Fraunhofer
ISE

KATANA
Schlussbericht

Teilprojekt 1: “Entwicklung von Kalibrierverfahren auf Zell- und Modulebene”

Förderkennzeichen: 03EE1087A

Fraunhofer ISE

Danksagung

Das Forschungsprojekt KATANA wurde in der Zeit vom 01.02.2021 – 31.01.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1087A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fraunhofer ISE

KATANA

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

Teilprojekt 1: “Entwicklung von Kalibrierverfahren auf Zell- und Modulebene”

Dr. Martin Schubert
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Förderkennzeichen: 03EE1087A
Berichtszeitraum: 01.02.2021 – 31.01.2024

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

Fraunhofer ISE

Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens 6
1.1 Aufgabenstellung 6
1.2 Voraussetzungen 6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens 13
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse 13
2.1.1 AP 1 Messplatzentwicklung 14
Grundlegende Untersuchung des Zell-LED-Messplatzes 14
Quantifizierung der spektralen Beleuchtungshomogenität des LED-Zellmessplatzes 16
Detaillierte Untersuchung thermischer Effekte auf die Beleuchtungseinheit des LED-Zellsimulators 19
Entwicklung eines neuen Verfahrens zum Einmessen der LED-Spektren 21
Entwicklung einer Prozedur für die spektrale Anpassung von LED-Sonnensimulatoren für die Messung von Mehrfachsolarzellen 22
Messvergleich zwischen dem Zell-LED-Simulator und einem im CalLab etablierten 3-Lichtquellen Sonnensimulator 28
Charakterisierung des Modul-Sonnensimulators 30
Untersuchungen zur Stabilisierung spektraler Bedingungen 30
Ermittlung der Simulator Spektren zur Berechnung angepasster Spektraleinstellungen 31
Bestimmung der integralen und spektralen Beleuchtungshomogenität des Modul Sonnensimulators 32
Messung der Spektralen Empfindlichkeit von 6“ Tandemsolarzellen 36
Bias-Beleuchtung für Tandemmessungen am DSR-Messplatz 36
Bestimmung der Leistungsparameter mit dem Wacom Sonnensimulator 37
Spektrale Charakterisierung des Wacom-Sonnensimulators 37
Definition einer Kalibrierprozedur für Tandemsolarzellen 45
Messvergleich an einem klassischen c-Si Modul 46
Definition der Kalibrierprozedur für Tandemmodule 47
LED basierte Modul EQE Messung 48
Validierung der Kalibrierprozedur für großflächige Perowskit auf Silizium Tandem-Module 50
SR-Messung 50

Berechnung und Einstellung des Simulator-Spektrums 50
Temperaturstabilisierung 51
Leistungsbestimmung 51
Spektrometrische Charakterisierung von Tandem-Modulen 51
Messung der EQE an Tandem-Modulen und deren Einfluss auf die Spektralanpassung 52
Outdoor-Validierung der Messprozedur für Tandem-Module 54
Verwendung von III-V Komponentenzellsensoren 54
Messvergleich 55
Messunsicherheitsbestimmung 57
Unsicherheit der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke 57
Unsicherheiten in Bezug auf die Modultemperatur 57
2.1.3 AP 3 Absicherung der Kalibrierprozeduren 57
Homogenität der Beleuchtung am Provisorischer Messaufbau 57
Homogenität der Beleuchtung am provisorischen Messaufbau 58
Lieferung und Erstinbetriebnahme des PL-Imaging Gerätes „Tandem Modulum“ 59
Beleuchtungshomogenität auf dem Chuck 60
Temperatur der Laserfasereingang 61
Kalibration der Laserintensität 62
Optische Filter und Artefakte 64
Unebenheit auf dem Chuck 66
Temperaturhomogenität auf Chuck 66
Speckling 68
Verbesserung des Kontaktierungskonzeptes für kleine Zellen 68
Einfluss lokaler Shunts auf EQE-Messartefakt 71
Erklärung lokal inverser EL vs. PL-Kontrast 73
2.3 Notwendigkeit der Arbeit 76
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse 77
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite 77
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen 79

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Im Projekt „Katana“ sollten Kalibrierverfahren für großformatige Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen und –module entwickelt werden. Hierzu gehörten die Entwicklung der Messmethoden, insbesondere die Sicherstellung von spektral homogener Beleuchtungsintensität und einstellbaren Spektren für die IV-Messung. Hierfür wurde ein neuer LED-basierter IV-Messplatz installiert, der auch für große Module geeignet ist. Außerdem entwickelt werden sollte eine großflächige EQE-Messung inklusive Bias-Beleuchtung. Auf Basis dieser Methoden mussten geeignete Messprozeduren entwickelt werden, um Perowskit-Silizium-Tandemzellen und –module in industrieller Größe (bis ca. 16 x 16 cm² für Zellen und Module mit bis zu 60/72 Zellen) zu kalibrieren. Für eine genaue Fehlerbetrachtung wurde außerdem ein Fokus auf die Analyse von inhomogenen Zelleigenschaften gelegt, die mit Hilfe von Photolumineszenz-Imaging (PLI) mit mehreren Anregungswellenlängen realisiert werden sollte. Hierfür wurde ein neuer PLI Messaufbau installiert. Schließlich sollten Simulationen der Zellen unter Messbedingungen die Bestimmung der Unsicherheiten unterstützen.

Die wissenschaftlich-technischen Ziele für das Projekt Katana, speziell für das Fraunhofer ISE, waren

- Entwicklung von Analyseverfahren zur Bestimmung von Inhomogenitäten und deren Einfluss auf den Kalibrierprozess: Messungen an vorhandenen Anlagen
- Entwicklung einer Zellmodellierung zur Bestimmung der Auswirkungen von Inhomogenitäten bei der Zellmessung
- Anpassung eines neuen multispektralen PL Messplatzes an die Anforderungen der Inhomogenitätsanalyse
- Entwicklung eines Kalibrierverfahrens zur Wirkungsgradbestimmung und Zertifizierung von Perowskit-Silizium-Tandemzellen
- Entwicklung eines Kalibrierverfahrens zur Wirkungsgradbestimmung und Zertifizierung von Perowskit-Silizium-Tandemmodulen

1.2 Voraussetzungen

Für das Projekt KATANA konnte auf die langjährige Expertise und Ausstattung der Kalibrierlabore CalLab PV Cells und CalLab PV Modules des Fraunhofer ISE zurückgegriffen werden. Zwei wesentliche neue Messapparaturen wurden im Rahmen des Projekts beschafft, um Pero-Si Tandemsolarzellen zu analysieren (PL Imaging Tool) und Pero-Si-Tandem Module zu vermessen (LED-Modulsimulator). Zusätzlich standen Expertise und Ausstattung des Solarzellenmesslabors am Fraunhofer ISE zur Verfügung sowie eine Simulationsumgebung QUOKKA3, um laterale Besonderheiten von Tandemsolarzellen zu analysieren.
Das Projekt wurde als Verbundprojekt durchgeführt. So hat die Arbeit am Fraunhofer ISE durch eine enge Zusammenarbeit mit der Uni Freiburg im Simulations- und Analysebereich sowie der Firma WAVELABS im Bereich der Modulmessung profitiert. Durch die Partnerschaft der Firmen Oxford PV und Intego wurde sichergestellt, dass an relevanten industriellen Messobjekten gearbeitet werden konnte (Oxford PV) und eine industrietaugliche Verwertung der im Projekt weiterentwickelten Photolumineszenzmethode möglich ist.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde gemäß des folgenden Arbeitstrukturplans in Arbeitspakete aufgeteilt:

Die Aufgaben innerhalb der Arbeitspakete waren folgende:

AP0: Projektmanagement
Allgemeine Projektekoordination und -administration während der gesamten Projektlaufzeit zur Sicherstellung einer effektiven Zusammenarbeit und Erreichung der Ergebnisse

AP1: Messplatzentwicklung
Weiterentwicklung und Aufbau eines LED-basierten Zell- und Modulsimulators zur Analyse von Tandemsolarzellen/-modulen mit diesen Unterarbeitspaketen:

AP1.1: Grundlegende Arbeiten zur Messung von Zellen und Modulen mit einstellbarem Spektrum
AP1.2: Erweiterung des IR-Spektrums
AP1.3: Erweiterung des Pmpp Tracing (ISE nicht beteiligt)
AP1.4: Einbinden weiterer WPVS-Zellen (ISE nicht beteiligt)
AP1.5: Entwicklung eines Messtischs für die Kalibrierung von Tandemzellen
AP1.6: Erweiterung der ISE-Software an Kalibrieranforderungen

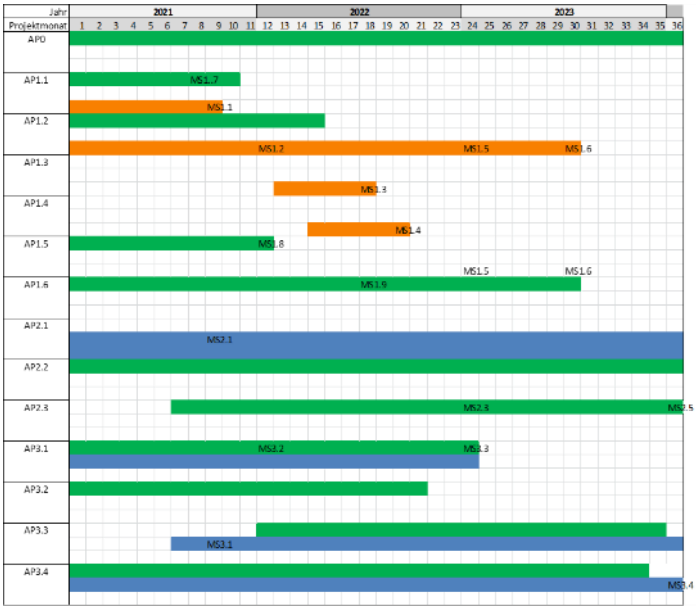
AP2: Entwicklung von Kalibrierprozeduren
Entwicklung von Verfahren zur Kalibrierung von Perowskit-Silizium-Tandemzellen und –module an vorhandenen sowie in AP1 neu entwickelten Messapparaturen mit diesen Unterarbeitspaketen:

AP2.1: Unterstützende Zellprozessierung zur Herstellung von Referenzproben (ISE nicht beteiligt)
AP2.2: Zellkalibrierung
AP2.3: Modulkalibrierung

AP3: Absicherung der Kalibrierprozeduren
Bestimmung von lateralen Verteilungen von Zelleigenschaften und Quantifizierung deren Auswirkungen auf die Messunsicherheit der Kalibrierungen mit diesen Unterarbeitspaketen:

AP3.1: Entwicklung eines Konzepts für multispektrale Photolumineszenzanalysen für Tandemzellen
AP3.2: Entwicklung eines Thermographie-basierten Imaging Verfahrens zur lokalen Zellanalyse
AP3.3: Quantifizierung von lateralen Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemzellen
AP3.4: Modellierung

Die zeitliche Planung der Arbeitspakete des Fraunhofer ISE sind in nachfolgender Abbildung in grün dargestellt und mit denen von WAVELABS (orange) und der Uni Freiburg (blau) ergänzt.



1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Kalibrierung von Tandem-Solarzellen

Kleinformatige Tandemsolarzellen im Besonderen auf III-V Halbleiter Basis für Weltraum- und terrestrische Konzentratoranwendungen werden am Fraunhofer ISE seit vielen Jahren erfolgreich kalibriert und viele Rekordwirkungsgrade wurden hier bestätigt. In den letzten Jahren vor dem Projekt hat sich das Callab PV Cells auch im Bereich der Kalibrierung kleiner Perowskit-Silizium-Tandemzellen eine führende Position erarbeitet. So wurde der damalige Wirkungsgradweltrekord am ISE bestätigt (29.15%, vom HZB). Die Messung von Perowskit-Solarzellen bringt hierbei besondere Herausforderungen hinsichtlich der Zellstabilität mit sich [1]. Unterschiedliche Methoden zur Berücksichtigung der Metastabilität sind hier vorgeschlagen [2, 3]. Die Kalibrierung umfasst zwei wesentliche Schritte:

1. Die Messung der spektralen Empfindlichkeit erfolgt unter Verwendung von spektral selektiver Biasbestrahlung und Biasspannung [4]. Dabei können Messartefakte auftreten, die von bestimmten Eigenschaften (R_p, Photolumineszenz) der Teilzellen abhängen [5]. Ein laserbasierter Messplatz mit dem Potential zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit großer Solarzellen existiert am Fraunhofer ISE bereits.
2. Zur korrekten Bestimmung der IV-Kennlinien unter Standardtestbedingungen werden Mehrlichtquellensimulatoren verwendet. Diese ermöglichen es sowohl Normbedingungen für jede Teilzelle einzustellen, als auch mittels systematischer spektraler Variation [6, 7] die Stromanpassung der Tandemsolarzelle gezielt zu untersuchen. Am Fraunhofer ISE existieren mehrere Mehrlichtquellensimulatoren, die für PSC/Si Tandemsolarzellen zum Einsatz kommen. Ein Wacom 2-Quellensimulator und ein LED-Simulator (WAVELABS) für kleine Zellgrößen sind vorhanden. Diese waren jedoch bisher technisch nicht ausreichend auf die Anforderungen für 6“ bzw. Tandemmessungen ausgelegt.

Kalibrierung von Tandemmodulen

Die Kalibrierung von Tandemmodulen war vor dem Projekt lediglich mit Messunsicherheiten möglich, die um etwa einen Faktor 3 bis 5 über den Werten für kristalline Module liegen. Konzentratormodule mit III-V Mehrfachsolarzellen werden dabei standardmäßig mit Hilfe von Außenmessungen charakterisiert. Die vorhandenen Sonnensimulatoren für grossflächige Module bis 3m x 3m verwenden als Lichtquelle Xenon Blitzlampen mit nicht anpassbarem Spektrum und kurzen Blitzzeiten zwischen 10 und 100 ms. Zur Minimierung von Hystereseeffekten wird das muliflash-Verfahren angewandt, welches für Silizium Module und die meisten Dünnschichttechnologien, die kleine Lichtansprechzeiten haben, gute Ergebnisse liefert.
Modultechnologien, die wie im Fall der Perowskittechnologie eine Messung unter Dauerlicht erfordern, können damit jedoch nicht präzise charakterisiert werden. Zudem ist die Messung der spektralen Empfindlichkeit auf Modulebene mit dem vorhandenen Equipment nur für single-junction Module möglich. Für multi-junction Technologien müssen zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit baugleiche Kleinproben verwendet werden, die jedoch nur wenige Kunden zur Verfügung stellen können. Somit ist für multi-junction Module in den meisten Fällen eine Bewertung bzw. Korrektur des Einflusses der spektralen Fehlanpassung nicht möglich, was zu erhöhter Messunsicherheit führt. Für Messungen unter Dauerlicht mit möglichst kleinen spektralen Abweichungen wird daher bisher auf Außenmessungen zurückgegriffen. Diese sind jedoch sehr zeitaufwendig und können nur in begrenzten Zeitfenstern stattfinden, da die vorherrschenden Wetter- und spektralen Bedingungen nicht beeinflusst werden können. Außerdem sind hier meist hohe Korrekturen der Modultemperatur nötig, wofür die Temperaturkoeffizienten bekannt sein müssen.
Für Hersteller und Anlagenplaner sind Tandem-Module im Vergleich zu kristallinen Modulen dadurch deutlich schwieriger zu bewerten. Für Investoren ergeben sich daraus zusätzliche Risiken. Für Perowskit-Silizium-Tandem Solarmodule gibt es hinsichtlich Stabilität und zeitlichem Ansprechverhalten zusätzliche Herausforderungen, für die angepasstes Messequipment und –methoden entwickelt werden müssen.

Bestimmung von Inhomogenitäten in Tandem-Solarzellen

Teilzellen mit inhomogenen elektrischen Eigenschaften in Tandemsolarzellen lassen sich durch wellenlängensensitive Anregung oder spektral unterschiedliche Antwort analysieren.
Erste Ansätze zur kamerabasierten ortsaufgelösten Charakterisierung gab es vor dem Projekt am ISE zur Bestimmung der Serien- und Parallelwiderstandsverteilung [8] mittels Photo- und Elektrolumineszenz an III-V-Mehrfachzellen. Darüber hinaus ist aus der Literatur eine Berechnung der lokalen I-V-Kennlinie [9] aus EL-Messungen bekannt, für die allerdings viele vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen.
Für die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften der Subzellen von Perowskit-Si-Devices ist bislang aus der Literatur die ortsaufgelöste Messung der EQE bei verschiedenen Bias-Beleuchtungen als rasterndes Verfahren bekannt [10] und steht prinzipiell auch am ISE zur Verfügung. Am Fraunhofer ISE wurde ein µPL-System entwickelt, welches nicht nur über verschiedene Anregungswellenlängen verfügt, sondern zugleich auch die Lumineszenzantwort spektral auflösen kann [11]. Auf einer PSC/Si-Tandemstruktur konnten damit sowohl Inhomogenitäten in den Rekombinationseigenschaften der Si-Bottomzelle als auch Variationen in der Bandlücke der Perowskit-Topzelle detektiert werden.
Darüber hinaus steht am Fraunhofer ISE eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, um die laterale Verteilung der Solarzellenparameter von Einfachsolarzellen detailliert zu bestimmen. Viele dieser Techniken können prinzipiell für Tandemstrukturen angepasst werden.

Simulationsansätze für Tandemsolarzellen

Während die Modellierung und Simulation von etablierten Einfachsolarzellen bereits einen hohen Reife- und Genauigkeitsgrad erreicht hat, war dies im Bereich der Mehrfachsolarzellen noch nicht der Fall. Dies ist der deutlich erhöhten physikalischen Komplexität geschuldet. Daher wurden Tandemsolarzellen in der Regel noch mit einfachen Modellierungsansätzen simuliert, wobei hier die Fortschritte und Publikationen im Bereich der optischen Simulationen denen der elektrischen deutlich voraus sind.
Für die optische Modellierung werden vor allem Raytracer eingesetzt, die sowohl inkohärente Strahlengänge in den dickeren Schichten (wie Silizium oder Modulverkapselungen) berücksichtigen können, als auch kohärente Strahlenoptik innerhalb der Dünnschichten. Hier gibt es einige Publikationen, die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erreichen konnten [12–15]. Solche Modelle sind von hoher Bedeutung für eine detaillierte Analyse der optischen Generations- und Verlustströme innerhalb des komplexen Schichtsystems, um so die Lichtausbeute innerhalb der beiden Teilzellen maximieren zu können und zudem ideales Current-Matching der beiden Teilzellen zu erreichen. So konnten bereits einige Schlussfolgerungen über Materialien hergeleitet werden, wie z.B. die hohe parasitäre Absorption in spiro-OMeTAD [16], die mittlerweile zu einem Technologiewechsel Perowskit-Topzelle von n-i-p auf p-i-n Design geführt haben [17]. Es wird weiterhin von hoher Bedeutung sein, mittels detaillierter Optiksimulationen den Entwicklungsprozess zu begleiten, wobei die Themenfelder von der Analyse optischer Generations- und Verlustströme bis hin zu Jahresertragsanalysen [18] unter verschiedenen Standorten und Witterungsbedingungen reichen können.
Während vonseiten der optischen Simulationsmodelle Fortschritte erzielt worden sind, die gute Übereinstimmung zu den Experimenten aufweisen, steckte ein detailliertes elektrisches Simulationsmodell für die Perowskit-Silizium-Tandemzelle noch weit in den Anfängen, wobei viele Modelle stark vereinfacht waren, insbesondere mittels elektrischer Ersatzschaltbilder [19], welche zur Interpretation wichtiger Messungen und Verlustkanäle oft nicht ausreichend sind. Für eine wünschenswerte detaillierte opto-elektrische Simulation basierend auf multidimensionalen Ladungsträgertransport in den Halbleiterschichten, sowie geometrische- und/oder wellen-optische Modellierung der optischen Ladungsträgergeneration, gab es bereits vielversprechende Ansätze [9,10], allerdings fehlte ein konsistentes, umfassendes Modell für Perowskit-Silizium-Tandem Solarzellen und die Literatur dazu war äußert beschränkt [20]. Der Schwerpunkt der Modellentwicklung muss hierbei auf der Perowskit-Topzelle liegen, die schon als Einzelzelle eine relativ komplexe Physik aufweist und bei der noch substantielle Unsicherheiten über die fundamentalen Materialeigenschaften bestehen. Damalige Simulationsarbeiten im Bereich von Perowskitzellen beschränkten sich noch auf die Identifikation von Materialeigenschaften und prinzipieller physikalischer Mechanismen (z.B. Ionen-Transport [21, 22]), und konnten noch nicht zuverlässig zur Interpretation von Zellmessungen angewendet werden. Als zweiter wichtiger Baustein kommt die Modellierung der Ladungsträgertransferschicht als Verbindungsstück zwischen Top- und Bottomzelle hinzu. Auch hier existierten Arbeiten, die sich mit der elektrischen Simulation von n^{++}/p^{++} Tunneljunctions befassten [23].
Für kommende Projekte im Bereich der Tandemtechnologie ist es daher von hoher Bedeutung sein, die bestehenden Einzelmodelle zu erweitern, mit experimentellen Daten zu kalibrieren und so in ein einheitliches, vorhersagekräftiges Gesamtmodell zu überführen.

[1] H. J. Snaith, A. Abate, J. M. Ball, G. E. Eperon, T. Leijtens, N. K. Noel, S. D. Stranks, J. T.-W. Wang, K. Wojciechowski, and W. Zhang, "Anomalous Hysteresis in Perovskite Solar Cells," (eng), *The journal of physical chemistry letters*, vol. 5, no. 9, pp. 1511–1515, 2014.

[2] J. A. Christians, J. S. Manser, and P. V. Kamat, "Best Practices in Perovskite Solar Cell Efficiency Measurements. Avoiding the Error of Making Bad Cells Look Good," (eng), *The journal of physical chemistry letters*, vol. 6, no. 5, pp. 852–857, 2015.

[3] E. Zimmermann, K. K. Wong, M. Müller, H. Hu, P. Ehrenreich, M. Kohlstädt, U. Würfel, S. Mastroianni, G. Mathiazhagan, A. Hinsch, T. P. Gujar, M. Thelakkat, T. Pfadler, and L. Schmidt-Mende, "Characterization of perovskite solar cells: Towards a reliable measurement protocol," *APL Materials*, vol. 4, no. 9, p. 91901, 2016.

[4] J. Burdick and T. Glatfelter, "Spectral response and I–V measurements of tandem amorphous-silicon alloy solar cells," *Solar Cells*, vol. 18, no. 3-4, pp. 301–314, 1986.

[5] G. Siefer, C. Baur, and A. W. Bett, "External quantum efficiency measurements of Germanium bottom subcells: Measurement artifacts and correction procedures," in *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010: 20 - 25 June 2010, Honolulu, Hawaii ; conference proceedings*, Honolulu, HI, USA, 2010, pp. 704–707.

[6] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A. W. Bett, and W. Warta, "Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 10, no. 4, pp. 243–255, 2002.

[7] M. Meusel, C. Baur, G. Siefer, F. Dimroth, A. W. Bett, and W. Warta, "Characterization of monolithic III–V multi-junction solar cells—challenges and application," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 18-19, pp. 3268–3275, 2006.

[8] H. Nesswetter, P. Lugli, A. W. Bett, and C. G. Zimmermann, "Electroluminescence and photoluminescence characterization of multijunction solar cells," in *2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2*, Austin, TX, USA, Jun. 2012 - Jun. 2012, pp. 1–6.

[9] C. G. Zimmermann, "Performance Mapping of Multijunction Solar Cells Based on Electroluminescence," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 8, pp. 825–827, 2009.

[10] Z. Song, J. Werner, S. C. Watthage, F. Sahli, N. Shrestha, S. de Wolf, B. Niesen, A. B. Phillips, C. Ballif, R. J. Ellingson, and M. J. Heben, "Imaging the Spatial Evolution of Degradation in Perovskite/Si Tandem Solar Cells After Exposure to Humid Air," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1563–1568, 2017.

[11] L. E. Mundt, F. D. Heinz, S. Albrecht, M. Mundus, M. Saliba, J. P. Correa-Baena, E. H. Anaraki, L. Korte, M. Gratzel, A. Hagfeldt, B. Rech, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, "Nondestructive Probing of Perovskite Silicon Tandem Solar Cells Using Multiwavelength Photoluminescence Mapping," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 4, pp. 1081–1086, 2017.

[12] K. A. Bush, S. Manzoor, K. Frohna, Z. J. Yu, J. A. Raiford, A. F. Palmstrom, H.-P. Wang, R. Prasanna, S. F. Bent, Z. C. Holman, and M. D. McGehee, "Minimizing Current and Voltage Losses to Reach 25% Efficient Monolithic Two-Terminal Perovskite–Silicon Tandem Solar Cells," *ACS Energy Lett.*, vol. 3, no. 9, pp. 2173–2180, 2018.

[13] M. Jošt, E. Köhnen, A. B. Morales-Vilches, B. Lipovšek, K. Jäger, B. Macco, A. Al-Ashouri, J. Krč, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, M. Topič, B. Stannowski, and S. Albrecht, "Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: advanced light management for improved efficiency and energy yield," *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 12, pp. 3511–3523, 2018.

[14] M. Langenhorst, B. Sautter, R. Schmager, J. Lehr, E. Ahlswede, M. Powalla, U. Lemmer, B. S. Richards, and U. W. Paetzold, "Energy yield of all thin-film perovskite/CIGS tandem solar modules," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 290–298, 2019.

[15] S. Altazin, L. Stepanova, J. Werner, B. Niesen, C. Ballif, and B. Ruhstaller, "Design of perovskite/crystalline-silicon monolithic tandem solar cells," (eng), *Optics express*, vol. 26, no. 10, A579-A590, 2018.

[16] M. Filipič, P. Löper, B. Niesen, S. de Wolf, J. Krč, C. Ballif, and M. Topič, "CH(3)NH(3)PbI(3) perovskite / silicon tandem solar cells: characterization based optical simulations," (eng), *Optics express*, vol. 23, no. 7, A263-78, 2015.

[17] K. Jäger, L. Korte, B. Rech, and S. Albrecht, "Numerical optical optimization of monolithic planar perovskite-silicon tandem solar cells with regular and inverted device architectures," (eng), *Optics express*, vol. 25, no. 12, A473-A482, 2017.

[18] J. Lehr, M. Langenhorst, R. Schmager, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, and U. W. Paetzold, "Energy yield modelling of perovskite/silicon two-terminal tandem PV modules with flat and textured interfaces," *Sustainable Energy Fuels*, vol. 2, no. 12, pp. 2754–2761, 2018.

[19] L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, Y. Toyoshima, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa, "Simulation of current–voltage curves for inverted planar structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance," *Appl. Phys. Express*, vol. 10, no. 2, p. 25701, 2017.

[20] M. Jošt, L. Kegelmann, L. Korte, and S. Albrecht, "Monolithic Perovskite Tandem Solar Cells: A Review of the Present Status and Advanced Characterization Methods Toward 30% Efficiency," *Adv. Energy Mater.*, p. 1904102, 2020.

[21] P. Lopez-Varo, J. A. Jiménez-Tejada, M. García-Rosell, S. Ravishankar, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert, and O. Almora, "Device Physics of Hybrid Perovskite Solar cells: Theory and Experiment," *Adv. Energy Mater.*, vol. 8, no. 14, p. 1702772, 2018.

[22] C. Eames, J. M. Frost, P. R. F. Barnes, B. C. O'Regan, A. Walsh, and M. S. Islam, "Ionic transport in hybrid lead iodide perovskite solar cells," (eng), *Nature communications*, vol. 6, p. 7497, 2015.

[23] A. Rolland, L. Pedesseau, M. Kepenekian, C. Katan, Y. Huang, S. Wang, C. Cornet, O. Durand, and J. Even, "Computational analysis of hybrid perovskite on silicon 2-T tandem solar cells based on a Si tunnel junction," *Opt Quant Electron*, vol. 50, no. 1, 2018.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt mit WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH und der Universität Freiburg sowie den assoziierten Partnern Oxford PV Germany GmbH und Intego GmbH durchgeführt.

Die **Universität Freiburg** trug mit der am Institut INATECH vorhandenen Expertise im Simulationsbereich und in der Interpretation von Leistungsverlustanalysen mittels Thermographie wesentlich zur wissenschaftlichen Basis des Konsortiums in diesem Projekt bei und unterstützte mit der Erfahrung für die optische und elektrische Simulation von Perowskitsolarzellen die technischen Entwicklungen im Kalibrierbereich.

WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH entwickelt, produziert und vertreibt neuartige Messsysteme zur Charakterisierung von Solarzellen im Forschungsbereich und im Produktionsumfeld. Der Sitz der Firma ist Leipzig. Durch innovative Verfahren erreichen die Produkte von WAVELABS höchste Ansprüche bezüglich Präzision, Genauigkeit, Flexibilität und Wartungsaufwand. WAVELABS sieht sich als Weltmarktführer im Bereich der Simulation des Sonnenlichts mit LEDs. WAVELABS hat Kunden in USA, Spanien, Frankreich, Deutschland, Schweiz, Saudi-Arabien, Indien, China, Singapur, Thailand, Taiwan, Saudi-Arabien und Australien.

Oxford PV Germany GmbH ist ein Start-Up-Unternehmen, welches hocheffiziente Silizium-Perowskit-Tandem-Solarzellen entwickelt und herstellt. Weltweit ist Oxford PV Pionier und Technologieführer auf dem Gebiet der Perowskit-Solarzellen. Das Unternehmen wurde 2010 als Spin-Out der Universität Oxford gegründet. Heute verfügt das Unternehmen über das weltweit größte Team, das sich ausschließlich auf die Entwicklung und Kommerzialisierung einer auf Perowskit basierenden Solartechnologie konzentriert. Ein Forschungs- und Entwicklungsstandort in Oxford, Großbritannien, und eine industrielle Pilotlinie in der Nähe von Berlin, Deutschland, ermöglichen den beschleunigten Transfer der Technologie in die industrielle Produktion von Silizium-Solarzellen. Oxford PV ist das erste Unternehmen, welches diese Technologie aus dem Labormaßstab auf industrielles Wafer-Format übertragen hat. Ziel des Standortes ist es, die Grundlage für die industrielle Fertigung solcher Solarzellen zu schaffen und diese Technologie am Markt einzuführen. Oxford PV hält ein weltweit einzigartiges Patent-Portfolio im Bereich Perowskit-Photovoltaik.

Die weltweit agierende **Intego GmbH**, ein KMU aus Erlangen, wurde vor 20 Jahren aus dem Fraunhofer IISA ausgegründet. Mit seinen ca. 60 Mitarbeitern ist Intego ein etablierter Experte für innovative, komplexe optische Inspektionssysteme für Halbleitermaterialien (z.B. Si, SiC, GaAs). Unter Nutzung des im Rahmen des Projekts gewonnenen Know-hows sollen bestehende Systeme verbessert und neue, innovative Anlagenkonzepte für laborbegleitende Wafer- und Zellencharakterisierung von Tandem-Solarzellen entwickelt werden.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Insgesamt konnten die im Projekt gesteckten Gesamtziele sehr gut erreicht werden und es stehen nun die gewünschten Erkenntnisse zu Mess- und Kalibrierverfahren für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und -module zur Verfügung. Diese sind in den Zwischenberichten, in diesem Schlussbericht und in diesen Veröffentlichungen zusammengefasst:

1. Fell, A., Schultz-Wittmann, O., Messmer, C., Schubert, M. C., & Glunz, S. W. (2022). Combining drift-diffusion and equivalent-circuit models for efficient 3D tandem solar cell simulations. IEEE Journal of Photovoltaics, 12(6), 1469-1476.

2. Messmer, C., Schön, J., Würfel, U., Schulze, P. S., Schubert, M. C., Bivour, M., ... & Hermle, M. (2022). Efficient Charge Carrier Extraction in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells Investigated by Numerical Simulation.

3. Schultz-Wittmann, O., Schulze, P. S. C., Er-Raji, O., Efinger, R., Kabaklı, Ö. Ş., Heydarian, M., ... & Glunz, S. W. (2022). Upscaling of Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells. In Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (pp. 354-357).

4. Reichmuth, S. K., Fell, A., Siefer, G., Schachtner, M., Chojniak, D., Fischer, O., ... & Schubert, M. C. (2022). Impact of Lateral Effects on EQE Measurements of Large Scale Tandem Solar Cells.

5. Fischer, O., Bui, A. D., Schindler, F., Macdonald, D., Glunz, S. W., Nguyen, H. T., & Schubert, M. C. (2023). Versatile implied open-circuit voltage imaging method and its application in monolithic tandem solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

6. Chojniak, D., Bett, A. J., Hohl-Ebinger, J., Reichmuth, S. K., Schachtner, M., & Siefer, G. (2023, June). LED solar simulators–A spectral adjustment procedure for tandem solar cells. In AIP Conference proceedings (Vol. 2826, No. 1). AIP Publishing.

7. Bett, A. J., Chojniak, D., Schachtner, M., Reichmuth, S. K., Schulze, P. S., Kabakli, Ö. S., ... & Schubert, M. C. (2023, June). Spectrometric determination of current matching in perovskite/silicon tandem solar cells. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2826, No. 1). AIP Publishing.

8. Bett, A. J., Chojniak, D., Schachtner, M., Reichmuth, S. K., Kabaklı, Ö. Ş., Schulze, P. S., ... & Schubert, M. C. (2023). Spectrometric characterization of monolithic perovskite/silicon tandem solar cells. Solar RRL, 7(2), 2200948.

9. Fischer, O., Fell, A., Messmer, C., Efinger, R., Schindler, F., Glunz, S. W., & Schubert, M. C. (2023). Understanding contact nonuniformities at interfaces in perovskite silicon tandem solar cells using luminescence imaging, lock-in thermography, and 2D/3D simulations. Solar RRL, 7(19), 2300249.

10. Heydarian, M., Messmer, C., Bett, A. J., Heydarian, M., Chojniak, D., Kabaklı, Ö. Ş., ... & Schulze, P. S. (2023). Maximizing current density in monolithic perovskite silicon tandem solar cells. Solar RRL, 7(7), 2200930.

11. Steiner, M., & Siefer, G. (2023). Translation of outdoor tandem PV module I–V measurements to a STC power rating. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31(8), 862-869.

12. Er-Raji, O., Messmer, C., Bett, A. J., Fischer, O., Reichmuth, S. K., Schindler, F., ... & Glunz, S. W. (2023). Loss Analysis of Fully-Textured Perovskite Silicon Tandem Solar Cells: Characterization Methods and Simulation toward the Practical Efficiency Potential. Solar RRL, 7(24), 2300659.

13. Messmer, C., Chojniak, D., Bett, A. J., Reichmuth, S. K., Hohl-Ebinger, J., Bivour, M., ... & Glunz, S. W. (2024). Toward more reliable measurement procedures of perovskite-silicon tandem solar cells: The role of transient device effects and measurement conditions. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

Im Projekt wurden folgende, den Arbeitspaketen zugeordnete Ergebnisse erreicht:

2.1.1 AP 1 Messplatzentwicklung

AP1.1: Grundlegende Arbeiten zur Messung von Zellen und Modulen mit einstellbarem Spektrum

Wie vorgesehen wurden grundlegende Arbeiten für die Nutzung LED basierter Sonnensimulatoren für Tandem-Messungen zunächst an dem am Fraunhofer ISE vorhandenen Zell-LED Simulator durchgeführt. Aufgrund des erheblichen Lieferverzugs des Modul Sonnen-Simulators wurden die in der Teilvorhabenbeschreibung genannten Punkte teilweise erweitert, wodurch eine gute Ausgangssituation für die erfolgreiche und schnelle Inbetriebnahme des Modul LED-Simulators geschaffen werden konnte. Die Ergebnisse dieser eingehenden Charakterisierung sowie daraus abgeleiteten Vorgehensweisen und Methoden werden im Folgenden dargestellt.

Grundlegende Untersuchung des Zell-LED-Messplatzes

Zunächst lag der Fokus auf der Untersuchung spektraler Veränderungen der einzelnen LED-Spektren im Verbund aller LEDs, da diese für die Berechnung spektraler Einstellungen zur Messung von Tandemsolarzellen essenziell sind. Hierfür wurde mit Hilfe der Messplatzsoftware ein AM1.5g-ähnliches Spektrum aus den jeweiligen Einzelspektren angenähert, worüber die Aussteuerung jedes LED-Typs im Spektrum ermittelt werden konnte. Im Folgenden wurden mehrere Messungen durchgeführt, in denen jeweils nur ein einzelner LED-Typ mit genau dieser Aussteuerung betrieben wurde, die er auch im Verbund aller LED-Typen im zuvor angenäherten AM1.5g Spektrum hätte. Dabei wurde bei jeder Messung sowohl das Spektrum der einzelnen LED-Typen als auch der Kurzschlussstrom einer auf dem Messblock positionierten und temperierten c-Si Referenzzelle (4 cm², nicht verkapselt) gemessen. Zuletzt wurden diese Messungen mit dem zuvor angenäherten AM1.5g Gesamtspektrum durchgeführt, in dem alle der zuvor separat betriebenen LEDs gemeinsam betrieben wurden. Die Messdauer betrug für jeden LED-Typ 1 s. Die Spektren wurden mit dem internen Spektrometer des Zell-LED-Messplatzes gemessen und die den Stromwerten zugrundeliegenden Strom-Spannungskurven wurden mit der vom Messplatzhersteller bereitgestellten Messelektronik aufgenommen. Die Ergebnisse der beschriebenen Messungen sind in Abbildung 1 zu sehen.

