

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Schlussbericht

Kalibrierung großflächiger Tandem Solarzellen und -module für den industriellen Perowskit-Silizium-Markteintritt
(KATANA)

Teilvorhaben der WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH:
Weiterentwicklung einer LED-basierten Messtechnik zur Analyse von
Perowskit-Silizium Tandemmodulen

24.07.2024

Förderkennzeichen: 03EE1087C

Projektlaufzeit: 01.02.2021-30.04.2024

Projektkoordination Teilvorhaben und Autoren: Dr. Bernhard Mitchell, Falko Griehl

WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH

Spinnereistraße 7

04147 Leipzig

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen	3
3	Planung und Ablauf	4
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	5
5	Zusammenarbeit.....	6
6	Ergebnisse.....	6
6.1	Grundlegende Arbeiten (AP1.1)	6
6.2	Einbinden weiterer WPVS-Monitorzellen (AP1.4)	8
6.3	Erweiterung des Pmpp Tracings (AP1.3).....	10
6.4	Erweiterung des IR-Spektrums (AP1.2)	11
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	13
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	13
9	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	14
10	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt.....	14
11	Veröffentlichungen und Referenzen.....	14

1 Aufgabenstellung

Die übergeordnete Aufgabenstellung des Teilprojekts war die Verbesserung und Innovation im Bereich der Perowskit-Si Tandemsolarmodul Charakterisierung.

Dabei sollte Messtechnik in Hard- und Software erforscht und entwickelt werden, welche die genaue und präzise Vermessung großformatiger photovoltaischer Module mit Perowskit-Si-Tandemzelltechnologie ermöglicht.

Zwei besondere Herausforderungen mussten hierbei gemeistert werden:

- a) IV-Vermessung von Perowskit-Topzellen mit der Notwendigkeit der Stabilisierung des maximalen Leistungspunktes aufgrund zellinterner Ionenströme auf Zeitskalen von Sekunden bis Minuten abhängig von externen Terminalspannungsänderungen.
- b) IV-Vermessung einer zwei Terminal zwei Junction (2T2J) Tandemtechnologie mit der einhergehenden erhöhten Abhängigkeit der Messgenauigkeit und Präzision von der spektralen Übereinkunft des Beleuchtungsspektrums zum Normspektrum und dessen zeitlicher Stabilität. Dabei entsteht durch die Serienverschaltung der Teilzellen die Notwendigkeit den Abweichungen zum Normspektrum über beide Teilzellen möglichst klein und gleichmäßig zu halten.

Die konkreten F&E Ziele basierten dabei auf dem neu entwickelten Messgerät SINUS-3000 ADV, welches eine sehr homogene, in Intensität und Spektrum stabile kontinuierliche Beleuchtung realisiert.

Über die Entwicklung des Demonstrators war die spezielle Aufgabenstellung die Kalibrierfähigkeit durch die Integration weiterer Referenzsolarzellen, welche die Intensität und die spektrale Verteilung genau monitoren und zeitkorreliert loggen.

Die Unterstützung einer flexiblen Programmierung der Steuerung von Licht und Strom- und Spannungsmessung zur Abbildung verschiedener Algorithmen zur Vermessung des sog. „stabilisierten maximalen Leistungspunktes“ (stabilisierter P_{max} , typ. 5min) war eine weitere wichtige konkrete Aufgabenstellung.

Schließlich sollte eine spektrale Erweiterung des Beleuchtungsspektrums in den Wellenlängenbereich oberhalb von 1200nm (1200-1800nm) untersucht und demonstriert werden.

2 Voraussetzungen

Das Vorhaben war eingebettet in die Entwicklung und Fertigung einer neuen Generation von Solarsimulator und Tester (SINUS-3000 ADV) durch WAVELABS. Dieser wurde mit den notwendigen Fähigkeiten und Spezifikationen für die genaue Vermessung von großflächigen Perowskit, Si und Tandemsolarmodulen ausgestattet. Der Tester realisiert eine einzigartige Basis für das Ziel des Gesamtvorhabens, der weltweit erstmaligen rückführbaren Vermessung eines großflächigen Pero/Si Tandemmoduls.

Das Vorhaben darüber hinaus adressierte zusätzliche Fähigkeiten des Messgerätes in Hard- und Software, welcher in der Flexibilisierung und Kalibrierung, d.h. Rückführbarkeit der Messungen liegen.

Das Hauptgerät wurde durch den Projektpartner Fraunhofer ISE zu Beginn der Projektlaufzeit beschafft. Die weiteren Fähigkeiten und Komponenten wurden im Rahmen dieses Teilvorhabens erforscht, entwickelt und erprobt.

