
5 VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM MULTISPEKTRALEN BESTIMMEN VON
 SPEKTRALER BESTRAHLUNGSSTÄRKEEMPFINDLICHKEIT UND
 SPANNUNGSABHÄNGIGEM STROMVERHALTEN VON PHOTOVOLTAIKEINHEITEN

10

GEBIET DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum
Charakterisieren von Eigenschaften von Photovoltaikeinheiten. Ferner betrifft die
Erfindung ein entsprechendes Computerprogrammprodukt und ein computerlesbares
15 Medium.

TECHNISCHER HINTERGRUND

Photovoltaikeinheiten sind Halbleiterbauelemente, welche den inneren Photoeffekt
ausnutzen, um bei Absorption von Licht ein elektrisches Signal zu liefern. Photovoltaik-
20 einheiten können allgemein ausgedrückt als Strahlungssensoren bezeichnet werden.
Insbesondere können Photovoltaikeinheiten als Solarzellen ausgebildet sein. Solarzellen
dienen dazu, Licht, wie es insbesondere von der Sonne eingestrahlt wird, in elektrische
Energie umzuwandeln. Solche Solarzellen werden auch als Photovoltaikzellen bezeichnet.
Mehrere Solarzellen können miteinander zu einem Solarmodul verschaltet sein. Sowohl
25 einzelne Solarzellen als auch ganze Solarmodule sowie andere Arten von

Strahlungssensoren werden hierin verallgemeinernd als Photovoltaikeinheit bezeichnet, wobei Photovoltaik teilweise mit PV abgekürzt wird.

Verschiedene physikalische Eigenschaften von Photovoltaikeinheiten werden herkömmlich mithilfe unterschiedlicher und meist speziell für einen Anwendungszweck
5 entwickelter Messvorrichtungen und Verfahren bestimmt.

Beispielsweise kann es zur Beurteilung eines Verhaltens einer Photovoltaikeinheit und insbesondere eines Wirkungsgrades der Photovoltaikeinheit notwendig sein, das spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der Photovoltaikeinheit zu kennen. Dieses Stromverhalten gibt an, wie sich der durch die Photovoltaikeinheit fließende elektrische
10 Strom I abhängig von einer an die Photovoltaikeinheit angelegten elektrischen Spannung U verhält. Insbesondere kann eine Information über dieses Stromverhalten bei Beleuchtung der Photovoltaikeinheit gewünscht sein. Dabei wird regelmäßig angestrebt, die Photovoltaikeinheit möglichst in einer Weise zu beleuchten, wie dies einem realen Einsatz bei Beleuchtung mit von der Sonne eingestrahlttem Licht entspricht.

15 Um Photovoltaikeinheiten möglichst genau und standardisiert charakterisieren zu können sowie um auf eine Beleuchtung mit realem Sonnenlicht verzichten zu können, wurden die Bedingungen, wie sie bei Beleuchtung mit realem Sonnenlicht herrschen, hinsichtlich einer Lichtintensität und einer spektralen Verteilung standardisiert. Ein standardisiertes Sonnenspektrum beispielsweise gemäß dem Standard AM1.5G
20 entspricht dabei einer Intensität von 1000 W/m^2 und einer Spektralverteilung, wie sie im Mittel an der Erdoberfläche, d.h. nach Durchlaufen einer 1,5-fachen Erdatmosphärenschicht, herrschen. Ein solches standardisiertes AM1.5G Sonnenspektrum wird daher bevorzugt zum Charakterisieren von terrestrischen Photovoltaikeinheiten eingesetzt. Ein standardisiertes AM0 Sonnenspektrum entspricht
25 hinsichtlich Intensität und Spektralverteilung einer Sonnenstrahlung, wie sie im Weltall herrscht und wird somit insbesondere zum Charakterisieren von Photovoltaikeinheiten für Satelliten und Ähnliches eingesetzt.

Technische Vorrichtungen, mithilfe derer das spannungsabhängige Stromverhalten von Photovoltaikeinheiten unter möglichst realistischen Strahlungsbedingungen charakterisiert werden soll, werden auch als IV-Messplätze mit einem Sonnensimulator als Lichtquelle bezeichnet. Es handelt sich dabei im Allgemeinen um einen Messplatz, an dem eine Photovoltaikeinheit mittels einer Kontaktierungseinrichtung elektrisch kontaktiert werden kann, um dann mithilfe einer Auswerteeinrichtung einen durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strom abhängig von einer angelegten elektrischen Spannung messen zu können. Aus einer dabei ermittelten Strom-Spannungs-Kennlinie können dann charakteristische Kenndaten wie der Kurzschlussstrom I_{SC} , die Offene-Klemmen-Spannung V_{OC} , die maximale Leistung P_{max} , der Füllfaktor FF und/oder der Wirkungsgrad η ermittelt werden, wodurch die Photovoltaikeinheit bewertet und/oder charakterisiert werden kann. Der IV-Messplatz ist in der Regel so aufgebaut, dass die Photovoltaikeinheit unter Standard-Testbedingungen (Probentemperatur, Bestrahlungsstärke und Spektrum des Sonnensimulators gemäß jeweils anzuwendender Norm) gemessen werden kann. Dazu verfügt der IV-Messplatz über eine Beleuchtungsquelle, welche dazu ausgelegt ist, das jeweils anzuwendende Normspektrum (Sonnenspektrum) möglichst genau zu reproduzieren.

Hierzu kann der Sonnensimulator beispielsweise mit einer thermischen Lichtquelle ausgebildet sein, deren Strahlung dann mithilfe verschiedener Filter modifiziert wird, um das standardisierte Sonnenspektrum nachzubilden. Alternativ können moderne Sonnensimulatoren über mehrere lichtemittierende Dioden (LEDs) verfügen, deren emittiertes Licht insgesamt das standardisierte Sonnenspektrum reproduzieren kann, gegebenenfalls unter Einsatz von Filtern. Dabei kann mittels der LEDs ein stark reduzierter Energieverbrauch, geringere Wartungserfordernisse, eine längere Lebensdauer, eine schneller schaltbare Lichtemission und/oder ein zeitlich stabileres Lichtemissionsverhalten erreicht werden. Außerdem lässt sich mit Hilfe von LEDs ein Spektrum leichter auf einen für die Messung relevanten Spektralbereich einschränken. Um das in dem Sonnensimulator vorherrschende Lichtspektrum hinsichtlich seiner

Spektralverteilung beeinflussen zu können, können verschiedene LEDs in dem Sonnensimulator vorgesehen sein, die sich hinsichtlich der Spektralverteilung des von ihnen emittierten Lichts unterscheiden. Gegebenenfalls können diese verschiedenen LEDs einzeln oder in mehreren Gruppen ansteuerbar sein.

- 5 Eine weitere Art der Charakterisierung von Photovoltaikeinheiten stellt die Bestimmung der sogenannten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (englisch: spectral responsivity, SR) dar. Die spektrale Bestrahlungsempfindlichkeit gibt damit an, welchen Strom die Photovoltaikeinheit bei Beleuchtung mit Licht einer Wellenlänge bzw. eines schmalbandigen Wellenlängenbereichs generiert und wird üblicherweise mit der Einheit
- 10 $\text{mA}/(\text{W}/\text{m}^2)$ oder flächenunabhängig mit der Einheit A/W angegeben. Die Kurven der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit (SR-Kurven) werden unter anderem während einer Entwicklung und Charakterisierung von Photovoltaikeinheiten wie Solarzellen oder Solarmodulen und zur Materialanalyse verwendet, da die SR-Kurve das Stromverhalten, insbesondere einen Kurzschlussstrom I_{sc} , der Photovoltaikeinheit
- 15 spektral auflöst.

Beispielsweise können zur Materialanalyse Wellenlängenbereiche identifiziert werden, welche den Kurzschlussstrom erhöhen oder erniedrigen. Zudem ist es mit physikalischer Modellierung möglich, die Form der SR-Kurve auf Zelleigenschaften wie Rekombination oder Absorption zurückzuführen, um hiermit die Zelleigenschaften zu bestimmen.

- 20 Für die Kalibrierung von Photovoltaikeinheiten und die Bestimmung ihrer charakteristischen Kenngrößen unter Standardtestbedingungen sind SR-Kurven im Allgemeinen essentiell notwendig für eine Bestimmung eines Faktors einer spektralen Fehlanpassung und somit für eine präzise Einstellung der Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators. Nur mit Hilfe dieses Faktors der spektralen Fehlanpassung kann in IV-
- 25 Messsystemen eine Kennlinie der Photovoltaikeinheit präzise und normkonform bestimmt werden. Dies gilt sowohl für Offline-Analysen als auch für Inline-Messungen.

Die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ von Solarzellen und Solarmodulen wird üblicherweise an speziellen SR-Messplätzen (sog. DSR/SR-Messplätzen) bestimmt. Dieser Ansatz wird hierin als „SR-Standardverfahren“ bezeichnet. Ein Funktionsprinzip dieser bisherigen DSR/SR-Messplätze besteht in einer Bestrahlung des Testobjekts mit

5 zwei Strahlungsquellen: (1) einem zeitlich konstanten weißen (Bias-) Licht und (2) einem quasi-monochromatischen Licht als Kleinsignal mit deutlich geringer Intensität. Das weiße Licht wird beispielsweise mit einem Array aus Halogenstrahlern erzeugt. Dabei kann das weiße Licht im Idealfall gleich oder weitgehend ähnlich sein zu dem Normspektrum, unter dem später die Strom-Spannungs-Kennlinie gemessen werden

10 soll, in der Regel also dem AM1.5G oder dem AM0 Spektrum. Das quasi-monochromatische Licht kann beispielsweise mit einer Kombination aus einer Lampe mit breitbandigem Spektrum und einem Monochromator und/oder verschiedenen Filtern erzeugt werden. Das quasi-monochromatische Licht kann dabei zeitlich moduliert werden, beispielsweise mittels eines Chopperrads. Vor der Messung des Testobjekts wird

15 der Strahlungsbeitrag des quasi-monochromatischen Lichtes mit einer Referenzsolarzelle kalibriert. Während des Messvorgangs wird das Testobjekt unter Kurzschlussbedingungen gehalten. Die Stromantwort des Testobjektes ist dann ein Gleichstrom mit einem kleinen pulsierenden Anteil. Ein Transimpedanzwandler trennt den pulsierenden Stromanteil vom Gleichstromanteil und stellt diesen als ein proportionales

20 Spannungssignal zur Verfügung, welches mittels eines Lock-in-Verstärkers gemessen und ausgewertet wird. Als Ergebnis folgt die differentielle SR des Testobjektes, welche über verschiedene Bias-Bestrahlungsstärken integriert wird und damit die gesuchte SR des Testobjektes liefert. Dieses Verfahren ist seit vielen Jahrzehnten für PV-Anwendungen etabliert, erfordert allerdings komplexe Messtechnik und ist

25 zeitaufwendig.

