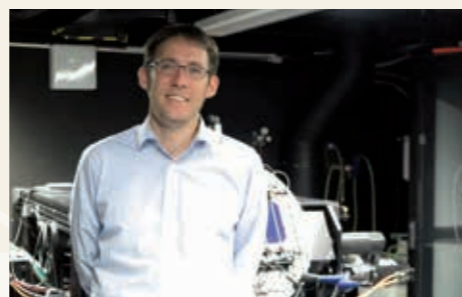


DR. INGO KRÖGER

SPEKTRALE MESSVERFAHREN FÜR DIE PHOTOVOLTAIK



Nach dem Abitur 2000 studierte Ingo Kröger Physik zunächst an der Universität Rostock und später dann an der Universität Würzburg, wo er eine Diplomarbeit über Strukturuntersuchungen von organischen Adsorbatsystemen mittels Elektronenbeugung erstellte. Für diese Diplomarbeit erhielt er 2007 den Röntgen Studienpreis der Universität Würzburg. Von 2007–2011 promovierte er an der Universität Würzburg über die „Adsorption von Phthalocyaninen auf Edelmetalloberflächen“. Seit 2011 arbeitet Ingo Kröger in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in der Arbeitsgruppe Solarzellen und ist dort für die wissenschaftliche Betreuung der Spektromessplätze verantwortlich, an denen unter anderem die hochgenauen Kalibrierungen von Referenzsolarzellen durchgeführt werden. Die Forschungsschwerpunkte liegen in der Weiterentwicklung spektraler Messverfahren für die Solarzellenmetrologie.

1. Metrologische Rückführung in der Photovoltaik

Die Photovoltaik hat sich als Technologie zur regenerativen Energieerzeugung weltweit durchgesetzt mit jährlich ansteigenden Installationszahlen. So wurden im Jahr 2014 weltweit Module mit einer nominellen Gesamtleistung von ca. 40 GWp installiert [1], was einem Marktwert in der Größenordnung von einigen Milliarden Euro entspricht. Die gesamte Wertschöpfungskette der Photovoltaik hat sich dabei in den letzten Jahren global verteilt vom europäischen über den asiatischen bis hin zum amerikanischen Kontinent.

Um die Vergleichbarkeit von weltweit produzierten und vertriebenen Photovoltaikmodulen zu gewährleisten ist entsprechend dem Wachstum des PV Marktes auch eine Kalibrier- und Prüfinfrastruktur entstanden. Grundlage dieser ist unter anderem die IEC Norm 60904-3, die die Einstrahlungsbedingungen definiert, unter denen die wesentlichen elektrischen Leistungsparameter (Wirkungsgrad η , maximale elektrische Leistung P_{Max} , Füllfaktor FF , Leerlaufspannung U_{OC} und Kurzschlussstrom I_{SC}) von Solarmodulen und Solarzellen gemessen werden müssen. Dies sind die sogenannten Standard Testbedingungen (STC):
Gesamtbestrahlungsstärke: 1.000 W/m²
Spektrum: AM 1.5 g
Modultemperatur: 25 °C

Die für die Rückführung relevanteste Messgröße ist der Kurzschlussstrom unter Standard Testbedingungen I_{STC} , da der Photostrom über die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle direkt mit der Bestrahlungsstärke und dem Spektrum korreliert ist. Die Rückführung dieser Messgröße auf die SI-Basis-einheiten erfolgt von der produzierenden Industrie über Prüf- und Kalibrierlabore hin zu den weltweit vier Instituten, die sich über einen internationalen Vergleich qualifiziert haben, die World Photovoltaic Scale (WPVS) über primäre Kalibrierungen zu realisieren und weiterzugeben. Diese vier Labore sind die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Deutschland), das National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA), das National Institute of Advances Industrial

Kurzzusammenfassung:

Die Arbeitsgruppe „Solarzellen“ der PTB trägt durch seinen Status als World Photovoltaic Scale (WPVS) qualifiziertes Kalibrierlabor mit den bislang geringsten Messunsicherheiten eine hohe Verantwortung für die internationale Rückführung in der Photovoltaik. Es wurde ein neuartiger laserbasierter Spektromessplatz aufgebaut, der die Kalibrierung von Referenzsolarzellen mit einer erweiterten Unsicherheit von < 0.4 % ermöglicht. Das ist die bislang geringste erreichte Messunsicherheit weltweit. Darüber hinaus ermöglicht dieser Messplatz die hochgenaue Charakterisierung der spektralen Winkelabhängigkeit, Linearität und Temperaturabhängigkeit von Solarzellen, sowie die Kalibrierung von großen Solarzellen bis zu einer Größe von 6 Zoll.