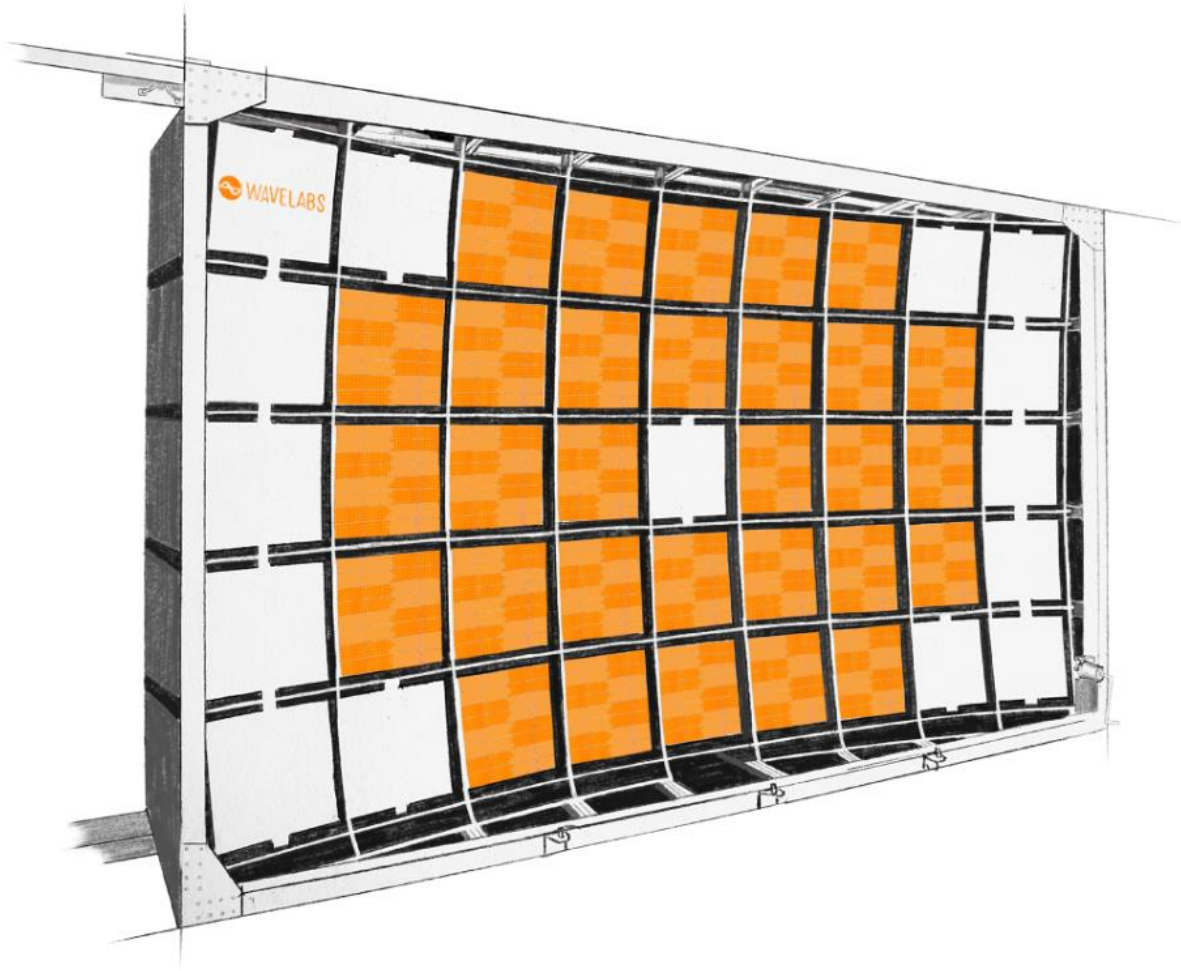


Abbildung 1: Skizze der SINUS-3000 ADV-Beleuchtungseinheit mit Rahmen und Vielzahl UV/VIS/NIR LED-Beleuchtungsboxen. Hier noch ohne die Bestückung von LED-Boxen zur Erweiterung des Spektrums in den NIR-Bereich oberhalb von 1200nm.

3 Planung und Ablauf

Um die Projektziele umzusetzen, war folgender Arbeitsplan vorgesehen:

1. Grundlegende Arbeiten zur Messung von Zellen und Modulen mit einstellbarem Spektrum
 - Analyse der spektralen Eigenschaften bezgl. Normsimulation und spektraler Stabilität
 - Analyse der Beleuchtungshomogenität und Variation der Einstrahlungsintensität
2. Erweiterung des Beleuchtungsspektrums im NIR oberhalb von 1200nm
 - Entwicklung eines Prototyps einer IR-Beleuchtungseinheit
 - Mechanische Integration und Erweiterung der Firmware und Steuersoftware
3. Flexibilisierung des Pmp Tracings
 - Eröffnung einer direkten Programmierschnittstelle der Beleuchtungseinheit
 - Eröffnung einer direkten Programmierschnittstelle der Strom-Spannungsmessung
4. Einbindung weiterer mindestens 4 Intensitätssensoren zum zeitsynchronisierten Logging der Beleuchtungsintensitäten von beispielweise Teilspektren
 - Miniaturisierung und Integration
 - Digitalisierung
 - Zeitsynchronisierung in Hardware
 - Datenschnittstelle in Hardware und Software



Abbildung 2: Verteilung der LED-Boxen im Schirm der Beleuchtungseinheit. Die Optiken sind so ausgelegt, dass sich in der Messebene das LED-Licht perfekt mischt und homogenisiert. Alle Boxen beleuchten das vollständige Messfeld.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Die Vermessung von 2-Terminal Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V war etabliert auf Zellebene inklusiver einer möglichen Rückführbarkeit der Messunsicherheit in Kalibrierlaboren wie z.B. dem Fraunhofer ISE Callab. Die Vermessung von Perowskit-Solarzellen mit ihrer Vielfalt von Materialkompositionen und kinetischen Eigenschaften kann zum Zeitpunkt des Projektbeginns als problematisch und oft hoher Messunsicherheit aufgefasst werden. Hintergrund ist hier die Nichteignung von verbreiteten Blitz-Sonnensimulatoren zur Vermessung des stabilisierten Leistungsvermögens von Solarzellen- und Solarmodulen, welche bis zu 30% relative Abweichungen zeigen.

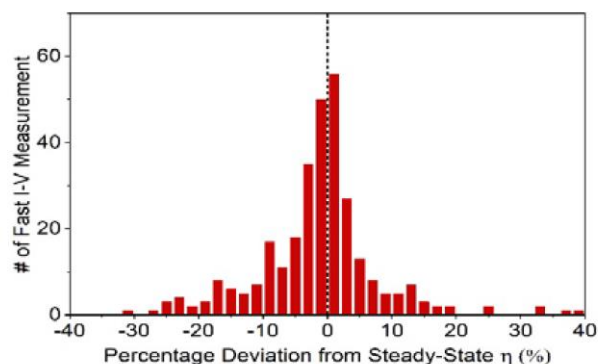


Abbildung 3: Histogramm der Abweichung von schnellen und stabilisierten maximalen Leistungswerten über 100 am NREL (USA) vermessen Solarzellen [1].