Seit ein paar Jahren gibt es Ansätze, die SR-Kurve mit LEDs verschiedener Wellenlänge zu bestimmen (hierin „SR-LED-Referenzsolarzelle-Verfahren“ genannt). Dabei handelt es sich um eine Variante bzw. Weiterentwicklung des zuvor beschriebenen SR-

Standardverfahrens. Hierbei wird das Testobjekt einzeln mit den LEDs bestrahlt und der resultierende Kurzschlussstrom gemessen. Die Bestrahlungsstärke der LEDs wird vorher mit einer kalibrierten Solarzelle gemessen. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Verfahren die SR-Kurve des Testobjekts bestimmt werden kann. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die LEDs häufig breitbandig sind und die SR dadurch in einigen Wellenlängenbereichen nicht hinreichend gut bestimmt werden kann. Es wurden mathematisch aufwendige Verfahren vorgeschlagen, um diesem Problem vorzubeugen. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist die Stabilisierung der Lichtintensität jeder einzelnen LED, da die in den Sonnensimulatoren verbauten Monitordioden üblicherweise breitbandig sammeln und für andere Arbeitspunkte optimiert sind. Bislang hat sich das Verfahren für PV-Anwendungen nicht durchgesetzt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG UND VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

Es kann ein Bedürfnis an einer alternativen Messvorrichtung sowie einem alternativen Verfahren zum Charakterisieren von Photovoltaikeinheiten bestehen. Insbesondere kann ein Bedürfnis daran bestehen, Photovoltaikeinheiten mit wenig Aufwand, schnell, kostengünstig und/oder zuverlässig charakterisieren zu können. Außerdem kann ein Bedürfnis an einem Computerprogrammprodukt bestehen, mithilfe dessen entsprechende Verfahren implementiert werden können, sowie an einem computerlesbaren Medium mit einem darauf gespeicherten solchen Computerprogrammprodukt.

Die genannten Bedürfnisse können zumindest teilweise mit dem Gegenstand eines der unabhängigen Ansprüche der vorliegenden Anmeldung erfüllt werden. Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen sowie der nachfolgenden Beschreibung und den Figuren angegeben.

Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird eine Messvorrichtung zum Bestimmen einer spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ und eines spannungsabhängigen Stromverhaltens $I(U)$ einer Photovoltaikeinheit unter Standard-Sonne-Bedingungen beschrieben. Die Messvorrichtung umfasst zumindest eine

5 Beleuchtungsquelle, eine Kontaktierungseinrichtung, eine Steuerung und eine Auswerteeinrichtung. Die Beleuchtungsquelle ist dazu konfiguriert, wahlweise Licht mit variierbaren Spektralverteilungen oder mit einer Intensität und Spektralverteilung, welche einem standardisierten Sonnenspektrum entsprechen, zu emittieren. Die Kontaktierungseinrichtung ist dazu konfiguriert, die Photovoltaikeinheit elektrisch zu

10 kontaktieren. Die Steuerung und die Auswerteeinrichtung sind wahlweise in einem ersten oder einem zweiten Betriebsmodus betreibbar. Dabei ist die Steuerung dazu konfiguriert, (i) in dem ersten Betriebsmodus die Beleuchtungsquelle zur Emission von Licht mit einer dem standardisierten Sonnenspektrum entsprechenden Intensität und Spektralverteilung anzusteuern, und (ii) in dem zweiten Betriebsmodus die

15 Beleuchtungsquelle zur sukzessiven Emission von Licht mit einer Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen anzusteuern. Ferner ist die Auswerteeinrichtung dazu konfiguriert, über die Kontaktierungseinrichtung eine elektrische Spannung an die Photovoltaikeinheit anzulegen und abhängig von der angelegten Spannung einen durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strom zu messen und dabei (i) in dem ersten

20 Betriebsmodus aus dem gemessenen Strom das spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der Photovoltaikeinheit unter Einwirkung des standardisierten Sonnenspektrums zu bestimmen, und (ii) in dem zweiten Betriebsmodus aus mehreren bei Beleuchtung mit den N verschiedenen Spektralverteilungen jeweils gemessenen Strömen $I_{\text{meas},n}$ ($n = 1 \dots N$) und unter Berücksichtigung einer für jede der N Spektralverteilungen vorbekannten

25 spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ ($n = 1 \dots N$) die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ der Photovoltaikeinheit zu bestimmen.

Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Bestimmen einer spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ einer

Photovoltaikeinheit mittels einer Messvorrichtung zum Bestimmen eines spannungsabhängigen Stromverhaltens $I(U)$ einer Photovoltaikeinheit unter Standard-Sonne-Bedingungen beschrieben. Die Messvorrichtung umfasst eine Beleuchtungsquelle, eine Kontaktierungseinrichtung, eine Steuerung und eine

5 Auswerteeinrichtung. Die Beleuchtungsquelle ist dazu konfiguriert, wahlweise Licht mit variierbaren Spektralverteilungen oder mit einer Intensität und Spektralverteilung, welche einem standardisierten Sonnenspektrum entsprechen, zu emittieren. Die Kontaktierungseinrichtung ist dazu konfiguriert, die Photovoltaikeinheit elektrisch zu kontaktieren. Die Steuerung ist dazu konfiguriert, die Beleuchtungsquelle in dem ersten

10 Betriebsmodus zur Emission von Licht mit einer dem standardisierten Sonnenspektrum entsprechenden Intensität und Spektralverteilung anzusteuern. Die Auswerteeinrichtung ist dazu konfiguriert, über die Kontaktierungseinrichtung eine elektrische Spannung an die Photovoltaikeinheit anzulegen und abhängig von der angelegten Spannung einen durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strom zu messen und dabei in dem ersten

15 Betriebsmodus aus dem gemessenen Strom das spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der Photovoltaikeinheit unter Einwirkung des standardisierten Sonnenspektrums zu bestimmen. Das Verfahren umfasst zumindest die folgenden Schritte, möglicherweise aber nicht notwendigerweise in der angegebenen Reihenfolge:

Ansteuern der Beleuchtungsquelle mittels der Steuerung in einem zweiten

20 Betriebsmodus zur sukzessiven Emission von Licht mit einer Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen,

Messen, mittels der Auswerteeinrichtung, in dem zweiten Betriebsmodus von bei Beleuchtung mit den N verschiedenen Spektralverteilungen jeweils durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strömen $I_{\text{meas},n}$ ($n = 1 \dots N$), und

25 Bestimmen der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ der Photovoltaikeinheit unter Berücksichtigung einer für jede der Spektralverteilungen vorbekannten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ ($n = 1 \dots N$).

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird ein Computerprogrammprodukt beschrieben, welches maschinenlesbare Anweisungen aufweist, welche bei Ausführung durch einen Prozessor einer Messvorrichtung zum Bestimmen eines Stromverhaltens unter Standard-Sonne-Bedingungen einer Photovoltaikeinheit die Messvorrichtung dazu
5 anleiten, das Verfahren einer Ausführungsform des zweiten Aspekts der Erfindung auszuführen oder zu steuern.

Gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung wird ein computerlesbares Medium beschrieben, welches darauf gespeicherte maschinenlesbare Anweisungen eines Computerprogrammprodukts gemäß einer Ausführungsform des dritten Aspekts der
10 Erfindung aufweist.

Einleitend soll eine Grundidee und mögliche Vorteile betreffend Ausführungsformen der herein beschriebenen Erfindung kurz erläutert werden, wobei diese Erläuterung als lediglich grob zusammenfassend und die Erfindung nicht einschränkend auszulegen ist:

15 Die vorliegende Erfindung betrifft insbesondere eine Messvorrichtung, mit der sowohl das spannungsabhängige Stromverhalten einer Photovoltaikeinheit bei Beleuchtung mit einem standardisierten Sonnenspektrum als auch die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Photovoltaikeinheit bestimmt werden können. Dabei weist die Messvorrichtung Komponenten wie insbesondere eine Beleuchtungsquelle, eine
20 Kontaktierungseinrichtung, eine Steuerung und eine Auswerteeinrichtung auf, wie sie häufig in modernen Sonnensimulatoren zum Einsatz kommen. Allerdings sind insbesondere die Steuerung und die Auswerteeinrichtung zusätzlich zu einer bei Sonnensimulatoren implementierten Funktionalität im Rahmen eines ersten Betriebsmodus, bei dem die Beleuchtungsquelle zum Emittieren des standardisierten
25 Sonnenspektrums angesteuert und die Auswerteeinrichtung zum Messen eines dadurch bewirkten, spannungsabhängigen Stroms der Photovoltaikeinheit konfiguriert sind, zur Implementierung eines zweiten Betriebsmodus konfiguriert. In diesem zweiten

Betriebsmodus kann die Messvorrichtung dann die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Photovoltaikeinheit bestimmen.

Für den zweiten Betriebsmodus wird hierbei ein anderer Ansatz eingesetzt, als dies bei den in der Beschreibungseinleitung erläuterten herkömmlichen Verfahren, insbesondere dem „SR-Standardverfahren“ oder dem „SR-LED-Referenzsolarzelle-Verfahren“, der Fall ist. Insbesondere wird ein Ansatz gewählt, bei dem die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit weitgehend mit Bauteilkomponenten, wie sie in einem Sonnensimulator häufig ohnehin eingesetzt werden, ermittelt werden kann, d.h. bei dem ein herkömmlicher Sonnensimulator hardwaretechnisch nicht oder lediglich geringfügig (beispielsweise, wie weiter unten erläutert, durch Hinzufügen eines Spektrometers oder eines Spektralradiometers) modifiziert werden braucht. Insbesondere wird genutzt, dass moderne Sonnensimulatoren oft über eine Beleuchtungsquelle mit beispielsweise mehreren verschiedenfarbigen LEDs verfügen und somit in der Lage sind, Licht mit einer variierbaren Spektralverteilung zu emittieren. Wie hierin weiter unten im Detail dargestellt, kann dies genutzt werden, um im zweiten Betriebsmodus die Photovoltaikeinheit mehrmals mit jeweils verschiedenen Spektralverteilungen zu beleuchten und dabei jeweils den bewirkten Strom zu messen. Sofern für jede Spektralverteilung dann die zugehörige spektrale Bestrahlungsstärke beispielsweise aufgrund einer zusätzlich durchgeführten Messung mit einem Spektrometer bzw. Spektralradiometer bekannt ist, kann die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit beispielsweise mithilfe eines relativ einfach zu implementierenden Rechenverfahrens bestimmt werden.

Die hier beschriebene „multi-spektrale Bestimmungsmethode“ kann diverse Vorteile gegenüber den weiter oben beschriebenen herkömmlichen Verfahren zum Bestimmen der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit bieten, insbesondere wenn sie in Kombination mit den Ressourcen bzw. Komponenten eines Sonnensimulators bzw. IV-Messplatzes implementiert wird.

Es können unter anderem folgende Vorteile gegenüber dem SR-Standardverfahren genannt werden:

- Die SR der Photovoltaikeinheit kann innerhalb eines IV-Messplatzes mit einer spektral justierbaren Lichtquelle direkt bestimmt werden. Ein separater SR-Messplatz ist nicht
5 notwendig. Dadurch können Kosten, Aufwand und Zeit gespart werden.
 - Eine mechanische Belastung der Photovoltaikeinheit kann reduziert werden, insbesondere da sie nur einmal kontaktiert werden muss, um dann sowohl eine IV-Kurve als auch eine SR-Kurve ermitteln zu können.
 - Es wird keine komplexe Lock-In-Technik benötigt und auch kein Transimpedanz-
10 wandler. Dies kann insbesondere für eine Charakterisierung großer Solarzellen (M6 – M12) vorteilhaft sein, da hierfür bisher meist kein Transimpedanzwandler zur Anwendung des Standardverfahrens kommerziell erhältlich ist.
 - Eine Messdauer kann sich von ca. 20-60 min beim SR-Standardverfahren auf wenige Minuten oder sogar weniger als eine Minute reduzieren.
- 15 Gegenüber dem „SR-LED-Referenzsolarzelle-Verfahren“ können unter anderem folgende Vorteile genannt werden:
- Die SR-Kurve kann direkt am 1-Sonnen-Arbeitspunkt der Solarzelle bzw. der Photovoltaikeinheit bestimmt werden.
 - Die vorgeschlagene Methodik ist mathematisch einfach durchzuführen.
 - 20 - Es werden keine Korrekturen bei breitbandigen LEDs benötigt.
 - Insbesondere kann anstatt einer kalibrierten Referenzsolarzelle ein Spektrometer oder ein Spektralradiometer (kalibriertes Spektrometer) als Referenz verwendet werden. Solch ein Spektrometer bzw. Spektralradiometer kann in ausreichend guter Qualität verfügbar, insbesondere kommerziell erhältlich, sein.
 - 25 - Die Stabilisierung der Lichtintensität der LEDs kann mit üblicherweise verwendeten breitbandigen Monitordioden durchgeführt werden. Eine Stabilisierung jedes einzelnen LED-Kanals ist nicht notwendig.

