

	DIN EN IEC 60904-1 (VDE 0126-4-1)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 27.160

Einsprüche bis 2019-11-20

Entwurf

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60904-1
(VDE 0126-4-1):2007-07

**Photovoltaische Einrichtungen –
Teil 1: Messen der photovoltaischen Strom-/Spannungskennlinien
(IEC 82/1556/CD:2019);
Text Deutsch und Englisch**

Photovoltaic devices –
Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics
(IEC 82/1556/CD:2019);
Text in German and English

Dispositifs photovoltaïques –
Partie 1: Mesure des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques
(IEC 82/1556/CD:2019);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-09-20 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 49 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 82/1556/CD:2019 "Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics" (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom IEC/TC 82 "Solar photovoltaic energy systems" der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine "JA/NEIN"-Entscheidung möglich ist, wobei eine "NEIN"-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium DKE/K 373 "Photovoltaische Solarenergie-Systeme" der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60904-1 (VDE 0126-4-1):2007-07** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Aktualisierte normative Verweisungen;
- Aktualisierter Anwendungsbereich zur Einbeziehung aller Bedingungen;
- Ergänzung von Begriffen und Definitionen;
- Umstrukturierung des Dokuments zur Vermeidung unnötiger Wiederholungen;
- Ergänzung eines Abschnitts zur Datenanalyse;
- Ergänzung von Anhängen (Flächenmessung, PV-Einrichtungen mit Kapazität und I-U-Dunkelkennlinien (Strom-/Spannungs-Dunkelkennlinien).

Inhalt

Seite

Nationales Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Allgemeine Anforderungen	7
4.1 Messungen	7
4.2 Stabilisierung	8
4.3 Gleichwertigkeit der Leistung unter stationären Bedingungen	8
4.4 Bedingungen laut Bericht	9
4.5 Übertragung von Messbedingungen auf Bedingungen laut Bericht	10
5 Prüfgerät	10
6 Messungen im natürlichen Sonnenlicht	11
7 Messungen in simuliertem Sonnenlicht	12
8 Datenanalyse	15
8.1 Übertragung von Messbedingungen auf Bedingungen laut Bericht	15
8.2 Extrahieren von Parametern der I - U -Kennlinie	16
8.3 Bewerten der Messunsicherheit	16
9 Prüfbericht	17
10 Literaturhinweise	17
Anhang A (informativ) Flächenmessung	19
A.1 Einleitung	19
A.2 Definition einer Fläche einer Einrichtung	19
A.2.1 Gesamtfläche (T)	19
A.2.2 Aperturfläche (A_p)	19
A.2.3 Vorgesehene Beleuchtungsfläche (D_a)	19
A.3 Flächenmessung von PV-Einrichtungen	19
Anhang B (informativ) Messungen von Strom-/Spannungskennlinien für PV-Einrichtungen mit Kapazität	22
B.1 Einleitung	22
B.2 Fehler aufgrund von Kapazität	22
B.3 Methoden zur Unterdrückung des Messfehlers	22
B.3.1 Messung im stationären Zustand	22
B.3.2 Messung im quasi-stationären Zustand	22
B.3.3 Gängige Verfahren	22
B.3.4 Leerlaufspannung	23
B.4 Bericht	23
Anhang C (informativ) Messung von photovoltaischen Strom-/Spannungskennlinien ohne Beleuchtung (I - U bei Dunkelheit)	24
C.1 Einleitung	24
C.2 Durchführung	25
C.2.1 Allgemeines	25
C.2.2 Prüfeinrichtung	25
C.2.3 Messungen von I - U -Dunkelkennlinien	26
Bilder	
Bild 1 – Schematische Strom-Spannungs-Kennlinie (I - U -Kennlinie) mit Darstellung typischer I - U -Kennlinien-Parameter, Kurzschlussstrom (I_{SC}), Leerlaufspannung (V_{OC}), höchste Leistung (P_{max}), Spannung bei höchster Leistung (V_{Pmax}) und Strom bei höchster Leistung (I_{Pmax})	7