FORSCHUNGSBEITRAG ZUR PHOTOVOLTAIK METROLOGIE

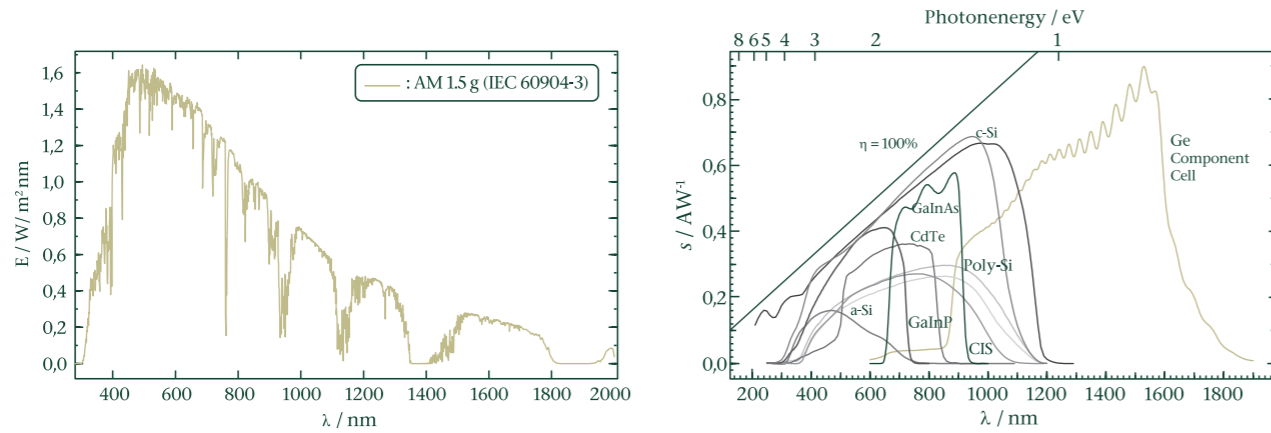


Abbildung 1: Das Zusammenwirken von spektraler Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ der Lichtquelle und spektraler Empfindlichkeit $s(\lambda)$ der Solarzelle führt zum generierten Photostrom.

Science and Technology (AIST, Japan) und das Tianjin Institute of Power Sources (TIPS, China). Die PTB wendet zur Kalibrierung von Referenzsolarzellen das differential spectral responsivity (DSR) Verfahren an und erreicht mit diesem Verfahren die bislang geringsten Messunsicherheiten.

2. Spektrale und integrale Messverfahren in der Photovoltaik

Die Messverfahren in der Photovoltaik können in integrale und spektrale Messverfahren unterteilt werden. Der grundsätzliche Unterschied dieser Messverfahren zeigt sich in dem Zusammenspiel von spektraler Bestrahlungsstärke der Lichtquelle und spektraler Empfindlichkeit der Solarzelle (siehe Abbildung 1). Die spektrale Bestrah-

lungsstärke $E(\lambda)$ beschreibt die Verteilung der Photonen unterschiedlicher Wellenlänge im Spektrum der Lichtquelle. Die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ der Solarzelle beschreibt die wellenlängenabhängige Konversionseffizienz der Photonen in elektrischen Strom. Bildet man das Produkt der beiden Funktionen und integriert über alle Wellenlängen, so erhält man den generierten Photostrom I_{sc} .