Außerdem lassen sich mit Ausführungsformen der hierin vorgestellten Messvorrichtung unterschiedliche Varianten von Strahlungssensoren charakterisieren. Eine erste Variante verhält sich dabei wie eine Solarzelle. Eine zweite Variante eines Strahlungssensors hat einen internen Shuntwiderstand. Bei derartigen Strahlungssensoren wird ein

5 Spannungsabfall eines intern fließenden Stroms über einem Widerstand gemessen. Auch derartige Sensoren lassen sich mit dem hier vorgestellten Verfahren bzw. der vorgestellten Messvorrichtung messen. Außerdem lässt sich der hier vorgestellte Ansatz auch zur Charakterisierung digitaler Sensoren einsetzen, die einen Wert ausgeben, der proportional zur Bestrahlungsstärke ist.

10 Insgesamt ist eine vorteilhafte Integration der hierin vorgestellten Methodik in einen Mehrkanal-LED-Sonnensimulator vorstellbar. Dadurch kann beispielsweise die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ einer zu messenden Solarzelle ergänzend zu einem mit dem Sonnensimulator ermittelten spannungsabhängigen Stromverhalten der Solarzelle bestimmt werden und somit direkt der Faktor einer spektralen Fehlanpassung

15 ermittelt werden. Es ist hierbei insbesondere kein weiterer Messplatz notwendig, sodass unter anderem erhebliche Kosten und/oder Platzbedarf beispielsweise für die Ausstattung einer Solarzellenfertigungsline unter Einbeziehung einer SR-Messmöglichkeit eingespart werden können.

20 Nachfolgend werden mögliche Ausgestaltungen und Vorteile von Ausführungsformen der Messvorrichtung sowie eines Verfahrens in genaueren Einzelheiten beschrieben:

Die hierin vorgestellte Messvorrichtung ist unter anderem für eine Implementierung einer Funktionalität eines Sonnensimulators ausgelegt. Dementsprechend kann die Messvorrichtung das spannungsabhängige Stromverhalten einer einzelnen Solarzelle

25 oder eines ganzen Solarmoduls unter Standard-Sonne-Bedingungen bestimmen.

Die Beleuchtungsquelle der Messvorrichtung ist hierzu in der Lage, Licht zu emittieren, welches hinsichtlich seiner Intensität demjenigen von natürlichem Sonnenlicht entspricht, das heißt mit etwa 1000 W/m^2 , und welches außerdem eine Spektralverteilung aufweist, welche natürlichem Sonnenlicht weitgehend ähnelt.

- 5 Beispielsweise ist die Beleuchtungsquelle zum Emittieren eines AM1.5G-Sonnenspektrums konfiguriert. Die Beleuchtungsquelle kann dabei eine Messfläche möglichst homogen ausleuchten, welche zumindest die Oberfläche der zu charakterisierenden Photovoltaikeinheit überdeckt, das heißt zur Messung einzelner Solarzellen eine Messfläche von typischerweise zwischen $0,1 \text{ cm}^2$ und 1000 cm^2 , meist
- 10 zwischen 1 cm^2 und 500 cm^2 , bzw. zur Messung ganzer Solarmodule eine deutlich größere Messfläche mit beispielsweise wenigstens $0,3 \text{ m}^2$ bis hin zu einigen Quadratmetern. Ein Betrieb und insbesondere eine Energieversorgung der Beleuchtungsquelle werden hierbei von der Steuerung der Messvorrichtung gesteuert.

- Die Messvorrichtung verfügt über eine Kontaktierungseinrichtung, mithilfe derer die zu
- 15 charakterisierende Photovoltaikeinheit elektrisch kontaktiert und gegebenenfalls geeignet positioniert und/oder mechanisch gehalten werden kann. Über die Kontaktierungseinrichtung kann die Auswerteeinrichtung der Messvorrichtung eine elektrische Spannung an die Photovoltaikeinheit anlegen und den sich daraufhin einstellenden Strom (nachfolgend teilweise als „PV-Strom“ bezeichnet) messen. Die
- 20 Spannung kann dabei beispielsweise über einen Bereich hin variiert werden, der zumindest von einer Kurzschlussspannung U_{sc} (short-circuit) bis zu einer Offene-Klemmen-Spannung U_{oc} (open-circuit, manchmal auch als Leerlaufspannung bezeichnet) der Photovoltaikeinheit reicht, d.h. beispielsweise bei einer einzelnen Siliziumsolarzelle über einen Spannungsbereich von 0 V bis ca. $0,7 \text{ V}$.

- 25 Ergänzend zu der Sonnensimulator-Funktionalität ist die vorgestellte Messvorrichtung zur Implementierung einer Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ konfiguriert.

Die Beleuchtungsquelle ist hierzu derart konfiguriert, dass mit ihrer Hilfe Licht mit unterschiedlichen Spektralverteilungen emittiert werden kann. Das Licht kann hierbei sukzessive mit einer Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen emittiert werden, wobei $N > 1$, $N > 2$, $N > 5$, vorzugsweise $N > 10$ oder $N > 20$, $N > 50$, $N > 100$, $N > 200$,
5 $N > 500$ oder $N > 1000$ und/oder $N < 100000$, $N < 50000$, $N < 10000$, vorzugsweise $N < 5000$ oder $N < 1000$, $N < 500$ oder $N < 100$ gelten kann. Eine emittierte Spektralverteilung kann dabei über die Steuerung der Messvorrichtung gesteuert und variiert werden. Die Spektralverteilungen unterscheiden sich hierbei insbesondere hinsichtlich einer bei verschiedenen Wellenlängen emittierten Strahlungsleistung.
10 Unterschiede zwischen den Spektralverteilungen können dabei über zumindest einen Wellenlängenteilbereich hinweg zumindest 1 % relativ, zumindest 2 % relativ, zumindest 5 % relativ, zumindest 10 % relativ oder zumindest 20 % relativ betragen, wobei der Wellenlängenteilbereich sich zum Beispiel über zumindest ein Wellenlängenintervall von wenigstens 5 nm, wenigstens 10 nm, wenigstens 20 nm oder wenigstens 30 nm
15 erstrecken kann. Die Beleuchtungsquelle kann Licht mit einer Spektralverteilung über zumindest eine Beleuchtungsdauer hinweg emittieren, die ausreichend lang ist, um den sich daraufhin in der Photovoltaikeinheit einstellenden Strom messen zu können. Beispielsweise kann die Beleuchtungsdauer länger als 10 ms, länger als 100 ms, länger als 1 s oder länger als 10 s und/oder kürzer als 100 s, kürzer als 10 s, kürzer als 1 s oder
20 kürzer als 100 ms sein.

Die Auswerteeinrichtung ist hierbei ergänzend dazu konfiguriert, in dem zweiten Betriebsmodus bei jeder der von der Beleuchtungsquelle eingestrahnten N verschiedenen Spektralverteilungen jeweils den sich in der Photovoltaikeinheit ergebenden elektrischen PV-Strom $I_{\text{meas},n}$ (mit $n = 1 \dots N$) zu messen. Ausgehend von dieser Vielzahl von
25 Strommessungen kann dann, wie weiter unten im Detail für ein Beispiel erläutert, die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Photovoltaikeinheit beispielsweise durch eine analytische und/oder numerische Rechnung zumindest in einer für praktische Anwendungen ausreichend guten Näherung bestimmt werden.

Dabei muss neben der Information über die gemessenen PV-Ströme auch für jede der Spektralverteilungen eine zugehörige spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ ($n = 1 \dots N$) in ausreichender Qualität vorbekannt sein und bei der Bestimmung der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit berücksichtigt werden.

- 5 Hierzu kann gemäß einer Ausführungsform die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der Spektralverteilungen durch Messung mittels des Spektrometers bzw. Spektralradiometers vorbekannt sein. Anders ausgedrückt kann ein Spektrometer bzw. Spektralradiometer dazu eingesetzt werden, um die in der hierin beschriebenen Messvorrichtung zu emittierenden Spektralverteilungen hinsichtlich ihrer spektralen
- 10 Bestrahlungsstärken mit einer Genauigkeit zu messen, die für die nachfolgend durchzuführende Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ ausreicht.

- Ein Spektrometer ist dazu ausgelegt, ein Lichtspektrum als Intensität in Funktion der Wellenlänge auszumessen. Einfache Spektrometer erfassen dabei die Lichtintensität bei
- 15 den verschiedenen Wellenlänge meist als relative Messgröße und geben Messwerte typischerweise als [counts] aus.

- Ein Spektralradiometer, manchmal auch als Spektroradiometer bezeichnet, ist ein Lichtmessgerät in Form eines kalibrierten Spektrometers, das sowohl die Wellenlänge als auch die spektrale Bestrahlungsstärke des von einer Lichtquelle ausgestrahlten Lichts
- 20 messen kann. Im Gegensatz zu einem einfachen Spektrometer, welches ein Spektrum einfallenden Lichts im Allgemeinen lediglich hinsichtlich seiner relativen Intensitätsunterschiede bei verschiedenen Wellenlängenbereichen messen kann, kann ein Spektralradiometer als kalibriertes Spektrometer für jeden Wellenlängenbereich eine absolute Bestrahlungsstärke ermitteln. Spektrometer in Form sogenannter
- 25 Arrayspektrometer unterscheiden die Wellenlänge anhand einer Position, an der das Licht auf eine Detektoranordnung trifft, so dass das gesamte Spektrum mit einer einzigen Erfassung erfasst werden kann. Sofern die Lichtquelle zeitlich stabil ist, kann das

Spektrum alternativ auch mit einem scannenden System gemessen werden, wobei die Auswahl der Wellenlänge meist über eine Dispersionsoptik wie z.B. ein optisches Gitter, ein Prisma oder ähnliches erfolgt. Die Dispersionsoptik kann in diesem Fall schrittweise gedreht werden und pro Drehschritt kann mit einem kleinen breitbandigen Sensor

5 beispielsweise auf Siliziumbasis die (spektrale) Bestrahlungsstärke gemessen werden. Die meisten Spektrometer verfügen über eine Basismessung von Zählungen, die ein unkalibrierter Messwert ist und somit von der Empfindlichkeit des Detektors für jede Wellenlänge beeinflusst wird. Durch Anwendung einer Kalibrierung ist das Spektrometer dann als Spektralradiometer in der Lage, Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke

10 $[W/(m^2 \cdot nm)]$, der spektralen Strahldichte und/oder des spektralen Flusses zu liefern. Diese Daten können dann verwendet werden, um beispielsweise Messwerte für Bestrahlungsstärke (W/cm^2), Beleuchtungsstärke (Lux oder fc), Strahldichte (W/sr), Leuchtdichte (cd), Lichtstrom (Lumen oder Watt), Chromatizität, Farbtemperatur, Spitzenwert und/oder dominante Wellenlänge zu erhalten. Spektrometer können viele

15 Wellenlängenbereiche abdecken. Ein effektiver Wellenlängenbereich (Spektralbereich) eines Spektrometers wird nicht nur durch ein Dispersionsvermögen eines darin eingesetzten Gitters bestimmt, sondern hängt auch vom Empfindlichkeitsbereich der Detektoren ab. Begrenzt durch eine Bandlücke des Halbleiters spricht beispielsweise ein Detektor auf Siliziumbasis auf 200-1100 nm an, während ein Detektor auf InGaAs-Basis

20 meist für 900-1700 nm empfindlich ist.