Bild 2 – Schematische Leistung-Spannungs-Kennlinie (P-V-Kennlinie) mit Darstellung typischer I-U-Kennlinien-Parameter, Kurzschlussspannung (V_{OC}), höchste Leistung (P_{max}) und Spannung bei höchster Leistung (V_{Pmax}).....	7
Bild 3 – Monte-Carlo-Simulation eines 60-Zellen-PV-Moduls mit Zellen des Typs mit hohem Nebenwiderstand (Shunt). Für jeden Durchlauf wurde die Verteilung der Bestrahlungsstärke nach dem Zufallsprinzip berechnet und die mittlere Bestrahlungsstärke wurde auf einen konstanten Wert normalisiert.....	15
Bild A.1 – PV-Modul (rechteckig).....	20
Bild A.2 – PV-Modul mit abweichender Geometrie (fünfeckig, trapezförmig)	20
Bild A.3 – PV-Zelle (beschnittene Ecken).....	20
Bild A.4 – PV-Zelle (abgerundete Ecken, kreisförmig)	21
Bild C.1 – I-U-Kennlinie ohne Beleuchtung (I-U-Dunkelkennlinie)	24
Bild C.2 – I-U-Kennlinie unter Beleuchtung (I-U-Photokennlinie).....	25

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 60904 beschreibt Verfahren für die Messung von Strom-/Spannungskennlinien (*I-U*-Kennlinien) photovoltaischer (PV) Einrichtungen in natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht. Diese Verfahren gelten für eine Einzelsolarzelle, eine Baugruppe aus Solarzellen oder ein Photovoltaikmodul. Sie sind anwendbar auf einseitige Einzelschicht-PV-Einrichtungen. Für Mehrschichteinrichtungen siehe [IEC 60904-1-1](#). Für doppelseitige Einrichtungen siehe IEC TS 60904-1-2. Zusätzliche informative Anhänge sind in Bezug auf Flächenmessung von PV-Einrichtungen, PV-Einrichtungen mit Kapazität und Messungen für Strom-/Spannungs-Dunkelkennlinien (*I-U*-Dunkelkennlinien) enthalten.

Diese Norm ist anwendbar auf terrestrische Flachplatten-PV-Einrichtungen (üblicherweise aber nicht ausschließlich) in Bezug auf die globale, normale, spektrale Referenzbestrahlungsstärke ([IEC 60904-3](#)). Sie ist möglicherweise auch anwendbar auf PV-Einrichtungen, die für einen Gebrauch unter konzentrierter Bestrahlung ausgelegt sind, sofern die Bestrahlung eine normale Bestrahlung ist und auf die direkte, normale, spektrale Referenzbestrahlungsstärke in [IEC 60904-3](#) Bezug genommen wird.

Der Zweck dieser Norm ist es, Grundanforderungen für die Messung von Strom- Spannungskennlinien (*I-U*-Kennlinien) von PV-Einrichtungen festzulegen, um Verfahren für unterschiedliche in Anwendung befindliche Messtechniken zu definieren und Praktiken zur Minimierung von Messunsicherheiten aufzuzeigen. Sie ist auf Messungen von *I-U*-Kennlinien im Allgemeinen anwendbar. Diese dienen möglicherweise verschiedenen Zwecken, z. B. Kalibrierung (d. h. Messung unter Normprüfbedingungen) eines PV-Prüflings anhand einer Referenzeinrichtung, Messung unter verschiedenen Bedingungen (z. B. für Einrichtungstemperatur und Bestrahlungsstärke), wie solche, die in [IEC 60891](#) (für die Bestimmung von Temperaturkoeffizienten oder Reiheninnenwiderständen), [IEC 61853-1](#) (Leistungsbemessung von PV-Einrichtungen) oder [IEC 60904-10](#) (für die Linearität des Ausgangs in Bezug auf einen bestimmten Prüfparameter) gefordert sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

[IEC 60891](#), *Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic (PV) devices*

[IEC 60904-1-1](#), *Photovoltaic devices – Part 1-1: Measurement of current-voltage characteristics of multi-junction photovoltaic (PV) devices*