2.1 Integrale Messverfahren

Bei den integralen Messverfahren wird versucht eine Lichtquelle mit AM 1.5 g Spektrum und 1.000 W/m^2 möglichst ideal nachzubilden, die Solarzelle damit zu bestrahlen und den Kurzschlussstrom und die Kennlinien direkt zu messen. Solche Sonnensimu-

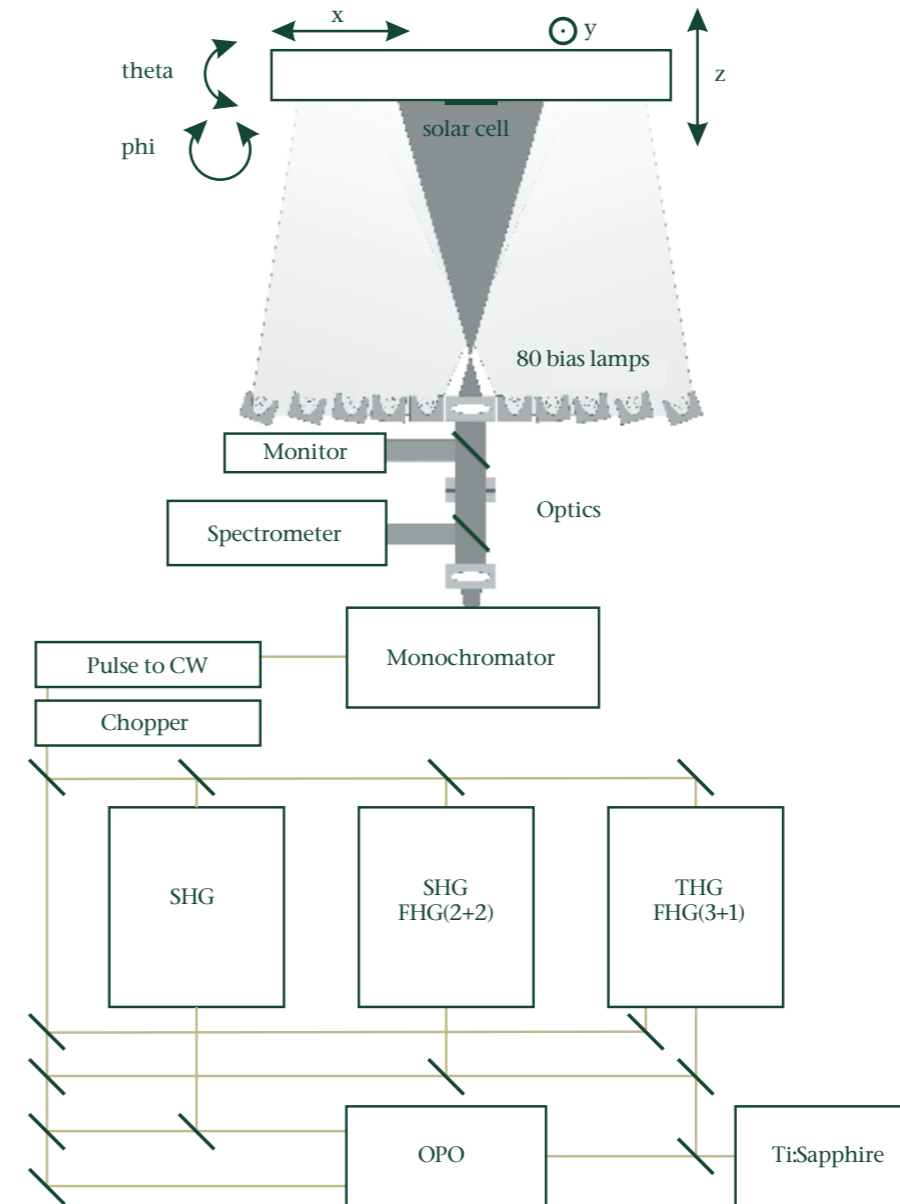


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Laser-DSR Messplatzes

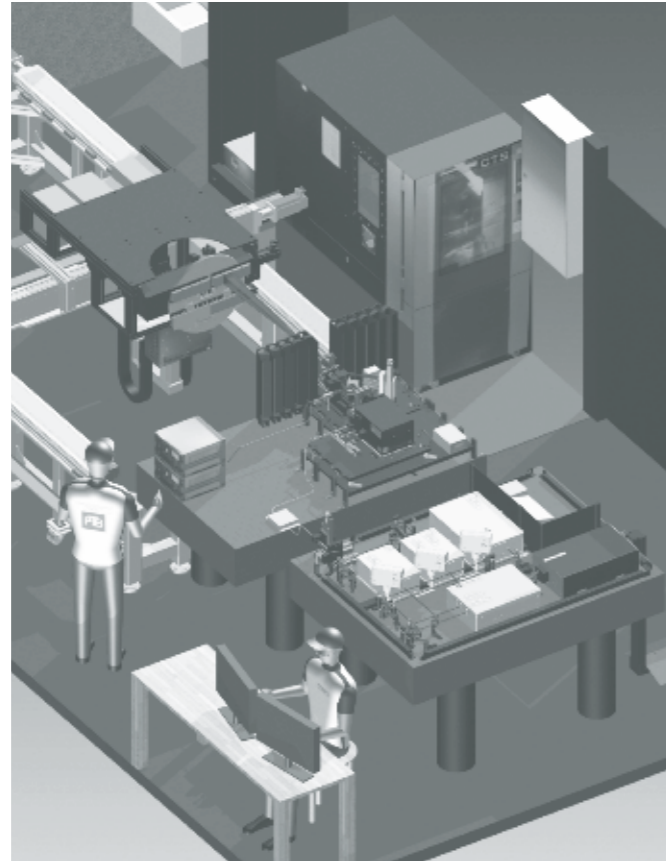


Abbildung 3:
Technische Zeichnung des
Laser-DSR Messplatzes.

atoren bieten den Vorteil von sehr großen Strahlungsfeldern, die dazu geeignet sind auch große Solarmodule zu messen. Gepulste Sonnensimulatoren sind zudem mit Messdauern von 10–100 ms sehr schnell und eignen sich für Messungen mit hohem Durchsatz, z.B. in einer Fertigungslinie. Alle Abweichungen des Spektrums und der Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators und auch die Abweichung der Temperatur der Solarzelle müssen entsprechend korrigiert

werden oder durch die Angabe einer entsprechenden Messunsicherheit berücksichtigt werden. Die Bestrahlungsstärke wird üblicherweise mit Hilfe einer kalibrierten Referenzsolarzelle, deren Kurzschlussstrom unter STC bekannt ist, gemessen und eingestellt.

Die Korrektur des Spektrums erfolgt über den sogenannten spektralen Fehlanpassungskorrekturfaktor [2]. In diesen Faktor gehen