Um basierend auf der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ nachfolgend die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ in ausreichender Qualität bestimmen zu können, sollte die spektrale Bestrahlungsstärke mit einer ausreichenden Genauigkeit

25 Wellenlängenauflösung von mindestens 100 nm, vorzugsweise mindestens 50 nm, mindestens 20 nm oder mindestens 10 nm, vorbekannt sein. Ergänzend sollte die spektrale Bestrahlungsstärke mit einer spektralen Bandbreite von höchstens 100 nm, vorzugsweise höchstens 50 nm, höchstens 20 nm oder höchstens 10 nm, vorbekannt

sein. Ferner sollte die spektrale Bestrahlungsstärke über einen Wellenlängenbereich von mindestens 400 nm bis 800 nm vorbekannt sein, wobei eine untere Grenze des Wellenlängenbereichs vorzugsweise bei 380 nm, 350 nm, 330 nm oder 300 nm oder sogar niedriger und eine obere Grenze des Wellenlängenbereichs vorzugsweise bei
5 850 nm, 900 nm, 950 nm, 1000 nm, 1050 nm oder 1100 nm oder sogar höher liegen kann. Außerdem sollte die spektrale Bestrahlungsstärke mit einer Nicht-Linearität in Bezug auf die Intensität von besser als 20 %, vorzugsweise besser als 10 % oder besser als 5 % vorbekannt sein. Ferner sollte eine relative Intensitätskalibrierung besser als 20 %, vorzugsweise besser als 10 % oder besser als 5 % sein. Abschließend sollte eine
10 relative Wellenlängenkalibrierung besser als 40 nm, vorzugsweise besser als 10 nm oder sogar besser als 3 nm sein. Insbesondere kann die spektrale Bestrahlungsstärke mithilfe eines hochwertigen Spektralradiometers gemessen sein, welches für ein Messen der spektralen Bestrahlungsstärke mit den vorgenannten Eigenschaften konzipiert ist. Ferner sollte ein solches Spektralradiometer möglichst über eine Computerschnittstelle
15 verfügen, um die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke und gegebenenfalls andere Daten an andere Komponenten der hierin beschriebenen Messvorrichtung kommunizieren zu können.

Durch das Nutzen des Spektrometers bzw. Spektralradiometers kann für jede der von der Beleuchtungsquelle auf die Photovoltaikeinheit eingestrahlten Spektralverteilungen
20 jeweils deren spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ mit hoher Genauigkeit und individuell für die tatsächlich auf die Photovoltaikeinheit eingestrahlte Spektralverteilung gemessen werden. Basierend auf solchen Messwerten $E_{\lambda,n}(\lambda)$ kann dann zusammen mit der Information über die jeweils gemessenen Ströme $I_{\text{meas},n}$ die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ mit hoher Genauigkeit und ausreichender
25 Auflösung rechnerisch ermittelt werden.

Sofern die spektrale Bestrahlungsstärke mit einem unkalibrierten Spektrometer gemessen wurde, kann basierend auf den Messwerten eine Information über die relative

spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit abgeleitet werden. Wurde die spektrale Bestrahlungsstärke hingegen mit einem kalibrierten Spektralradiometer gemessen, kann basierend auf den Messwerten eine Information über die absolute spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit abgeleitet werden. Aus dieser Information über die absolute spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit kann dann ein Absolutwert für den Kurzschlussstrom I_{SC} der Solarzelle errechnet werden.

Das Spektrometer bzw. Spektralradiometer kann hierfür gemäß einer Ausführungsform in die Messvorrichtung integriert sein, um die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der innerhalb der Messvorrichtung emittierten Spektralverteilungen aktuell messen zu können. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass es zwar vorteilhaft erscheint, die spektrale Bestrahlungsstärke für jede eingestrahlte Spektralverteilung individuell mithilfe eines direkt in die Messvorrichtung integrierten Spektrometers bzw. Spektralradiometers zu messen, dass dies für die Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit jedoch nicht zwingend erforderlich ist, solange die spektrale Bestrahlungsstärke zumindest aus anderen Informationsquellen vorbekannt ist. Beispielsweise kann die spektrale Bestrahlungsstärke auch aus anderen Messdaten und/oder Simulationen berechnet bzw. bestimmt werden.

Dabei ist es im Allgemeinen notwendig, die Emissionseigenschaften der in der Messvorrichtung genutzten Beleuchtungsquelle zumindest einmalig mithilfe eines Spektrometers bzw. Spektralradiometers zu vermessen, d.h. entweder simultan zusammen mit dem Messen der jeweiligen Ströme $I_{meas,n}$ oder zu einem anderen Zeitpunkt, d.h. einem früheren Zeitpunkt oder einem späteren Zeitpunkt.

Beispielsweise kann das Spektrometer bzw. Spektralradiometer extern vorgehalten sein oder nur zeitweise in die Messvorrichtung eingebaut werden. In diesem Fall kann mithilfe des Spektrometers bzw. Spektralradiometers einmalig vorab oder in gewissen Zeitabständen die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der innerhalb der Messvorrichtung zu emittierenden Spektralverteilungen gemessen und gespeichert

werden, sodass dann zu einem Zeitpunkt, zu dem in der Messvorrichtung die Spektralverteilungen tatsächlich emittiert werden, deren spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ nicht mehr aktuell gemessen werden braucht, sondern die gespeicherten Werte abgerufen werden können. Eventuell können die Emissionsspektren einzelner

- 5 Lichtquellen wie beispielsweise einzelner LEDs, welche in einer Mehrzahl gemeinsam die Beleuchtungsquelle der Messvorrichtung bilden, vorab mithilfe des Spektrometers bzw. Spektralradiometers vermessen werden. Dabei sollten die Emissionsspektren jeder einzelnen Lichtquelle bei unterschiedlichen Ansteuerungen, d.h. bei unterschiedlichen Emissionsintensitäten, vermessen werden. Aus den derart ermittelten Messdaten kann
- 10 dann eventuell später im Betrieb der Messvorrichtung das insgesamt von der Beleuchtungsquelle emittierte Licht mit seiner Spektralverteilung und deren spektraler Bestrahlungsstärke ermittelt, d.h. beispielsweise errechnet, werden.

- Bei einer solchen Herangehensweise wird angenommen, dass die Beleuchtungsquelle der Messvorrichtung die verschiedenen Spektralverteilungen z.B. durch gezieltes
- 15 Ansteuern von deren einzelnen Lichtquellen sehr genau und zeitlich stabil reproduzieren kann. Sollte eine solche genaue Reproduktion verschiedener Spektralverteilungen nicht möglich oder nicht gewährleistet sein, sollte vorzugsweise ein Spektrometer bzw. Spektralradiometer direkt in der Messvorrichtung vorgesehen sein und jede angesteuerte Spektralverteilung mithilfe dieses Spektrometers bzw. Spektralradiometers
- 20 hinsichtlich seiner spektralen Bestrahlungsstärke aktuell vermessen werden.

Gemäß einer weiter spezifizierten Ausführungsform ist das Spektrometer bzw. Spektralradiometer derart konfiguriert und angeordnet, dass es Licht von einer Position benachbart zu und/oder in einer Ebene mit der in der Kontaktierungseinrichtung zu kontaktierenden Photovoltaikeinheit empfängt.

- 25 Anders ausgedrückt kann das Spektrometer bzw. Spektralradiometer derart in der Messvorrichtung angeordnet sein oder an die Messvorrichtung optisch angekoppelt sein, dass es ebenso wie die zu vermessende Photovoltaikeinheit mit von der

Beleuchtungsquelle emittiertem Licht bestrahlt wird und dabei das die Photovoltaikeinheit erreichende Licht sich qualitativ und/oder quantitativ lediglich unwesentlich von dem das Spektrometer bzw. Spektralradiometer erreichenden Licht unterscheidet. Vorzugsweise soll das Spektrometer bzw. Spektralradiometer derart
5 angeordnet sein, dass die spektrale Bestrahlungsstärke des die Photovoltaikeinheit erreichenden Lichts sich insgesamt und/oder bei jeder Wellenlänge innerhalb des effektiven Spektralbereichs des Spektrometers bzw. Spektralradiometers um weniger als 10 %, weniger als 5 %, weniger als 2 %, weniger als ein Prozent, weniger als 0,5 % oder sogar weniger als 0,1 % von dem das Spektralradiometer erreichenden Licht
10 unterscheidet.

Das Spektrometer bzw. Spektralradiometer kann beispielsweise in einem Abstand von weniger als 20 cm, weniger als 10 cm, weniger als 5 cm oder sogar weniger als 2 cm von einem Rand der Kontaktierungseinrichtung bzw. einem Rand der in der Kontaktierungseinrichtung zu fixierenden Photovoltaikeinheit angeordnet sein. Dabei
15 kann eine Detektionsfläche des Spektrometer bzw. Spektralradiometers sich in oder parallel zu einer Oberfläche der in der Kontaktierungseinrichtung zu haltenden Photovoltaikeinheit oder in einem Winkel von weniger als 30°, weniger als 20°, weniger als 10°, weniger als 5° oder sogar weniger als 2° zu dieser erstrecken.

Alternativ kann das Spektrometer bzw. Spektralradiometer zwar entfernt von der in der Kontaktierungseinrichtung zu fixierenden Photovoltaikeinheit angeordnet sein, aber
20 optisch in einen die Photovoltaikeinheit erreichenden Strahlengang an einer Position nahe der derart fixierten Photovoltaikeinheit eingekoppelt sein. Beispielsweise kann in dem Strahlengang ein Strahlteiler wie z.B. eine Glasplatte angeordnet sein, welche einen Anteil des auf das Photovoltaikelement gerichteten Lichts auskoppelt und auf das
25 Spektrometer bzw. Spektralradiometer lenkt.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Beleuchtungsquelle eine Mehrzahl M von Lichtquellen auf, welche unabhängig voneinander von der Steuerung zur Emission von

für verschiedene der Lichtquellen unterschiedlichen Emissionsspektren und/oder unterschiedlichen Emissionsintensitäten ansteuerbar sind.