Die rückführbare und damit kalibrierbare Vermessung von Perowskit Tandemsolarmodulen war zu Projektbeginn noch nicht für Module gezeigt. Diese Messung war hingegen auf Zellebene etabliert. Wobei noch keine Norm für die Vermessung des stabilisierten Leistungswertes existiert.

Die technischen Anforderungen für diese Vermessung waren besonders hoch, da ein Dauerlicht mit hoher spektraler Stabilität und Homogenität notwendig ist, um eine hohe Messgenauigkeit im Bereich kleiner 5% der maximalen Leistung erzielen zu können.

Eine genaue Vermessung von großflächigen zwei Terminal Perowskit-Si Tandemmodellen benötigt einen Sonnensimulator mit folgenden Eigenschaften:

1. Sehr nahe Anpassung des Beleuchtungsspektrums an das Normspektrum AM1.5G
2. Hohe Stabilität des Spektrums nach wenigen Millisekunden des Einschaltens bis über Minuten und Stunden
3. Fähigkeit der Feinanpassung der Normabweichung in der spektralen Simulation, so dass jede Teilzellen integral die nahezu gleiche kleine Abweichung zur Norm erfährt. Dies kann beispielsweise durch eine Spektralanpassung an eine referenzierte spektrale Empfindlichkeit umgesetzt werden.
4. Hohe Homogenität der Beleuchtung bis möglichst in Sub 100nm Bereichen über die gesamte Beleuchtungsfläche

Für die Vermessung von Stapelsolarzellen auf Basis von III-V Halbleitern ist zusätzlich eine spektrale Erweiterung oberhalb von 1200nm notwendig, um deren Bottom-Zelle auszuleuchten.

Tandem-Solarmodule auf Basis von Silizium-Wafer-Technologie erreichten zu Projektbeginn eine Fläche von bis zu 2200x1400mm mit steigender Tendenz.

5 Zusammenarbeit

Die Projektarbeit war hauptsächlich bilateral zwischen dem Fraunhofer ISE und WAVELABS, wobei das Fraunhofer ISE wiederum mit andere Projektpartnern z.B. an der Bereitstellung von großflächigen Tandem-Modulen arbeitete.

Die Zusammenarbeit basierte in der Detailspezifikation der Lasten der einzelnen Meilensteine, des gemeinsamen Aufbaus und der Erprobung. Teils wurden iterative Meilensteine definiert, um sich dem Ziel anzunähern.

6 Ergebnisse

6.1 Grundlegende Arbeiten (AP1.1)

In der Qualifizierung des neuen Sonnensimulators SINUS-3000 ADV wurde insbesondere die Lichtstabilität in Intensität und Spektrum vermessen. Auch die Homogenität in den einzelnen LEDs war eine wichtige Spezifikationsgröße, da für die genaue Vermessung von Tandemmodulen die Beleuchtung spektral schmalbandiger homogen ausgeführt werden muss.

Insgesamt wurde die Gerätespezifikation qualifiziert. In Tabelle 1 sind grundlegende Sonnensimulatorwerte vermessen (nach IEC 60904-9 Ed3 gelistet).

Tabelle 1: SINUS-3000 ADV-Sonnensimulator Klassifikationsnachweise

Classification item (nach IEC 60904)	Nachgewiesen
---	--------------

Spektraler Match	A+ (0,875 - 1,125)
Non-Uniformity	A (< 2%), A+ (< 1%) if possible
STI	A (synchronized)
LTI (Flash)	300ms: A+++ (<0,25%) for > 200W A (<2%) for < 200W
LTI (Continuous)	1h: A+ (<1%) for > 200W A (<2%) for < 200W
SPC	> 95% (350 - 1200nm)
SPD	< 25% (350 - 1200nm)
Intensity Range (Flash)	100 - 1070 W/m ² , adjustable in steps of 5%
Intensity Range (Continuous)	1 Sun (AM1.5G)

		Messergebnisse [Isc in A]														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
A		3.293	3.272	3.266	3.271	3.267	3.265	3.265	3.268	3.272	3.275	3.281	3.275	3.283	3.306	1300 mm
B		3.285	3.268	3.265	3.266	3.259	3.259	3.265	3.268	3.265	3.270	3.277	3.275	3.278	3.300	
C		3.293	3.279	3.277	3.270	3.264	3.264	3.269	3.270	3.268	3.272	3.277	3.281	3.281	3.296	
D		3.290	3.281	3.280	3.272	3.266	3.273	3.283	3.286	3.277	3.273	3.276	3.282	3.281	3.292	
E		3.283	3.275	3.277	3.269	3.266	3.277	3.297	3.302	3.282	3.269	3.269	3.277	3.275	3.285	
F		3.286	3.276	3.275	3.269	3.268	3.279	3.291	3.286	3.275	3.269	3.274	3.283	3.282	3.292	
G		3.290	3.281	3.278	3.273	3.269	3.267	3.279	3.279	3.267	3.267	3.273	3.280	3.280	3.295	
H		3.290	3.273	3.272	3.269	3.265	3.265	3.266	3.265	3.262	3.260	3.268	3.273	3.274	3.293	
I		3.284	3.260	3.250	3.256	3.254	3.253	3.249	3.248	3.252	3.255	3.258	3.254	3.261	3.287	
		2200 mm														
		Inhomogenität														
		Maximum	3.306													
		Minimum	3.259													
		Ergebnis	0.730%													

Abbildung 4: Messung der Beleuchtungshomogenität anhand des Kurzschlussstromes einer referenzierten temperaturstabilisierten Solarzelle nach WPVS-Standard. Die Zielspezifikation, eine Restinhomogenität kleiner 1%, wurde deutlich übertroffen.

