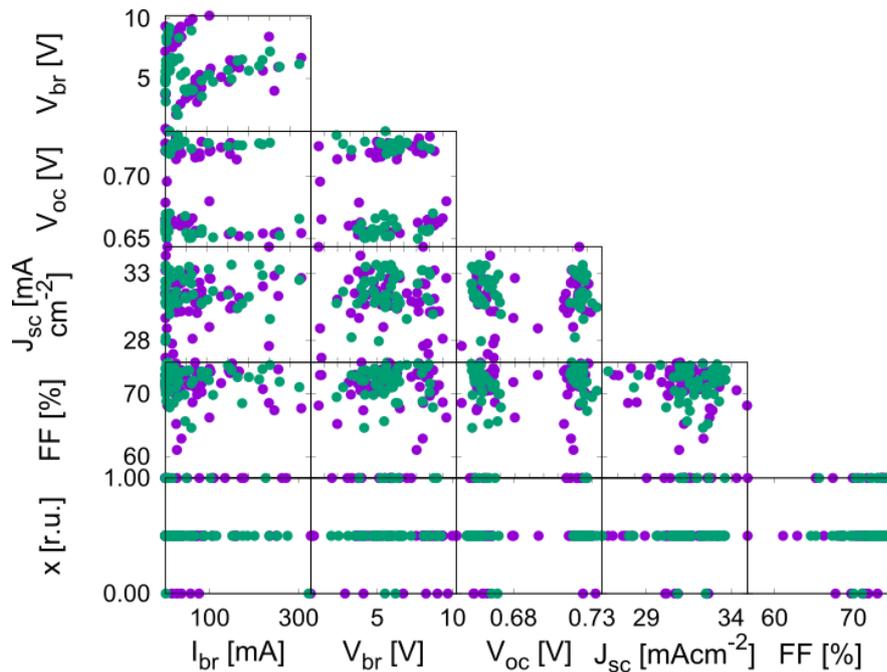
**Abbildung 68: Clusteranalyse der FZJ Daten. Die Datenpunkte aus obiger Abbildung wurden in dieser Auftragsung nach Klasse A und B gefärbt. Man erkennt keine weiteren Korrelationen oder Merkmale.**



**Abbildung 69: Analyse UO Daten: Hier sind die Punkte gefärbt nach Durchbruchexperimente im Dunkeln (grün) und unter Beleuchtung (lila).**



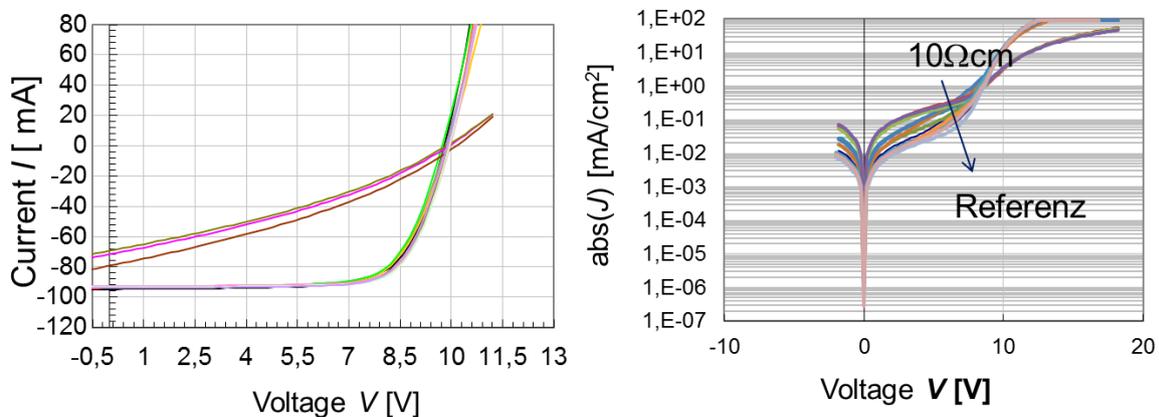
**Abbildung 70: Datenanalyse der UO Daten: Sortierung grün mit und lila ohne Vorkonditionierung.**



**Abbildung 71: Datenanalyse der UO Daten:** Hier wurde der Plot aufgeteilt in Strom- (grün) und Spannunggetrieben (lila) Punkte.

### 2.1.6.5. Erhöhung der Durchbruchstabilität

Eine Möglichkeit die Durchbruchstabilität zu beeinflussen besteht in der Variation des Molybdän Widerstands des Rückseitenkontakts. Dies wurde zuvor durch Simulationen in PVMOS untersucht. Um den Einfluss durch ein Experiment zu bestätigen, wurden von MCT/NSE spezielle Proben mit unterschiedlichen Molybdänwiderständen hergestellt. Abbildung 72 zeigt die Probeneigenschaften. Im linken Diagramm sind die Hellkennlinien gezeigt, im rechten Diagramm die entsprechenden Dunkelkennlinien. Siehe hierzu auch die Arbeiten in Arbeitspaket 7, Simulationen und Modellierungen.



**Abbildung 72: Dunkelkennlinien der Proben mit unterschiedlichen Molybdän-Schichtwiderständen.**

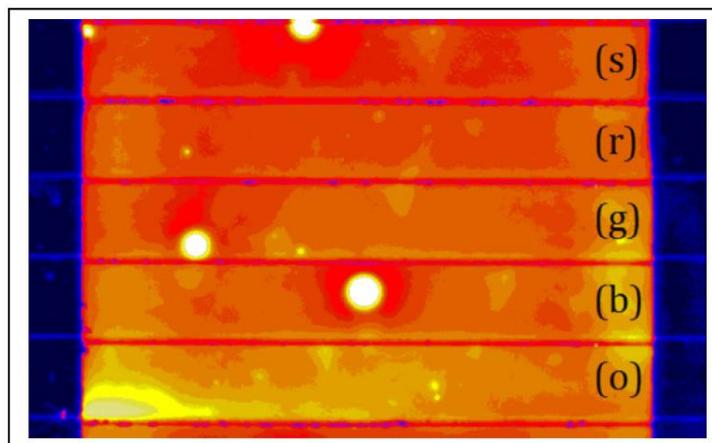
## Zusammenfassung der wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse

Es wurden umfangreiche Arbeiten zum Thema Rückwärtsstabilität von CIGS Solarzellen und Minimodulen durchgeführt. Dabei wurde zunächst ein Verfahren zur Stabilisierung der Proben und eine einheitliche Vorgehensweise bei der Durchbruchanalyse entwickelt. Die im Projekt untersuchten Proben zeigen einen kritischen Durchbruchstrom in der Größenordnung des Kurzschlussstroms  $I_{sc}$ . Eine Clusteranalyse hat keine Korrelationen mit anderen Versuchsparametern wie  $V_{oc}$  etc. ergeben. Zudem zeigt sich, dass die Durchbrüche vermehrt in der Zelle stattfinden. Im Nachfolgeprojekt OptiCIGSII soll gezielt die kritische Durchbruchstromdichte erhöht werden (z.B. durch Integration einer monolithisch integrierten Bypassdiode).

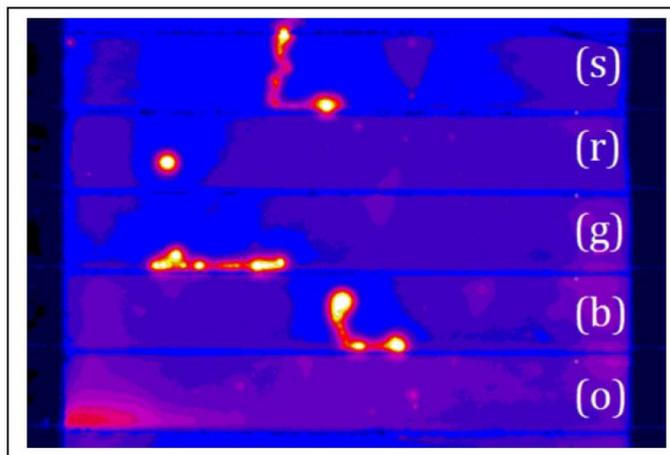
### Beitrag HSU:

Im AP5 adressierte die HSU primär die Korrelation zwischen initialen Shunt-Defekten und dem Ausbilden irreversibler Durchbrüche nach dem Anlegen einer hohen Sperrspannung.

Die HSU ging der Fragestellung nach, ob Durchbrüche aufgrund hoher negativer Spannungen an bereits existierenden Defekten entspringen und sich dann fortpflanzen. Es ist bekannt, dass sich in CIGS-Modulen bei irreversiblen Durchbrüchen aufgrund hoher negativer Spannungen Defekte wurmartig ausbilden, wobei diese „Würmer“ an Strukturierungslinien enden. Um dies zu untersuchen, wurde ein Minimodul mit einigen Shuntdefekten identifiziert und mit ILIT charakterisiert. Abbildung 73 zeigt das Ergebnis dieser Messung, woraus die angesprochenen Shuntdefekte klar erkennbar sind. In einem zweiten Schritt wurden an die einzelnen Zellen so hohe Sperrspannungen angelegt, dass sich die oben beschriebenen wurmartigen Defekte ausbilden konnten. Abbildung 74 zeigt das ILIT-Bild nach dieser Schädigung. Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen ist klar erkennbar, dass die Ursprünge der Würmer mit den bereits vorhandenen Defekten identisch sind (Zellen (s), (g), (b)).



**Abbildung 73 ILIT-Bild vor Schädigung**



**Abbildung 74 ILIT-Bild nach Schädigung**

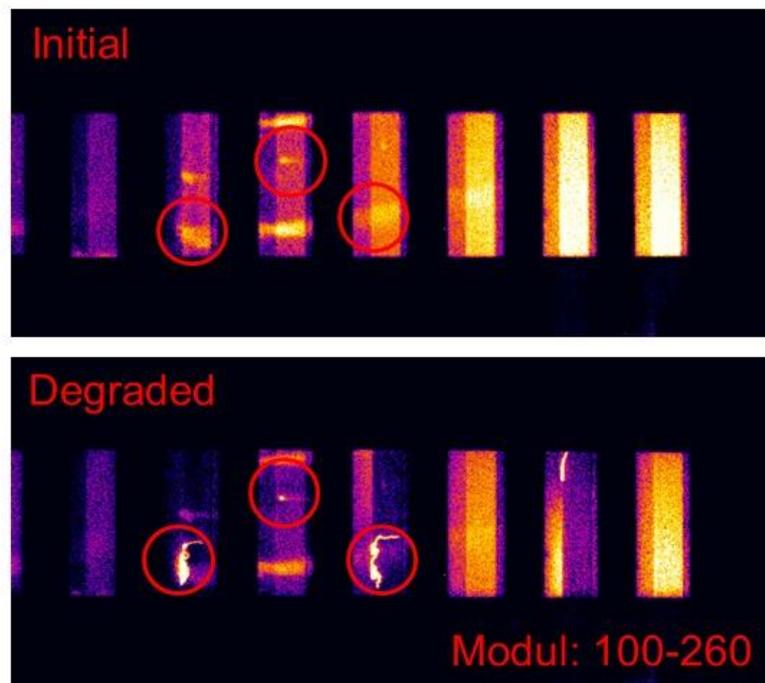
In einer weiteren Messreihe wurden diverse Parameter untersucht, welche das Durchbruchverhalten beeinflussen können. Beispielhaft werden in diesem Bericht Untersuchungen an gekapselten und ungekapselten Zellen insbesondere deren Empfindlichkeit gegenüber negativen Stromrampen dargestellt und diskutiert.

Tabelle 5 zeigt einen Vergleich zwischen ungekapselten und gekapselten Zellen beim Anlegen von Stromrampen mit unterschiedlichen Steilheiten. Bemerkenswert ist die daraus ablesbare Tatsache, dass gekapselte Zellen gegenüber Stromrampen weit weniger empfindlich sind. Dies kann mit einer veränderten Wärmeabfuhr und thermischem „run away“ zusammenhängen. Abschließend lässt sich jedoch über die Hintergründe noch keine Aussage treffen. Diese erhöhte Immunität gekapselter Zellen ließ sich jedoch für Spannungsrampen nicht bestätigen, wobei Spannungsrampen allerdings zu anderen Durchbruchmechanismen führen können. Zentral beim Nachfolgeprojekt sollte dann auch die Klärung der Frage sein, ob Spannungs- oder Stromrampen kritischer sind. Weiterhin ist zu klären, welcher Effekt im Feld auftreten könnte und wodurch eine Immunisierung zu erreichen ist.

**Tabelle 5 Statistik zum Durchbruchverhalten ungekapselter und gekapselter Zellen**

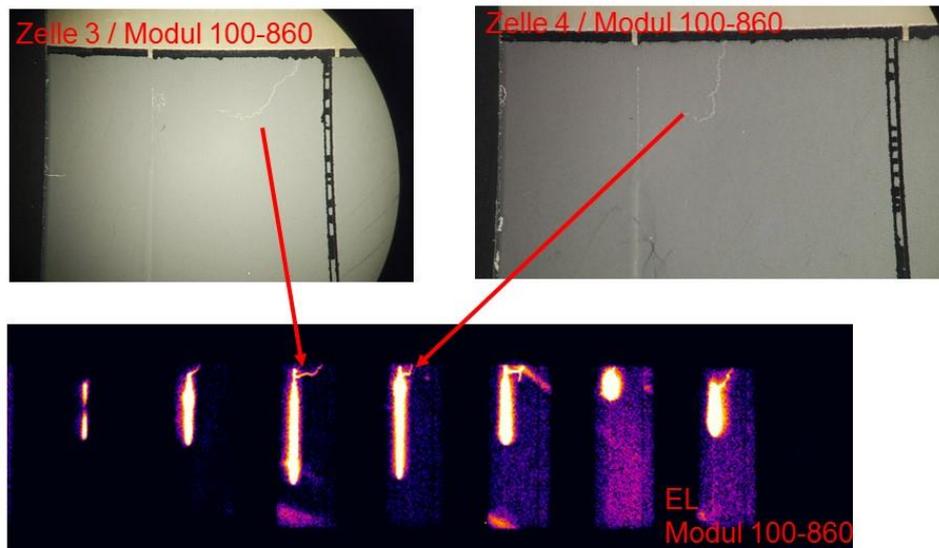
	Ungekapselt	Gekapselt
Stromerhöhung pro Messpunkt [mA]	Anzahl der durchgebrochenen Zellen	
0.1	1	0
0.2	3	0
0.4	4	0
0.8	4	0
1.6	4	0
3.2	3	0
6.4	3	0
Nicht durchgebrochen	8	19
Zellen gesamt	30	19

Ein Ansatzpunkt zum Verständnis irreversibler Durchbrüche ist der Zusammenhang zwischen (Shunt-) Defekten, welche mit DLIT identifiziert und lokalisiert werden können und irreversiblen Durchbrüchen, die sich oft entlang der P1-Strukturierungslinie ausbreiten. Wird die Zelle mit einem Rückwärtsstrom bzw. mit einer Rückwärtsspannung belastet, fließt der gesamte Strom unter Umständen durch diesen Defekt, wobei es durch die hierbei dissipierte Energie zum Aufschmelzen der Schichten kommen kann. Abbildung 75 zeigt DLIT-Bilder vor und nach der Degradation, wobei in diesem Fall Korrelationen zu erkennen sind. Es ist allerdings zu betonen, dass diese „Würmer“ teilweise nicht an vorhandenen und detektierbaren Defekten entstehen.



**Abbildung 75 Vergleich Defekte (DLIT) initial sowie "Wurmbildung" nach der Degradation**

Weitere Untersuchungen sind von daher mit noch größerer Statistik notwendig. Auch könnten Methoden des maschinellen Lernens (z.B. über Support Vector Machine) dazu führen, kritische Parameter und Parameterkombinationen leichter zu identifizieren. In Abbildung 76 ist ein Beispiel gezeigt, bei welchem die „Würmer“ in der Zelle wohl beginnen und dann zu den seitlichen Strukturierungslinien wandern.



**Abbildung 76** Lokalisierung von "Würmern" im DLIT sowie Mikroskopbild

**Fazit:**

Irreversible Durchbrüche nach Anlegen einer negativen Spannung oder eines hohen Sperrstromes beginnen oftmals an initialen Defekten, durch welche dann der gesamte Sperrstrom fließen kann, was aufgrund von Wärmeentwicklung zum Aufschmelzen der Schichten führen kann. Eine eindeutige Korrelation ist jedoch nicht gegeben. Im Nachfolgeprojekt sollen Methoden des maschinellen Lernens angewandt werden, um verborgene Schlüsselparameter für das Durchbruchverhalten identifizieren zu können.

### 2.1.7. Begleitende Detailanalytik (AP6)

Ziel dieses Arbeitspakets war es, ein grundlegendes Verständnis materialbestimmter Verlustmechanismen auf mikroskopischer Ebene zu generieren. Dazu bedurfte es zum einen einer umfangreichen Grundcharakterisierung der relevanten physikalischen Eigenschaften der untersuchten Materialien, nicht zuletzt um eine Baseline für Simulationsmodelle zu schaffen. Zum anderen wurden Materialdefekte hinsichtlich ihrer Ursachen und Auswirkungen auf die Modulperformance analysiert. Darüber hinaus stellte die umfassende Untersuchung der Verschattungsstabilität bzw. des Durchbruchverhaltens einen weiteren Schwerpunkt in diesem AP dar.

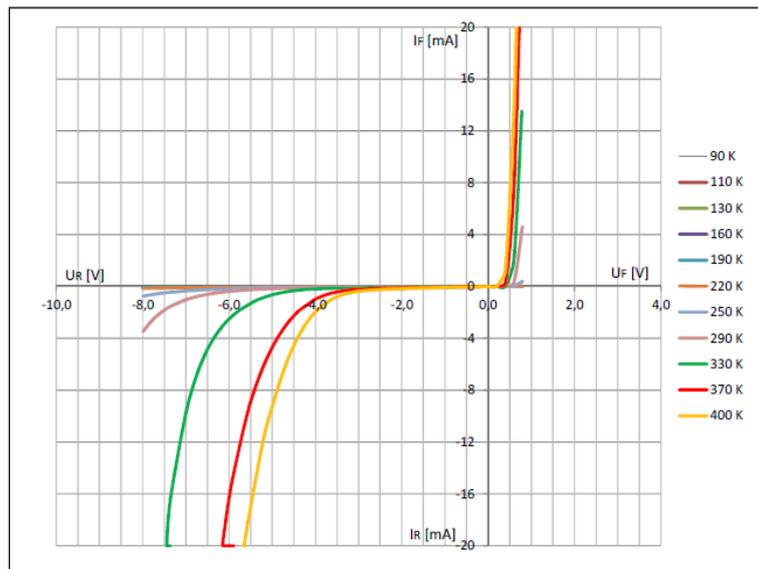
**Beitrag HSU:**

Beispielhaft für die von der HSU durchgeführten Untersuchungen seien zwei Aspekte angeführt:

- Temperaturabhängigkeit des reversiblen Durchbruchverhaltens
- Rückkontaktdiode und Admittanzmessungen

## Temperaturabhängigkeit des reversiblen Durchbruchverhaltens

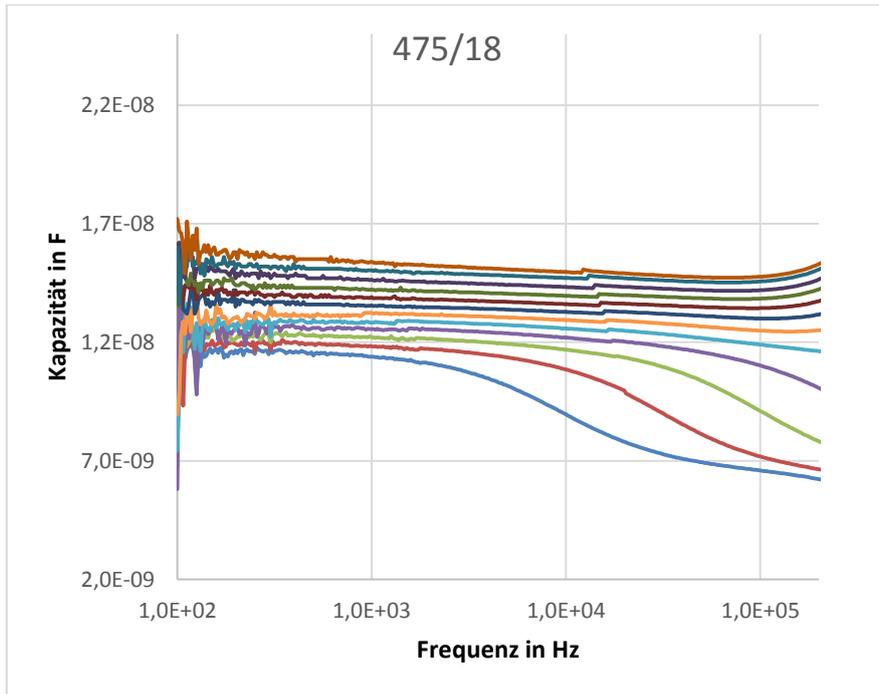
Als Grundlage zur Modellbildung des Durchbruchverhaltens wurde das reversible Sperrverhalten von CIGS-Zellen temperaturabhängig untersucht. Aus dem Temperaturverhalten sollte erkennbar sein, ob Tunnelmechanismen oder Lawineneffekte für den Anstieg des Stromes verantwortlich sind. Abbildung 77 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung. Die daraus erkennbare enorme Temperaturabhängigkeit spricht gegen die oben angegebenen Mechanismen.



**Abbildung 77 Temperaturabhängigkeit des Durchbruchverhaltens**

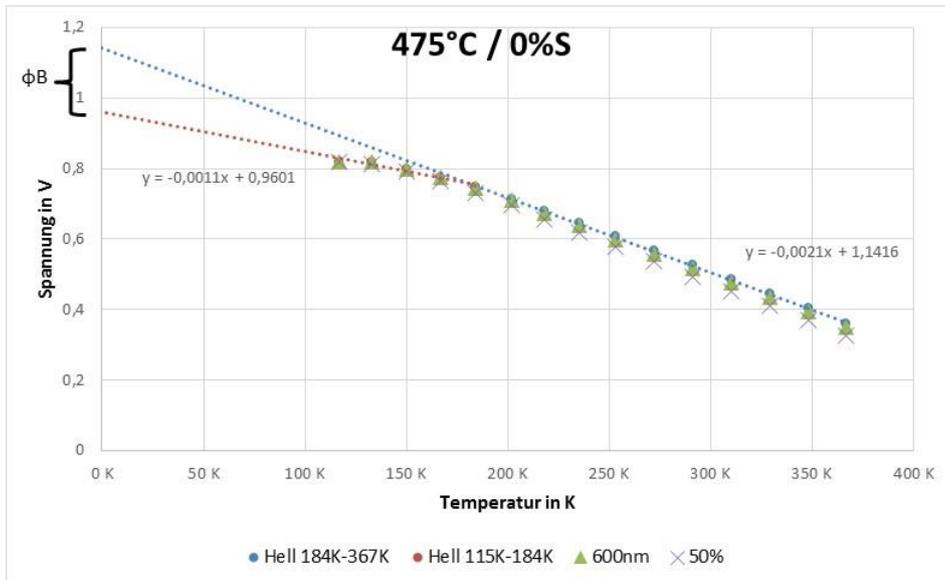
Die Ergebnisse (insbesondere bei einer spektralen Betrachtung) deuten eher darauf hin, dass die Pufferschichten eine zentrale Rolle spielen. So sind Modelle denkbar, welche darauf hinweisen, dass CdS entlang von Korngrenzen wichtig sein könnte. Generell lässt sich jedoch auch nach Abschluss des Projektes keine Aussage über die reversiblen Durchbruchmechanismen treffen. Wie angedeutet, könnten Effekte, welche mit der Polykristallinität des Materials zusammenhängen, für diese Durchbruchmechanismen verantwortlich sein.

Im Projektzeitraum wurden Admittanzmessungen an Zellen von Bosch mit unterschiedlichem S-Gehalt sowie an Zellen von MCT/NSE durchgeführt und interpretiert. Hintergrund war der Einfluss von Schwefel auf das Admittanzspektrum sowie die Interpretation dieser Spektren. Abbildung 78 zeigt ein typisches Admittanzspektrum im Temperaturbereich 80 – 340 K. Bei höheren Temperaturen hängt die Kapazität nur schwach von Frequenz und Temperatur ab, während bei tiefen Temperaturen eine deutliche Stufe zu erkennen ist, welche mit zunehmender Temperatur zu höheren Frequenzen hin verschoben ist. Im Folgenden soll auf die Interpretation dieser N1-Signatur als Rückkontaktdiode eingegangen werden.



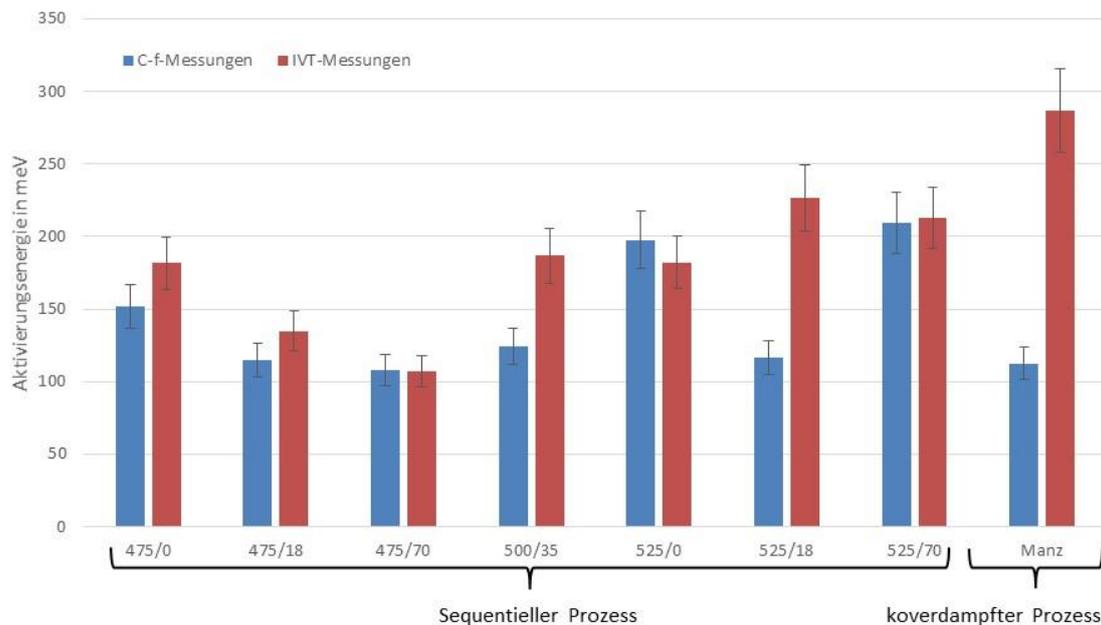
**Abbildung 78: Typisches Admittanz-Spektrum**

In früheren Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass sich die Rückkontaktbarriere auch aus temperaturabhängigen Voc-Messungen bestimmen lässt. Abbildung 79 verdeutlicht diese Zusammenhänge. Extrapoliert man den Hochtemperaturbereich zu 0 K, bekommt man die Bandlückenenergie als extrapolierten Wert. Wird dieses Verfahren im Tieftemperaturbereich angewandt, erhält man die um die Rückkontaktbarriere reduzierte Bandlücke. Somit kann aus diesen beiden Werten die Rückkontaktbarriere abgeschätzt werden.



**Abbildung 79: Voc(T) und Rückkontaktbarriere**

Im Projektzeitraum wurden nun diverse Zellen mit diesen beiden Verfahren (C(f), Voc(T)) charakterisiert sowie die daraus erhaltenen Werte für die Rückkontaktbarriere verglichen. Abbildung 80 zeigt die somit erzielten Ergebnisse.



**Abbildung 80: Rückkontaktbarrieren aus C(f) und Voc(T)**

Während bei den sequentiellen Prozessen eine recht gute Übereinstimmung zu beobachten ist, weichen die Werte für die koverdampften Proben für die beiden Messverfahren signifikant voneinander ab. Über die Hintergründe kann bis dato nur spekuliert werden. Evtl. sind Metastabilitäten, welche bei den sequentiellen Prozessen nur sehr untergeordnet auftreten, für die beobachteten Abweichungen verantwortlich.

## Beitrag UOL:

### 2.1.7.1. Grundcharakterisierung

Die zur Weiterentwicklung der Analyseverfahren notwendige Grundcharakterisierung der im Verbundprojekt verwendeten Solarzellen war ein entscheidender Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeit. Die Grundcharakterisierung umfasste die Bestimmung der IV-Kenngrößen ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $J_{00}$ ,  $n_{Dioden}$ ) sowie der aus der CV-Messung extrahierten Größen Nettodotierung und effektive Raumladungszonenweite. Hinzu kamen die Messungen der EQE und ggf. Reflexion, aber auch die Charakterisierung des metastabilen Verhaltens. Ziel war es, diese Größen statistisch zu erfassen und mit einem geeigneten eindimensionalen Simulationsmodell mit ausreichender Genauigkeit zu reproduzieren, um die physikalischen (Verlust-)Prozesse zu verstehen.

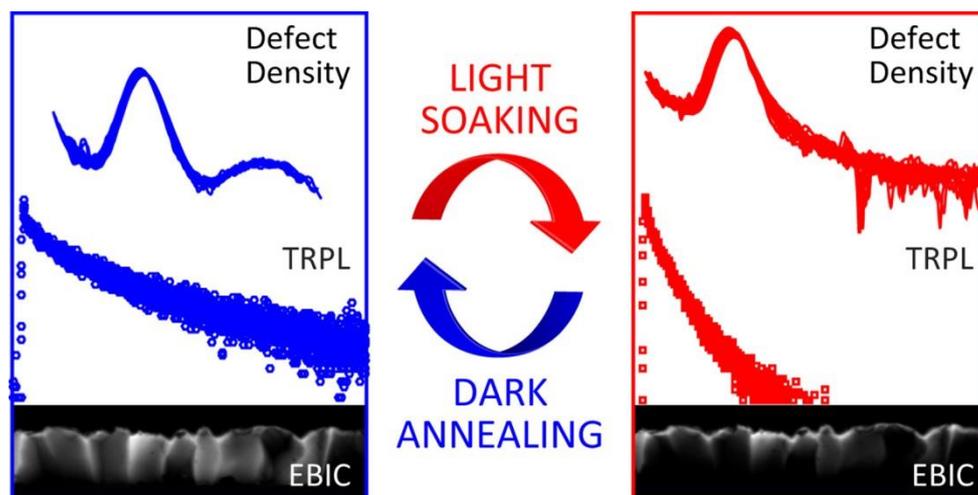
## Metastabilitäten

Um CIGS-Dünnschichtsolarzellen zuverlässig und reproduzierbar charakterisieren zu können, ist eine gute Kenntnis des metastabilen Verhaltens des Materials unter Beleuchtung oder angelegter Spannung notwendig. Insbesondere ist es erforderlich, den möglichen Messbereich zu erfassen, bei dem kein metastabiles Verhalten der Solarzellen induziert wird, sodass eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse unter den Verbundpartnern gegeben ist. Daher wurde zu Beginn des Projekts für beide verwendeten Probentypen untersucht, in welchem Spannungs- und Temperaturbereich die Solarzellen betrieben werden können, bevor ihre Kenndaten dauerhaft oder temporär verändert werden.

## MCT/NSE-Material

Zunächst wurde die zeitliche Änderung der Leerlaufspannung  $V_{OC}$  bei verschiedenen Temperaturen bei konstanter Beleuchtung aufgenommen. Es zeigt sich, dass eine signifikante Änderung der Leerlaufspannung von ca. 1% erst bei Temperaturen  $> 50^{\circ}\text{C}$  auftritt (darunter ist  $\Delta V_{OC} < 0.2\%$ ). Diese Änderung besteht nach Abkühlung auch weiterhin. Eine spannungsinduzierte Metastabilität konnte im üblichen Messbereich von  $-1,0$  bis  $0,8$  V nicht beobachtet werden. Aufgrund dieser Erkenntnisse konnten den Verbundpartnern Grenzwerte für die IV- und CV-Messung vorgegeben werden.