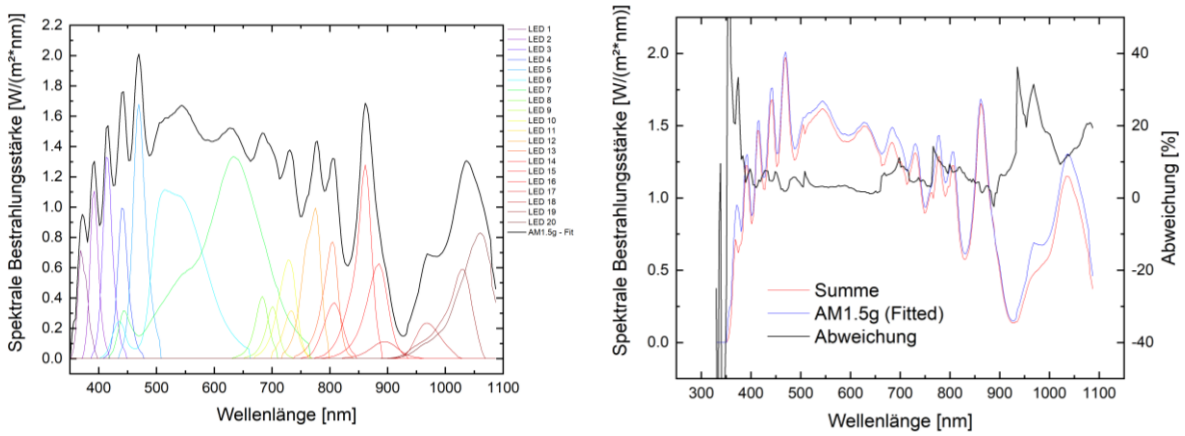


Abbildung 1: Links: Mit dem internen Spektrometer des Zell-LED-Messplatzes aufgenommene Spektren. In Schwarz: Ein mit Hilfe der Messplatzsoftware angenähertes AM1.5g Spektrum bestehend aus den Spektren 20 verschiedener LEDs, die alle zeitgleich betrieben wurden. Farbverlauf: Einzelspektren der 20 LEDs, die getrennt voneinander bei exakt den Aussteuerungen betrieben wurden, mit denen die LEDs auch im Gesamtspektrum betrieben werden. Rechts: Messungen zur Untersuchung der Superposition einzelner LED-Spektren am Zell-LED-Messplatz. In Blau: Gemessenes Gesamtspektrum aller LEDs, welches mit Hilfe der Messplatzsoftware einem AM1.5g Spektrum angenähert wurde. In Rot: Mathematische Summe der gemessenen Einzelspektren aller LEDs bei identischer LED-Aussteuerung wie im angenäherten AM1.5g Spektrum. In Schwarz: Prozentuale Abweichung des gemessenen Spektrums zum aufsummierten Spektrum der Einzelspektren.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die in Rot dargestellte Summe der Einzelspektren nicht gleich dem in Blau dargestellten Gesamtspektrum (AM1.5g) ist. Zudem wird deutlich, dass das aufsummierte Spektrum über den gesamten Spektralbereich eine geringere spektrale Bestrahlungsstärke aufweist. Dieses Verhältnis widerspricht der Annahme, dass die LEDs im Einzelbetrieb aufgrund der sich daraus ergebenden geringeren Temperatur in der Beleuchtungseinheit effizienter betrieben werden.
Eine Betrachtung der gemessenen Kurzschlussströme der Referenzzelle in Tabelle 1 zeigt jedoch ein entgegengesetztes Verhältnis.

Tabelle 1: Die Tabelle zeigt die Summe der Kurzschlussströme der verwendeten Referenzzelle unter den LED-Einzelspektren sowie unter dem AM1.5g Gesamtspektrum. Zudem wird die absolute sowie die relative Abweichung des unter dem Gesamtspektrums generierten Kurzschlussstroms von der Summe der unter den Einzelspektren generierten Kurzschlussströme dargestellt.

	Summe [mA]	AM 1.5g [mA]	Abweichung [mA]	Relative Abweichung [%]
Isc	170.646	156.047	-14.599	9.356

Die Summe der Kurzschlussströme der Einzelmessungen ergibt einen höheren Gesamtstrom als der unter dem AM1.5g Spektrum gemessene Kurzschlussstrom der Referenzzelle. Dieses Ergebnis widerspricht dem qualitativen Verlauf der Spektren in der rechten Grafik in Abbildung 1. Mögliche Gründe hierfür sind Nichtlinearitäten des Spektrometers oder der Referenzzelle, die zu Fehlern bei Messungen mit geringer Einstrahlungsintensitäten führen können. Dieser Fall ist bei den Messungen der einzelnen LED-Typen gegeben. Allerdings sind auch Fehler durch die Strommesselektronik des Messplatzes bisher nicht auszuschließen. Zusätzlich zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass das interne Spektralradiometer eine unzureichende Empfindlichkeit im Infrarotbereich aufweist. Um eine aussagekräftige Charakterisierung der Beleuchtungseinheit zu ermöglichen und den in dieser ersten Untersuchung gezeigten Auffälligkeiten weiter nachzugehen, werden die Charakterisierungen im weiteren Projektverlauf mit einem Spektrometer des Fraunhofer ISE sowie einer WPVS-Referenzzelle mit bekannter Linearität durchgeführt.

Quantifizierung der spektralen Beleuchtungshomogenität des LED-Zellmessplatzes

Für die Bestimmung der spektralen Beleuchtungshomogenität wurde ein am Fraunhofer ISE entwickeltes Homogenitäts-Messgerät verwendet. Dieses ist aus 64 1 cm² großen Silizium Solarzellen aufgebaut, welche auf Basis ihrer IV-Kenndaten so ausgewählt wurden, dass bei identischen Messbedingungen eine möglichst hohe Übereinstimmung der Zellen untereinander besteht. Die in regelmäßigen Abständen in einer 8 x 8 Matrix angeordneten Solarzellen decken eine Fläche von 15 cm x 15 cm ab. Mit Hilfe dieses Messgerätes wurde die Bestrahlungshomogenität jedes einzelnen LED-Typs in der Beleuchtungseinheit des LED-Zellsimulators separat gemessen. Somit kann die spektrale Beleuchtungsinhomogenität des Sonnensimulators bestimmt werden.
Für die Bestimmung der Beleuchtungsinhomogenität wurde das Messgerät mittig auf dem Messblock des LED-Zellsimulators platziert. Dabei wird die an jeder Zelle über einen einheitlichen Widerstand abfallende Spannung mit Hilfe eines Multiplexers gemessen. Die gemessenen Spannungsunterschiede lassen sich auf Variationen in der auf die jeweiligen Zellen treffende Bestrahlungsintensität zurückführen. Die Messdauer betrug 200 ms. Innerhalb dieser Zeit wurde der Spannungsabfall an jedem Widerstand mehrfach gemessen, sodass ein Intensitätsverlauf jeder Zelle aufgenommen werden konnte. Beispielhaft sind in Abbildung 2 zwei Intensitätsverläufe zu erkennen, die bei der Inhomogenitätsmessung von LED 6 und LED 7 aufgenommen wurden. Dabei entspricht jede Linie dem Intensitätsverlauf einer einzelnen Solarzelle auf dem Homogenitäts-Messgerät.

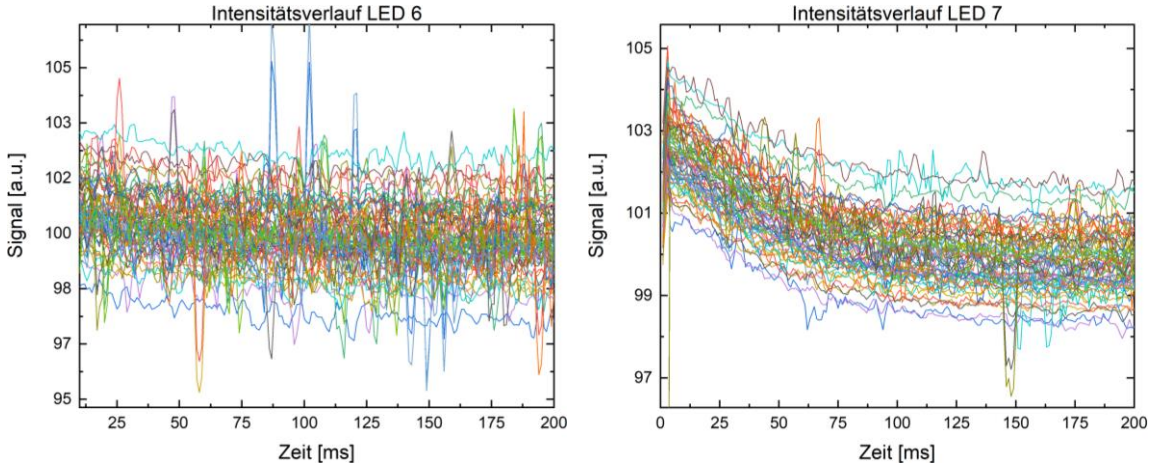


Abbildung 2: Intensitätsverläufe bei der Homogenitätsmessung der LED-Typen 6 und 7. Jede Linie entspricht dem von einer Einzelzelle gemessenen Intensitätsverlauf der jeweiligen LEDs.

Anhand der gezeigten Intensitätsverläufe ist eindeutig zu erkennen, dass sich die Stabilitätseigenschaften einzelner LEDs voneinander unterscheiden. Während LED 6 eine stabile Intensität innerhalb der Messdauer zeigt, ist bei LED 7 eine deutliche Intensitätsabnahme zu erkennen. Aufgrund dieser bei verschiedenen LED-Typen auftretenden zeitlichen Intensitätsverläufe ist für die Messung der spektralen Beleuchtungsinhomogenität die Verwendung eines Messgerätes, welches die Einstrahlungsintensität an verschiedenen Positionen nahezu gleichzeitig misst, einem scannenden System vorzuziehen. Bei einem solchen System wird nur eine einzige Zelle verwendet, die systematisch über die Messfläche verfahren wird und die Bestrahlungsintensität an verschiedenen Positionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelt. Durch die nahezu gleichzeitige Messung aller Zellen kann sichergestellt werden, dass es sich bei den gemessenen Intensitätsunterschieden um räumliche Unterschiede handelt und nicht um Abweichungen, die auf einen zeitlichen Verlauf der LED-Intensitäten zurückzuführen sind.
Um die trotz sorgfältiger Auswahl bestehenden Einflüsse kleiner Unterschiede der auf dem Messgerät positionierten Solarzellen auszugleichen, werden je LED-Typ zwei Messungen bei unterschiedlicher Orientierung des Messgerätes durchgeführt (Drehung um 180°). Die Aussteuerung jedes LED-Typs wurde so gewählt, dass die Summe aller LEDs bei der gewählten Einstellung einem AM1.5g ähnlichem Spektrum entspricht. Somit wurde sichergestellt, dass die Inhomogenität des Beleuchtungsfeldes bei LED-Einstellungen gemessen wurde, die für den späteren Betrieb des Simulators besonders relevant sind.
Die Ergebnisse aller Messungen beruhen auf den Mittelwerten der beiden bei unterschiedlicher Orientierung des Messgerätes (Drehung um 180°) aufgenommen Intensitätsverteilungen. In Abbildung 3 sind die Inhomogenitäten der LED-Typen 7 und 8 beispielhaft als Heatmap dargestellt.

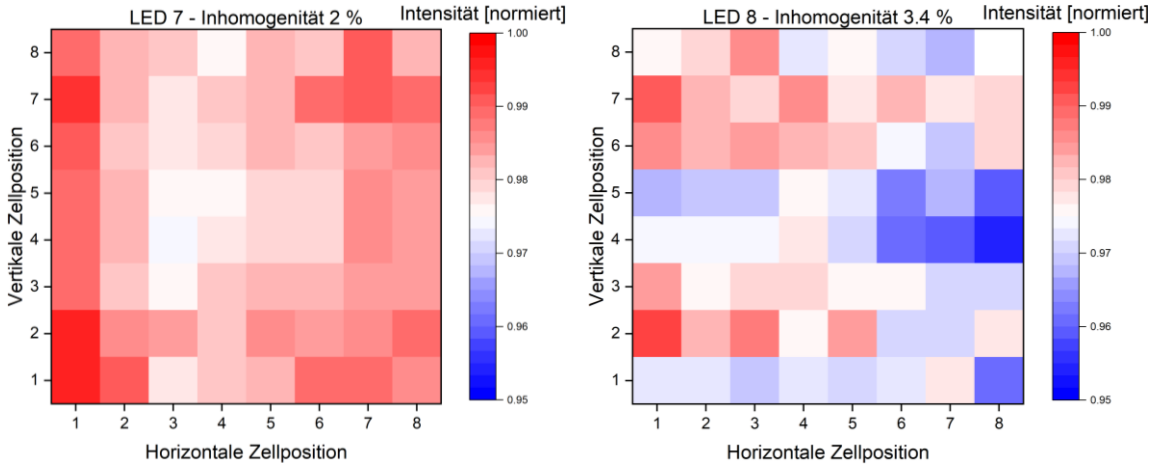


Abbildung 3: Gemessene Intensitätsverteilung der LED-Typen 7 und 8 des LED-Zellsimulators. LED-Typ 7 weist eine Inhomogenität über den Messbereich von nur 2 % auf, während sich für LED 8 eine Inhomogenität von 3.4 % ergibt. Die dargestellten Verteilungen basieren auf den Mittelwerten zweier Messungen mit um 180° rotierter Orientierung des Homogenitäts-Messgerätes.

LED 7 weist eine Inhomogenität von nur 2 % auf, wohingegen die für LED 8 gemessene Inhomogenität von 3.4 % zu den höchsten gemessenen Werten gehört. Anhand der Heatmap von LED 8 ist zu erkennen, dass eine Überbetonung des oberen linken Bereichs der Messebene vorliegt. Die gemessenen Inhomogenitäten aller LEDs sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die dargestellten Unsicherheiten beziehen sich auf die absoluten prozentualen Abweichungen zwischen den beiden bei unterschiedlicher Orientierung des Messgerätes durchgeführten Messungen.

Tabelle 2: Gemessene Inhomogenitäten der LED-Typen 1-20. Die dargestellten Unsicherheiten beziehen sich auf die absoluten prozentualen Abweichungen zwischen zwei bei unterschiedlicher Orientierung des Homogenitäts-Messgerätes durchgeführten Messungen.

LED-Typ	Inhomogenität [%]	Unsicherheit ± [%]
1	4.0	0.1
2	3.5	0.7
3	3.0	0.2
4	3.0	0.7
5	2.8	0.2
6	2.1	0.5
7	2.0	0.6
8	3.4	0.4
9	3.7	1.2
10	2.3	0.2
11	2.1	0.2
12	3.3	0.7
13	3.0	0.6
14	3.1	0.3
15	3.4	0.7
16	2.9	0.3
17	3.2	1.5
18	2.2	0.8
19	2.4	0.1
20	2.4	0.1

Detaillierte Untersuchung thermischer Effekte auf die Beleuchtungseinheit des LED-Zellsimulators

Für eine präzise Ermittlung der IV-Kenndaten von Perowskit auf Silizium Tandemsolarzellen haben sich Messungen unter Dauerlicht als sinnvoll erwiesen. Übliche Messdauern bewegen sich dabei im Bereich mehrerer Minuten. Messdauern weniger Sekunden hingegen führen bei vielen Zellen zu starken Hysterese-Effekten, die eine aussagekräftige Bestimmung der IV-Parameter unmöglich machen.1 Aus diesem Grund ist es für eine präzise Messung von Perowskit auf Silizium Tandemsolarzellen unabdingbar, das Verhalten der verwendeten Lichtquelle im Dauerlichtbetrieb zu untersuchen. Nachdem die mit dem internen Spektralradiometer des Simulators durchgeführten Messungen uneindeutige Ergebnisse bezüglich der Charakteristik verschiedener LEDs bei unterschiedlichen Betriebszuständen gezeigt haben, soll nun eine detaillierte Untersuchung möglicher thermischer Effekte durchgeführt werden.
Um dieser Anforderung nachzukommen, wurde der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsintensität des LED-Zellsimulator zunächst mit Hilfe verschiedener verglaster Referenzsolarzellen untersucht. Hierfür wurde deren Kurzschlussstrom unter einem am Sonnensimulator eingestellten AM1.5g ähnlichen Spektrum mit Hilfe eines Dataloggers über mehrere Minuten hinweg gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung mit einer Blau-Glas gefilterten (WPVS 006-2012), einer Rot-Glas gefilterten (WPVS 009-2012) und einer ungefilterten (WPVS 053-2017) Silizium Referenzsolarzelle werden in Abbildung 4 dargestellt.

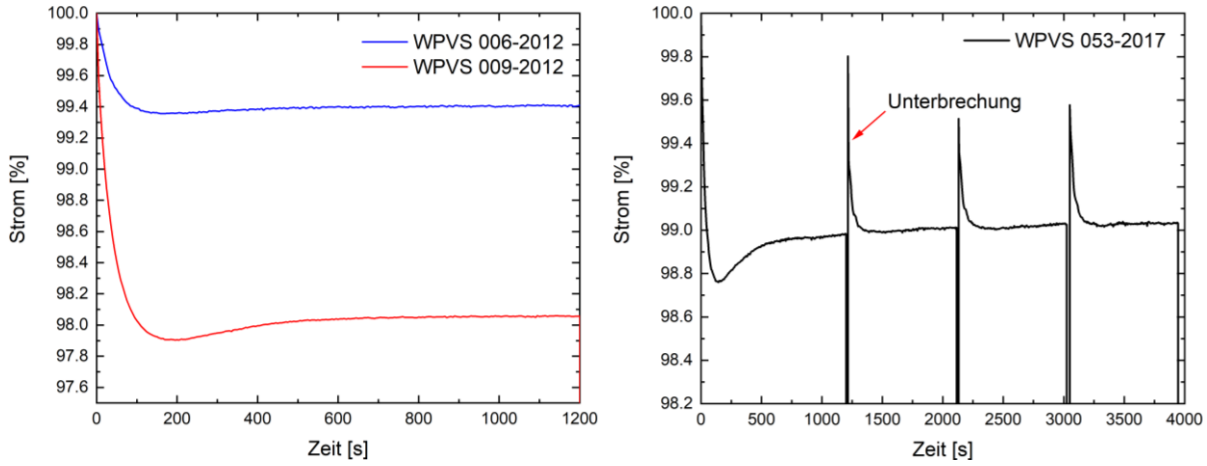


Abbildung 4: Untersuchung des zeitlichen Intensitätsverlaufs der Beleuchtungseinheit des LED-Zellsimulators. Links: Untersuchung mit einer rot- und einer blau-verglasten Referenzsolarzelle. Rechts: Untersuchung mit einer ungefilterten Referenzsolarzelle mit Beleuchtungsunterbrechungen.

Es wird deutlich, dass die Beleuchtungsintensität der LED-Lichtquelle im zeitlichen Verlauf zunächst stark abnimmt, nach ca. 200 s aber wieder in einen leichten Anstieg übergeht. Die deutliche Intensitätsabnahme ist durch die Erwärmung der LEDs direkt nach dem Einschalten des Sonnensimulators zu erklären. Der darauffolgende kontinuierliche Anstieg hingegen, lässt sich der Kühlung des LED-Boards über einen Aluminium-Kühlkörper zuordnen. Dieser Effekt ist träge im Vergleich zur Erwärmung der LEDs und läuft darum auf einer deutlich längeren Zeitskala ab. In den ersten Sekunden nach Einschalten des Sonnensimulators wird der Einfluss der Kühlung noch durch die Intensitätsabnahme aufgrund der Erwärmung der LEDs überlagert.
Anhand der linken Grafik in Abbildung 4 wird zudem deutlich, dass sich die verschiedenen LED-Typen unterschiedlich Verhalten. Während die thermisch bedingte Intensitätsabnahme der kurzwelligen LED-Typen (blaue Linie) weniger als 1 % beträgt, fällt die Intensität der langwelligen LED-Typen (rote Linie) um mehr als 2 %.
Anhand der rechten Grafik können die sich überlagernden Effekte der LED-Erwärmung und der gegensteuernden Kühlkörper-Temperatur gezeigt werden. Nach dem Einschalten und einer Stabilisierungszeit von 1200 s wurde der Sonnensimulator für diesen Versuch wiederholt für einige

[1] Song, T., Friedman, D.J., Kopidakis, N.: How Useful are Conventional I–Vs for Performance Calibration of Single- and Two-Junction Perovskite Solar Cells? A Statistical Analysis of Performance Data on ≈200 Cells from 30 Global Sources. Sol. RRL, 6: 2100867, (2022)

Sekunden ausgeschaltet. Nach erneutem Einschalten der Lichtquelle wird zunächst wieder ein höherer Kurzschlussstrom an der im Lichtfeld positionierten Referenzsolarzelle gemessen. Dieser fällt, wie beim ersten Einschaltvorgang, zunächst stark ab, pendelt sich daraufhin aber auf einem höheren Niveau ein und nähert sich dabei dem vor dem Ausschalten des Simulators prognostizierten Verlauf an. Der schnelle Intensitätsabfall ist auch in diesem Fall der LED-Erwärmung zuzuordnen, die Annäherung an den vorherigen Intensitätsverlauf ist auf die thermische Trägheit des Kühlkörpers zurückzuführen, dessen Temperatur sich durch das kurze Ausschalten der LED-Lichtquelle kaum verändert hat.

Um ein vollständiges Bild des zeitlichen bzw. thermischen Verhaltens der Lichtquelle zu erhalten, wurden auch spektrale Veränderungen der LEDs untersucht. Hierzu wurde ein AM1.5g ähnliches Simulator-Spektrum eingestellt und dieses mittels eines kalibrierten Spektralradiometers zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen, um zeitliche spektrale Veränderungen zu detektieren. Diese Zeitpunkte wurden auf Basis des zuvor untersuchten Intensitätsverlaufs ausgewählt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Abbildung 5 dargestellt.

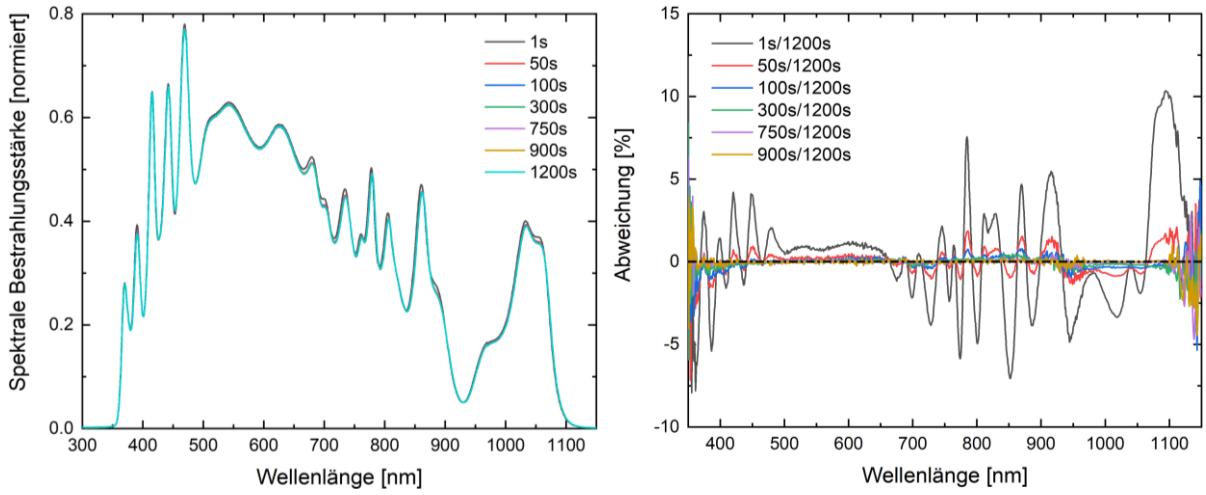


Abbildung 5: Untersuchung zeitlicher spektraler Veränderungen im Dauerlicht-Betrieb des LED-Zellsimulators. Links: Zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommene und auf ihr Integral normierte Spektren. Rechts: Prozentuale Abweichungen der zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Spektren im Vergleich zu dem nach 1200 s aufgenommenem Spektrum.

In der linken Grafik sind Simulator-Spektren zu sehen, die mit einem kalibrierten Spektralradiometer zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen wurden. Diese wurden auf ihr Integral normiert, sodass Unterschiede in den Kurvenverläufen auf spektrale Veränderungen und nicht auf absolute Intensitätsunterschiede zwischen den Messzeitpunkten zurückzuführen sind. Die rechte Grafik zeigt die prozentualen spektralen Abweichungen der zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Spektren zu dem zuletzt aufgenommenen Spektrum nach 1200 s. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen im zeitlichen Verlauf abnehmen, woraus sich eine zunehmende Stabilisierung des Simulator-Spektrums ableiten lässt. Um die Spektren besser untereinander vergleichen zu können, wurde die mittlere spektrale Abweichung der zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Spektren zu dem nach 1200 s aufgenommenen Spektrum ermittelt. Diese beträgt nach 1 s mehr als 2 % und sinkt nach 750 s auf unter 0.2 % ab. Nach 900 s ist keine wesentliche Abnahme der Abweichungen mehr zu erkennen, weshalb das Spektrum nach 750 s als stabil betrachtet werden kann.

Auch die Untersuchungen des Intensitätsverlaufs der Lichtquelle, die im ersten Teil dieses Abschnittes beschrieben wurden (siehe Abbildung 4), zeigen, dass die Intensitätsänderung nach 750 s zu einem nach 2750 s aufgenommenen Endwert unter 0.1 % liegt.

Entwicklung eines neuen Verfahrens zum Einmessen der LED-Spektren

Anhand der zuvor beschriebenen Untersuchungen der zeitlichen Veränderungen des Simulator-Spektrums wird ein auffälliger thermischer Einfluss deutlich. Aus diesem Grund wurde eine angepasste Methode zur Messung der LED-Spektren entwickelt, welche die thermischen Bedingungen der Lichtquelle im Betrieb berücksichtigt.
Bei dieser Methode werden die LED-Spektren nicht einzeln, sondern innerhalb eines Superpositionsspektrums aller LEDs gemessen. Hierfür wird die Aussteuerung des jeweils zu messende LED-Typs innerhalb des Gesamtspektrums zwischen 0 % und 100 % variiert. Durch die Subtraktion des bei 0 % LED-Aussteuerung gemessenen Spektrums von den bei 20 % - 100 % aufgenommenen Spektren lassen sich die Einzel-LED-Spektren innerhalb des Gesamtspektrums intensitätsabhängig ermitteln. Als Basis-Spektrums innerhalb dessen die einzelnen LED-Typen variiert werden, wurde ein AM1.5g nahes Spektrum verwendet. Damit wird erreicht, dass die bei der Messung der LED-spektren vorliegenden thermischen Bedingungen in der Lichtquelle den bei späteren IV-Messungen vorliegenden Bedingungen so ähnlich wie möglich sind. Beispielhaft wird das beschriebene Vorgehen in Abbildung 6 anhand der für die Messung des LED-Typs 6 aufgenommenen Spektren verdeutlicht. Im linken Graph sind die mit einem kalibrierten Spektralradiometer gemessenen Superpositionsspektren gezeigt. Im rechten Graph sind die sich durch die Subtraktion des 0 % Spektrums ergebenden Einzelspektren des LED-Typs 6 bei verschiedenen Aussteuerungen dargestellt. Alle Spektren wurden mit Hilfe einer primärkalibrierten, ungefilterten Silizium-Referenzsolarzelle auf absolute Bestrahlungswerte normiert.

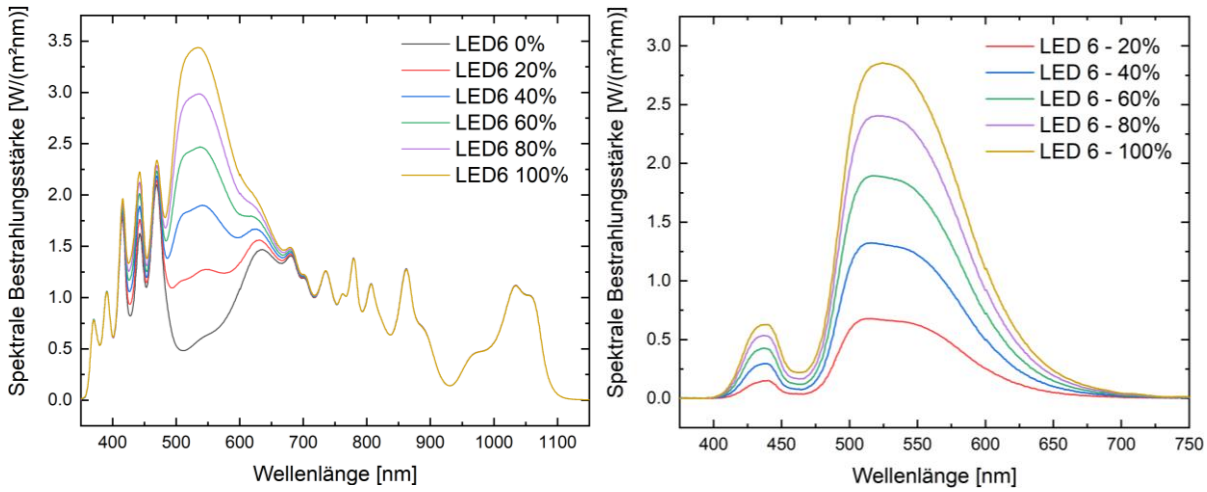


Abbildung 6: Spektralmessung des LED-Typs 6. Links: Messung des LED-Typs durch Intensitätsvariationen innerhalb eines AM 1.5g ähnlichen Basisspektrums. Rechts: Aus den gemessenen Superpositionsspektren berechnete Einzelspektren des LED-Typs 6 bei verschiedenen LED-Aussteuerungen.

Der thermische Einfluss, den die Gesamtheit der übrigen LEDs auf den jeweils zu messenden LED-Typen hat, wird anhand eines Vergleichs zu den separat eingemessenen Spektren des LED-Typs 6 deutlich. Um einen möglichst fairen Vergleich zu gewährleisten, wurde der Sonnensimulator für beide Messprozeduren zunächst 750 s durch Einstellen eines AM1.5g nahen Spektrums aufgewärmt. Anschließend wurden die LED-Spektren im ersten Fall (Differenz-Spektren – Diff) wie zuvor beschrieben durch Intensitätsvariationen innerhalb eines Basisspektrums gemessen. Im zweiten Fall (Einzel-Spektren – Single) wurden nach der Aufwärmphase alle, bis auf die zu messende LED ausgeschaltet. Deren Spektrum wurde dann bei verschiedenen Aussteuerungen zwischen 20 % und 100 % gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 7 dargestellt.

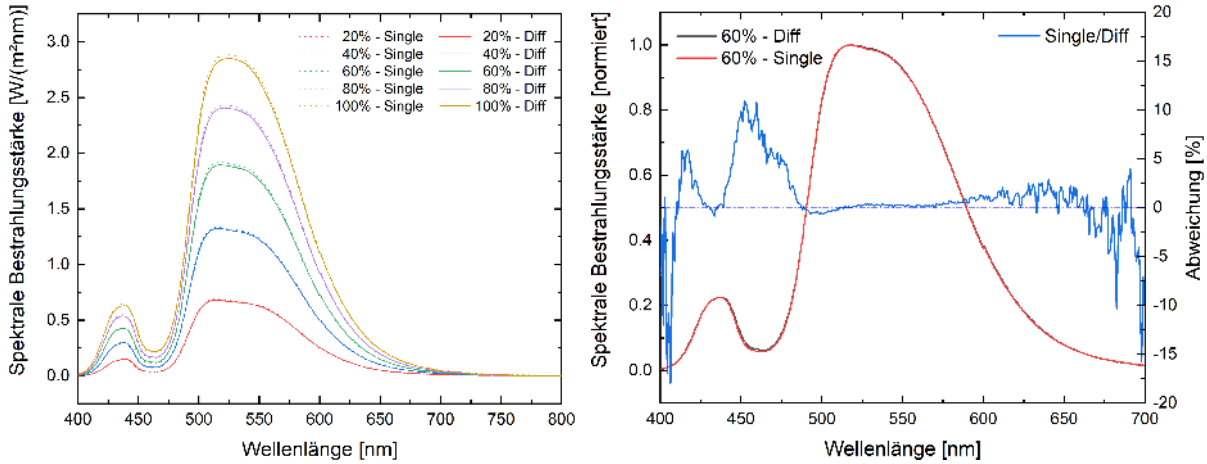


Abbildung 7: Vergleich verschiedener Messmethoden zur Ermittlung von LED-Spektren. Links: Vergleich der Spektralverläufe des LED-Typs 6 einzeln eingemessen (gepunktete Linien) und mit der Differenz-Methode gemessen (durchgezogene Linien). Rechts: Darstellung der relativen spektralen Abweichungen der auf verschiedene Arten gemessenen und auf eins normierten Spektren des LED-Typs 6 bei einer Aussteuerung von 60 %.

In der linken Grafik ist deutlich zu erkennen, dass die mit der Differenzen-Methode gemessenen Spektren (durchgezogene Linien) unterhalb der separat gemessenen Spektren (gepunktete Linien) verlaufen. Dies lässt sich durch die in beiden Fällen unterschiedlichen LED-Temperaturen erklären. Durch die höhere Temperatur des LED-Typs 6 innerhalb des Superpositionsspektrums verliert diese an Effizienz. Auch die mit der LED-Aussteuerung linear ansteigende Zunahme der Abweichungen ist auf einen thermisch bedingten Unterschied der LED-Effizienz zurückzuführen. Im rechten Graph wurden die mit den unterschiedlichen Methoden bei einer Aussteuerung von 60 % gemessenen Spektren normiert dargestellt, um einen relativen spektralen Vergleich zu ermöglichen. Anhand der auf der rechten y-Achse aufgetragenen prozentualen spektralen Abweichungen ist eine leichte Rotverschiebung des mit der Differenz-Methode aufgenommenen Spektrums des LED-Typs 6 zu erkennen. Auch dieser Effekt lässt sich auf den Einfluss einer erhöhten Temperatur innerhalb der Lichtquelle beim Einmessen der LED-Spektren zurückführen.

Auf Basis dieser Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass die vorgestellte Methode zur Messung der LED-Spektren durch Intensitätsvariation innerhalb eines AM1.5g ähnlichen Basisspektrums besser geeignet ist, um die im Betrieb vorliegenden Eigenschaften der einzelnen LED-Typen zu erfassen, als eine einfache Messung der einzelnen LEDs.

Entwicklung einer Prozedur für die spektrale Anpassung von LED-Sonnensimulatoren für die Messung von Mehrfachsolarzellen

Für die Messung von Mehrfachsolarzellen ist eine spektrale Anpassung des LED-Simulator-Spektrums notwendig, sodass jede Teilzelle der zu messenden Mehrfachsolarzelle unter dem eingestellten Spektrum genau den Strom generiert, den sie auch unter dem zugrunde liegenden Referenzspektrum generieren würde[2]. In der Regel werden hierfür Sonnensimulatoren verwendet, die mehrere, spektral unterschiedliche Lichtquellen aufweisen, wobei die Anzahl der Lichtquellen gleich[3] oder leicht über[4] der Anzahl der Teilzellen der zu messenden Mehrfachzelle ist. Im Falle eines LED-Simulators übersteigt die Anzahl der spektral unterschiedlichen Lichtquellen die Anzahl der Teilzellen jedoch um ein Vielfaches. Wie im letzten Berichtzeitraum angekündigt, wurde darum an einer neuen Prozedur für die spektrale Anpassung von LED-Sonnensimulatoren gearbeitet, die im Folgenden vorgestellt wird.

[2] DIN EN 60904-1-1 VDE 0126-4-1-1:2018-06

[3] Meusel, M., Adelhelm, R., Dimroth, F., Bett, A. W. u. Warta, W.: Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 10 (2002) 4, S. 243–255

[4] Moriarty, T., Jablonski, J., Emery, K.: Algorithm for building a spectrum for NREL's One-Sun Multi-Source Simulator. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, Texas, USA, 2012, S. 1291–1295.