u.a. das gemessene Spektrum des Sonnensimulators und die relativen spektralen Empfindlichkeiten der Referenzsolarzelle und der zu messenden Solarzelle ein. Eine ausführliche Unsicherheitsbetrachtung eines gepulsten Sonnensimulators ist in Ref. [3] gezeigt. Plag et al. haben an diesem Beispiel gezeigt, dass die größten Unsicherheitsbeiträge die Homogenität des Strahlungsfeldes, die Unsicherheit der Referenzsolarzelle und die Unsicherheit der Messung des Spektrums sind. Typische erweiterte Unsicherheiten für die Messung des Kurzschlussstromes mittels Sonnensimulatoren liegen z.Zt. bei ca. > 1 %.

2.2. Spektrale Messverfahren

Bei den spektralen Messverfahren wird nicht versucht das AM 1.5 g Spektrum nachzubilden, sondern es wird die absolute spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle gemessen. Der Kurzschlussstrom I_{SC} wird dann mathematisch unter Verrechnung mit dem Normspektrum AM 1.5 g bestimmt. Somit entfallen alle Unsicherheiten, die mit der Messung eines Spektrums verbunden sind.

In der PTB wurde ein solches Messverfahren, das sogenannte DSR (differential spectral responsivity) Verfahren entwickelt [4, 5]. Beim DSR-Verfahren wird monochromatische Strahlung mittels Weißlichtquellen und einem Monochromator

System erzeugt und durch eine Linsenoptik homogen in die Messebene abgebildet. Gleichzeitig wird die Solarzelle mit Bias-Bestrahlung bestrahlt, um die spektrale Empfindlichkeit bei unterschiedlichen Gesamtbestrahlungsstärken bis zu 1.000 W/m^2 zu messen. Damit man die Stromantwort der Solarzelle auf die monochromatische und der Bias-Bestrahlung trennen kann wird die Lock-In Technik angewandt, d.h. die monochromatische Strahlung wird mit einem Chopper zeitlich moduliert.