Es zeigt sich also bereits unter normalen Betriebsbedingungen, dass transiente Effekte in der Solarzelle eine Rolle spielen und bei der Bestimmung von Solarzellenkennwerten berücksichtigt werden müssen. Eine genauere Untersuchung des Light-Soaking (LS) Effekts an MCT/NSE Proben (Heise et al. 2017, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 163, 270) ergab eine reversible Änderung der Solarzelleneigenschaften zwischen zwei (extremen) Zuständen: Nach dem LS bei  $90^{\circ}\text{C}$  (9 h) erhöht sich die  $V_{OC}$  um ca. 40 mV und die  $J_{SC}$  verringert sich um  $1 \text{ mA/cm}^2$  im Vergleich zum Dark-Annealed (DA) Zustand nach 15 h bei  $90^{\circ}\text{C}$  im Dunkeln. Ursache für die Änderung ist in erster Linie eine metastabile Erhöhung der Absorberdotierung und Störstellendichte bei gleichzeitiger Verringerung der Defektenergie durch das LS. Dadurch ergibt sich eine höhere Quasi-Fermi-Niveau-Aufspaltung ( $V_{OC}$  steigt) und eine verringerte Raumladungszonenweite sowie Minoritäten-Diffusionslänge ( $J_{SC}$  sinkt). Admittanzmessungen, sowie zeitaufgelöste Photolumineszenz- und elektronenstrahlinduzierte Strommessungen (EBIC) an LS- und DA-konditionierten Proben bestätigen diese Ergebnisse, die in Abbildung 81 zusammengefasst sind.

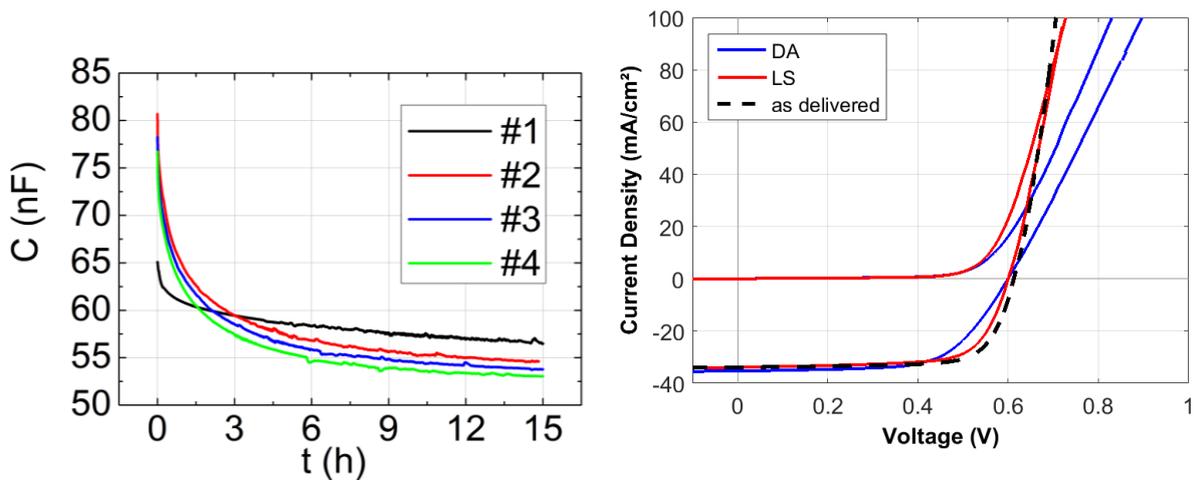


**Abbildung 81: Metastabile Änderungen in MCT/NSE-Material bei Light-Soaking- bzw. Dark Annealing-Behandlung: Änderungen von Dichte und Aktivierungsenergie eines Defektes, PL-Lebensdauer, sowie EBIC-Signal (aus: Heise et al. 2017, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 163, 270).**

### BSCT-Material

Im Folgenden werden die entsprechenden Untersuchungen an BSCT-Zellmaterial beschrieben. Nach erstmaliger Beleuchtung für zwei Stunden bei  $1000 \text{ W/m}^2$  und  $25^\circ\text{C}$  verringert sich die Leerlaufspannung um ca. 6 mV. Wird die Probe anschließend bei  $40^\circ\text{C}$  beleuchtet, fällt der Effekt geringer aus. Bei erneuter Messung bei  $25^\circ\text{C}$  hat sich die  $V_{oc}$  im Vergleich zum Initialwert bereits um 8 mV verringert und eine weitere Abnahme verläuft deutlich langsamer, um ca.  $0,5 \text{ mV/h}$ . Dieser Trend unterscheidet sich deutlich von dem der MCT/NSE-Zellen, welche nach dem Light-Soaking eine erhöhte Leerlaufspannung aufweisen. Der unterschiedliche Herstellungsprozess scheint hier eine Rolle zu spielen.

Eine detailliertere Analyse dieses Verhaltens konzentrierte sich zunächst auf die Dynamik der metastabilen Zustandsänderung, indem die Probe bei  $90^\circ\text{C}$  abwechselnd 15 Stunden mit und ohne Beleuchtung geheizt wurde und währenddessen die Leerlaufspannung (im Falle der Beleuchtung) bzw. die Kapazität (im Dunkelfall) gemessen wurden. Es zeigt sich, dass die Kapazität beim Konditionieren ohne Beleuchtung (dark annealing, DA) kontinuierlich abnimmt (s. Abbildung 82). Dieser Abfall passiert im Wesentlichen innerhalb der ersten Stunde (16 nF) und wird stetig flacher, scheint aber auch nach 15 h noch nicht in der Sättigung zu sein. Aus dem Unterschied der Werte am Ende eines DA-Zyklus und am Anfang des darauffolgenden DA-Zyklus lässt sich ablesen, dass die Light-Soaking-Behandlung (LS) zwischen den DA-Zyklen offenbar die Kapazitätsreduktion wieder rückgängig macht. Die ursprüngliche Kapazität wird dabei jedoch nicht vollständig wiederhergestellt, was auf unterschiedliche Aktivierungsenergien der dem LS und dem DA zugrundeliegenden Prozesse schließen lässt. Die Reduktion der Zellkapazität beim DA ist Ausdruck einer Vergrößerung der Raumladungszone, die auf eine verringerte Dotierkonzentration im DA-Zustand schließen lässt. Daher wäre zu erwarten, dass sich auch die Leerlaufspannung  $V_{oc}$  beim DA entsprechend verringert. Interessanterweise zeigt  $V_{oc}$  jedoch während der LS-Zyklen keine Änderung, was auf einen kompensierenden Mechanismus hindeutet.

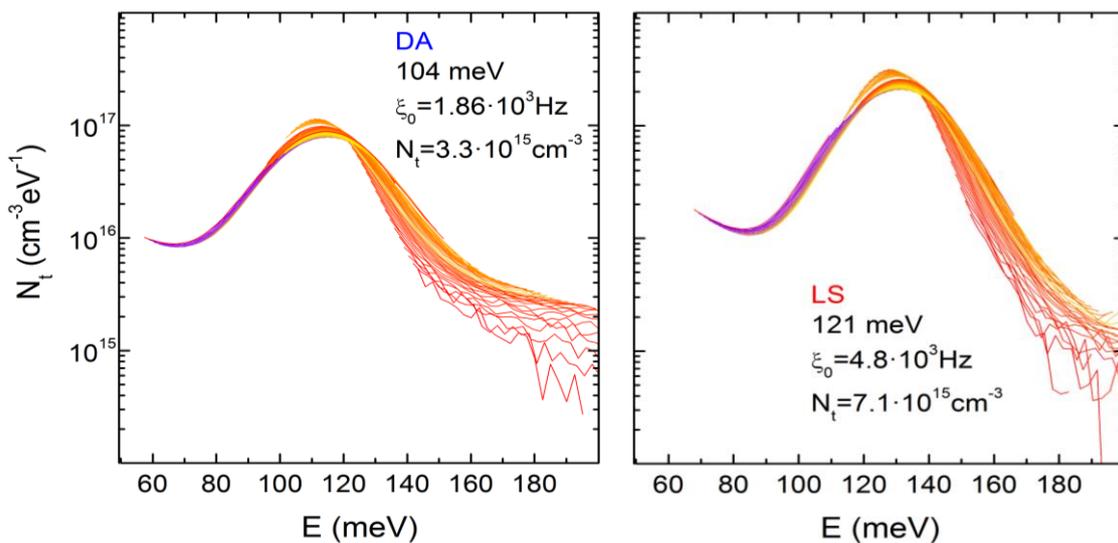


**Abbildung 82:** Kapazitätstransienten einer BSCT-Zelle jeweils im Dunkeln und unter STC nach 15h während mehrerer Zyklen der Dunkelkonditionierung bei 90°C. Zwischen den Zyklen fand jeweils ein Light Soaking statt.

**Abbildung 83:** Strom-Spannungs-Kurven einer BSCT-Zelle jeweils im Dunkeln und unter STC nach 15h Konditionierung bei 90°C im Dunkeln (DA) und unter AM1.5 Beleuchtung (LS) sowie im ausgelieferten Zustand.

Für die weiteren Untersuchungen wurden zwei Proben jeweils 15 h bei 90°C einmal mit (LS) und einmal ohne Beleuchtung (DA) konditioniert und an den jeweils frisch konditionierten Proben Messungen durchgeführt. Kapazitäts-Spannungs-Messungen zeigen, dass sich die Dotierkonzentration  $N_A$  beim Light-Soaking von  $1.2 \times 10^{16}$  auf  $7.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  erhöht, was in etwa mit der in Abbildung 82 beobachteten Kapazitätsänderung konsistent ist. Strom-Spannungs-Messungen (Abbildung 83) zeigen einen deutlich niedrigeren Serienwiderstand ( $0.8$  gegenüber  $2445 \Omega \text{ cm}^2$ ) und einen etwas kleineren Kurzschlussstrom  $J_{sc}$  (um  $1.3 \text{ mA/cm}^2$ ) im LS-Zustand gegenüber dem DA-Zustand, jedoch ist auch hier zu erkennen, dass keine Änderung der Leerlaufspannung stattfindet. Konsistent zum niedrigeren  $J_{sc}$  im LS-Zustand ist das EQE-Spektrum im LS-Zustand konstant etwas niedriger als im DA-Zustand.

In Abbildung 84 sind Defektdichten eines Defektzustands bei etwa 100 meV aus Admittanzspektroskopie-Messungen dargestellt. Daraus ist abzulesen, dass der Defekt nach der LS-Konditionierung offenbar energetisch tiefer in die Bandlücke verschoben ist und gleichzeitig die Dichte erhöht ist. Findet nichtstrahlende Rekombination angeregter Ladungsträger über diesen Defekt statt, so sollte sich diese bei der LS-Konditionierung deutlich erhöhen. Dies würde die Lebensdauer der Elektronen verkürzen, damit die Leerlaufspannung verringern und könnte somit die oben vermutete Kompensation der aufgrund der  $N_A$ -Erhöhung erwarteten  $V_{oc}$ -Erhöhung darstellen.



**Abbildung 84: Defektdichten aus Admittanzspektroskopie-Messungen für den DA- (links) und den LS-Zustand (rechts) an BSCT-Zellmaterial.**

Eine spannungsinduzierte Metastabilität der Kenndaten konnte auch bei BSCT-Zellen im üblichen Messbereich von  $-1,0$  bis  $0,8$  V nicht beobachtet werden.

### Varianz der Zellparameter

Ein Teilziel der Grundcharakterisierung ist die Zuordnung produktionsbedingter Schwankungen der Solarzellenkenngößen zu physikalischen Eigenschaften des Materials. Hierzu wurden Zellen von beiden Herstellern in ausreichender Anzahl charakterisiert und signifikante Schwankungen bei den Kenndaten identifiziert. Hier ist insbesondere die Leerlaufspannung von großer Relevanz. Um deren Varianz auf Schwankungen bestimmter Materialeigenschaften zurückzuführen, wurden verschiedene Regressionen untersucht. Die  $V_{oc}$  korreliert weder mit der Nettodotierung des Absorbers, noch mit der aus der EQE bestimmten minimalen Bandlücke des Absorbers. Da mit der fehlenden Korrelation zwischen  $V_{oc}$  und  $J_{sc}$  auch ein Einfluss der Pufferdotierung (Raumladungszonenweite) und des Gradings unwahrscheinlich ist, gehen wir von einer Schwankung der Rekombination in der Raumladungszone bzw. am Heterointerface (HI) aus. Weitere mögliche Erklärungen sind eine variierende Heterointerface-Rekombination oder (nur für BSCT zutreffend) eine variierende Schwefelkonzentration am HI. Dazu wurden temperaturabhängige IV (IVT) und defektspektroskopische Messungen (Admittanzspektroskopie) an den Zellen mit den besten und schlechtesten Effizienzen durchgeführt und miteinander verglichen. Aus den IVT Messungen geht hervor, dass die Aktivierungsenergie des Sperrsättigungsstroms wenig streut und auf eine Rekombination eher in der Raumladungszone (RLZ) als am HI hindeutet. Bei den Zellen von BSCT führten die Admittanzmessungen zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen, weil hier eine dominierende Signalstufe (N1) die Signale möglicher Defekte überlagert. Bei Zellen von MCT/NSE konnten dagegen Schwankungen in der Defektenergie zwischen verschiedenen Zellen nachgewiesen werden, die zu einer unterschiedlichen Rekombination und damit  $V_{oc}$  führen können.

Es kann festgehalten werden, dass die Variation der  $V_{oc}$  bei Zellen von MCT/NSE und BSCT sehr wahrscheinlich durch eine unterschiedlich starke Rekombination in der RLZ verursacht wird, wobei Zellen von BSCT zusätzlich eine Variation des Schwefels am Heterointerface aufweisen können. Man muss bemerken, dass MCT/NSE-Zellen eine stärkere Streuung des Gallium-Gradings über eine Modulfläche haben. Zellen, die aus entfernten Stellen eines Moduls entnommen wurden, können dadurch eine unterschiedliche  $V_{oc}$  aufweisen.

### Simulations-Baseline

Um ein Diodenmodell als Grundlage für die Netzwerksimulationen in AP7 zur Verfügung zu stellen, wurde eine Simulations-Baseline für beide im Projekt bearbeiteten Probenotypen in SCAPS (Version 3.3, Burgelman et al. 2000, *Thin Solid Films* 361-362, 527-532) erstellt. Dazu wurde jeweils ein Materialparametersatz benötigt, der sowohl die optischen als auch die elektrischen Eigenschaften jeder einzelnen Schicht im Dünnschichtstapel beinhaltet. Durch die hohe Probenanzahl und damit gute Statistik der Messungen war es möglich, für beide Hersteller eine durchschnittliche Zelle als Standard für die (defektfreie) Simulationsbaseline zu definieren. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung, in welchem Zustand sich die Zelle durch Konditionierung befindet. Wie oben unter dem Punkt „Metastabilität“ erläutert wurde, ändern sich die Zellparameter durch Light-Soaking und Dark-Annealing bei erhöhten Temperaturen dauerhaft und reversibel. Es ist anzunehmen, dass alle Zustände zwischen den genannten zwei Extrema durch entsprechende Konditionierung erreicht werden können. Man hat also zusätzlich zum mittleren Standard auch die Randwerte für die Simulationsbaseline definiert, idealerweise ausschließlich durch eine Änderung der gemessenen Parameter (Dotierung, Störstellendichte/-energie). Die Ergebnisse der Metastabilitätsuntersuchungen an den MCT/NSE Proben konnten in die Simulation eingehen. Für BSCT Zellen wurde der „as-grown“ Zustand ohne spezielle Konditionierung betrachtet.

Die parasitäre Absorption in den Fensterschichten (Al-ZnO, iZnO, CdS) muss bei der optischen Simulation berücksichtigt werden. Dazu wurden die Absorptionskoeffizienten mittels spektroskopischer Ellipsometrie bei variablem Einfallswinkel (VASE) an einzeln präparierten Fensterschichten auf Glassubstraten bestimmt. Die Absorptionseigenschaften der übrigen Schichten wurden der Literatur entnommen (M. Richter et al. 2013, *Thin Solid Films* 535, 331). Die Elementgradierung konnte bei den betrachteten Zellen mittels Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) ermittelt werden. Die Absorberdotierung ergibt sich aus Kapazitäts-Spannungs-Messungen (CV) und die Störstelleneigenschaften idealerweise direkt aus der Admittanzspektroskopie (für MCT/NSE Zellen) oder indirekt durch IV(T), oder CV(T) Messungen.

Die Ergebnisse der SCAPS Simulationsbaseline sind für MCT/NSE Zellen in Abbildung 85 und für BSCT Zellen in Abbildung 86 in Form der IV und EQE Charakteristik dargestellt. Die in SCAPS verwendeten Parameter sind in Tabelle 6 angegeben. Hierbei wird bei den MCT/NSE Zellen zwischen light-soaked (LS) und dark-annealed (DA) Zustand unterschieden. Die metastabilen Zustände der MCT/NSE Zellen werden insofern simulatorisch gut erfasst, als dass die  $V_{oc}$ - und EQE-Unterschiede sehr gut wiedergegeben werden. Insgesamt wird in der Simulation der  $J_{sc}$  im dark-annealed Zustand leicht überschätzt.

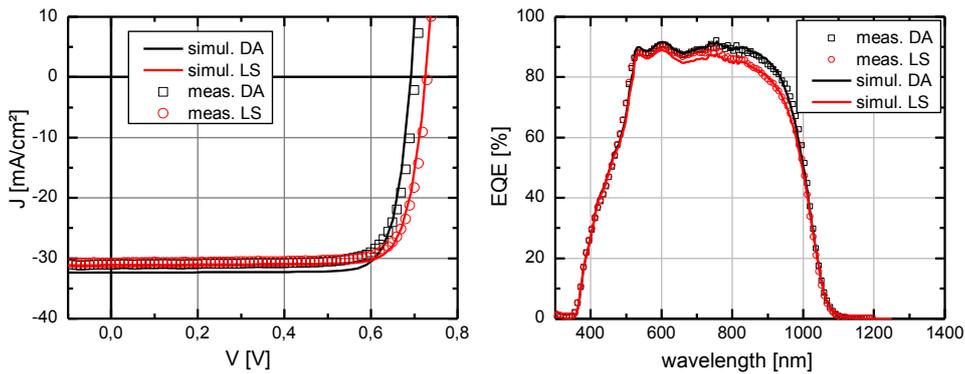


Abbildung 85: Gemessene und simulierte IV- und EQE-Charakteristik der MCT/NSE-Zellen im Zustand „light-soaked“ (LS - rot) und „dark-annealed“ (DA - schwarz).

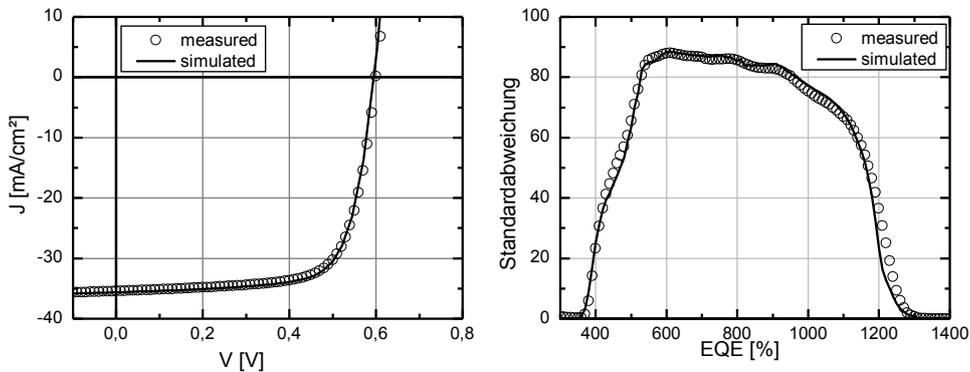


Abbildung 86: Gemessene und simulierte IV- und EQE-Charakteristik der BSCT-Zellen im Zustand „as-grown“.

Tabelle 6: SCAPS Simulationsparameter für MCT/NSE und BSCT Zellen. Bei den MCT/NSE Parametern sind die sich zwischen light-soaked und dark-annealed Zustand unterscheidenden Größen rot bzw. schwarz angezeigt.

Parameter	Einheit	front	ZnO:Al		iZnO		CdS		CIGS <sub>Se</sub>		back	
			MCT	BSCT	MCT	BSCT	MCT	BSCT	MCT LS / DA	BSCT		
Dicke	µm		0,87	1,2	0,07	0,1	0,06		1,92	1,75		
Bandlücke (via composition y)	eV		3,33		3,3		2,4		1,1585/1,3275	1,283/1,061/1,407		
Elektronenaffinität	eV		4,47				4,27		4,3457/4,1675	4,402/4,488/4,208		
rel. Permittivität			9				10		13,6			
CB DOS	1/cm³						2,20E+18					
VB DOC	1/cm³						1,80E+19					
electron therm. velocity	cm/s						1,00E+07					
hole therm. vel.	cm/s						1,00E+07					
electron mobility	cm²/Vs		1,00E+02				6,00E+01					
hole mobility	cm²/Vs		2,50E+01				5,00E+00					
N <sub>D</sub>	1/cm³		1,00E+20		5,00E+17				1,00E+01			
N <sub>A</sub>	1/cm³		1,00E+00				4,9E+16 / 3,8E+15		1,90E+16			
alpha			measured	default	measured	default	default	Paulson - adapted				
defect type			neutral				acceptor	donor	acceptor	acceptor		
cross section electrons	cm²		1,00E-12				8,00E-17	1,00E-14	3,00E+14	3,50E-14		
cross section holes	cm²		1,00E-12				8,00E-12	1,00E-14	3,00E+14	3,50E-14		
energ. Distr.			Gauß									
energy level	eV above EV		1,65				0 above Ei	0,094/0,119 (EC)	0,227	0,5		
characteristic energy	eV		0,1				0,1	0,018 / 0,016	0,05	0,023		
total density	1/cm³		1,77E+16				8,00E+16	1,4E+15 / 4,5E+14	1,25E+14	4,00E+14		
peak density	1/eV/cm³		1,00E+17				4,51E+17	4,39E+16 / 1,587E+16	1,41E+15	9,81E+15		
optical filter	reflection	measured total reflection										0,15

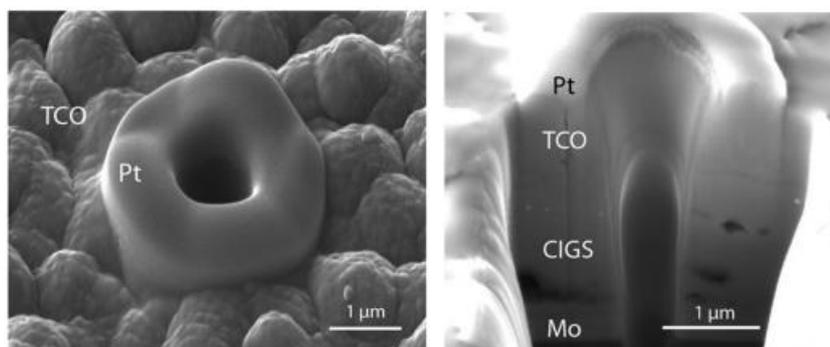
Die Ermittlung der für Simulationen notwendigen Parameter zur Charakterisierung von Kleinzellen (Meilenstein M6.1) konnte somit abgeschlossen werden und die sich ergebenden Solarzeleigenschaften für das Arbeitspaket 7 verwendet werden.

### 2.1.7.2. Untersuchung von Defekten

Materialdefekte spielen für die Performance von CIGS<sub>Se</sub>-Dünnschichtsolarzellen eine große Rolle, da sie einen Shuntpfad bilden können, der die Effizienz des Moduls reduziert, und zusätzlich die Rückwärtsspannungsstabilität maßgeblich beeinflussen. Die Defektanalyse an dieser Stelle hatte mehrere Aspekte zum Ziel: zum einen ging es um die Klärung möglicher mikroskopischer Ursachen für Materialdefekte, zum anderen sollten die jeweiligen Auswirkungen auf die Bauteilphysik charakterisiert werden.

#### Künstlich induzierte Defekte

Eine Schwierigkeit bei der Entwicklung von Analysemethoden zur Untersuchung von Defekten und deren Auswirkungen auf die Zellperformance besteht darin, dass „natürliche“ Defekte im Allgemeinen eine große Variabilität aufweisen. Für eine saubere Evaluation der Methoden sind aber wohldefinierte bzw. einheitliche Defekte notwendig, bei denen darüber hinaus idealerweise bekannt sein sollte, wie stark sie die Zelleistung beeinflussen. Daher wurde zu Beginn des Projekts eine Methode getestet, um „künstliche“ Defekte gezielt mittels eines fokussierten Ionenstrahls im Material zu erzeugen. Abbildung 87 zeigt SEM-Aufnahmen eines solchen Defekts mit einem Durchmesser von ca. 1 µm. Es zeigt sich, dass die so induzierten Defekte zu einem ohmschen Zellverhalten führen. Mit Hilfe dieser Defekte wurde in Zusammenarbeit mit dem ZAE die IR-Analytik evaluiert (siehe dazu den entsprechenden Abschnitt in AP2 bzw. Vetter et al. 2016, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24, 1001).



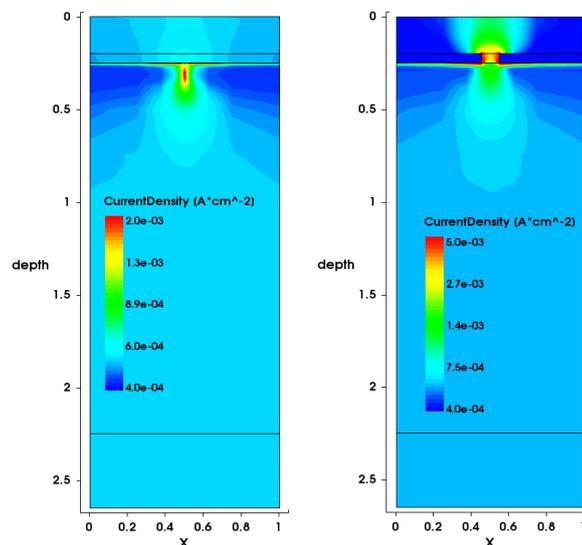
**Abbildung 87:** SEM-Bilder eines durch einen focussed-ion-beam (FIB) induzierten Defekts. Links: Ansicht von oben, Rechts: im Querschnitt (aus: Vetter et al. 2016, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24, 1001, Copyright©2016 John Wiley & Sons, Ltd. ).

#### Simulation von Defekten

Die in AP2 durchgeführten Arbeiten an künstlich eingebrachten Defekten mittels Laser oder focussed-ion-beam (FIB) und deren Analyse führten zu der Fragestellung, welche lokalen Unstimmigkeiten in der Solarzelle zu den charakteristischen Merkmalen von Defekten zum Beispiel bei IR-Messungen führen. Hier konnten experimentell grundsätzlich zwei Typen von Defekten entsprechend ihrer Spannungsabhängigkeit des Wärmesignals (D-LIT) unterschieden werden: ohmsche Defekte und diodenartige Defekte. Ohmsche Defekte, auch Shunts, lassen auf metallische oder zumindest gut leitende Verbindungen zwischen Front- und Rückkontakt schließen. Genaue

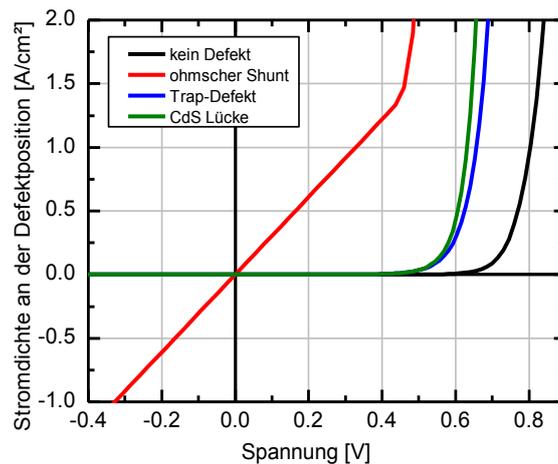
Ursachen für diodenartige Defekte, auch „schwache Dioden“, sind hingegen nicht intuitiv zu benennen.

Um ein genaueres Bild zu möglichen Defektursachen zu erhalten, wurden zweidimensionale Bauelementsimulationen in Sentaurus TCAD erstellt und auf gemessene IV-Kennlinien und EQE-Messungen kalibriert. Anschließend wurden drei verschiedene Defekte implementiert und deren Auswirkungen auf die IV-Kennlinie untersucht sowie die lokale Stromdichte am Ort des Defektes untersucht als Maß für die dort entstehende Wärme (Richter et al. 2015, EUPVSEC). Abbildung 88 zeigt die Simulationsstruktur für Zellen, bei denen als Defekt eine lokal erhöhte Rekombination durch eine erhöhte Dichte von Rekombinationszentren realisiert wurde (links) bzw. die Pufferschicht lokal entfernt wurde und an der Grenzfläche CIGS/ZnO erhöhte Rekombination stattfindet (rechts). Der dritte Defekttyp wurde mit einer metallischen Verbindung zwischen ZnO und Molybdän realisiert (ohmscher Shunt).



**Abbildung 88: Simulationsstruktur von Solarzellen mit 100-fach erhöhter Trapdichte bei  $x = 0,5 \mu\text{m}$  (links) bzw. CdS-Pufferlücke (rechts). Die Farbcodierung gibt die lokale Stromdichte bei einer angelegten Spannung von +0,5 V an.**

In Abbildung 89 ist der Einfluss der jeweiligen Defekttypen auf die lokale Strom-Spannungs-Kennlinie zu sehen. Das unterschiedliche Verhalten zwischen ohmschem Shunt und Trap-Defekt bzw. CdS-Lücke (beides diodenartig) spiegelt das mit D-LIT gemessene wider (nicht gezeigt). Die Auswirkungen auf die IV-Charakteristik sind entsprechend unterschiedlich: Während ohmsche Shunts vorrangig den Füllfaktor und die Leerlaufspannung ( $V_{oc}$ ) reduzieren, verringern Trap-Defekte und unvollständige CdS-Schichten hauptsächlich die  $V_{oc}$  und im Falle der CdS-Lücke auch in geringem Maße den Kurzschlussstrom.

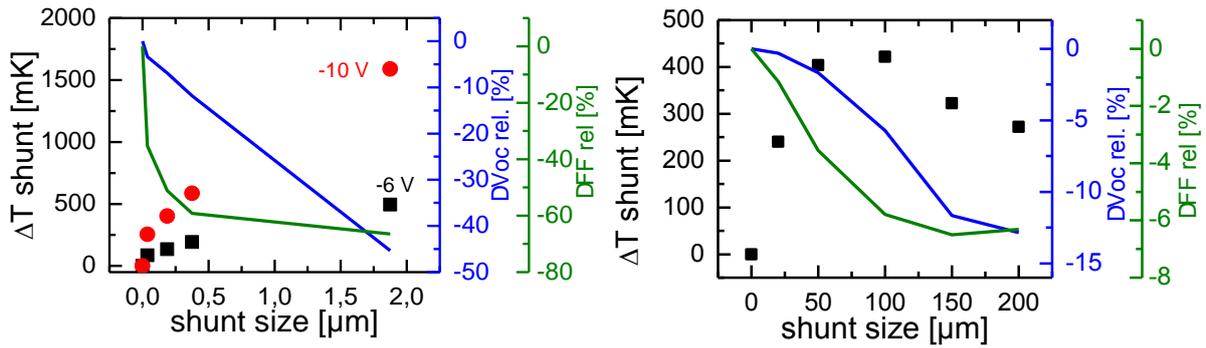


**Abbildung 89: Strom-Spannungsverhalten im Dunkeln von lokalen Defekten.**

Die Suche nach der Ursache prozessbedingter  $V_{oc}$ -Schwankungen könnte durch diese Studie evtl. weiter eingeschränkt werden: Die Inhomogenität der CIGS-Qualität (Trap-Defekte bzw. „schwache Dioden“) oder der CdS-Bedeckung könnten Ursachen für die  $V_{oc}$ -Schwankungen sein. Da der Kurzschlussstrom und der Füllfaktor weniger stark schwanken, ist eher von einer lateral inhomogenen Rekombination im CIGS auszugehen.

In einem weiteren Schritt wurde die Struktur auf eine der Realität entsprechenden 3D Struktur erweitert, um die Temperaturverteilung in der Solarzelle simulieren zu können. Diese spielt beim Rückwärtsspannungsverhalten der Zelle eine entscheidende Rolle und beeinflusst maßgeblich den Zelldurchbruch. Bei der Simulation müssen die thermodynamischen Prozesse adäquat abgebildet werden. Neben den optischen und elektrischen Prozessen wurden in dem erweiterten Modell die Wärmegenerationsprozesse Lichtabsorption (Thermalisierung), Stromtransport (Joule'sche Wärme), Rekombination sowie die Peltierwärmegeneration berücksichtigt. Als Wärmeverlustprozess wurde die Wärmeabgabe an die Umgebung über einen thermischen Widerstand eingeführt. Dieser Widerstand ist zunächst unbekannt, kann aber durch das Temperaturprofil, das sich über eine monolithisch verschaltete Zelle bei +1 V einstellt, angepasst werden, so dass DLIT-Messung und Simulationsmodell das gleiche Profil zeigen.