Die Prozedur lässt sich grob in drei Einzelschritte unterteilen. Dabei handelt es sich um die präzise Messung der einzelnen LED-Spektren des Sonnensimulators (i), die Durchführung einer täglichen Referenzmessung (ii), mit der der tagesaktuelle Zustand des Sonnensimulators ermittelt werden soll, sowie die finale Berechnung neuer Simulator-Spektren für die präzise Messung von Tandemsolarzellen (iii).

(i) Kalibrierung der einzelnen LED-Spektren

Im ersten Schritt werden die Spektren der einzelnen LEDs mit Hilfe eines kalibrierten Spektralradiometers bei verschiedenen Intensitäten ermittelt. Um die thermische Beeinflussung der LEDs untereinander zu berücksichtigen, werden diese nicht separat, sondern innerhalb eines Superpositions-Spektrums aus allen LEDs kalibriert. Die jeweils zu messende LED wird innerhalb dieses Spektrums in ihrer Intensität variiert, sodass sich aus den Differenzen des Basisspektrums und den in dieser Weise variierten Spektren das Spektrum der LED bei verschiedenen Aussteuerungen innerhalb des Gesamtspektrums ermitteln lässt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgehens ist dem vorherigen Abschnitt zu entnehmen.

(ii) Tägliche Referenzmessung

Nachdem die Lichtquelle des Sonnen-Simulators aufgewärmt und damit „stabilisiert" wurde wird eine Referenzmessung durchgeführt, um den tagesaktuellen Betriebszustand des Sonnensimulators festzustellen und für die nachfolgenden Berechnungen neuer Simulator-Spektren zu berücksichtigen. Hierfür wird ermittelt welchen Anteil jeder einzelne LED-Typ an dem in einer primärkalibrierten Silizium Referenzsolarzelle erzeugten Gesamtstrom unter einem definierten Simulator-Spektrum liefert. Hierfür wird das bereits für die Kalibrierung der LED-Spektren verwendete Basisspektrum am Sonnensimulator eingestellt. Daraufhin wird jeder LED-Typ nacheinander für 0.5 s abgeschaltet, um den Strom der Referenzzelle innerhalb dieses Zeitraums zu messen. Der Strombeitrag jedes LED-Typs kann dann aus der Differenz der Mittelwerte der vor und nach dem Abschalten der LED gemessenen Referenzzellenströme bestimmt werden. Die Summe der für jeden LED-Typ gemessenen Ströme ergibt den rechnerischen Gesamtstrom, der um etwa 0,1 % (StD: 0,025 % basierend auf 13 Messungen) von dem mit der Referenzsolarzelle unter dem Basisspektrum gemessenen Gesamtstrom abweicht. Diese Abweichung kann auf Messunsicherheiten zurückgeführt werden und ist in den Gesamtunsicherheiten, die für die mit diesem Verfahren gemessenen I-V-Parameter angegeben werden, zu berücksichtigen. Ausgehend von den gemessenen LED-Strömen $I_{LED_n}^{meas}$ werden die zuvor ermittelten Einzel-LED-Spektren bei unterschiedlichen Intensitäten $E_{LED_n}^{0\,\%-100\,\%}$ mit Hilfe eines Skalierungsfaktors s_{LED_n} auf absolute Bestrahlungsstärken skaliert. Dieser Faktor wird für jeden LED-Typ n, wie in Gleichung 1 beschrieben, aus den bei der LED-Kalibrierung $E_{LED_n}^{Base}(\lambda)$ bei identischen Einstellungen gemessenen Spektren sowie der absoluten spektralen Empfindlichkeit der verwendeten Referenzsolarzelle $SR_{Ref}(\lambda)$ berechnet.

$$s_{LED_n} = \frac{\int E_{LED_n}^{Base}(\lambda) \cdot SR_{Ref}(\lambda)\, d(\lambda)}{I_{LED_n}^{meas}}$$

Durch die tagesfeine Skalierung der zum Zeitpunkt der Simulator-Kalibrierung ermittelten LED-Spektren werden Kurz- und Langzeitstabilitätseffekte der Lichtquelle sowie Degradationseffekte der einzelnen LEDs für die anschließende Berechnung geeigneter Simulator-Spektren berücksichtigt. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse mehrerer solcher Referenzmessungen beispielhaft über einen Zeitraum von etwa drei Monaten dargestellt. Dabei werden für jeden LED-Typ die Abweichungen des gemessenen Strombeiträge im Vergleich zu der initial am 01.03.2022 durchgeführten Messung gezeigt.

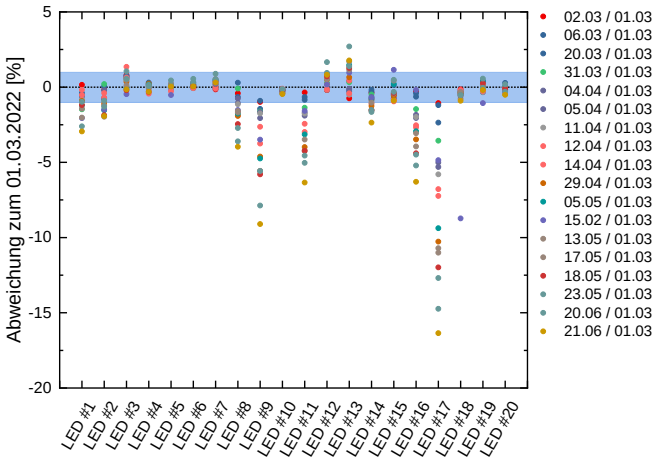


Abbildung 8: Abweichungen der über einen Zeitraum von ca. 3 Monaten ermittelten Strombeiträge der einzelnen LED-Typen innerhalb der „täglichen Referenzmessungen". Die dargestellten Abweichungen beziehen sich auf eine am 01.03.2022 durchgeführte Referenzmessung. Der blau hervorgehobene Bereich entspricht einer Abweichung von ±1%.

Anhand der Abweichungen können Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit sowie auf Degradations-Effekte der verschiedenen LED-Typen getroffen werden. Zudem wird anhand dieser Ergebnisse die Notwendigkeit der Verifikation der Simulator-Spektren durch Referenzmessungen unterstrichen. Diese Untersuchung und Art der Auswertung zeigt sich damit zudem als sinnvolle Möglichkeit um die Stabilität und Degradationseffekte einzelner LEDs dauerhaft zu monitoren.

(iii) Berechnung neuer Simulator-Spektren für Tandemmessungen

Um die Spektren aller LED-Typen innerhalb ihres gesamten einstellbaren Intensitätsbereichs für die anschließende Berechnung neuer Simulator-Spektren zu definieren, wird der Intensitätsverlauf $E_{LED_n}^{\lambda_m}(CV_n)$ jedes LED-Typs mit Hilfe eines Polynoms vierten Grades für jeden Wellenlängenknoten λ_m innerhalb des Emissionsbereichs der Lichtquelle gefittet. Die Intensität der LEDs hängt dabei von der LED-Aussteuerung ab, die als "Channel Value" (CV) bezeichnet wird. Unter Verwendung der sich ergebenden wellenlängenaufgelösten Intensitätsfunktionen kann das Spektrum jedes LED-Typs für jede Aussteuerung zwischen 0 % und 100 % bestimmt werden. Dies wird in der linken Grafik in Abbildung 9 für LED-Typ 6 exemplarisch dargestellt. Dieses Vorgehen resultiert wie in der rechten Grafik in Abbildung 9 beispielhaft für ein Spektrum dargestellt, in einer hohen Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen LED-Spektren.

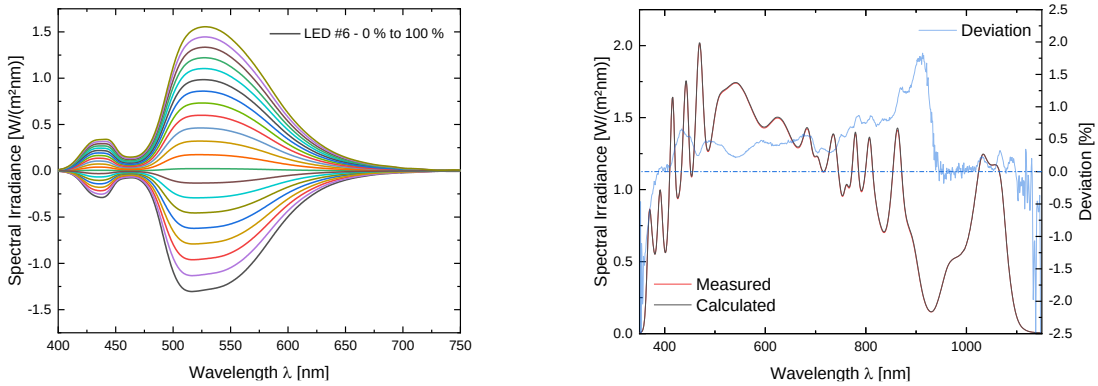


Abbildung 9: Spektren des LED-Typs 6 bei verschiedenen Intensitäten zwischen 0 % und 100 % in 5 % Schritten. Die Spektren wurden aus den gefitteten Intensitätsfunktionen für jeden Wellenlängenknoten berechnet. Rechts: Vergleich zwischen einem gemessenen und einem berechneten LED-Spektrum. Das gezeigte Spektrum wurde für eine Dreifach-Solarzelle auf der Grundlage des in dieser Arbeit vorgestellten Anpassungsverfahrens berechnet. Die Messung wurde mit einem kalibrierten Spektralradiometer durchgeführt und mit Hilfe einer Silizium Referenzsolarzelle auf absolute Bestrahlungsstärken skaliert. Die rechte y-Achse zeigt die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Spektrum in Prozent.

Im Folgenden wird die entwickelte Berechnungsmethode beispielhaft für eine $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}$-Tandemsolarzelle durchgeführt, die als stabiler Ersatz für einen Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle dient. Die EQEs dieser Testzelle sowie einer Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle sind in Abbildung 10 dargestellt und weisen besonders in der Position der Bandkante der Oberzelle eine hohe Ähnlichkeit auf, was diese Zelle zu einem geeigneten Testobjekt macht.

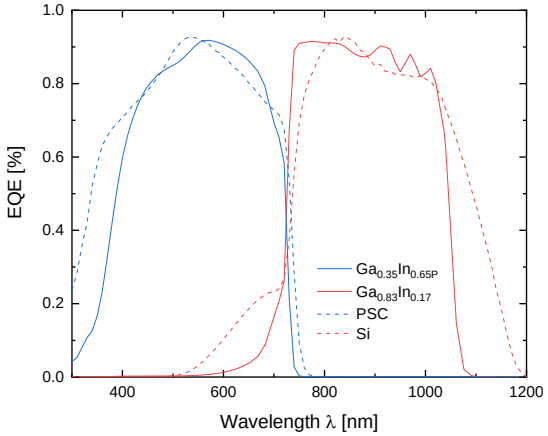


Abbildung 10: Externe Quanteneffizienz (EQE) einer 4 cm² Ga0.35In0.65P/Ga0.83In0.17-Tandemsolarzelle (durchgezogene Linien), die aufgrund ihrer ähnlichen EQE als stabiler Ersatz für eine Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle (gestrichelte Linien) verwendet wird.

Für die Berechnung eines neuen Simulator-Spektrums, welches die zuvor beschriebene Bedingung erfüllt, dass der Strom jeder Teilzelle unter dem Sonnensimulator ihrem Strom unter Referenzbedingungen entspricht, muss ein unterbestimmtes nichtlineares Gleichungssystem gelöst werden. Dieses besteht für das hier beschriebene Beispiel aus zwei Gleichungen und 20 Unbekannten. Die Anzahl der Gleichungen entspricht dabei der Anzahl der Teilzellen j in der zu messenden Mehrfachsolarzelle, und die Anzahl der Unbekannten entspricht n, der Anzahl der spektral unterschiedlichen LED-Lichtquellen im Sonnensimulator.

$$\begin{bmatrix} \int sr_{j_1}(\lambda)E_{Sim}(\lambda)d\lambda \\ \int sr_{j_2}(\lambda)E_{Sim}(\lambda)d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Jsc_{j_1}^{Sim} \\ Jsc_{j_2}^{Sim} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} Jsc_{j_1}^{LED_1}(CV_1) + \cdots + Jsc_{j_1}^{LED_{20}}(CV_{20}) \\ Jsc_{j_2}^{LED_1}(CV_1) + \cdots + Jsc_{j_2}^{LED_{20}}(CV_{20}) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} Jsc_{j_1}^{Ref} \\ Jsc_{j_2}^{Ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int sr_{j_1}(\lambda)E_{Ref}(\lambda)d\lambda \\ \int sr_{j_2}(\lambda)E_{Ref}(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

Dieses Gleichungssystem kann jedoch leicht für Mehrfachzellen mit drei oder mehr Teilzellen sowie für Sonnensimulatoren mit mehr oder weniger als 20 spektral unterschiedlichen Lichtquellen erweitert werden. Jede Gleichung beschreibt den Strom der jeweiligen Teilzelle unter dem Spektrum des Sonnensimulators $Isc_{j_j}^{Sim}$ als die Summe der Ströme $\sum_1^n Isc_{j_j}^{LED_n}(CV_n)$, die von den verschiedenen LED-Typen in der jeweiligen Teilzelle generiert werden. Diese Summe muss per Definition gleich dem Strom der Teilzelle unter Referenzbedingungen $Isc_{j_j}^{Ref}$ sein. Der Strom unter Referenzbedingungen kann für jede Teilzelle durch die Integration des Produkts der relativen spektralen Empfindlichkeit $sr_{j_j}(\lambda)$ der Teilzelle und der spektralen Bestrahlungsstärke des Referenzspektrums $E_{Ref}(\lambda)$ berechnet werden. Wichtig ist es hierbei anzumerken, dass für dieses Vorgehen die Kenntnis der relativen spektralen Empfindlichkeit der Teilzellen ausreicht. Während der relative Verlauf der spektralen Empfindlichkeit mit geringer Unsicherheit gemessen werden kann, ist die Bestimmung der absoluten Höhe mit höheren Unsicherheiten behaftet. Da die spektralen Empfindlichkeiten der Teilzellen jedoch auf beiden Seiten des Gleichungssystems auftreten kann die

absolute Höhe als Skalierungsfaktor vor die relative sr gezogen und so aus der Gleichung herausgekürzt werden[5].
Ebenso wie die LED-Spektren selbst können auch die Verläufe der von jedem LED-Typ in den einzelnen Teilzellen erzeugten Ströme $Isc_{j_j}^{LED_n}(CV_n)$ aufgrund ihrer Abhängigkeit von den gemessenen Spektren mit einem Polynom vierten Grades beschrieben werden.

$$Isc_{j_n}^{LED_n}(CV_n) = \alpha_n \cdot CV_n^4 + \beta_n \cdot CV_n^3 + \gamma_n \cdot CV_n^2 + \delta_n \cdot CV_n + \varepsilon_n$$

Aufgrund der Unterbestimmtheit des eingeführten Gleichungssystems ergibt sich eine unendliche Anzahl möglicher Lösungen für dieses Problem, welches durch Subtraktion des Lösungsvektors in ein Minimierungsproblem umgewandelt werden kann.

$$\begin{bmatrix} Isc_{j_1}^{LED_1}(CV_1) + & \cdots & + Isc_{j_1}^{LED_{20}}(CV_{20}) \\ Isc_{j_2}^{LED_1}(CV_1) + & \cdots & + Isc_{j_2}^{LED_{20}}(CV_{20}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Isc_{j_1}^{Ref} \\ Isc_{j_2}^{Ref} \end{bmatrix} = 0$$

Dieses Minimierungsproblem wird nun mehrfach numerisch gelöst. Dabei werden für jede Lösung verschiedene Randbedingungen definiert, um den Lösungs-Algorithmus[6] zu verschiedenen Lösungen zu zwingen, die anschließend bewertet werden, um das Zielspektrum für die jeweilige Mehrfachsolarzelle zu finden. Die einzelnen Schritte dieses Verfahrens werden in dem in Abbildung 11 dargestellten Flussdiagramm veranschaulicht und im Folgenden beschrieben.

[5] Meusel, M., Adelhelm, R., Dimroth, F., Bett, A. W. u. Warta, W.: Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 10 (2002) 4, S. 243–255

[6] Branch, Mary Ann; Coleman, Thomas F.; Li, Yuying (1999): A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems. In SIAM J. Sci. Comput. 21 (1), pp. 1-23.

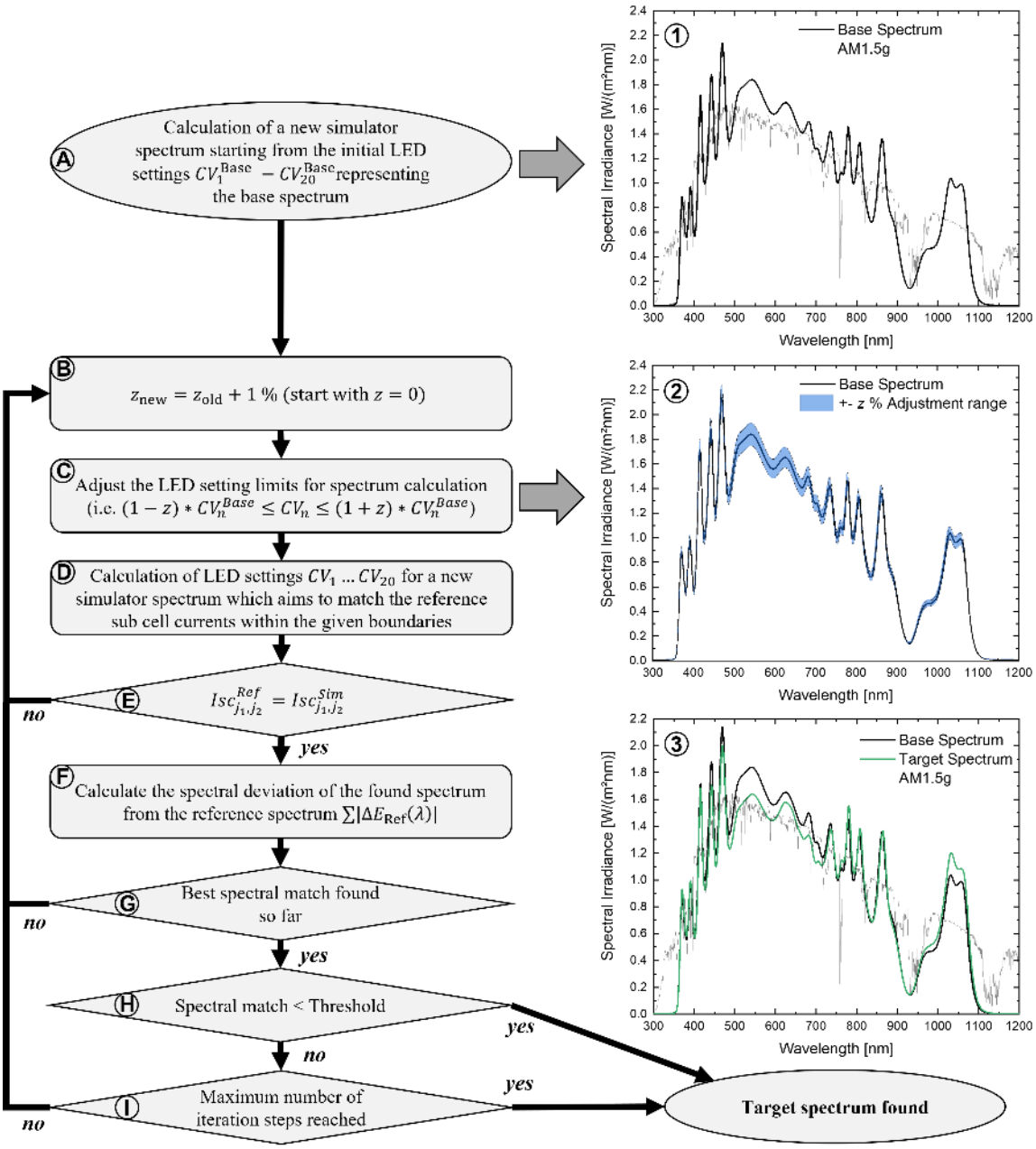


Abbildung 11: Flussdiagramm der vorgestellten Methode zur Berechnung neuer Spektren für LED basierte Sonnensimulatoren.

Die LED-Einstellungen $CV_1^{Base} - CV_{20}^{Base}$, die das in der oberen Grafik des Flussdiagramms dargestellte Basisspektrum repräsentieren, werden als Anfangswerte für jede numerische Lösung des Gleichungssystems verwendet Ⓐ. Die Berechnungsgrenzen hingegen werden in jedem Iterationsschritt variiert, um verschiedene Lösungen dieses Minimierungsproblems zu erhalten. Hierfür wird eine Iterationsvariable z eingeführt, die kontinuierlich um einen konstanten Faktor (in diesem Fall 1 %) erhöht wird Ⓑ. Mit Hilfe dieser Variable werden die Berechnungsgrenzen, d.h. die maximale und minimale LED-Einstellung, die für jede LED im aktuellen Iterationsschritt zulässig ist, neu berechnet Ⓒ.

$$(1-z) \cdot CV_n^{\mathrm{Base}} \leq CV_n \leq (1+z) \cdot CV_n^{\mathrm{Base}}$$

Das bedeutet, dass in jedem Schritt die zulässigen Einstellbereiche für alle LEDs ausgehend von den Basisspektrums-Einstellungen symmetrisch vergrößert werden. Grafisch lässt sich dies, wie in der mittleren Grafik des Flussidagramms zu erkennen, als ein Band um das Basisspektrum darstellen, das in jedem Iterationsschritt breiter wird und die spektralen Grenzen für eine mögliche Lösung des

Minimierungsproblems definiert Ⓓ. Kann das Gleichungssystem innerhalb dieser Grenzen nicht gelöst werden, d. h. es wird kein Spektrum gefunden, das die Bedingung angepasster Teilzellenströme erfüllt Ⓔ, beginnt ein neuer Iterationslauf. Kann eine Lösung gefunden werden, wird die spektrale Abweichung $\sum|\Delta E_{Ref}(\lambda)|$ des berechneten Simulatorspektrums vom zugrundeliegenden Referenzspektrum bestimmt Ⓕ. Ist diese Abweichung kleiner als die kleinste in den vorangegangenen Iterationsschritten gefundene Abweichung, wird dieses Spektrum als vorläufiges Zielspektrum gespeichert Ⓖ. Konnte mit einem zuvor berechneten Spektrum eine geringere Abweichung erreicht werden, beginnt die Iteration erneut. Liegt die spektrale Abweichung des vorläufigen Zielspektrums unter einem zuvor festgelegten Schwellenwert Ⓗ, endet die Iteration, und das gefundene Spektrum wird zum endgültigen Zielspektrum Ⓙ . Auch wenn eine zuvor festgelegte maximale Anzahl an Iterationsschritten erreicht ist Ⓘ, endet der Berechnungsprozess, und das vorläufige Zielspektrum, welches die bisher geringste Abweichung zum Referenzspektrum aufzeigte, wird zum Ausgangszielspektrum Ⓙ. Ein Zielspektrum für eine Mehrfachsolarzelle mit zwei Teilzellen wird in der unteren Grafik des Flussdiagramms beispielhaft zusammen mit dem Basisspektrum sowie dem AM1.5g Referenzspektrum dargestellt.
Mit der spektralen Ähnlichkeit zum Referenzspektrum wird ein sekundäres Bewertungskriterium für die Suche eines geeigneten Simulator-Spektrums eingeführt. Während jedes Spektrum, das im Rahmen des oben erläuterten, iterativen Verfahrens gefunden wurde, die primäre Bedingung angepasster Teilzellenströme erfüllt, dient die Einführung dieses zusätzlichen Bewertungskriteriums als Hilfsgröße, um genau eine Lösung aus dem Raum unendlich vieler möglicher Lösungen auszuwählen. Die spektrale Ähnlichkeit des Simulator-Spektrums zum Referenzspektrum ermöglicht jedoch auch eine höhere Messgenauigkeit, insbesondere bei der Messung von Solarzellen mit starken wellenlängenabhängigen Nichtlinearitäten[7]. Zudem führt das von uns vorgestellte Verfahren effizient zu einem Zielspektrum, welches aufgrund seiner spektralen Ähnlichkeit zum Referenzspektrum und damit auch zu dem für die Kalibrierung der LED-Spektren verwendeten Basisspektrum einen thermischen Zustand in der Lichtquelle einstellt, der dem Zustand beim Einmessen der LED-Spektren ähnlich ist. Aufgrund der detailliert beschriebenen thermischen Empfindlichkeit von LED-basierten Sonnensimulatoren ist dieser Aspekt entscheidend für die Durchführung präziser Messungen an Tandemsolarzellen mit dieser Art von Sonnensimulatoren.

Messvergleich zwischen dem Zell-LED-Simulator und einem im CalLab etablierten 3-Lichtquellen Sonnensimulator

Um das vorgestellte Verfahren zur spektralen Anpassung von LED-basierten Solarsimulatoren zu evaluieren, wurde ein Messvergleich mit einem etablierten 3-Lichtquellen Sonnensimulator des Fraunhofer ISE CalLab durchgeführt. Hierfür wurde die bereits zuvor erwähnt 4 cm² große $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}$ Tandemsolarzelle als Ersatz für eine Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle verwendet.
Für diesen Messvergleich wurde eine spektrometrische Charakterisierung der Tandemsolarzelle mit beiden Sonnensimulatoren durchgeführt. Die spektrometrische Charakterisierung ist eine spezielles Messmethode zur Untersuchung von Tandemsolarzellen unter verschiedenen spektralen Bedingungen. Für diese Messmethode wird das Spektrum des Sonnensimulators auf definierte Weise von rotreichen zu blaureichen Spektren verkippt, wobei jeder einzelne Punkt in den in Abbildung 12: Spektrometrische Charakterisierung einer 4 cm² Ga0.35In0.65P/Ga0.83In0.17 - Tandemsolarzelle, durchgeführt mit einem 3-Lichtquellen Sonnensimulator des Fraunhofer ISE CalLab (rot) und dem Zell-LED-Sonnensimulator (schwarz). Für die spektrometrische Charakterisierung wurde das Spektrum der Sonnensimulatoren von links nach rechts systematisch von rot lastigen zu blau lastigen Spektren verkippt, um die Stromanpassung der beiden Teilzellen zu verändern. Auf der unteren und oberen x-Achse werden die Bestrahlungsstärke-Verhältnisse von Ober- und Unterzelle zu den Referenzbedingungen für die jeweiligen Messpunkte dargestellt. Alle LED-Spektren wurden mit der vorgestellten Methode der spektralen Anpassung berechnet.
dargestellten Ergebnissen einem bestimmten Spektrum zugeordnet ist. Ändert sich die Farbe des Simulator-Spektrums werden die Teilzellströme systematisch gegeneinander verändert. Dabei bleibt die effektive Bestrahlungsstärke auf die gesamte Solarzelle konstant, so dass

[7] J Metzdorf et al 2000 Metrologia 37 573

$$\frac{G_{eff}^{Top}(E(\lambda))}{G_{eff}^{Top}(AM1.5g)} + \frac{G_{eff}^{Bot}(E(\lambda))}{G_{eff}^{Bot}(AM1.5g)} = 2$$

für jedes innerhalb der Messmethode verwendete Spektrum erfüllt ist.
Mit Hilfe dieser Messmethode können wertvolle Informationen, z.B. über die Stromanpassung der Teilzellen, gewonnen werden. Darüber hinaus können durch Variation der Stromlimitierung unter rot- und blau lastigen Spektren die I-V-Kennlinien beider Teilzellen innerhalb der Mehrfachsolarzelle gemessen werden. Die für diese Messmethode erforderliche präzise Variation der Spektralbedingungen stellt besonders hohe Anforderungen an die Einstellung des Simulator Spektrums, was die spektrometrische Charakterisierung zu einer robusten Methode zur Validierung des von uns entwickelten Verfahrens macht. Die Ergebnisse der mit beiden Sonnensimulatoren durchgeführten Messungen sind in Abbildung 12 dargestellt.

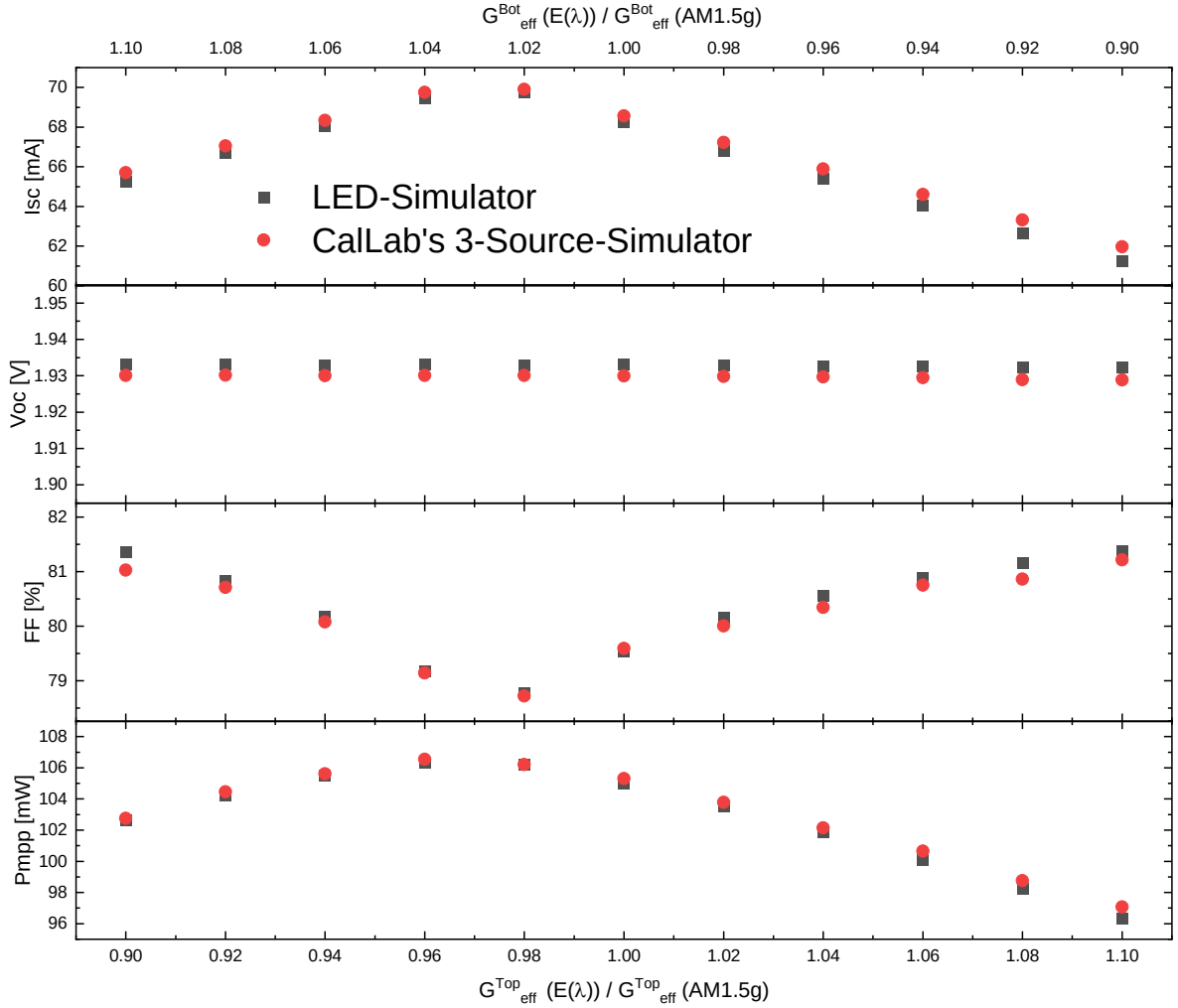


Abbildung 12: Spektrometrische Charakterisierung einer 4 cm² Ga0.35In0.65P/Ga0.83In0.17 - Tandemsolarzelle, durchgeführt mit einem 3-Lichtquellen Sonnensimulator des Fraunhofer ISE CalLab (rot) und dem Zell-LED-Sonnensimulator (schwarz). Für die spektrometrische Charakterisierung wurde das Spektrum der Sonnensimulatoren von links nach rechts systematisch von rot lastigen zu blau lastigen Spektren verkippt, um die Stromanpassung der beiden Teilzellen zu verändern. Auf der unteren und oberen x-Achse werden die Bestrahlungsstärke-Verhältnisse von Ober- und Unterzelle zu den Referenzbedingungen für die jeweiligen Messpunkte dargestellt. Alle LED-Spektren wurden mit der vorgestellten Methode der spektralen Anpassung berechnet.

Ein Vergleich der Ergebnisse der spektrometrischen Charakterisierungen zeigt eine hohe Übereinstimmung der beiden Sonnensimulatoren über den gesamten Messbereich. Die maximalen Abweichungen betragen -1,2 % im I_{SC}, 0,18 % im V_{OC} und -0,8 % im P_{MPP}. Zu erwähnen ist außerdem, dass diese maximalen Abweichungen bei Messungen unter deutlich blau und rot verschobenen Spektren auftreten. Dies lässt sich

dadurch erklären, dass die einzelnen LED-Spektren unter spektralen und damit thermischen Bedingungen in der Lichtquelle kalibriert wurden, die den Referenzmessbedingungen nahekommen. Variationen des Spektrums zu sehr blau- oder rotreichen Spektren führen hingegen unweigerlich zu Messbedingungen, die weiter von den Referenzbedingungen entfernt sind und so zu höheren Unsicherheiten führen. Bei einem Vergleich der unter Referenzbedingungen durchgeführten Messungen, dargestellt durch den Punkt 1.00 innerhalb der spektrometrischen Charakterisierung, sind die Abweichungen in allen I-V-Parametern daher mit -0,4 % im I_{SC}, 0,16 % im V_{OC} und -0,3 % im P_{MPP} noch deutlich geringer.
Mit Hilfe dieses Messvergleichs konnte die Anwendbarkeit, der von uns entwickelten Methode für die spektrale Anpassung von LED basierten Sonnensimulatoren bestätigt werden. Dies ermöglicht die Verwendung unseres Zell-LED-Simulators für die präzise Charakterisierung von Perowskit auf Silizium Tandemsolarzellen. Zudem erlaubt unsere Anpassungsmethode auch die Berechnung von Spektren für die Durchführung spektrometrischer Charakterisierungen an Perowskit auf Silizium Tandemsolarzellen, was wiederum wertvolle Informationen für Zellenentwicklung liefern kann. Nicht zuletzt konnten während der Entwicklung dieser Methodik für den Zell-LED-Simulator bereits wichtige Erkenntnisse über Besonderheiten der LED-Beleuchtungseinheit gesammelt werden, was für einen möglichst schnellen Übertrag dieser Anpassungsmethode auf den Modul-LED-Sonnensimulator von Vorteil ist.

Charakterisierung des Modul-Sonnensimulators

Nachdem der LED Modul Sonnen-Simulator erfolgreich in das eigens dafür umgebaute Labor eingebracht und in Betrieb genommen werden konnte werden die am Zell-LED-Simulator durchgeführten Charakterisierungsmessungen nun auch am Modul-Sonnensimulator durchgeführt. Ziel ist es, die zuvor beschriebenen Methoden nun auf Modulmessungen zu übertragen um damit die für AP2.3 vorgesehene Modulkalibrierung zu ermöglichen.

Untersuchungen zur Stabilisierung spektraler Bedingungen

Da die spektrale Stabilität des Sonnensimulator Spektrums mit Hilfe der bereitgestellten Software bisher nicht ausreichend gut geregelt werden kann ist es notwendig die Stabilisierungszeit des Lichtfelds ohne Nachregelung der LED-Intensitäten zu ermitteln. Hierzu wurde am Modul-Sonnensimulator, äquivalent zu dem zuvor für den Zell-Messplatz beschriebenen Vorgehen, ein Spektrum eingestellt dessen Intensität in etwa einer Sonne (bezogen auf eine breitbandige Silizium Referenzsolarzelle) entspricht. Nach dem Anschalten des Lichtfeldes wurde der Kurzschlussstrom einer breitbandigen Silizium Referenzsolarzelle kontinuierlich gemessen, um eine Aussage bezüglich der zeitlichen Stabilität der Beleuchtungseinheit zu erlangen. Die Temperatur der Solarzelle wurde auf ca. 25 °C stabil gehalten, (max. Abweichungen -0.6°C, +0.1°C) wobei leichte Temperaturschwankungen nachträglich über den bekannten Temperatur-Koeffizienten des Kurzschlussstroms der verwendeten Referenzsolarzelle korrigiert wurden. Zudem wurde das Spektrum des Sonnensimulators alle fünf Minuten mit Hilfe eines kalibrierten Spektralradiometers gemessen.