Das DSR-Verfahren ist ein Substitutionsverfahren, d.h. die zu kalibrierende Solarzelle wird gegen eine Referenz verglichen, deren spektrale Empfindlichkeit bekannt ist. Diese Referenz setzt sich aus einer auf Strahlungsleistungsempfindlichkeit kalibrierte Photodiode und einer kalibrierten Messblende zusammen. Da Prüfling und Referenz zeitlich nacheinander im homogenen Strahlungsfeld gemessen werden, wird die monochromatische Strahlung immer durch eine Monitorphotodiode mitgemessen. So können eine Drift und zeitliche Instabilitäten nachträglich korrigiert werden.

Mittels des lampenbasierten DSR-Verfahrens kann in der PTB der Kurzschlussstrom von Referenzsolarzellen bis zu einer Größe von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ mit einer erweiterten Mess-

„Eine funktionierende globale Kalibrierinfrastruktur mit Rückführung auf die SI-Basiseinheiten ist notwendig für den Erfolg einer Technologie auf dem Weltmarkt.“

Dr. Ingo Kröger

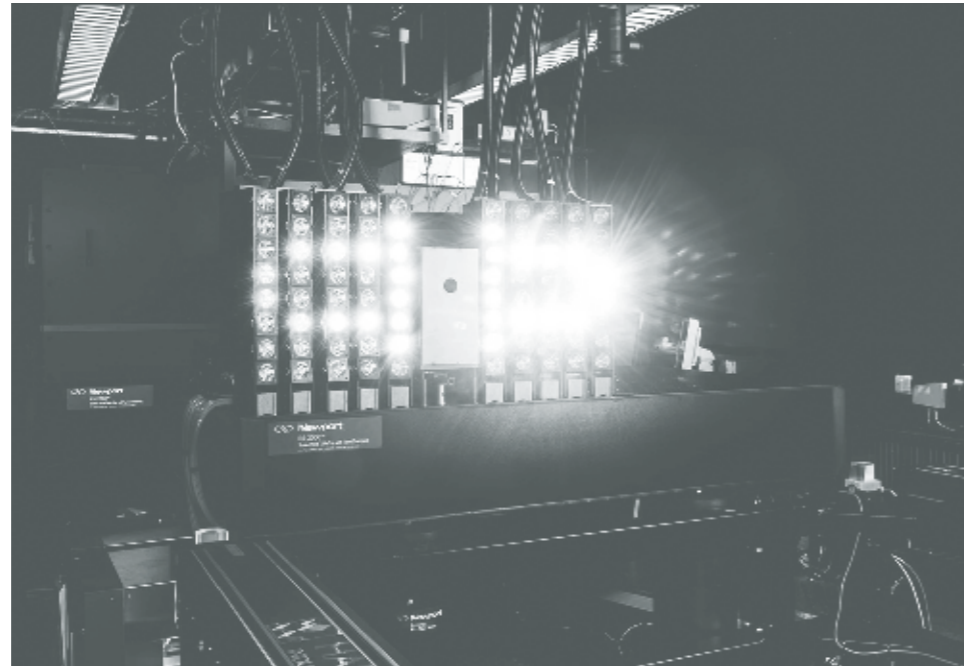


Abbildung 4:
Frontansicht des Laser-DSR
Messplatzes.

unsicherheit von $U(I_{STC}) < 0.6\%$ kalibriert werden.

Die wesentliche metrologische Herausforderung beim DSR-Verfahren liegt in der Erzeugung des homogenen monochromatischen Strahlungsfeldes, denn die monochromatische Bestrahlungsstärke liegt (je nach Wellenlänge) im Bereich von $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ – $100 \text{mW}/\text{m}^2$. Im Vergleich zu $1.000 \text{W}/\text{m}^2$

Bias-Bestrahlungsstärke sind dies extrem niedrigen Signalhöhen, so dass große Signal-zu-Rausch Probleme entstehen.

3. Das Laser-basierte DSR Verfahren

Die Weiterentwicklung des DSR-Verfahrens zum Laser-DSR Verfahren besteht in der Verwendung eines durchstimmbaren Lasersys-

tems als Quelle für die monochromatische Strahlung [6]. Auf diesem Wege kann die monochromatische Strahlungsleistung um einen Faktor von 100–10.000 erhöht werden, sodass nicht nur das Signal-zu-Rausch Verhältnis signifikant verbessert wird sondern es können auch größere und homogenere Strahlungsfelder erzeugt werden. Dies ermöglicht zum einen geringere Messunsicherheiten und auch die Kalibrierung größerer Solarzellen.

