

Analyse der variierenden Einstrahlungsbedingungen auf Outdoor-PV-Messungen

T. Fey, T. Walzak, I. Kröger, D. Friedrich, D. Schlüssel, S. Winter

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

<mailto:Thomas.Fey@PTB.de>

An der PTB wurde ein neuer Outdoormessplatz aufgebaut, um die Einflüsse unterschiedlicher Outdoorbedingungen auf den Kurzschlussstrom von Solarzellen zu untersuchen. Als Einflussfaktoren werden das Sonnenspektrum, die Bestrahlungsstärke, die Temperatur und die Bewölkungssituation aufgezeichnet.

1 Einführung

Bei Outdoor- und Indoormessungen von Solarzellen können im Allgemeinen signifikante Abweichungen im Kurzschlussstrom und somit auch im Wirkungsgrad auftreten. Die zu Grunde liegenden Effekte wurden weitestgehend noch nicht detailliert und rückführbar untersucht.

Die Unterschiede können verschiedene Ursachen haben. Während bei Indoormessungen die Umgebungsbedingungen definiert und reproduzierbar eingestellt werden können, sind diese bei Outdoormessungen oft vorgegeben. Dazu gehören die Temperatur der Zellen, das Sonnenspektrum, die Bestrahlungsstärke sowie die räumliche Verteilung des Sonnenlichts.

Um dies zu untersuchen, wurde an der PTB ein neuer Outdoormessplatz aufgebaut und es wurden erste Messungen mit gefilterten und c-Si-Solarzellen durchgeführt [1].

2 Messplatz

Der Messplatz führt die Messebene vollautomatisch zur Sonne nach und misst den Kurzschlussstrom der Solarzellen. Des Weiteren werden die Kriterien der Standardtestbedingungen (STC) berücksichtigt. Zu den STC gehört neben der Bestrahlungsstärke von $E = 1000 \text{ W/m}^2$ das Referenzspektrum (AM 1.5) und die die Temperatur der Solarzelle (25°C).

Um Wolken und weitere Störeinflüsse zu dokumentieren, wurde zusätzlich eine Kamera mit Weitwinkelobjektiv hinzugefügt. Zur Berücksichtigung des Referenzspektrums wird mittels eines Si- und eines InGaAs-Kompakt-Array-Spektrometers das Kosinus-gewichtete Sonnenspektrum aufgezeichnet.

3 Spektrale Fehlanpassung

Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle (SZ) ergibt sich aus dem einfallenden Spektrum und der spektralen Empfindlichkeit (SE, $s(\lambda)$) der SZ (1).

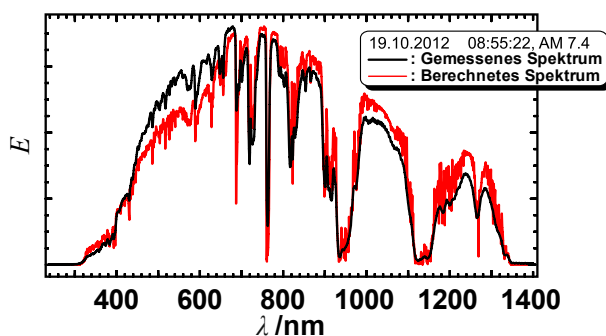


Abb. 1 Berechnetes Am 7.4 Spektrum und gemessenes Spektrum vom 19.10.2012 8:55. Das berechnete Spektrum wurde mittels SMARTS erstellt.

$$\text{Kurzschlussstrom: } I = \int E(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Unter Outdoor-Bedingungen hängt das Sonnenspektrum stark von Absorptions- und Streueffekten in der Atmosphäre (Sonnenstand, Wetter, usw.) ab. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden zum Einen gemessene und zum Anderen mit Hilfe des Programms SMARTS simulierte Sonnenspektren verwendet. Zur Veranschaulichung werden hier die Ergebnisse vom 19.10.2012 8:55 gezeigt (Abb. 1). Zu diesem Zeitpunkt sollte das Sonnenspektrum einem AM 7.4 Spektrum entsprechen. Es zeigt sich eine signifikante Abweichung zwischen Simulation und Messung.

Die SE beschreibt das Verhältnis zwischen monochromatischer Bestrahlung $E(\lambda)$ und zugehörigem

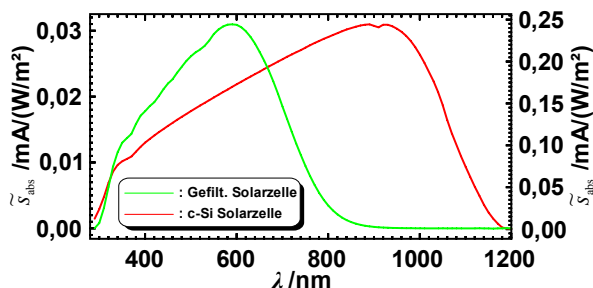


Abb. 2 Spektrale Empfindlichkeit einer gefilterten Solarzelle und einer c-Si-Solarzelle.

Beitrag zum Kurzschlussstrom. Sie ist je nach Solarzellen-Typ meist unterschiedlich. In dem hier gezeigten Fall wurden zwei gefilterte Solarzellen mit einem Maximum der SE um 600 nm und zwei c-Si-Solarzellen mit einem Maximum um 900 nm (Abb. 2) ausgewählt.