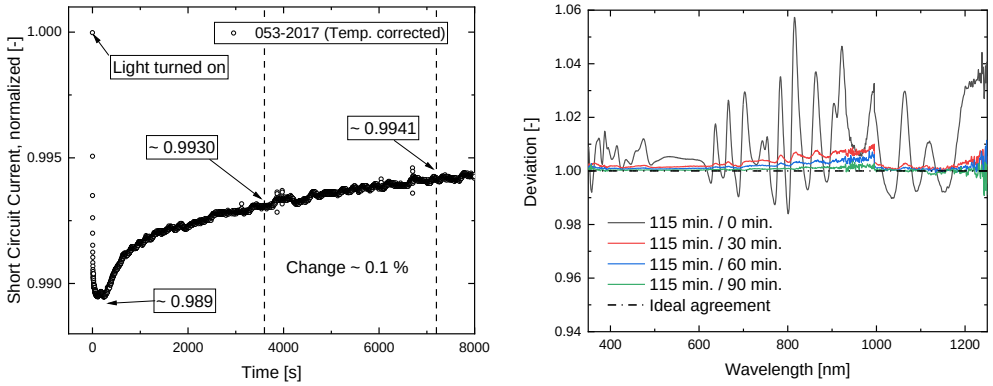


Abbildung 13: Links: Kurzschlussstrom einer breitbandigen Silizium Referenzsolarzelle über Zeit. Die Änderung des Kurzschlussstroms der temperaturstabilen Referenzsolarzelle wird als Maß für die Intensität des Lichtfelds genutzt. Rechts: Vergleich von Simulator-Spektren die zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Einschalten des Modul-Sonnensimulators gemessen wurden. Dargestellt werden die Abweichungen der jeweiligen Spektren zu einem nach 115 min. gemessenen Spektrum. Die Einstellungen aller LED-Kanäle wurden im Verlauf der Messreihe konstant gehalten.

In der linken Grafik in Abbildung 13 ist der Kurzschlussstrom der Referenzsolarzelle über einen Zeitraum von etwa zwei Stunden aufgetragen. Nach dem Einschalten des Lichtfeldes ist eine deutliche Abnahme des Kurzschlussstroms zu erkennen. Dieses Verhalten kann über den plötzlichen Temperaturanstieg im System nach dem Anschalten des Lichtfelds erklärt werden und deckt sich vollständig mit den Beobachtungen und Untersuchungen, die im Rahmen dieses Projektes am LED-Zell Sonnensimulator durchgeführt wurden. Nachdem nach ca. 4 min. ein Minimum erreicht wurde, steigt der Kurzschlussstrom und somit die Intensität des Lichtfeldes kontinuierlich an. Im weiteren Verlauf der Messung nimmt der Intensitätsanstieg zunehmend ab, sodass zwischen den nach einer (3600 s) und nach zwei Stunden (7200 s) gemessenen Kurzschlussströmen nur noch eine Abweichung von ca. 0.1 % erkennbar ist. Die im Verlauf sichtbaren wellenförmigen Schwankungen des Kurzschlussstroms lassen sich über eine leichte Hysterese der Kühlwassertemperatur aufgrund der Nach-Reglung des Kühlsystems erklären.
In der rechten Grafik in Abbildung 13 sind die Abweichungen der zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Anschalten des Sonnensimulators gemessenen Spektren im Vergleich zu einem nach 115 min. gemessenen Spektrum gegenüber der Wellenlänge des Lichts auftragen. Während Abweichungen von bis zu 6 % zwischen dem direkt nach dem Einschalten der Lichtquelle gemessenen Spektrum (0 min.) und dem zuletzt gemessenen Spektrum (115 min.) sichtbar sind, wird anhand der weiteren Vergleiche deutlich, dass sich auch die Form des Spektrums zunehmend stabilisiert. Nach 30 min. wurden keine Abweichungen über 1 % mehr gemessen und nach 60 min liegen sich Abweichungen über weite Teile des Spektrums unterhalb von 0.5 %. Nach 90 min reduzieren sich die maximal ermittelten Abweichungen auf ca. 0.25 %. Bei einer Wellenlänge 994 nm ist ein Sprung im Verlauf der Abweichungen zu erkennen. Dieser ist auf den Übergang zwischen zwei Sensor-Kassetten des verwendeten Spektralradiometers zurückzuführen und muss für weitere Messungen untersucht werden, verhindert eine Interpretation der dargestellten Daten jedoch nicht. Anhand der dargestellten Untersuchungen wird eine Stabilisierungszeit des Sonnensimulators von 90 min festgelegt, welche so auch in die vorläufige Kalibrierprozedur eingeht.

Ermittlung der Simulator Spektren zur Berechnung angepasster Spektraleinstellungen

Für die Ermittlung der Einzelspektren jedes LED-Kanals wird auf das am LED-Zell-Simulator entwickelte und als differentielle Messmethode vorgestellte Vorgehen zurückgegriffen. Hierfür wird, nach der im vorherigen Abschnitt betrachteten Stabilisierung des Lichtfeldes, die Intensität jedes einzelnen LED-Kanals nacheinander innerhalb eines Basisspektrums variiert und das Gesamtspektrum mit Hilfe eines kalibrierten Spektralradiometers gemessen. Um absolute Spektren zu erhalten, wird bei jeder spektralen Einstellung zusätzlich der Strom einer temperaturstabilisierten breitbandigen Silizium Referenzsolarzelle gemessen. Das für diese Messprozedur verwendete Basisspektrum stellt eine erste Annäherung der einzelnen LED-Kanäle an das AM1.5g Referenzspektrum da. Damit kann sichergestellt werden, dass die Spektren der einzelnen LEDs bei thermischen Bedingungen eingemessen werden, die den vorherrschenden Bedingungen bei

beispielsweise der Kalibrierung von Tandem-Modulen möglichst gut entsprechen. Somit kann die Unsicherheit in der Spektraleinstellung und folglich auch die allgemeine Messunsicherheit für die Kalibrierung von Tandem-Solarzellmodulen mit dem untersuchten System reduziert werden. In Abbildung 14 sind die Einzelspektren aller aktuelle vorhandenen LED-Typen bei einer Aussteuerung die in Summe dem verwendeten AM1.5g nahen Basisspektrum entspricht dargestellt.

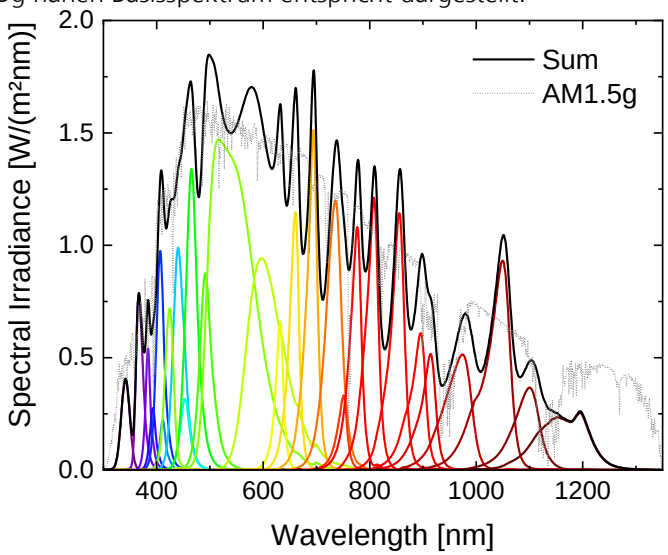


Abbildung 14: Spektren der einzelnen LEDs des LED-Modul Sonnensimulators. Die gezeigten Spektren wurden mit Hilfe eines differentiellen Messverfahrens innerhalb eines Basisspektrums gemessenen und zeigen somit die Emissionsspektren der einzelnen LEDs bei realistischen thermischen Bedingungen. Die Summe aller LEDs (schwarze Linie) ergibt das verwendete Basisspektrum, welches für die Ermittlung der Einzelspektren verwendet wurde. Im Hintergrund ist das AM1.5g Referenzspektrum als gepunktete Linie grau dargestellt.

Bestimmung der integralen und spektralen Beleuchtungshomogenität des Modul Sonnensimulators

Die spektrale und integrale Beleuchtungshomogenität des Modul Sonnen-Simulators wurde im Zuge der Inbetriebnahme am Fraunhofer ISE gemessen. Für die Messung wurde eine verkapselte c-Si Referenzsolarzelle mit einer Fläche von ca. 239 cm² verwendet. Während der Messung wurde diese Zelle mit Hilfe einer Haltvorrichtungen an verschiedenen Positionen fixiert, um damit das gesamte Lichtfeld (2.2 m x 1.3 m) abzudecken. Homogenitätsmessungen wurden bei verschiedenen Einstrahlungsintensitäten sowie im Blitz- und Dauerlichtbetrieb durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die verwendete Referenzsolarzelle bei einer gleichbleibend stabilen Temperatur gehalten wurde, um Einflüsse der Zelltemperatur auf die Messergebnisse auszuschließen. In Abbildung 15 sind die Ergebnisse der Homogenitätsmessung nach 3h Dauerlicht bei einer Intensität von einer Sonne beispielhaft dargestellt. Die Ergebnisse der bei verschiedenen Intensitäten im Blitzbetrieb durchgeführten Messungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Messergebnisse [Isc in A]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	7.514	7.479	7.472	7.486	7.478	7.470	7.472	7.479	7.485	7.501	7.511	7.501	7.517	7.561
B	7.505	7.474	7.476	7.479	7.463	7.459	7.471	7.483	7.482	7.491	7.510	7.505	7.513	7.548
C	7.490	7.472	7.479	7.466	7.454	7.455	7.468	7.473	7.468	7.485	7.499	7.513	7.513	7.533
D	7.485	7.475	7.484	7.466	7.455	7.471	7.493	7.503	7.484	7.478	7.491	7.511	7.513	7.524
E	7.466	7.462	7.475	7.458	7.450	7.479	7.523	7.538	7.498	7.469	7.474	7.499	7.491	7.508
F	7.479	7.471	7.481	7.462	7.462	7.485	7.510	7.497	7.485	7.466	7.490	7.511	7.507	7.517
G	7.486	7.479	7.484	7.472	7.465	7.457	7.492	7.497	7.469	7.474	7.488	7.509	7.509	7.528
H	7.490	7.468	7.476	7.475	7.461	7.464	7.466	7.468	7.466	7.458	7.485	7.497	7.498	7.527
I	7.489	7.448	7.437	7.454	7.453	7.450	7.443	7.442	7.452	7.462	7.472	7.454	7.475	7.517

1300 mm

2200 mm

Inhomogenität	
Maximum	7.561
Minimum	7.450
Ergebnis	0.739%

Abbildung 15: Ergebnisse der Inhomogenitätsmessung des LED-Modul-Sonnen-Simulators im Dauerlichtbetrieb bei einer Einstrahlungsintensität von einer Sonne. Die dargestellte Messung wurde im Zuge der Abnahme des Modul Sonnen-Simulators am Fraunhofer ISE durchgeführt und dem von WAVELABS bereitgestellten Abnahme-Protokoll „Site Acceptance Test“ entnommen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Inhomogenitätsmessungen im Blitzbetrieb bei verschiedenen Intensitäten.

Intensität [Sonnen]	Spektrum	Beleuchtungsdauer [s]	Inhomogenität [%]
1.3	AM1.5g	0.3	0.75%
1	AM1.5g	0.3	0.81%
0.5	AM1.5g	0.3	0.74%
0.1	AM1.5g	0.3	0.81%

Zusätzlich zu den mit einem vollen, AM1.5g nahen Spektrum durchgeführten Inhomogenitätsmessungen wurden Messungen durchgeführt bei denen jeweils nur der sichtbare (LED1 bis LED13) bzw. der Infrarotanteil (LED14 bis LED26) des Spektrums verwendet wurde. Die Trennung der beiden Bereiche wurde dabei so gewählt, dass die jeweils resultierenden Spektren im Wesentlichen die Ober- bzw. die Unterzelle einer gängigen Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle anregen. Anhand dieser Messungen soll sichergestellt werden, dass auch in den für die jeweilige Teilzelle relevanten Teilbereichen des Spektrums eine ausreichend gute Homogenität erreicht wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Inhomogenitätsmessungen an Teilspektren. Hierfür wurde ein AM1.5g nahes Spektrum so aufgeteilt, dass der „blaue" Anteil des Spektrums (VIS) im Wesentlichen eine gängige Perowskit Oberzelle und der „rote" Anteil des Spektrums (IR) im Wesentlichen eine Silizium Unterzelle im Verbund einer Perowskit auf Silizium Tandemsolarzelle anregt.

Intensität [Sonnen]	Spektrum	Beleuchtungsdauer [s]	Inhomogenität [%]
1	AM1.5g - VIS	0.3	0.86%
1	AM1.5g - IR	0.3	0.73%

Zudem wurden von WAVELABS vor Auslieferung des Gerätes Inhomogenitätsmessungen der Einzelkanäle durchgeführt. Dabei ergab sich eine ebenfalls sehr gute Inhomogenität, die im Mittel ebenfalls unter 1% liegt. Die maximale Inhomogenität wurde dabei für den LED-Kanal 5 mit einer Inhomogenität von 1.93% gemessen.
Die so bestimmten Inhomogenitäten erfüllen die spezifizierten Anforderungen an das Gerät und dienen weiterhin als Eingangsgrößen für die Bestimmung der Messunsicherheit für die Messung von Tandemmodulen am LED Modul Sonnen-Simulator.

AP1.2: Erweiterung des IR-Spektrums

Die Arbeiten zu AP 1.2 wurden vom Projektpartner WAVELABS durchgeführt – das Fraunhofer ISE war hier in erster Linie beratend tätig. Die IR-Erweiterung besteht aus LEDs bei den Wellenlängen 1300 nm und 1540 nm und dient zur Vermessung von Solarzellen mit Absorption im Infrarot, insbesondere III-V Solarzellen mit aktivem Germanium, insbesondere auch z.B. Solarmodule aus dem Forschungsvorhaben Vorfahrt (FK: 03EE1142). Die IR-Erweiterung wurde von WAVELABS erfolgreich am Messplatz integriert von Fraunhofer ISE initial charakterisiert (siehe Abbildung 16).

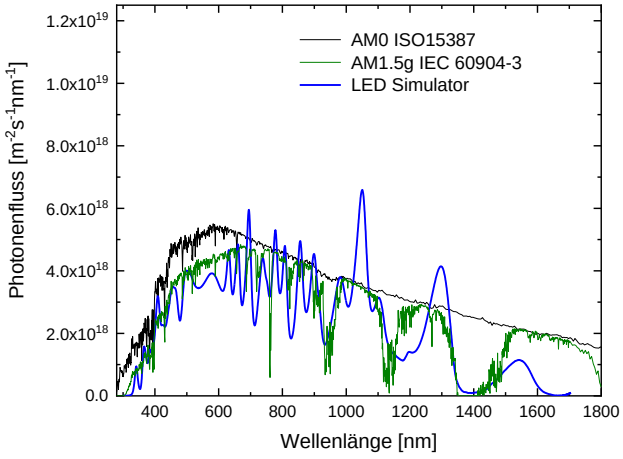


Abbildung 16: Spektrale Verteilung des LED Modulsimulators in der Messebene Es wurde für die LEDs bis 1200 nm ein AM1.5g ähnliches Spektrum eingestellt und die beiden IR Kanäle auf 100 % Leistung gestellt. Gezeigt ist auf der y-Achse der Photonenfluss, da dieser für die Stromgeneration relevant ist.

Wie aus **Abbildung 16** ersichtlich wird, stehen im IR oberhalb von 1200 nm genügend Photonen im Vergleich zu dem Referenzspektrum AM1.5g zur Verfügung. Im Vergleich zum für Weltraumanwendungen relevanten Spektrum AM0 sind jedoch nicht ausreichend Photonen verfügbar – hier sind die Projektpartner in über das hier beschriebene Projekt hinausgehendendem Kontakt, inwiefern durch zukünftige Änderungen u.U. auch Messungen unter AM0 Bedingungen ermöglicht werden können.

AP1.5: Entwicklung eines Messtischs für die Kalibrierung von Tandemzellen

In diesem Arbeitspaket wurde ein Messtisch zur Messung der Strom-Spannungs-Charakteristik von Tandemsolarzellen im Strahlengang des Modulsimulators entwickelt. So können durch Verwendung der gleichen Beleuchtungsquelle Synergien und eine besonders gute spektrale und Leistungsverteilungs-Homogenität erreicht werden. Der Messtisch ist inklusive einer Peltier-geregelten Temperatursteuerung sowie einer thermischen und elektrischen Kontaktierung für Solarzellen ausgeführt und bis mind. 6" ausgelegt. Dieser Messtisch wurde desweiteren mit einer fahrbaren Unterkonstruktion mobilisiert, so dass er problemlos ins Lichtfeld gefahren werden kann. Eine Frontplatte mit umfassenden Möglichkeiten die unterschiedlichen Kontaktierungslösungen elektrisch zu verbinden, die pneumatische Kontaktmechnik zu bedienen und die Vakuumkanäle zu schalten.
Ergänzt wurde der Messtisch mit einem schallgedämmten Vakuum Pumpenschrank, welcher zwei pumpen unterschiedlicher Leistung enthält, um das Arbeiten mit Adaptermessblöcken zu ermöglichen. Dies trägt den aktuell notwendigen Anforderungen an die rückseitige Kontaktierung aktueller (meist bifazialer) Solarzellen Rechnung.
Als wesentliche Komponenten hat sich die dazu zusammengestellte Messtechnik erwiesen. Ein Schaltschrank mit 4 Digitalmultimetern, einer Relaisschaltbox, einem bipolaren 4-quadranten Messverstärker und einem Messrechner zur Steuerung ermöglicht es die Software des Solarzellenmesslabors mit den in AP1.6 entwickelten Features einzusetzen. Die modulare Bauweise erlaubt die (rückführbare) Kalibrierung der einzelnen Elemente. Der Messverstärker ist austauschbar mit Geräten unterschiedlicher Leistung, Strom und Spannungsbereichen. Dies ermöglicht es auch Solarmodule zu messen.

AP1.6: Erweiterung der ISE-Software an Kalibrieranforderungen

Da die Software im Kalibrierlabor für die Kalibrierung von Solarzellen mit einem pn-Übergang optimiert war, mussten zu Beginn des Projektes viele Berechnungen und Einstellungen in einer separaten Excel Tabelle vor und während der Kalibrierung durchgeführt und jeweils in die Software bzw die einzulesenden Parameterfiles der Messsoftware übertragen werden.
Um die neue Messhardware für Kalibriermessungen zugänglich zu machen, sind umfangreiche Anpassungen der vorhandenen Software am ISE zur Zell- und Modulmessung unter Dauerlicht durchgeführt worden. Hierfür musste die Berechnung der Simulatoreinstellungen für Tandemzellen überarbeitet und die Messsoftware angepasst werden. Die Umsetzung des Monitorprinzips zur Überwachung und Korrektur der Strahlungsschwankungen wurde für Tandemzellen angepasst und entsprechend in der Software umgesetzt.
Neben der Messung nach dem Dauerlichtverfahren am Punkt maximaler Zellleistung ("Steady State Pmpp") wurde ein sich dem Punkt maximaler Zellleistung asymptotisch annäherndes Messverfahren ("Asymptotic Pmax") etabliert.
Typischerweise werden Messwerte als stabilisiert angesehen, deren Änderungsrate dabei unterhalb von 0.1 %/min liegen. Es zeigt sich jedoch, dass manche Solarzellen ihr Maximum nur erreichen, wenn dieser Wert noch deutlich niedriger liegt. Andere meta-stabile Zellen erreichen höhere Pmpp-Werte, wenn die Änderungsrate weniger streng gesetzt wird. Die „asymptotic Pmax" Methode kann aufgrund dieser Randbedingungen zu deutlich längeren Messdauern führen. Der Vorteil dieser Methode ist jedoch die einfachere Automatisierung, die Herausforderung der Methode das Definieren passender einheitlicher Randparameter.
Im Vergleich zeigt sich eine Abhängigkeit der maximalen ermittelten Leistung von der benutzten Methode und der verwendeten Randparameter. Das unterschiedliche meta-stabile Verhalten der elektrischen Zellparameter zeigt dabei die Schwierigkeit einheitlicher Programmparameter, die für alle Perowskit-basierte Tandemsolarzellen verwendet werden können.
Aufgrund der starken Variation der Zelldynamik bei unterschiedlichen Zellen, ist ein automatisiertes tracking (automatisches MppT) schwierig. Dagegen erlaubt die dynamic IV Methode eine bessere Automatisierung. Zur Weiterentwicklung dieser Methode wurde diese mit mehreren einstellbaren Parametern implementiert. Dabei sind auch beide Messrichtungen (steigende oder sinkende Spannung) möglich.

AP2.2: Zellkalibrierung

In diesem Arbeitspaket wurde sowohl die Messung der Spektralen Empfindlichkeit von 6“ Tandemsolarzellen verbessert als auch die Bestimmung der Leistungsparameter unter dem 2-Lichtquellen Wacom Sonnensimulator.

Messung der Spektralen Empfindlichkeit von 6“ Tandemsolarzellen

Bias-Beleuchtung für Tandemmessungen am DSR-Messplatz

Verschiedene Tests und die Implementierung verschiedener Bias-Bestrahlungen am SR-Messplatz zur Messung der spektralen Empfindlichkeit ermöglichten den Messplatz für großflächiger (6'') Tandemsolarzellen zu erweitern.
Für die höchstpräzise Messung der spektralen Empfindlichkeit von Tandem-Solarzellen wurde das neue Konzept zur Bias-Beleuchtung unterschiedlicher spektraler Bereiche für den SR-Messplatz weiterentwickelt. Es wurde mittels 467 nm und IR (860 nm) LED-Balken eine sehr gute Homogenität für 6“-große Solarzellen realisiert. Diese wurden konstruktiv in den Messaufbau integriert. Das in der Messebene eintreffende Licht wurde quantitativ in seiner Verteilung auf Inhomogenitäten untersucht.
Die durchgeführte Messung der Homogenität der Beleuchtung in der Messebene zeigte sich wie in Abbildung 17: und Abbildung 18: dargestellt.

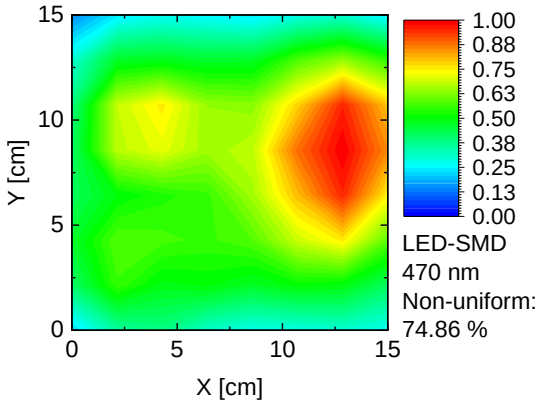


Abbildung 17: Homogenitätsmessung der alten 470 nm LED-Biasbeleuchtung am LDSR-Messplatz

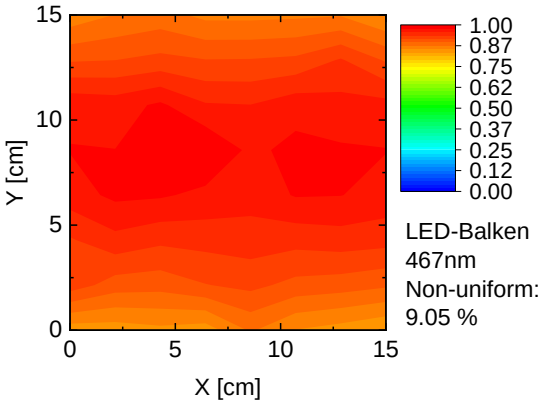


Abbildung 18: Homogenitätsmessung der neuen 467 nm LED-Biasbeleuchtung am LDSR-Messplatz

Während die alte blaue (auf gefilterte Halogenlampen basierende) Biasbeleuchtung eine Inhomogenität von 74.9 % zeigte, reduzierte sich diese für die neuen LED-Balkenbeleuchtung zu nun nur noch 9.1 % Inhomogenität.

Der Vergleich der vorher (für kleine Zellen) genutzten Halogenlampen (Schottfilter RG715) und der für die großen 6“-Zellen neu installierten Infrarot LED-Balken (860 nm) ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 als Kontourplots dargestellt.

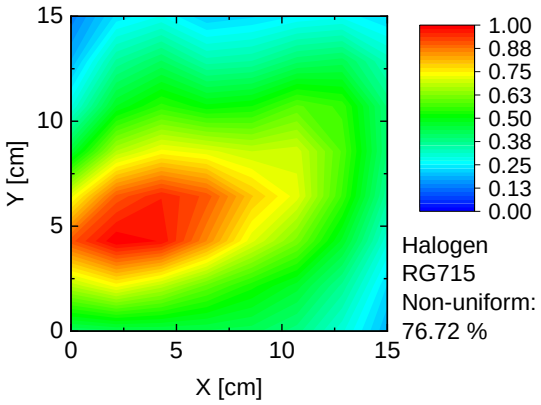


Abbildung 19: Homogenitätsmessung der alten mit RG715 gefilterten Halogen-Biasbeleuchtung

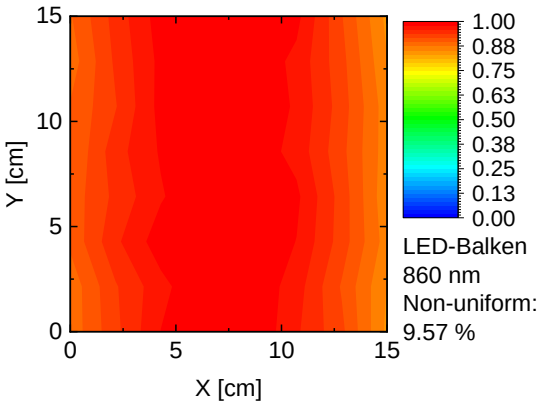


Abbildung 20:Homogenitätsmessung der neuen 860 nm LED-Biasbeleuchtung am LDSR-Messplatz

Die beiden IR-LED Balken verbessern die Homogenität der Biasbeleuchtung am SR Messplatz deutlich. Im Vergleich zur für kleinere Tandemzellen vorher eingesetzte Halogenbeleuchtung ergibt sich für die große Fläche eine Reduzierung der Inhomogenität von 76.72 % auf nur noch 9.57 %.
Damit konnte der in den letzten Jahren entwickelte und verbesserte Gittermonochromator SR Messplatz für 6“ Tandemsolarzellen erfolgreich erweitert werden.

Bestimmung der Leistungsparameter mit dem Wacom Sonnensimulator

Spektrale Charakterisierung des Wacom-Sonnensimulators

Der am Fraunhofer ISE bereits vorhandene 2-Lichtquellen Sonnensimulator (Wacom) wurde im Rahmen des Projektes zur Analyse großer Tandemsolarzellen eingerichtet.
Für die Kalibrierung von Tandemsolarzellen ist es im Gegensatz zu Einfachsolarzellen notwendig, die spektrale Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators so justieren zu können, dass jede Teilzelle den gleichen Strom wie unter Referenzbedingungen (AM1.5g) generiert. Dies ist grundsätzlich am Wacom-Simulator mit zwei Lichtquellen möglich.
Für die korrekte Einstellung des Sonnensimulators wird eine „Spektralkorrektur“ nach der in der [8] vorgestellten und etablierten Methode durchgeführt. Der Ansatz erfordert das separate Kalibrieren der spektralen Bestrahlungsstärke der beiden Lichtquellen (Xenon- und Halogen-Lampen). Aus den einzeln bei verschiedenen Bestrahlungsstärke gemessenen Verläufen lassen sich dann rechnerisch im Superpositionsprinzip die resultierenden Sonnensimulator-Spektren berechnen. In Abbildung 21 sind die Messungen bei einer Bestrahlungsstärke dargestellt.

[8] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A. W. Bett and W. Warta (2002): Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells. In: *Progress in Photovoltaics, Vol.10 (2002), No.4*, N-17060. DOI: 10.1002/pip.407.

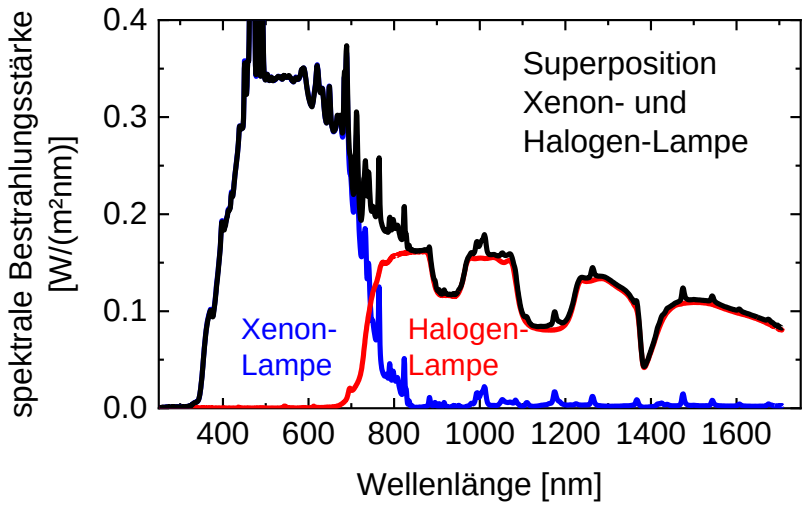


Abbildung 21: Spektralradiometrische Messung am Wacom Sonnensimulator. Die Xenon (blaue Linie) und Halogenlichtquellen (rote Linie) werden über einen zentraler dichroitischen Filter mit Filterkante bei ~744 nm in separate spektrale Bereiche getrennt, die in der Messebene in dann Superposition (schwarze Linie) vorliegen.

Eine Messung mit Referenzsolarzellen zeigte jedoch Unterschiede im Strom im Promillebereich, wenn diese von beiden Lampen gleichzeitig beleuchtet wurden im Vergleich zur Summe der nur von einzelnen Lampen beleuchteten Messung.
Weil das Prinzip der Superposition essenziell für die oben genannte Spektralkorrektur-Methode ist, müssen hier auch kleinste Abweichungen vermieden werden, um eine Erhöhung des Messunsicherheitsbudgets in der Kalibrierung zu vermeiden.

Zur Analyse möglicher Ursachen dieser Abweichung wurde u.a. die sich ändernde Temperatur des dichroitischen Spiegels beim Abschalten der einzelnen Lampen untersucht. Dieser stellt ein zentrales optisches Element des Sonnensimulators dar und besitzt eine eigene Temperaturabhängigkeit. Seine spektralen Eigenschaften beeinflussen maßgeblich die spektrale Bestrahlungsstärke, die sich in der der Messebene durch Superposition beider Einzelspektren ergibt. Dieses Filterelement sorgt für die klare Trennung (~744 nm) der spektralen Bereiche von Xenon- und Halogenlichtquelle (s. obere Abbildung). Eine Änderung der Temperatur wird daher auch zu einer veränderten spektralen Bestrahlungsstärke in der Kalibrierung führen.

Es wurden daher detaillierte Temperaturmessungen im Sonnensimulator mittels and verschiedenen Positionen angebrachter PT-100 Sensoren durchgeführt. Auffällig waren tatsächlich die Messwerte am dichroitischen Spiegel:
Abbildung 22 zeigt den zeitabhängigen Verlauf der Temperatur des dichroitischen Spiegels. Zunächst wurde der Simulator wie üblich eingeschaltet und eine Aufwärmzeit abgewartet. Im stabilen Zustand wurde nach ~4 h die Xenon Lampe und nach einer weiteren Stunde die Halogenlampe ausgeschaltet.

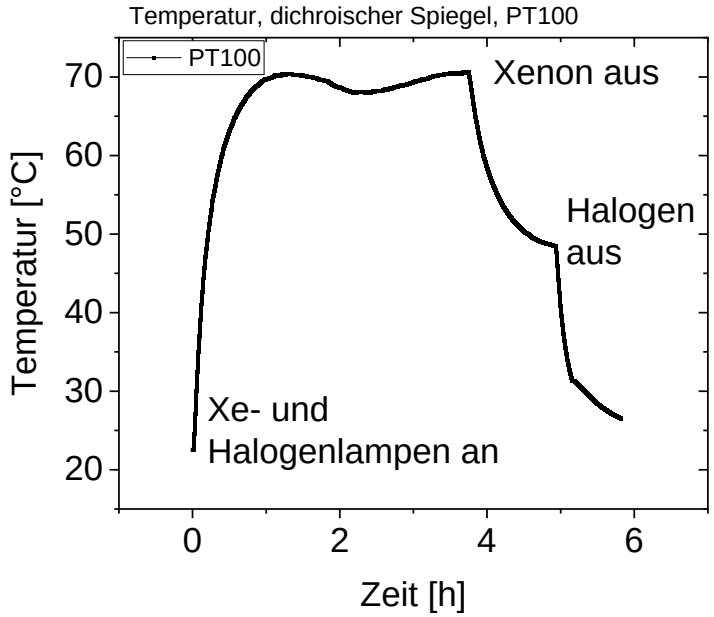


Abbildung 22: Temperaturmessung am zentralen dichroitischen Filter, der die spektralen Anteile von Xenon und Halogen Lampen am Wacom-Sonnensimulator filtert. Zunächst wurden beide Lichtquellen aktiviert und nach Erreichen der Arbeitsbedingungen erst nur die Xenon-Lampe und dann auch die Halogenlampen abgeschaltet.

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, bewirkte das Ausschalten einer der beiden Lichtquelle ein Abfallen der Temperatur am dichroitischen Spiegel von ~20 K. Dieser deutliche Temperaturunterschied sollte daher auf seine Relevanz für die Kalibrierung untersucht werden.
Daher wurde die oben beschriebene Messung wiederholt, um die Temperaturänderungen mit der Strommessung von Monitorzellen in der Messebene als auch mit spektralradiometrischen Messungen zu korrelieren. Abbildung 23 zeigt den Verlauf der gemessenen Ströme der beiden Monitorzellen über der Zeit. In der oberen Grafik sind die Temperaturen des dichroitischen Spiegels aufgetragen.

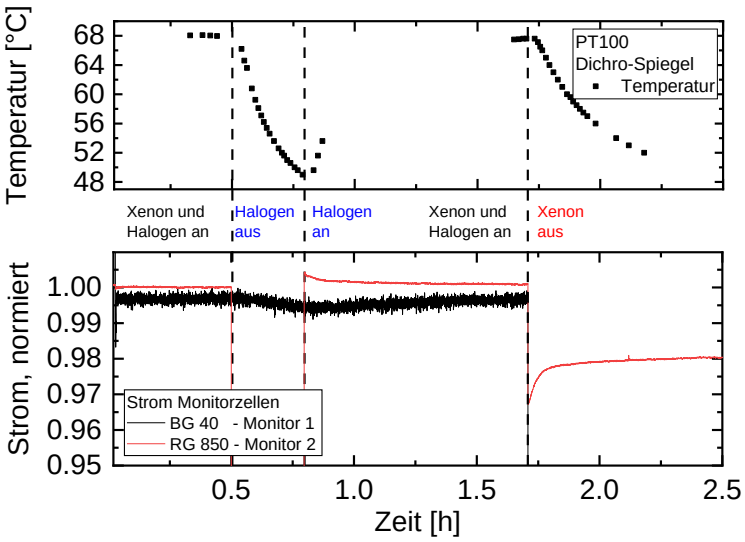


Abbildung 23: Untersuchung des Temperatureinflusses des dichroitischen Spiegels auf die Stabilität des Monitor-Stroms. Oben: Temperaturmessung am zentralen dichroitischen Filter. Unten: Strom der beiden Monitorzellen des Wacom über Zeit. Zunächst wurden beide Lichtquellen aktiviert und nach Erreichen der Arbeitsbedingungen erst nur die Xenon-Lampe und dann auch die Halogenlampen abgeschaltet.

Es ist zu erkennen, wie der Strom der BG40-gefilterten Monitorzelle sich nur wenig beim Ausschalten der Lampen ändert. Die RG850-gefilterte Monitorzelle zeigt jedoch eine auffällige Änderung des Stroms.
Die Monitorzellen selbst werden konstant über eine Peltierregelung auf einem Temperaturniveau gehalten. Die über den Zellen angeordneten spektralen Absorptionsfilter (BG40, bzw. RG850) sind jedoch nur indirekt an diese thermisch angekoppelt.
Die Vermutung liegt nahe, dass das Abschalten der Xenonlampe zu einer Abkühlung des RG850 Filters führte und die Monitorzelle – aufgrund des Temperaturkoeffizienten des Filters – zu einem sich ändernden Strom in der Monitorzelle führte.
Um dies zu beheben ist es geplant eine neue Monitoreinheit zu konstruieren, bei der die thermische Anbindung des Filters verbessert wird. Zudem wurde als Sofortmaßnahme eine Lösung gefunden, bei der nun ein zusätzlicher Filter (RG645) oberhalb und thermisch isoliert vom RG850 eingefügt wurde. Dadurch wird ein Großteil der Strahlung der Xenon-Lampe vom obersten Absorptionsfilter aufgenommen. Im unteren RG850-Filter werden durch die geringere Strahlungsabsorption auch geringere thermische Effekte erwartet. Eine Evaluierung wurde zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht durchgeführt.