Mit anderen Worten kann die Beleuchtungsquelle nicht als eine einzelne Lichtquelle sondern zusammengesetzt aus mehreren Lichtquellen vorgesehen sein, wobei jede der

5 Lichtquellen oder Gruppen mehrerer Lichtquellen voneinander unabhängig von der Steuerung angesteuert werden können und aufgrund einer solchen Ansteuerung dann Licht mit unterschiedlichen Emissionsspektren und/oder unterschiedlichen Emissionsintensitäten abstrahlen. Das insgesamt von der Beleuchtungsquelle daraufhin emittierte Licht ergibt sich somit hinsichtlich seiner Intensität und Spektralverteilung aus

10 einer Überlagerung der von den einzelnen Lichtquellen emittierten Lichtanteile. Insbesondere die Spektralverteilung dieses insgesamt emittierten Lichts kann daher in einfacher Weise dadurch variiert werden, dass die einzelnen Lichtquellen hinsichtlich ihrer emittierten Lichtintensität, das heißt insbesondere hinsichtlich ihrer Leistung, variiert werden. Anders ausgedrückt kann die Spektralverteilung des von der

15 Beleuchtungsquelle emittierten Lichts in technisch einfach zu realisierender Weise dadurch variiert werden, dass die einzelnen Lichtquellen gesteuert durch die Steuerung mit unterschiedlichen Leistungen versorgt werden.

Insbesondere kann die Beleuchtungsquelle gemäß einer Ausführungsform eine Mehrzahl M von durch die Steuerung unabhängig voneinander ansteuerbaren Lichtquellen in

20 Form von LEDs mit unterschiedlichen Emissionsspektren aufweisen.

LEDs weisen typischerweise einen im Vergleich zu thermischen Lichtquellen geringen Energiebedarf auf. Dementsprechend kann insbesondere bei hohen Bestrahlungszeiten, wie sie zum Betrieb eines Sonnensimulators regelmäßig erforderlich sind, durch den Einsatz von LEDs signifikant Energie eingespart werden. Außerdem stehen inzwischen

25 LEDs mit stark unterschiedlichen Emissionsspektren zur Verfügung. Beispielsweise existieren LEDs, die im nahen UV-Spektralbereich, in verschiedenen Teilbereichen des sichtbaren Spektralbereichs und/oder im infraroten Spektralbereich emittieren. Durch

den Einsatz verschiedener LEDs in der Beleuchtungsquelle kann somit ein Spektralbereich abgedeckt werden, der für eine Beleuchtung im Rahmen einer Messung der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit in den meisten Fällen ausreichend ist. Ein solcher Spektralbereich erstreckt sich beispielsweise ab zumindest 400 nm, ab zumindest 350
5 nm, vorzugsweise ab zumindest 280 nm, ab zumindest 250 nm oder ab zumindest 200 nm und/oder bis zumindest 1100 nm, bis zumindest 1150 nm, bis zumindest 1180 nm, bis zumindest 1300 nm, bis zumindest 1500 nm oder sogar vorzugsweise bis zu 2500 nm.

Dabei wird es als vorteilhaft angesehen, die Lichtquellen und ihre Emissionsspektren
10 derart zu wählen, dass innerhalb des gesamten Spektralbereichs zumindest eine der Lichtquellen Licht mit signifikanter Intensität emittiert. Die LEDs können sich hierbei hinsichtlich von in ihnen eingesetzten Halbleitermaterialien unterscheiden, da insbesondere beispielsweise eine Bandlücke solcher Halbleitermaterialien ein von einer LED emittiertes Emissionsspektrum maßgeblich beeinflusst. Die LEDs können auch mit
15 optischen Filtern ausgestattet sein, um das Emissionsspektrum zu beeinflussen. Die Emissionsspektren unterschiedlicher LEDs können sich hinsichtlich einer zentralen Emissionswellenlänge und/oder hinsichtlich einer wellenlängenabhängigen Verteilung der Emissionsintensität voneinander unterscheiden.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen
20 größer als die Mehrzahl M von Lichtquellen.

Mit anderen Worten ist es als vorteilhaft anzusehen, die Vielzahl von Beleuchtungen der Photovoltaikeinheit mit verschiedenen Spektralverteilungen größer zu wählen als die Mehrzahl von in der Beleuchtungsquelle vorgesehenen, individuell steuerbaren Lichtquellen. Anders ausgedrückt wird es zwar generell als vorteilhaft angesehen, die
25 spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit durch Messung von PV-Strömen bei Beleuchtung mit einer möglichst großen Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen zu bestimmen, beispielsweise $N > 10$, $N > 20$, $N > 50$ oder $N > 100$. Hierzu muss jedoch

- nicht notwendigerweise auch die Anzahl der in der Beleuchtungsquelle vorzusehenden Lichtquellen sehr hoch sein. Theoretisch kann bereits mit zwei Lichtquellen unterschiedlicher Emissionsspektren durch Variieren ihrer jeweiligen Emissionsintensitäten eine beliebige Anzahl verschiedener Spektralverteilungen erzeugt
- 5 werden. Für den Einsatz in der vorgestellten Messvorrichtung erscheint eine Beleuchtungsquelle mit einer Mehrzahl M von Lichtquellen unterschiedlicher Emissionsspektren mit $M > 2$, $M > 5$, $M > 10$ oder $M > 20$ und/oder $M < 100$, $M < 50$, $M < 20$ oder $M < 10$ vorteilhaft. Dabei kann es jeweils Gruppen von mehreren Lichtquellen gleichen Emissionsspektrums geben.
- 10 Gemäß einer Ausführungsform sind die Steuerung und die Beleuchtungsquelle dazu konfiguriert, die Beleuchtungsquelle in dem zweiten Betriebsmodus derart zur sukzessiven Emission von Licht anzusteuern, dass jede der Vielzahl verschiedener Spektralverteilungen bei jeder Wellenlänge innerhalb eines Emissionsbandes von wenigstens 400 nm bis 1100 nm eine von Null verschiedene Emissionsleistung aufweist.
- 15 Anders ausgedrückt sollte das von der Beleuchtungsquelle emittierte Licht für jede der sukzessive emittierten Spektralverteilungen jeweils innerhalb eines gesamten Emissionsbandes bei jeder Wellenlänge eine signifikante Emissionsleistung aufweisen. Die Formulierung „eine von Null verschiedene Emissionsleistung“ kann hierbei dahingehend verstanden werden, dass bei jeder Wellenlänge eine
- 20 Mindestemissionsleistung emittiert wird, die eine ausreichend präzise Messung des dabei generierten PV-Stroms ermöglicht. Mit anderen Worten soll die Spektralverteilung innerhalb des Emissionsbandes keine Lücken aufweisen, bei denen innerhalb von Wellenlängenteilintervallen keine Lichtintensität bzw. eine zum Auswerten eines hierdurch bewirkten PV-Stroms unzureichende Lichtintensität emittiert wird. Es wird
- 25 davon ausgegangen, dass ein Vorhandensein solcher Lücken in einer oder mehreren Spektralverteilungen nachteilig bei der Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit ist, d.h. beispielsweise zu einer ungenauen Ermittlung

der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit in dem der Lücke entsprechenden Wellenlängenbereich führen kann. Dementsprechend kann es vorteilhaft sein, die in der Beleuchtungsquelle eingesetzten Lichtquellen derart zu wählen, dass sich deren Emissionsspektren über den gesamten zu erfassenden Spektralbereich hin verteilt
5 erstrecken und/oder zumindest teilweise überlappen und sich somit keine Lücken ergeben.

Gemäß einer Ausführungsform sind die Steuerung und die Auswerteeinrichtung dazu konfiguriert, in dem zweiten Betriebsmodus die Beleuchtungsquelle dazu anzusteuern, Licht sukzessive mit wenigstens zehn verschiedenen Spektralverteilungen zu emittieren
10 und für jede der Spektralverteilungen den dabei durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strom $I_{\text{meas},n}$ zu messen.

Indem die Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen, mit denen die Photovoltaikeinheit sukzessive von der Beleuchtungsquelle bestrahlt wird, ausreichend groß, d.h. mit $N \geq 10$, $N \geq 50$ oder sogar $N \geq 100$, gewählt wird, kann eine Genauigkeit,
15 mit der letztendlich die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit bestimmt werden kann, erhöht werden. Dabei wird als vorteilhaft angenommen, wenn sich zumindest einige der verschiedenen Spektralverteilungen derart voneinander unterscheiden, dass letztendlich für jeden Wellenlängenbereich innerhalb des gesamten zu erfassenden Spektralbereich zwei oder mehr Spektralverteilungen existieren, die sich in diesem
20 Wellenlängenbereich voneinander unterscheiden.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Auswerteeinrichtung dazu konfiguriert, zum Bestimmen der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ der Photovoltaikeinheit ein Gleichungssystem zu erstellen und zu lösen, wobei
- ein gesamter Wellenlängenbereich, innerhalb dessen die spektrale Bestrahlungsstärke-
25 empfindlichkeit $SR(\lambda)$ zu bestimmen ist, in eine Mehrzahl von K Wellenlängenintervallen $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ mit $(k = 1 \dots K)$ aufgeteilt wird,
- für jede der N verschiedenen Spektralverteilungen und jedes der K

- Wellenlängenintervalle eine auf das jeweilige Wellenlängenintervall bezogene Bestrahlungsstärke $P_{k,n}$ durch Aufintegration der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ über das jeweilige Wellenlängenintervall $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ bestimmt wird, und
- eine anteilige spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit SR_k bezogen auf jedes der K
- 5 Wellenlängenintervalle durch Lösen des folgenden Gleichungssystems näherungsweise bestimmt wird:

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,K} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,1} & P_{N,2} & \cdots & P_{N,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SR_1 \\ SR_2 \\ \vdots \\ SR_K \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} I_{\text{meas},1} \\ I_{\text{meas},2} \\ \vdots \\ I_{\text{meas},N} \end{pmatrix}$$

- Details zu einer möglichen Ausgestaltung einer solchen näherungsweisen und
- 10 analytischen Berechnung werden weiter unten mit Bezug auf eine beispielhafte Ausführungsform dargelegt.

Gemäß einer weiter konkretisierten Ausführungsform wird die anteilige spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit SR_k für jedes der K Wellenlängenintervalle als innerhalb des Wellenlängenintervalls konstant angenommen.

- 15 Wie weiter unten mit Bezug auf die beispielhafte Ausführungsform detaillierter erläutert, kann die Annahme, dass die anteilige spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit innerhalb jedes einer Mehrzahl von Wellenlängenintervallen als näherungsweise konstant angesehen werden kann, eine analytische und/oder numerische Berechnung der gesamten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit ermöglichen oder
- 20 vereinfachen.

Gemäß einer Ausführungsform wird die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ unter Berücksichtigung einer für jede der N Spektralverteilungen vorbekannten relativen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ oder unter Berücksichtigung einer für jede

der N Spektralverteilungen vorbekannten absoluten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ bestimmt.