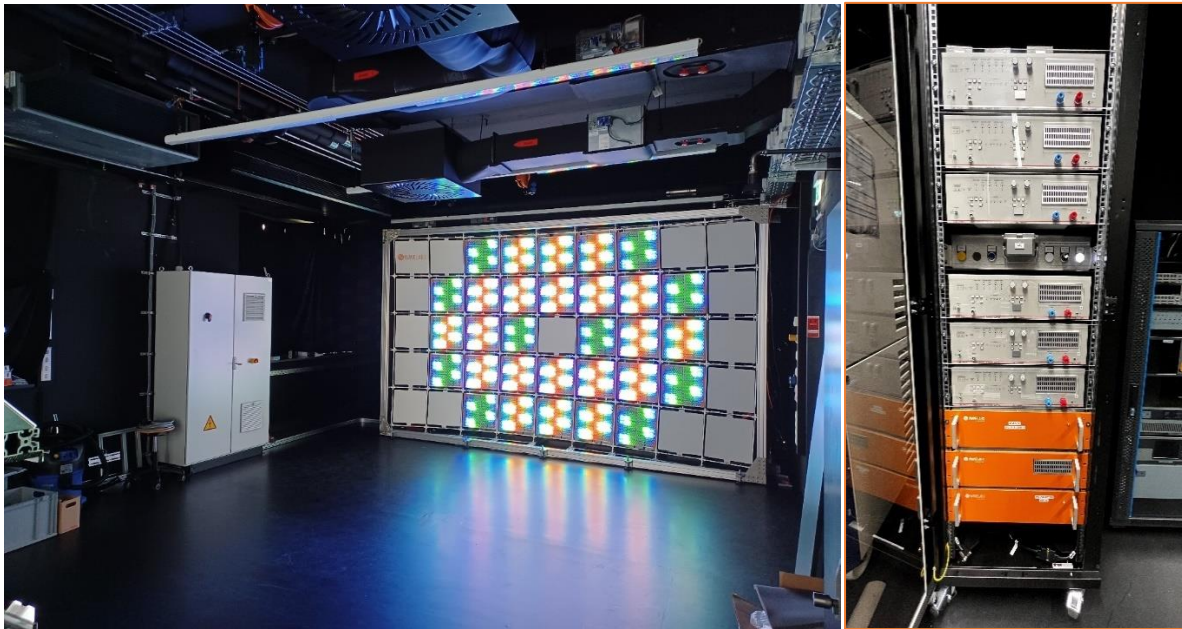


Abbildung 5: Grundgerät SINUS-3000 ADV installiert am Fraunhofer ISE. Sichtbar sind links die Beleuchtungseinheit im Gesamtschirm noch ohne IR-LED-Erweiterungsboxen und mit Schaltschrank. Rechts ist gezeigt das IV und Verstärker Rack mit Messbereichen für Modul- und Zellmessungen.

6.2 Einbinden weiterer WPVS-Monitorzellen (AP1.4)

Für die rückführbare IV-Messung einer 2T Tandemsolarzelle ist es notwendig, die Intensität und die Verteilung des Beleuchtungsspektrums als Funktion der Zeit zu vermessen. Dies muss während der Beleuchtung und Vermessung der Proben durchgeführt und zeitsynchron protokolliert bzw. „geloggt“ werden.

Das WAVELABS Spektrometer des SINUS-3000 ADV ist in der Lage, diese Daten als sogenanntes „Arbeitsnormal“ zu erfassen. Für die lückenlose Rückführbarkeit zur Primärreferenz der PTB zum Standardspektrum AM1.5G werden zusätzlich im Kurzschlussstrom referenzierte Monitorzellen nach dem Typ WPVS eingesetzt. Diese können frei im Beleuchtungsfeld platziert werden.

Um die Notwendigkeit einer umfangreichen spektralen Abweichungskorrektur zu vermeiden, und damit die Unsicherheitseinflüsse solch einer Korrektur gering zu halten, werden spektral gefilterte WPVS-Siliziumsolarzellen eingesetzt. Die Befilterung wird spektral derart angepasst, dass die resultierende Quanteneffizienz der befilterten WPVS-Zelle, die der jeweiligen Teilzellen der zu vermessenden Tandemsolarzellen in Annäherung entspricht. Verbleibende Abweichungen werden über eine Mismatchkorrekturrechnung auf ein vernachlässigbares Unsicherheitsniveau reduziert.

Die Kurzschlussströme der Monitorzellen müssen hochaufgelöst und mit geringem Rauschen präzise über einen temperaturunabhängigen parallel verschalteten Messwiderstand in eine Spannung umgewandelt werden. Zusätzlich wird die Temperatur des Prüflings über einen thermisch angebundenen PT100 Sensor genau und präzise vermessen.

Aufgabe war es, die Ströme und Temperatursignale dieser weiteren Monitorzellen analog zu vermessen, digital zu wandeln, und zeitbasiert bzw. -synchron als Loggingdaten bereitzustellen. Dadurch wird eine nachträgliche Korrektur und Rückführbarkeit ermöglicht, um einen eventuellen Drift im Spektrum und Intensität des Sonnensimulators unabhängig und primärreferenziert vermessen und ggfs. korrigieren zu können.

Die Strommessung der WPVS-Zellen wurde hardwareseitig erreicht durch die miniaturisierte Integration eines Messwiderstandes in den Stecker direkt an der WPVS-Zelle. Alle analogen Messsignale der

bis zu vier Monitorzellen laufen über eine zentrale Mehrkanaldatenerfassung zusammen und können visualisiert und geloggt werden. Die analogen Messsignale werden dabei digitalisiert und mit Zeitstempel versehen. Weiterhin werden die Daten über eine Softwareschnittstelle an die zentrale Systembenutzersoftware WAVELABS SINUSGUI weitergeleitet. Letztlich sind die Monitordaten zeitsynchron in den Ergebnisdateien der Modulmessung aufgeführt und können für ggfs. notwendige Spektralkorrekturen herangezogen werden. Das Monitoring kann durch logische Kanäle ergänzt werden und in Echtzeit angezeigt werden. Dadurch können z.B. manuelle oder automatisierte Eingriffe in die Lichtregelung durchgeführt werden, sollten zeitliche Drifts in Intensität oder Spektrum festgestellt werden.



Abbildung 6: WPVS-Solarzelle mit primärreferenziertem Kurzschlussstrom zum Standardbeleuchtungsspektrum AM1.5G. Die Referenzstromsolarzelle hat einen Temperatursensor verbaut, welcher ebenfalls ausgelesen und geloggt wird.