Mit diesem Modell können die Einflüsse diverser Defekte auf die Temperaturverteilung in der Zelle untersucht werden (s.a. Richter et al. 2016, EUPVSEC). So ist in Abbildung 90 links die Temperaturdifferenz in einem simulierten ohmschen Shunt in einer Zelle abhängig von dessen Größe dargestellt. Die Performanceeinbußen sind in diesem Fall erheblich, jedoch liegt die maximale Temperatur nur wenige Kelvin über der Umgebungstemperatur. Für den Fall eines Dioden-artigen Defektes erwarten wir eine signifikante Wärmeentwicklung nur bei Vorwärtsspannung. Für den Punkt +1 V ist dies in Abbildung 90 rechts dargestellt. Hier sind die Verluste im FF erwartungsgemäß deutlich geringer und auch die Wärmeentwicklung ist in Bezug auf zerstörende Effekte vernachlässigbar.

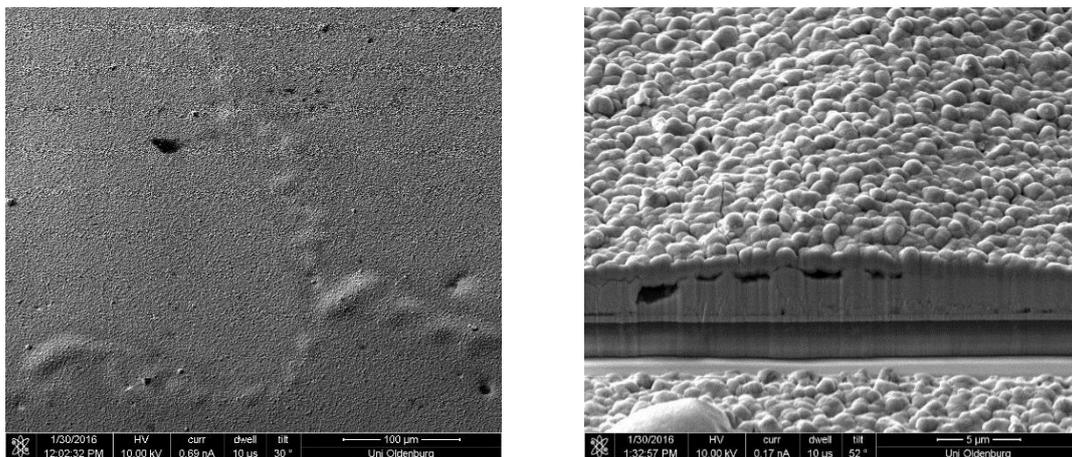


**Abbildung 90: Maximaler Temperaturunterschied zwischen Defekt und defektfreier Region und Verluste bei Leerlaufspannung und Füllfaktor bei Defekten mit variierender Ausdehnung. Links: Verhalten eines ohmschen Shunts, bei -10 V und -6 V. Rechts: Fall eines Dioden-artigen Defekts bei +1 V.**

Um die Temperatur im Rückwärtsspannungsbereich bzw. im Durchbruchfall besser zu verstehen und damit die Ursachen für spannungsinduzierte Defekte zu verstehen, muss auch ein Durchbruchverhalten (z. B. Avalanche Lawinendurchbruch, Tunneldurchbruch) adäquat in der Simulation abgebildet werden. Diese Ergebnisse werden im Abschnitt „Rückwärtsspannungsverhalten“ (s.u.) behandelt.

**Mikroskopische Untersuchung von Defekten**

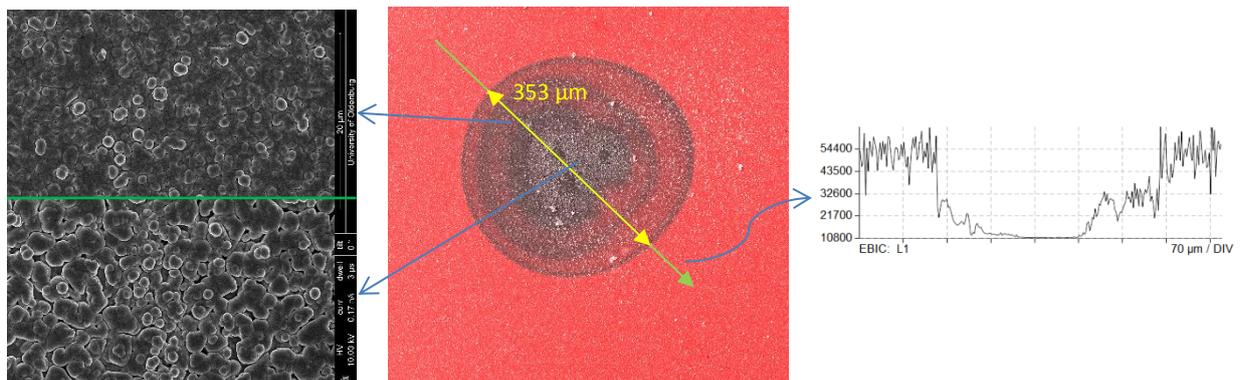
Um die Ursachen von Materialdefekten experimentell zu analysieren, wurden einzelne Defekte elektronenmikroskopisch untersucht. Ein Beispiel eines sog. Hot-Spots, der durch hohe Rückwärtsspannung induziert wurde und den typischen Wurm-artigen Verlauf zeigt, ist in Abbildung 91 abgebildet. Im FIB-Schnitt (rechts) ist deutlich zu erkennen, wie sich im Bereich des „Wurms“ offenbar die Puffer- und Fensterschicht von der CIGS-Absorberschicht gelöst haben. Dies ist möglicherweise auf eine hitzebedingte Ausdehnung bzw. teilweise Verdampfung der Absorberschicht zurückzuführen.



**Abbildung 91: Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines typischen Defektes, der durch hohe Rückwärtsspannungen induziert wurde. Links erkennt man deutlich die längliche Ausdehnung, die die Bezeichnung „Wurm“ begründet. Rechts im FIB-Schnitt erkennt man die Ablösung der Puffer-/Fensterschichten vom CIGS bzw. die Auftrennung in der CIGS Schicht, die die Aufwölbung verursacht.**

Ganz ähnlich ist die Situation bei einem beim Projektpartner ZAE künstlich durch einen Laser induzierten Defekt, der sich elektrisch in einer diodischen Kennlinie mit reduzierter Zelleffizienz äußert. Auch hier hat die erhöhte Temperatur zu einer Ablösung der Pufferschicht von der Absorberschicht geführt (für eine detailliertere Beschreibung siehe Vetter et al. 2016, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24, 1001).

Um die funktionellen Auswirkungen von natürlichen Defekten, die durch eine erhöhte Wärmeentwicklung im LIT-Bild auffallen, ausführlicher mikroskopisch zu charakterisieren, wurden Untersuchungen mittels EBIC durchgeführt. In der Abbildung 92 sind Messungen an einem Defekt (#9 aus Abbildung 93) gezeigt. Zunächst sind in den SEM-Aufnahmen deutliche Anomalien in der Oberflächenmorphologie zu sehen, die den Defekt kennzeichnen. EDX-Aufnahmen (nicht gezeigt) deuten ferner an, dass es leichte Kompositionsunterschiede im Defekt gibt, dahingehend, dass der Cu-Anteil etwas erhöht und der In-Anteil etwas verringert ist. Darüber hinaus zeigt die EBIC-Messung, dass der Einflussbereich des Defekts relativ scharf begrenzt ist, in dem die Stromsammlung drastisch reduziert ist. Dieser Einflussbereich ist deutlich größer als die im SEM-Bild sichtbare Defektstruktur, was zum einen zeigt, dass die Ladungsträgersenke im Defekt (aufgrund der Rekombination) so stark ist, dass die Stromsammlung auch in benachbarten Bereichen beeinträchtigt ist. Zum anderen spricht dies ebenfalls dafür, dass die LIT-Signatur des Defekts nicht nur auf einen Effekt an der Oberfläche bzw. der CdS-Schicht zurückzuführen ist, sondern Materialveränderungen im Absorber bzw. am Heteroübergang vorhanden sind, worauf auch die PL-Ergebnisse mit einer reduzierten Lebensdauer hindeuten (s.u.). Ähnliche Resultate liefern auch die Untersuchungen an weiteren Defekten (#6 und #8 aus Abbildung 93); bei Defekt #8 sind lediglich die Defektstruktur und der im EBIC-Signal zu sehende Einflussbereich (in Übereinstimmung mit den ILIT-Aufnahmen) kleiner.



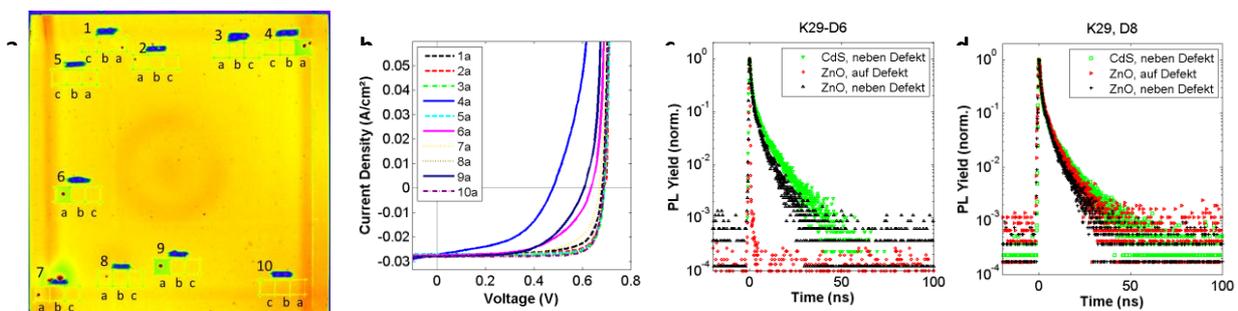
**Abbildung 92. EBIC/SEM-Charakterisierung eines Defekts (#9 von Kachel 29 aus Modul 01-161203-00429). Links: SEM-Aufnahmen von Bereichen neben (oben) und im Defekt (unten). Mitte: EBIC/SEM-Overlay. Rechts: EBIC-Signal eines Linescans über den Defekt (entlang der grünen Linie im mittleren Bild).**

### Einfluss von Defekten auf die Lebensdauer

Im Folgenden wurde untersucht, inwieweit sich Defekte auf dem Modul auf die Ladungsträgerlebensdauer auswirken. Dabei ging es zum einen darum, den Einflussbereich eines Defekts und seine „Schädlichkeit“ für die Zellperformance zu quantifizieren. Zum anderen sollte untersucht werden, ob sich verschiedene Defektklassen identifizieren lassen, die sich in ihrer

Auswirkung auf die Lebensdauer und ihrer mikroskopischen Ursache unterscheiden. Nicht zuletzt galt es zu überprüfen, inwieweit die Methode der zeitaufgelöster Photolumineszenzmessungen (TRPL) für die Defektanalyse hilfreich ist, sei es zur Klassifizierung oder für ein tieferes Verständnis der Devicephysik.

Dazu wurden mit Hilfe von ILIT-Messungen auf unstrukturiertem Zellmaterial vom Projektpartner MCT/NSE ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ -Kacheln) vorhandene Defekte lokalisiert und mechanisch isoliert (vgl. Abbildung 93a). Zusätzlich wurden zu Referenzzwecken in unmittelbarer Nachbarschaft dieser Zellen mit Defekt je zwei defektfreie Zellen isoliert („b“ und „c“ in Abbildung 93a). Schon in der ILIT-Aufnahme wird deutlich, dass einige Defekte (#4, #6, #9) die Zellperformance offenbar deutlich stärker beeinträchtigen als andere Defekte: Dies zeigt sich hier in einer Reduktion des ILIT-Signals in der gesamten Zelle. Dieselben Zellen zeigen auch in den IV-Messungen (Abbildung 93b) die deutlich größten Verluste.



**Abbildung 93. Defektuntersuchungen an der  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ -Kachel Nr. 29 aus dem Modul 01-161203-00429. a) ILIT-Aufnahme mit isolierten Zellen ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ), b) IV-Kennlinien der Zellen mit Defekt, c)+d) TRPL an den Zellen mit Defekt #6 und #8, jeweils an der Stelle des Defekts (rot), abseits des Defekts (schwarz) sowie zusätzlich ohne ZnO-Schicht (grün).**

Die Defekte (#2, #4, #6, #8, #9) wurden mittels TRPL untersucht. Dazu wurde zunächst das PL-Signal der Zelle lateral mit einer Schrittweite von 0.2 mm (bei einem Spotdurchmesser von ca. 0.1 mm) abgerastert, um die Koordinaten des Defekts auf dem Probenstisch des PL-Aufbaus zu bestimmen. Anschließend wurden TRPL-Messungen an jeweils drei Positionen durchgeführt: am Ort des Defekts, an einer Stelle in ca. 1.5 mm Entfernung zum Defekt (aber noch innerhalb der defekten Zelle) sowie außerhalb der defekten Zelle. Bei den TRPL-Messungen an der Position des Defekts ergeben sich zwei Szenarien: Bei den Defekten #4, #6 und #9 ist die PL im Defekt entweder gar nicht messbar oder der PL-Zerfall ist kürzer als die Transferfunktion des Aufbaus (ca. 1 ns), s. rote Kurve in Abbildung 93c. Bei den Defekten #2 und #8 hingegen unterscheidet sich das TRPL-Signal im Defekt nicht von dem abseits des Defekts, s. Abbildung 93d. Diese zwei Arten von Defekten stimmen mit den in den IV- und ILIT-Messungen beobachteten Defektgruppen überein.

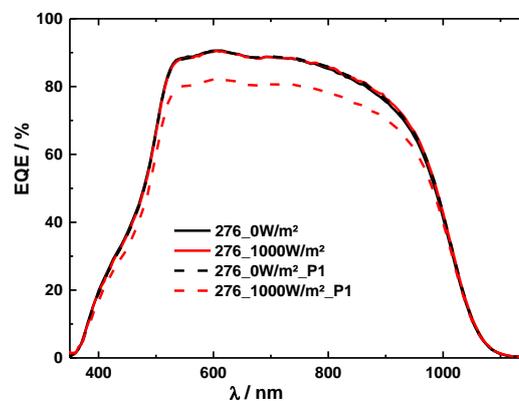
Vergleicht man des Weiteren das TRPL-Signal innerhalb der defekten Zelle mit dem außerhalb der defekten Zelle, lassen sich außer bei Defekt #4 keine Unterschiede feststellen. D.h. im Allgemeinen ist der Einflussbereich des Defekts auf die PL lokal sehr begrenzt. Ist der Defekt jedoch zu „stark“, wie im Beispiel von #4, bei der die Zelle sogar zwei Defekte enthält, wirkt sich dies auch auf die PL durch

einen kürzeren/schnelleren PL-Zerfall aus. Hier wird vermutlich die Ladungsträgertrennung dadurch erhöht, dass die ZnO-Schicht auch entferntere Stellen innerhalb der Zelle mit dem Defekt koppelt. Entfernt man die ZnO-Schicht durch Ätzen mit Essigsäure, so verschwindet diese Kopplung und das TRPL-Signal innerhalb der Zelle abseits des Defekts gleicht dem außerhalb der defekten Zelle. Darüber hinaus ändert das Entfernen der ZnO-Schicht wenig am TRPL-Signal (grüne Kurven in Abbildung 93c+d)), was vermutlich am hohen injection level liegt (ca. 130 Sonnen).

Die Untersuchungen zum Einfluss von Defekten auf die PL-Lebensdauer (Meilenstein M6.2) zeigen also, dass die „Schädlichkeit“ eines Defekts in der TRPL abgebildet wird: Es gibt einerseits Defekte, die zu einer drastischen Reduktion des PL-Signals führen; diese zeigen auch in der IV eine deutlich reduzierte Performance. Andererseits gibt es Defekte, die zwar in ILIT und DLIT sichtbar sind, sich aber nur unwesentlich auf die TRPL bzw. die IV-Kennlinie auswirken. Somit bietet die TRPL eine vielversprechende Methode, um das Verständnis von Defekten und ihren Auswirkungen auf die Deviceeigenschaften zu erweitern.

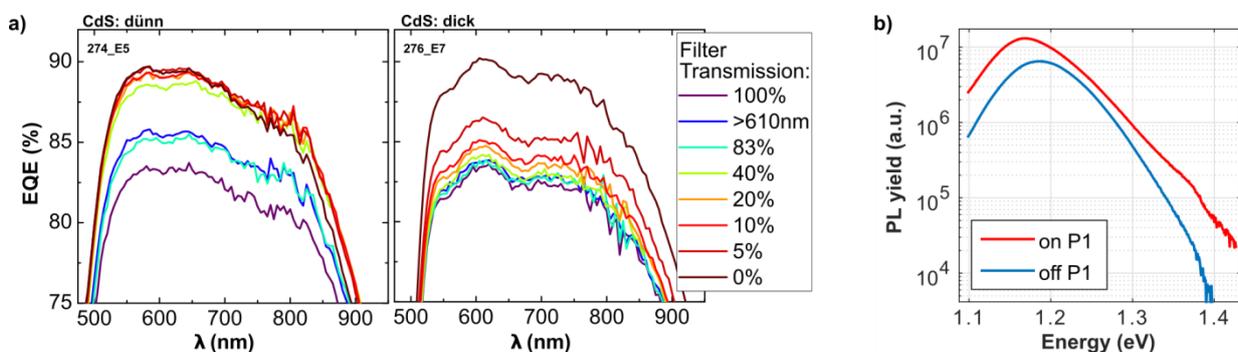
### P1-Linie

Die Charakterisierung von Zellproben von MCT/NSE mit ausschließlich P1-Strukturierungslinien zeigte unerwartete Auffälligkeiten an genau diesen P1 Positionen. Insbesondere die EQE an diesen Stellen reduzierte sich über das gesamte Spektrum, sobald die Messung mit Biasbeleuchtung durchgeführt wurde, siehe dazu Abbildung 94. Ohne Biaslicht konnte kein unterschiedliches Verhalten in der EQE zwischen normaler Zellfläche und an P1 Linien festgestellt werden. Ein spektral- und intensitätsabhängiger Transportverlustmechanismus ist hier zu vermuten, der die Minoritätenextraktion am Ort über dem P1-Graben deutlich verringert, sobald bestimmte Beleuchtungsspektren vorhanden sind. Eine mögliche Erklärung könnte eine durch Rotlicht angeregte Barriere am Rückkontakt sein, wobei diese Barriere sich über den P1-Graben hinaus am Rückkontakt befinden müsste, da der Lichtspot einen Durchmesser von ca. 1 mm hat und damit ein Vielfaches der Grabenbreite. Eine weitere Erklärung wäre eine durch blau/UV-Licht angeregte Grenzflächenrekombination am Heterokontakt, wodurch Minoritäten verstärkt rekombinieren.



**Abbildung 94: Externe Quanteneffizienz (EQE) an MCT/NSE-Zellmaterial mit (durchgehende Linien) und ohne (gestrichelte Linien) Weißlichtbeleuchtung, sowohl in normaler Zellregion (schwarz) und über dem P1 Graben (rot).**

Zur weiteren Untersuchung dieses Phänomens wurden zunächst die Intensität und das Spektrum des Bias-Lichts variiert. Die resultierenden EQE-Spektren über der P1-Linie sind in Abbildung 95a für zwei Proben mit unterschiedlicher CdS-Schichtdicke dargestellt. Wie zu erwarten war, steigt die Reduktion der EQE mit zunehmender Intensität des Bias-Lichts. Dieses Verhalten ist jedoch von der CdS-Schichtdicke abhängig: Je dicker die CdS-Schicht, desto sensitiver ist die EQE auf das Bias-Licht. Außerdem lassen sich zwischen einer Messung mit rotem Bias-Licht (>610nm) und mit weißem Bias-Licht vergleichbarer Gesamtintensität (83%) keine Unterschiede erkennen (dunkel- und hellblaue Linien in Abbildung 95a). Folglich scheint der blaue Anteil der Bias-Beleuchtung keinen reduzierenden Einfluss auf die EQE über der P1-Linie zu haben, so dass ein Erklärungsansatz des Effekts über eine durch blaues Licht erhöhte Interface-Rekombination am Heteroübergang ausgeschlossen werden kann.

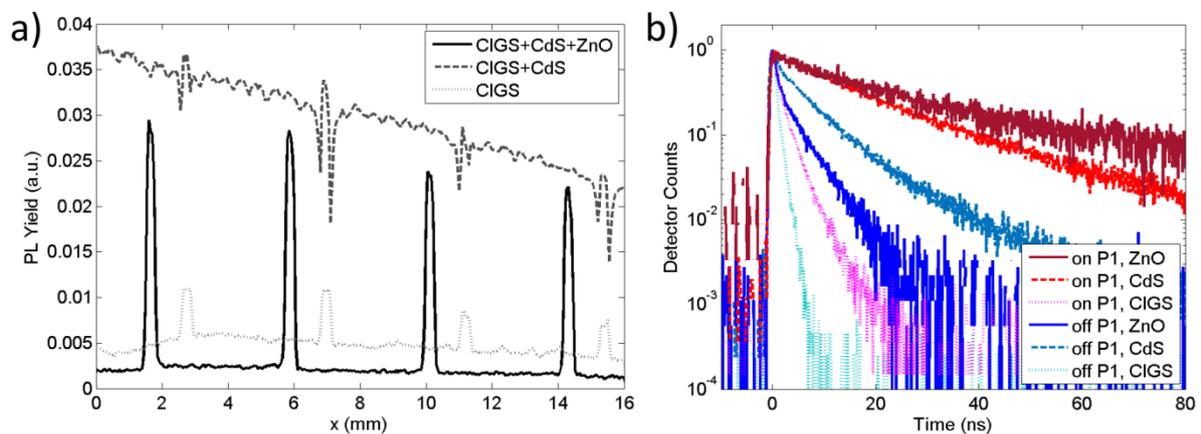


**Abbildung 95. Untersuchungen von MCT/NSE-Zellen im Bereich der P1-Strukturierungslinie. a) EQE über der P1-Linie bei Variation der Intensität bzw. des Spektrums der Bias-Beleuchtung durch verschiedene Filter für zwei Proben mit unterschiedlicher CdS-Schichtdicke (Proben: 01-150923-00274\_150/300 und -00276\_150/400). b) PL-Spektren in und neben der P1-Linie an einem CdS-beschichteten Absorber (Probe: 01-160424-00185\_265/350).**

Um die Bereiche innerhalb und außerhalb der P1-Linie besser untersuchen zu können, wurden von MCT/NSE Proben zur Verfügung gestellt, deren P1-Linien mit 300  $\mu\text{m}$  breiter als üblich sind. An diesen Proben wurden an der UOL vergleichende PL-Spektren mit einem konfokalen  $\mu$ -PL-Aufbau (laterale Auflösung  $\approx 1 \mu\text{m}$ ) aufgenommen, die in Abbildung 95b zu sehen sind. Eine Auswertung der Spektren mithilfe des verallgemeinerten Planck-Gesetzes (Würfel 1982, *J. Phys. C* 15, 3967) zeigt zum einen, dass die lokale Temperatur bei der Messung auf der P1-Linie deutlich höher ist, was vermutlich daran liegt, dass die bei der Laseranregung deponierte Wärme durch das angrenzende Glas schlechter abtransportiert werden kann als andernorts durch das Molybdän. Weiter zeigt sich, dass die optische Bandlücke auf der P1-Linie etwa 25 meV niedriger ist. Dies könnte einerseits temperaturbedingt sein, andererseits aber auch auf einen unterschiedlich ausgeprägten Ga-Gradienten hindeuten. Entsprechend ist auch die Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus auf der P1-Linie kleiner als außerhalb. Allerdings ist die PL-Ausbeute über der P1-Linie etwa doppelt so hoch wie außerhalb der P1-Linie. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte eine verringerte

Ladungsträgerseparation am Heteroübergang aufgrund von veränderten Absorbereigenschaften (Dotierung) sein.

Um zu untersuchen, ob es sich bei den vorgenannten Beobachtungen um Effekte durch ein andersgeartetes elektrisches Feld an der P1-Linie handelt oder ob in den P1-Linien der Absorber andere Eigenschaften aufweist, wurden die Analysen durch orts aufgelöste TRPL-Messungen erweitert. Dazu wurden an einer Probe mit 300  $\mu\text{m}$  breiten P1-Linien zunächst PL-Linescans über die P1-Linien durchgeführt und anschließend an den Stellen der P1-Linien bzw. zwischen den P1-Linien TRPL gemessen. Die Größe des Laserflecks, die hier die laterale Auflösung bestimmte, lag bei etwa 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Diese Messungen wurden sowohl für die vollständige Zelle, als auch für den CdS-bedeckten Absorber ohne ZnO sowie für den reinen Absorber durch Abätzen der ZnO- bzw. CdS-Schichten durchgeführt.



**Abbildung 96. PL-Untersuchungen der P1-Strukturierungslinie (Probe MCT/NSE 01-160424-00192\_150/600). a) PL-Linescans über P1-Linien für unterschiedliche Schichtstapel. b) Zugehörige TRPL-Messungen jeweils in der P1-Linie (rötliche Linien) und abseits der P1-Linie (bläuliche Linien).**

In Abbildung 96a sind die PL-Linescans für die verschiedenen Schichtstapel zu sehen. Bei der Zelle ist die PL-Ausbeute in der P1-Linie deutlich höher (ca. 10 $\times$ ) als in „normalen“ Bereichen, beim reinen Absorber ist dieser Effekt etwas schwächer. Der CdS-beschichtete Absorber verhält sich deutlich anders, wofür die Gründe bisher noch unklar sind (das Verhalten ist reproduzierbar und der stetige Abfall über x (Drift) verschwindet, wenn die Anregungsleistung deutlich verringert wird). In Abbildung 96b sind für jede der Linescans je eine TRPL-Messung in einer P1-Linie und eine TRPL-Messung zwischen P1-Linien gezeigt. Es sind zwei Tendenzen zu erkennen: erstens ist der PL-Zerfall länger in den P1-Linien, zweitens ist der PL-Zerfall für den reinen Absorber am kürzesten und zwischen den P1-Linien für den CdS-beschichteten Absorber am längsten (in der P1-Linie unterscheiden sich die Messungen mit und ohne ZnO kaum).

Insgesamt lässt sich jedoch eindeutig festhalten, dass sowohl die PL-Ausbeute als auch die PL-Lebensdauer in den P1-Linien erhöht sind. Da dies sogar für den reinen Absorber der Fall ist, können Feldeffekte dabei nicht die einzige Begründung sein, sondern es muss sich um Änderungen im

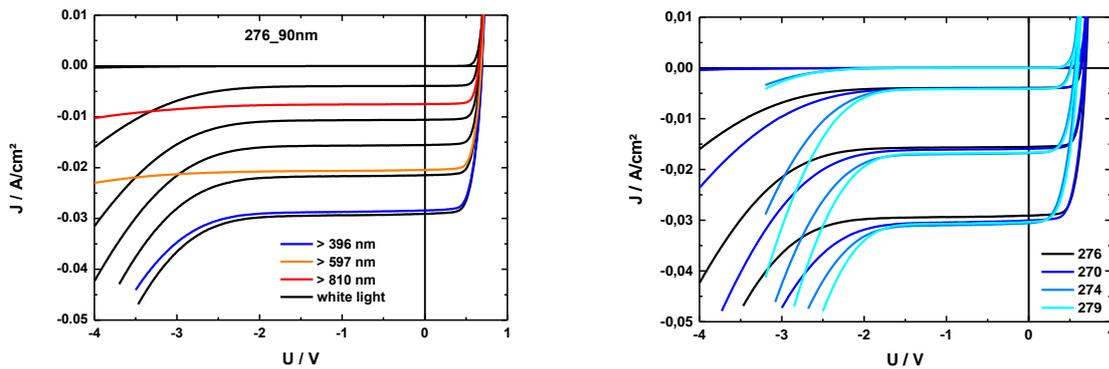
Absorber selber handeln. Dabei ist zu beachten, dass wie oben erwähnt die Temperatur in der P1-Linie wahrscheinlich etwas höher ist und die Bandlücke etwas kleiner; beides führt im Allgemeinen zu einer *Reduktion* der PL-Ausbeute/-Lebensdauer. Eine mögliche Erklärung für die Beobachtungen könnte eine verringerte Defektdichte in der P1-Linie sein, die ihre Ursache in einer anderen Absorberzusammensetzung haben könnte. Chemische Unterschiede in der Absorberschicht sind angesichts der unterschiedlichen Wachstumsvoraussetzungen (Substrat: Glas vs. Mo) naheliegend (unterschiedlicher Na-Gehalt bzw. Ga-Gradient). Da in diesem Zusammenhang noch viele Fragen offen sind und die P1-Linie aufgrund ihres Einflusses auf den Parallelwiderstand höchstwahrscheinlich auch für die Rückwärtsspannungsstabilität des Moduls von Bedeutung ist, soll die P1-Linie im Nachfolgeprojekt weiter untersucht werden.

### **2.1.7.3. Reverse-Eigenschaften**

Im Laufe des Projekts ist die Verschattungsstabilität als ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines CIGS-Moduls in den Fokus der Untersuchungen gerückt. CIGS-Zellen zeigen ein reversibles Durchbruchverhalten bis zum Auftreten irreversibler Schäden. Die Arbeiten der UOL umfassen auf der experimentellen Seite sowohl reversible als auch irreversible Analysen des Verhaltens bei negativen Spannungen und Strömen sowie 3D-Device-Simulationen des Durchbruchverhaltens.

#### **Reversible experimentelle Untersuchungen**

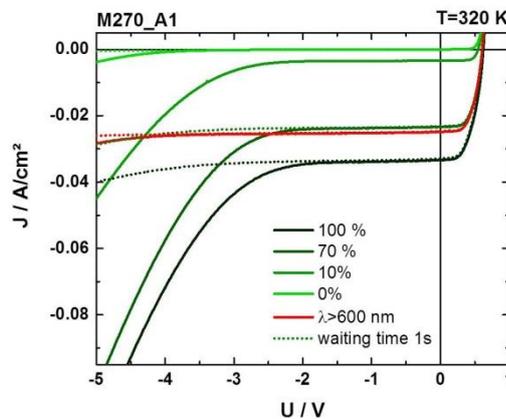
Um die Verschattungsstabilität und die Hot-Spot-Neigung eines Moduls bewerten zu können, ist es sinnvoll, die Reverse-Eigenschaften zunächst an einzelnen Zellen zu untersuchen. Da es in der Literatur Hinweise gibt, dass das Durchbruchverhalten von CIGS-Solarzellen von den Heterointerfaceeigenschaften abhängt (Szaniawski et al. 2013, *Thin Solid Films* 535, 326), wurde von MCT/NSE Zellmaterial auf 10x10 cm<sup>2</sup> Substraten mit verschiedenen Pufferdicken prozessiert, das anschließend in Oldenburg strukturiert und mit einem Metallgrid bedampft wurde. Die Untersuchungen des reversiblen Durchbruchverhaltens bei sukzessiver Erhöhung der negativen Spannung wurden bei verschiedenen Lichtintensitäten und -spektren durchgeführt. Die Abbildung 97 zeigt die für CIGS-Zellen typischen diodischen Durchbruchkennlinien. Die Rückwärtsspannung, bei der der Durchbruch einsetzt, sinkt mit zunehmender Lichtintensität. Im Diagramm links ist zusätzlich der Einfluss des Blauanteils im Beleuchtungsspektrum dargestellt. Unter Verwendung von Langpassfiltern, die für Wellenlängen unter 600 nm nicht durchlässig sind, tritt das Durchbruchverhalten erst bei deutlich höheren negativen Spannungen, vergleichbar zu denen der Dunkelkennlinie, auf (rote und gelbe Kurve). Eine Generation im Puffer führt somit zu kleineren Durchbruchspannungen. Der genaue Prozess ist dabei noch nicht abschließend verstanden. In Abbildung 97 (rechts) ist der Einfluss der CdS-Schichtdicke zu sehen, je dünner der Puffer, desto kleiner die Durchbruchspannung.