Um den Einfluss der Temperatur des dichroitischen Spiegels wellenlängenaufgelöst quantifizieren zu können, wurde aus den ebenso aufgenommenen spektralradiometrischen Messungen die relativen Temperaturkoeffizienten des spektralen Bestrahlungsstärkeverlaufs bestimmt.
In Abbildung 24 sind links die Messungen nach Ausschalten der Halogenlampe aufgetragen und rechts die nach Ausschalten der Xenon-Lampe. Die unteren beiden Grafiken zeigen die daraus berechneten Temperaturkoeffizienten.

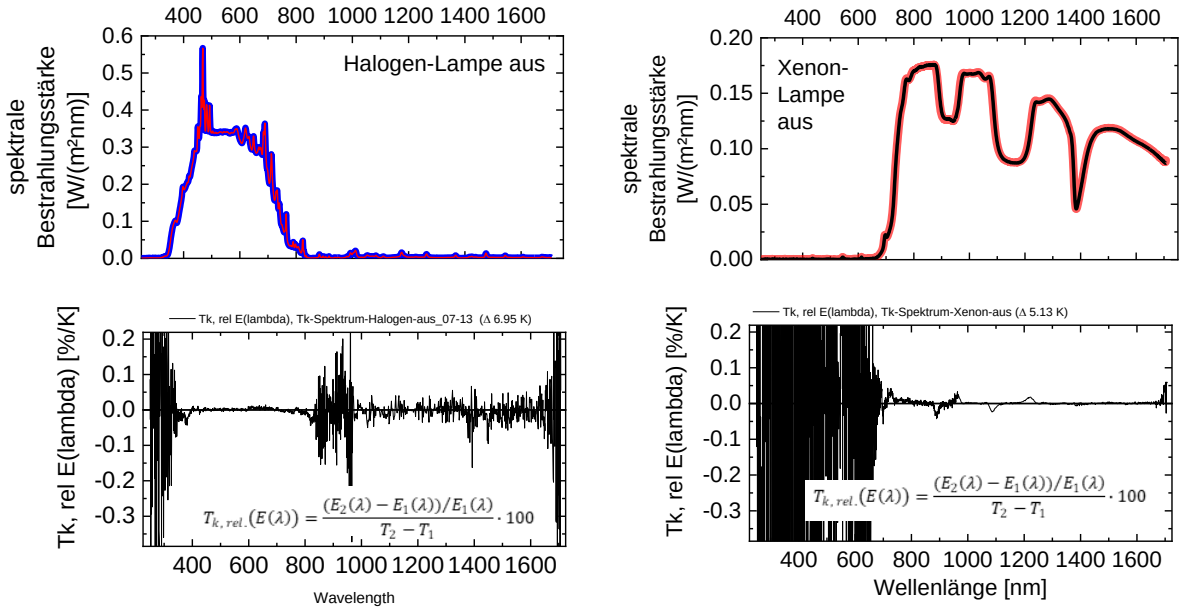


Abbildung 24: Untersuchung des Temperatureinflusses des dichroitischen Spiegels auf die Stabilität des spektralen Bestrahlungsstärke in der Messebene. Messung mit dem Spektralradiometer. Aus den bei verschiedenen Zeitpunkten der Abkühlung des dichroitischen Spiegels (s.o.) kontinuierlich durchgeführten Messungen wurde der relative Temperaturkoeffizient des Simulatorspektrums ermittelt. Linke Grafiken: Spektralmessungen nachdem die Halogenlampen ausgeschaltet wurden. Rechte Grafiken: Nach Ausschalten der Xenon-Lampe.

Wellenlängenaufgelöst sind die beobachteten Temperaturkoeffizienten in beiden Fällen kleiner als 0.05 %/K (Xe: 400…800 nm, Halogen: 750…1600 nm). Dies erscheint zunächst relativ gering. Da jedoch wie oben berichtet Temperaturdeltas von ~20°C auftreten können, ist es möglich, dass sich daraus signifikante Änderungen im gemessenen Strom der Referenzsolarzellen ergeben.

Die Untersuchung der Auswirkungen auf die Kalibrierung wird daher auch anhand der rückführbar kalibrierten Solarzellen durchgeführt werden müssen.

Um den Sonnensimulator für Tandemzellen spektral einzustellen wird die Methode mittels einem am Fraunhofer ISE für III-V-Mehrfachzellen entwickelten und in Meusel et.al. 9 beschriebenen Gleichungssystems verwendet. Dafür wird die spektrale Bestrahlungsstärke der einzelnen Lichtquellen separat voneinander bestimmt, um in Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit der Teilzellen und des AM1.5 Referenzspektrums daraus die einzustellenden Ströme der Referenzsolarzellen zu berechnen.
Wie im letzten Projektbericht erläutert, sind jedoch erkennbare Abweichungen der Spektren der Einzellampen aufgefallen, wenn die jeweils anderen Lichtquellen ausgeschaltet wurden, um diese mit dem Spektralradiometer separat zu charakterisieren. Im zeitlichen Verlauf zeigte sich dabei, dass die gemessene Temperatur am zentralen optischen Element, einem dichroitischen Spiegel, von ca. 70°C auf ca. 50°C abkühlt.
Das bedeutet, dass das in der Messebene vorliegende Licht, welches als Superposition der beiden Lichtquellen gebildet wird, in seiner spektralen Bestrahlungsstärke unterschiedlich ist im Vergleich zur berechneten Addition der gemessenen Einzelspektren. Die daraus resultierende Abweichung ist in Abbildung 25 quantitativ dargestellt.
Für die Berechnung wurden die gemessenen Spektren im zeitlichen Verlauf der Abkühlung des dichroitischen Spiegels auf die gefilterten Monitorzellen des Sonnensimulators angewendet. In den oberen beiden Grafiken sind die spektralen Bestrahlungsstärken der beiden Lichtquellen und die Quanteneffizienz der beiden Monitorzellen über Wellenlänge aufgetragen (links: Xenon-Lampe und BG-gefilterte Monitorzelle, rechts: Halogenlampen und RG-gefilterte Monitorzelle). Darunter sind in den beiden Grafiken die berechneten Ströme der jeweiligen Monitorzelle unter den gemessenen Lampenspektren über Temperatur des Spiegels aufgetragen.
Es ist zu erkennen, wie sich die Ströme im Mittel um ca. 0.2 % verändern (erhöhen im Fall BG gefilterten und erniedrigen im Fall der RG gefilterten Monitorzelle).

[9] Meusel, M., Adelhelm, R., Dimroth, F., Bett, A. W. u. Warta, W.: Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 10 (2002) 4, S. 243–255

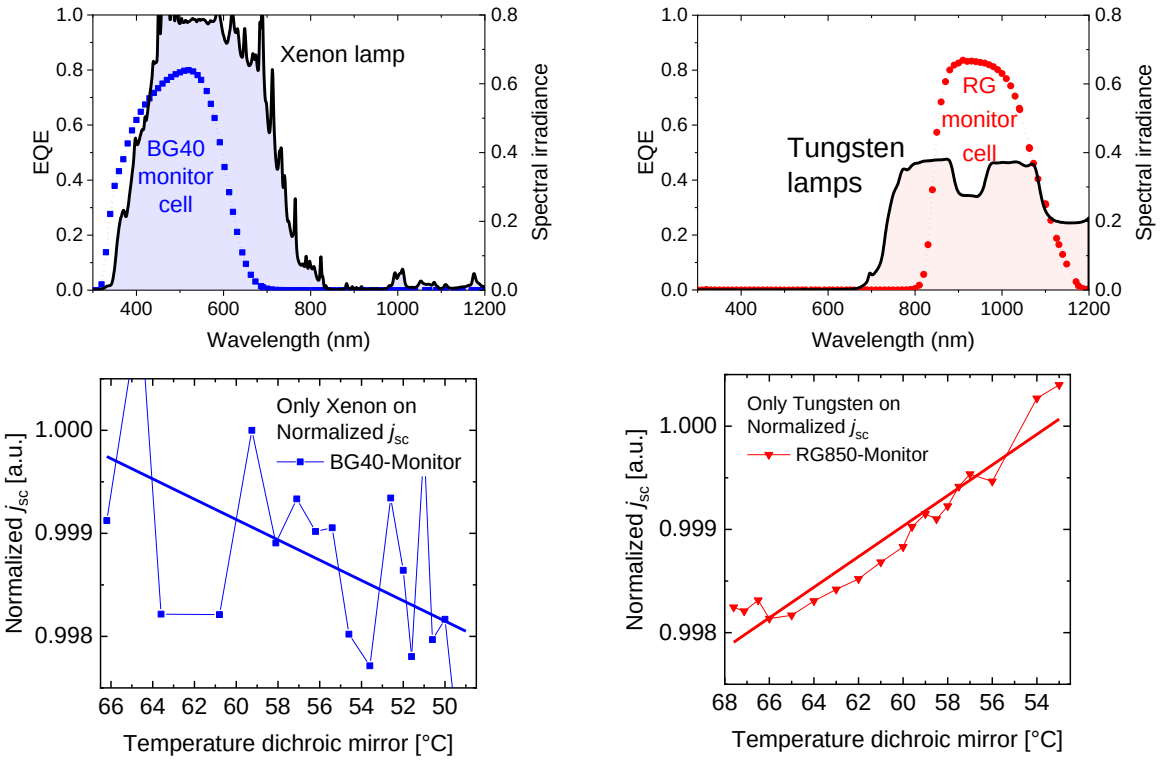


Abbildung 25: Obere beide Grafiken: gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe (links) bzw. der Halogenlampen (rechts) als Flächendiagramm aufgetragen. Ebenso dort als Punkt-Liniendiagramme aufgetragen sind die externen Quanteneffizienzen der im Sonnensimulator eingesetzten Monitorzellen (links: BG-40 gefiltert, rechts RG850 gefiltert). Darunter sind die berechneten und normierten Ströme der beiden gefilterten Monitorzellen über der Temperatur des dichroitischen Spiegels als Punktliniendiagramm aufgetragen. Eine lineare Anpassung ist jeweils als durchgezogenen Trendlinie eingezeichnet.

Das Ergebnis kann zunächst verwendet werden, um die berechnete Abweichung der Ströme im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Im Ausblick dieses Abschnitts wird außerdem ein weiterer Vorschlag formuliert.

Für die Kalibrierung von 6“ großen Tandemsolarzellen ist neben der variabel justierbaren spektralen Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators wichtig, dass die spektrale Inhomogenität möglichst klein ist. Dazu wurden Messungen mithilfe eines x-y-Messtisches durchgeführt, bei der die Bestrahlungsstärke an jeder angefahrenen Position mit einer Silizium-Solarzelle ermittelt wurde. Aus den Abweichungen wurde die Inhomogenität in der Messebene bestimmt.
Um die Unterschiede für jede Lichtquelle zu ermitteln, wurden separate Analysen für die Xenon-Lampe bzw. die Halogenlampen durchgeführt.
Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 26 als Kontourplots dargestellt.
Durch die vorherige Justage konnten sehr geringe Inhomogenitäten erreicht werden. Für die Xenon-Lampe ergeben sich 1.08 % und für die Halogenlampen 1.15 % auf einer Fläche von 18 cm x 18 cm und einer Auflösung von 2 cm.

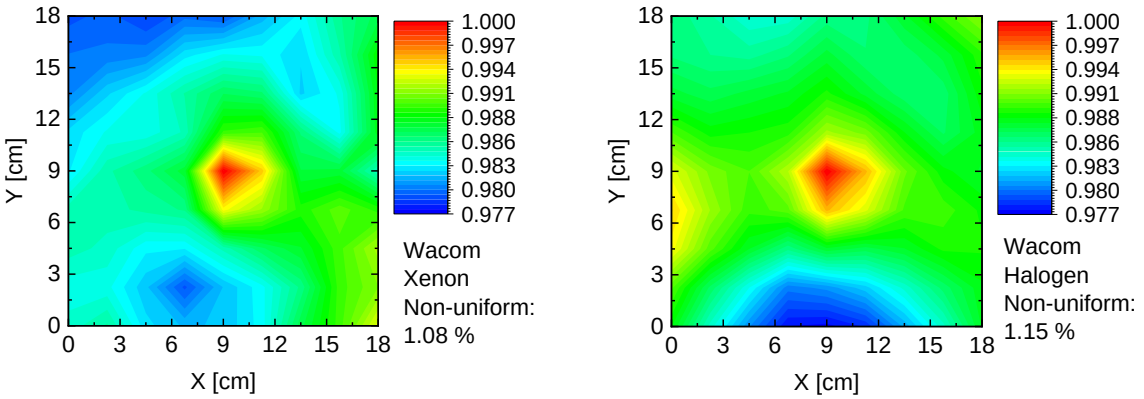


Abbildung 26:Kontourplots der flächigen Inhomogenität der Beleuchtung in der Messebene am Wacom Sonnensimulator. Die Messung wurde mit einer Siliziumsolarzelle auf einem x-y-Tisch durchgeführt. Links: Inhomogenität bei Beleuchtung mit der Xenon, rechts bei beleuchtung mit den Halogenlampen.

Im Anschluss an die Justage der Lampen und der Überprüfung einer ausreichenden Homogenität konnte eine ausführliche Charakterisierung der spektralen Bestrahlungsstärke durchgeführt werden, um einerseits die Perowskit auf Siliziumsolarzellen bei Referenzbedingungen (AM1.5g) andererseits aber auch spektrometrisch bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen analysieren zu können. Für diese spektrometrische Untersuchungen soll die Bestrahlungsstärke sehr variabel mit ±20 % abweichend von AM1.5g einstellbar sein.
Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 27 gezeigt. Die spektrale Bestrahlungsstärke der einzelnen Lichtquellen sind über Wellenlänge als Linienplots aufgetragen. Im Hintergrund ist das AM1.5g Referenzspektrum als grauer Flächenplot gezeigt. Die absolute Bestrahlungsstärke der gemessenen Spektren wurde mittels Referenzsolarzellen kalibriert.

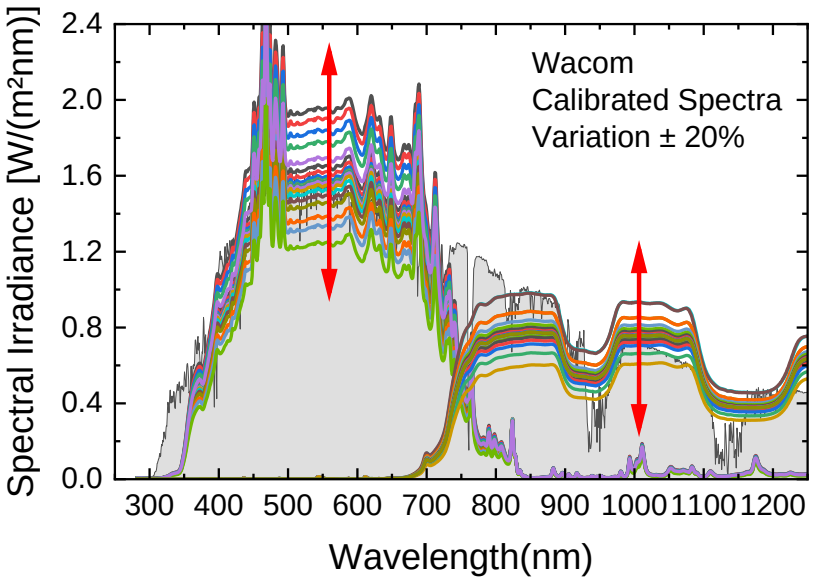


Abbildung 27: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der Einzellampen des Wacom Sonnensimulators als Linienplots über Wellenläng bei Variation der Bestrahlungsstärke um ±20 %. Die Messung wurde mit Referenzsolarzellen kalibriert. Im Hintergrund das tabellierte Referenzspektrum AM1.5g aufgetragen als grauer Flächenplot..

Damit ist der Wacom Sonnensimulator bereit für kalibrierte Messungen von 6“ großen Perowskit/Tandemsolarzellen.
Die Charakterisierung derselben soll wie bereits erwähnt auch mithilfe einer ausführlichen spektrometrischen Untersuchung erfolgen, um Einblicke über das Verhalten der Tandemzelle bei unterschiedlichen Einstrahlungen zu erhalten. Dies ist sinnvoll, um die Strom-Spannungsparameter bei Strombegrenzung durch die Oberzelle bzw. Strombegrenzung durch die Unterzelle zu evaluieren. Daraus lassen sich auch Rückschlüsse über vorhandene Verluste einzelner Teilzellen (z.B. niedriger Parallelwiderstand) ziehen, die ansonsten aus der Tandemkennlinie bei nur einer spektralen Einstellung nicht offensichtlich sind.

Für die beobachtete Ungenauigkeit durch Abkühlung des dichroischen Spiegels in der spektralen Charakterisierung einzelner Lampen soll zudem in den kommenden Monaten nach einer möglichen Verbesserung der Kalibriermethode gesucht werden. Im optimalen Fall sollten die Lampen ohne den beschriebenen Temperatureinfluss charakterisiert werden können.

Definition einer Kalibrierprozedur für Tandemsolarzellen

In Abbildung 28 wurde die definierte Kalibrierprozedur für Tandemsolarzellen als Schaubild zusammengefasst.
Zunächst muss die spektrale Empfindlichkeit aller Teilzellen bestimmt werden. Im Anschluss kann mit dieser Messung und den vorab kalibrierten Spektralradiometermessungen des Sonnensimulators die individuellen Einstellungen für die jeweilige Testzelle berechnet werden.
Die Testzelle wird dann vor der eigentlichen Messung ca. 15 Minuten vorbeleuchtet und in dieser Zeit elektrisch kontaktiert und thermisch auf 25.0°C (±0,1) stabilisiert.
Mit zwei ersten Strom-Spannungskennlinien (Voc nach Isc und Isc nach Voc) wird das elektrische Verhalten vorcharakterisiert.
Im folgenden Schritt wird die meta-stabile Solarzelle über ein Verfahren zur Bestimmung der maximalen Leistung (Pmpp) vermessen (fixed voltage, MppT, asymptotic Pmax). Der ermittelte Pmpp Wert wird zur Kalibrierung verwendet und mit der Flächenmessung zur Bestimmung des Wirkungsgrades genutzt.
Abschließend werden erneut zwei Stromspannungskennlinien in beiden Richtungen gemessen, um daraus den Kurzschlussstrom (Isc) und die Offen-Klemmenspannung (Voc) für die Kalibrierung zu bestimmen.

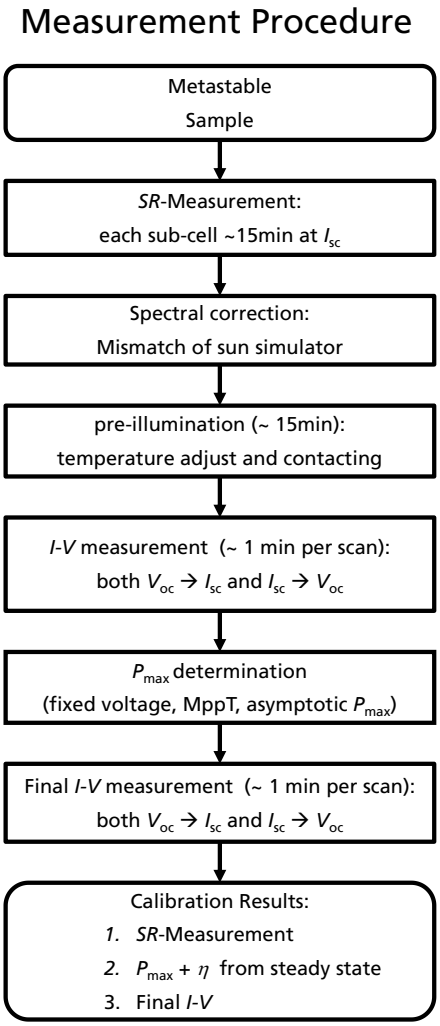


Abbildung 28: Aktuelle Definition der Kalibrierprozedur für Pero-Si-Tandemsolarzellen

AP2.3: Modulkalibrierung

Messvergleich an einem klassischen c-Si Modul

Um die prinzipielle Funktionalität des Gesamtsystems, bestehend aus LED-Lichtquelle, IV-Elektronik sowie der Systeminternen Sensorik zu überprüfen wurden zunächst Vergleichsmessungen mit etablierten Messsystemen des CalLabPV Modules durchgeführt. Die an einem klassischen c-Si Modul durchgeführten Messungen lieferten dabei relativ gute Übereinstimmungen. Die ermittelten Abweichungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Abweichungen zwischen den an einem klassischen c-Si Modul durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen dem neu aufgebauten LED Modul Sonnen-Simulator und einem im CalLabPV Modules etablierten Messsystem.

	I_{SC}	V_{OC}	FF	P_{MPP}
dev Fl3 - WL:	0.02%	0.25%	0.18%	0.44%

Die Differenz in der Spannung wird auf unzureichende thermische Ankopplung der Temperaursensoren zurückgeführt. Um diese zu verbessern, wurden neue Sensoren anderer Bauart beschafft.

Da die Einstrahlung wegen der noch immer fehlenden Einbindung von Referenz-Solarzellen als Monitorzellen nicht simultan mitgemessen werden kann, wurde untersucht, ob die Regelung der Einstrahlung über die im Sonnen-Simulator integrierte Photodiode zuverlässig funktioniert. Bei einer Einstrahlungsvariation zwischen 100-1300 W/m^2 wurden Abweichungen von der Linearität von bis zu 1.5% festgestellt. Da die Abweichungen bei Referenzzelle und Modul in gleicher Weise auftreten, können aus einer Messung der Referenzzelle Korrekturfaktoren für die Messung des Moduls bestimmt werden. Damit ergibt sich eine gute Übereinstimmung zum Verlauf in den etablierten Messystemen des CallabPV Modules, wie in Abbildung 29 gezeigt.

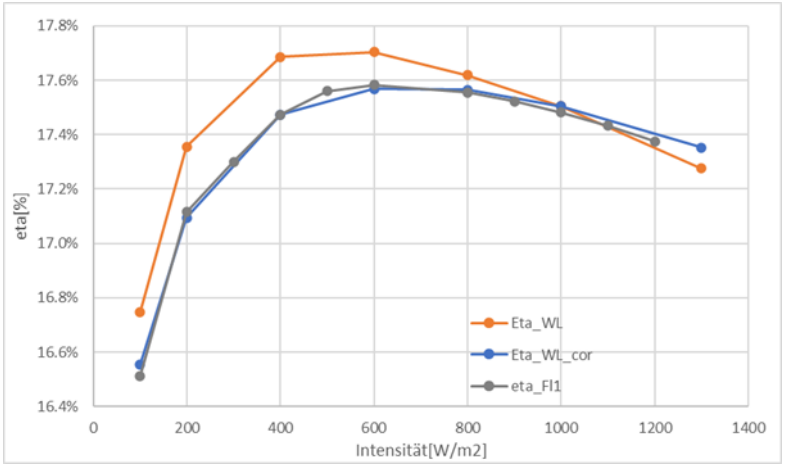


Abbildung 29: Vergleich der Effizienzmessung eines single-junction Si-Moduls bei verschiedenen Bestrahlungsintensitäten. Die orangenen Datenpunkte zeigen die Datenpunkte am Modulsimulator vor Temperatur-Korrektur, die blauen mit Korrektur. Die Referenzmessung ist in grau dargestellt und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Außerdem wurde die P_{MPP} tracking Funktion (P&O) am LED-Simulator getestet. Hier besteht aktuell noch das Problem, dass die Modul-Temperatur in der WAVELABS-Software nur einmal pro Rezeptstart ausgelesen wird. Für kurze Kennlinienmessungen mit Beleuchtungszeiten < 500 ms kann das ausreichend sein, bei längeren Rezepten wie dem P_{MPP} Tracking kann die Temperaturänderung unter Dauerlicht jedoch nicht erfasst werden, was eine Bewertung der Stabilität des Messobjektes behindert. Aktuell wird die Messung der Modultemperatur darum mit einem externen Datalogger durchgeführt, um die erfassten IV- Daten nachträglich manuell zu korrigieren. Außerdem wurde eine anfängliche Temperaturstabilisierungs-phase

von 40 min unter Dauerlicht festgelegt, um die Temperaturänderungen während des P_{MPP} trackings zu minimieren. Mittelfristig muss eine Temperaturmessung in kürzeren Intervallen und gleichzeitige automatische Korrektur der Messwerte umgesetzt werden, um das P_{MPP}tracking sinnvoll durchführen zu können. Hierzu werden fortlaufend Gespräche mit der Firma WAVELABS geführt.

Definition der Kalibrierprozedur für Tandemmodule

Folgende Messprozedur wurde für die Kalibrierung von Tandemmodulen definiert.

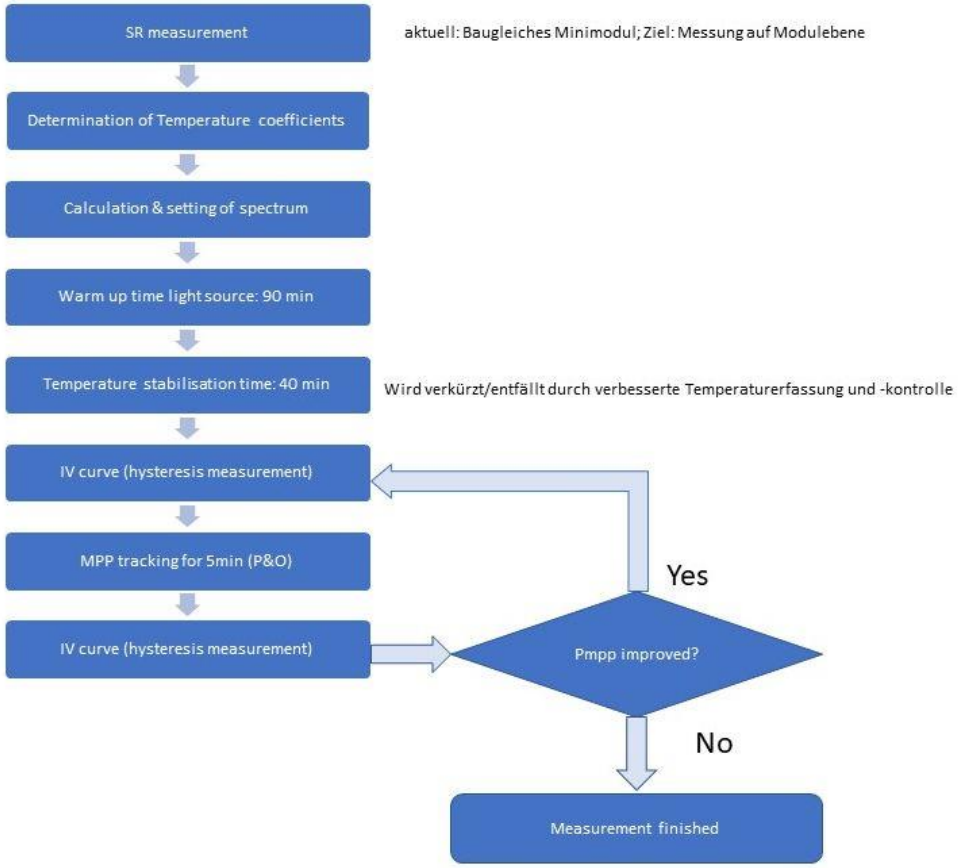


Abbildung 30: Schematische Darstellung der erarbeiteten Kalibrierprozedur für Tandemmodule.

Aufgrund verschiedener Limitierungen der mitgelieferten IV-Messelektronik (teilweise im vorherigen Abschnitt beschrieben) sowie der Software des Modul Sonnen-Simulators wird im weiteren Verlauf des Projektes eine am Fraunhofer ISE entwickelte IV-Messelektronik sowie eine eigene Software zur Ansteuerung des Lichtfeldes verwendet. Diese Software ermöglicht eine flexible und direkte Ansteuerung aller LED-Kanäle wodurch verschiedene Spektralbedingungen basierend auf der am Zell-Simulator erarbeiteten Berechnungsroutine eingestellt werden können. Zudem bietet diese modular aufgebaute Software eine einfache Möglichkeit zur Integration neuer Funktionen und Messroutinen, um beispielsweise eine automatisierte LED basierte Modul EQE Messung oder spektrometrische Charakterisierung zu realisieren.

LED basierte Modul EQE Messung

Aufgrund der Serien Verschaltung der Teilzellen in einer monolithischen Tandemsolarzelle muss, zur Bestimmung der EQE, die zu messende Teilzelle in Strombegrenzung gebracht werden. Für ein aus mehreren (in diesem Fall 60) Tandemsolarzellen aufgebautes Modul gilt die gleiche Bedingung. Um diese zu erfüllen, wird am Sonnensimulator ein Beleuchtungsspektrum eingestellt, welches zu einer definierten Limitierung der jeweils zu messenden Teilzelle führt. Da es sich bei den innerhalb dieses Projektes untersuchten Messobjekten um Perowskit auf Silizium Tandem-Module mit zwei Teilzellen handelt, wird ein blau lastiges Spektrum für die Messung der Silizium Unterzelle und ein rot lastiges Spektrum für die Messung der Perowskit Oberzelle verwendet. Zwei für die EQE-Messung eines Perowskit auf Silizium Tandem-Moduls angepasste Spektren sind, gemeinsam mit dem AM1.5g Referenzspektrum, beispielhaft in Abbildung 31 dargestellt.

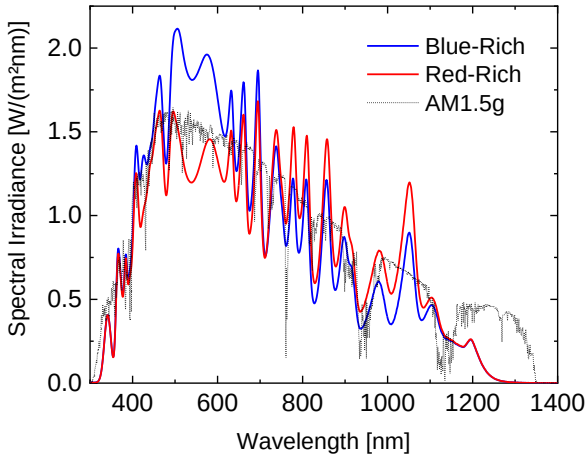


Abbildung 31: Beleuchtungsspektren für die EQE-Messung an einer Perowskit Oberzelle (rot) und einer Silizium Unterzelle (blau) in einem Tandem-Modul.

Geeignete spektrale Einstellung können hierfür beispielsweise über die Durchführung einer spektrometrischen Charakterisierung des Messobjekt ermittelt werden. Dabei wird die Einstrahlung auf die jeweiligen Teilzellen, wie zuvor für Zell-Messungen beschrieben, systematisch variiert. Durch Auftragung des Modulstroms über die Einstrahlungsverhältnisse sind spektrale Bedingungen, die zur Limitierung einer der beiden Teilzellen führt, verlässlich zu identifizieren.
Die automatisierte Durchführung einer spektrometrischen Charakterisierung wurde in die Software zur Ansteuerung der Beleuchtungseinheit implementiert. Während der Messung wird das Modul (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit Hilfe der eigens entwickelten *IV*-Messelektronik auf einer festen Spannung (Bias-Spannung) gehalten. Die ermöglicht eine Messung der Teilzellen nahe ihres Kurzschlussstroms (I_{SC}) und stellt, neben der zuvor beschriebenen Einstellung eines geeigneten Spektrums, eine notwendige Bedingung für die EQE-Messung an Tandemsolarzellen und Modulen da[10].
Um die EQE des Moduls zu bestimmen, wird die Beleuchtungsintensität einzelner LED-Kanäle im Folgenden moduliert. Für die Untersuchung des generellen Vorgehens an einem vollflächigen Modul wurden die einzelnen LED-Kanäle hierzu mit einer gleichbleibenden Frequenz an und wieder ausgeschaltet. Eine hiervon abweichende Modulation, beispielsweise nur um wenige % der zuvor gesetzten Intensitätswerte, ist softwareseitig jedoch bereits abgebildet und kann im Zuge weiterer Untersuchungen genutzt werden. Mit Hilfe der IV-Elektronik wird die Stromantwort des Moduls auf die LED-Modulation detektiert. Gleichzeitig wird auch der Strom einer ebenfalls im Lichtfeld platzierten Referenzsolarzelle (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit bekannter spektraler Empfindlichkeit über einen Messwiderstand bestimmt. Über das Verhältnis der gemessenen Stromantworten von Test- und Referenz-Objekt (ΔI_{test} und ΔI_{ref}) sowie der bekannten spektralen

[10] J. Burdick and T. Glatfelter. Spectral response and I-V measurements of tandem amorphous-silicon alloy solar cells. Solar Cells, 18, 301-14. 1986

Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle $SR_{\mathrm{ref}}(\lambda)$ lässt sich die spektrale Empfindlichkeit des Moduls wie folgt ermitteln.

$$SR_{\mathrm{test}}(\lambda) = \frac{\Delta I_{\mathrm{test}}(\lambda)}{\Delta I_{\mathrm{ref}}(\lambda)} SR_{\mathrm{ref}}(\lambda)$$

Die spektrale Empfindlichkeit kann über

$$EQE = SR \cdot \frac{hc}{q\lambda}$$

in eine EQE umgerechnet werden. Wobei h das plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigekit im Vakuum und q die Elementarladung darstellt.
Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt ebenfalls automatisiert über ein in Python programmiertes Auswertungstool. Mit Hilfe dieser Methode lässt sich die EQE einer Teilzelle in einem vollflächigen Tandem-Modul automatisiert innerhalb von 20 min messen.

Validierung der Kalibrierprozedur für großflächige Perowskit auf Silizium Tandem-Module

Die vorgestellte Prozedur zur Kalibrierung großflächiger Perowskit auf Silizium Tandemsolarzellmodule wird im Folgenden beispielhaft an einem Modul dargestellt. Aufgrund der Vertraulichkeit der Messdaten werden alle Ergebnisse auf 1 normiert.

SR-Messung

Die spektrale Empfindlichkeit des Messobjekts wird für die Anpassung des Sonnensimulator-Spektrums benötigt. Für die Messung dieser wurde ein dem eigentlichen Messobjekt entsprechendes Einzeller-Modul, bestehend aus einer einzigen Zelle, hergestellt. Die spektrale Empfindlichkeit dieses Messobjekts wurde im CalLab PV Cells gemessen und ist in Abbildung 32 als externe Quanteneffizienz (EQE) dargestellt. Der Zusammenhang zwischen EQE und SR wurde im vorherigen Abschnitt beschrieben. Neben der am Einzeller-Modul gemessenen EQE (offene Datenpunkte) ist auch die am Modul selbst mit Hilfe des LED-Modul-Sonnensimulators gemessene EQE dargestellt. Die gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen unterstreicht zum einen die Anwendbarkeit der am Einzeller-Modul gemessenen Daten für die Spektralanpassung, als auch das Vorgehen zur Modul-EQE Messung selbst.

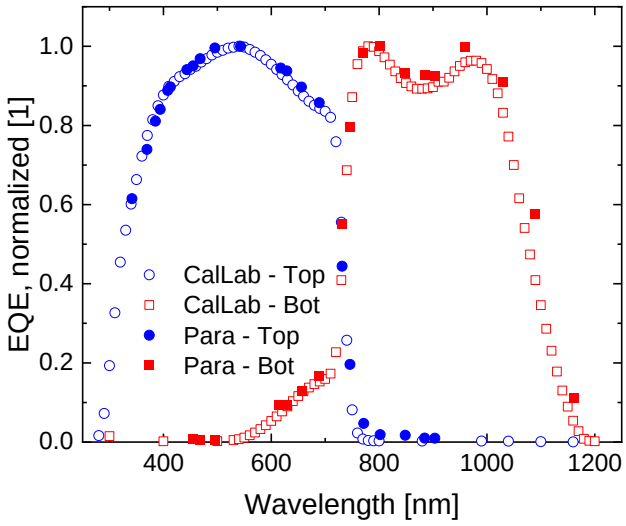


Abbildung 32: EQE des für die Spektralanpassung des Sonnensimulators hergestellten Einzeller-Moduls (offene Datenpunkte) sowie die am LED-Sonnensimulator gemessenen EQE des vollflächigen Tandem-Moduls (geschlossene Datenpunkte).