Die zeitliche Zuordnung der Intensitätspegel erfolgt in drei wählbaren Operationsmodi je nach Gerätebetriebsmodus: a) Auf Einzelanforderung über die programmierbare Schnittstelle der SINUSGUI mit typischerweise 50ms Zeitabweichung; b) Über eine Trendzuordnung mit der I_{sc} -Daten des Prüflings und c) über einen Hardware-Trigger.

Hier als Langzeitmessungen benannte Vermessungen der IV-Kurve oder eines MPP-Tracings in Zeiträumen größer einer Sekunde erlauben ein Monitoring nach Methode a oder b. Aufwendigere Rezeptabfolgen mit beispielsweise mehreren schnelleren IV-Sweeps erfordern einen Hardware Trigger. Dieser erlaubt eine zeitliche Synchronisation der Messwerte auf ca. 1 Millisekunde. Letzteres ist bei der Vermessung von Silizium-Solarmodulen mit Durchsatzanforderungen notwendig.

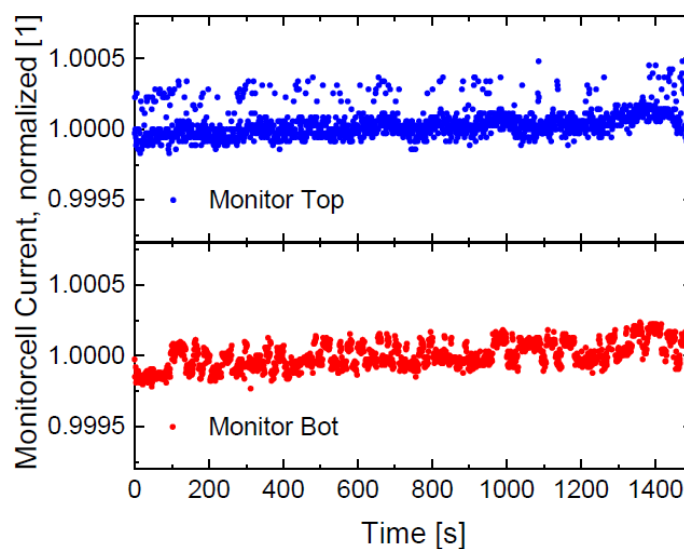


Abbildung 7: Beispielhafte WPVS Monitordaten von Projektpartner Fraunhofer ISE als Funktion der Zeit während einer IV und MPPT Messung eines Perowskit-Si-Tandem-Moduls.

6.3 Erweiterung des Pmpp Tracings (AP1.3)

Die WAVELABS SINUSGUI Anwendersoftware ermöglicht eine graphisch unterstützte Konfiguration eines Nachfahrens des maximalen Leistungspunktes (MPPT genannt) mittels zweier wählbarer Methoden. Mit der „Minisweep“ Methode wird nachfolgend eines initialen „vollen“ IV-Sweeps, um den initial ermittelten MPP eine Serie lokaler IV-Sweeps durchgeführt. Je nach Verschiebung dieses Punktes wird der lokale Sweep in seiner Spannungslage angepasst, bis keine Änderung der MPPs mehr messbar ist. Auf diese Weise wird eine stabilisierte maximale Leistung ermittelt.

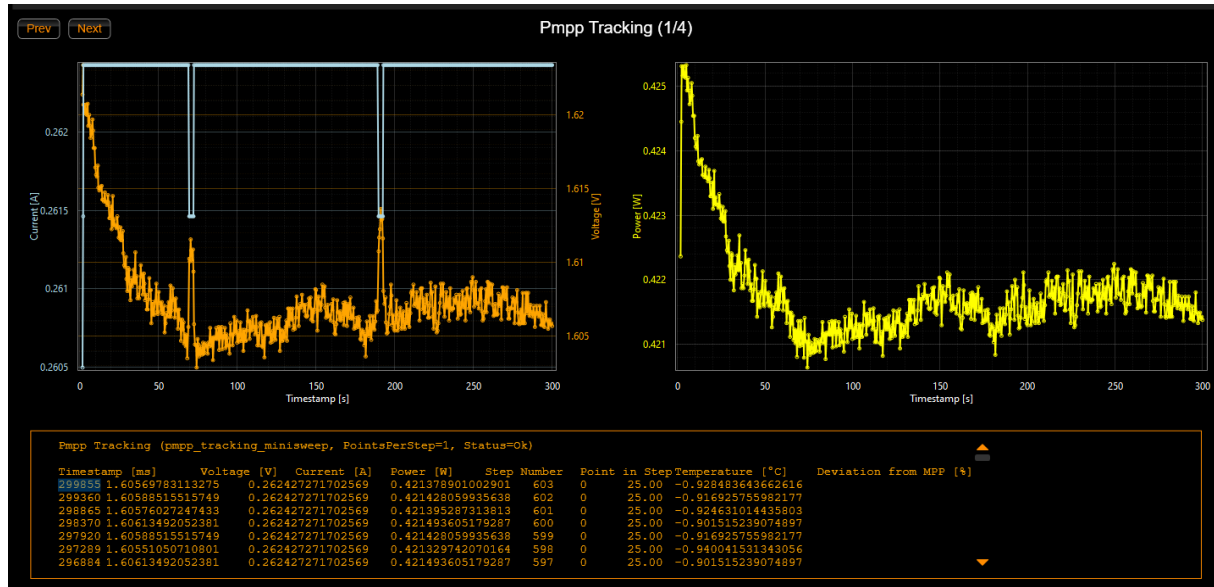


Abbildung 8: Screenshot einer MPPT Messung einer Perowskit-Silizium-Solarzelle unter Nutzung der SINUSGUI Anwendersoftware.