Das Lasersystem basiert auf einem durchstimmbaren Ti:Saphir Laser, der gepulste Strahlung im Wellenlängenbereich von 680 nm–1080 nm erzeugen kann. Diese Strahlung kann durch eine automatisierte Strahlführung in unterschiedliche nicht-lineare Kristalle eingekoppelt werden. Durch Frequenzkonversion in die zweite (340 nm–530 nm), dritte (230 nm–340 nm) und vierte Harmonische (210 nm–230 nm) sowie die Verwendung eines optisch parametrischen Oszillators (1.000 nm–1.600 nm) und dessen Frequenzverdopplung (500 nm–700 nm) können alle Wellenlängen im Bereich von 210 nm–1.600 nm lückenlos erzeugt werden.

Diese monochromatische Strahlung durchläuft einen Glasfaser basierten Konverter [7], der die gepulste Strahlung in quasi-CW Strahlung konvertiert. Dies ist von Bedeutung, um nichtlineare Effekte in den zu kalibrierenden Solarzellen zu vermeiden. Die

Glasfaser koppelt die Strahlung direkt in einen Monochromator ein, der sowohl die Begrenzung der Bandbreite ermöglicht, als auch ungewollte Laserwellenlängen (z.B. die Fundamentale der Frequenzkonversion) aussondert. Die resultierende monochromatische Strahlung wird dann durch eine geeignete Optik homogen in die Messebene abgebildet. Über zwei Strahlteiler wird ein geringer Teil der Messstrahlung zum einen in eine Monitorphotodiode und zum anderen in ein Spektrometer eingekoppelt. Ersteres

dient zur Korrektur von Schwankungen der spektralen Bestrahlungsstärke, letzteres dient zur Korrektur der Wellenlänge.

Der gesamte Aufbau des Messplatzes ist in Abbildung 2 schematisch und in Abbildung 3

als technische Zeichnung dargestellt. Mit diesem neuartigen Messplatz ist es möglich geworden, die Messunsicherheit für Referenzsolarzellen deutlich zu reduzieren ($U(I_{STC}) < 0.4\%$) und auch größere Solarzellen bis zu $6''$ kalibrieren zu können.

Der neuartige Laser-DSR Messplatz bietet weiterhin erweiterte Messmöglichkeiten zur Charakterisierung von Solarzellen. Es wurde zum einen ein Goniometer in den Messaufbau integriert, um die spektrale Winkelabhängigkeit zu untersuchen. Weiterhin kann

„Durch die Verwendung eines durchstimmbaren Lasers als Strahlungsquelle kann die monochromatische Strahlungsleistung um einen Faktor 100–10.000 erhöht werden.“

Dr. Ingo Kröger

die Messstrahlung in eine Klimakammer eingekoppelt werden, um Solarzellen in einem weiten Temperaturbereich von $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ charakterisieren zu können.

4. Forschung und Entwicklung für die Photovoltaik Metrologie

Mit Hilfe dieses neu entwickelten Laser-DSR Messplatzes wurde eine Messinfrastruktur geschaffen, Kalibrierungen mit geringeren Messunsicherheiten durchzuführen. Dieser Messplatz ermöglicht durch seine geringen Messunsicherheiten und seine Multifunktionalität hochgenaue Messungen für Forschung und Weiterentwicklungen in der Photovoltaik Metrologie. Einige Beispiele werden im Folgenden kurz erläutert.

4.1. Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Referenzsolarzellen

Die Weitergabe der Einheit erfolgt über WPVS-Referenzsolarzellen, die in regelmäßigen Zeiträumen von 1–2 Jahren rekali­briert werden müssen. Durch die Verwendung unter Sonnensimulatoren und natürlicher Sonnenstrahlung können die Materialien degradieren, so dass es zu zunehmenden Abweichungen des Kurzschlussstroms zum Kalibrierwert kommen kann. Insbesondere der ultraviolette (UV) Anteil (280 nm–400 nm) der solaren Strah-

lung ist maßgeblich für Materialdegradation verantwortlich.