- Für manche Anwendungsfälle kann es genügen, lediglich eine relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit zu ermitteln. Beispielsweise kann eine solche relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit hinreichend für eine Bestimmung eines Faktors der spektralen Fehlanpassung, nicht aber für eine Bestimmung eines Kurzschlussstroms sein. Zum Bestimmen der relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit kann es im Allgemeinen genügen, für jede der N Spektralverteilungen deren relative spektrale Bestrahlungsstärke zu kennen. Eine Messung solcher relativer spektraler Bestrahlungsstärken kann einfacher sein als eine Messung entsprechender Absolutwerte. Sofern jedoch beispielsweise mittels eines ausreichend präzisen Spektralradiometers absolute spektrale Bestrahlungsstärken für alle Spektralverteilungen gemessen werden können, können diese Werte zur Bestimmung der absoluten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit herangezogen werden.
- 15 Gemäß einer Ausführungsform ist die Steuerung dazu konfiguriert, die Beleuchtungsquelle in dem zweiten Betriebsmodus zur Emission von Licht mit einer Intensität von zwischen 60 % und 140 %, vorzugsweise zwischen 80% und 120 % des standardisierten Sonnenspektrums oder mit einer Intensität von weniger als 30% des standardisierten Sonnenspektrums anzusteuern.
- 20 Anders ausgedrückt kann die Steuerung der Messvorrichtung in einer ersten Variante des zweiten Betriebsmodus dazu ausgelegt sein, die Beleuchtungsquelle Licht emittieren zu lassen, wie es im Wesentlichen auch beim Betrieb innerhalb des ersten Betriebsmodus zur Implementierung der Sonnensimulator-Funktionalität eingesetzt wird. Das Licht kann hierbei mit einer Intensität gleich derjenigen des standardisierten Sonnenspektrums, d.h.
- 25 beispielsweise bei einem standardisierten AM1.5G-Spektrum mit 1000 W/m^2 , auf die Photovoltaikeinheit gerichtet werden, wobei ein Toleranzbereich bezüglich der emittierten Lichtintensität maximal 20 %, maximal 10 % oder maximal 5 % betragen

sollte. Die im zweiten Betriebsmodus dabei sukzessive angesteuerten verschiedenen Spektralverteilungen können der Spektralverteilung des standardisierten Sonnenspektrums zumindest innerhalb eines Toleranzbereichs ähneln. Beispielsweise können die Spektralverteilungen des von der Beleuchtungseinrichtung während des

5 zweiten Betriebsmodus sukzessive variierenden Lichts sich für jede Wellenlänge bzw. jeden Wellenlängenteilbereich innerhalb des gesamten Spektralbereichs um weniger als 30 %, vorzugsweise weniger als 20 % oder weniger als 10 % von dem standardisierten Sonnenspektrum unterscheiden. Dementsprechend kann die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit dann unter Beleuchtungsbedingungen bestimmt

10 werden, wie sie den im realen Einsatz herrschenden Bedingungen entsprechen.

In einer alternativen zweiten Variante des zweiten Betriebsmodus kann die Beleuchtungsquelle von der Steuerung zur Lichtemission mit einer im Vergleich zum standardisierten Sonnenspektrum stark reduzierten Intensität angesteuert werden. Beispielsweise kann die emittierte Lichtintensität weniger als 30 %, weniger als 20 %,

15 weniger als 10 % oder sogar weniger als 5 % von derjenigen des standardisierten Sonnenspektrums ausmachen. Aufgrund der reduzierten eingestrahlten Lichtintensität kann beispielsweise eine übermäßige Erwärmung der Photovoltaikeinheit während der Messung der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit vermieden werden. Hierdurch können insbesondere Effekte wie eine Verfälschung der Messungen aufgrund von sich

20 ändernden Temperaturen der Photovoltaikeinheit verhindert oder zumindest verringert werden. Eine relative Spektralverteilung des während des zweiten Betriebsmodus emittierten Lichts kann dabei innerhalb eines Toleranzbereichs von beispielsweise weniger als 20 %, weniger als 10 % oder weniger als 5 % gleich sein wie bei dem standardisierten Sonnenspektrum. D.h., die während des zweiten Betriebsmodus

25 emittierten Spektralverteilungen können innerhalb des Toleranzbereichs als herunterskaliertes Sonnenspektrum angesehen werden.

Ausführungsformen des Verfahrens gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung können dahingehend ausgestaltet sein, dass eine Messvorrichtung in Form eines Sonnensimulators neben ihrer ursprünglichen Funktion in einem ersten Betriebsmodus zur Bestimmung eines spannungsabhängigen Stromverhaltens einer Photovoltaikeinheit bei Beleuchtung mit einem standardisierten Sonnenspektrum ergänzend in einem zweiten Betriebsmodus betrieben werden kann. In dem zweiten Betriebsmodus kann dabei mit den Komponenten des Sonnensimulators unter Zuhilfenahme einer geschickt angepassten Prozessführung und geeignet ausgestalteten Signal- und Datenverarbeitungsvorschriften die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Photovoltaikeinheit ermittelt werden, ohne dass hierfür ein separater Messplatz vorgesehen werden bräuchte. Das Verfahren ist hierbei dazu ausgelegt, die hierin vorangehend und nachfolgend beschriebenen Eigenschaften von Ausführungsformen der Messvorrichtung zur Implementierung des zweiten Betriebsmodus zu realisieren. Dementsprechend können die hierin vorangehend und nachfolgend beschriebenen Merkmale von Ausführungsformen der Messvorrichtung analog auf das Verfahren übertragen werden.

Das Verfahren kann insbesondere mithilfe einer programmierbaren Messvorrichtung implementiert werden. Dabei kann insbesondere die Steuerung und/oder die Auswerteeinrichtung der Messvorrichtung programmierbar sein. Die Messvorrichtung kann hierbei über einen oder mehrere Prozessoren sowie einen oder mehrere Datenspeicher verfügen. In dem Datenspeicher kann ein Computerprogrammprodukt gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung gespeichert sein. Die maschinenlesbaren Anweisungen des Computerprogrammprodukts können dabei in jeder beliebigen Computersprache formuliert sein und den Prozessor dazu anleiten, Ausführungsformen des hierin beschriebenen Verfahrens auszuführen oder zu steuern. Das Computerprogrammprodukt kann als Software eine Hardware einer Messvorrichtung wie zum Beispiel eines Sonnensimulators dazu in die Lage versetzen, ergänzend zu seiner ursprünglichen Funktionalität der Messung von IV-Kurven unter Standard-Sonnen-

Beleuchtung auch eine Funktionalität des Bestimmens der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit zu implementieren.

Das Computerprogrammprodukt kann in einem beliebigen computerlesbaren Medium gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung gespeichert sein. Das computerlesbare
5 Medium kann Daten, die das Computerprogrammprodukt wiedergeben, in beliebiger physikalischer Weise speichern, beispielsweise magnetisch, optisch, elektrostatisch, etc. Beispielsweise kann das computerlesbare Medium ein portabler Datenspeicher wie z.B. eine CD, DVD, Flashspeicher, RAM-Speicher, ROM-Speicher, PROM-Speicher, EPROM-Speicher, etc. sein. Alternativ kann das computerlesbare Medium ein in einem separaten
10 Computer, Server oder einer Datenwolke (Cloud) aufgenommener Datenspeicher sein, aus dem das Computerprogrammprodukt beispielsweise über ein Netzwerk, insbesondere das Internet, heruntergeladen werden kann.

Es wird darauf hingewiesen, dass mögliche Vorteile und Ausgestaltungen von Ausführungsformen der Erfindung hierin teilweise mit Bezug auf eine erfindungsgemäße
15 Messvorrichtung und teilweise mit Bezug auf ein erfindungsgemäßes Verfahren beschrieben sind. Ein Fachmann erkennt, dass die beschriebenen Merkmale in geeigneter Weise übertragen, angepasst, ausgetauscht oder modifiziert werden können, um zu weiteren Ausführungsformen der Erfindung zu gelangen.

20 KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Nachfolgend werden Ausführungsformen der Erfindung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben, wobei weder die Zeichnungen noch die Beschreibung als die Erfindung einschränkend auszulegen sind.

Fig. 1 zeigt eine Messvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden
25 Erfindung.

Fig. 2 zeigt eine beispielhafte Spektralverteilung.

Fig. 3 zeigt eine beispielhafte Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit.

Die Figuren sind lediglich schematisch und nicht maßstabsgetreu. Gleiche Bezugszeichen bezeichnen gleiche oder gleichwirkende Merkmale.

5

BESCHREIBUNG VON BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

Fig. 1 zeigt eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung 1, die Messvorrichtung 1 ist dazu konfiguriert, für eine Photovoltaikeinheit 3 sowohl eine spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ als auch ein spannungsabhängiges
10 Stromverhalten $I(U)$ bei Bestrahlung mit einem standardisierten Sonnenspektrum bestimmen zu können.

Die Messvorrichtung 1 umfasst hierzu eine Beleuchtungsquelle 5. Im dargestellten Beispiel verfügt die Beleuchtungsquelle 5 über eine Mehrzahl von Lichtquellen 21 in Form von LEDs 23. Dabei unterscheiden sich zumindest einige der LEDs 23 hinsichtlich
15 ihres Emissionsspektrums 25 (siehe Fig. 2). Die Beleuchtungsquelle 5 ist daher dazu in der Lage, wahlweise Licht 13 mit variierbaren Spektralverteilungen 15 zu emittieren. Außerdem ist die Beleuchtungsquelle 5 dazu ausgelegt, Licht 13 wie bei einem herkömmlichen Sonnensimulator mit einer Intensität und einer Spektralverteilung, welche einem standardisierten Sonnenspektrum entsprechen, zu emittieren.

20 Die Messvorrichtung 1 verfügt ferner über eine Kontaktierungseinrichtung 7, mithilfe derer die Photovoltaikeinheit 3 elektrisch kontaktiert werden kann. Hierzu verfügt die Kontaktierungseinrichtung 7 beispielsweise über zwei oder mehr reversibel anbringbare Kontakte 31, mit denen Kontaktstrukturen wie beispielsweise Busbars oder Finger an der Photovoltaikeinheit 3 kontaktiert werden können.

Weiterhin umfasst die Messvorrichtung 1 eine Steuerung 9 sowie eine Auswerteeinrichtung 11.

Die Steuerung 9 ist mit der Beleuchtungsquelle 5 verbunden und dazu ausgelegt, die Beleuchtungsquelle 5 und insbesondere deren verschiedene Lichtquellen 21 individuell
5 derart anzusteuern, dass Licht 13 entweder, in einem ersten Betriebsmodus, näherungsweise mit dem standardisierten Sonnenspektrum emittiert wird oder, in einem zweiten Betriebsmodus, Licht 13 sukzessive mit einer Vielzahl verschiedener Spektralverteilungen 15 zu emittiert wird.

In Fig. 2 ist hierbei eine beispielhafte Spektralverteilung 15 dargestellt, die sich durch
10 eine Überlagerung mehrerer verschiedener Emissionsspektren 25 der unterschiedlichen Lichtquellen 21 der Beleuchtungsquelle 5 ergibt. Ein Spektralbereich der gesamten Spektralverteilung 15 erstreckt sich dabei beispielhaft von ca. 340 nm bis ca. 1180 nm, wobei der erreichbare Spektralbereich insbesondere von den zur Verfügung stehenden Lichtquellen 21 und deren Emissionsspektren abhängt.

15 Die Auswerteeinrichtung 11 ist mit der Kontaktierungseinrichtung 7 verbunden und kann über diese den in der Photovoltaikeinheit 3 fließenden bzw. generierten PV-Strom I_{meas} abgreifen und messen. Die Auswerteeinrichtung 11 verfügt hierzu unter anderem über einen Prozessor 29. In dem ersten Betriebsmodus kann die Auswerteeinrichtung 11 dabei mithilfe des gemessenen Stroms das spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der
20 Photovoltaikeinheit 3 unter Einwirken des standardisierten Sonnenspektrums bestimmen. In dem zweiten Betriebsmodus kann die Auswerteeinrichtung 11 alternativ hierzu die verschiedenen PV-Ströme $I_{\text{meas},n}$, wie sie bei Beleuchtung der Photovoltaikeinheit 3 mit jeder der N verschiedenen Spektralverteilungen 15 in der Photovoltaikeinheit 3 erzeugt werden, messen.