IEC TS 60904-1-2, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices*

[IEC 60904-2](#), *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference devices*

[IEC 60904-3](#), *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

[IEC 60904-4](#), *Photovoltaic devices – Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability*

[IEC 60904-5](#), *Photovoltaic devices – Part 5: Determination of equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method*

[IEC 60904-7](#), *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device*

[IEC 60904-8](#), *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device*

[IEC 60904-9](#), *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

[IEC 60904-10](#), *Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linearity measurements*

IEC 61215 series

[IEC 61215-1](#), *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements*

IEC 61215-1-1, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules*

IEC 61215-1-2, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1-2: Special requirements for testing of thin-film Cadmium Telluride (CdTe) based photovoltaic (PV) modules*

IEC 61215-1-3, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1-3: Special requirements for testing of thin-film amorphous silicon based photovoltaic (PV) modules*

IEC 61215-1-4, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1-4: Special requirements for testing of thin-film Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based photovoltaic (PV) modules*

IEC 61215-2, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures*

IEC/TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols*

IEC 61853-1, *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC TS 61836 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

kapazitätsinduzierter Strom

Lade- oder Entladestrom einer PV-Einrichtung aufgrund von Kapazität, bei Änderung der extern an die Einrichtung angelegten Spannung

Anmerkung 1 zum Begriff: Laden und Entladen ist abhängig von der Richtung der Spannungsänderung.

Anmerkung 2 zum Begriff: Da die PV-Einrichtung ähnlich einer Kapazität wirkt, wird der gemessene Strom einer bestimmten PV-Einrichtung beeinflusst.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der gemessene Strom ist die Summe des Wirkstroms und des kapazitiven Stroms

3.2

kapazitiver Fehler

durch die Kapazität eingebrachter Fehler, festgelegt als das Verhältnis von kapazitivem Strom zum Wirkstrom, als eine Funktion der Spannung der PV-Einrichtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Fehler ist null, wenn zur Zeit der Messung weder Laden noch Entladen vorliegt. Dies ist bei unbegrenzt langsamen Änderungen der Spannung der PV-Einrichtung der Fall.

3.3

Durchlaufgeschwindigkeit

Änderungsrate der an das gemessene PV-Einrichtung angelegten Spannung

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff Anstiegsrate kann synonym verwendet werden.

3.4

Durchlaufrichtung

Richtung der Änderung der angelegten Spannung während *I-U*-Messungen; eine positive Durchlaufgeschwindigkeit wird als Vorwärts- oder Direktdurchlauf bezeichnet (I_{sc} in Richtung V_{oc}), während eine negative Durchlaufgeschwindigkeit als Umkehr- oder Rückwärtsdurchlauf bezeichnet wird (V_{oc} in Richtung I_{sc}).

3.5

Verzögerungszeit

Zeitspanne zwischen der Änderung einer an die PV-Einrichtung angelegten Spannung und der Messung des Stroms der PV-Einrichtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Messung einer I - U -Kennlinie sollte die Verzögerungszeit ausreichend groß sein, sodass der kapazitive Strom vernachlässigbar wird.

Zum Zweck der Veranschaulichung ist in Bild 1 eine schematische Strom-Spannungs-Kennlinie (I - U -Kennlinie) und in Bild 2 die zugehörige Leistung-Spannungs-Kennlinie (P - U -Kennlinie) dargestellt.