Degradationseffekte sollten bei einer typischen Verwendung der Referenzsolarzelle im Kalibrierbetrieb nur zu Änderungen des Kurzschlussstroms deutlich unterhalb der Kalibrierunsicherheit von $<0.5\%$ liegen. Die Herausforderung besteht hier nun wieder in UV-Alterungsuntersuchungen, die selber Unsicherheiten deutlich unter 0.5% aufweisen. Der Laser-DSR Messplatz hat eine Reproduzierbarkeit von Spektral­messungen $<0.2\%$ und ist damit hervorragend für solche Untersuchungen geeignet. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE wurden unterschiedlichste Typen von neuartigen WPVS Referenzsolarzellen untersucht. Diese sind aufgebaut aus hochstabilen Siliziumsolarzellen und unterschiedlichen optischen Filtern als Verkapselung. Durch die unterschiedliche Transmission der optischen Filter kann die spektrale Empfindlichkeit der Referenzsolarzelle entsprechend anderen Materialsystemen (z.B. Dünnschichttechnologien) angepasst werden. Diese neuartigen Referenzsolarzellen wurden am Laser-DSR spektral vermessen und dann bis zu 30 Stunden erhöhter UV-Bestrahlung ausgesetzt, die einer effektiver Bestrahlung unter natürlicher Sonnenstrahlung von mehreren hundert Stunden entspricht. Anschließend wurde erneut die spektrale Empfindlichkeit gemessen.

Es zeigte sich für die ungefilterten c-Si Referenzsolarzellen als auch für die GaAs Referenzsolarzellen keine signifikanten Alterungseffekte, so dass diese als sehr langzeitstabil einzuschätzen sind. Bei den gefilterten Referenzsolarzellen zeigten sich signifikante Degradationseffekte. Die Infrarotgefilterten zeigten eine signifikante Abnahme der spektralen Empfindlichkeit im UV-VIS Bereich $<600\text{ nm}$. Dies führte zu einer Abnahme des I_{STC} von ca. $0.3\text{--}0.5\%$. Die UV-VIS gefilterten Referenzsolarzellen zeigten ebenfalls Degradation im UV-VIS Bereich $<600\text{ nm}$. Dort scheint die Transmission des optischen Filters durch die UV-Degradation im Blockungsbereich zuzunehmen. Da diese Änderungen aber nur im Blockungsbereich auftreten führt dies zu keiner signifikanten Änderung des I_{STC} . Zusammenfassend konnten die Alterungsuntersuchungen zeigen, dass diese neuartigen Referenzsolarzellen grundsätzlich sehr stabil sind, in Einzelfällen konnte Optimierungsbedarf identifiziert werden.

4.2. Kalibrierung von Komponentenzellen für Multijunction Solarzellen

Hocheffizienzsolarzellen werden aus Schichtsystemen unterschiedlicher Materialsysteme mit unterschiedlichen Bandlücken realisiert. Dabei hat jeder einzelne dieser „junctions“ eine spektrale Empfindlichkeit die jeweils einen anderen Teil des solaren Spektrums

abdeckt. Somit können Multijunction Solarzellen einen weiteren Bereich des Spektrums abdecken und somit höhere Wirkungsgrade erzielen. Insbesondere bei der Weltraumanwendung von Photovoltaik stehen solche Multijunction Solarzellen im Fokus. Für die Kalibrierung von Multijunction Solarzellen mit Hilfe von Sonnensimulatoren benötigt man Referenzsolarzellen, die baugleich sind, dessen einzelne Junctions aber separat kontaktiert sind und somit auch einzeln messbar sind. Üblicherweise werden solche Komponentenzellen für die Weltraumanwendung über Ballonflüge in der Stratosphäre direkt gegen die Sonne kalibriert.

Da solche Ballonflüge aber sehr selten und sehr teuer sind, rücken spektrale Messverfahren wie die DSR-Methode vermehrt in den Fokus der Anwender, denn über die spektrale Empfindlichkeit lässt sich der Kurzschlussstrom für jedes beliebige Spektrum, also auch das AM0 Spektrum berechnen. Mit Hilfe des Laser-DSR Messplatzes wurden erstmals top und middle Komponentensolarzellen mit einer Größe von $80\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ mit einer erweiterten Unsicherheit von deutlich $<1\%$ kalibriert [8]. Diese reduzierten Unsicherheiten der Laser-DSR Messinfrastruktur eröffnen somit eine alternative Rückführung für Weltraumsolarzellen im Vergleich zu den Ballonflügen.