**Abbildung 97: Rückwärtsspannungsverhalten bei Zellen von MCT/NSE (01-150923-0027x). Links: Einfluss der Beleuchtungsintensität bzw. des Beleuchtungsspektrums unter Verwendung verschiedener Neutraldichte- (Schwarz) und Langpassfilter (90 nm dicker Puffer). Rechts: Einfluss der Pufferdicke bei unterschiedlichen Beleuchtungsintensitäten: 30 nm (279 und 274), 60 nm (270) und 90 nm (276).**

Um den Strom bei Rückwärtsspannungen zu begrenzen, wären diesen Ergebnissen zufolge die Verwendung dicker Pufferschichten bzw. Blaulichtfilter (Glas-/Fensterschichten mit kleiner Bandlücke) zu empfehlen. Allerdings ist es in Bezug auf die Verschattungstoleranz bzw. eine geringe Leistungsdissipation von Vorteil, wenn die Zelle eine reversible Strombelastbarkeit (bis zum  $I_{MPP}$ ) bei kleinen Spannungen aufweist (interner Bypass). Ausschlaggebend wird hier sein, unter welchen Bedingungen irreversible Schäden auftreten (s.u.).

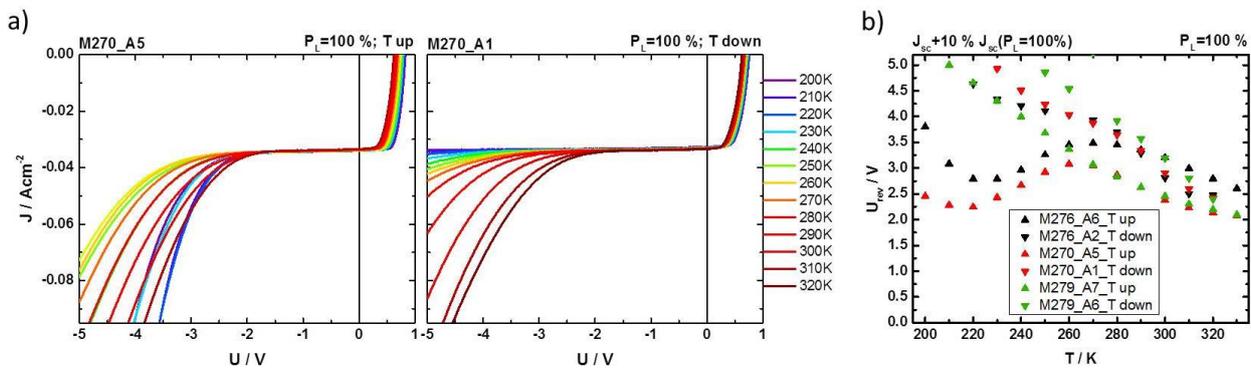
Untersuchungen des Projektpartners FZJ zeigen, dass die IV-Kennlinien sich bei verschiedener Scanrichtung der Spannung unterscheiden. Dieses Verhalten wird auf lokale Erwärmungen potentieller Durchbruchstellen zurückgeführt. Messungen mit einem Temperatursensor direkt auf der Zelle ergaben, dass sich die gesamte Zelle aufgrund der dissipierten Leistung bei negativen Spannungen nur um wenige Kelvin erwärmt. Werden Messungen so durchgeführt, dass jeweils zwischen zwei Messpunkten für eine Sekunde keine Spannung anliegt (Abbildung 98, gestrichelte Linien), lässt sich der Einfluss der Erwärmung auf die Kennlinie stark minimieren.



**Abbildung 98: Rückwärtsspannungsverhalten einer MCT/NSE-Zelle (01-150923-0270) für unterschiedliche Beleuchtungsintensitäten (100 %=1000 W/m<sup>2</sup>) bzw. unter Verwendung eines Langpassfilters (rote Kurve). Die Spannung wurde von positiven zu negativen Werten gescannt und lag entweder durchgehend an (durchgezogene Linien) oder war für 1s zwischen den einzelnen Messpunkten unterbrochen (Integrationszeit: 20 ms).**

Der starke Anstieg des Durchbruchstroms bei durchgängigem Spannungssweep und die starke Temperaturabhängigkeit sprechen für lokale Hot-Spots mit verstärktem Durchbruchverhalten.

Um den Einfluss der Temperatur auf das Rückwärtsspannungsverhalten der MCT/NSE-Zellen zu untersuchen, wurden IV-Kennlinien in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Beleuchtungsintensitäten aufgenommen. Damit die Einzelzellen während dieser temperaturabhängigen Messungen nicht irreversibel durchbrechen, wurde die Spannung auf  $-5\text{ V}$  begrenzt. Da es teilweise aufgrund des schwächeren Stromanstiegs schwierig ist, aus den Messungen mit Wartezeiten zwischen den Messpunkten eine Durchbruchspannung zu bestimmen, wurden die im Folgenden dargestellten Messergebnisse mit der Scanrichtung von positiven zu negativen Spannungen mit durchgehend angelegter Spannung und einer Integrationszeit von  $20\text{ ms}$  erzielt – d.h. mit Einfluss lokaler Durchbruchstellen.



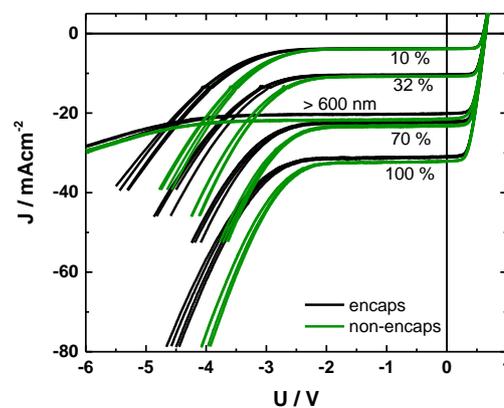
**Abbildung 99: Rückwärtsspannungsverhalten von MCT/NSE-Zellen (01-150923-00270). a) Temperaturabhängigkeit für aufsteigende (links) und für absteigende (rechts) Temperaturen (Standard-CdS-Pufferdicke). b) Betrag der „Durchbruch-“ Spannung als Funktion der Temperatur für verschiedene Pufferdicken ( $1000\text{ W/m}^2$ ).**

Die Abbildung 99a) zeigt IV-Kennlinien mit der Standard-CdS-Pufferschicht bei einer Beleuchtungsintensität von  $1000\text{ W/m}^2$  bei unterschiedlichen Temperaturen, wobei die Temperatur sukzessive erhöht (links) bzw. erniedrigt (rechts) wurde. Das Rückwärtsspannungsverhalten bei auf- und absteigender Temperatur unterscheidet sich deutlich für Temperaturen unterhalb von  $270\text{ K}$ . Zum Vergleich sind in der Abbildung 99b) die „Durchbruch-“ Spannungen  $U_{rev}$ , bei denen der Strom merklich (um  $10\%$  der Kurzschlussstromdichte) zunimmt, über der Temperatur aufgetragen. Die Zellen mit dicker und Standard-CdS-Pufferschicht zeigen für tiefe Temperaturen eine vergleichbare Abhängigkeit von der Temperatur. Für Zellen mit dünner CdS-Pufferschicht sowie alle Zellen bei Temperaturen  $>270\text{ K}$  nimmt die Spannung  $U_{rev}$  mit zunehmender Temperatur ab, der Temperaturkoeffizient ist somit in diesem Bereich negativ.

Diese Abhängigkeit lässt sich nicht mit dem Modell des Lawinendurchbruchs erklären, das mit einem positiven Temperaturkoeffizienten einhergeht. In der Literatur wird unter anderem das Modell der tunnelunterstützten Poole-Frenkel Leitung (defektunterstützte Band-zu-Band Tunnelgeneration) herangezogen, was kleine Durchbruchspannungen und einen negativen Temperaturkoeffizienten erklären könnte (Sun et al. 2015, *Proc. of the 42<sup>nd</sup> IEEE PV Specialists Conference*). Das Verhalten bei

unterschiedlichen Lichtintensitäten und die Blaulichtabhängigkeit sind hierbei noch nicht vollständig verstanden. Außerdem ist davon auszugehen, dass in der Zelle aufgrund der hohen negativen Spannungen Umladungseffekte auftreten und metastabile Zustände entstehen können, so dass den Messungen eine Rückwärtsspannungsbehandlung („reverse bias voltage treatment“) überlagert ist, was die Suche nach einem einheitlichen Modell für das Rückwärtsspannungsverhalten erschwert.

Um einen Einfluss der Verkapselung auf das Rückwärtsspannungsverhalten prüfen zu können, wurden Einzelzellen sowohl unverkapselt als auch verkapselt von MCT/NSE zur Verfügung gestellt. Die Kontaktierung erfolgte dabei über auf den Nachbarzellen aufgebraachte Bänder. Wie sich durch Vergleichsmessungen an unverkapselten Zellen herausstellte, ist bei der Kontaktierungsmethode über die Bänder der Serienwiderstand deutlich erhöht.

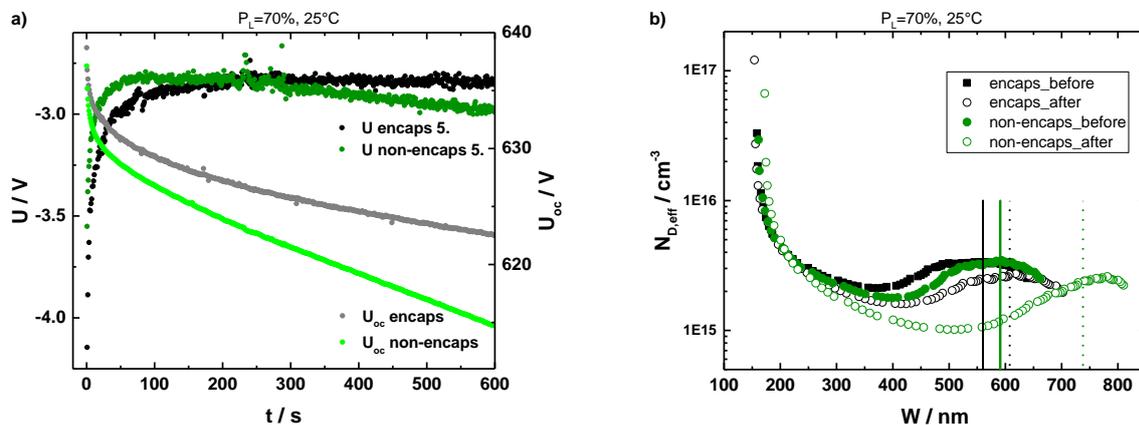


**Abbildung 100. Rückwärtsspannungsverhalten verkapselter und unverkapselter strukturierter MCT/NSE-Einzelzellen (01-160709-00510) unter variierter Beleuchtungsintensität ( $100\% \pm 1000 \text{ Wm}^{-2}$ ) und unter Beleuchtung mit  $\lambda > 600 \text{ nm}$ ; Scanrichtung von positiven zu negativen Spannungen.**

In der Abbildung 100 sind IV-Kurven von unverkapselten und verkapselten Einzelzellen bei verschiedenen Beleuchtungssituationen dargestellt. Um die Spannung in negativer Richtung zu begrenzen, wurden die Messungen mit der Scanrichtung von positiven zu negativen Spannungen mit durchgehend angelegter Spannung ohne Wartezeit zwischen den Messpunkten durchgeführt (Einfluss lokaler Erwärmungen). Wie bei den unverkapselten Zellen erhöht sich auch für Zellen mit Verkapselung der Betrag der Rückwärtsspannung  $U_{\text{rev}}$ , bei der der Strom merklich zunimmt, mit abnehmender Lichtintensität und unter Verwendung eines Langpassfilters. Es ist allerdings deutlich zu erkennen, dass die Verkapselung der Zellen zu einer Zunahme von  $U_{\text{rev}}$  unter gleichen Beleuchtungsbedingungen führt, was nicht auf die geringfügig niedrigere Kurzschlussstromdichte aufgrund verringerter Transmission bei Verkapselung zurückzuführen ist. Wie oben gezeigt wurde, weist  $U_{\text{rev}}$  für  $T > 270 \text{ K}$  einen negativen Temperaturgradienten auf, so dass  $U_{\text{rev}}$  mit steigender Temperatur abnimmt. Demnach könnte die erhöhte  $U_{\text{rev}}$  bei den verkapselten Zellen mit einer geringeren Temperatur im Material erklärt werden.

In einem nächsten Schritt wurde der Spannungsverlauf einzelner verschatteter Zellen aufgenommen unter Durchlass eines Stromes, den benachbarte Zellen unter Beleuchtung mit  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  im Maximum Power Point (MPP) liefern würden (Konstant-Strom-Messung). IV-Kennlinien zeigen einen

starken Einfluss der Temperatur auf das Rückwärtsspannungsverhalten (s.o.). Um Anhaltspunkte über die Temperaturentwicklung während der Konstant-Strom-Messung innerhalb der Zelle zu erhalten, wurde nach jeweils 5 Messpunkten die Leerlaufspannung  $U_{oc}$  bestimmt (annähernd:  $U_{oc} \propto -T$ ).



**Abbildung 101. Konstant-Strom-Messung. a)** Zeitliche Entwicklung der Spannung von MCT/NSE-Zellen (01-160709-00510) mit (schwarz) und ohne (grün) Verkapselung bei Beleuchtung mit  $700\text{ Wm}^{-2}$  unter Durchlass eines Stromes  $I(1000\text{ Wm}^{-2})$ @MPP bei  $25^\circ C$ . Die  $U_{oc}$  ist in grau und hellgrün dargestellt. **b)** Vergleich der Profile der effektiven Dotierung vor und nach der in a) gezeigten Messung.

Die Abbildung 101a) zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung für eine unter Verwendung eines Neutraldichtefilters zu 30 % verschattete Zelle. Es ist jeweils der 5. Messpunkt nach Durchlass des Stromes unter  $1000\text{ Wm}^{-2}$  im MPP dargestellt. Zu Beginn der Messungen treten hohe Rückwärtsspannungen auf, die für verkapselte Zellen im Allgemeinen höher sind als ohne Verkapselung. Der Betrag der Spannung verringert sich innerhalb von einigen Sekunden allerdings deutlich. Auch während der fünf aufeinanderfolgenden Messpunkte ist eine starke Änderung der Spannung zu verzeichnen (Abnahme bis zu 2 V innerhalb von ca. 400 ms, nicht gezeigt). Zusätzlich fällt die direkt im Anschluss an den dargestellten Messpunkt aufgenommene  $U_{oc}$  ab, was auf eine Zunahme der Temperatur (ca. 4–7 K in 50 s) innerhalb des Systems aufgrund der in der Zelle umgesetzten Leistung schließen lässt. Die starke Änderung der Rückwärtsspannung spiegelt vermutlich eher lokale Temperaturerhöhungen (Hot-Spots) wider, während die  $U_{oc}$  einen Rückschluss auf die Temperatur gemittelt über die gesamte Zellfläche geben sollte.

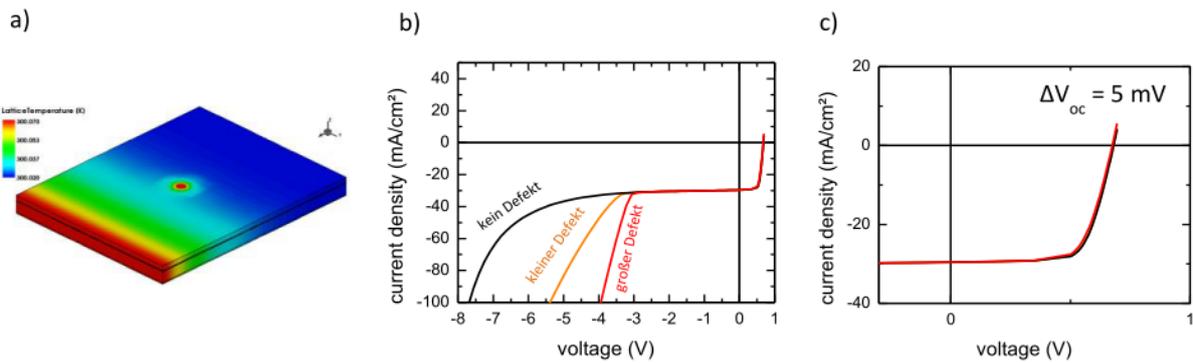
Im weiteren zeitlichen Verlauf bleibt die Rückwärtsspannung für verkapselte Zellen annähernd konstant, während sie für unverkapselte Zellen ein Minimum erreicht und danach wieder stetig zunimmt. Die offene Klemmenspannung nimmt jeweils kontinuierlich ab, im gleichen Zeitraum stärker für Zellen ohne Verkapselung. Dieses Verhalten kann nicht als reiner Temperatureffekt verstanden werden, da sonst nach einem gewissen Zeitraum ein Gleichgewicht mit konstanter Rückwärtsspannung und  $U_{oc}$  zu erwarten wäre. Auch konnte ein Verlust in  $U_{oc}$  von einigen mV im Vergleich der IV-Kennlinien unter STC-Bedingungen vor und nach der Konstant-Strom-Messung festgestellt werden, so dass aus dem Verlauf der  $U_{oc}$  nicht direkt auf die Temperaturentwicklung in der Zelle geschlossen werden kann. Unter Beleuchtung und erhöhten Temperaturen kann die  $U_{oc}$

wieder erhöht werden. Um diesen metastabilen Verlust in  $U_{oc}$  zu verstehen, wurde anhand von Kapazitäts-Spannungs-Messungen vor und nach der Konstant-Strom-Messung das aus dem Mott-Schottky-Plot extrahierte Profil der effektiven Dotierung bestimmt, siehe Abbildung 101b). Die Konstant-Strom-Messung führt sowohl für Zellen mit als auch für die ohne Verkapselung zu einer Verringerung der effektiven Dotierkonzentration, was einen metastabilen  $U_{oc}$ -Verlust erklären könnte. Für Zellen ohne Verkapselung ist sowohl die Verringerung der effektiven Dotierkonzentration als auch der  $U_{oc}$ -Verlust im Vergleich zu verkapselten Zellen verstärkt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das reversible Durchbruchverhalten maßgeblich von den Eigenschaften des Heterointerface abhängt und stark von den jeweiligen Betriebsbedingungen, wie Temperatur und Beleuchtungsintensität, beeinflusst wird.

### Simulation des Durchbruchverhaltens

Mit der Erweiterung des Simulationsmodells für Defekte (s. Seite 91) um ein geeignetes physikalisches Modell zur Simulation des Durchbruchverhaltens konnten die Zusammenhänge zwischen Zell- bzw. Materialeigenschaften und Rückwärtsspannungsverhalten studiert werden. Die simulatorische Umsetzung des Durchbruchverhaltens wurde mittels Lawinendurchbruch realisiert und ergab eine starke Abhängigkeit der Durchbruchspannung von der Dotierung sowohl im Puffer als auch im Absorber. Eine höhere Dotierung verursacht stärkere Felder in der Raumladungszone, was die Stoßionisation begünstigt. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass lokal verschiedene Feldstärken (z. B. durch Defekte) zu lokal unterschiedlichen Durchbruchspannungen führen. An Orten mit erhöhter Feldstärke (kleine Durchbruchspannung) wird der Durchbruchstrom vorrangig erzeugt. Ein Simulationsbeispiel mit einer Zelle mit lokalem Defekt (Störstellenüberhöhung – schwache Diode) ist in Abbildung 102 dargestellt.



**Abbildung 102: Simulation eines lokalen Defekts. a) Simulationsstruktur für einen Ausschnitt aus einem Zellstreifen mit angelegter Spannung (+1 V). Die Farbcodierung steht für die Materialtemperatur. b) Strom-Spannungs-Kennlinie mit Durchbruchcharakteristik für defektfreie Struktur und mit kleinem und großem Defekt. c) Ausschnitt Performance-Bereich der in b) dargestellten Kennlinien.**

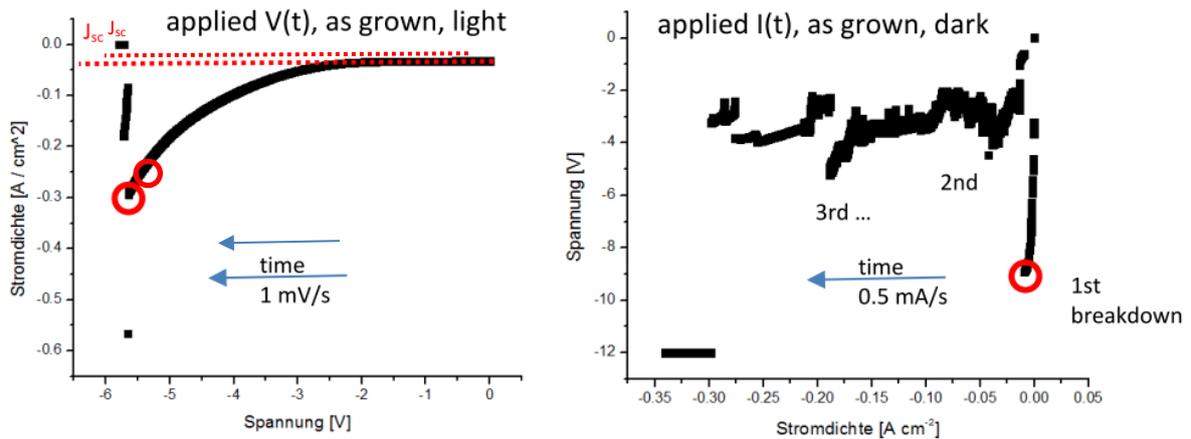
Man erkennt klar den Einfluss des Defektes auf das Durchbruchverhalten, wobei größere Defekte zu verringerten Durchbruchspannungen führen. Die Effizienz bzw. Leerlaufspannung ist von diesem Defekt kaum beeinflusst. Dies bedeutet, dass im Allgemeinen aus der IV-Charakteristik im 4. Quadranten nicht auf das Verhalten unter Rückwärtsspannung geschlossen werden kann.

In diesem Modell führt die mit dem Durchbruch einhergehende lokale Wärmeentwicklung allerdings zu einer Abschwächung des Durchbruchstroms, da die Feldstärke in der Raumladungszone mit zunehmender Temperatur sinkt und damit auch die Stoßionisationswahrscheinlichkeit. Eine verstärkende Rückkopplung durch Wärmeentwicklung am Hot-Spot, wie wir sie aus den Messungen (siehe Abbildung 99) gesehen haben ist damit nicht zu erklären. Hier führt die oben erwähnte tunnelgestützte Poole-Frenkel Leitung theoretisch zu korrektem Verhalten.

### **Irreversible experimentelle Untersuchungen**

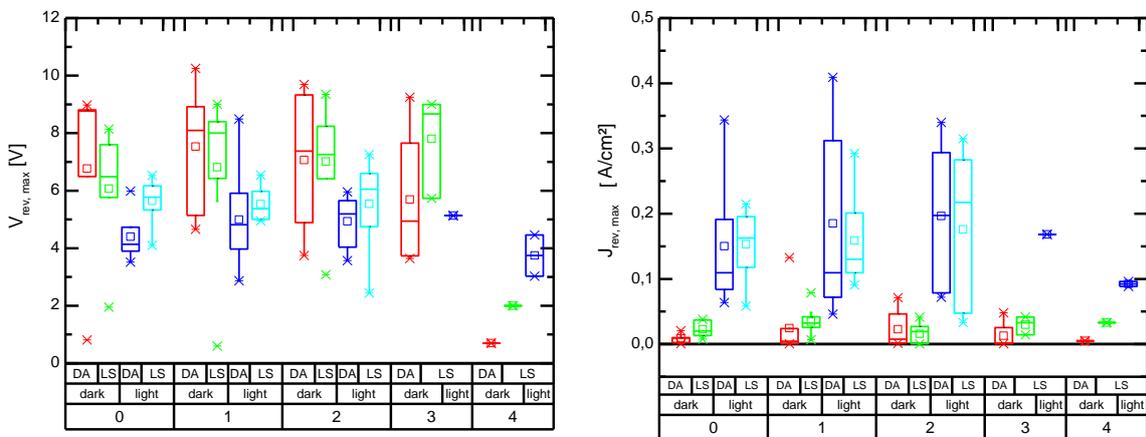
Um zu klären, unter welchen Bedingungen es zu einem irreversiblen Schaden durch Rückwärtsspannung kommt, ist eine große Versuchsreihe erforderlich, um verlässliche Aussagen zum „typischen“ Verhalten der Zellen treffen zu können. Beispielsweise gilt es zu klären, ob die Spannung oder der Strom Ursache für die Zerstörung ist und ob es einen Unterschied zwischen beleuchtetem und unbeleuchtetem Betrieb gibt. Zur Bewertung der Stabilität des Moduls bei Normalbetrieb oder bei Verschattung des Moduls sind Erkenntnisse dazu von großer Bedeutung. Zur Untersuchung des irreversiblen Durchbruchverhaltens wurden daher etwas mehr als 100 Zellen einer konstanten negativen Spannung oder einem konstanten negativen Strom ausgesetzt, wobei die Spannungs- bzw. Stromwerte sukzessive (nach 1–2 Sekunden um 1 mV bzw. 0,5 mA) erhöht wurden (Richter et al. 2017, EUPVSEC). Direkt vor dem Versuch wurde die IV- und CV-Kennlinie aufgenommen. Bei allen Proben wurden zusätzlich DLIT Messungen bei Spannungen von +1 V und –3 V durchgeführt, um bereits bestehende Defekte zu identifizieren. Die DLIT-Ergebnisse wurden genutzt, um die Zellen in 5 Defektklassen (0 = keine Defekte ... 4 = sehr starke Defektsignatur im Zellinneren) einzuteilen. Ein Teil der Proben wurde vor dem Versuch einem Light-Soaking (1000 W/m<sup>2</sup> bei 90 °C für 9 Stunden) unterzogen. Die Versuche wurden im Dunkeln und bei Beleuchtung (1000 W/m<sup>2</sup>) durchgeführt. Daraus ergeben sich acht Experimentkonstellationen (V / I, as grown / LS, dark / light) mit jeweils 10–14 Zellen.

Bei jedem irreversiblen Durchbruchversuch wurde der maximale Belastungszustand (Spannung, Stromdichte) kurz vor einer massiven Änderung der Strom-Spannungscharakteristik identifiziert. Die Abbildung 103 zeigt exemplarisch das Durchbruchverhalten zweier Zellen mit verschiedenen Messbedingungen (angelegte Spannung & beleuchtet bzw. angelegter Strom & dunkel). Es ist anzumerken, dass der Durchbruch selbst meist nicht direkt mit dem Umschalten auf den nächsten Spannungs- bzw. Stromwert eintritt. Die beobachtete Verzögerung von ca. 0,5 Sekunden lässt auf Erwärmungsprozesse schließen, die den Durchbruch einleiten („thermal runaway“). Sofern ausreichend genau aufgezeichnet, konnte ein maximaler Strom während des Durchbruchs von ca. 1 A gemessen werden. Dies entspricht in etwa dem  $I_{mpp}$  im Modul und steht damit im Modul zur Verfügung. Oftmals reduziert sich der Rückwärtsstrom nach dem Durchbruch deutlich. Hier ist davon auszugehen, dass die lokalen Defekte, die den Durchbruch erlauben, durch verdampftes TCO isoliert werden.



**Abbildung 103: Quasi-stationäre IV Charakteristik, bei der Spannung (links) oder Strom (rechts) nach kurzen Haltezeiten schrittweise erhöht wurden und die Stromdichte bzw. Spannung gemessen wurden. Rote Markierungen identifizieren den Zustand kurz vor dem irreversiblen Durchbruch (Punkt maximaler Belastung).**

Die gemessenen Belastungsgrößen sind in Abbildung 104 dargestellt. Hierbei wurden die Anregungsarten  $V(t)$  und  $I(t)$  zusammengefügt, da diese die gleichen Trends zeigen, sowie die Ergebnisse in die Defektkategorien 0–4 unterteilt. Defektkategorie 3 und 4 (viele Defekte) enthalten dabei nur sehr wenige Proben.



**Abbildung 104: Maximale Belastung vor Durchbruch: Maximale Rückwärtsspannung (links) und Stromdichte (rechts) kurz vor irreversiblen Durchbruchschaden. Die Proben sind gruppiert nach DLIT-Defektsignaturgruppe (0–4), Hell- und Dunkelmessung und Vorbehandlung (LS – Light-Soaking, DA – Dunkellagerung).**

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus diesen Ergebnissen ableiten:

1. Die Belastbarkeit ist – wie bei den Untersuchungen zum reversiblen Durchbruch gezeigt – beleuchtungsabhängig. Die maximale Belastungsspannung ist im Dunkeln etwas geringer als unter Beleuchtung, wobei der Belastungsstrom unter Beleuchtung deutlich größer ist. Im Dunkeln wurde teilweise nicht der Kurzschlussstrom der Zelle ausgehalten. Da der Kurzschlussstrom im Normalbetrieb zu keinen Schäden führt und aufgrund der Tatsache, dass die Belastungsspannung im Vergleich zum Strom relativ konstant ist, lässt sich der Schluss ziehen, dass der Strom nicht unmittelbar die Ursache für die Zerstörung ist. Hier ist

vielmehr das elektrische Feld entscheidend, das entweder direkt anliegt (= Spannung angelegt) oder sich ergibt, wenn ein Strom durchgetrieben wird (= Strom angelegt).

2. Die Vorkonditionierung durch Light-Soaking (LS) führt im Dunkeln zu einer größeren Strombelastbarkeit, wohingegen unter Beleuchtung kein signifikanter Unterschied zu sehen ist. Die Spannungsbelastbarkeit unter Beleuchtung steigt nach LS und ändert sich nicht im Dunkeln. Dabei streut die Spannung deutlich weniger, wenn die Proben vorbehandelt wurden (Quartilbreite geringer im Box-Plot). Der Einfluss des LS ist hier noch nicht eindeutig identifiziert. Offenbar verringert sich die Beleuchtungsabhängigkeit der Belastungsgrenze geringfügig, wenn die Proben höhere Ladungsträgerdichten aufweisen (LS vorkonditioniert).
3. Der Einfluss von Defekten ist außer im Falle von sehr starken DLIT-Defektsignaturen (Kategorie 4) marginal. Die Mittelwerte von Strom- und Spannungsbelastung steigen leicht mit erhöhter Defektkategorie. Das deutet darauf hin, dass vorhandene kleine Defekte eine Zerstörung hinauszögern. Bei sehr starken Defekten sinkt die Belastbarkeit jedoch deutlich. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die vorhandenen Defekte einen irreversiblen Durchbruch auf eine sehr lokale Position begünstigen, wie es in den o. g. Simulationen gezeigt wurde. Es ist dabei anzumerken, dass bei Zellen mit vorher identifizierten Defekten (Defektklasse 1–4) ca. 50 % der Durchbruchschadenssignaturen an genau diesen Stellen beobachtet wurden. Bei der anderen Hälfte traten neue sichtbare Defektstrukturen an anderen Positionen auf. Bei sehr starken Defekten (4) ist die Übereinstimmung größer als bei weniger starken Defekten.

Im Hinblick auf die Stabilität der Zelle während des Modulbetriebs zeigt sich also, dass Zellen zum irreversiblen Durchbruch neigen, wenn sie im Dunkeln (verschattet) betrieben werden, vorher nicht beleuchtet waren (kein LS) und sehr starke Defekte aufweisen. Im Falle eines Betriebes der Zelle ohne Beleuchtung und ohne Vorbehandlung kommt es bereits bei Strömen, die kleiner als der Kurzschlussstrom sind, zu irreversiblen Schäden. Eine Komplettabschattung ist daher zu vermeiden.

Diese Daten wurden vom Projektpartner FZJ mit Methoden der Clusteranalyse untersucht, um Korrelationen zwischen Durchbruchspannungen, -strömen und den einzelnen Solarzellenparametern ermitteln zu können. Hierbei konnten jedoch keine signifikanten Korrelationen festgestellt werden. Es sind kleine Unterschiede zwischen Strom- und Spannungsgetriebenen Messungen ersichtlich, was mit der unterschiedlichen Entwicklung der dissipierten Leistung zusammenhängen kann. Durchbrüche treten im Dunkeln wie oben beschrieben schon bei relativ kleinen Strömen auf, die kleiner sind als der Kurzschlussstrom eines 20 cm langen Zellstreifens.

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Reverse-Eigenschaften von vielen Faktoren, wie Eigenschaften des Heterointerface etc. abhängig sind und sich stark mit den jeweiligen Betriebsbedingungen wie Beleuchtung, verschiedenen Rampen (Schrittweiten und Zeiten) etc. ändern. So brechen Zellen z.B. eher im Dunkeln oder bei hohen Temperaturen durch bzw. wenn sie starke Defekte aufweisen. Weitere Untersuchung sind hier notwendig, um auf Basis eines Modells Vermeidungsstrategien für irreversible Durchbrüche zu entwickeln und die Verschattungstoleranz zu erhöhen. Insbesondere sollte dafür auch untersucht werden, welche Bedingungen bei Abschattungen real im Feld auftreten.