Bei Outdoorkalibrierungen des Kurzschlussstromes (I_{STC}^{TC}) werden hier zu prüfende Solarzellen (TC) gegen Referenzsolarzellen (RC) verglichen. Weisen RC und TC unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten auf, ist eine spektrale Fehlanpassung notwendig. Diese berechnet sich aus den Spektralfunktionen ($E_{AM1.5}(\lambda), E_{gemessen}(\lambda)$) und den spektralen Empfindlichkeiten ($s^{TC}(\lambda), s^{RC}(\lambda)$) wie folgt:

$$I_{STC}^{TC} = M \cdot \frac{I_{STC}^{RC}}{I_{gemessen}^{RC}} \cdot I_{gemessen}^{TC} \quad (2)$$

$$M = \frac{\int E_{AM1.5}(\lambda) \cdot s^{TC}(\lambda) d\lambda}{\int E_{gemessen}(\lambda) \cdot s^{TC}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int E_{gemessen}(\lambda) \cdot s^{RC}(\lambda) d\lambda}{\int E_{AM1.5}(\lambda) \cdot s^{RC}(\lambda) d\lambda}$$

Zur Auswertung der Outdoorkalibrierungen der c-Si SZ 2 Solarzelle und den zwei gefilterten Solarzellen wurden drei Korrekturansätze für die Kurzschlussströme der übrigen drei Solarzellen verwendet. Die c-Si SZ 1 dient hierbei als RC. Die einfachste Korrektur ist ein Berechnen der Bestrahlungsstärke aus dem Verhältnis des Kurzschlussstromes unter STC und dem gemessenen Strom der RC. Anschließend werden die Kurzschlussströme der TC hochskaliert für $E = 1000 \text{ W/m}^2$. Als zweite Korrektur wurde eine spektrale Fehlanpassung mittels eines berechneten Spektrums für AM 7.4 durchgeführt. Mit dem gemessenen Spektrum erfolgte auf gleiche Weise die dritte Korrektur. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Proben	c-Si SZ 1	c-Si SZ 2	gefilt. SZ 1	gefilt. SZ 2
I_{STC} / mA	144,24	141,04	13,03	15,54
$I_{Mess.} / \text{mA}$	64,82	64,00	5,02	5,91
I_{1000W} / mA	-	142,42	11,16	13,16
ΔI in %	-	1,0	-14,3	-15,3
$M_{ber.Sp.} / \text{mA}$	-	1,008	1,358	1,368
$I_{ber.Sp.} / \text{mA}$	-	143,52	15,15	18,01
ΔI in %	-	1,8	16,3	15,9
$M_{mess.Sp.} / \text{mA}$	-	1,005	1,194	1,202
$I_{mess.Sp.} / \text{mA}$	-	143,07	13,32	15,82
ΔI in %	-	1,4	2,3	1,8

Tab. 1 Vergleich der Korrektur mittels Skalierung und spektraler Fehlanpassung mittels berechnetem Spektrum sowie gemessenem Spektrum.

4 Diskussion der Ergebnisse

Während die zu untersuchende c-Si-Solarzelle bei jeder Korrekturmethode geringe Abweichungen ($< 1,8\%$) zum Indoor-kalibrierten Wert unter STC aufweist, sind die Abweichungen der ähnlich gefilterten Solarzellen stets ebenfalls ähnlich. Bei der Skalierung auf 1000 W/m^2 sind deren Signale $14,3\%$ bzw. $15,3\%$ zu klein. Wird hingegen die Korrektur mit dem berechneten Spektrum durchgeführt, sind die erhaltenen Werte für die gefilterten Solarzellen $16,3\%$ bzw. $15,9\%$ zu groß. Die spektrale Fehlanpassung mit dem gemessenen Spektrum und den spektralen Empfindlichkeiten liefert die Werte mit geringster Abweichung ($2,3\%$ bzw. $1,8\%$) zu den Indoor bestimmten Kurzschlussströmen unter STC.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Schlussfolgerungen ziehen.

1. Besteht nicht die Möglichkeit die Spektren mitzuschreiben, so ist es wichtig Solarzellen mit einer kalibrierten Solarzelle zu vergleichen, die eine qualitativ gleiche SE aufweist.
2. Unterscheiden sich die spektralen Empfindlichkeiten kann es sein, dass die Berechnung des Spektrums nicht ausreicht. Es kann nicht garantiert werden, dass berechnete Spektren die Realität vollständig wiedergeben, sondern lediglich gut annähern. Ein bedeutender Einflussfaktor sind hierbei insbesondere die Aerosole in der Atmosphäre. Diese können lokal und zeitlich stark variieren.

Es ist anzumerken, dass es sich bei dieser Messung um ein ausgewähltes Beispiel handelt. Oft stellen berechnete Spektren bei klarem Himmel eine sehr gute Näherung dar, so dass diese oft zur spektralen Fehlanpassung genommen werden können.

5 Zusammenfassung

An der PTB wurde erfolgreich ein neuer Outdoor-messplatz aufgebaut und getestet. Er ist in der Lage Kurzschlussstrom und Temperatur von Solarzellen sowie das Kosinus-gewichtete Sonnenspektrum zu messen.

Mit den so gewonnenen Daten konnten die Einflüsse auf die Bestimmung des Kurzschlussstromes durch spektraler Empfindlichkeit und Sonnenspektrum gezeigt werden.

Literatur

- [1] Masterarbeit: „Untersuchung des Einflusses der Einstrahlungsbedingungen auf das Ergebnis von PV-Outdoorkalibrierungen“, Thomas Walzak, Dezember 2012