25 Eine spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ kann hierbei für jede der Spektralverteilung 15 vorbekannt sein, beispielsweise indem sie mithilfe eines Spektrometers vorzugsweise in

Form eines kalibrierten Spektralradiometers 19 gemessen wird. Das Spektralradiometer 19 kann hierzu vorzugsweise benachbart zu der Position, an der die Photovoltaikeinheit 3 an der Kontaktierungseinrichtung 7 gehalten wird und/oder in einer gleichen Ebene hiermit angeordnet sein, sodass das Spektralradiometer 19 im Wesentlichen das gleiche
5 Licht 13 empfängt wie die Photovoltaikeinheit 3. Alternativ kann das Spektralradiometer 19 an einer entfernten Position angeordnet sein und auf die Photovoltaikeinheit 3 gerichtetes Licht anteilig beispielsweise mittels eines Strahlteilers (nicht dargestellt) ausgekoppelt und auf das Spektralradiometer 19 gelenkt werden.

Nachfolgend werden Details einer möglichen Ausgestaltung der hierin beschriebenen
10 Messvorrichtung sowie des damit ausführbaren Verfahrens der multi-spektralen Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit mit Bezug auf eine beispielhafte Ausführungsform beschrieben.

Zur Anwendung der multi-spektralen Bestimmungsmethode der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ eines Testobjekts (Solarzelle oder Solarmoduls)
15 werden zumindest drei Komponenten benötigt:

- Eine spektral justierbare Lichtquelle einer Beleuchtungsquelle. Diese kann beispielsweise durch LEDs mit verschiedenen Farben realisiert werden. Denkbar sind auch Laser, Lampen mit breitbandigem Spektrum in Kombination mit Filtern, Spiegeln und ähnlichen optischen Komponenten oder Lichtquellen deren Spektralverteilung sich
20 verändern lässt.
- Ein Spektrometer bzw. Spektralradiometer zur Messung der spektralen Bestrahlungsstärke in der Ebene des Testobjekts. Alternativ zum Spektrometer bzw. Spektralradiometer kann die spektrale Bestrahlungsstärke in der Ebene des Testobjekts auch aus anderen Messdaten oder Simulationen berechnet/bestimmt werden.
- 25 - Eine Strom-Messmöglichkeit des zu untersuchenden Testobjekts. Diese besteht üblicherweise aus einer Kontaktiereinheit und einer Stromsenke.

Zur Durchführung der Methode wird die spektral justierbare Lichtquelle so konfiguriert, dass N verschiedene Spektren erzeugt werden. Für jede Konfiguration der Lichtquelle wird

(a) das Spektrum $E_{\lambda,n}(\lambda)$ bestimmt sowie

- 5 (b) die Stromantwort $I_{\text{meas},n}$ des Testobjekts (beispielsweise der Kurzschlussstrom I_{SC} oder der Strom I_{MPP} am Punkt maximaler Leistung) gemessen.

Hierbei gilt $n = 1 \dots N$. Das Spektrum $E_{\lambda,n}(\lambda)$ und die Stromantwort $I_{\text{meas},n}$ können sowohl gleichzeitig als auch sequentiell aufgenommen werden. Es ist auch möglich, erst alle Spektren zu messen (bzw. zu bestimmen/berechnen) und zu einem anderen Zeitpunkt

- 10 den Strombeitrag des Testobjekts, vorausgesetzt die spektrale Bestrahlungsstärke in der Ebene des Testobjekts ist zeitlich ausreichend stabil.

Der Zusammenhang zwischen Stromantwort des Testobjekts, spektraler Bestrahlungsstärke und SR des Testobjekts ist über die Formel

$$I_{\text{meas},n} = \int d\lambda E_{\lambda,n}(\lambda) SR(\lambda)$$

- 15 gegeben, welche für jedes der N Spektren und Stromantworten gilt ($n = 1 \dots N$).

Zur Lösung dieser Gleichung wird das Integral durch eine Summe dargestellt,

$$I_{\text{meas},n} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda E_{\lambda,n}(\lambda) SR(\lambda) + \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} d\lambda E_{\lambda,n}(\lambda) SR(\lambda) + \dots + \int_{\lambda_{K-1}}^{\lambda_K} d\lambda E_{\lambda,n}(\lambda) SR(\lambda).$$

- 20 Diese Gleichung lässt sich unter Annahme einer im jeweiligen Intervall $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ konstanten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit zu

$$I_{\text{meas},n} \approx SR_1 P_{1,n} + SR_2 P_{2,n} + \dots + SR_K P_{K,n}$$

vereinfachen. $P_{1,n}, P_{2,n}, \dots, P_{K,n}$ entsprechen dabei den Bestrahlungsstärken in jedem Wellenlängenintervall k ,

$$P_{k,n} = \int_{\lambda_k}^{\lambda_{k+1}} d\lambda E_{\lambda,n}(\lambda),$$

mit $k = 1 \dots K$. Es ergibt sich ein Gleichungssystem mit N Gleichungen und K Unbekannten SR_1 bis SR_K . In Matritzenschreibweise kann dieses Gleichungssystem mittels

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,K} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,1} & P_{N,2} & \dots & P_{N,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SR_1 \\ SR_2 \\ \vdots \\ SR_K \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} I_{\text{meas},1} \\ I_{\text{meas},2} \\ \vdots \\ I_{\text{meas},N} \end{pmatrix}$$

10

dargestellt werden. Gelöst werden kann dieses Gleichungssystem mit bekannten numerischen und/oder analytischen Verfahren (Regressionsverfahren, inversen Matrizen, ...). Als Ergebnis folgen die Werte SR_1 bis SR_K . Zu jedem dieser Werte wird ein Wellenlängenwert innerhalb des Intervalls $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ zugeordnet, typischerweise der Mittelwert. Beispielsweise wird dem Wert SR_1 die Wellenlänge $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ zugeordnet. Als Ergebnis folgt die SR-Kurve des Testobjekts.

15

Wie oben beschrieben gibt es diverse Anwendungsfälle für die Auswertung und Nutzung der SR-Kurven, unter anderem die Bestimmung des Faktors MM der spektralen Fehlanpassung. Als Alternative zur Anwendung des MM -Faktors (und damit der Verwendung einer Referenzsolarzelle) kann der Kurzschlussstrom I_{sc} direkt aus der SR-Kurve mittels

20

$$I_{sc} = \int d\lambda E_{\lambda,\text{ref}}(\lambda) SR(\lambda)$$

bestimmt werden. Hierbei ist $E_{\lambda,\text{ref}}(\lambda)$ das tabellierte Ziel-Referenzsonnenspektrum, beispielsweise das AM1.5G-Spektrum.

Es wird darauf hingewiesen, dass für die Anwendung der multi-spektralen

- 5 Bestimmungsmethode zur Bestimmung einer relativen spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit (hinreichend für die Bestimmung des Faktors der spektralen Fehlanpassung, aber nicht für die Bestimmung eines Kurzschlussstroms) prinzipiell die Kenntnis der relativen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,\text{rel}}(\lambda)$ ausreichend ist. Diese relative spektrale Bestrahlungsstärke hängt mit der absoluten spektralen
- 10 Bestrahlungsstärke $E_{\lambda}(\lambda)$ über einen konstanten Skalierungsfaktor C zusammen,

$$E_{\lambda}(\lambda) = C \cdot E_{\lambda,\text{rel}}(\lambda).$$

Ist nur die relative spektrale Bestrahlungsstärke bekannt, liefert die Anwendung des

- 15 Verfahrens die relative spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR_{\text{rel}}(\lambda)$ des Testobjekts. Diese wiederum hängt mit der absoluten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ und dem konstanten Skalierungsfaktor C über

20

$$SR(\lambda) = C \cdot SR_{\text{rel}}(\lambda)$$

zusammen. Mit Kenntnis der absoluten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda}(\lambda)$ ergibt sich direkt die absolute spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ und über die oben genannte Gleichung der Kurzschlussstrom I_{sc} unter Standard-Test-Bedingungen.

Nachfolgend werden beispielhafte Versuche zur Implementierung des hierin

- 25 beschriebenen Ansatzes erläutert.

Ein erster Versuch der Methodik wurde an einem IVmj-Messsystem mit einem LED-Lampensystem (Wavelabs SinusGUI 360 Plus) durchgeführt. Dieses Lampensystem

besteht aus 27 LEDs verschiedener Wellenlängen, welche jeweils separat gesteuert werden können. Als Testobjekt diente eine WPVS Referenzsolarzelle (aktive Zellfläche 4 cm^2).

Das Spektrometer und die Solarzelle wurden von dem Lampensystem mit $N = 108$ verschiedenen Spektren bestrahlt. Diese 108 Spektren basieren auf Kanaleinstellungen für eine Approximation eines AM1.5G-Spektrums mit Klassifizierung A++ . Für jedes Spektrum wird eine Kanalaussteuerung zweier Kanäle (Kanalabstand 10, also beispielsweise Kanal 1 und 11) mit einem Faktor 0, 1 oder 2 multipliziert (hier gewählte Kombinationen: 0-0, 0-1, 2-0 und 2-1). Zuerst wurden die 108 Spektren mit einem Spektralradiometer gemessen und im zweiten Schritt wurden 108 Kurzschlussströme gemessen.

Zur Analyse der Messdaten wird der Wellenlängenbereich von 340 nm bis 1180 nm in $K = 27$ äquidistante Teilintervalle aufgeteilt (Intervallbreite von 31.1 nm) und die Bestrahlungsstärken $P_{k,n}$ für jedes Wellenlängenintervall k berechnet. Es resultiert eine Matrix M der Dimension 108×27 (108 Zeilen, 27 Spalten). Zusammen mit den gemessenen Strömen $I_{\text{meas},n}$ (Vektor mit 108 Einträgen) ergibt sich ein Gleichungssystem von 108 Gleichungen und 27 Unbekannten.

Dieses Gleichungssystem wird mit einem „Least-Square“ Regressionsverfahren gelöst. Das Ergebnis des Regressionsverfahrens ergibt eine SR-Kurve ähnlich der in Fig. 3 gezeigten.

Hervorzuheben ist, dass die resultierende SR-Kurve der multi-spektralen Bestimmungsmethode nicht notwendigerweise eine Skalierung benötigt, da mit dem Spektralradiometer direkt die absolute spektrale Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$ bestimmt wurde. Die dafür erforderlichen Kalibrierverfahren für Spektralradiometer sind an verschiedenen Kalibrierinstitutionen verfügbar, unter anderem an dem von der Anmelderin der vorliegenden Patentanmeldung betriebenen ISFH CalTeC. Im Gegensatz

zu der hier beschriebenen Methode erfordert das SR-Standardverfahren bei klassischen DSR/SR-Messplätzen im Allgemeinen vor allem für große Solarzellen regelmäßig eine zusätzliche nachträgliche Skalierung der Daten.

Es ist darauf hinzuweisen, dass Begriffe wie „aufweisend“, „umfassend“, etc. keine
5 anderen Elemente oder Schritte ausschließen und Begriffe wie „eine“ oder „ein“ keine
Vielzahl ausschließen. Ferner sei darauf hingewiesen, dass Merkmale oder Schritte, die
mit Verweis auf eines der obigen Ausführungsbeispiele beschrieben worden sind, auch in
Kombination mit anderen Merkmalen oder Schritten anderer oben beschriebener
Ausführungsbeispiele verwendet werden können. Bezugszeichen in den Ansprüchen sind
10 nicht als Einschränkung anzusehen.