## Zusammenfassung AP6

Im AP6 sollte ein grundlegendes Verständnis materialbestimmter Verlustmechanismen auf mikroskopischer Ebene generiert werden.

Dazu wurde zum einen eine umfangreiche **Grundcharakterisierung** der relevanten physikalischen Eigenschaften der untersuchten Materialien durchgeführt. So konnte beispielsweise die laterale Streuung der  $V_{oc}$  bei MCT/NSE- und BSCT-Modulen auf unterschiedlich starke Rekombination in der Raumladungszone zurückgeführt werden. Untersuchungen der metastabilen Zustandsänderung unter Beleuchtung („Light Soaking“) zeigten, dass neben einem Ansteigen der Absorber-Dotierkonzentration die Verschiebung eines elektronischen Defektniveaus einen kompensierenden Mechanismus bzgl. der  $V_{oc}$  darstellt, der das unterschiedliche Verhalten von MCT/NSE- und BSCT-Zellen erklären kann. Unter Berücksichtigung der in der Grundcharakterisierung gesammelten Ergebnisse konnte schließlich für beide Materialsysteme (MCT/NSE und BSCT) eine Baseline für ein Simulationsmodell erstellt und für die weiteren Simulationsarbeiten im Projekt zur Verfügung gestellt werden.

Des Weiteren wurden **Materialdefekte** hinsichtlich ihrer Ursachen und Auswirkungen auf die Modulperformance analysiert, da Defekte sowohl einen direkten Einfluss auf die Effizienz des Moduls haben können, als auch die Rückwärtsspannungsstabilität maßgeblich beeinflussen können. Die Arbeiten hierzu umfassten 3D-Bauteilsimulationen, mit denen der Einfluss verschiedener Defektmechanismen auf die lokale Strom-Spannungs-Kennlinie und die Temperaturverteilung in der Zelle untersucht wurden. Mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB) wurden künstliche Defekte im Material eingebracht, um Vorhersagemethoden zur Defektschädlichkeit zu kalibrieren (s.a. AP2). Weitere experimentelle Untersuchungen konnten z.B. zeigen, dass die „Schädlichkeit“ eines Defekts auch in der Photolumineszenz-Lebensdauer abgebildet wird, und dass die P1-Strukturierungslinie sowohl ein anomales Verhalten der EQE als auch veränderte Absorbereigenschaften aufweist.

Darüber hinaus stellte die umfassende Untersuchung der Verschattungsstabilität bzw. des **Durchbruchverhaltens** einen weiteren wichtigen Schwerpunkt in diesem AP dar. Es zeigte sich, dass das Durchbruchverhalten von sehr vielen Faktoren beeinflusst wird: von Betriebsbedingungen wie Temperatur, Beleuchtungsintensität und Beleuchtungsspektrum; von Probeneigenschaften wie CdS-Schichtdicke und Verkapselung; aber auch von Details in den Messparametern. Da es durch die bei der Messung angelegte Rückwärtsspannung zu einer metastabilen Zustandsänderung der Zelle kommt, wird eine Aussage über die dem reversiblen Durchbruch zugrundeliegenden Mechanismen zusätzlich erschwert. Auch wenn daher noch kein einheitliches Modell des reversiblen Durchbruchs gefunden werden konnte, so schließt die beobachtete Temperaturabhängigkeit (negativer Temperaturkoeffizient) zumindest das Modell des Lawinendurchbruchs aus. Weitere Untersuchungen zum irreversiblen Durchbruch ergaben, dass Zellen zum irreversiblen Durchbruch neigen, wenn sie im Dunkeln (verschattet) betrieben werden, vorher nicht beleuchtet waren (kein Light Soaking) und sehr starke Defekte aufweisen. Dabei treten Durchbrüche im Dunkeln schon bei relativ kleinen Strömen auf, die zum Teil kleiner sind als der Kurzschlussstrom. Bereits eine schwache Beleuchtung hat hier einen großen Effekt, der bislang noch unzureichend verstanden ist.

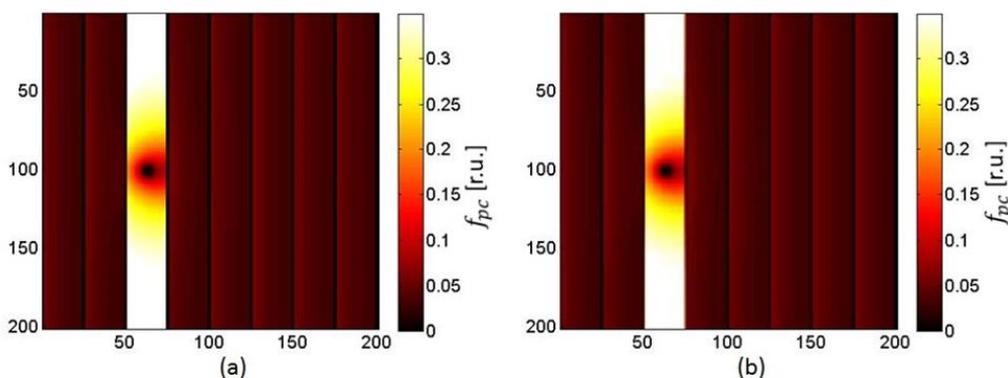
## 2.1.8. Modellbildung und Simulation (AP7)

### Beitrag FZJ:

Dieses Arbeitspaket sollte ursprünglich erst im dritten Quartal starten. Auf dem Kick-off Meeting im Oktober 2014 wurde beschlossen, schon früher mit den ersten Arbeiten in diesem Arbeitspaket zu beginnen. Aufgrund der Vielzahl der daran beteiligten Partner und der teilweise unterschiedlichen Modellierungs-Schwerpunkten und Expertisen der Partner wurde innerhalb des zweiten Quartals ein Simulationsworkshop am 23.03.2015 in Jülich durchgeführt.

Am 01.10.2015 wurde zusätzlich im Forschungszentrum Jülich ein Workshop über das PVMOS Simulationstool durchgeführt. In diesem wurde eine praktische Einführung in PVMOS gegeben. Beteiligt waren fast alle Partner des Konsortiums (insgesamt 11 Personen). Der Workshop wurde durch den Entwickler von PVMOS, Dr. B. Pieters durchgeführt. Die Resonanz war sehr positiv.

In diesem Arbeitspaket wurde zunächst der 2D-PVModul Simulator PVMOS erweitert, sodass er eine Bestimmung des lokalen Photostromsammlungskoeffizienten  $f_{pc}$  ermöglicht ohne die Nutzung der lokalen Spannungen. Dies ist einerseits nützlich um zu überprüfen, dass die Bestimmung von  $f_{pc}$  mittels differentieller Lumineszenz Messungen möglich ist und andererseits erhält man so Informationen über die Aussagekraft von  $f_{pc}$  über den absoluten gesammelten Photostrom. Die experimentelle Bestimmung von  $f_{pc}$  ohne differentielle Lumineszenzmessung ist sehr aufwendig, da dafür lokal aufgelöst die Beleuchtung geändert werden müsste. In einer Simulation ist dies einfacher, da schnell lokaler Parameter geändert werden können. Zur Bestimmung von  $f_{pc}$  wird bei der PVMOS Simulation in einem kleinen Bereich der Photostrom geändert und die Auswirkung auf den Strom durch das gesamte simulierte System registriert. Die Änderung des gesamten Stroms kann nun dem gewählten Bereich zugeordnet werden und daraus kann der lokale Photostromsammlungskoeffizient bestimmt werden. In Abbildung 105 sieht man  $f_{pc}$  simuliert für ein Modul. In (a) wurde  $f_{pc}$  durch die lokalen Spannungen bestimmt (wie es im experimentellen Fall gemessen würde) und in (b) wurde  $f_{pc}$  durch lokale Änderungen des Photostroms bestimmt.



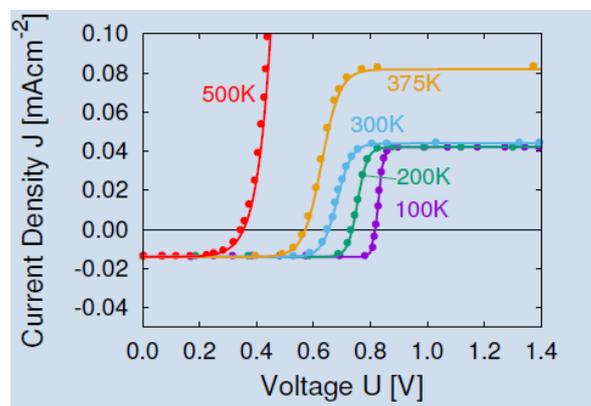
**Abbildung 105: (a)  $f_{pc}$  bestimmt aus den lokal berechneten Diodenspannungen. (b) bestimmt aus lokaler Variation des Photostroms. Beide Methoden liefern wie erwartet die gleichen Ergebnisse**

Man sieht, dass beide Methoden gleiche Ergebnisse liefern und somit die Simulationen mit unseren Annahmen konsistent sind.

Des Weiteren ist es mit PVMOS nun auch möglich, nicht nur den differentiellen Photostromsammlungskoeffizienten lokal zu bestimmen sondern, auch etwas wie den gesamten gesammelten Photostrom einer Region. Dazu wird der der komplette Photostrom einer Region gleich 0 gesetzt und die Auswirkung auf den gesamten Strom beobachtet. Diese Methode ist nützlich um die Aussagekraft des differentiellen Photostromsammlungskoeffizienten auf absolute Ströme zu erweitern.

Allerdings funktionieren die Simulationen (über die Variation des lokalen Photostroms) nur bei niedrig gewählten internen Widerständen, da die Stromsammlung von Strom an den Grenzen zu den Front und Rückkontakten bestimmt wird und somit nur Verluste durch diese berücksichtigt. Der wahre Photostromsammlungskoeffizient berücksichtigt aber zusätzlich Verluste die durch interne Widerstände entstehen, bevor der generierte Photostrom überhaupt den Front und Rückkontakt erreicht hat. Dieses wurde gegen Ende der Projektlaufzeit durch die Erweiterung von PVMOS durch ein neues Ersatzschaltbild (siehe letzter Abschnitt der AP Beschreibung) berücksichtigt.

Zusätzlich wurde in PVMOS ein schnelles und robustes Phototransistor-Modell implementiert. Es basiert auf einem modifizierten Gummel-Poon Transistor Modell (asymmetrische Basis-Emitter (BE) und Basis-Collector (BC) Junctions). Dieses Modell wurde anhand von Referenzdaten von der HS ULM (VBIC Modell basierend) verifiziert (Abbildung 106).



**Abbildung 106: Vergleich der J/V Kennlinien eines Phototransistors bei verschiedenen Temperaturen, berechnet mit dem Gummel-Poon und dem Referenz VBIC Modell. Die Punkte im Diagramm repräsentieren die Berechnungen basierend auf dem VBIC Modell, die Linien die berechneten Kurven basierend auf dem PVMOS (Gummel-Poon).**

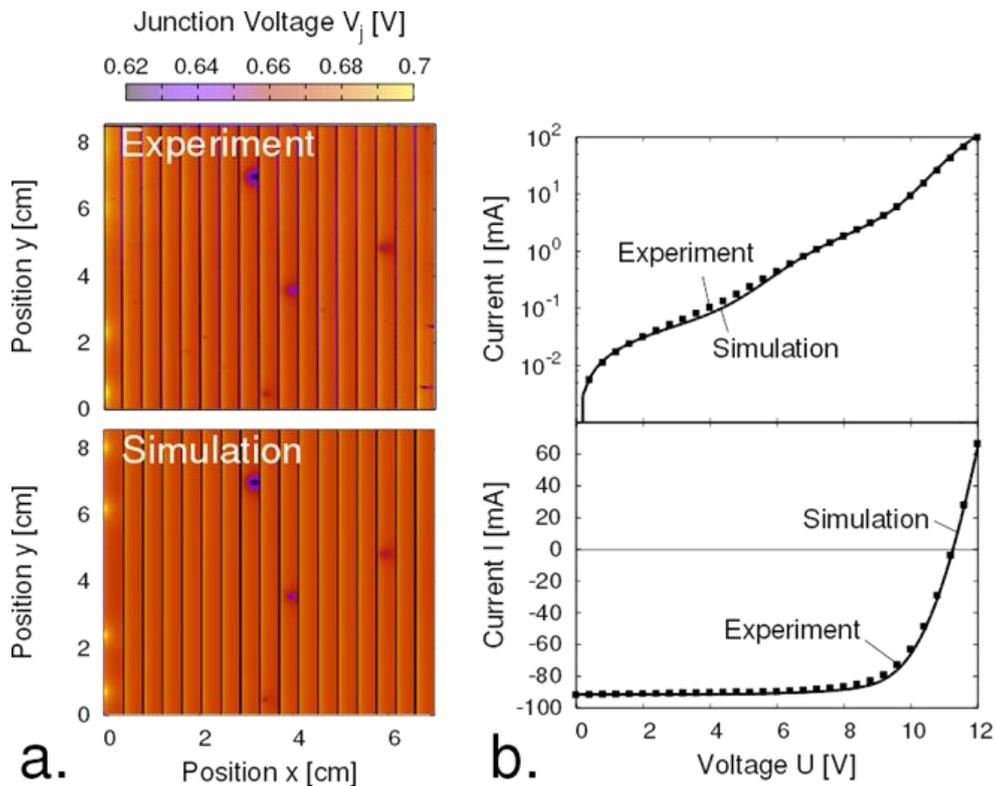
### 2.1.8.1. Simulationsparametersatz für CIGS Simulationen

Basierend auf MCT/NSE-Mini-Modulen wurde ein „Baseline“ Parametersatz für PVMOS Simulationen entwickelt. Die Eingangsparameter wurden so angepasst, dass sie den Dunkel- und Hell-IV-Eigenschaften sowie den EL-Experimenten nahe kommen. Das nun betrachtete MCT/NSE Mini-Modul hat eine Fläche von 7,0 x 8,6 cm<sup>2</sup> und besteht aus 17 in Reihe geschaltete Zellen. Wir haben die Probe mit je fünf Leitungen auf jeder Seite kontaktiert, um den Serienwiderstand möglichst klein zu halten, wobei zwei Leitungen als Messleitungen benutzt wurden und die übrigen 2x4 Leitungen Strom führen.

Abbildung 107 zeigt einen Vergleich zwischen experimentellen und Simulationsergebnissen für das Mini-Modul. Abbildung 107a zeigt das Bild der lokalen Spannungen („Junction-Voltage“), welches experimentell aus einem EL-Experiment (oben) bestimmt und mit PVMOS simuliert wurde (unten). Die an das Modul angelegte externe Spannung (Spannungsdifferenz zwischen den beiden Messleitungen) beträgt 11,8 V. Mehrere kleine Defekte sind im Experiment sichtbar. Um eine gute Übereinstimmung zu erzielen, fügten wir auch Defekte an den gleichen Stellen hinzu und passten die Eigenschaften so an, dass sie dem Experiment nahe kamen. Zusätzlich können auf der linken Seite des Geräts 4 Bereiche mit einer erhöhten Übergangsspannung beobachtet werden. Dieser Anstieg der Übergangsspannung ist auf eine Erhöhung der Stromdichte in der Nähe der Stromzuführungen zurückzuführen. Dieser Effekt ist auf der rechten Seite nicht sichtbar, da die rechte Seite von einer Molybdänelektrode kontaktiert wird, welche leitfähiger ist.

Parameter		Wert	Einheit
Sättigungsstromdichte	$J_{01}$	0.155	pAcm <sup>-2</sup>
Sättigungsstromdichte	$J_{02}$	19	nAcm <sup>-2</sup>
Photostromdichte	$J_{ph}$	28.1	mAcm <sup>-2</sup>
Serienwiderstand	$R_s$	0.3	Ωcm <sup>2</sup>
Parallelwiderstand	$R_p$	1.7e+04	Ωcm <sup>2</sup>
Molybdän Flächenwiderstand	$R_b$	0.6	Ω
TCO Flächenwiderstand	$R_f$	24	Ω

**Tabelle 7: Auflistung der Simulationsparameter verwendet zur Simulation des Mini-Moduls. Es wurde ein Zwei-Dioden-Modell verwendet, daher die beiden angegebenen Sättigungsstromdichten. Hierin repräsentiert  $J_{01}$  eine Diode mit einem Idealitätsfaktor 1 und  $J_{02}$  eine Diode mit einem Idealitätsfaktor von 2.**



**Abbildung 107: Vergleich zwischen Experiment und Simulation für ein MCT/NSE-Mini-Modul. a) Vergleich zwischen experimentellen (oben) und simulierten (unten) Junction Voltage Bildern. b) Vergleich zwischen der dunklen (oben) und der hellen (unten) IV-Charakteristik.**

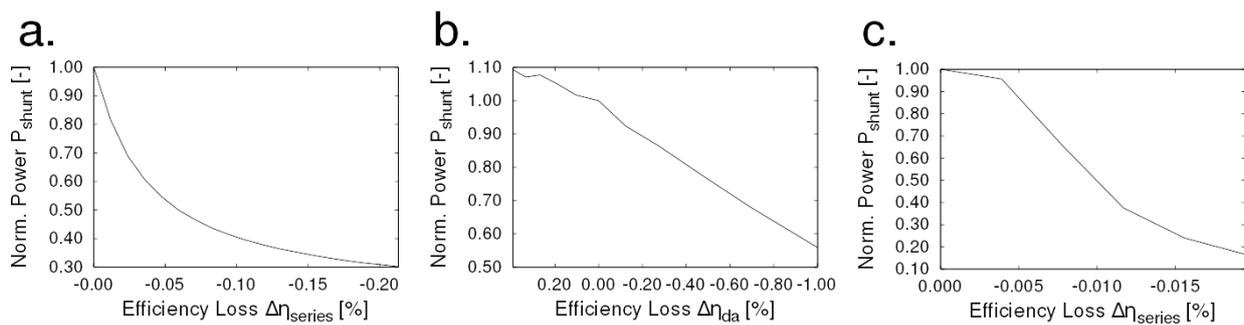
Die simulierte laterale Junction-Voltage (Spannung) zeigt ebenfalls auf der linken Seite eines Zellstreifens eine erhöhte Spannung. Abbildung 107b zeigt einen Vergleich zwischen den experimentellen und simulierten Hell-Dunkel-IV-Eigenschaften, wobei die Quadrate die experimentellen Ergebnisse und die Linien Simulationen darstellen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Experiment sehr gut mit Simulationen übereinstimmt. Der benutzte Basis Parametersatz ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

### **2.1.8.2. Reduktion der Auswirkungen von Shunts – Eine Simulations-Studie**

In diesem Abschnitt diskutieren wir drei Möglichkeiten die Auswirkungen von Shunts (Kurzschlüssen) zu mildern. Die Methoden, die wir dabei untersucht haben, sind:

1. Erhöhung des Flächenwiderstandes des Rückkontakts,
2. Reduktion der Zellenbreite,
3. Parallele Trennlinien.

Methode 1 und 2 zielen beide darauf ab, den Widerstand entlang der Länge der Zellstreifen zu erhöhen. Da schwerwiegende Defekte (Kurzschluss) zu Strömen entlang des Zellstreifens führen, führt eine Erhöhung dieses Widerstandes zu einer Reduzierung des Einflusses eines Kurzschlusses.



**Abbildung 108:** Die normierte Leistungsdissipation im Kurzschluss aufgetragen gegen den Wirkungsgradverlust für die drei Methoden zur Kurzschluss-Minderung: a) Erhöhung des Flächenwiderstandes des Rückkontakts, b) Abnahme der Zellenbreite, c) Methode Einführung paralleler Trennlinien.

Methode 1 führt zu einer Erhöhung des Serienwiderstandes, jedoch wird der Serienwiderstand hauptsächlich durch die Widerstandselektrode (TCO) bestimmt, während der Widerstand entlang der Länge eines Zellenstreifens hauptsächlich durch die am meisten leitfähige Elektrode (Mo) bestimmt wird. Durch die Erhöhung des Widerstands des Rückkontakts erwarten wir, dass die Auswirkungen von Kurzschlüssen verringert werden auf Kosten eines zusätzlichen kleinen Serienwiderstands.

Methode 2 führt zu einer Verringerung des Serienwiderstands pro Zelle, es führt jedoch auch zu einer Zunahme der inaktiven Fläche, d. h. diese Methode (2) ist ein Kompromiss zwischen Shunt-Verlusten und inaktiven Fläche.

Methode 3 reduziert den maximalen Strom durch einen Defekt, indem das Modul in mehrere parallele Zellketten aufgeteilt wird. Die dazu benötigten Separationslinien führen zu einer zusätzlichen inaktiven Fläche.

Anschließend wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. In dieser wurden fünf in Reihe verbundene Zellen mit einer Länge von  $l = 40$  cm angenommen (mit Zellbreite von  $b = 0,38$  cm), von denen die dritte Zelle abgeschattet ist. In der Mitte dieser dritten Zelle wurde ein Defekt (Kurzschluss) gesetzt. Das Minimodul wird unter Kurzschlussbedingungen betrieben. Für die Simulationen wurden die oben beschriebenen Basis-Parameter verwendet.

Aus der Simulation bestimmen wir die normierte Leistung im Kurzschluss, den normierten Serienwiderstand und die normalisierten Verluste durch inaktive Flächen (alles im Verhältnis zu den Baseline Parametern). Der normalisierte Serienwiderstand und die Verluste durch inaktive Flächen werden dann in eine Schätzung des Wirkungsgradverlustes in absoluten Prozentsätzen im Vergleich zu der Basisliniensimulation übersetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 108 dargestellt.

Aus Abbildung 108 folgt, dass bei Methode 1, um eine Reduzierung der Kurzschlussverluste um 50% zu erreichen, eine Effizienz von etwa 0,05% verloren geht. Im Vergleich, mit Methode 2 würden wir mehr als 1% und mit Methode 3 etwas weniger als 0,01% verlieren. Daraus folgt, dass Methode 3 der beste Weg ist, um die Auswirkungen von Kurzschlüssen abzuschwächen. Es ist jedoch anzumerken, dass für diese Simulationen angenommen wurde, dass der Ritzprozess für die parallelen Schnitte

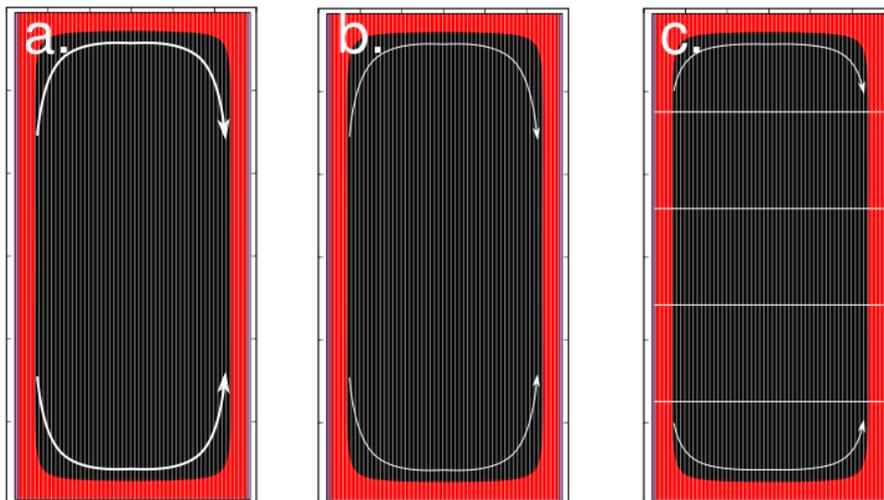
keine zusätzlichen Defekte oder andere Probleme hervorruft. Methode 1 kann immer noch relevant sein, da sie keinen zusätzlichen Verarbeitungsschritt erfordert und die Leistung immer noch mit der von Methode 3 vergleichbar ist. Die Verringerung der Zellenbreite stellt sich als nicht sehr effektive Methode heraus.

### **2.1.8.3. Auswirkung von Inhomogenitäten auf Shunts**

Im letzten Abschnitt haben wir Methoden diskutiert, um die Auswirkungen von Kurzschlüssen auf die Leistung von Solarzellen und die Bildung von Hot-Spots zu mildern. Im Folgenden sind die Arbeiten zu der Wechselwirkung von Iso-Linien mit Inhomogenitäten des Flächenwiderstandes und die Wechselwirkung des Molybdän-Rückkontaktflächen-widerstandes mit Inhomogenitäten des Flächenwiderstandes zusammengefasst.

Man erwartet, dass in Gegenwart von Inhomogenitäten die Verluste, die mit den im letzten Abschnitt behandelten Methoden zur Reduktion des Shunt Einflusses verbunden sind, zunehmen. Inhomogenitäten können von Modul zu Modul variieren, jedoch sind oft auch systematische Variationen vorhanden, die von der Prozessbedingungen (Geometrien der Depositionsanlagen) und Verarbeitungsbedingungen herrühren. Sehr häufig treten Randeffekte auf, die zum Beispiel zu niedrigeren Photoströmen oder höheren Schichtwiderständen nahe dem Modulrand führen.

Abbildung 109a zeigt ein Solarmodul, bei dem wir im rot markierten Bereich einen höheren Schichtwiderstand annehmen. Ein solches Muster im Flächenwiderstand würde zu Strömen entlang der Längsrichtung der Zellenstreifen führen.



**Abbildung 109: a) Darstellung von "Kompensations-" Strömen bei Vorliegen von Inhomogenitäten im Randbereich (rote Fläche). b) Ein Anstieg des Mo-Flächenwiderstands kann die Kompensationsströme reduzieren. c) Iso-Schnitte sollen Kompensationsströme reduzieren.**

Bis zu einem gewissen Grad sind solche "Kompensations-" Ströme vorteilhaft, da sie eine bessere Stromentnahme aus bestimmten Bereichen im Solarmodul ermöglichen (die oberen und unteren Teile in der Abbildung). Die Methoden zur Reduktion von Shunteinflüssen, basieren nun alle auf der

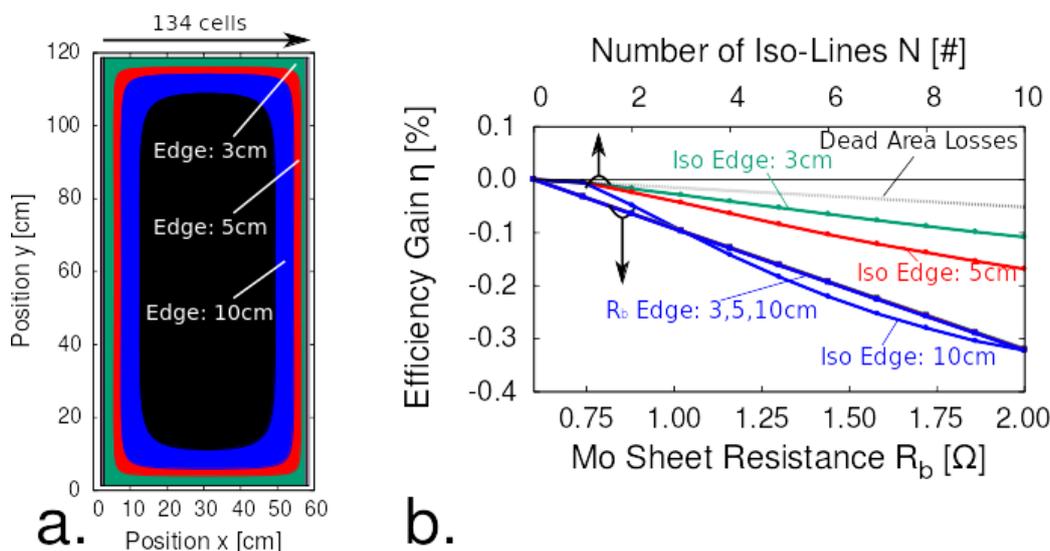
Reduktion von Strömen entlang der Längsrichtung der Zellen eines Moduls. Daher reduzieren Shunt-Abschwächungsmaßnahmen auch die Kompensationsströme (siehe Abbildung 109b und c). Aus diesem Grund wurde eine Verlustabschätzung in Verbindung mit verschiedenen Shunt-Abschwächungsmethoden durchgeführt.

Um die Wechselwirkung von Inhomogenitäten zu untersuchen, wurden Simulationen von Full-Size-Modulen in PVMOS durchgeführt. In diesen Modulen wurde ein Randbereich mit 10% weniger Photostrom angenommen. Wir berechnen dann die Verluste für Isolinien neu und erhöhen den Schichtwiderstand des Rückkontakts. Um den Randbereich zu definieren, betrachten wir eine Position im Modul,  $r$ , außerdem betrachten wir die Grenze des Moduls,  $C$ . Wir können einen integrierten inversen Abstand zur Grenze als Konturintegral definieren:

$$(1) \quad \int_C \frac{dr_c}{|r-r_c|},$$

wobei  $r_c$  die Koordinaten entlang der Grenze  $C$  sind. Wir können leicht einen Randbereich als den Bereich definieren, wo die integrierte inverse Distanz größer als eine bestimmte Zahl ist. Dies führt zu einem mehr oder weniger konstanten Abstand der Kante, wobei der Abstand in Ecken zunimmt, da dort mit stärkeren Randeffekten zu rechnen ist.

Abbildung 110a zeigt drei Randbereiche. Diese drei Randbereiche sind so definiert, dass der Abstand vom Modulrand zur Modulmitte ( $y = 60$ ) 3, 5 bzw. 10 cm beträgt. In Abbildung 110b werden die relativen Verluste für Iso-Linien bei gleichzeitig erhöhtem Mo-Rückkontakt-widerstand abgebildet. Wir können beobachten, dass bei Inhomogenitäten die mit Isolinien verbundenen Verluste größer sind als nur die Verluste durch inaktive Bereiche. Die Verluste, die sich aus einem Anstieg des Mo-Schichtwiderstands ergeben, sind im Allgemeinen größer als für die Iso-Linien, jedoch haben die Inhomogenitäten keinen merklichen Einfluss auf diese Verluste.



**Abbildung 110:** a) Illustration der simulierten Randinhomogenitäten von 3, 5 und 10 cm. b) Simulierter Wirkungsgradgewinn für Iso-Linien und erhöhte Mo-Flächenwiderstände.

Es ist wichtig anzumerken, dass Abbildung 110b nicht direkt die Wirksamkeit von Iso-Linien und einer Erhöhung des Schichtwiderstands zeigt. Da die Wirksamkeit der Kurzschluss-Abschwächung nicht linear mit der Anzahl der Isolinien oder mit dem Schichtwiderstand ist, ist es nicht so einfach, die Ergebnisse in Abbildung 110b zu vergleichen. Aus den vorherigen Ergebnissen wissen wir, dass Iso-Linien nur für Abstände zwischen Linien von weniger als 20 cm (d.h. mehr als 6 Iso-Linien) wirksam sind. Unterhalb dieses Abstandes von 20 cm nimmt die Verlustleistung in den Kurzschlüssen schnell ab. Für den Widerstand des Rückkontakts hat ein kleiner Anstieg sofort einen großen Einfluss. Wenn jedoch der Schichtwiderstand zunimmt, nimmt die Ableitung der Verlustleistung in dem Kurzschluss in Bezug auf den Schichtwiderstand in der Größe ab. In Abbildung 110b haben wir die Bereiche so gewählt, dass 10 Iso-Linien und ein Mo-Flächenwiderstand von 2 Ohm zu einer Reduktion der Verlustleistung von 50% in einem Kurzschluss in Bezug auf die Baseline Simulation führen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von Inhomogenitäten die durch Isolinien induzierten Verluste negativ beeinflussen kann, während die Verluste aufgrund eines erhöhten Mo-Widerstands durch Randinhomogenitäten nicht beeinflusst werden. Im Allgemeinen sind die Isolinien Verluste geringer als für einen erhöhten Schichtwiderstand. Es ist unklar, wie realistisch die angenommenen Inhomogenitäten sind, so dass die Ergebnisse eher als allgemeine Trends betrachtet werden sollten.

### **Ersatzschaltbild für einen spannungsabhängigen Photostrom**

Wir präsentieren ein Ersatzschaltbild für den spannungsabhängigen Photostrom. Dieses Modell erklärt die Beobachtungen des spannungsabhängigen Serienwiderstandes in AP4. In diesem Abschnitt werden wir die Struktur des Ersatzschaltbildes ableiten und die Ergebnisse mit Simulationen zur Verifikation vergleichen.