Berechnung und Einstellung des Simulator-Spektrums

Basierend auf der am Einzeller-Modul gemessenen spektralen Empfindlichkeit des Messobjekts wurde ein auf das Messobjekt angepasstes Simulator-Spektrum errechnet. Die hierfür verwendete Berechnungsmethode wurde innerhalb dieses Projektes entwickelt und als Beitrag in einer Fachzeitschrift veröffentlicht11. Basierend auf dem berechneten Simulator-Spektrum wurden die „Soll-Ströme“ für zwei den Teilzellen des Messobjektes angepasste Referenzsolarzellen ermittelt. Nach Einstellung des berechneten Spektrums am Sonnensimulator sowie einer 90-minütigen Aufwärmzeit wurden die entsprechenden Referenzsolarzellen im Lichtfeld positioniert und auf 25 °C temperiert. Aufgrund von Unsicherheiten in der Spektraleinstellung kam es zu leichten Abweichungen (<2%) zwischen den berechneten Soll-Strömen und den tatsächlich gemessenen Kurzschlussströmen beider Referenzsolarzellen. Die sich ergebenden Abweichungen wurden in die Berechnungssoftware zur Spektralanpassung zurückgespeist und für eine erneute Anpassung des Simulator-Spektrums verwendet. Dabei wurde dieses so angepasst, dass die Änderung der für das vorherige Spektrum ermittelten Soll-Ströme möglichst klein ist. Somit ist eine präzise

[11] Chojniak et al.: A Precise Method for the Spectral Adjustment of LED and Multi-Light-Source Solar Simulators, 2023, 10.1002/pip.3776

und auf angepasste Referenzsolarzellen rückführbare Anpassung des Sonnensimulator-Spektrums für beliebige Messobjekte möglich. Für die finale Anpassung des Spektrums reichte in den bisherigen Untersuchungen ein einzelner Iterationsschritt um, durch minimale, aber gezielte Anpassungen des Ausgangsspektrums, die Abweichungen zwischen den Soll- und Ist-Strömen beider Referenzsolarzellen auf <0.1% zu reduzieren. Mit Hilfe zweier ebenfalls grob auf das Messobjekt angepassten Monitorzellen wurden die Spektralbedingungen über den gesamten Messverlauf überwacht und etwaige Abweichungen in den Messdaten korrigiert. In bisherigen Untersuchungen zeigte sich eine sehr gute Stabilität der Lichtquelle, welche in Monitorzell-Abweichungen von weniger als 0.015% über die gesamte Messdauer resultierten.

Temperaturstabilisierung

Nach der korrekten Einstellung des Simulator-Spektrums wurde das zu messende Modul im Lichtfeld positioniert. Danach wurde eine Spannung angelegt, welche grob der zu erwartenden Spannung am Punkt maximaler Modulleistung entspricht. Dieser Zustand wurde ca. 40 min beibehalten, um eine stabile Modultemperatur zu erreichen. Dieser Schritt soll in Zukunft durch den Aufbau einer Klimakammer für den Messplatz überflüssig gemacht werden.

Leistungsbestimmung

Zur Bestimmung der Modulleistung wurde zunächst eine IV-Kennlinie in Vorwärts und Rückwärts-Richtung aufgenommen. Danach wurde ein MPP-Tracking durchgeführt, wobei die maximale Modulleistung durch Variation der am Modul angelegten Spannung ermittelt wurde. Nach Messung eines über 5 Minuten stabilen Leistungswertes am Punkt maximaler Leistung wurde erneut eine IV-Kennlinie in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung gemessen. Für die Effizienzbestimmung wird der Mittelwert der im Verlauf des zuvor beschriebenen 5 Minuten Zeitraums gemessenen Leistungswerte genutzt. Dieser wird mit Hilfe des ermittelten Temperaturkoeffizienten auf 25 °C korrigiert. Zusätzlich wird aktuell die Verwendung der von T. Moriarty und D. Levi vorgestellten und im Verlauf dieses Projektes in die IV-Software integrierte „Asymptotic Pmax" 12 Methode geprüft. Diese wird darum ebenfalls für die Bestimmung der Modulleistung angewendet, deren Ergebnis bisher jedoch noch nicht als offizieller Messwert verwendet.

Spektrometrische Charakterisierung von Tandem-Modulen

Wie bereits erwähnt ermöglicht die innerhalb des Projektes entwickelte Methode zur Berechnung verschiedener Simulator-Spektren sowie die eigens programmierte Software zur Ansteuerung der Lichtquelle des Modul Simulators nun eine automatische spektrometrische Charakterisierung vollständiger PV-Module. Diese fortgeschrittene Charakterisierungsmethode bietet eine akkurate Möglichkeit zur Bestimmung der spektralen Bedingungen, unter denen beide Teilzelle des Tandem-Moduls stromangepasst sind. Zudem ermöglicht diese Einblicke in die Modul-Charakteristik unter verschiedenen und unterschiedlich stark ausgeprägten Teilzell-Limitierungen. Diese Informationen sind wichtig für einen zielgerichtete Optimierung von Tandem-Modulen, insbesondere für Außenbedingungen wo eine kontinuierliche Variation spektralen Bedingungen gegeben ist. In **Abbildung 33** sind die Ergebnisse einer spektrometrischen Charakterisierung (für I_{SC} und P_{MPP}) an einem vollflächigen Perowskit auf Silizium Tandem-Modul beispielhaft dargestellt. Aufgrund der aktuell noch nicht vorhandenen Klimakammer können Messungen bisher nur bei deutlich erhöhten, sich unter Beleuchtung am Modul einstellenden Temperaturen durchgeführt werden.

[12] T. Moriarty, D. Levi: NREL's Cell and Module Performance group's asymptotic Pmax protocol for perovskite devices, 2017, 10.1109/PVSC.2017.8366424)

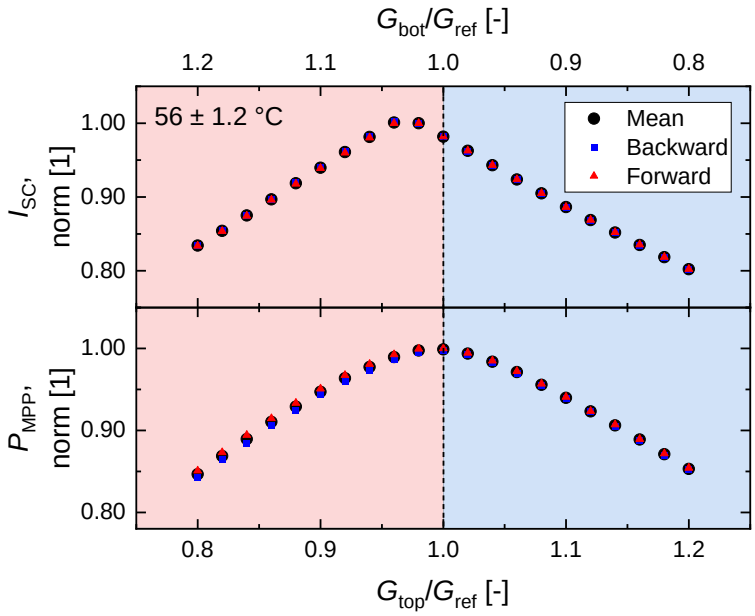


Abbildung 33: Spektrometrische Charakterisierung (für I_{SC} und P_{MPP}) eines vollflächigen Perowskit auf Silizium Tandem-Moduls. Im roten und blauen Bereich der Grafik sind die jeweiligen Simulator Spektren ins rote, bzw. blaue verschoben. Die gestrichelte Linie am x-Wert 1 repräsentiert die spektralen Referenzbedingungen.

Messung der EQE an Tandem-Modulen und deren Einfluss auf die Spektralanpassung

Durch das zuvor beschriebene Verfahren zur Bestimmung einer Modul-EQE wird es möglich eine vollständige Modul Kalibrierung am LED-Sonnensimulator durchzuführen. Diese Option ermöglicht die Reduzierung der benötigten Mess-Zeit, aber auch des erforderlichen Modulhandlings. In diesem Fall wird die auf der spektralen Empfindlichkeit des Messobjekts basierenden Spektralanpassung des Sonnensimulators direkt mit der am Simulator selbst gemessenen EQE durchgeführt. Für dieses Vorgehen müssen jedoch zusätzliche Unsicherheiten, die sich aus der mit dem LED-Simulator gemessenen EQE ergeben, berücksichtigt werden. Abbildung 34 zeigt eine an einem Einzeller-Modul im CalLab, sowie die am zugehörigen vollflächigen Modul am LED-Sonnensimulator gemessenen EQE eines Perowskit auf Silizium Tandem-Moduls.

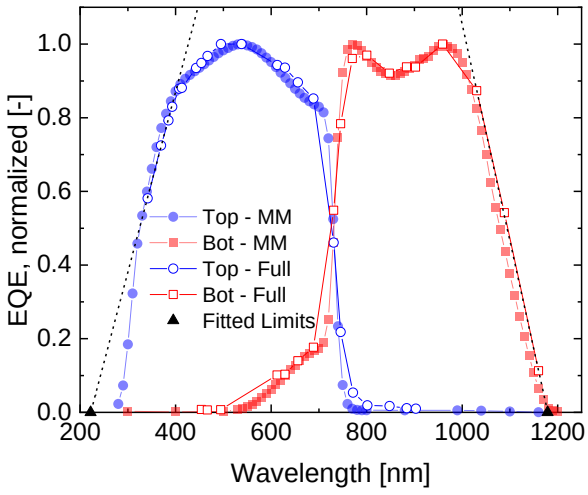


Abbildung 34: Im Fraunhofer ISE CalLab gemessene und auf 1 normierte EQE eines Perowskit auf Silizium Einzeller -Moduls (geschlossene Datenpunkte), sowie eine am LED-Simulator gemessene und ebenfalls normierte EQE des zugehörigen vollflächigen Moduls (offene Datenpunkte).

Trotz der sehr guten Übereinstimmung aller vorhandenen Messpunkte ergibt sich aus der geringeren Auflösung der LED basierten EQE eine Unsicherheit im relativen Verlauf. Diese wirkt sich auf die spektrale Anpassung des Sonnensimulators aus. Um diese Auswirkung zu quantifizieren, wurde eine Spektralanpassung des Sonnensimulators mit beiden EQEs durchgeführt. Die Sensitivitätsgrenzen der Ober- und Unterzelle im kurz, bzw. langwelligen Spektralbereich wurden für die LED-EQE, wie in Abbildung 34 zu sehen, durch lineare Anpassungen an den letzten drei gemessenen Datenpunkten der jeweiligen Teilzelle abgeschätzt. Basierend auf den Berechnungen der Spektraleinstellungen mit beiden EQEs ergeben sich die in Tabelle 6 gezeigten Soll-Ströme für die verwendeten Referenzsolarzellen. Wie im Abschnitt „Validierung der beschriebenen Kalibrierprozedur“ beschrieben werden diese Soll-Ströme der jeweiligen Referenzsolarzellen für die rückführbare und präzise Anpassung des Simulator-Spektrums verwendet.

Tabelle 6:Eregebnisse der Spektralanpassung des LED-Modul-Sonnensimulators unter Verwendung der im CalLab gemessenen Einzeller -Modul EQE sowie der am LED-Modul-Sonnensimulator gemessenen EQE des vollflächigen Moduls.

SR-Type	CalLab SR	Linear Fits	Deviation to CalLab SR [%]
Topcell Ref. Current [mA]	52.29	52.12	**-0.32**
Bottomcell Ref. Current [mA]	76.29	76.30	**0.006**

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen zeigt sich eine maximale Abweichung der errechneten Sollströme und damit auch der für die Einstellung des Simulator Spektrums relevanten spektralen Mismatch-Faktoren, von 0.32%. Daraus ergibt sich auch für die Spektralanpassung des Sonnsimulators eine sehr gute Übereinstimmung beider EQEs wobei die ermittelten Abweichungen in der für die Modulmessung angegebenen Messunsicherheit berücksichtigt werden muss.

Outdoor-Validierung der Messprozedur für Tandem-Module

Im Folgenden sollen die am LED Modul Sonnensimulator gemessenen Ergebnisse durch Außenmessungen am selben Modul verifiziert werden.

Verwendung von III-V Komponentenzellsensoren

Für die Entwicklung einer Outdoor-Kalibrierroutine für Perowskit Silizium Tandemmodule soll auf die am Fraunhofer ISE vorhandene, langjährige Erfahrung in der Durchführung von Outdoor-Kalibrierungen an aus III-V Mehrfachsolarzellen aufgebauten Konzentrator-Photovoltaik Modulen zurückgegriffen werden. Dabei ist die Verwendung von III-V Komponentenzellsensoren für die Bewertung des zum jeweiligen Messzeitpunkt vorliegenden Spektrums seit langem etabliert. Deren Aufbau entspricht dem einer Mehrfachsolarzelle, wobei nur ein einziger pn-Übergang innerhalb der Zelle aktiv ist. Die inaktiven Teilzellen fungieren somit als „monolithisch gewachsene" Filter. Die EQEs der am Fraunhofer ISE verwendeten Komponentenzellsensoren sind in **Abbildung 35** dargestellt und basieren auf einer $Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ Dreifachzelle (die Germanium Komponentenzelle wird hier nicht verwendet).

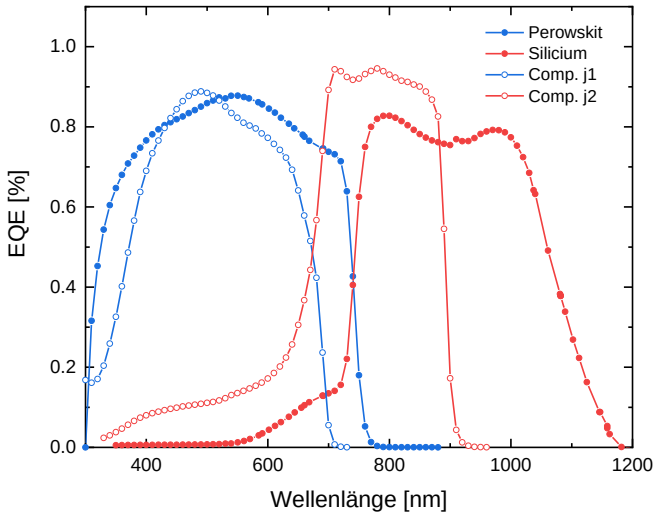


Abbildung 35: Externe Quanteneffizienz (EQE) der am Fraunhofer ISE verwendeten Komponentenzellsensoren 1 und 2 (Offene Symbole). Und die EQE des verwendeten Perowskit/ Silizium Einzeller -Moduls.

Dabei sind die Bandlücken der einzelnen Komponentenzellen so gewählt, dass verschiedene relevante Bänder des Sonnenspektrums separat voneinander bewertet werden können[13]. So beeinflussen Änderungen im atmosphärischen Wassergehalt beispielsweise primär die Unterzelle wohingegen der Ozongehalt einen Einfluss auf den Strom der Oberzelle hat. Da die spektrale Empfindlichkeit des vorliegenden Messobjektes nur bis ca. 1200 nm reicht werden im Folgenden nur der SMR Werte der Komponentenzellsensoren 1 und 2 gemessen, um daraus, wie in Gleichung 1 dargestellt, einen „Spectral Match Ratio" (SMR) zu berechnen[14].

$$\mathrm{SMR}_{12} = \frac{I_1^{\mathrm{Meas}}}{I_2^{\mathrm{Meas}}} \cdot \frac{I_2^{\mathrm{Ref}}}{I_1^{\mathrm{Ref}}}$$

Ergeben sich für die so berechneten Stromverhältnisse aller drei Komponentenzellen zueinander (SMR12, SMR13, SMR23) Werte von 1, so ähnelt das aktuelle Spektrum dem AM1.5g Referenzspektrum. Diese Art der Spektralbewertung hat sich trotz ihrer geringen Auflösung als robust erwiesen, da die im Freien vorkommenden Spektren bei guten Einstrahlungsbedingungen ihrer Form nach generell eine hohe

[13] Peharz, 2008, Spectrometric Outdoor Characterization of CPV Modules using Isotype Monitor Cells
[14] Domínguez, 2012, Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells.

Ähnlichkeit zu dem AM1.5g Referenzspektrum aufweisen. Daraus ergibt sich jedoch auch, dass diese Art der Spektralbewertung z.B. für die Einstellung eines Sonnensimulators nicht geeignet wäre, da die zuvor beschriebene Ähnlichkeit der Simulator-Spektren zum Referenzspektrum hier nicht gegeben ist.
Dabei stellt sich die Frage, ob das errechnete Stromverhältnis der beiden Sensoren auch Aussagen über die Stromanpassung der beiden Teilzellen eines Perowskit auf Silizium Moduls zulässt, welches wie in Abbildung 35 beispielhaft zu erkennen eine von den Komponentenzellsensoren verschiedene EQE besitzt (Die hier dargestellte EQE wurde an einem Perowskit auf Silizium Einzeller-Modul gemessen). Hierzu wurden zunächst 2450 Spektren unter Variation der optischen Dichte der Aerosole (Aerosol Optical Depth (AOD)) mit dem Programm SMARTS2[15] simuliert um für jedes dieser Spektren die SMR-Werte der Komponentenzellsensoren 1 und 2 sowie die jeweiligen SMR-Werte der beiden Teilzellen des verwendeten Messobjektes zu berechnen. Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abbildung 36 dargestellt.

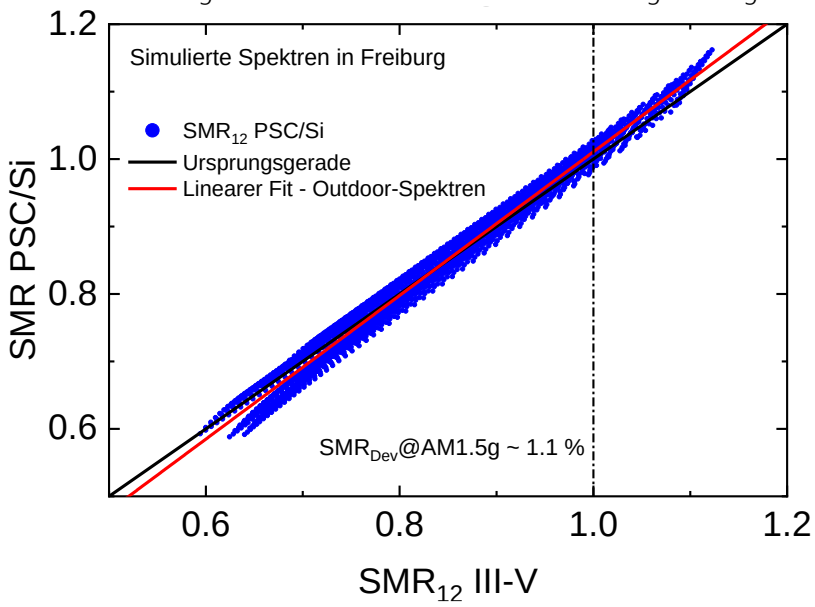


Abbildung 36: Vergleich der SMR-Werte der am Fraunhofer ISE verwendeten III-V Komponentenzellsensoren zu den SMR-Werten, die sich aus der EQE der Teilzellen eines Perowskit auf Silizium Einzeller-Moduls errechnen lassen. Der Vergleich basiert auf der Simulation von 2450 Spektren am Standort des Fraunhofer ISE in Freiburg. Eine ideale Übereinstimmung der Stromverhältnisse ist durch die eingezeichnete Ursprungsgerade dargestellt. Ein Fit durch die dargestellte Punktewolke ergibt die, von der Ursprungsgeraden abweichende Gerade.

Anhand der Abweichung der Ursprungsgerade von der linearen Anpassung durch die simulierten Datenpunkte wird deutlich, dass eine ideale Übereinstimmung der SMR-Werte mit den hier simulierten Spektren nicht gegeben ist. Dennoch beträgt die aus beiden Geraden berechnete maximale Abweichungen in einem für die im Folgenden dargestellten Messungen relevanten Bereich von SMR_{12}III-V = 0.6 bis SMR_{12}III-V = 1.1 lediglich 2.5 %. Dass sich trotz der deutlichen Unterschiede in den EQEs der Teilzellen und der Komponentenzellsensoren dennoch nur relativ geringe Abweichungen ergeben, kann auch in diesem Fall durch die spektrale Ähnlichkeit der Outdoor-Spektren zum AM1.5g Referenzspektrum erklärt werden. Basierend auf dieser Untersuchung konnte die Anwendbarkeit des am Fraunhofer ISE etablierten III-V Komponentenzellsensors für die Durchführung von Outdoor-Messungen an Perowskit auf Silizium Tandem-Modulen nachgewiesen werden.

Messvergleich

Für die Durchführung des Messvergleichs wurde das bereits im Abschnitt „Validierung der Kalibrierprozedur für großflächige Perowskit auf Silizium Tandem-Module“ verwendete, monofaziale Perowskit auf Silizium Tandem-Modul verwendet. **Abbildung 37** zeigt das Modul montiert auf dem für Outdoor-Messungen verwendeten zweiachsig nachgeführten Tracker.

[15] Gueymard.: SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment

Abbildung 37: Vollflächiges Perowskit auf Silicum Tandemmodul während der Outdoor-Messung. Das Modul wurde für die Messung auf einem zweiachsig nachgeführten Tracker montiert und über zwei Tage hinweg vermessen.

Insgesamt wurde das Modul über zwei Tage hinweg auf dem Outdoor-Messstand des Fraunhofer ISE vermessen. Dabei wurden alle zwei Minuten IV-Kurven in vorwärts und rückwärts Richtung aufgenommen. Zwischen den IV-Messungen wurde das Modul kontinuierlich MPP getrackt wobei die jeweiligen Leistungswerte aufgezeichnet wurden. Die so gesammelten Messdaten wurden anschließend anhand der während der Messung vorliegenden spektralen Bedingungen, welche basierend auf dem im vorherigen Abschnitt eingeführten Komponentenzellsensor ermittelt wurden, gefiltert. Dabei wurden nur Messdaten berücksichtigt, die unter spektralen Bedingungen gemessen wurden welche in einem SMR12 Wert von 1 ± 0.03 resultierten. Die integrale Einstrahlungsintensität wurde mit Hilfe einer primär kalibrierten Silizium Referenzsolarzelle bestimmt.
Neben spektralen Bedingungen wurden auch Filter angewendet die einerseits die Plausibilität der Messdaten, aber auch Einflüsse wie Wind, Temperatur oder die Positioniergenauigkeit des Trackers berücksichtigten. Die verwendete Prozedur beruht dabei im Wesentlichen auf der von Steiner et al. veröffentlichten Vorgehensweise für die Outdoor-Kalibrierung III-V basierter Tandem-Module[16].
Für den Vergleich zu der mit Hilfe des LED-Sonnen-Simulators ermittelten Modulleistung wurden die mittels MPP-Track gemessenen Outdoor-Daten genutzt.
Im beschriebenen Messvergleich konnte, nach Anwendung von Temperaturkorrekturen, eine Abweichung der Indoor und Outdoor gemessenen Modulleistung von 1.2% erreicht werden.

Allerdings bleibt anzumerken, dass die vorliegenden Outdoor-Bedingungen im Messzeitraum nicht ideal waren. Da die betreffenden Messungen Ende September durchgeführten wurden konnten, aufgrund des tiefen Sonnenstandes, keine idealen Spektralbedingungen erreicht werden. Obwohl die vorliegenden Bedingungen die angewendeten Filterkriterien erfüllen, wurde generell unter eher rot verschobenen Spektralbedingungen gemessen (SMR12 ca. 0.98 bei allen Messungen). Zudem ergibt sich für die Outdoor gemessenen Leistungen, aufgrund nicht konstanter Wetterbedingungen, eine recht hohe Standartabweichung von 3%.
Dennoch bestätigt die in diesem Messvergleich ermittelte hohe Übereinstimmung der Outdoor und Indoor durchgeführten Messungen die im Zuge dieses Projektes entwickelte Kalibrierroutine für großflächige Perowskit auf Silizium Tandemmodule.

[16] Steiner et al.: Translation of outdoor tandem PV module I–V measurements to a STC power rating; 2023; DOI: 10.1002/pip.3691

Messunsicherheitsbestimmung

Basierend auf einer detaillierten Analyse relevanter Unsicherheitsbeiträge ergibt sich für die am LED-Modul-Sonnensimulator mittels P_{MPP}-Track an einem Perowskit auf Silizium Tandem-Modul gemessene Leistung aktuell eine Unsicherheit von 4%. Die in die genannte Unsicherheit eingehenden Messobjekt spezifischen Größen wurden beispielhaft an einem innerhalb des Projektes gemessen vollflächigen PSC/Si Tandem Modul ermittelt. Hierfür werden im Wesentlichen die Ergebnisse einer spektrometrischen Charakterisierung (s.o.) des betreffenden Moduls genutzt. Anhand dieser lässt sich der Einfluss möglicher spektraler Fehlanpassungen auf die verschiedenen *IV*-Parameter des Moduls ermitteln. Selbstverständlich variieren diese Werte jedoch für verschiedene Messobjekte, weshalb Messobjekt spezifische Anpassungen der angebenden Messunsicherheiten notwendig sind. Die wesentlichen Beiträge zur ermittelten Unsicherheit sind:

Unsicherheit der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke

Hierzu zählen im Wesentlichen Einflüsse, die in einer Unsicherheit der spektralen Einstellung des Sonnensimulators resultieren. Hier sind mögliche Abweichungen zwischen der für die Spektralanpassung verwendeten Einzeller -Modul und der tatsächlichen Modul-EQE, Unsicherheiten in der Form des eingestellten Spektrums sowie die integrale und spektrale Inhomogenität des Lichtfeldes zu nennen, welche sich auch auf die mittels Referenzsolarzellen gemessenen Intensitätswerte auswirkt. Aber auch Unsicherheitsbeiträge, die aus den verwendeten Messgeräten resultieren haben hier einen Einfluss. Hierzu zählen zum Beispiel Unsicherheiten auf die Kalibrierwerte der als Einstrahlungssensoren verwendeten Referenzsolarzellen, aber auch die Messunsicherheit des verwendeten Spektralradiometers.

Unsicherheiten in Bezug auf die Modultemperatur

Da für die Durchführung von Messungen am LED-Modul-Sonnensimulator bisher noch keine Klimakammer zur Verfügung steht ergeben sich verschiedenen Unsicherheitsbeiträge, welche sich auf die Modultemperatur beziehen. Zum einen werden Messungen aktuell bei deutlich von 25 °C abweichenden Modultemperaturen durchgeführt (für das dargestellte Beispiel ca. 45 °C). Somit muss eine Temperaturkorrektur um 20 °C durchgeführt werden um die Modulleistung bei 25 °C zu ermitteln. Der hierfür benötigte Temperaturkoeffizient der Modul-Leistung wird wiederum selbst am LED-Sonnensimulator gemessen und unterliegt einer hohen Unsicherheit, welche im Gesamtergebnis aufgrund der weiten Temperaturkorrektur einen deutlichen Einfluss hat. Da keine konstante Modultemperatur eingestellt und geregelt werden kann ergibt sich auch für die Temperaturhomogenität über die Modul-Fläche eine erhöhte Unsicherheit, welche wiederum einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit hat.

2.1.3 AP 3 Absicherung der Kalibrierprozeduren

AP3.1: Multispektrale Photolumineszenzanalysen für Tandemzellen

In diesem Arbeitspaket wurde daran gearbeitet, ein Messgerät bereitzustellen, mit dem multispektrale Photolumineszenzanalysen für Tandemsolarzellen erstellt werden können. In einem ersten Schritt wurde zur Überbrückung der Lieferzeit ein experimenteller Aufbau für diese Messungen mit eingeschränktem Funktionsumfang ertüchtigt, bevor etwas später ein dafür extra beschafftes Messgerät mit vollem Funktionsumfang von Intego GmbH im Rahmen des Projektes geliefert werden konnte. Im Folgenden werden die wesentlichen durchgeführten Arbeiten und die daraus resultierenden Erkenntnisse beschrieben.

Homogenität der Beleuchtung am Provisorischer Messaufbau

Um bereits vor Auslieferung des neuen Systems qualitative PL-Testmessungen an Tandemsolarzellen durchführen zu können, wurde der am ISE bereits vorhandene PL-Imaging Referenzaufbau, der über eine

rote und eine grüne Anregungswellenlänge verfügt, nach Reparatur des grünen Lasers wieder erfolgreich in Betrieb genommen.
Um seine Verwendbarkeit für quantitative Messungen zu bewerten, wurde eine Analyse von räumlichen Intensitätsschwankungen im Lichtkegel des grünen Lasers durchgeführt (Siehe Abbildung 38). Es zeigte sich eine Zunahme der Lichtintensität zur rechten Seite des Probentisches hin. Aufgrund von zeitlichen Schwankungen in der Lichtintensität des grünen Lasers und der Größe der beleuchteten Fläche waren absolute und großflächige PL-Aufnahmen leider nicht möglich. Diese konnten erst später im Projekt am neu beschafften Messaufbau durchgeführt werden.

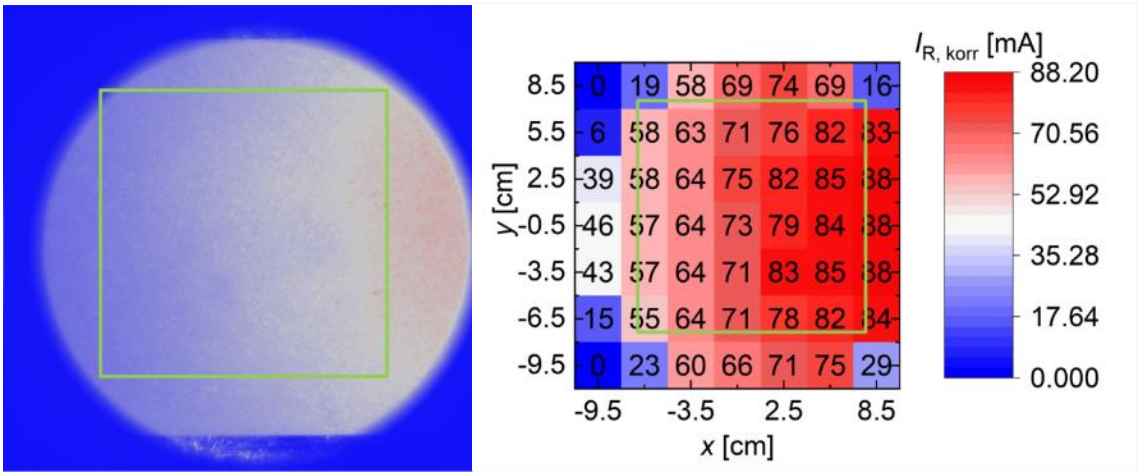


Abbildung 38: (Links) Eingefärbtes Foto des Lichtkegels des grünen Lasers auf dem Probentisch. Das grüne Quadrat kennzeichnet eine Probenauflagefläche von 15x15 cm2. Deutlich erkennbar ist die Zunahme der Lichtintensität zur rechten Seite hin. (Rechts) Gemessener Strom einer 2x2 cm2 großen Solarzelle auf dem Probentisch. Die schwankende Laserleistung wurde durch eine Korrektur mittels einer zweiten, ortsfesten Solarzelle berücksichtigt. Analog zur Lichtintensität zeigt sich ein erhöhter Strom hin zur rechten Seite der Probenauflagefläche.

Homogenität der Beleuchtung am provisorischen Messaufbau

Am provisorischen Messaufbau wird die Laserintensität nicht in-situ gemessen. Entsprechend erfolgte ein Test zur zeitlichen Stabilität der Laserleistung nach erfolgter Einschwingphase. Abbildung 39 zeigt die gemessene Laserleistung, welche mithilfe des Kurzschlusstroms an einer Referenzzelle bestimmt wurde. Es zeigt sich, dass innerhalb von etwas weniger als 8 Minuten die Laserleistung tatsächlich signifikant schwankt. In dem untersuchten Zeitintervall fiel die höchste gemessene Intensität 17.8 % höher aus, als die niedrigste gemessene Laserintensität. Auch diesen Ergebnissen zuvolge ist dieser Messaufbau nur für qualitative Messungen zu verwenden. Für quantitative Messungen sollte entsprechend der in diesem Projekt neu beschaffte Messaufbau verwendet werden, welcher eine simultane Messung der Laserleistung übernimmt.

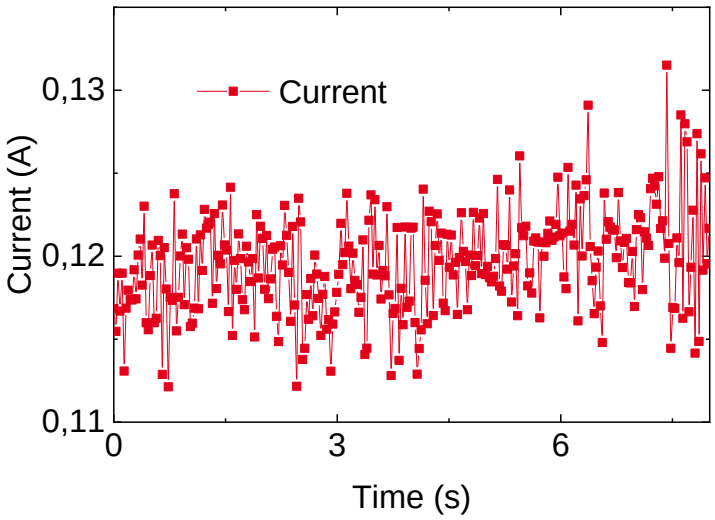


Abbildung 39: Stabilität des 532 nm Lasers im experimentellen Versuchsaufbau zur Messung von PL-Bildern. Es ist der Strom einer beleuchteten Referenzsolarzelle im zeitlichen Verlauf bei konstanten Lasereinstellungen dargestellt.

Lieferung und Erstinbetriebnahme des PL-Imaging Gerätes „Tandem Modulum“

Im Berichtszeitraum 2 wurde das PL-Imaging Gerät „Tandem Modulum“ von Intego GmbH geliefert und in Betrieb genommen. In diesem Rahmen wurde das Gerät gründlich charakterisiert, um Messunsicherheiten abzuschätzen und die Entwicklung von Messverfahren durch die Uni Freiburg zu ermöglichen. Die einzelnen Ergebnisse hierzu werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Abbildung 40: Das von Intego GmbH ausgelieferte PL-Imaging System („Tandem Modulum“) zur Analyse von großflächigen Tandem-Solarzellen.

Beleuchtungshomogenität auf dem Chuck

Für die Untersuchung von lateralen Inhomogenitäten der Probe war es wichtig, die Inhomogenitäten der Beleuchtung zu kennen und so gering wie möglich zu halten. Dies ist auf großen Flächen eine Herausforderung. Abbildung 41 zeigt die gefundenen lateralen Beleuchtungsinhomogenitäten für den IR Laser. Die Messung erfolgte mittels einer 2 cm x 2 cm großen Solarzelle an 25 Beprobungsorten auf einer 180 mm x 180 mm großen Fläche. Erfreulicherweise wurde die spezifizierte maximal zulässige Inhomogenität von 10% klar unterschritten.

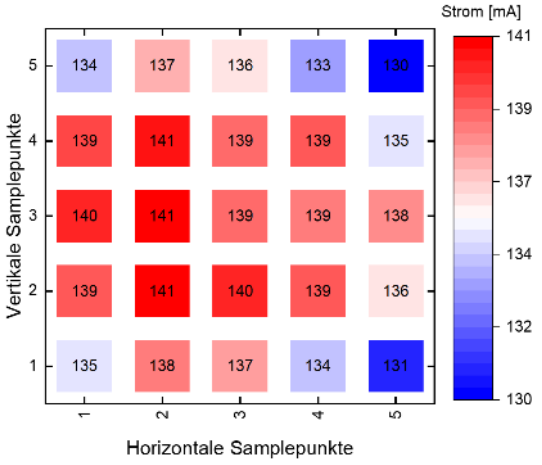


Abbildung 41: Beleuchtungshomogenität auf einer Fläche von 180 mm x 180 mm mit dem IR Laser.

Für ein größeres Feld von 220 mm x 220 mm ist die Inhomogenität größer (siehe Abbildung 42). Für diese Abmaße muss bei sehr präzisen Messungen der Abstand zwischen Chuck und Laserstrahlausgang vergrößert werden. Diese Funktion ist im Gerät durch eine Schiene realisiert. Durch einen größeren Abstand weitet sich der Lichtkegel des Lasers auf, sodass im Gegenzug zu einer homogeneren Ausleuchtung die maximal erreichbar Lichtintensität sinkt. Für den IR Laser ist dies kein Problem, da seine Leistung großzügig ausgelegt ist.

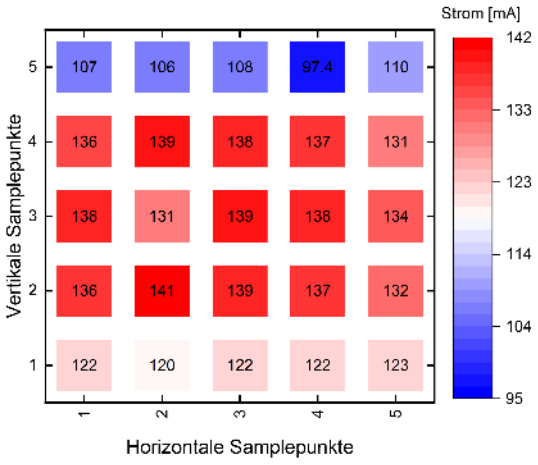


Abbildung 42: Beleuchtungshomogenität auf einer Fläche von 220 mm x 220 mm mit dem IR Laser.