BEZUGSZEICHENLISTE

	1	Messvorrichtung
	3	Photovoltaikeinheit
5	5	Beleuchtungsquelle
	7	Kontaktierungseinrichtung
	9	Steuerung
	11	Auswerteeinrichtung
	13	Licht
10	15	Spektralverteilung
	17	spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit
	19	Spektralradiometer
	21	Lichtquellen
	23	LED
15	25	Emissionsspektrum
	27	Wellenlängenintervall
	29	Prozessor
	31	reversibel anbringbarer Kontakt

Ansprüche:

1. Messvorrichtung (1) zum Bestimmen einer spektralen Bestrahlungsstärke-
empfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) und eines spannungsabhängigen Stromverhaltens $I(U)$
unter Standard-Sonne-Bedingungen einer Photovoltaikeinheit (3),
wobei die Messvorrichtung (1) aufweist:
- eine Beleuchtungsquelle (5),
 - eine Kontaktierungseinrichtung (7),
 - eine Steuerung (9), und
 - eine Auswerteeinrichtung (11),
- wobei die Beleuchtungsquelle (5) dazu konfiguriert ist, wahlweise Licht (13) mit
variierbaren Spektralverteilungen (15) oder mit einer Intensität und
Spektralverteilung, welche einem standardisierten Sonnenspektrum entsprechen,
zu emittieren,
- wobei die Kontaktierungseinrichtung (7) dazu konfiguriert ist, die
Photovoltaikeinheit (3) elektrisch zu kontaktieren,
- wobei die Steuerung (9) und die Auswerteeinrichtung (11) wahlweise in einem
ersten oder einem zweiten Betriebsmodus betreibbar sind,
- wobei die Steuerung (9) dazu konfiguriert ist,
- in dem ersten Betriebsmodus die Beleuchtungsquelle (5) zur Emission
von Licht (13) mit einer dem standardisierten Sonnenspektrum
entsprechenden Intensität und Spektralverteilung anzusteuern, und
 - in dem zweiten Betriebsmodus die Beleuchtungsquelle (5) zur
sukzessiven Emission von Licht (13) mit einer Vielzahl N verschiedener
Spektralverteilungen (15) anzusteuern,
- und
- wobei die Auswerteeinrichtung (11) dazu konfiguriert ist, über die

Kontaktierungseinrichtung (7) eine elektrische Spannung U an die Photovoltaikeinheit (3) anzulegen und abhängig von der angelegten Spannung einen durch die Photovoltaikeinheit fließenden Strom I_{meas} zu messen und dabei

- in dem ersten Betriebsmodus aus dem gemessenen Strom I_{meas} das spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der Photovoltaikeinheit (3) unter Einwirkung des standardisierten Sonnenspektrums zu bestimmen, und
- in dem zweiten Betriebsmodus aus mehreren bei Beleuchtung mit den N verschiedenen Spektralverteilungen (15) jeweils gemessenen Strömen $I_{\text{meas},n}$ ($n = 1 \dots N$) und unter Berücksichtigung einer für jede der N Spektralverteilungen (15) vorbekannten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ ($n = 1 \dots N$) die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) der Photovoltaikeinheit (3) zu bestimmen.

2. Messvorrichtung nach Anspruch 1,
wobei die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der Spektralverteilungen (15) durch Messung mittels eines Spektrometers, vorzugsweise eines Spektralradiometers (19), vorbekannt ist.
3. Messvorrichtung nach Anspruch 2,
wobei die Messvorrichtung ferner ein integriertes Spektrometer bzw. Spektralradiometer (19) aufweist, um die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der innerhalb der Messvorrichtung emittierten Spektralverteilungen aktuell messen zu können.
4. Messvorrichtung nach Anspruch 3,
wobei das Spektrometer bzw. Spektralradiometer (19) derart konfiguriert und angeordnet ist, dass es Licht von einer Position benachbart zu und/oder in einer Ebene mit der in der Kontaktierungseinrichtung (7) zu kontaktierenden

Photovoltaikeinheit (3) empfängt.

5. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die Beleuchtungsquelle (5) eine Mehrzahl M von Lichtquellen (21) aufweist,
5 welche unabhängig voneinander von der Steuerung (9) zur Emission von für
verschiedene der Lichtquellen (21) unterschiedlichen Emissionsspektren (25)
und/oder unterschiedlichen Emissionsintensitäten ansteuerbar sind.
6. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
10 wobei die Beleuchtungsquelle (5) eine Mehrzahl M von durch die Steuerung (9)
unabhängig voneinander ansteuerbaren Lichtquellen (21) in Form von LEDs (23)
mit unterschiedlichen Emissionsspektren (25) aufweist.
7. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 5 und 6,
15 wobei die Vielzahl N verschiedener Spektralverteilungen (15) größer ist als die
Mehrzahl M von Lichtquellen (21).
8. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die Steuerung (9) und die Beleuchtungsquelle (5) dazu konfiguriert sind,
20 die Beleuchtungsquelle (5) in dem zweiten Betriebsmodus derart zur sukzessiven
Emission von Licht (13) anzusteuern, dass jede der Vielzahl verschiedener
Spektralverteilungen (15) bei jeder Wellenlänge innerhalb eines Emissionsbandes
von wenigstens 400 nm bis 1100 nm eine von Null verschiedene
Emissionsleistung aufweist.
25
9. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die Steuerung (9) und die Auswerteeinrichtung (11) dazu konfiguriert sind,
in dem zweiten Betriebsmodus die Beleuchtungsquelle (5) dazu anzusteuern, Licht

(13) sukzessive mit wenigstens zehn verschiedenen Spektralverteilungen (15) zu emittieren und für jede der Spektralverteilungen (15) den dabei durch die Photovoltaikeinheit (3) fließenden Strom $I_{\text{meas},n}$ zu messen.

- 5 10. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die Auswerteeinrichtung (11) dazu konfiguriert ist, zum Bestimmen der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) der Photovoltaikeinheit (3) ein Gleichungssystem zu erstellen und zu lösen, wobei
- ein gesamter Wellenlängenbereich, innerhalb dessen die spektrale
 - 10 Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) zu bestimmen ist, in eine Mehrzahl von K Wellenlängenintervallen (27) $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ mit ($k = 1 \dots K$) aufgeteilt wird,
 - für jede der N verschiedenen Spektralverteilungen (15) und jedes der K Wellenlängenintervalle (27) eine auf das jeweilige Wellenlängenintervall (27) bezogene Bestrahlungsstärke $P_{k,n}$ durch Aufintegration der spektralen
 - 15 Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ über das jeweilige Wellenlängenintervall (27) bestimmt wird, und
 - eine anteilige spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit SR_k bezogen auf jedes der K Wellenlängenintervalle (27) durch Lösen des folgenden Gleichungssystems näherungsweise bestimmt wird:

20

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,K} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,1} & P_{N,2} & \cdots & P_{N,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SR_1 \\ SR_2 \\ \vdots \\ SR_K \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} I_{\text{meas},1} \\ I_{\text{meas},2} \\ \vdots \\ I_{\text{meas},N} \end{pmatrix}$$

11. Messvorrichtung nach Anspruch 10,
wobei die anteilige spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit SR_k für jedes der
- 25 K Wellenlängenintervalle (27) als innerhalb des Wellenlängenintervalls (27) konstant angenommen wird.

12. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) unter
Berücksichtigung einer für jede der N Spektralverteilungen (15) vorbekannten
relativen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ oder unter Berücksichtigung einer
5 für jede der N Spektralverteilungen vorbekannten absoluten spektralen
Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ bestimmt wird.
13. Messvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
wobei die Steuerung (9) dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungsquelle (5) in dem
10 zweiten Betriebsmodus zur Emission von Licht (13) mit einer Intensität von
zwischen 60 % und 140 %, vorzugsweise zwischen 80% und 120 %, des
standardisierten Sonnenspektrums oder mit einer Intensität von weniger als 30%
des standardisierten Sonnenspektrums anzusteuern.
14. Verfahren zum Bestimmen einer spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit
15 $SR(\lambda)$ (17) einer Photovoltaikeinheit (3) mittels einer Messvorrichtung (1) zum
Bestimmen eines spannungsabhängigen Stromverhaltens $I(U)$ der
Photovoltaikeinheit (3) unter Standard-Sonne-Bedingungen,
wobei die Messvorrichtung aufweist:
20 - eine Beleuchtungsquelle (5),
- eine Kontaktierungseinrichtung (7),
- eine Steuerung (9), und
- eine Auswerteeinrichtung (11),
wobei die Beleuchtungsquelle (5) dazu konfiguriert ist, wahlweise Licht (13) mit
25 variierbaren Spektralverteilungen (15) oder mit einer Intensität und
Spektralverteilung, welche einem standardisierten Sonnenspektrum entsprechen,
zu emittieren,
wobei die Kontaktierungseinrichtung (7) dazu konfiguriert ist, die

- Photovoltaikeinheit (3) elektrisch zu kontaktieren,
wobei die Steuerung (9) dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungsquelle (5) in dem ersten Betriebsmodus zur Emission von Licht (13) mit einer dem standardisierten Sonnenspektrum entsprechenden Intensität und Spektralverteilung anzusteuern,
5 wobei die Auswerteeinrichtung (11) dazu konfiguriert ist, über die Kontaktierungseinrichtung (7) eine elektrische Spannung U an die Photovoltaikeinheit (3) anzulegen und abhängig von der angelegten Spannung U einen durch die Photovoltaikeinheit (3) fließenden Strom I_{meas} zu messen und dabei in dem ersten Betriebsmodus aus dem gemessenen Strom I_{meas} das
10 spannungsabhängige Stromverhalten $I(U)$ der Photovoltaikeinheit (3) unter Einwirkung des standardisierten Sonnenspektrums zu bestimmen, wobei das Verfahren umfasst:
- Ansteuern der Beleuchtungsquelle (5) mittels der Steuerung (9) in einem zweiten Betriebsmodus zur sukzessiven Emission von Licht (13) mit einer Vielzahl N
15 verschiedener Spektralverteilungen (15),
 - Messen, mittels der Auswerteeinrichtung (11), in dem zweiten Betriebsmodus von bei Beleuchtung mit den N verschiedenen Spektralverteilungen (15) jeweils durch die Photovoltaikeinheit (3) fließenden Strömen $I_{\text{meas},n}$ ($n = 1 \dots N$), und
 - Bestimmen der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit $SR(\lambda)$ (17) der
20 Photovoltaikeinheit (3) unter Berücksichtigung einer für jede der Spektralverteilungen (15) vorbekannten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ ($n = 1 \dots N$).
15. Verfahren nach Anspruch 14,
25 wobei die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,n}(\lambda)$ für jede der Spektralverteilungen (15) durch Messung mittels eines Spektrometers oder eines Spektralradiometers (19) vorbekannt ist.

16. Computerprogrammprodukt, aufweisend maschinenlesbare Anweisungen, welche
bei Ausführung durch einen Prozessor (29) einer Messvorrichtung (1) zum
Bestimmen eines Stromverhaltens unter Standard-Sonne-Bedingungen einer
Photovoltaikeinheit (3) die Messvorrichtung (1) dazu anleiten, das Verfahren
5 gemäß Anspruch 14 auszuführen oder zu steuern.

17. Computerlesbares Medium aufweisend darauf gespeicherte maschinenlesbare
Anweisungen eines Computerprogrammprodukts gemäß Anspruch 16.