In einem Ersatzschaltbild stellen die Dioden die Rekombinationsprozesse dar, die Generation des Photostroms wird durch Stromquellen dargestellt und die Widerstände können die Widerstandsverluste des elektronischen Transports darstellen. Die Rekombinationsraten und Leitfähigkeiten der Leitungsbänder hängen von den lokalen Ladungsträgerkonzentrationen ab. Wir unterscheiden drei Regionen im Bauteil, die  $n$ -,  $p$ - und  $d$ - (Verarmung) Regionen. Die Trägerkonzentrationen in diesen Regionen verhalten sich unterschiedlich:

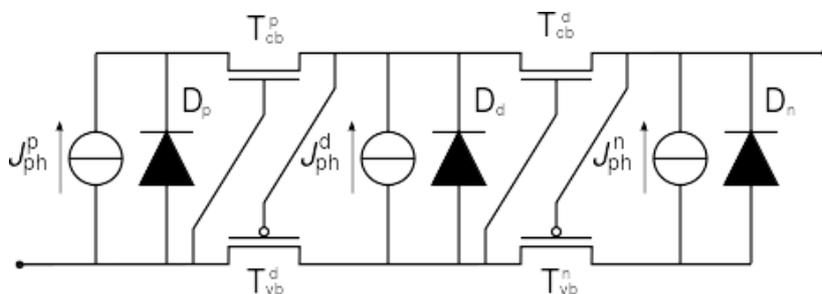
**$p$ -Region:** Die Lochkonzentration ist fixiert und die  $n$ -Konzentration hängt exponentiell von der lokalen Spannung ab (Quasi-Fermi-Level-Splitting) mit einem Idealitätsfaktor von 1

**$n$ -Region:** Die Elektronenkonzentration ist fixiert und die Lochkonzentration hängt exponentiell von der lokalen Spannung mit einem Idealitätsfaktor von 1 ab.

**$d$ -Region:** Elektron- und Lochkonzentrationen sind ungefähr gleich und beide hängen exponentiell von der lokalen Spannung mit einem Idealitätsfaktor von 2 ab.

Mit diesen Annahmen haben wir hier die in Abbildung 111 gezeigte Ersatzschaltung entwickelt. In jeder Region platzieren wir eine Diode, um die Rekombination in ihrer jeweiligen Region darzustellen,

wobei  $D_p$ ,  $D_d$  und  $D_n$  die Rekombination in den  $p$ -,  $d$ - bzw.  $n$ -Regionen darstellen. Aufgrund der Abhängigkeit der Ladungsträgerkonzentrationen von der lokalen Spannung haben die  $n$ - und  $p$ -Dioden einen Idealitätsfaktor von  $n=1$  und die Verarmungsdiode von  $n=2$ . Zwischen den Dioden haben wir einen Transport durch die Bänder. Die Leitfähigkeit des Transports hängt linear von der Ladungsträgerkonzentration ab. Aus diesem Grund stellen wir den Transportwiderstand unter Verwendung von Kanaltransistoren dar. Für die in der Figur gezeigten Transistoren zeigt der Index  $cb$  und  $vb$  an, dass er den Transport im Leitungs- bzw. Valenzband darstellt. Die hochgestellten Zahlen  $p$ ,  $d$  und  $n$  zeigen an, dass der Kanalwiderstand hauptsächlich von der Trägerkonzentration in den jeweiligen Bänder in der  $p$ -,  $d$ - bzw.  $n$ -Region abhängt. Dies bedeutet, dass zum Beispiel für den Transistor der Kanalwiderstand umgekehrt proportional zur Elektronenkonzentration in der  $p$ -Region ist, und dass für den Transistor der Kanalwiderstand umgekehrt proportional zur Lochkonzentration in der  $d$ -Region ist.



**Abbildung 111: Ein Ersatzschaltbild für eine Solarzelle.**

Überprüfung:

Wir verifizierten das Modell unter Verwendung von Bauteilsimulationen eines amorphen Silizium-p-i-n-Bauelements. Für diesen Solarzellentyp verwendeten wir leicht modifizierte Dioden Gleichungen, um den Einfluss eines quasi-Kontinuums von Zuständen auf die spannungsabhängigen Rekombinationsraten darzustellen:

$$J_{D_d} = J_{0D_d} T^3 |V_{D_d}| \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{V_{D_d}}{2kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

und

$$J_{D_p}/D_n = J_{0D_p}/D_n T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Für die Transportwiderstände benutzen wir:

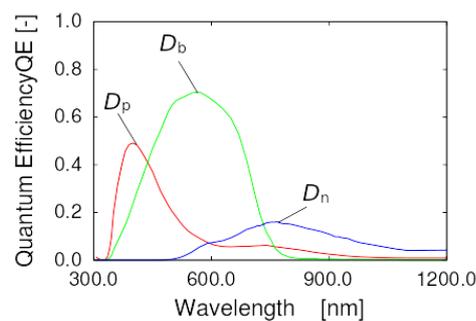
$$\begin{aligned}
 R_{cb}^d &= R_{cb0}^d \exp\left(-\frac{V_{D_d}}{2kT}\right) \\
 R_{vb}^d &= R_{vb0}^d \exp\left(-\frac{V_{D_d}}{2kT}\right) \\
 R_{cb}^p &= R_{cb0}^p \exp\left(-\frac{V_{D_p}}{kT}\right) \\
 R_{vb}^n &= R_{vb0}^n \exp\left(-\frac{V_{D_n}}{kT}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Es wurden Simulationen einer standardisiert amorphen Siliziumsolarzellen durchgeführt, bestehend aus dem Schichtstapel Glas/ZnO/ $\mu$ c-Si:H-p/a-SiC:H-p/a-Si:H-i/a-Si:H-n/ZnO/Ag. Die intrinsische Schichtdicke betrug  $d=330\text{nm}$ . Die Simulationen (dunkeln) wurde zur Parametrisierung des Modells benutzt und wird im Folgenden beschrieben.

Für die Parametrisierung benötigt man zunächst einige interne Parameter. Dazu wurden zunächst optische Device Simulation durchgeführt. Diese Simulation führt zu den wellenlängenabhängigen, räumlich aufgelösten optischen Elektron-Loch-Paar-Generationsraten. Es wird angenommen, dass die Erzeugungsraten linear von dem Photonenfluss abhängig sind. Diese Annahme gilt im Allgemeinen für Lichtintensitäten in nicht konzentrierter PV. Daraus wird ein Photonenstrom für die Bulk-,  $n$ - und  $p$ -Dioden berechnet. Dies erreichen wir, indem wir für jede dieser Dioden eine "optische Quanteneffizienz" berechnen, indem wir die Erzeugungsraten in der Bulk-,  $n$ -Schicht- bzw.  $p$ -Schicht integrieren und die Gesamtgenerationsrate in jeder dieser Dioden durch den eingehenden Photostrom teilen.

In Abbildung 112 zeigen wir die optischen Quanteneffizienzen der  $p$ , Bulk und  $n$  Dioden. Aus diesen optischen Quanteneffizienzen können wir dann die Photostromdichte in jedem Bauelement berechnen, indem wir die Quanteneffizienz mit dem Beleuchtungsspektrum multiplizieren und die resultierende Stromdichte integrieren gemäß:

$$J_{ph}^{n/p/d} = q \int I(\lambda) QE_{opt}^{n/p/d}(\lambda) d\lambda$$



**Abbildung 112: Die optische Quanteneffizienz der  $p$ -,  $n$ - und  $d$ -Regionen.**

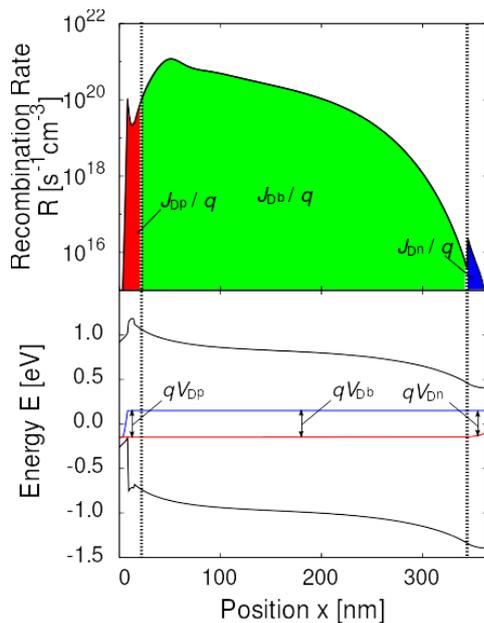
Im nächsten Schritt wird eine Device Simulationen im Dunkeln durchgeführt. Aus diesen Simulationen exportieren wir nun die Rekombinationsratenprofile und die Banddiagramme. Aus den Rekombinationsprofilen, siehe zum Beispiel in Abbildung 113, können wir den Strom durch die Bulk-Diode und die  $p$ - und  $n$ -Dioden durch Integrieren der Rekombinationsraten in der  $p$ -Schicht, der intrinsischen Schicht bzw. der  $n$ -Schicht berechnen:

$$J_{D_p} = q \int_0^{x_{pi}} R(x) dx$$

$$J_{D_b} = q \int_{x_{pi}}^{x_{in}} R(x) dx$$

$$J_{D_n} = q \int_{x_{in}}^w R(x) dx$$

So bekommen wir die Diodenströme in Abhängigkeit von der extern angelegten Spannung. Wir brauchen jedoch die Spannung über jede Diode separat. Wir können die Spannung über jede Diode leicht bestimmen, indem wir die Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus an verschiedenen Stellen in der Solarzelle betrachten. Wir bestimmen somit die Spannung über der  $p$ -Schicht-Diode als den Abstand zwischen den Quasi-Fermi-Niveaus in der Mitte der  $p$ -Schicht.

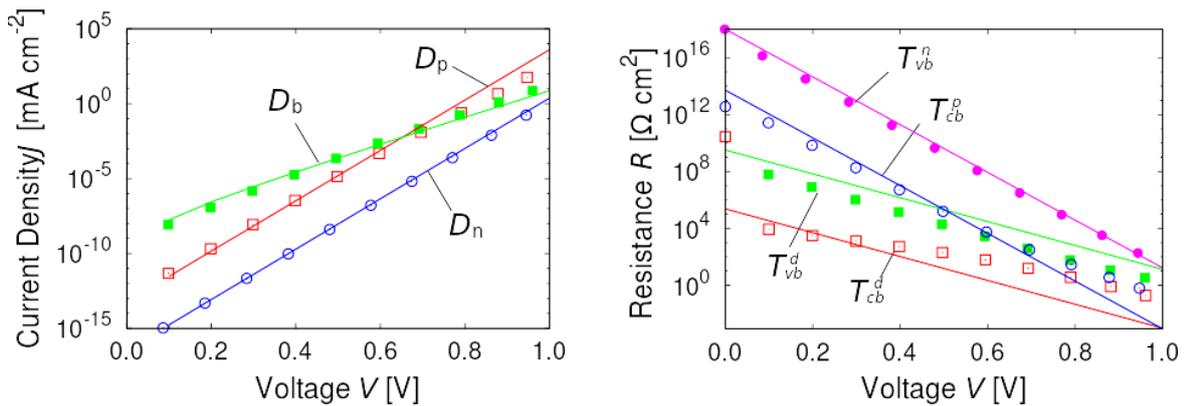


**Abbildung 113:** *Abbildung der Berechnung der  $JV$ -Kennlinien durch jede Diode im Netzwerk. Die Rekombinationsraten sind über verschiedene Teile der Diode integriert, wobei der rote Bereich den Strom durch die  $p$ -Schicht-Diode anzeigt, der grüne Bereich die Rekombination in der Bulk-Diode und der blaue Bereich die  $n$ -Schicht-Diode.*

In gleicher Weise werden die Spannungen über der Bulk- und der  $n$ -Schicht-Diode in der Mitte der intrinsischen bzw.  $n$ -Schicht bestimmt.

Auf diese Weise bestimmen wir separat eine  $JV$ -Charakteristik für jede Diode, wie in Abbildung 114 (links) gezeigt. Da jede Diode nur einen Anpassungsparameter, den Dunkelsättigungsstrom, aufweist, ist es trivial, die Gleichungen (1-2) an die jeweilige  $JV$ -Charakteristik anzupassen. Die Anpassungen der Gleichungen (1-2) an die  $JV$ -Charakteristik sind ebenfalls in Abbildung 114 (links) gezeigt.

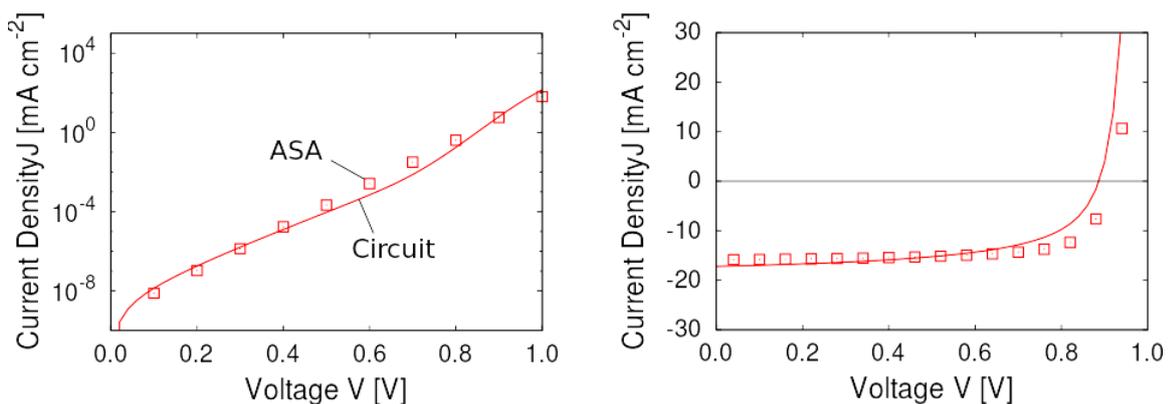
Schließlich können wir auch die Widerstände aus dem Banddiagramm und den berechneten Stromdichten durch jede Diode berechnen. Aus dem Banddiagramm können wir den Unterschied im



**Abbildung 114:** Die JV-Kennlinien der *p*-, Bulk- und *n*-Diode (links) und der Widerstände (rechts). Die aus den Device Simulationen berechneten Werte sind mit Punkten und die Anpassungen mit sind mit Linien entsprechender Farbe gekennzeichnet

Quasi-Fermi-Niveau für Elektronen zwischen dem Zentrum der *p*-Schicht und dem Zentrum der *i*-Schicht bestimmen. In der Ersatzschaltung ist diese Potentialdifferenz beschrieben durch  $\Delta E_{fn} = J_p R_{i-e}$ . Da wir bereits die Stromdichte durch jede Diode kennen, können wir so einfach den Kanalwiderstand jedes Transistors berechnen, indem wir eine Differenz im Quasi-Ferminiveau zwischen zwei Positionen durch den Strom teilen, der durch das Band fließt. In Abbildung 114 (rechts) zeigen wir die Kanalwiderstände in Abhängigkeit von der Spannung über den Dioden. Zusätzlich zeigen wir auch die Anpassungen der analytischen Gleichungen (Gl. 1-3).

Da wir nun alle Parameter ermittelt haben, können wir die Bauteil Kennlinien nach unserem Ersatzschaltbild und nach unserem Gerätesimulator (ASA) berechnen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 115 gezeigt.

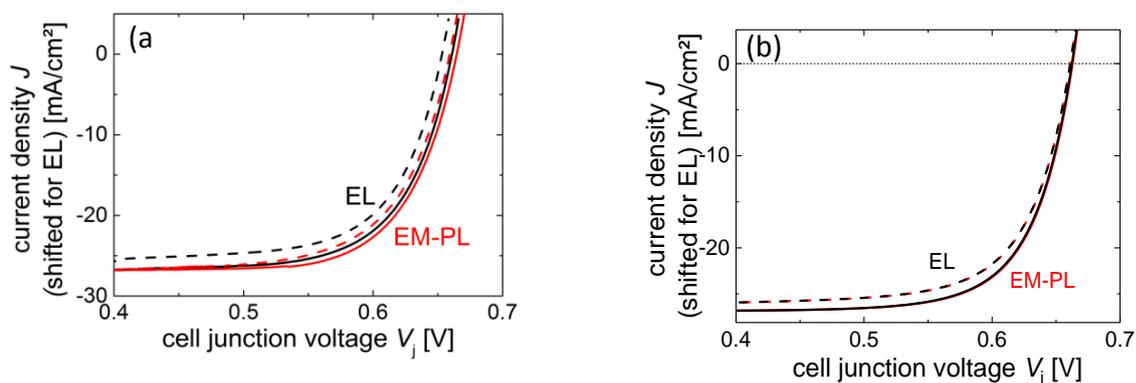


**Abbildung 115:** Vergleich der dunkel (links) und beleuchtet (rechts) Bauteilkennlinien bestimmt durch Bauteilsimulationen (ASA) und unserer Ersatzschaltung (Schaltung).

Es ist zu sehen, dass sowohl die dunklen als auch die beleuchteten Eigenschaften gut wiedergegeben werden. Die Abweichung der Leerlaufspannung ist auf die Abweichung in der Anpassung der *p*-Schicht-Dioden-JV-Kennlinie zurückzuführen und kann verbessert werden, indem die *p*-Schicht-Diode mit einer linearen Skala anstatt mit einer logarithmischen Skala angepasst wird.

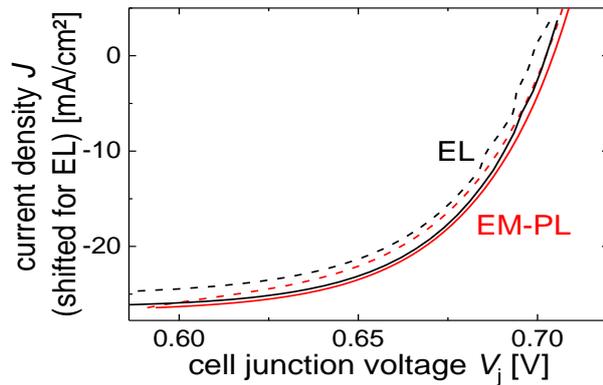
Ein interessanter Aspekt dieses Modells, insbesondere angesichts der in AP4 erhaltenen Ergebnisse, ist, dass dieses Modell implizit spannungsabhängige Photostromeffekte beinhaltet. Vor allem tut es dies ohne Einführung von spannungsabhängigen Stromquellen. Somit zeigt das Modell, dass spannungsabhängige Photostromeffekte unter Verwendung einer spannungsabhängigen Bandleitfähigkeit erklärt werden können. Um dies zu veranschaulichen, zeigen wir sowohl die simulierten dunklen als auch die beleuchteten JV-Kennlinien in Abbildung 115.

Anschließend wurde das Ersatzschaltbild in PVMOS integriert. Das neue Schaltbild beinhaltet nun einen spannungsabhängigen Serienwiderstand, welcher einige gefunden Phänomene in dem Lumineszenz Signal von CIGS Solarzellen erklärt. Abbildung 116 zeigt einen Vergleich von Solarzellen Dioden Spannungen welche experimentell gemessen wurden (a) und welche mit einem Standard Ersatzschaltbild und PVMOS (b) simuliert wurden bei verschiedenen Strömen.



**Abbildung 116:** (a) Per Lumineszenz gemessene Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte (durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt). (b) Mit PVMOS simulierte Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte (durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt).

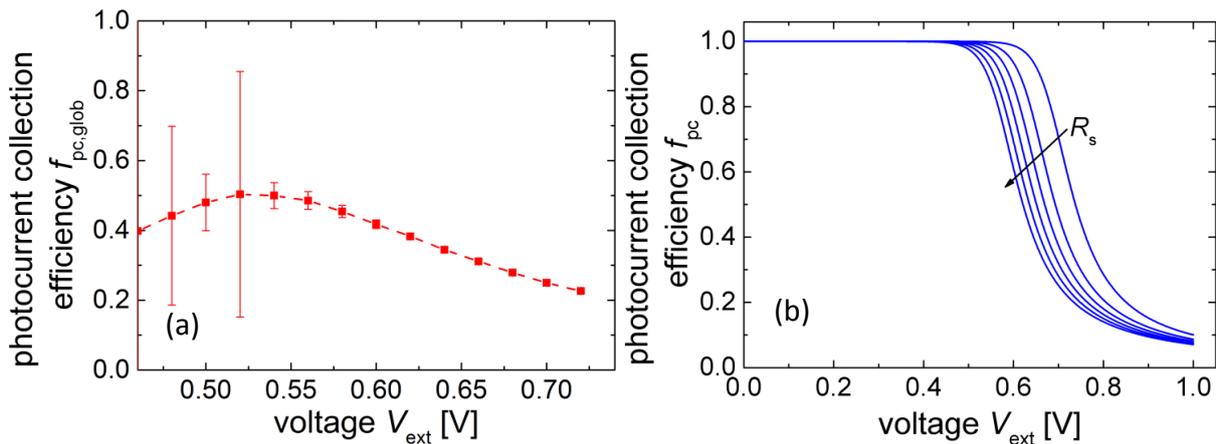
Die Simulationen können die die Unterschiede zwischen den Dioden Spannungen welche bei geringen externen Spannungen unter Beleuchtung und im Dunkeln gemessen wurden nicht erklären. Abbildung 117 zeigt neue Simulationen welche das neue Ersatzschaltbild mit einem spannungsabhängigen Serienwiderstand verwenden. Wie man sieht reproduziert das neue Modell Unterschiede zwischen den Diodenspannungen bei geringen externen Spannungen. Des Weiteren reproduzieren PVMOS Simulationen inclusive einem spannungsabhängigem Serienwiderstand auch Ergebnisse, die bei der Bestimmung der Photostromsammlungseffizienz von CIGS Solarzellen gefunden wurden.



**Abbildung 117:** Mit PVMOS simulierte (mit spannungsabhängigem Serienwiderstand) Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte(durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt).

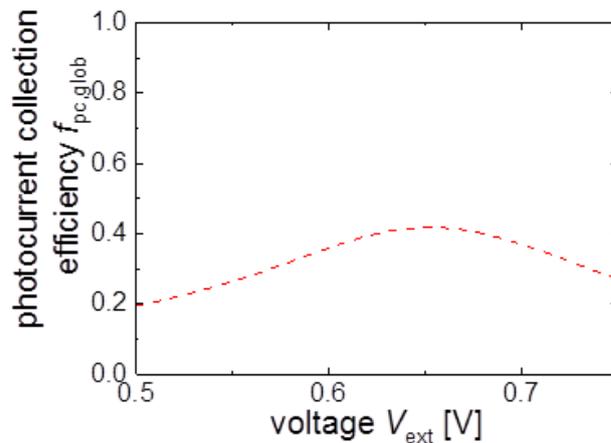
In Experimenten wurde gefunden, dass die mittels Lumineszenz gemessenen Photostromsammlungseffizienz zu kleineren Spannung zwar wie in einem Standardmodell zunächst steigt, später jedoch sinkt [Abbildung 118 (a)]. Dieses Verhalten wird nicht von einem standard 1-Diodenmodell reproduziert [Abbildung 118 (b)].

Es wurde bereits mittels Simulationen in einer Dimension gezeigt, dass sich dieses Verhalten mit einem Spannungsabhängigen Serienwiderstand erklären lässt. Durch die Implementierung dieses Modells in PVMOS konnte in dem aktuellem Berichtszeitraum, dieses spezielle Verhalten der Photostromsammlungseffizienz nun auch im mehr-dimensionalen Fall reproduziert werden (Abbildung 118).



**Abbildung 118:** (a) Experimentell gemessene Photostromsammlungs Effizienz einer CIGS Solar Zelle. (b) Simulierte Photostromsammlungseffizienz eines 1-Dioden Modells.

Die Implementierung des neuen Ersatzschaltbildes in PVMOS ermöglicht des Weiteren die genauere Modellierung von Lumineszenz Messungen an CIGS Solarzellen.



**Abbildung 119:** Mit PVMOS simulierte Photostromsammlungseffizienz bei Benutzung des Ersatzschaltbildes welches einen spannungsabhängigen Serienwiderstand nutzt.

### Zusammenfassung

Über die gesamte Projektlaufzeit wurde PVMOS weiterentwickelt und als Standard-Tool zur Netzwerk Modellierung von CIGS Solarzellen und Modulen entwickelt. Es konnte zur Klärung zahlreicher Fragestellungen erfolgreich eingesetzt werden – z.B. zur Simulation von Randeffekten auf die Modulperformance oder die Auswirkung des TCO und Molybdän Schichtwiderstands auf die Rückwärtsstabilität von Solarzellen. PVMOS soll im Nachfolgeprojekt OptiCIGS II durch ein thermisches Modell erweitert werden. Es ist als opensource Software frei erhältlich.

### Beitrag HSU

Zentrales Ziel in diesem AP war die Erstellung von Modellen, um Messergebnisse interpretieren zu können. Im Folgenden soll auf zwei Aspekte eingegangen werden:

- Abschätzung der Lebensdauer aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung
- Steady state PL und Bandverbiegungen

Aus transienten PL-Messungen lässt sich die Lebensdauer der Minoritäten abschätzen. Um diese Werte zu validieren, wurde die erforderliche Lebensdauer aus Voc-Messungen entnommen und verglichen. Hierzu wurden geeignete Rekombinationsmodelle angenommen und ausgewertet. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die ermittelten Werte von diversen Parametern (z.B. Dotierung) abhängen, die selbst großen Unsicherheiten unterliegen. In Abbildung 120 sind die Ergebnisse gegenübergestellt und verglichen.

Sulfur/ Temperature	Voc(RT), V	Voc(OK), V	$\tau_n$ , s device measured	$\tau_n$ , s abs/buff measured	$\tau_n$ , s calculated
no/low	0.525	1.07	2.1E-09	42.1E-9	-
low/low	0.565	1.11	2.1E-09	47.5E-9	65E-09
high/low	0.585	1.14	2.1E-09	47.5E-9	37E-09
medium/ medium	0.585	1.15	1.9E-09	52.7E-9	19E-09
no/high	0.55	1.07	2.6E-09	-	-
low/high	0.575	1.13	1.9E-09	45.0E-9	35E-09
high/high	0.595	1.17	2.1E-09	48.1E-9	11E-09

Forward current in the pn-junction:

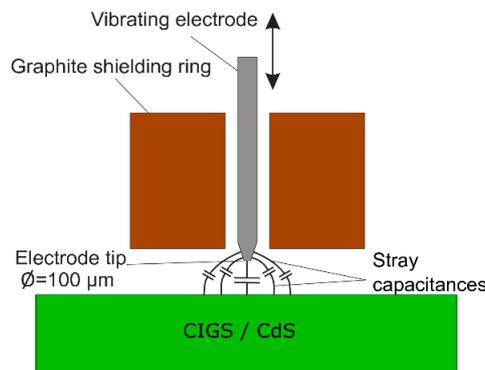
$$J_F = q \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{kTn_i}{\tau_n E_0} \cdot \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{qN_A(2\psi_B - V)}{\epsilon_s}}$$

**Abbildung 120: Vergleich: Lebensdauern aus TRPL und IV(T)**

Aus TRPL-Messungen ergaben sich Werte im Bereich von 40-60 ns, während aus der Leerlaufspannung Werte zwischen 11 und 65 ns entnommen werden konnten. Eine höhere Genauigkeit ist nicht zu erwarten (s.o.), wobei allerdings die Größenordnung übereinstimmt, womit eine gewisse Plausibilisierung der TRPL-Lebensdauer gezeigt werden konnte.

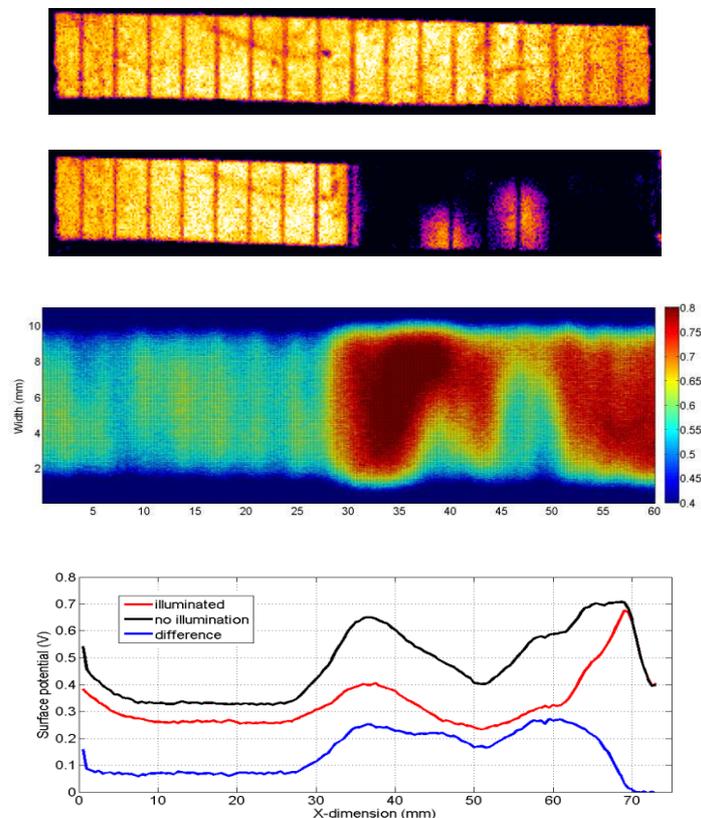
Im Projektzeitraum wurden an der TU Budapest „vibrating Kelvin probe“-Messungen durchgeführt zur Interpretation von steady state PL-Messungen an Proben vom Partner MCT/NSE. Mit Kelvin-Probe-Messungen kann kontaktlos das Oberflächenpotential und mit Hilfe von Beleuchtung die Bandverbiegung an der Oberfläche gemessen werden. Abbildung 121 zeigt das Prinzip der Kelvin-probe-Messung.



**Abbildung 121 Prinzip vibrating Kelvin-Probe**

Die beiden Messverfahren wurden an partiell thermisch gealterten CIGS/CdS-Proben miteinander verglichen. In Abbildung 122 ist zunächst eine PL-Messung an der initialen Probe gezeigt, wobei eine

ausreichende Homogenität gewährleistet ist. Im Bild unterhalb ist die partiell gealterte Probe dargestellt, wobei die Abnahme der PL-Intensität im gealterten rechten Teil deutlich erkennbar ist.



**Abbildung 122 Vergleich PL und Kelvin-Probe an partiell gealterten Proben**

Vergleicht man diese PL-Messung mit dem Mapping des Oberflächenpotentials (Kelvin-Probe), so ist klar erkennbar, dass die Degradation in der PL-Intensität mit einer signifikanten Veränderung des Oberflächenpotentials einhergeht. Zu bemerken ist, dass sich Inhomogenitäten in der PL des degradierten Bereiches klar im Mapping des Oberflächenpotentials wiederfinden lassen.

Die blaue Kurve im untersten Diagramm zeigt die gemessene Bandverbiegung an der Oberfläche. Deutlich zu erkennen ist, dass der degradierte Teil mit einer um ca. 200 meV vergrößerten Bandverbiegung einhergeht. Weitere Versuche (Ätzen mit HCl) haben gezeigt, dass diese Bandverbiegung mit dem CdS-Puffer korreliert.

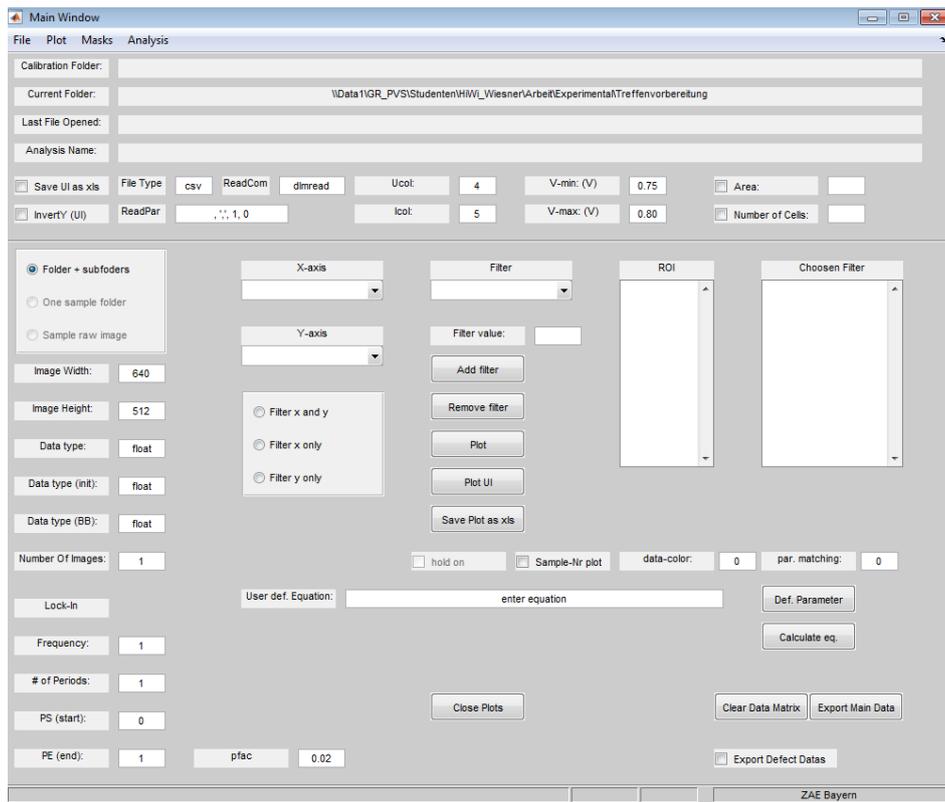
Abbildung 123 zeigt eine Modellvorstellung zur Interpretation von PL-Daten. Eine Bandverbiegung an der Oberfläche führt zu einer Separation photogenerierter Ladungsträger, welche mit einer reduzierten PL-Intensität einhergeht, da die Minoritäten dann strahlungslos an der Oberfläche rekombinieren. Diese Interpretation ist konsistent mit den gezeigten PL- und Kelvin-Probe-Messungen.