Auch für den blauen Laser wurden unter anderem für das 180 x 180 mm^2 Sichtfeld und für das 220 x 220 mm^2 Sichtfeld Homogenitätsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 gezeigt. Für beide Sichtfelder sind die maximal zulässige Inhomogenität von 10 % noch eingehalten (7.5 % für das kleinere und 9.8 % für das größere Sichtfeld)

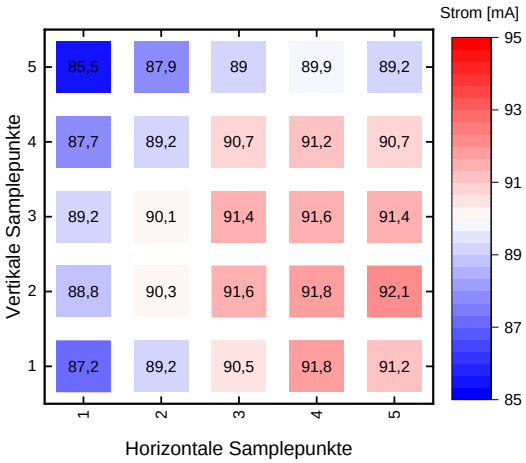


Abbildung 43: Bestimmung der Homogenität der Laserintensität mittels Referenzsolarzelle für ein Sichtfeld mit 180 mm Kantenlänge

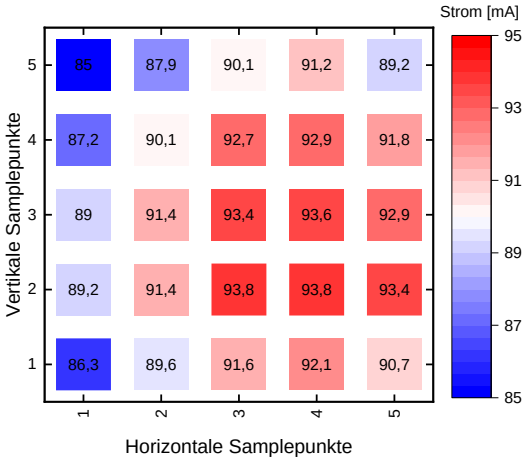


Abbildung 44: Bestimmung der Homogenität der Laserintensität mittels WPVS Zelle für ein Sichtfeld mit 220 mm Kantenlänge

Auch die maximale Gesamtleistung des blauen Lasers wurde bestimmt. Mit einem Powermeter wurden bei Messwiederholungen im Mittel von einem Detektor 47.3 W in einem Abstand von 3 cm vom Faserausgang gemessen. Dort hatte der Strahl einen Durchmesser von 15.17 mm. Im Rahmen der Messunsicherheiten kann daher angenommen werden, dass der Laser die spezifizierten 50 W Lichtausgangsleistung am Faserausgang erreicht.

Temperatur der Laserfasereingang

Bereits bei Auslieferung des Mesgerätes wurde eine Erwärmung des Laserfaserkopfes bei der Einkopplung des Lichtes der Laserdiode am 450 nm Laser festgestellt. Nach 15 Minuten bei 0.78 suns erwärmte sich der Kopf der Laserfaser des 450 nm Lasers ca 50 °C bis 55 °C gemäß eines Temperatursensors. Allerdings war das Herstellen eines thermischen Kontaktes zwischen Sensor und Faserkopf nicht einfach, weshalb die Messung nur einen groben Anhaltspunkt bietet. Laut Hersteller war diese Temperatur dennoch unbedenklich. Gegen Ende des Projektes brannte jedoch an dieser Stelle die Laserfaser durch die thermische

Auswirkung ab, sodass eine Reparatur des Lasers notwendig wurde. Während dieser wurde der Laser neu fokussiert, wodurch das Problem dann tatsächlich behoben werden konnte.

Kalibration der Laserintensität

Ebenfalls durch die Reparatur des Lasers konnte eine gemessene Fluktuation in der Laserintensität behoben werden. Wie Abbildung 45 zeigt, gab es zeitlich starke Abweichungen bei den durch Monitordioden beobachteten Laserintensitäten. Innerhalb von 5 Minuten sank die mittels Monitordioden gemessene Laserintensität des blauen 450 nm Lasers um einige Prozent ab. Interessanter Weise war jedoch die mittels einer Referenzzelle gemessene Laserleistung auf dem Chuck selbst zeitlich relativ konstant. Es konnte schnell ausgeschlossen werden, dass es sich um optische Effekte aufgrund eines Wellenlängendrifts der Peaklaserwellenlänge handelte oder dass es sich um Laserdegradation handelt.

Auch ein thermischer Effekt in der Monitoreinheit konnte weitestgehend ausgeschlossen werden, da zumindest die Außenwand der Monitordiodeneinheit keine nennenswerte Temperaturerhöhung während der Messung zeigte. Dies ist in Abbildung 46 dargestellt. Letzten Endes war das Problem jedoch behoben, nachdem der Laser neu justiert wurde, sodass davon ausgegangen werden muss, dass Streulicht in der Laserfaser durch schlechte Lichteinkopplung die Monitordioden beeinflusste und der thermische Effekt am Laserkopf zu finden war (und nicht in der Monitoreinheit).

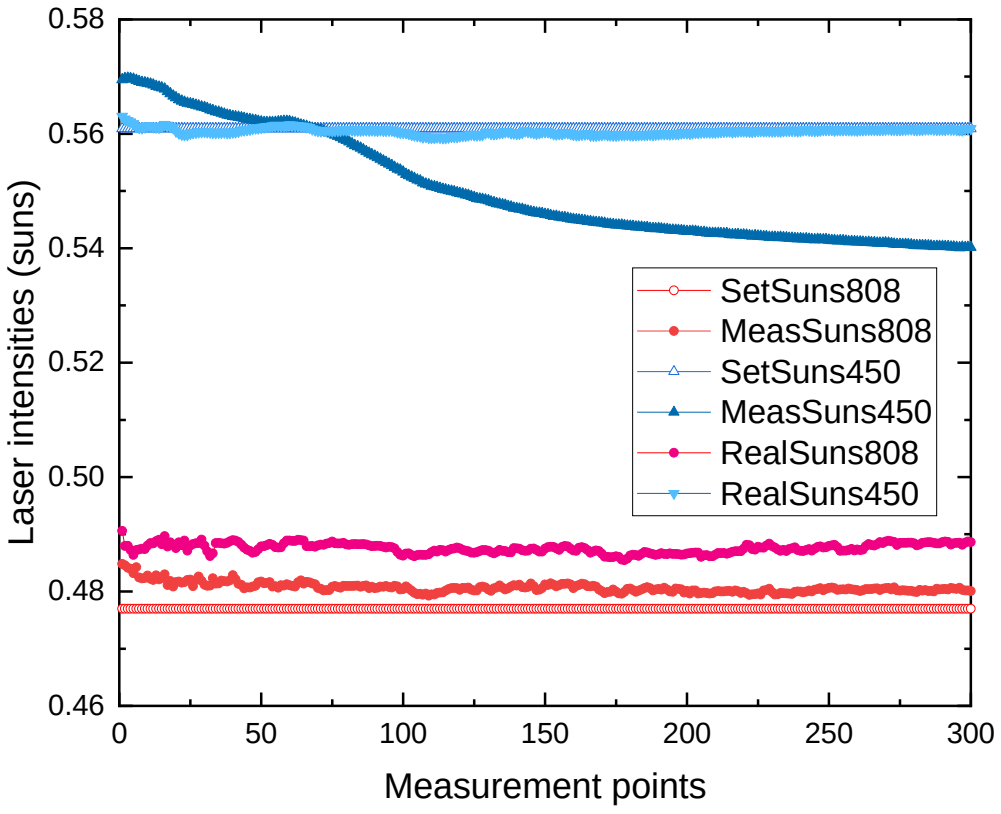


Abbildung 45: Vergleich der eingestellten Laserintensität, der durch die Monitordioden bestimmten Laserintensität und der tatsächlich mittels einer Referenzsolarzelle bestimmten Laserintensitäten. Jeder Messpunkt ist vom nächsten durch eine Pause von ca. 1 sec unterbrochen.

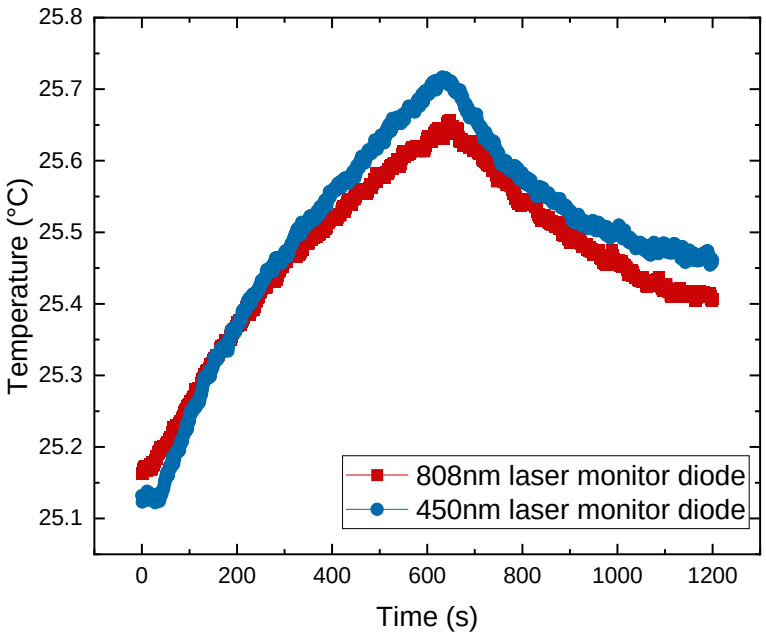


Abbildung 46: Temperaturverlauf des Gehäuses der Monitordioden während der Laseremissionsphase (1. 10 Minuten) und der danach folgenden Abkühlphase.

Nach dieser Reparatur wurden tatsächlich nur noch kleine Abweichungen beobachtete. Über eine 2 cm x 2 cm große Solarzelle kann die im Gerät verbaute Monitordiode (zur Überwachung der Laserleistung) und der benötigte Eingangsstrom am Lasertreiber (zum Erreichen einer eingestellten Laserleistung) geeicht werden. Die Genauigkeit der Eichung wurde zur Einordnung der Messunsicherheiten untersucht. Abbildung 47 zeigt die durch die interne Monitordiode gemessene Laserleistung, sowie die extern auf dem Chuck bestimmte Laserleistung in Abhängigkeit der eingestellten Laserleistung im Bereich niedriger Intensitäten. Es zeigte sich, dass bei dem IR Laser nach einer Eichung eine geringere Leistung erreicht wird, als vorgegeben wird. Diese Abweichung kann durch andere Betriebszustände des Lasers verursacht werden (z.B. abweichende Diodentemperatur nach längerem Betrieb verglichen zur Kalibrierung). Die durch die Monitordiode und durch die extern bestimmte Abweichungen der ursprünglich kalibrierten Laserintensität stimmen aber sehr gut überein, wenn man einen Blick auf die dargestellte Skala wirft. Daher kann diese Abweichung zuverlässig auch nachträglich bei der Auswertung berücksichtigt werden. Im Bereich von Laserintensitäten um 0.01 Sonnen ist ohnehin nur eine gestufte Einstellung der Intensität möglich (siehe Stufen in Abbildung 47). Dies ist ein Effekt des nur stufenweise einstellbaren Laserstroms am Treiber. Zusammengenommen werden für präzise Messungen daher keine Probleme seitens der Laserleistungsbestimmung für niedrige Intensitäten erwartet.

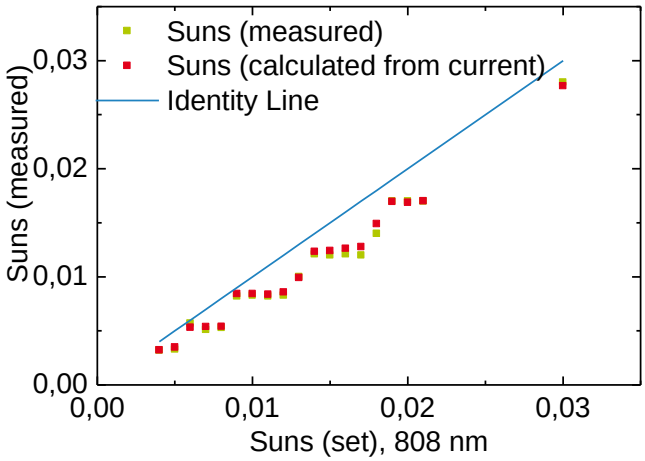


Abbildung 47: Vergleich der intern und extern bestimmten Laserintensität des IR Lasers mit der eingestellten Laserintensität in suns (2.4e17 photonen cm-2s-1).

Auch bei höheren Beleuchtungsstärken wurde die Kalibrierung und zeitliche Stabilität der Leistung überprüft. Es wurden Abweichungen von unter 2 % bei einer 1-Sonnen äquivalenten Beleuchtung nach einer 60 s dauernden Einschwingzeit des Lasers gemessen.

Optische Filter und Artefakte

Bei Photolumineszenzmessungen an Tandemsolarzellen müssen optische Filter zwei Aufgaben erfüllen. Sie müssen das Licht der Laser vor dem Eindringen in die Kamera abhalten und das Lumineszenzsignal der beiden Teilzellen auftrennen können. Wie **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt, funktionierte dies für Silizium und den IR Laser bereits im ersten Versuch sehr gut. Es gibt keine Artefakte im Bild, welche durch gestreutes Laserlicht und einen für das Laserlicht durchlässigen Filter verursacht werden.

Dazu im Gegensatz zeigte die Aufnahme mit dem Perowskitfilterstapels in Abbildung 48 noch ein deutliches Signal von gestreutem Licht des blauen Lasers auf einer Edelstahlplatte. Dieses Störsignal war auf einen Shortpassfilter am Laserausgang zurückzuführen, welcher zu früh bei langen Wellenlängen erneut Licht aus der Laser Lichtquelle transmittiert. Durch Verwendung eines weiteren Kurzpassfilters konnte dieses Problem behoben werden.

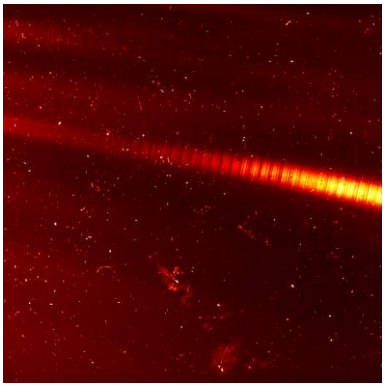


Abbildung 48: Eine Aufnahme einer Edelstahlplatte mit dem Perowskitfilterstack bei blauer Beleuchtung. Es sind deutlich Reflektionen des blauen Lasers erkennbar.

Im Regelfall wird der 808 nm Laser, welcher zur Anregung der Siliziumteilzellen genutzt wird, nicht betrieben, wenn mit dem Perowskitfilter Bildaufnahmen der Perowskitteilzelle gemacht werden. Es kann jedoch vorkommen, dass für elektrisch kontaktierte Messungen auch eine Biasbeleuchtung der

Siliziumteilzelle mit dem 808 nm Laser während Messungen an der Perowskitteilzelle nötig ist. Bei der Verwendung des Perowskitfilters und dem Betrieb des 808 nm Lasers trat zu Beginn ein Artefakt rauf. Es wurde festestellt, dass der 808nm IR Laser auch im kurzwelligen Bereich < 750 nm ein nicht vernachlässigbares Signal aussendet, welches von den Filtern für die Perowskitsolarzellen transmittiert wird (Siehe Abbildung 49). Um die Beleuchtung der Probe mit dem IR Laser bei einer Bildaufnahme mit dem Perowskitfilter zu erlauben, wurde ein weiterer Langpassfilter beschafft, welcher das kurzwellige Licht des IR-Lasers blockiert.

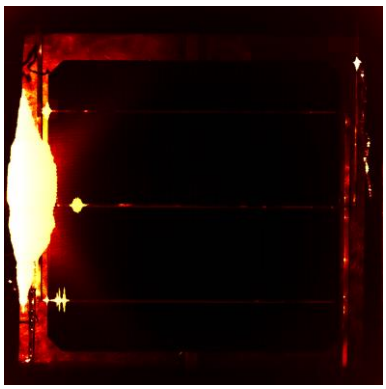
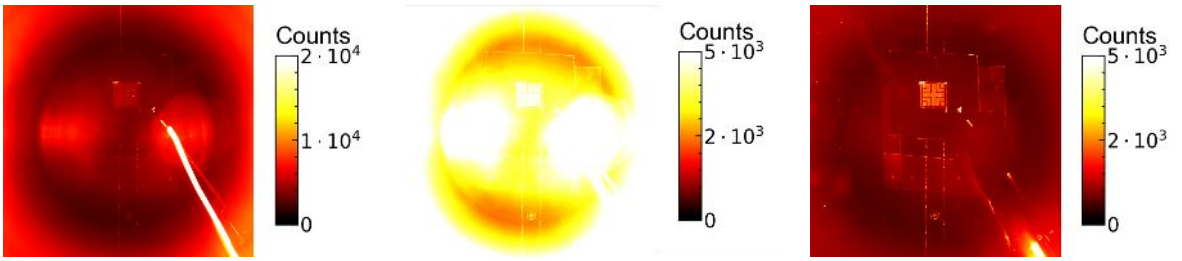


Abbildung 49: Eine Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzelle angeleuchtet durch den IR-Laser. Das Bild wurde mit dem Perowskitfilterstack vor der Kamera aufgenommen. Deutlich zeigt sich links ein Artefakt, welcher durch Streulicht des IR Lasers verursacht wird.

Dadurch wurde das Problem erheblich verkleinert. Wurde jedoch zusätzlich über die Kontakte der Solarzelle Strom extrahiert (und damit das PL-Signal gesenkt), war das Problem des Lichteinfalls vom IR Laser in den Perowskitfilter noch nicht ganz gelöst. Dieser Effekt ist in Abbildung 50:a) bei einer Skalierung von 0 – 20000 counts und b) bei einer Skalierung von 0 – 5000 counts für die gleiche Aufnahme dargestellt. Die Beleuchtungsintensitäten entsprechen in etwa dem 1-Sonnen Äquivalent der jeweiligen Teilzellen. Durch elektrische Kontaktierung wird die Spannung an den Kontakten auf 1.5 V eingestellt, was unter dem V_{oc} des Tandems liegt. Abbildung 50:c) zeigt eine weitere Aufnahme der Zelle mit gleicher Beleuchtung und elektrischem Bias. Allerdings wurde das hell leuchtende Kabel aus a) mit Aluminiumfolie abgedeckt und links von der Probe ein verkippter Spiegel angebracht. Dieser verhindert den Einfall von Licht des 808 nm Lasers, welches auf der linken Seite des Chucks (wo Einfallswinkel ähnlich dem Ausfallswinkel werden) auf der glänzenden Edelstahloberfläche gestreut wird. Im Vergleich zu b) zeigt c) nochmal eine deutliche Verbesserung.

Ohne Spiegel kommt dieser Effekt besonders bei Bildern von kleinen Proben zum Tragen, da für diese Aufnahmen die Kamera näher zum Chuck herangefahren wird und damit der Punkt, wo Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel bei einer direkten Reflexion auf dem Chuck näher an die detektierte Bildfläche heranrückt. Aufgrund der hier erzielten Ergebnisse kann nun bei Messungen mit Biasbeleuchtung durch Einsatz eines Spiegels die Bildqualität maßgeblich gesteigert werden.



a) Bild der Perowskitteilzelle skaliert von 0 – 20000 counts ohne Spiegel.

b) Bild der Perowskitteilzelle skaliert von 0-5000 counts ohne Spiegel.

c) Bild der Perowskitteilzelle skaliert von 0 – 5000 counts mit Spiegel.

Abbildung 50: PL-Bild einer Perowskittopzelle eines Tandems. Die Probe wird mit dem 450 nm und 808 nm Laser gleichzeitig angeregt und durch elektrische Kontaktierung bei einem Arbeitspunkt von 1.5 V gehalten. Dies ist unter dem V_{oc} der Zelle, was das emittierte PL-Signal deutlich mindert. Während a) bei einer Skalierung von 0 – 20000 counts deutlich ein Störsignal des Kabels und einen Kreisrunden Artefakt zeigt, ist die gleiche Aufnahme in b) mit einer Skalierung von 0 – 5000 counts völlig überbelichtet. c) hingegen zeigt eine neue Aufnahme, bei der das Kabel mit Aluminiumfolie abgedeckt wurde und links von der Probe ein Spiegel platziert wurde, um Streustrahlung zu verhindern, eine deutliche Verbesserung. Auch bei einer Skalierung von 0 – 5000 counts ist nur ein leichtes Artefakt sichtbar. Das PL-Signal der Solarzelle wird erstmalig detektierbar.

Unebenheit auf dem Chuck

Leider war der Chuck bei Auslieferung leicht gewölbt. Dies stellt ein Problem dar, da für nicht flexible Proben dadurch die thermische Anbindung an den Chuck unmöglich wird. Verschiedene Lösungsansätze wurden hierzu verfolgt. In einem ersten Ansatz wurde der Einsatz von Wärmeleitpads und Leiterfolien getestet. Es stellte sich jedoch heraus, dass zum einen die Krümmung des Chucks zu groß war, um durch ein flexibles Wärmeleitpad mit einer Dicke von wenigen Millimetern ausgeglichen zu werden. Weder unter Einsatz der Vakuumpumpe noch unter Einsatz von manuellem Druck konnte das Wärmeleitpad in der Mitte des Chucks so weit komprimiert werden, dass überall auf der Probe ein thermischer Kontakt zum Chuck bestand. Daher wurde als Alternativlösung der Chuck ausgebaut und beim Hersteller durch Abschleifen planarisiert. Nach Rückerhalt des Chucks konnten mit einem Lineal und mit bloßem Auge keine Unebenheiten mehr festgestellt werden.

Temperaturhomogenität auf Chuck

Insbesondere für Silizium ist bei präzisen Messungen eine über die gesamte Zelle hinweg homogene Temperatur wichtig. Bei der Konstruktionsplanung wurde daher viel Augenmerk auf eine homogene Temperierung des Chucks gelegt. Wie die Aufnahme einer Wärmebildkamera in Abbildung 51 zeigt, ist dies durchaus gelungen. Die Spezifikation einer Temperaturabweichung von weniger als 1°C über den Chuck hinweg ist erfolgreich eingehalten worden. Auch nach Veränderung der Soll-Temperatur stellt sich sehr schnell eine homogene Temperaturverteilung wieder ein.

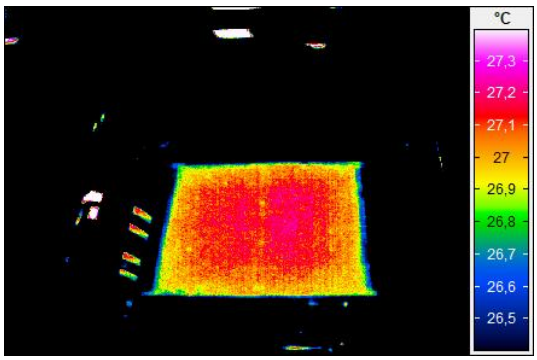


Abbildung 51: Temperaturverteilung auf dem Chuck. 2 Minuten zuvor wurde die Solltemperatur um 4°C angehoben. Kleinere Inhomogenitäten der Temperatur am Rand sind durch eine nicht optimal thermisch angebundene Papierauflageverursacht. Diese Auflage ist nötig, um die Temperatur auf dem stark reflektierenden Edelstahlchuck sichtbar zu machen.

Allerdings zeigte sich in Thermographieaufnahmen eine Verschlechterung der Temperaturhomogenität nach der Planarisierung. Während bei Betrieb mit konstanter Temperatur aufgrund des Kupfers eine homogene Temperaturverteilung erzielt werden konnte, zeigte sich beim Aufheizprozess in Abbildung 52, dass nicht alle 12 Peltierelemente gleichmäßig zum Heizprozess beitragen. Auch dieses Problem konnte jedoch durch eine erneute Reparatur behoben werden. In Abbildung 53 ist der Chuck im Aufwärmvorgang nach Reparatur gezeigt. Während im konstanten Betrieb eine erfreulich homogene Temperaturverteilung mit kleinen Abweichungen erkennbar ist, kann die inhomogene Temperaturverteilung währen des Aufwärmprozesses genutzt werden, um die Funktionalität der Peltierelemente zu überprüfen. Es steht also nun zum Projektende ein planarer Chuck mit homogener Temperaturverteilung zur Verfügung.

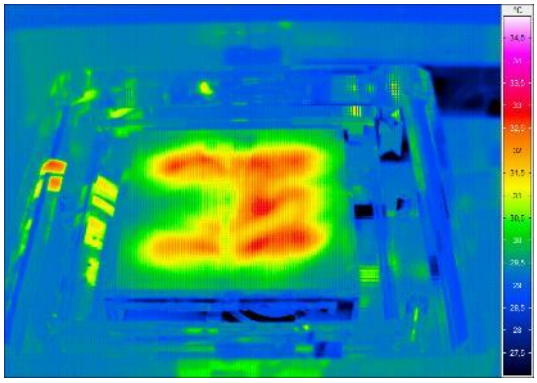


Abbildung 52: Thermographiebild des Chucks während des Aufheizprozesses von 25 °C auf 35 °C.

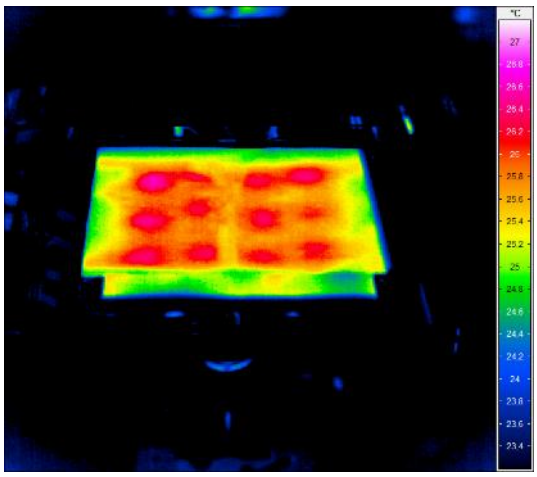
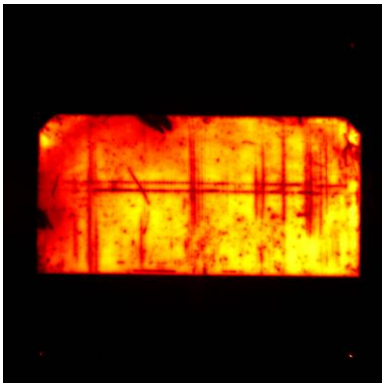


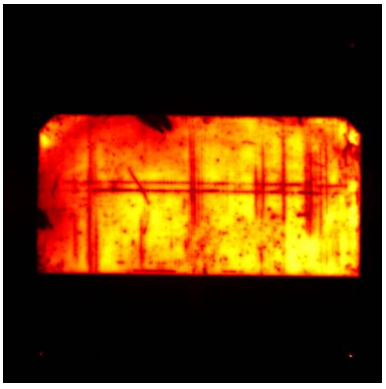
Abbildung 53: Der Messchuck beim Aufheizvorgang. Es ist klar erkennbar, dass alle 12 Peltierelemente in thermischem Kontakt zur Messoberfläche sind und zum Erhitzen beitragen.

Speckling

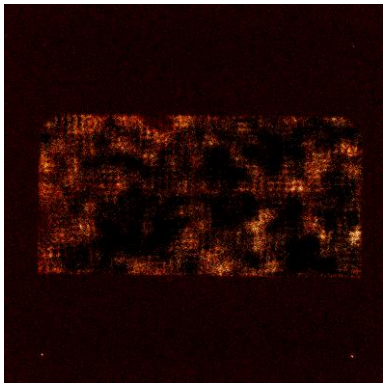
Ein weiteres bekanntes Problem bei Laserbeleuchtung ist das sogenannte Speckling, bei dem Interferenzen zu lokalen Beleuchtungsintensitätsschwankungen führen. Um diesen unerwünschten Effekt zu messen, wurde eine Probe mit geringer Lebensdauer auf den Chuck gelegt. An dieser Probe wurden zwei PL Messungen mithilfe des 808 nm Lasers durchgeführt, wobei zwischen den Messungen an der Faser gewackelt wurde, was typischerweise das Interferenzmuster verschiebt. Entsprechend zeigt das Subtraktionsbild aus beiden Aufnahmen ein Specklingmuster. Beachtet man die Skalierung der Bilder (Originalaufnahme in Abbildung 54a) und b) 0 bis 3000 Counts und Differenzbild in Abbildung 54c) 0 bis 100 Counts), so kann geschlossen werden, dass der Effekt für den 808 nm Laser nicht besonders in Erscheinung tritt.



a) Aufnahme vor Bewegen der Faser. Skalierung 0 bis 3000 Counts.



Aufnahme nach Bewegen der Faser. Skalierung 0 bis 3000 Counts.



Differenzbild. Skalierung 0 bis 100 Counts.

Abbildung 54 Untersuchung des Specklingverhaltens des 808 nm Lasers.

Verbesserung des Kontaktierungskonzeptes für kleine Zellen

Während der Entwicklung von Messverfahren durch die Uni Freiburg, hat sich herausgestellt, dass die Kontaktierung von kleinen 2.5×2.5 cm^2 Substraten nicht optimal im Tandem Modulum funktionierte. Es kam immer wieder vor, dass die Vakuumansaugung das Substrat nicht richtig ansaugen konnte und die elektrische Kontaktierung fehlschlug. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Adapterchuck gebaut. Wie in Abbildung 55 ersichtlich ist, wurde eine kleine Kupferplatte gefertigt, welche über einen eigenen

Vakuumanschluss, einen Kontakt zum Abgriff der Spannung an der Probenrückseite mittels Spanungspinn und einen Stromanschluss verfügt. Durch die dichtere Anordnung von Löchern für die Vakuumansaugung auf der Oberseite des Adapterchucks kann die Vakuumansaugung auch für kleine Proben gewährleistet werden. Der Einbau eines gefederten Spannungspins (bisher war aus Gründen der Wärmeleitfähigkeit eine statische Kontaktierung vorgesehen) sorgt zusätzlich dafür, dass das Substrat einerseits sicher kontaktiert werden kann, andererseits aber auch bei Ansaugung Spaltfrei mit dem Chuck verbunden ist. Die thermische Kontrolle der Probe ist in diesem Konzept etwas schlechter, da die Temperierung durch die Wärmeleitfähigkeit des Kupferblocks und dessen thermische Anbindung an den originalen, großflächigen Messchuck geschieht. Die erwarteten Abweichungen in der Temperatur sind jedoch begrenzt auf wenige Gradcelsius, was für die meisten Messanwendungen an dem Gerät akzeptabel ist. Erste Testmessungen konnten die erfolgreiche Umsetzung dieses neue Kontaktierungskonzeptes für kleine Proben validieren.

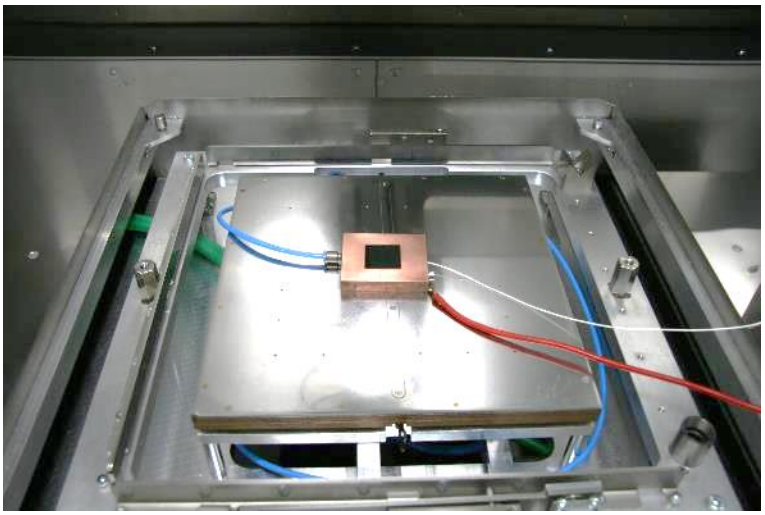
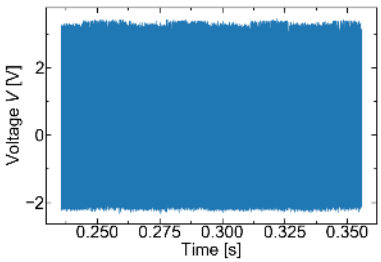


Abbildung 55 Adapterchuck zur Kontaktierung kleiner Proben mit einer Größe von 2.5 x 2.5 cm2.

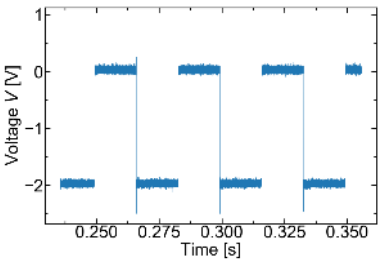
AP3.2: Entwicklung eines Thermographie-basierten Imaging Verfahrens zur lokalen Zellanalyse

Für die Qualitäts- und Homogenitätsanalyse von Tandem Solarzellen stand am ISE ein Thermographiemessstand während der Projektlaufzeit zur Verfügung. Während der Projektlaufzeit wurden insbesondere Zellen im Verdachtsfall untersucht, um lokale Defekte als Ursache für Abweichungen in den globalen Leistungsparametern auszuschließen oder nachzuweisen. Um diesen Messplatz einsatzbereit für die Messungen zu halten, waren einige Reparaturmaßnahmen und Instrument Charakterisierungen nötig.

Zum einen fiel im Projektzeitraum eine Hardwarekomponente der Thermographiekamera aus. Die Kamera wurde entsprechend bei ihrem Hersteller eingesendet und repariert wieder in Betrieb genommen. Zum anderen bestand zwischenzeitlich der Verdacht eines Gerätedefektes, dieser konnte jedoch auf eine besondere Eigenschaft von getesteten Solarzellen zurückgeführt werden. Konkret wurde zu Beginn durch Sense-Kontakte an der Probe die eingestellte Spannung des Anregungssignals am Ausgang der Quelle-Senke so angepasst, dass tatsächlich an der Probe die eingestellte Spannung erreicht wurde. Vermutlich aufgrund von kleinen Kapazitäten in bestimmten Proben führte diese Korrektur jedoch zu einer unkontrollierten Oszillation des stufenförmigen Anregungssignals. Die Quelle-Senke übersteuerte ihr an die Probe angelegtes Signal. Dies ist in Abbildung 56a) dargestellt. Es lässt sich keine Stufenfunktion mehr erkennen. Eingestellt war eine Stufenfunktion mit einer Frequenz von 30 Hz und einer Amplitude von 0.2 V. Erst, als der Sensemode abgeschaltet wurde, konnte wieder eine saubere Stufenfunktion (mit einem anfänglichen Überschwinger, diesmal mit Zielamplitude von 2 V) festgestellt werden, wie in Abbildung 56b) dargestellt. Screenshots des Oszilloskops verdeutlichen diese Problematik in Abbildung 57.

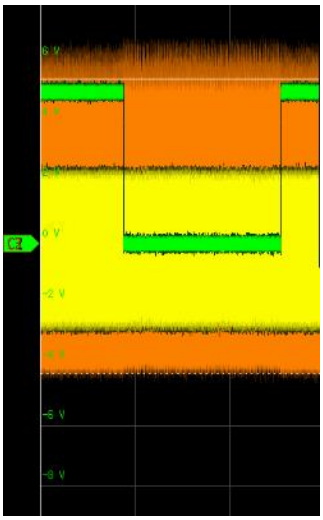


a) Mit Sensemode

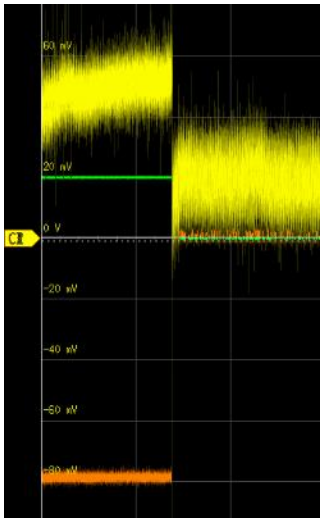


b) Ohne Sensemode

Abbildung 56 Spannungssignal über Probe a) mit und b) ohne Sensemode. Vermutlich aufgrund von kapazitiven Eigenschaften der Probe schlug der Sensemode fehl.



a) Mit Sensemode



b) Ohne Sensemode

Abbildung 57: Taktgebereingangsstufensignal (grün) am Ausgang des Funktionsgenerators, an der Probe durch die Quelle-Senke angelegte Spannung (orange) und die Probe durchfließender Strom (gelb) mit a) eingeschalteter und b) ausgeschaltetem Sensemode. In b) zeigt sich möglicherweise am zu Beginn steigenden Stromfluss, dass die Perowskit-Teilzelle einen transienten Effekt aufweist, durch den bei konstanter gegebener Spannung der Stromfluss zunimmt.