Um das System noch flexibler programmierbar zu gestalten und u.a. auch den sogenannten „asymptotischen“ Punkt maximaler Leistung vermessen zu können, wurde eine offene Programmierschnittstelle für die WAVELABS Lichtquelle und die WAVELABS IV-Elektronik/SMU-Einheit definiert. Diese es ermöglicht es direkte Kontrollbefehle zu übersenden und eine Messabfolge und -routine zu definieren. Auf diese Art ist eine flexible Ausführung des maximalen Leistungsnachfahrens ermöglicht. Dabei ist insbesondere eine manuelle Steuerung ermöglicht, welche individuell und ggfs. live ausgestaltbar ist, abhängig von den aktuellen Messdaten.

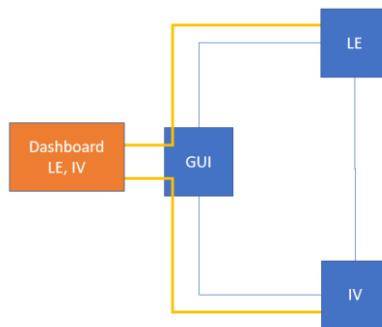


Abbildung 9: Kommunikationspfade der Programmschnittstelle über die WAVELABS SINUSGUI, wiederum weitergeleitet auf die Lichtquelle (LE) und die IV-Elektronik (IV). Der XML-basierte Befehlscode kann z.B. in ein Labview oder Python Dashboard eingebunden werden.

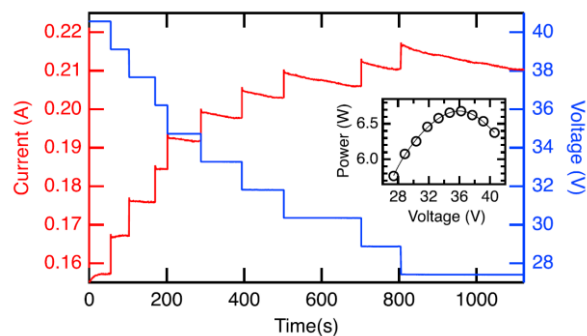


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf von Strom- und Spannung während einer sog. „asymptotischen“ Vermessung des Leistungsmaximums ermittelt durch eine aktiv gesteuerte Spannungsrampe am Zellterminal über den Wertebereich des vorherig schnell und noch stark unsicherheitsbehaftet ermittelten Arbeitspunkt maximaler Leistung [1].

Ein Beispielcode der direkten Programmierschnittstelle für die Lichtquelle, als „Freefloat-Modus“ bezeichnet, ist:

```
current_channel_settings_mpp = {2:50,3:40,6:40,9:100,10:100}
```

Ein Beispielcode der direkten Programmierung der IV-Elektronik, als „DirectAccess-IV Modus“ bezeichnet, ist:

```
start_voltage = -5
```

```
end_voltage = 1.0
```

```
sample_count = 300
```

Ein flexibles Ablaufrezept lässt sich damit erstellen und insbesondere die gewünschte Methode der stabilisierten Messung des Punktes maximaler Leistung realisieren. Aufgrund der Vertraulichkeit der vermessenen Module können an dieser Stelle keine realen Modulmessdaten gezeigt werden.

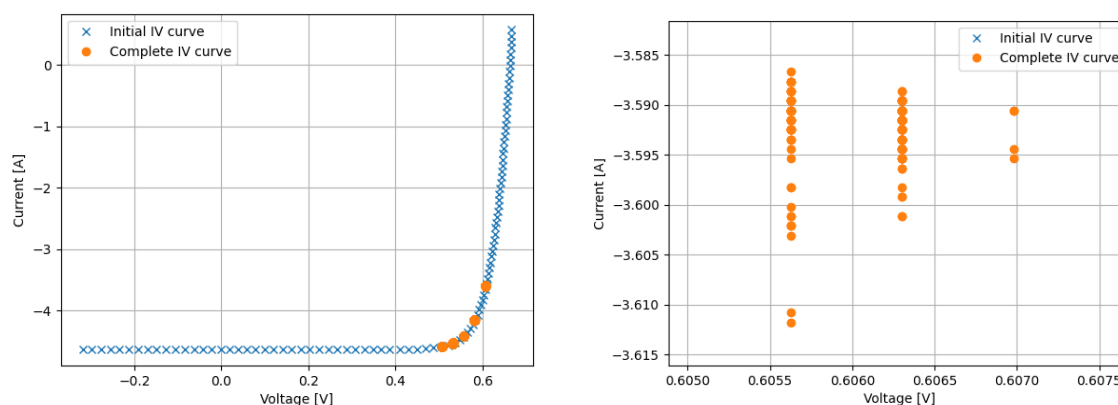


Abbildung 11: Abfahren einer asymptotischen P-Max Leistungsvermessung. Ein initialer IV-Sweep wird gefolgt von festen Spannungsanfahrpunkten um den MPP-Bereich (links). Der rechte Graph zeigt beispielhaft die Streuung des Zellstroms bei fest angelegter Terminalspannung, welche auch zeitlich aufgetragen werden kann.

6.4 Erweiterung des IR-Spektrums (AP1.2)

Vereinbartes Ziel war die spektrale Erweiterung des Beleuchtungsspektrums oberhalb von 1200nm, um mit dem Sonnensimulator und Model-IV-Tester SINUS-3000 ADV auch für die im Weltraumbereich eingesetzten III-V Stapelzellen mit 4 oder sogar 5 PN-Übergängen (4-5 Junctions) vermessen zu können.

Weitergehend war dazu die Untersuchung, ob das nötige strahlungsintensivere AM0 Spektrum erzielt werden kann. Eine Regelreserve wurde in der Auslegung angenommen.