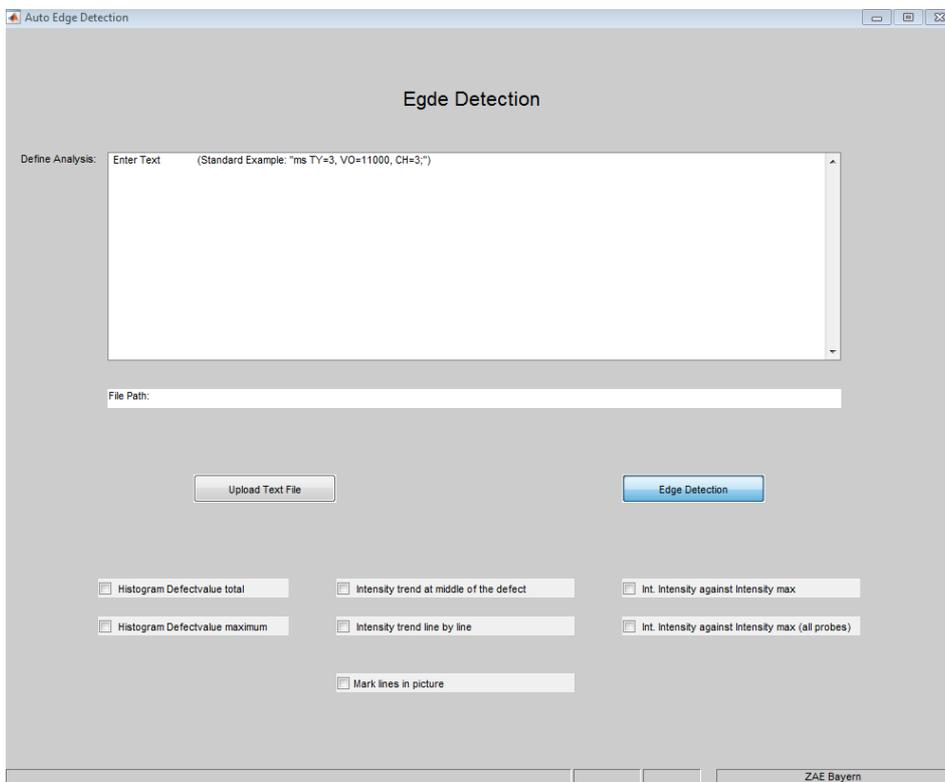
- M8.3: Das vielversprechendste Verfahren ist mit einer größeren Anzahl an Stichproben getestet (nicht zwangsläufig Großmodule)

Dieses AP diene letztlich vor allem der Unterstützung der Arbeiten in AP2. Es wurde ein Matlab-basierter Algorithmus zur Auswertung der DLIT-Messungen entwickelt, um diese in beliebig großer Zahl reproduzierbar auszuwerten. Jedoch geht die entwickelte Software weit über diese Anwendung hinaus, da sie sowohl die EL-Auswertung (Peak-Erkennung und Bestimmung der Zentralwellenlänge) als auch die Auswertung der elektrischen Messungen (Bestimmung der IV-Parameter und Messung der Kennlinie für verschiedene Beleuchtungsstärken) integriert, sodass sowohl die DLIT- als auch die EL-Messungen direkt zur elektrischen Performance korreliert werden können. Um eine allgemeine Nutzbarkeit der entwickelten Software zu gewährleisten, wurde diese zwar in Matlab erstellt, jedoch über einen EXE-Kompilator in ein eigenständig ausführbares Programm kompiliert. Auf diese Weise stand die Software sowohl anderen Projektpartnern als zur Integration in die MCT/NSE-Produktionslinie zur Verfügung. Im Laufe des Projektes wurde diese Software der Uni Oldenburg für ihre IR-Auswertungen zur Verfügung gestellt. Im Folgenden soll die Software sowohl hinsichtlich ihrer Struktur als auch Anwendung schrittweise erläutert werden.

Graphical User Interface (GUI): Da die durch das ZAE Bayern entwickelte Software sowohl während der Forschungsarbeiten in optiCIGS als auch nach Projektende zur automatisierten Prozessierung großer Datenmengen genutzt werden sollte, wurde die Software so ausgelegt, dass sie einerseits maximal flexibel genutzt werden kann, um die für die weitere Verarbeitung angemessene Bearbeitung der Bilddateien direkt in der Software zu erlauben, gleichzeitig jedoch auch eine automatisierte Batchverarbeitung einer großen Anzahl von gleichartigen Dateien erlaubt. Aus diesem Grunde wurde das GUI so gestaltet, dass dort direkt verschiedene Datenbearbeitungsoptionen (Filter etc.; s. Abbildung 124 a)) angewendet werden können. Zugleich können über die verschiedenen Unterprogramme weitergehende Operationen durchgeführt werden. Als Beispiel sei im Folgenden die Funktion der „Edge Detection“ (Kantenerkennung; s. Abbildung 124 b)) näher erläutert, die eine Voraussetzung für sämtliche DLIT-Auswertungen darstellte.



a)

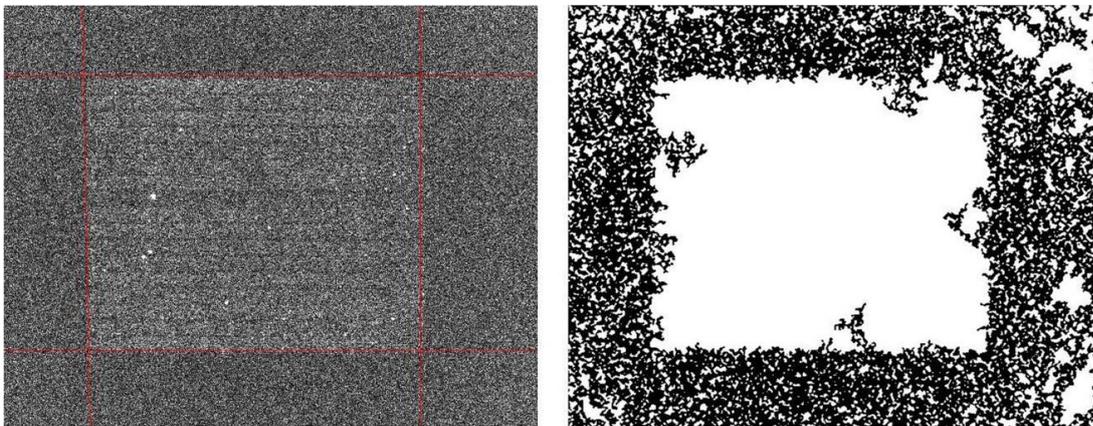


b)

**Abbildung 124: a) Allgemeine Benutzer-oberfläche der erstellten Software. Neben der Auswahl der zu bearbeitenden Bilddatei können die diversen Messparameter eingegeben und verschiedene Bildbearbeitungsoperationen ausgeführt werden; b) Beispielhafte Benutzer-oberfläche für den Unter-punkt „Edge Detection“**

Edge Detection: Die Kantenerkennung diente dazu, bei DLIT-Aufnahmen den aktiven Probenbereich aus der Aufnahme zu selektieren, sodass nur dieser quantitativ ausgewertet wurde. Andernfalls hätte der nicht-aktive Bildbereich zu signifikanten Verfälschungen geführt. Klassischerweise liegt der erste Ansatz für eine Kantenerkennung darin, einen Schwellwert (in Graustufen) zu bestimmen, über den der Signalbereich von dem Rauschbereich in dem zu analysierenden Bild separiert wird. Bei Bilddaten von hohem Kontrast führt dies i.d.R. zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Die DLIT-Aufnahmen der CIGS-Proben waren jedoch z. T. sehr kontrastarm, sodass über einen Schwellwert keine hinreichende Probenseparierung möglich war. In Abbildung 125 a) und b) ist das Ergebnis mit der neu entwickelten Kantenerkennung (a)) dem Ergebnis mit klassischem Schwellwert (b)) gegenübergestellt. Es ist klar erkennbar, dass der neue Algorithmus zu einer deutlich besseren Probenerkennung führt und somit eine genauere Bildauswertung zulässt.



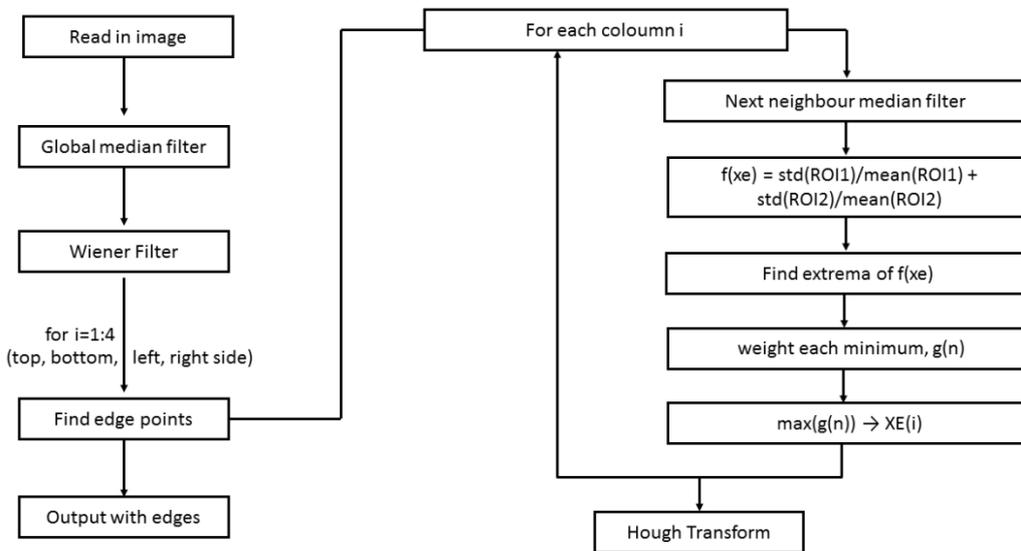
a)

b)

**Abbildung 125: Vergleich des hier entwickelten Kantenerkennungsalgorithmus: a) mit dem Ergebnis einer klassischen Schwellwertanalyse; b) am Beispiel eines CIGS-Minimoduls**

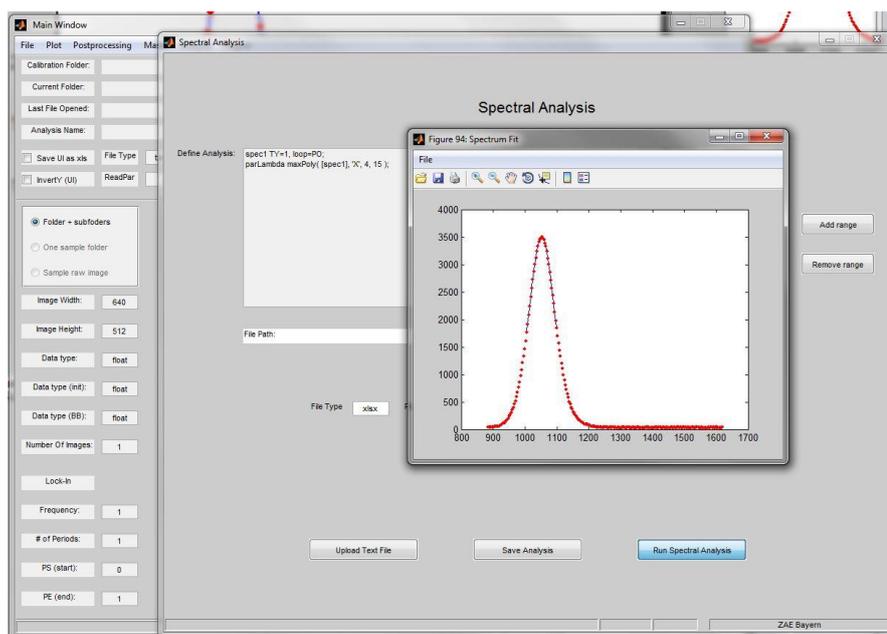
In Abbildung 126 ist ein Flussdiagramm des für die Kantenerkennung durch das ZAE Bayern entwickelten Algorithmus dargestellt. Die Grundidee dieses Algorithmus basiert auf der Annahme, dass die zwei grundlegend unterschiedlichen Bereiche des Bildes sich einerseits signifikant unterscheiden und zugleich jeder für sich im Vergleich zu diesem Unterschied weitgehend homogen sind. Der Algorithmus sucht dementsprechend nach den zwei Regionen, die jeweils die geringste Standardabweichung innerhalb ihres Bereiches aufweisen.

Dieser Algorithmus lieferte selbst bei geringen Spannungen/Bestromungen der Module bei den DLIT-Messungen sehr gute Ergebnisse, sodass selbst für um 10 ° verkippte Module noch eine korrekte Kantenerkennung erfolgte.



**Abbildung 126: Flussdiagramm des neu entwickelten Algorithmus zur Kantendetektion**

Bestimmung der EL-Zentralwellenlänge: Neben der Kantenerkennung war die Bestimmung der Zentralwellenlänge eine elementare Funktion der entwickelten Software. Ebenso wie im Fall der Kantenerkennung war auch hier die Reproduzierbarkeit der angewendeten Methode von fundamentaler Bedeutung, um auch bei Proben aus unterschiedlichen Messungen konsistente Daten zu erzeugen und so letztlich den o. g. Zusammenhang zur Vorhersage der  $V_{oc}$  abzuleiten. Die Bestimmung der EL-Zentralwellenlänge erfolgte dabei durch Anfitzen eines Polynoms 4. Ordnung an ca. 30 Messpunkten zentriert um das Maximum des EL-Spektrums (s. Abbildung 127). Auch diese Funktion kann sowohl mit individualisierten Parametern oder bei vorgegebenen Parametern als Batchprozessierung durchgeführt werden.



**Abbildung 127: Bestimmung der EL-Zentralwellenlänge in der im Projekt entwickelten Software**

Defekterkennung: Die Defekterkennung, d. h. die Segmentierung der defektbehafteten Pixel und Positionen innerhalb der Probe stellt das zentrale Ergebnis der Software-Entwicklung dar, da auf ihr die reproduzierbare Ableitung des Parameters  $IR$  beruht und sie somit elementare Voraussetzung für die in AP2 entwickelte Methodik ist. Aus Bildverarbeitungssicht besteht die Herausforderung bei der Segmentierung der Defekte und der Bestimmung ihrer Intensität darin, dass die Defekte eine sehr kleine Anzahl von Pixeln darstellen, die jedoch eine sehr hohe Intensität aufweisen. In der Intensitätsverteilung (s. Abbildung 128 e)) der betreffenden Bilddateien sind diese Teil des Ausläufers hin zu hohen Intensitäten. Da diese Verteilung stark „nicht-bimodal“ ist, ist kein eindeutiger Grenzwert zu identifizieren, der eine Entscheidung zwischen defektbehafteten und intakten Bereichen der Probe erlaubt. Es wurde daher ein eigener Algorithmus entwickelt und empirisch optimiert, der die Selektion der defektbehafteten Pixel reproduzierbar und robust erlaubt. Hierbei ist  $P$  die Häufigkeit einer Intensität auf Basis einer Unterteilung der Bilddaten in  $n_{\text{Bins}}$  Intensitätsbins und  $I_{\text{max}}$  die Intensität mit der maximalen Häufigkeit:

$$P = \frac{n(I)}{N} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$I_{\text{max}} = \arg \max(P(I)) \quad \text{Gleichung 8}$$

Auf Basis dieser Werte und der Intensitätsverteilung wird dann eine Schwellenwahrscheinlichkeit  $P_{\text{th}}$  definiert, auf deren Grundlage dann ein binäres Bild  $Pic_{\text{def}}$  erzeugt werden kann, in dem Defekten der Wert 1 und allen anderen Pixeln der Wert 0 zugeordnet werden:

$$P_{\text{th}} = \left( \frac{1}{n_{\text{Bins}}} \right) * P_{\text{factor}} \quad \text{Gleichung 9}$$

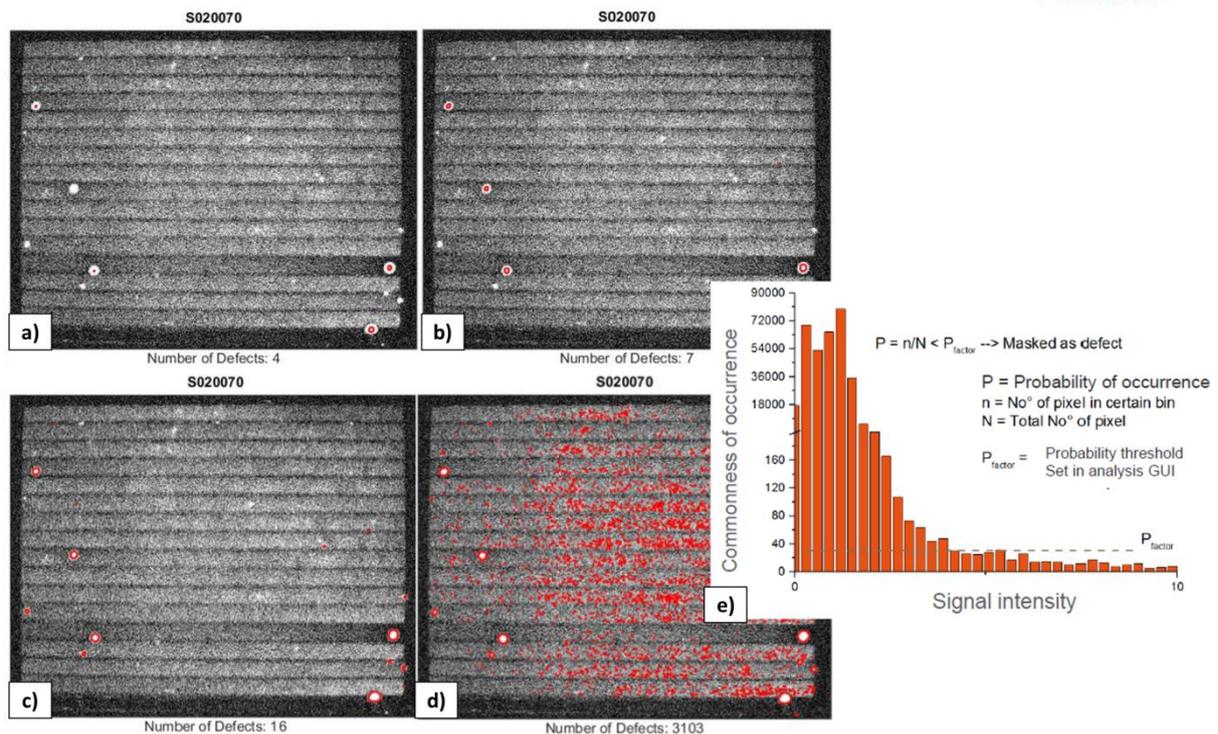
$$Pic_{\text{def}}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{falls } I(x, y) > I_{\text{max}} \ \& \ P(I(x, y)) < P_{\text{th}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gleichung 10}$$

Hierbei werden Defekte durch zwei Bedingungen definiert:

- i) sie müssen eine Intensität aufweisen die größer ist als die Intensität mit der maximalen Häufigkeit
- ii) sie müssen eine Häufigkeit aufweisen, die geringer ist als  $P_{\text{th}}$

Dabei wurde  $P_{\text{th}}$  empirisch im Projektverlauf durch Wahl des Parameters  $P_{\text{factor}}$  bestimmt. Es zeigte sich, dass die Wahl von  $P_{\text{factor}} = 0.1$  reproduzierbar zu der besten Defekterkennung führte. Dabei ist zu betonen, dass dieser Wert für alle Bilddateien verwendet wurde, die unter identischen Messbedingungen verwendet wurden. Dieser Faktor müsste also für eine spätere Implementierung der Methode in die Produktionslinie nur einmal pro Setup ermittelt bzw. verifiziert werden. In Abbildung 128 sind die identifizierten Defekte für verschiedenen  $P_{\text{factor}}$  gezeigt, wobei der Wert 0.1 (Abbildung 128 c)) zu der korrekten Defekterkennung führt.

Dieser Algorithmus stellte die Basis für die reproduzierbare und automatisierte Ermittlung des o. g. Parameters  $IR$  dar. Somit konnten sämtliche DLIT-Bilder unter gleichen Analysebedingungen ausgewertet werden und damit die Datenbasis ermittelt werden, die die Ableitung der o. g. Methodik zur Vorhersage der  $V_{oc}$  ermöglichte. Unabhängig davon wurde mit diesem Algorithmus ein Werkzeug zur reproduzierbaren Defekterkennung ermittelt, das auch separat von anderen Partnern oder direkt in der Produktion eingesetzt werden kann (z. B. Erfassung der kumulativen Defektfläche als Kenngröße für die Qualitätssicherung).



**Abbildung 128: Defekterkennung auf Basis des neu entwickelten Algorithmus für verschiedene Werte von  $P_{factor}$  (a) 0,001, b) 0,02, c) 0,15, d) 80. e) verdeutlicht die in Gleichung 7 bis Gleichung 10) dargestellten Algorithmen am Beispiel einer typischen Intensitätsverteilung eines DLIT-Bildes. Rote Pixel kennzeichnen dabei als für defektbehaftet befundene Pixel.**

Zusammenfassend wurde somit in AP8 eine Software entwickelt, die eine ganzheitliche reproduzierbare und automatisierbare Auswertung der elektrischen, thermischen und optischen Messungen an den CIGS-Modulen erlaubt und die gleichzeitig hinreichend flexibel ist um schnell Anpassungen vorzunehmen, die z. B. aus veränderten Messbedingungen resultieren, wie es im Forschungsbetrieb häufig geschieht.

### **M8.1: Auswertalgorithmus zur Bestimmung relevanter Parameter zur Modulcharakterisierung entwickelt**

Der in AP8 entwickelte Algorithmus erlaubt die Bestimmung der EL-Zentralwellenlänge und des Parameters  $IR$  (durch den Parameter  $P_{factor}$  und Gleichung 5). Dies sind die zwei Parameter, die zur Modulcharakterisierung verwendet werden. Der Meilenstein ist somit erreicht.

### **M8.2: Eine Klassifizierung nach Schweregrad in Bezug auf Leistungseinbuße von verschiedenen Defekttypen (Shunts) ist bestimmt**

Der Schweregrad der Defekte wird durch den Parameter  $IR$  (Gleichung 5) ausgedrückt. Die Leistungseinbuße wirkt sich auf die  $V_{OC}$  und den  $FF$  aus. Es konnte gezeigt werden, dass beide Parameter linear (für  $FF$  nur bei  $10 \text{ W/m}^2$  und  $100 \text{ W/m}^2$ ) von dem Parameter  $IR$  abhängen (s. Abbildung 11 und Abbildung 13). Der Meilenstein wurde somit erreicht.

### **M8.3: Das vielversprechendste Verfahren ist mit einer größeren Anzahl an Stichproben getestet (nicht zwangsläufig Großmodule)**

Das vielversprechendste Verfahren ist die Vorhersage der  $V_{OC}$ . Dieses wurde an 42  $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$ -Minimodulen und an 40 Fullsize-Modulen getestet. Das Ergebnis ist in M2.3 und 2.4 beschrieben. Der Meilenstein ist somit erreicht.

## **3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Auf die zahlenmäßigen Nachweise sei – da es sich abrechnungstechnisch um vier getrennte Projekte handelt - auf die jeweiligen Erfolgskontrollberichte bzw. Verwendungsnachweise der Partner verwiesen.

## **4. 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.

## **5. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes**

Aufgrund des Ausstiegs des Partners BSCT im Projektverlauf ist an dieser Stelle keine weitere Verwertung möglich.

Bezüglich des Nutzens und der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes der Partner HSU, FZJ, NSE/MCT, UOL und ZAE sei auf die Erfolgskontrollberichte der jeweiligen Partner verwiesen.

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

Auf dem Gebiet der Qualitätskontrolle mittels bildgebenden Verfahren sind den ZE keine – auf die CIGS-Technologie zugeschnittenen – neu aufgetauchten Verfahren bekannt geworden.

Im Bereich des zu untersuchenden CIGS-Materials gab es in der CIGS-Dünnschicht-Welt im Projektverlauf weitere Wirkungsgrad-Verbesserungen durch Einführung neuartiger Prozesse (e.g. Post Deposition Treatment (PDT), Ag-Legierung, Grid-Prozess, ..). Diese Verbesserungen flossen – soweit möglich – ins Projekt ein.

## 7. Veröffentlichungen

**HSU:**

**Tetiana Lavrenko, Thomas Walter and Balázs Plesz**

*A closer look into metastable effects of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells*

Physica Status Solidi C, 23 FEB 2017 (online)

doi: 10.1002/pssc.201600197

**Tetiana Lavrenko, Ricardo Vidal Lorbada, Denis Mücke, Thomas Walter, Balázs Plesz, Raymund Schäffler**

*Towards Stable and Efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin Films Solar Cells*

Proc. of the 33rd EU PVSEC, 2017, Amsterdam

**Rou Hua Chua, Xianglin Li, Thomas Walter, Lay Kuan Teh, Thomas Hahn, Frank Hergert, Subodh Mhaisalkar and Lydia Helena Wong**

*An experimentally supported model for the origin of charge transport barrier in Zn(O,S)/CIGS<sub>2</sub> solar cells*

Appl. Phys. Lett. 108, 043505 (2016);

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4940913>

**Lavrenko, T., Marzinzig, K., Walter, T., Plesz, B., and Röss, S. (2016)**

*On the application of the vibrating Kelvin probe method for quality control of Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> thin-film solar modules.*

Prog. Photovolt: Res. Appl., 24: 1554–1565.

**T. Lavrenko, T. Walter, B. Plesz**

*On the Interpretation of Photoluminescence and Vibrating Kelvin Probe Method for Quality Control of Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> Thin Films*

Proc. of the 32nd EU PVSEC, Munich, 2016

doi: 10.4229/EUPVSEC20162016-3CV.4.4

**Tetiana Lavrenko, Kerstin Marzinzig, and Thomas Walter**

*Performance Analysis of Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> Thin Film Solar Cells*

Proc. of the 42<sup>nd</sup> IEEE PVSC, New Orleans, 2015

#### **FZJ:**

##### Vorträge:

[1] V. Huhn et al., PHOTO-CURRENT COLLECTION EFFICIENCY MAPPING OF CIGS SOLAR MODULES BY A DIFFERENTIAL LUMINESCENCE IMAGING TECHNIQUE, EUPVSEC, 2015

[2] V. Huhn et al., Spatially Resolved Determination of the Absolute Collected Photocurrent from Solar Cells Using Electro-Modulated Luminescence, EUPVSEC, 2016

[3] Steve Johnston et al., Identifying Reverse-bias Breakdown Sites in CuIn x Ga (1-x) Se 2 Photovoltaic Modules, IEEE PVSC, 2017

[4] V. Huhn et al. , Quantitative Luminescence Imaging of Solar Cells using the Photocurrent Collection Efficiency, FZJ-HZB workshop, Hirschegg, 2016

[5] V. Huhn et al., Power Contribution Imaging of Solar Cells, Imaging Workshop Jena (ILMaging), Jena 2016

##### Poster

[1] V. Huhn et al., Study of metastable effects in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar modules during illumination and current injection, EUPVSEC, 2014

[2] Y. Augarten et al., Calculation of the TCO sheet resistance in thin film modules using electroluminescence imaging, IEEE PVSC, 2016

[3] V. Huhn et al., Collected Photocurrent Imaging via Electro-Modulated Luminescence under Different Illumination Conditions, IEEE PVSC, 2016

[4] B. E. Pieters et al., Reverse bias JV characteristics of CIGS devices, EUPVSEV, 2017

[5] V. Huhn et al., Determination and Modeling of Injection Dependent Series Resistance in CIGS Solar Cells, IEEE PVSC, 2017

##### Paper:

- [1] Vito Huhn, Andreas Gerber, Yael Augarten, Bart Elger Pieters, and Uwe Rau, PHOTO-CURRENT COLLECTION EFFICIENCY MAPPING OF CIGS SOLAR MODULES BY A DIFFERENTIAL LUMINESCENCE IMAGING TECHNIQUE, proceedings of the 31st EUPVSEC, p1065, (2015)
- [2] V. Huhn, B. E. Pieters, Y. Augarten, A. Gerber, D. Hinken, and U. Rau. Imaging photocurrent collection losses in solar cells, Appl. Phys. Lett., 109:223502, 2016
- [3] Y. Augarten et al., Calculation of the TCO sheet resistance in thin film modules using electroluminescence imaging, IEEE PVSC, 2016
- [4] V. Huhn et al., Collected Photocurrent Imaging via Electro-Modulated Luminescence under Different Illumination Conditions, IEEE PVSC, 2016
- [5] V. Huhn, A. Gerber, Y. Augarten, B. E. Pieters, and U. Rau. Analysis of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film modules by electro-modulated luminescence, J. Appl. Phys., 119:095704, 2016
- [6] Steve Johnston et al., Identifying Reverse-bias Breakdown Sites in CuIn x Ga (1-x) Se 2 Photovoltaic Modules, IEEE PVSC, 2017

#### Doktorarbeiten:

- [1] Vito Huhn: "Quantitative Luminescence Imaging of Solar Cells", RWTH Aachen, eingereicht im Mai 2018.

#### **UOL:**

Köhler, M.; Richter, M.; Neerken, J.; Heise, S. & Parisi, J. (2015), *Electrical and Chemical Characterization of Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> Solar Cells*, Proceedings of the 2015 Annual Meeting of the Far West Section of the APS.

Richter, M.; Babbe, F.-S.; Vetter, A.; Heise, S. J.; Ohland, J. & Riedel, I. (2015), *Origins of Shunt Signals of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells Investigated by Two-Dimensional Simulations*, Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

Vetter, A.; Babbe, F. S.; Hofbeck, B.; Kubis, P.; Richter, M.; Heise, S. J.; Ohland, J.; Riedel, I. & Brabec, C. J. (2016), *Visualizing the performance loss of solar cells by IR thermography -- an evaluation study on CIGS with artificially induced defects*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 24, 1001-1008.

M. Richter, J. Neerken, J. Parisi (2016), *Reverse-voltage bias induced shunt formation in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells: an approach with three-dimensional electro-thermal simulations*, Proceedings of the 32nd EU PVSEC, München.

López Salas, J.; Heise, S.; Richter, M.; Gerliz, V.; Hammer, M.; Ohland, J. & Hammer-Riedel, I. (2016), *Simulation of metastable changes in time resolved photoluminescence of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells upon light soaking treatment*, Thin Solid Films 633, 40–44.

Heise, S. J. & López Salas, J. F. (2017), *Charge separation effects in time-resolved photoluminescence of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells*, Thin Solid Films 633, 35-39.

Heise, S. J.; Gerliz, V.; Hammer, M. S.; Ohland, J.; Keller, J. & Hammer-Riedel, I. (2017), *Light-induced changes in the minority carrier diffusion length of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> absorber material*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 163, 270-276.

López Salas, J. F.; Richter, M.; Parisi, J. & Heise, S. J. (2017), *Simulation of photoluminescence lifetime and open-circuit voltage in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells*, J. Appl. Phys. 122, 203103.

M. Richter, M. Vrenegor, J. Parisi (2017), *Reverse-breakdown stability of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells*, Proceedings of the 33rd EU PVSEC, Amsterdam.