„Der laserbasierte DSR-Messplatz ermöglicht durch seine geringen Messunsicherheiten und seine Multifunktionalität hochgenaue Messungen für Forschung und Weiterentwicklungen in der Metrologie für die Photovoltaik.“

Dr. Ingo Kröger

4.3. Von den Standardtestbedingungen zum Energy-Rating

Die Messbedingungen für eine internationale Vergleichbarkeit von Solarzellen wird über die IEC Norm 60904-3 definiert. Diese unter den Standardtestbedingungen gemessenen Wirkungsgrade ermöglichen aber nur äußerst begrenzte Ertragsvergleiche, da die Realbedingungen unter denen Solarmodule betrieben werden stark von 1.000 W/m², dem AM1.5 Spektrum und 25 °C abweichen. Diese Beschränkung soll durch den neuen IEC Standard 61853 aufgehoben werden. Die IEC 61853 Serie beschreibt die Messung von Solarmodulen in einem erweiterten Temperaturbereich von 15 °C–75 °C, in einem Bestrahlungsstärkebereich von 100 W/m²–1100 W/m² und Messungen der Winkelabhängigkeit. Sind für Solarmodule diese erweiterten Eigenschaften bekannt, so können unter Verwendung von standardisierten Klimadatensätzen deutlich zuverlässigere Vergleiche zwischen verschiedenen Modultypen für einen Standort berechnet werden. Grundlage für die Anwendbar-

keit dieser neuen Norm ist metrologische Grundlagenforschung, bei der bestimmt wird, welche Messunsicherheiten für Temperatur-, Bestrahlungsstärke- und Winkelabhängige Messungen zu erwarten sind und wie sich diese auf die Ertragsprognosen auswirken. Außerdem muss festgelegt werden, in welchem Umfang dieser Parameterraum gemessen werden muss, um ein akzeptables Verhältnis von metrologischem Nutzen zu Messaufwand zu erhalten.

Diese Forschungsarbeiten werden in der PTB im Rahmen eines EMRP Projektes mit dem Laser-DSR Messplatz durchgeführt. Denn dieser Messplatz ermöglicht die multidimensionale spektrale Charakterisierung von Solarzellen bzgl. Wellenlänge, Temperatur, Bestrahlungsstärke und Einfallswinkel mit geringen Messunsicherheiten. Diese ausführlichen Charakterisierungen können sowohl für Referenzsolarzellen als auch für 6"-Wafer und Mini-Module durchgeführt werden. Ein solcher Vergleich ermöglicht weiterhin Aussagen über den Einfluss der verwendeten Verkapselungsmaterialien.

Literaturverzeichnis

- [1] „Global Market Outlook 2015,“ SolarPower Europe, Brüssel, 2015.
- [2] J. Hohl-Ebinger und W. Warta, „Uncertainty of the spectral mismatch correction factor in STC measurements on photovoltaic devices,“ *Progress in Photovoltaics* 19, Issue 5, pp. 573–579, 2011.
- [3] F. Plag, F. Haas, K. Ramspeck, H. Nagel, H. Albert, S. Nevas, P. Sperfeld, F. Witt und S. Winter, „Comprehensive Analysis of a Pulsed Solar Simulator to Determine Measurement Uncertainty Components,“ in *Proceedings 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 2014*.
- [4] J. Metzdorf, „Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method,“ *Applied Optics* Vol. 26, No. 9, pp. 1701–1708, 01 May 1987.
- [5] J. Metzdorf, S. Winter und T. Wittchen, „Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values,“ *Metrologia* 37, pp. 573–578, 2000.
- [6] S. Winter, T. Fey, I. Kröger, D. Friedrich, B. O. S. P. K. Ladner und F. Witt, „Design, realization and uncertainty analysis of a laser-based primary calibration facility for solar cells at PTB,“ *Measurement* 51, pp. 457–463, 2014.
- [7] PTB.Deutschland Patent 10 2010011615.
- [8] F. Witt, J. Fernández-Marín, I. Kröger, T. Fey, T. G. Rodríguez und S. Winter, „Improvements of the Si-Traceable Calibration of the Short Circuit Current of Multi Junction Component Solar Cells,“ in *Proceedings 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2015*.