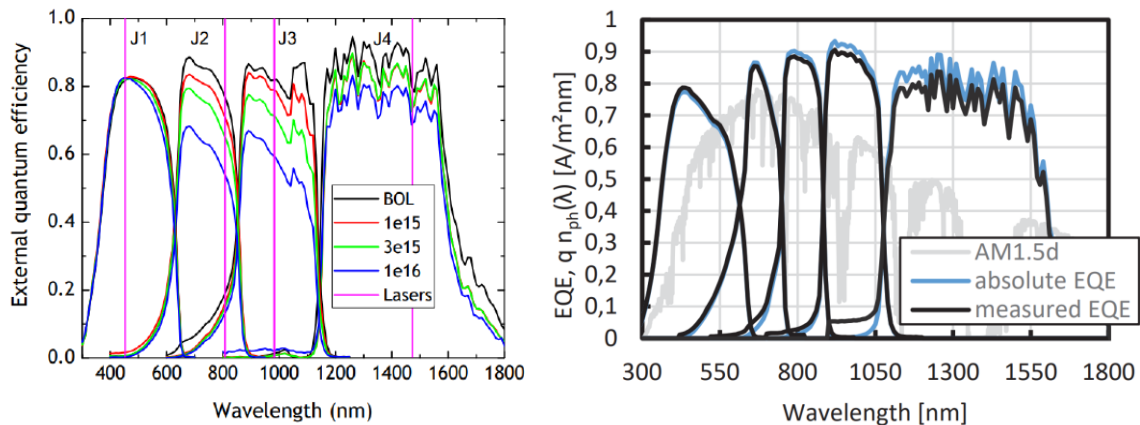


Abbildung 12: Gezeigt sind exemplarisch die externen Quanteneffizienzen einer 4J (links) und 5J III-V Stapelweltraumsolarzelle. Die sog. „Bottomsolarzelle“ benötigt eine Bestrahlung im Wellenlängenbereich 1200-1800nm in der nach dem Standardspektrum AM0 definierten Intensität. Quelle Fraunhofer ISE.

WAVELABS legte die LED-Bestückung der IR-Erweiterung und die nötigen Strahlformungs- und Fokussieroptiken aus, qualifizierte geeignete LEDs, LED-Boards und LED-Treiber, fertigte 9 SINUS-3000 ADV Musterboxen und installierte 8 dieser am Fraunhofer ISE zur Vermessung im Gesamtsystem. Insgesamt werden damit 29 LED-Typen bzw. Stützstellen zur Beleuchtung von 340 bis 1650nm verbaut.

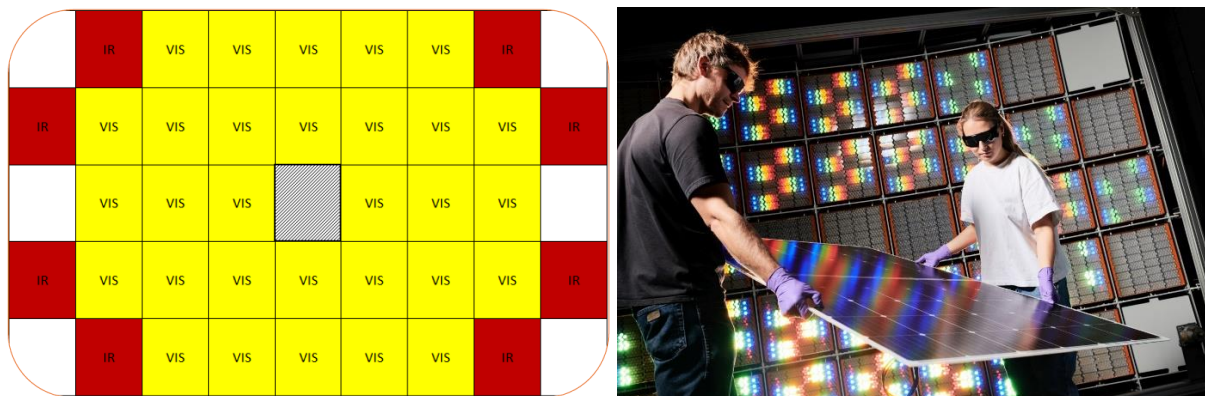


Abbildung 13: SINUS-3000 ADV-Beleuchtungseinheit nun mit 8 erweiterten IR LED Boxen (siehe Skizze links). 4 davon sind im Foto rechts jeweils in den Ecken des Schirms sichtbar. (Quelle: Fraunhofer ISE)

Eine weitere Qualifizierung im Gesamtsystem demonstrierte final die Fähigkeit eine AM0 Dauerbeleuchtung inklusive der für die IV-Vermessung von 4 und 5J Stapelweltraumsolarzellen nötigen Beleuchtung im Spektralbereich 1200-1800nm auf eine Fläche von 1000x600mm² mit dem SINUS-3000 ADV zu ermöglichen.

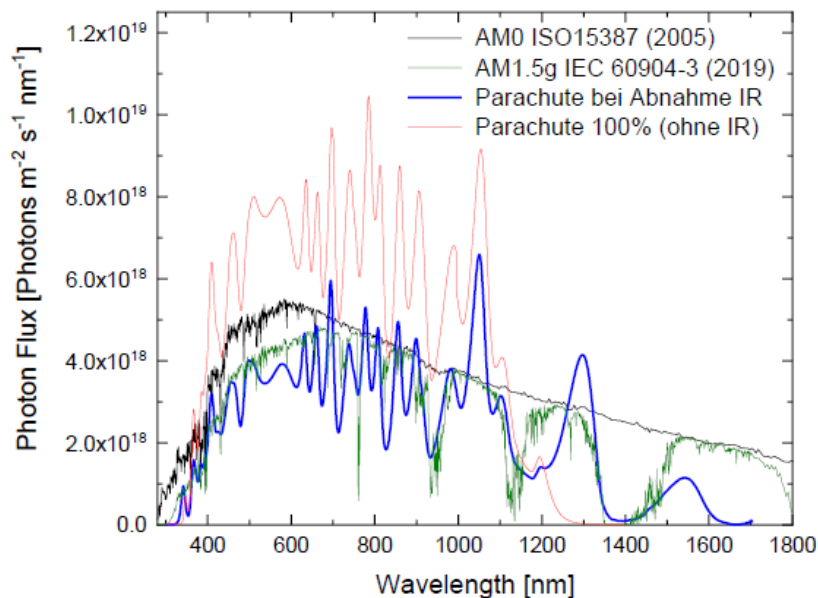


Abbildung 14: Vermessene Photonenleistung des SINUS-3000 ADV auf voller Messfläche. Die Beleuchtungsintensität des SINUS-3000 ADV erfüllt die AM0 Norm mit deutlichem Puffer. Die nötige Beleuchtungsintensität zwischen 1200 und 1800nm kann durch eine LED-Erweiterung erfüllt werden, wenn die Messfläche für AM0 Messungen von Stapelweltraummodulen auf 1x0.6m reduziert wird.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Hauptpositionen der Projektausgaben sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