#### ZAE:

##### Veröffentlichungen in Zeitschriften:

- Andreas Vetter, Johannes Hepp, Christoph J. Brabec: “Automatized segmentation of photovoltaic modules in IR-images with extreme noise”, Infrared Physics & Technology, Vol. 76, pp. 439-443, 2016
- Johannes Hepp, Florian Machui, Hans-J. Egelhaaf, Christoph J. Brabec, Andreas Vetter: “Automatized analysis of IR-images of photovoltaic modules and its use for quality control of solar cells”, Energy Science & Engineering, Vol. 4(6), pp. 363–371, 2016
- Andreas Vetter, Finn S. Babbe, Bernhard Hofbeck, Peter Kubis, Michael Richter, Stephan J. Heise, Jörg Ohland, Ingo Riedel, Christoph J. Brabec: “Visualizing the performance loss of solar cells by IR thermography — an evaluation study on CIGS with artificially induced defects”, Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 24, pp. 1001–1008, 2016
- **geplant:** Johannes Hepp, Andreas Vetter, Bernhard Hofbeck, Umair Sultan, Jens Hauch, Christoph J. Brabec, Christian Camus: “Quantitative analysis of the separate influences of material composition and local defects on the  $V_{oc}$  of photovoltaic devices”, Progress in Photovoltaics (in preparation).

##### Konferenzbeiträge:

- Vortrag: Andreas Vetter, Jens Adams, Frank Fecher, Claudia Buerhop-Lutz, Luca Lucera, Sebastian Langner, Monika M. Voigt, Sebastian Besold, Christoph J. Brabec: “Imaging for Quality Control of Thin Film Solar Cells Applications”, The international School: Integration of Organic Electronics, Erlangen, Deutschland, 2015
- Vortrag und Proceedings-Paper: Andreas Vetter, Bernhard Hofbeck, Peter Kubis, Christoph J. Brabec: “Assessing the accuracy of imaging techniques for defect characterization on thin film solar cells”, 42<sup>nd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2015, New Orleans, Louisiana, USA
- Vortrag und Proceedings-Paper: Johannes Hepp, Andreas Vetter, Bernhard Hofbeck, Christian Camus, Jens Hauch, Christoph J. Brabec: “Separating the Influence of Material Composition and Local Defects on the  $V_{oc}$  Of CIGS Solar Modules”, Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1010-1012, Amsterdam, Niederlande, 2017

- Eingeladener Vortrag: Johannes Hepp, Andreas Vetter, Philipp Wiesner, Christian Camus, Jens Hauch, Christoph J. Brabec: „Automatized optical quality assessment of photovoltaic modules“, International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics 2017, Las Vegas, Nevada, USA

#### Tätigkeitsberichte des ZAE Bayern:

- Tätigkeitsbericht 2015: Andreas Vetter: Optimierung bildgebender Messverfahren zur Charakterisierung von Solarzellen
- Tätigkeitsbericht 2016: Andreas Vetter, Johannes Hepp: Automatisierte Qualitätskontrolle von Solarmodulen

#### Abschlussarbeiten:

- Frieder Warth, Einfluss von induzierten Shunts auf die Performance von CIGS Solarzellen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bachelorarbeit, 2013
- Patrick Tröger, Künstliche Shunts und ihre Auswirkung auf die UI-Charakteristik von CIGS-Solarzellen, Hochschule für angewandte Wissenschaften, Bachelorarbeit, 2013
- Bernhard Hofbeck, Bildgebende Charakterisierung von speziell präparierten Ein-Zell-CIGS-Solarzellen, Hochschule für angewandte Wissenschaften, Bachelorarbeit, 2014
- Valentin Kunkel, Bestimmung thermischer Materialparameter von Dünnschicht solarzellen, Technische Universität München, Masterarbeit, 2014
- Alexander Bode, Determination of Electric Parameters of Thin-Film Solar Cells with Imaging Measurements, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bachelorarbeit, 2015

## 8. Schlusswort und Ausblick

Insgesamt kann auf ein Projekt mit aufschlussreichen und wertvollen Ergebnissen und einer vertrauensvollen Zusammenarbeit, verbunden mit einem offenen Austausch zurückgeblickt werden.

Auf dem Gebiet der Entwicklung eines rein bildgebenden, inlinefähigen Qualitätstools für die CIGS-Fertigung konnten wichtige Hinweise zum Einfluss von Messbedingungen der verschiedenen Analysemethoden sowie zur Vorhersagegenauigkeit gewonnen werden. Aufgrund der noch zu großen Streubreite ergab sich aus dem Projekt allerdings keine klare Empfehlung zur Umsetzung eines bestimmten Messtools. Es wurden daher am Projektende Ansätze skizziert, wie in Kombination mit elektrischen Messungen weitere Erkenntnisse gewonnen werden können.

Die Simulation mittels PVMOS zeigte sich als sehr hilfreich für die Betrachtung von Fragestellungen im Projekt. Außerdem ergibt sich mit einer validen Simulation ein Einsparpotential hinsichtlich Versuchs-Ressourcen und Zeit. Wir halten die Weiterentwicklung der Simulation und der darin enthaltenen Modelle für wichtig und notwendig.

Im Bereich der Device-Charakterisierung gab es einige Arbeiten zum Wirkungsgradpotential der untersuchten CIGS-Technologie. Insbesondere bei der Interpretation der Photolumineszenz konnten wertvolle Erkenntnisse zum Verständnis gewonnen werden. Eine Korrelation zum Wirkungsgrad

hingegen kann bisher noch nicht hergestellt werden, insbesondere nicht mit der typisch damit verbundenen Größe der Minoritätsladungsträger-Lebensdauer. Die Arbeiten sollen aus unserer Sicht weiter geführt werden.

Die Untersuchungen zum Durchbruchverhalten wurden mit einer größeren Anzahl von Proben durchgeführt und lieferten zentrale Hinweise auf die beeinflussenden Faktoren – wie e.g. Temperaturabhängigkeit oder die Vorkonditionierung. Mit diesem Wissen ist im Rahmen des beantragten Folgeprojektes ein Abgleich mit ausgewählten Bedingungen im Feld geplant. Auf Basis der bisherigen Untersuchungen wurden bereits mögliche Umsetzungspfade für ein abschattungstolerantes Modul aufgezeigt, die in der Simulation bereits verifiziert sind.

Die untersuchten innovativen, differentiellen Methoden haben das Potential, die lokalen Solarzelleneigenschaften und elektrischen Leistungsverluste mit hoher Präzision zu bestimmen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde erkannt, dass die CIGS-Technologie – neben anderen Technologien auch - einen arbeitspunktabhängigen Widerstand aufweist, welcher die ursprünglich vorgesehene Interpretation der Ergebnisse erheblich erschwert.

Die Projekt-Koordination durch die Industrie ist aus Sicht der Industrie sehr sinnvoll. Dadurch gibt es strukturell eine gute Balance aus einerseits ausreichender Freiheitsgrade für Grundlegendes sowie andererseits dem Blick auf die Anwendung und das Umsetzbare. In der praktischen Projektarbeit ist diese Balance gut gelungen.

Die aus dem Projekt gewonnenen Ergebnisse und Ideen zur weiteren Verbesserung der CIGS-Technologie sollen in einem Folgeprojekt weiter verfolgt werden.

Wir bedanken uns für die Möglichkeit, die – teils sehr grundlegenden und für die Anwendung und den Fortschritt der CIGS-Technologie wichtigen - Arbeiten im Rahmen der Förderung durchführen zu können.

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturplan und Vernetzung des Projektes.....	6
Abbildung 2: MCT/NSE Probenlieferungen nach Partner und Probengröße .....	11
Abbildung 3: a) Korrelation zwischen integrierter PL und VOC für kleinformatige defektfreie CIGS-Proben; b) Korrelation zwischen integrierter PL und Leistungsdichte für kleinformatige defektfreie CIGS-Proben unter STC .....	13
Abbildung 4: a) Transmission verschiedener Filter im Vergleich zur Intensität des Lumineszenzpeaks dargestellt; b) Resultierendes Lumineszenzbild (hier: Lock-in EL, ELLI) eines CIGS-Minimoduls.....	14
Abbildung 5: Korrelation der Lumineszenzwellenlänge zu verschiedenen Parametern: a) zur unter STC gemessenen $V_{OC}$ ; b) zum mittels Röntgenfluoreszenz bestimmten [Ga]/([Ga]+[In])-Verhältnis, GGI; c) PL vs. EL bestimmte Lumineszenzwellenlänge.....	15
Abbildung 6: a) Vergleich von EL- und RFA-Messung entlang der parallel zur langen Modulseite verlaufenden Mittelachse; b) Verteilung der Kompositionshomogenität über das Gesamtmodul, gemessen mit der hier beschriebenen spektralen EL-Messung .....	16
Abbildung 7: a) Spannungsabhängigkeit des DLIT-Signals eines Laser-induzierten Defekts; b) Rasterkraftmikroskopie-Messung der Topologie des Laser-induzierten Defekts; c) Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des Laser-induzierten Defektes (gelbe Linie markiert die Laser-induzierte Aufwölbung).....	17
Abbildung 8: a) Korrelation zwischen $IR_{Parameter}$ und Leistungsminderung „ $P_{mpp}$ loss“ für laserinduzierte diodische Defekte; b) Korrelation zwischen $IR_{Parameter}$ und Leistungsminderung „ $P_{mpp}$ loss“ für FIB-induzierte ohmsche Defekte .....	18
Abbildung 9: a) Darstellung des linearen Zusammenhanges zwischen relativer $V_{OC}$ (bei $10 \text{ W/m}^2$ ) und dem Parameter IR bei sequentieller Einbringung Laser-induzierter Defekte in eine CIGS-Probe. b) Verteilung des Parameters IR auf einem Fullsize-Modul (identisch zu Abbildung 6b)). .....	19
Abbildung 10: a) Auftragung der Zentralwellenlänge $\lambda_{Zentral}$ und dem Parameter IR gegen die $V_{OC}$ (bei $1000 \text{ W/m}^2$ ); b) Bestimmung des Zusammenhanges für die $V_{OC}$ -Vorhersage durch eine Regressionsebene (Farbskala: $V_{OC}$ ). .....	20
Abbildung 11: Darstellung der Korrelation zwischen vorhergesagter und gemessener $V_{OC}$ (a, d, g) sowie der zweidimensionalen Zusammenhänge für $V_{OC}$ und $\lambda_{Zentral}$ (b, e, h) bzw. dem Parameter IR (c, f, i) für $10 \text{ W/m}^2$ (a-c), $100 \text{ W/m}^2$ (d-f) und $1000 \text{ W/m}^2$ (g-i).....	20
Abbildung 12: Projektion der Regressionsebene (eingefärbt nach $V_{OC}$ ) auf die $\lambda_{Zentral}$ -IR-Fläche: a) relative $V_{OC}$ -Skala für jede Beleuchtungsstärke; b) identische $V_{OC}$ -Skala für alle Beleuchtungsstärken .....	21

Abbildung 13: 3D-Diagramme der bei verschiedenen Beleuchtungsstärken bestimmten FF-Werte für 8,5 x 8,5 cm<sup>2</sup> CIGS-Minimodule: a) 10 W/m<sup>2</sup>, b) 100 W/m<sup>2</sup>, c) 1000 W/m<sup>2</sup> ..... 22

Abbildung 14: Einfluss der FF- (siehe a)) und V<sub>OC</sub>-Variation (siehe b)) auf die Effizienz der untersuchten CIGS-Mini-Module für 10 W/m<sup>2</sup>, 100 W/m<sup>2</sup> und 1000 W/m<sup>2</sup>..... 23

Abbildung 15: Ergebnis der bildgebenden Messung des Serienwiderstandes R<sub>s</sub> mittels DLIT und EL an zwei unterschiedlichen CIGS-Minimodulen. Die Einfärbung gibt den R<sub>s</sub> in Ωcm<sup>2</sup> an. .... 24

Abbildung 16: Messaufbau für "Proof of principle" an 60 x 120 cm<sup>2</sup> Fullsize-CIGS Modulen ..... 25

Abbildung 17: DLIT Aufnahme von CIGS Modulen (120 x 60 cm<sup>2</sup>): Modul A: a) vor / b) nach Verkapselung mit glattem Weißglas; Modul B: a) vor / b) nach Verkapselung mit mattem ARC-Glas (Abbild der Kamera auf unverkapselten Modulen ist auf eine reale Erwärmung durch Reflexion der abgestrahlten Strahlung an der Kamera bedingt)..... 26

Abbildung 18: Auftragung der Zentralwellenlänge λ<sub>zentral</sub> und dem Parameter IR gegen die V<sub>OC</sub> (bei 1000 W/m<sup>2</sup>) für 28 Fullsize-CIGS-Module mit ARC. Zusätzlich gezeigt ist die Bestimmung des Zusammenhanges für die V<sub>OC</sub>-Vorhersage durch eine Regressionsebene (Farbskala: V<sub>OC</sub>)..... 27

Abbildung 19: Lokale V<sub>OC</sub>-Verteilung (pro Zelle) innerhalb eines CIGS-Moduls: a) EL-Zentralwellenlänge λ<sub>zentral</sub> (unten) und der abgeleiteten theoretischen V<sub>OC</sub> (oben, ohne Einfluss der Defekte); b) IR-Aufnahme des Moduls; c) EL-Zentralwellenlänge λ<sub>zentral</sub> für ein theoretisch geachteltes Modul; e-g) Vorhersage der V<sub>OC</sub>/Zelle für die theoretischen Achtel-Module für Beleuchtungsstärken von 1000 W/m<sup>2</sup> (e), 100 W/m<sup>2</sup> (f), 10 W/m<sup>2</sup> (g). ..... 28

Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau eines Aufbaus zu Beleuchtung von Fullsize-CIGS-Modulen mittels LEDs: Gesamtlayout mit acht LEDs und Kamera; b) Ausleuchtung für ein LED-Element; c) dimensionierte Ausleuchtung eines Moduls ..... 29

Abbildung 21 EQE und spektrale PL ..... 33

Abbildung 22: TRPL-Ergebnisse an der Zelle (oben); am Absorber (unten) ..... 34

Abbildung 23: TRPL- und IV-Ergebnisse an Zellen mit unterschiedlichem S-Gehalt im Zn(O, S)-Puffer 35

Abbildung 24: PL und CdS..... 35

Abbildung 25 PL-Transienten mit unterschiedlichem S-Gehalt ..... 36

Abbildung 26 Temperaturabhängigkeit bei hohem S-Gehalt..... 37

Abbildung 27 Temperaturabhängigkeit ohne S..... 37

Abbildung 28 Korrelation Voc und Lebensdauer (für verschiedene S-Gehalte) ..... 38

Abbildung 29: TRPL CIGS / CdS..... 38

Abbildung 30: TRPL CIGS ..... 39

Abbildung 31: Verifizierung der Filter-EL-Methode. .... 40

Abbildung 32: V1626: Kurze Wartezeit (nach CdS) + laminiert: Zwei exemplarische Abbildungen der laterale Variation der Peak-Energie aus EL, bzw. des GGI-Verhältnisses aus RFA. ....	41
Abbildung 33: V1188: Lange Wartezeit (nach CdS) + unlaminiert: Zwei exemplarische Abbildungen der laterale Variation der Peak-Energie aus EL, bzw. des GGI-Verhältnisses aus RFA. ...	41
Abbildung 34: Gegenüberstellung der EL Peak Energie mit dem GGI Verhältnis vom RFA von beiden Versuchsgruppen. ....	42
Abbildung 35: Bis CdS prozessierte Proben (blau, Modul 01-141205-00764) vs. mit Essigsäure geätzte Proben (rot, Modul 01-141205-00762). ....	43
Abbildung 36: TRPL-Signal als Funktion der Anregungsdichte.....	45
Abbildung 37: Vergleich des TRPL-Signals bei fester Anregungsleistung.....	46
Abbildung 38: Zusammenhang zwischen $V_{oc}$ und $\tau_{\infty}$ .....	47
Abbildung 39: Vergleich zwischen einem EL Bild und einem Photostromsammlungs-Effizienz Bild....	51
Abbildung 40: Stromsammlungsbilder eines CIGS-Moduls der Firma MCT/NSE bei unterschiedlichen Arbeitspunkten. ....	51
Abbildung 41: (a) lokaler Photostromsammlungskoeffizient multipliziert mit dem lokalen Photostrom zur Bestimmung des extrahierten Photostroms. (b) Extrahierter Photostrom von jedem Ort bestimmt indem in der Simulation der Photostrom jedes Ortes zu null gesetzt wird und die Differenz zum ursprünglichen Strom bestimmt wird. ....	52
Abbildung 42: Summe des extrahierten Photostroms bestimmt aus dem Photostromsammlungskoeffizienten (grün) und direkt aus Simulationen (blau).....	53
Abbildung 43: Gesamter gesammelter Photostrom bestimmt mittels zweier Methoden im Vergleich. ....	54
Abbildung 44: Photostromsammlungskoeffizient eines CIGS Minimoduls. Die Zellen mit einem Kurzschluss zeigen eine vergrößerte Photostromsammlung. ....	55
Abbildung 45: Totale Photostromsammlungskoeffizienten Bilder gemessen an einer CIGS Zelle bei verschiedenen Spannungen und einer Beleuchtungsintensität äquivalent zu 1.15 Sonnen. (a) 0,65V, (b) 0,70V .....	57
Abbildung 46: Globaler diff. Photostromsammlungskoeffizient gemessen mit Lumineszenz Messungen (rot) und externe Strom Messungen (blau) bei verschiedenen Spannungen und Beleuchtungsintensitäten.....	57
Abbildung 47: Arbeitspunkt Abhängigkeit des Serien Widerstandes einer CIGS Solarzelle. ....	58
Abbildung 48: Skizze eines Ersatzschaltbildes, welches die Spannungs- und Beleuchtungsabhängigkeit eines Serienwiderstandes beinhaltet, wie sie im Experiment gefunden wurde. ....	59

Abbildung 49: Experimentelle Messungen (Rechtecke) und Berechnungen mit dem Ersatzschaltbild (Linien) der Strom/Spannungskennlinien (links) und der Spannungsabhängigkeit des Serienwiderstandes (rechts) unter Beleuchtung (rot) und im Dunkeln (Schwarz).....	59
Abbildung 50: (a)Schematische Darstellung der Leistungsdissipation in Abhängigkeit der Spannung (b) Voltage-moduliertes LIT Bild eines a-Si:H mini-Moduls unter LED Beleuchtung von 450 nm.....	60
Abbildung 51: (a) Spannungsmoduliertes LIT Bild eines MCT/NSE CIGS Moduls am MPP und einer Spannungsmodulation von 0,6V. (b) LIT Phasenbild bei sonst gleichen Einstellungen...	61
Abbildung 52: Wärmebild eines CIGS Moduls unter verschiedenen Bias-Spannungen in Rückwärts-Richtung. Erst bei einer Spannung von -20V werden erste Shunts sichtbar (b). Mit steigender Rückwärtsspannung nimmt die Anzahl der Shunts zu (c)-(d).....	63
Abbildung 53: Lock-in Thermografie Bild des CIGS Moduls in Vorwärtsrichtung bei $I = 33 \text{ mA}$ , $10 \text{ V}$ (a) vor und (b) nach dem Anlegen der Spannungs-Rampe in rückwärts Richtung. ....	63
Abbildung 54: J/V Charakteristik einer CIGS Zelle in zwei Durchlaufrichtungen. Es wurden dabei auffällige Unterschiede zwischen diesen Kurven beobachtet (Erklärung siehe Text).....	64
Abbildung 55: Reverse Bias Messungen bei unterschiedlichen Start- und End-Spannungen. Dadurch kann eine Rückstrom Kennlinien Charakteristik rekonstruiert werden ohne Einfluss von Temperatureffekten während der Messung. ....	65
Abbildung 56: Zwei während der Shuntentstehung gemessene Spektren. Die beiden Spektren sind mehr oder weniger identisch (ein Schwarzkörperstrahlung Fit führt auf ca. 1760K). ....	66
Abbildung 57: Links: Reiter mit dem Live-Bild und Kameraeinstellungen. Rechts: Lock-In Auswertung mit $0^\circ$ , $90^\circ$ , Amplituden und Phasenbild.....	67
Abbildung 58: Reverse Bias Puls Experiment. An ein CIGS Minimodul wurde eine Gesamtspannung von -25V angelegt (entspricht einer Zellspannung von -6.25V). Die Pulsbreite der Anregung betrug 1ms, die Kamerafrequenz 1Hz. Das linke Bild (a) zeigt die Mittelung über viele „On“ Zustände, Bild (b) zeigt die Mittelung über die „OFF“ Zustände.....	68
Abbildung 59: (a) Anregungssignal bei der Standard Thermografie (Rechtecksignal mit einem DC (Duty Cycle) von 50%). (b) Anregungssignal mit deutlich reduziertem DC Wert (hier 20%). (c) Schematische Darstellung eines Burst Signals.....	68
Abbildung 60: Lockin Thermografie Messungen eines Minimodul ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) mit zwei kontaktierten Zellstreifen in vorwärts Richtung (Erläuterungen siehe Text). ....	69
Abbildung 61: Lockin Thermografie Messungen an einem Minimodul ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) mit zwei kontaktierten Zellstreifen bei einer Spannung von -10V in rückwärts Richtung.....	69
Abbildung 62: Realisierung der Burst Puls Methode. In diesem hier gezeigten Experiment wurde an eine CIGS Probe ein Anregungssignal mit einer Frequenz von $f=1,1\text{Hz}$ und 200 Burst Pulsen angelegt.....	70

Abbildung 63: a) Schematische Darstellung einer typischen „Durchbruch“-V(I) Kurve. (b) zeigt eine typische Durchbruch-Messung an zwei verschalteten Zellstreifen.....	71
Abbildung 64: a) DLIT Bild bei -2V überlagert mit einem optischen Bild. Dadurch lässt sich die Lage der Shunts besser ermitteln. (b) Überlagertes vorwärts EL Bild mit dem Durchbruchbild. ..	72
Abbildung 65: Auswertung der ersten Durchbruchserie. Es wurden hier die V(I) Kennlinien ausgewertet. Es sind die Häufigkeiten der Durchbruchströme und - Spannungen aufgetragen.....	72
Abbildung 66: Auftragung der Häufigkeit von Defekten an verschiedenen Positionen innerhalb einer Zelle und Strukturierungslinien (p1, p3). Unter „Center“ sind Defekte (Durchbrüche) gezählt, die innerhalb einer Zelle liegen. „Edge“ sind Durchbrüche, die am kurzen Rand der Zelle liegen, also nicht an den Strukturierungslinien liegen.....	73
Abbildung 67: Ergebnis-Plot der Clusteranalyse der FZJ Daten. Die Punkte sind gefärbt nach den Modul IDs.....	75
Abbildung 68: Clusteranalyse der FZJ Daten. Die Datenpunkte aus obiger Abbildung wurden in dieser Auftragung nach Klasse A und B gefärbt. Man erkennt keine weiteren Korrelationen oder Merkmale. ....	75
Abbildung 69: Analyse UO Daten: Hier sind die Punkte gefärbt nach Durchbruchexperimente im Dunkeln (grün) und unter Beleuchtung (lila).....	76
Abbildung 70: Datenanalyse der UO Daten: Sortierung grün mit und lila ohne Vorkonditionierung.	76
Abbildung 71: Datenanalyse der UO Daten: Hier wurde der Plot aufgeteilt in Strom- (grün) und Spannungsgetriebenen (lila) Punkte.....	77
Abbildung 72: Dunkelkennlinien der Proben mit unterschiedlichen Molybdän-Schichtwiderständen.	77
Abbildung 73 ILIT-Bild vor Schädigung .....	78
Abbildung 74 ILIT-Bild nach Schädigung.....	79
Abbildung 75 Vergleich Defekte (DLIT) initial sowie "Wurmbildung" nach der Degradation.....	80
Abbildung 76 Lokalisierung von "Würmern" im DLIT sowie Mikroskopbild .....	81
Abbildung 77 Temperaturabhängigkeit des Durchbruchverhaltens.....	82
Abbildung 78: Typisches Admittanz-Spektrum .....	83
Abbildung 79: Voc(T) und Rückkontaktbarriere.....	83
Abbildung 80: Rückkontaktbarrieren aus C(f) und Voc(T).....	84
Abbildung 81: Metastabile Änderungen in MCT/NSE-Material bei Light-Soaking- bzw. Dark Annealing-Behandlung.....	86
Abbildung 82: Kapazitätstransienten einer BSCT-Zelle .....	87
Abbildung 83: Strom-Spannungs-Kurven einer BSCT-Zelle .....	87

Abbildung 84: Defektdichten aus Admittanzspektroskopie-Messungen.....	88
Abbildung 85: Gemessene und simulierte IV- und EQE-Charakteristik der MCT/NSE-Zellen.....	90
Abbildung 86: Gemessene und simulierte IV- und EQE-Charakteristik der BSCT-Zellen .....	90
Abbildung 87: SEM-Bilder eines durch einen focussed-ion-beam (FIB) induzierten Defekts. ....	91
Abbildung 88: Simulationsstruktur von Solarzellen mit 100-fach erhöhter Trapdichte bei $x = 0,5 \mu\text{m}$ (links) bzw. CdS-Pufferlücke (rechts). ....	92
Abbildung 89: Strom-Spannungsverhalten im Dunkeln von lokalen Defekten.....	93
Abbildung 90: Maximaler Temperaturunterschied zwischen Defekt und defektfreier Region und Verluste bei Leerlaufspannung und Füllfaktor bei Defekten mit variierender Ausdehnung. ....	94
Abbildung 91: Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines typischen Defektes, der durch hohe Rückwärtsspannungen induziert wurde. ....	94
Abbildung 92. EBIC/SEM-Charakterisierung eines Defekts.....	95
Abbildung 93. Defektuntersuchungen an der $10 \times 10 \text{cm}^2$ -Kachel Nr. 29 .....	96
Abbildung 94: Externe Quanteneffizienz (EQE) an MCT/NSE-Zellmaterial .....	97
Abbildung 95. Untersuchungen von MCT/NSE-Zellen im Bereich der P1-Strukturierungslinie.....	98
Abbildung 96. PL-Untersuchungen der P1-Strukturierungslinie .....	99
Abbildung 97: Rückwärtsspannungsverhalten bei Zellen von MCT/NSE .....	101
Abbildung 98: Rückwärtsspannungsverhalten einer MCT/NSE-Zelle (01-150923-0270) für unterschiedliche Beleuchtungsintensitäten ( $100 \% = 1000 \text{ W/m}^2$ ) bzw. unter Verwendung eines Langpassfilters (rote Kurve). ....	101
Abbildung 99: Rückwärtsspannungsverhalten von MCT/NSE-Zellen (01-150923-00270).....	102
Abbildung 100. Rückwärtsspannungsverhalten verkapselter und unverkapselter strukturierter MCT/NSE-Einzelzellen.....	103
Abbildung 101. Konstant-Strom-Messung. ....	104
Abbildung 102: Simulation eines lokalen Defekts.....	105
Abbildung 103: Quasi-stationäre IV Charakteristik, bei der Spannung (links) oder Strom (rechts) nach kurzen Haltezeiten schrittweise erhöht wurden und die Stromdichte bzw. Spannung gemessen wurden.....	107
Abbildung 104: Maximale Belastung vor Durchbruch.....	107
Abbildung 105: (a) $f_{pc}$ bestimmt aus den lokal berechneten Diodenspannungen. (b) bestimmt aus lokaler Variation des Photostroms. Beide Methoden liefern wie erwartet die gleichen Ergebnisse.....	110

Abbildung 106: Vergleich der J/V Kennlinien eines Phototransistors bei verschiedenen Temperaturen, berechnet mit dem Gummel-Poon und dem Referenz VBIC Modell. Die Punkte im Diagramm repräsentieren die Berechnungen basierend auf dem VBIC Modell, die Linien die berechneten Kurven basierend auf dem PVMOS (Gummel-Poon). ..... 111

Abbildung 107: Vergleich zwischen Experiment und Simulation für ein MCT/NSE-Mini-Modul. a) Vergleich zwischen experimentellen (oben) und simulierten (unten) Junction Voltage Bildern. b) Vergleich zwischen der dunklen (oben) und der hellen (unten) IV-Charakteristik..... 113

Abbildung 108: Die normierte Leistungsdissipation im Kurzschluss aufgetragen gegen den Wirkungsgradverlust für die drei Methoden zur Kurzschluss-Minderung: a) Erhöhung des Flächenwiderstandes des Rückkontakts, b) Abnahme der Zellenbreite, c) Methode Einführung paralleler Trennlinien..... 114

Abbildung 109: a) Darstellung von "Kompensations-" Strömen bei Vorliegen von Inhomogenitäten im Randbereich (rote Fläche). b) Ein Anstieg des Mo-Flächenwiderstands kann die Kompensationsströme reduzieren. c) Iso-Schnitte sollen Kompensationsströme reduzieren..... 115

Abbildung 110:a) Illustration der simulierten Randinhomogenitäten von 3, 5 und 10 cm. b) Simulierter Wirkungsgradgewinn für Iso-Linien und erhöhte Mo-Flächenwiderstände. .... 116

Abbildung 111: Ein Ersatzschaltbild für eine Solarzelle. .... 118

Abbildung 112: Die optische Quanteneffizienz der p-, n- und d-Regionen..... 119

Abbildung 113: Abbildung der Berechnung der JV-Kennlinien durch jede Diode im Netzwerk. Die Rekombinationsraten sind über verschiedene Teile der Diode integriert, wobei der rote Bereich den Strom durch die p-Schicht-Diode anzeigt, der grüne Bereich die Rekombination in der Bulk-Diode und der blaue Bereich die n-Schicht-Diode..... 120

Abbildung 114: Die JV-Kennlinien der p-, Bulk- und n-Diode (links) und der Widerstände (rechts). Die aus den Device Simulationen berechneten Werte sind mit Punkten und die Anpassungen mit sind mit Linien entsprechender Farbe gekennzeichnet..... 121

Abbildung 115: Vergleich der dunkel (links) und beleuchtet (rechts) Bauteilkennlinien bestimmt durch Bauteilsimulationen (ASA) und unserer Ersatzschaltung (Schaltung). .... 121

Abbildung 116: (a) Per Lumineszenz gemessene Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte (durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt). (b) Mit PVMOS simulierte Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte (durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt). .... 122

Abbildung 117: Mit PVMOS simulierte (mit spannungsabhängigem Serienwiderstand) Zell Dioden Spannungen mit (rot) und ohne (schwarz) Beleuchtung einer CIGS Zelle ohne Defekte(durchgehend) und einer Zelle mit Kurzschluss (gestrichelt). ..... 123

Abbildung 118: (a) Experimentell gemessene Photostromsammlungs Effizienz einer CIGS Solar Zelle. (b) Simulierte Photostromsammlungseffizienz eines 1-Dioden Modells. .... 123

Abbildung 119: Mit PVMOS simulierte Photostromsammlungseffizienz bei Benutzung des Ersatzschaltbildes welches einen spannungsabhängigen Serienwiderstand nutzt. .... 124

Abbildung 120: Vergleich: Lebensdauern aus TRPL und IV(T). .... 125

Abbildung 121 Prinzip vibrating Kelvin-Probe. .... 125

Abbildung 122 Vergleich PL und Kelvin-Probe an partiell gealterten Proben ..... 126

Abbildung 123 Modellvorstellung für PL und Bandverbiegung ..... 127

Abbildung 124: a) Allgemeine Benutzer-oberfläche der erstellten Software. Neben der Auswahl der zu bearbeitenden Bilddatei können die diversen Messparameter eingegeben und verschiedene Bildbearbeitungsoperationen ausgeführt werden; b) Beispielhafte Benutzer-oberfläche für den Unter-punkt „Edge Detection“ ..... 129

Abbildung 125: Vergleich des hier entwickelten Kantenerkennungsalgorithmus: a) mit dem Ergebnis einer klassischen Schwellwertanalyse; b) am Beispiel eines CIGS-Minimoduls ..... 130

Abbildung 126: Flussdiagramm des neu entwickelten Algorithmus zur Kantendetektion ..... 131

Abbildung 127: Bestimmung der EL-Zentralwellenlänge in der im Projekt entwickelten Software... 131

Abbildung 128: Defekterkennung auf Basis des neu entwickelten Algorithmus für verschiedene Werte von  $P_{\text{factor}}$  (a) 0,001, b) 0,02, c) 0,15, d) 80. e) verdeutlicht die in Gleichung 7 bis Gleichung 10) dargestellten Algorithmen am Beispiel einer typischen Intensitätsverteilung eines DLIT-Bildes. Rote Pixel kennzeichnen dabei als für defektbehaftet befundene Pixel. .... 133