AP3.3: Quantifizierung von lateralen Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemzellen

In diesem Arbeitspaket arbeitete das Fraunhofer ISE nur unterstützend für die Universität Freiburg. Die Ergebnisse sind deshalb im Abschlussbericht der Universität Freiburg enthalten.

AP3.4: Modellierung

Ziel der Modellierung in diesem Projekt war die Untersuchung von großflächigen lateralen Inhomogenitäten einer Tandem Zelle, wofür großflächige elektrische 3D Simulationen notwendig sind. In der ersten Phase des Projekts wurde dafür die Tandem Erweiterung der Software „Quokka3" als Vorabversion dem Fraunhofer ISE zunächst exklusiv zur Verfügung gestellt. In dieser Erweiterung wird die Top-Zelle innerhalb eines sogenannten „lumped skins" als quasi-1D Randbedingung zum 3D Ladungsträgertransport in der Silizium Bottom-Zelle definiert. Die normale „lumped skin" Randbedingung beinhaltet lateralen Transport über den Schichtwiderstand R_{sheet}, effektive Oberflächenrekombination mittels einer Diode J_{0skin}, und einen vertikalen Widerstand ρ_{skin} (z.B. Kontaktwiderstand über ein Tunneloxid). Dies wurde um eine Strom-Spannungs Kennlinie (JV-Kurve) einer Top-Zelle erweitert, welche entweder tabellarisch oder mittels einer

2-Dioden Parametrisierung definiert werden kann. Die JV-Kurve kann entweder durch Messungen oder auch durch andere detaillierte elektro-optische Simulationen ermittelt werden. Die Erweiterung der Randbedingung ist in Abbildung 58 dargestellt.

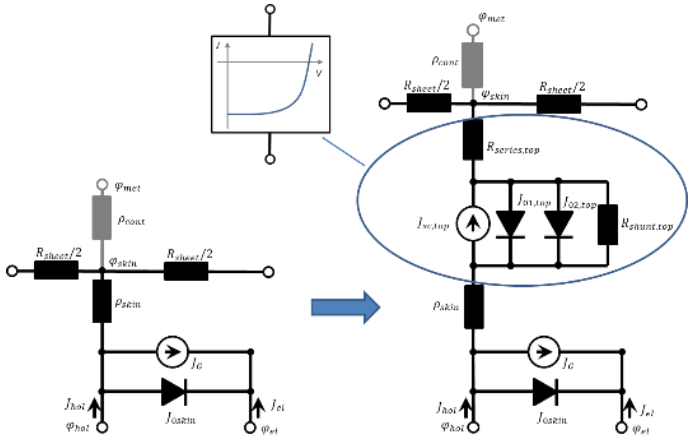


Abbildung 58: Erweiterung der „lumped skin" Randbedingung an den 3D Ladungsträgertransport in der Silizium Bottom-Zelle mittels eines 2-Dioden Modells.

Statt einem konstantem Wert für den Kurzschlussstrom der Top-Zelle $J_{sc,top}$ kann auch die spektrale aktive Absorption in der Top-Zelle in Quokka3 definiert werden, was der Abschattungsfreien EQE der Topzelle entspricht. Dies ermöglicht eine spektrale optische Modellierung der Tandem Zelle in Quokka3, was insbesondere für die Simulation einer EQE-Messung notwendig ist.

Die Definition der Top-Zelle innerhalb der Randbedingung führt wie erhofft dazu, dass sich die Simulationszeiten von Quokka3 nicht stark gegenüber Einfach-Zellen erhöhen. Damit sind, wie angedacht, 3D Tandem Simulationen an großen Geometrien möglich und großflächige Inhomogenitäten in praktikablen Zeitskalen simulierbar.

Für die simulativen Untersuchungen wurde zunächst wurde ein Quokka3 Modell kalibriert welches die am ISE hergestellten Pero-Si Tandem Zellen (~25% Effizienz) repräsentiert. Für die spektralen optischen Eigenschaften konnten die Simulationsergebnisse der Universität Freiburg exportiert werden, welche in diesem Projekt detaillierte optische Simulationen zu diesen Zellen durchgeführt hatte. Die elektrischen Eigenschaften die Silizium Zelle konnten mit Erfahrungswerten hinreichend gut abgeschätzt werden. Die 2-Dioden-Modell Parameter der Pero-Topzelle wurde anschließend so lange angepasst bis eine hinreichende Übereinstimmung mit einer typischen gemessenen IV-Kurve der Tandemzellen erreicht wurde.

Mithilfe dieser 3D Simulationen konnte ein generell verbessertes Verständnis der Tandem-Physik bei dem Projektmitgliedern hergestellt werden, was die Interpretation von Messergebnissen und Planung von Experimenten entscheidend unterstützt hat. Hervorzuheben sind die folgenden 2 Beispiele.

Einfluss lokaler Shunts auf EQE-Messartefakt

Ein häufiges Phänomen in der Messung der EQE einer Mehrfachsolarzelle ist ein durch einen Shuntwiderstand hervorgerufenes Messartefakt, was zu einer Erniedrigung des Signals der zu messenden Teilzelle sowie einem von Null verschiedenem Signal der gefluteten Teilzelle führt. Dieses Artifakt wurde bereits durch 1D Modellierungen erklärt, wodurch auch eine Korrekturprozedur abgeleitet werden konnte. Das zugrunde liegende 1D Modell nimmt dabei jedoch an das der Shuntwiderstand homogen in der Zelle verteilt ist, was aufgrund qualitativer Messungen, z.B. Thermographiemessungen (s. Fischer et al., tandem PV 2022) untypisch ist. Die Fragestellung, welche durch die 3D Simulationen beantwortet werden, soll ist

daher, ob sich durch die Lokalisierung des Shuntwiderstands auch das Ausmaß und die Art des Artefakts ändert, und ob die Korrekturprozedur für diesen Fall funktioniert.

Auf Basis eines Quokka3 Modells der experimentellen ISE Tandemzellen wurde zunächst der homogene Fall, also der 1D Fall, simuliert, siehe Abbildung 58. Man sieht bei Einführung eines homogenen Shuntwiderstands in der Topzelle das erwartete Artefakt für die EQE Messung der Topzelle. Was man auch sehen kann ist dass bei gleichzeitiger Einführung eines hohen Serienwiderstands das Artefakt stark zunimmt. Allerdings nur für die zu messende Topzelle, wohingegen das Artefaktsignal im Langwelligen sich nicht ändert, was bedeutet, dass in diesem Fall die Korrektur nicht gut funktionieren würde.

Im nächsten Schritt wurden 3D Simulationen aufgestellt bei denen der Shuntwiderstand nur in einem Teilbereich der Zelle definiert wurde. Der Wert des Shuntwiderstands wurde dabei in jedem Fall so gewählt dass er einen ähnlichen Einfluss auf die IV-Kurve der Tandemzelle hat. Dies ist daher sinnvoll da man bei Messung einer Zelle nicht weiß wie der Shunt verteilt ist, sondern zunächst in erster Linie nur den Einfluss des Shuntwiderstands auf die IV-Kurve sehen kann. Nun wurde zusätzlich noch die Position des Shuntbereichs variiert, und zwar so dass einmal der Shuntbereich zwischen zwei Metallfingern platziert ist, und im anderen Fall die Metallfinger berührt, siehe Abbildung 60.

In Abbildung 61 kann man sehen dass die Lokalisierung des Shuntwiderstands einen starken Einfluss auf die Höhe und die Art des Artefakts hat, obwohl der Einfluss auf die IV-Kurve sehr ähnlich ist. Insbesondere ändert sich auch die Signalstärke im Kurzwelligen relativ zum Langwelligen. Dies führt zu substantiellen Fehlern in der Anwendung der Korrektur auf Basis des homogenen Modells. Bei Verdacht auf lokale Shuntwiderstände sollte man der Korrekturprozedur des EQE Artefakts also nicht vertrauen.

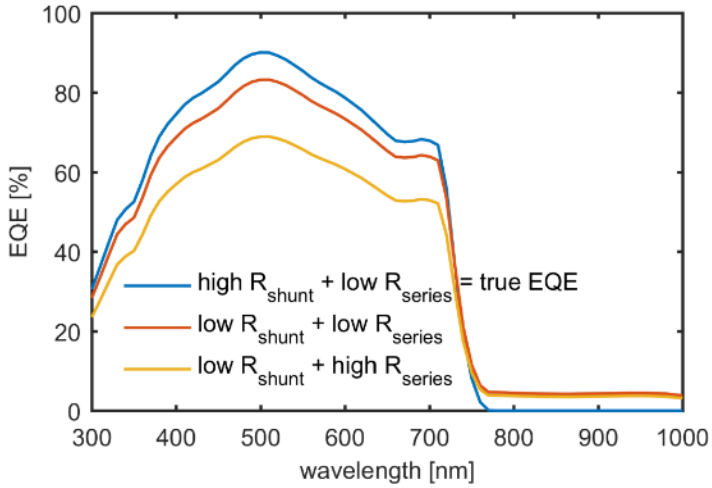


Abbildung 59: 1D Quokka3 Simulation der Topzellen-EQE mit verschiedenen Kombinationen von Shunt- und Serienwiderständen in der Topzelle, welche ein bekanntes EQE Artifakt zeigen.

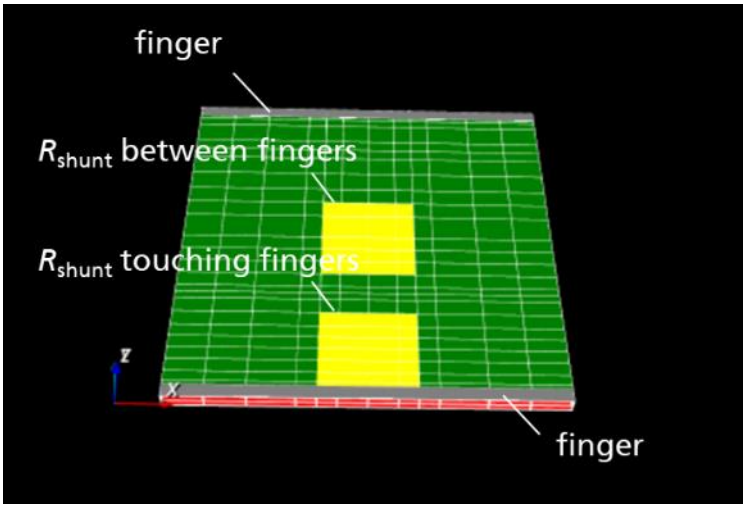


Abbildung 60: 3D Quokka3 Modell einer Tandemzelle bei dem eine niedriger Shuntwiderstand nur in jeweils einem Teilbereich der Topzelle definiert wurde.

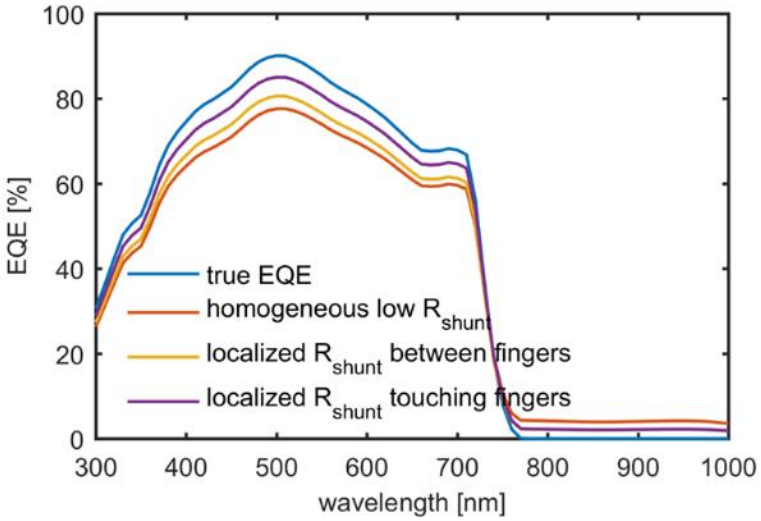


Abbildung 61: Simuliertes EQE-Artefakt für einen homogenen Shuntwiderstand, sowie für einen lokalen Shuntwiderstand platziert zwischen bzw. an den Metallfingern.

Erklärung lokal inverser EL vs. PL-Kontrast

Das erstellte 3D-Modell einer Perowskit-Silizium Tandemzellen in Quokka3 wurde dazu verwendet inhomogene EL- und PL-Messdaten mit nicht intuitiv verständlichen Merkmalen zu interpretieren. Die Messungen, welche vom Projektpartner Universität Freiburg durchgeführt wurden und dort berichtet werden, weisen neben anderen Inhomogenitäten wie Shunts regelmäßig ein weiteres besonderes Merkmal auf, welches durch einen stark entgegengesetzten Kontrast in PL und EL charakterisiert ist. Ein Beispiel ist in Abbildung 62 dargestellt.

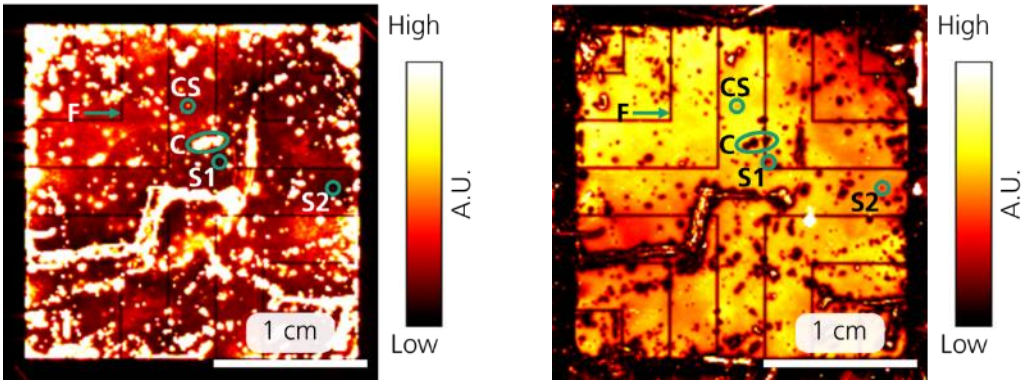


Abbildung 62: EL (links) und PL (rechts) Bild einer Perowskit-Tandem Zelle mit Inhomogenitäten, gemessen beim Projektpartner Universität Freiburg; Bereich „C" weist beispielhaft ein stark erhöhtes EL Signal und gleichzeitig stark erniedrigtes PL-Signal auf was nicht intuitiv verständlich ist

Als möglicher Erklärungsansatz wird vermutet, dass die Kontakteigenschaften zwischen der Perowskitschicht und der C60-Schicht lateral variieren. Dies liegt nahe, da aus mikroskopischen Messungen bekannt ist, dass diese Grenzfläche mechanisch instabil ist und zu Ablösungen neigt. Weiterhin ist bekannt, dass die C60-Schicht für einen guten ohmschen Kontakt einerseits notwendig ist, anderseits auch die Spannung erniedrigt. Die Hypothese ist deshalb, dass im Bereich „C" ein direkterer Kontakt zwischen C60 und Perowksit ausgebildet ist, welcher einen besseren ohmschen Kontakt und damit ein höheres EL Signal verursacht, und gleichzeitig zu höherer Oberflächenrekombination und damit niedrigerer Spannung und PL-Signal führt. Unklar ist, ob diese vermuteten Eigenschaften quantitativ die starken gegensätzlichen Kontraste erklären können, die „Schärfe" des beobachteten Kontrasts erklären können, da die starke laterale Leitfähigkeit verschiedener Schichten der Solarzelle üblicherweise zu starken Verschmierungen und damit Bildunschärfen führt, und die Kontakteigenschaften, welche für die Ausbildung der starken Kontraste notwendig sind, konsistent mit einer weiterhin moderat guten Effizienz der Solarzelle (>~20%) sind.

Zum Testen der Hypothese wurde daher Simulationsmodell der Tandemzelle in Quokka3 aufgestellt, welches einen repräsentativen Bereich mit dem vermuteten lokalen Merkmal mit geänderten Kontakteigenschaften enthält, siehe Abbildung 63.

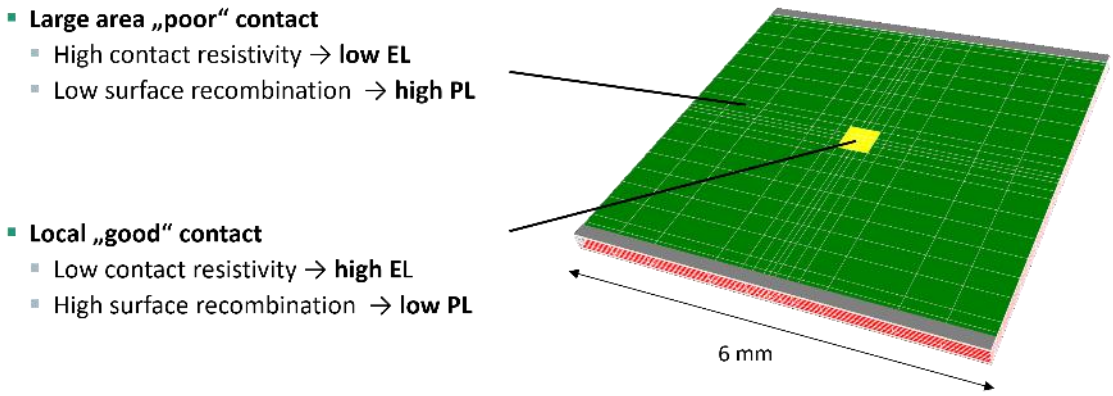


*Abbildung 63: 3D Domäne der in Quokka3 simulierten Tandemzelle mit einem lokalem Merkmal mit geänderten Kontakteigenschaften; die Größe der Domäne und des lokalen Merkmals wurden so gewählt dass sie näherungsweise dem Flächenverhältnis aus der Messung entspricht (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)*

Ein zur Messung vergleichbarer PL-Kontrast konnte erzielt werden, indem der effektive Rekombinationsparameter der Topzelle J_{01} von $4 \cdot 10^{-21}\,\mathrm{A\,cm^{-2}}$ in der Fläche auf $4 \cdot 10^{-20}\,\mathrm{A\,cm^{-2}}$ im Bereich „C" erhöht wurde, siehe Abbildung 64 rechts. Gleichzeitig konnte auch ein zur Messung vergleichbarer EL Kontrast erzielt werden, indem der Kontaktwiderstand im Bereich „C" vernachlässigbar

klein, und in der Fläche ein relativ hoher Wert von 10 Ωcm² gewählt wurde, siehe Abbildung 64 links. Dort wird der Spannungsabfall durch die weiterhin vorhandene erhöhte Rekombination durch den besseren Kontaktwiderstand überkompensiert. Aus Abbildung 64 ist weiterhin ersichtlich, dass der Kontrast sowohl im EL- als auch PL-Fall, trotz voller Berücksichtigung von lateralem Transport in der 3D Simulation, kaum Unschärfe aufzeigt, was konsistent mit der Messung ist. Erklärt werden kann dies durch die speziellen Umstände einer Messung der Topzelle innerhalb einer Tandemzelle, was im Vergleich zu einer Messung an typischen Einzelzellen den lateralen Transport von einem Ladungsträgertyp effektiv unterdrückt.

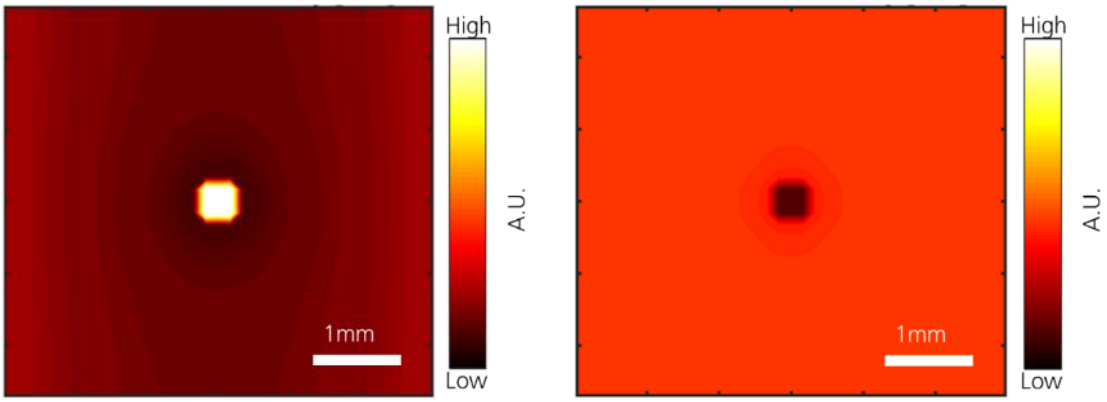


Abbildung 64: Mit Quokka3 simuliertes EL (links) und PL (rechts) Bild mit den im Text genannten inhomogenen Kontakteigenschaften

Zuletzt wurde mit den so festgelegten inhomogenen Kontakteigenschaften die Effizienz der Tandemzelle simuliert. Es stellte sich heraus, dass im Vergleich zu einer hypothetischen Referenz mit homogen guten Kontakteigenschaften der Effizienzverlust mit wenigen $\%_{abs}$ moderat ist, was ebenfalls konsistent mit der gemessenen Zelleffizienz von immer noch >~20% ist.

Zusammenfassend konnten alle offenen Fragen bezüglich der Hypothese anhand der Simulation positiv beantwortet werden, was die vermutete Inhomogenität des C60-Perowkit Kontaktes als eine plausible Ursache für die beobachteten EL- und PL-Merkmale validiert.

2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Das Projekt unterstützte eine vielversprechende neuartige PV-Technologie mit hohem Potential, die sich noch am Übergang zur industriellen Produktion im größeren Maßstab befindet. Die als notwendig erachtete Unterstützung durch Bereitstellung geeigneter Rahmenbedingungen im Kalibrierbereich und den begleitenden Analyse- und Simulationsverfahren war nur durch eine Förderung aus öffentlichen Mitteln zu erreichen. Die beteiligten Industrieunternehmen halfen durch ihre Zufinanzierungsbeiträge im Rahmen ihrer wirtschaftlichen Möglichkeiten, die aber nicht ausreichten für den hohen Aufwand zur Bereitstellung verlässlicher präziser Messkonzepte, die für die Kalibrierung notwendig sind.
Die Arbeiten, die für die Erreichung der Ziele dieses Projekts notwendig waren, waren so umfangreich, dass sie nicht im Rahmen von technologisch orientierten Zellentwicklungsprojekten begleitend durchgeführt werden konnten. Es war deshalb notwendig, im Rahmen der BMWi-Forschungsförderung die benötigten Gelder zu beantragen.
Eine Förderung des Projektes durch die EU war nicht möglich, da zum damaligen Zeitpunkt keine passenden Ausschreibungen existierten und das Konsortium sich rein national aufstellt, so dass die Mindestanforderung von drei beteiligten EU-Ländern nicht erfüllt wäre. Diese nationale Ausrichtung stellte sicher, dass sich durch die öffentliche Finanzierung ein ebenfalls nationaler Wettbewerbsvorteil erreichen ließ.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch das Projekt KATANA ist aus einem ersten LED-Modulsimulator-Messsystems ein neues Messkonzept entstanden, das zukünftig hochpräzise Messungen für einen größeren Kundenkreis ermöglicht. WAVELABS erhält hier aus der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE eine führende Marktposition. Der intensive fachliche Austausch mit Wissenschaftlern des Fraunhofer ISE zu technischen Fragen zur Funktion, Optimierung und Weiterentwicklung des LED-Simulators führte auch zu einer Know-How-Erhöhung beim Industriepartner, der für die weitere Produktentwicklung eine wichtige Grundlage ist.

Durch das Projekt konnte am Fraunhofer ISE eine weltweit einzigartige Möglichkeit zur unabhängigen Bewertung von Perowskit-Silizium-Tandemmodulen aufgebaut werden. Davon profitieren Unternehmen wie Oxford PV oder auch Qcells, die nun ihre Produkte unabhängig beurteilen lassen können und im Markt gegenüber Wettbewerbern und Kunden positionieren können. Das Fraunhofer ISE konnte sich durch das Projekt eine führende Position für die präzise Messung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen erarbeiten und kann nun im Rahmen des Kalibrierlabors anderen Unternehmen Kalibrierungen anbieten. Insgesamt ist damit nun ein objektiver Vergleich verschiedener Zell- und Modultechnologien möglich, der deren zielgerichtete und ressourcenoptimierte Weiterentwicklung unterstützt.

Die im Projekt etablierte kamerabasierte ortsaufgelöste Analyse von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen ist eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Forschung zu dieser Technologie am Fraunhofer ISE. Neben Arbeiten zur weiteren Erhöhung des Wirkungsgrads betrifft dies auch geplante Arbeiten zur Hochskalierung der Zelltechnologie und zur Erhöhung der Zellstabilität.

Der Simulationsansatz mittels Quokka3 zum Verständnis sowohl der Tandem-Zellphysik als auch des Einflusses von Zelleigenschaften auf Messdaten ausgesuchter Messkonzepte stellt einen deutlichen Fortschritt dar, der in zukünftigen Forschungsarbeiten zur Zelloptimierung und zur Messtechnikentwicklung zur Verfügung steht.

Im Projekt arbeiteten zwei Doktoranden und ein Masterand an zentralen Aufgaben und wurden in Zusammenarbeit mit den anderen, im Projekt beschäftigten Wissenschaftlern, intensiv ausgebildet.

2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Kalibrierung von Solarzellen
In einer Arbeit von Song et al.:
T. Song, C. Mack, R. Williams, D. J. Friedman, and N. Kopidakis, "How Should Researchers Measure Perovskite-Based Monolithic Multijunction Solar Cells' Performance? A Calibration Lab's Perspective," Sol. RRL, p. 2200800, 2022, doi: 10.1002/solr.202200800.
werden verschiedene IV-Messansätze diskutiert. Es werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die sich am besten für die Qualitätskontrolle in Produktionslinien, für F&E-Prüflabore und für Leistungstests mit geringer Unsicherheit in akkreditierten Kalibrierlabors eignen.
Die Arbeit der Autoren des NREL-Kalibrierlabors schließt eine Messroutine für akkreditierte Kalibrierlabore ein, die dem im Katana-Projekt am Fraunhofer ISE Callab PV Cells entwickelten Verfahren ähnlich ist. Nach der ersten EQE-Messung wird die spektrale Einstrahlung des Sonnensimulators für jede zu prüfende Probe individuell berechnet. Für die Wirkungsgradbestimmung wird eine stabilisierte Messung empfohlen, wie z.B. asymptotische IV oder MPPT. Das CalLab PV Cells ist im regelmäßigen Austausch mit diesem Labor, um gemeinsam beste Vergleichbarkeit der Messungen sicherzustellen.

Eine Arbeit von Kopidakis et al.:
N. Kopidakis et al., "Evaluation of an LED simulator for single- and multi-junction PV cell performance testing," in 2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC): 5-10 June 2022, Philadelphia, PA, USA, 2022, pp. 814–818.

Beschäftigt sich mit einer Evaluation eines LED-basierten Sonnensimulators im NREL-Kalibrierlabor. Es wird gezeigt, dass die Qualität der Ausrüstung für die Kalibrierung von kleinen Mehrfachsolarzellen gut geeignet ist.
Die Ergebnisse in diesem Artikel, der von den Autoren des NREL-Kalibrierlabors verfasst wurde, zeigen, dass der dort verwendete Solar-LED-Simulator "Sunbrick" von G2V Optics am NREL, USA, nur für die Kalibrierung von kleinen Mehrfachsolarzellen gut funktioniert. Es zeigt jedoch eine hohe Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke, wenn der gesamte Beleuchtungsbereich verwendet wird. Er ist nicht für die Kalibrierung großer industrieller Tandem-Solarzellen geeignet.

Kalibrierung von Modulen
Hier sind keine relevanten Aktivitäten außerhalb des Konsortiums bekannt.

Analysemethoden
Verschiedene Forschergruppen arbeiteten an der Analyse von Perowskit-Siliizium-Tandemsolarzellen. Für das KATANA-Projekt relevante Arbeiten sind an der UNSW entstanden:
Soufiani, A. M., Lee-Chin, R., Fassl, P., Mahmud, M. A., Pollard, M. E., Zheng, J., ... & Hameiri, Z. (2023). Implied open-circuit voltage imaging via a single bandpass filter method—its first application in perovskite solar cells. Advanced Functional Materials, 33(3), 2210592.

Im Projekt KATANA konnten diese Ergebnisse direkt aufgenommen werden und haben zu einer deutlich verbesserten und für Tandemsolarzellen kompatiblen Messmethode geführt, die wir selbst im Rahmen des Projekts veröffentlichen konnten:
Fischer, O., Bui, A. D., Schindler, F., Macdonald, D., Glunz, S. W., Nguyen, H. T., & Schubert, M. C. (2023). Versatile implied open-circuit voltage imaging method and its application in monolithic tandem solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

Simulationsmethoden
Viele Arbeitsgruppen arbeiten generell an der Modellierung und Simulation von Tandemsolarzellen. Die überwiegende Mehrheit fokussiert sich dabei auf eine detaillierte Beschreibung der Optik und Elektrik in einer Dimension, unter anderem auch der Projektpartner Universität Freiburg innerhalb dieses Projekts. Der Fokus des Fraunhofer ISE in diesem Projekt lag jedoch auf der mehrdimensionalen Beschreibung, also auf der Beschreibung lateraler Effekte, insbesondere großskaliger lateraler Inhomogenitäten. Hierzu sind nur sehr wenige Arbeiten außerhalb des ISE bekannt.
Nennenswert ist die Arbeit der EPFL zur Modellierung lokaler Shunt-Defekte in Tandemsolarzellen, welche kurz nach Projektbeginn veröffentlicht wurde:
Blaga, Claire; Christmann, Gabriel; Boccard, Mathieu; Ballif, Christophe; Nicolay, Sylvain; Kamino, Brett A. (2021): Palliating the efficiency loss due to shunting in perovskite/silicon tandem solar cells through modifying the resistive properties of the recombination junction. In Sustainable Energy Fuels 5 (7), pp. 2036–2045. DOI: 10.1039/D1SE00030F.
Hier wurden mittels eines manuell aufgestellten Netzwerkmodells laterale elektrische Transporteffekte erfolgreich simuliert. Dies ist jedoch im Vergleich zur Software Quokka3, welche in diesem Projekt für ähnliche Ziele verwendet wurde, als wesentlich rudimentärer und unflexibler zu bewerten.

Nennenswert ist weiterhin, dass die Netzwerkmodell-basierte Simulationssoftware für Solarzellen „Griddler“ (www.griddlersolar.com) gegen Ende des Projekts um eine Tandemfunktionalität erweitert wurde, womit nun ebenfalls großskalige 3D-Simulationen von Tandemsolarzellen durchführbar sind. Dies zeigt die Relevanz des Themas. Veröffentlichte Arbeiten mit dieser Software sind jedoch zum Zeitpunkt des Berichts noch nicht bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen sind bereits im Rahmen des Projekts erfolgt:

1. Fell, A., Schultz-Wittmann, O., Messmer, C., Schubert, M. C., & Glunz, S. W. (2022). Combining drift-diffusion and equivalent-circuit models for efficient 3D tandem solar cell simulations. IEEE Journal of Photovoltaics, 12(6), 1469-1476.

2. Messmer, C., Schön, J., Würfel, U., Schulze, P. S., Schubert, M. C., Bivour, M., ... & Hermle, M. (2022). Efficient Charge Carrier Extraction in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells Investigated by Numerical Simulation.

3. Schultz-Wittmann, O., Schulze, P. S. C., Er-Raji, O., Efinger, R., Kabaklı, Ö. Ş., Heydarian, M., ... & Glunz, S. W. (2022). Upscaling of Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells. In Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (pp. 354-357).

4. Reichmuth, S. K., Fell, A., Siefer, G., Schachtner, M., Chojniak, D., Fischer, O., ... & Schubert, M. C. (2022). Impact of Lateral Effects on EQE Measurements of Large Scale Tandem Solar Cells.

5. Fischer, O., Bui, A. D., Schindler, F., Macdonald, D., Glunz, S. W., Nguyen, H. T., & Schubert, M. C. (2023). Versatile implied open-circuit voltage imaging method and its application in monolithic tandem solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

6. Chojniak, D., Bett, A. J., Hohl-Ebinger, J., Reichmuth, S. K., Schachtner, M., & Siefer, G. (2023, June). LED solar simulators–A spectral adjustment procedure for tandem solar cells. In AIP Conference proceedings (Vol. 2826, No. 1). AIP Publishing.

7. Bett, A. J., Chojniak, D., Schachtner, M., Reichmuth, S. K., Schulze, P. S., Kabakli, Ö. S., ... & Schubert, M. C. (2023, June). Spectrometric determination of current matching in perovskite/silicon tandem solar cells. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2826, No. 1). AIP Publishing.

8. Bett, A. J., Chojniak, D., Schachtner, M., Reichmuth, S. K., Kabaklı, Ö. Ş., Schulze, P. S., ... & Schubert, M. C. (2023). Spectrometric characterization of monolithic perovskite/silicon tandem solar cells. Solar RRL, 7(2), 2200948.

9. Fischer, O., Fell, A., Messmer, C., Efinger, R., Schindler, F., Glunz, S. W., & Schubert, M. C. (2023). Understanding contact nonuniformities at interfaces in perovskite silicon tandem solar cells using luminescence imaging, lock-in thermography, and 2D/3D simulations. Solar RRL, 7(19), 2300249.

10. Heydarian, M., Messmer, C., Bett, A. J., Heydarian, M., Chojniak, D., Kabaklı, Ö. Ş., ... & Schulze, P. S. (2023). Maximizing current density in monolithic perovskite silicon tandem solar cells. Solar RRL, 7(7), 2200930.

11. Steiner, M., & Siefer, G. (2023). Translation of outdoor tandem PV module I–V measurements to a STC power rating. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31(8), 862-869.

12. Er-Raji, O., Messmer, C., Bett, A. J., Fischer, O., Reichmuth, S. K., Schindler, F., ... & Glunz, S. W. (2023). Loss Analysis of Fully-Textured Perovskite Silicon Tandem Solar Cells: Characterization Methods and Simulation toward the Practical Efficiency Potential. Solar RRL, 7(24), 2300659.

13. Messmer, C., Chojniak, D., Bett, A. J., Reichmuth, S. K., Hohl-Ebinger, J., Bivour, M., ... & Glunz, S. W. (2024). Toward more reliable measurement procedures of perovskite-silicon tandem solar cells: The role of transient device effects and measurement conditions. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

Außerdem befinden sich folgende Veröffentlichungen in der Vorbereitung:

Chojniak et al., Quantifying the Rear Side Contribution in Bifacial Tandem Photovoltaic Devices (Submitted to Energy & Environmental Science)

Chojniak et al., Measuring the External Quantum Efficiency of Tandem-Photovoltaic Modules Using an LED-Based Solar Simulator (Submitted to Solar RRL)

Chojniak et al., Precise Efficiency Determination of Large Area Perovskite on Silicon Tandem Modules – Insights from a Calibration Laboratories Perspective (to be submitted)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Öffentlicher Schlussbericht

3. Titel

KATANA - Kalibrierung großflächiger Tandem Solarzellen und -module für den industriellen Perowskit- Silizium-Markteintritt
Teilprojekt 1: “Entwicklung von Kalibrierverfahren auf Zell- und Modulebene”

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens
Dr. Martin Schubert, David Chojniak, Dr. Jochen Hohl-Ebinger, Dr. Gerald Siefer, Dr. Andreas Fell	31.01.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 21.11.2025
	7. Form der Publikation Schlussbericht

8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
Fraunhofer ISE Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg	10. Förderkennzeichen 03EE1087A
	11. Seitenzahl 80

12. Fördernde Institution (Name, Adresse)	13. Literaturangaben 23 zzgl. 16 eigene, neue Paper
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 64

16. Zusätzliche Angaben

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

Projektträger Jülich

18. Kurzfassung

Im Projekt Katana bündelten die international anerkannten Kalibrierlabore für Solarzellen und Module des Fraunhofer ISE ihre Kompetenzen zur Entwicklung eines neuen Kalibrierverfahrens als neuen Standard zur Effizienzbestimmung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und -modulen mit hoher Genauigkeit. Es wurden Analysewerkzeuge entwickelt, die kalibrierte Wirkungsgradbestimmungen und in der Folge systematische Prozessoptimierungen ermöglichen.
Um das Verständnis einer Skalierung der Solarzellen hin zu größeren Flächen bis zum Modul zu begleiten, kamen zudem kamerabasierte Messverfahren (Lumineszenz, Thermographie) zum Einsatz.
Diese Analyse wurde ergänzt durch Simulationen als Absicherung der Kalibrierverfahren. So konnten Messunsicherheiten identifiziert- und Lösungsansätze gefunden werden.

19. Schlagwörter
Kalibrierung, Perowskit-Silizium-Tandem, Solarzellen, Module, Photolumineszenz-Imaging, Simulation

20. Verlag	21. Preis