	Vorkalkulation	Nachkalkulation
0813 Material	170.000,00	172.921,93
0823 FE-Fremdleistungen	39.960,00	38.535,00
0837 Personalkosten	288.580,00	294.094,95
0838 Reisekosten	6.650,00	5.106,34
0882 Eigenmittel (40%)	202.076,00	207.543,86
0884 Zuwendung (60%)	303.114,00	303.114,00

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Forschungsprojekt adressierte die Erweiterung der Messfähigkeiten für großflächige Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen mit dem Ziel, diese genau und rückführbar durchzuführen. Das Projekt setzte auf die Entwicklung eines neuen Messgerätes, den WAVELABS Sonnensimulator SINUS-3000 ADV auf.

Mithilfe der Weiterentwicklung des Messgerätes konnte erstmal ein großflächiges Solarmodul auf Basis von hocheffizienten Perowskit-Silizium Tandemzellen vermessen werden. Die genaue Messung bestätigte einen Rekordwirkungsgrad von 25% nach STC-Bedingungen (IEC 60904). Damit ging die Entwicklung dieses Projektes zeitlich nahezu perfekt abgestimmt mit dem Marktbedarf einher, welcher im Jahr 2024 einen Übergang in die ersten Pilotfertigungen dieser Technologie vorsieht. Die Pilotproduktionsphase ist für Phase von 3-5 Jahre zu erwarten, welche mit dem Bedarf von referenzierten

Modul-IV-Messungen einhergeht. Referenzmessungen nach DIN/ISO/IEC 17025 sind in der Regel die Grundlage für eine Nennleistungsbestimmung einer neuen Modulkategorie eines Herstellers.

Die verschiedenen Arbeitspakete waren notwendig, um den Sonnensimulator für die aufwendige rückführbare Messung von Perowskit-Si Tandemsolarzellen zu befähigen. Hier wurden wesentliche Schritte unternommen.

Die Enge Kooperation mit dem zertifizierten Messlabor des Fraunhofer ISE und dem Modulhersteller OxfordPV war notwendig, um die gesamte Bandbreite von Bereitstellung der Proben, die Entwicklung der Messtechnik und der Entwicklung der Kalibrierverfahren abdecken zu können. Dies ist gelungen.

9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Sonnensimulator SINUS-3000 ADV wurde erfolgreich in den Markt eingeführt und kann als Referenzsimulator in diesem Marktsegment angesehen werden. Im Jahr 2024 wurde vom Projektkoordinator und Betreiber des Prüflabors Fraunhofer ISE weltweit erstmalig eine Messunsicherheitsanalyse für die Vermessung von Perowskit-Silizium Tandemmodulen durchgeführt. Ein erster Richtwert einer Messunsicherheit von 4% konnte nachgewiesen werden.

International führende zertifizierte Labore investierten innerhalb der Projektlaufzeit in den Sonnensimulator SINUS-3000 ADV, um das Ziel dieses Forschungsprojektes KATANA nachzutun und um zertifizierte Leistungs- und zukünftig auch Ertragsmessungen von Perowskit-Si-Tandemmodulen anbieten zu können. WAVELABS kann diesen Kunden nun zusätzlich zum Grundgerät weitergehende Unterstützung bieten, um die Rückführbarkeit und Zertifizierung zu unterstützen, einfacher zu machen und operativ absichern zu können. Hier sind projektseitig insbesondere die Einbindung von weiteren Monitorzellen und die flexible Ausgestaltung des MPPT Tracings zu nennen.

Die Vermessung von zwei Terminal III-V Stapelsolarzellen mit 4 oder 5 Teilzellen bzw. PN-Übergängen ist eine weitere Verwertung. Hier liegt der Wert des LED-Sonnensimulators darin, die Messgenauigkeit der Leistungsvermessung von großflächigen Weltraummodulen über eine genau einstellbare Spektralanpassung zu reduzieren. Hier werden aktuell nur auf Zellebene kalibrierte Messungen mit Messunsicherheiten im Bereich 2-3% durchgeführt. Auf größerer Fläche werden aktuell noch Flashsimulatoren eingesetzt, welche im Spektrum nicht gut angepasst werden können.

10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

Der technologische Reifegrad der Perowskit-Si-Tandemtechnologie hat sich auf Forschungsebene zu höheren Zelleffizienzen von bis zu 34.5% auf kleiner Zellfläche von typischerweise 100mm² stark weiterentwickelt. Darüber hinaus entstehen erste Pilotfertigungsanstrengungen, welche die Skalierung der Zelle auf die aktuellen Waferformate (bis zu 441cm²) angehen und bis zu 28.5% Wirkungsgrad erreichen. Der Bedarf der Zell- und Modulmetrologie ist daher auf der gesamten Bandbreite von zertifizierten Messungen der Leistung und Ertrages bis hin zu produktiven Messungen stark gestiegen.

11 Veröffentlichungen und Referenzen

- [1] T. Song, D. J. Friedman, and N. Kopidakis, "Comprehensive Performance Calibration Guidance for Perovskites and Other Emerging Solar Cells," *Adv Energy Mater*, vol. 11, no. 23, Jun. 2021, doi: 10.1002/aenm.202100728.

Im Rahmen des Teilvorhabens der Fraunhofer ISE sind Veröffentlichungen mit Nutzung des Messgerätes und der hier beschriebenen Erweiterungen entstanden. Die Veröffentlichungsliste entnehmen Sie dem Bericht des Gesamtvorhabens.