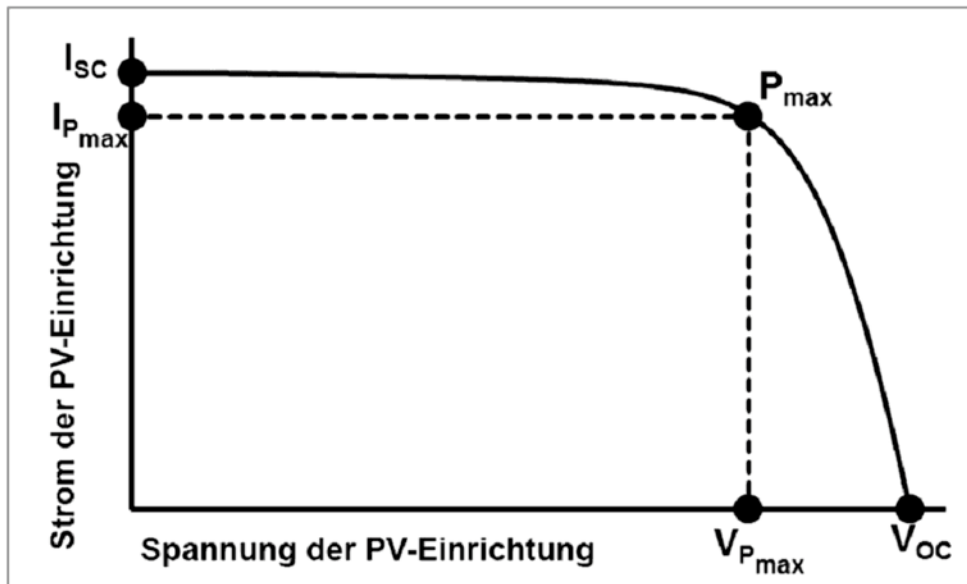


Bild 1 – Schematische Strom-Spannungs-Kennlinie (I - U -Kennlinie) mit Darstellung typischer I - U -Kennlinien-Parameter, Kurzschlussstrom (I_{sc}), Leerlaufspannung (V_{oc}), höchste Leistung (P_{max}), Spannung bei höchster Leistung (V_{pmax}) und Strom bei höchster Leistung (I_{pmax})

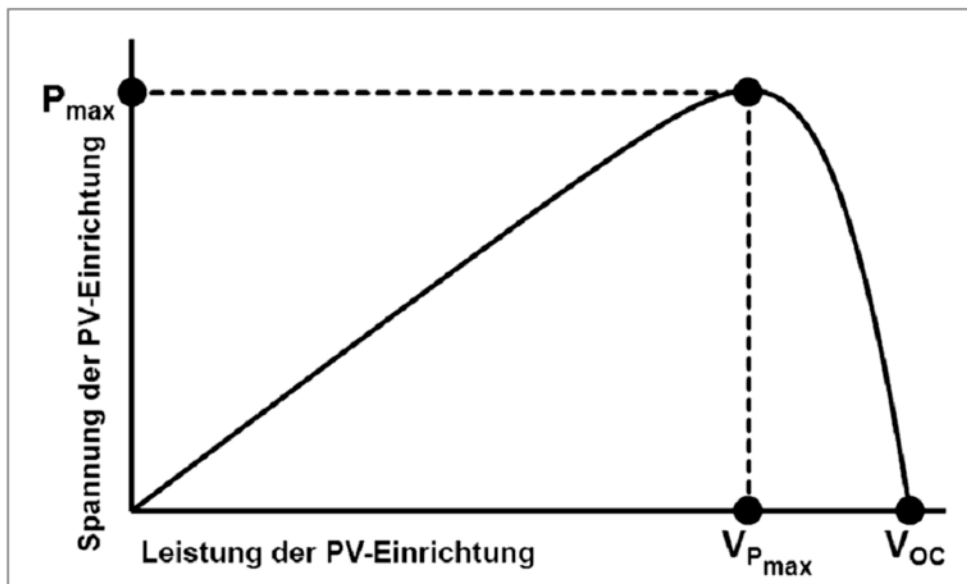


Bild 2 – Schematische Leistung-Spannungs-Kennlinie (P - V -Kennlinie) mit Darstellung typischer I - U -Kennlinien-Parameter, Kurzschlussspannung (V_{oc}), höchste Leistung (P_{max}) und Spannung bei höchster Leistung (V_{pmax})

4 Allgemeine Anforderungen

4.1 Messungen

- Die Messungen der Bestrahlungsstärke müssen mit einer PV-Referenzeinrichtung, die nach IEC 60904-2 zusammengestellt und kalibriert wurde, oder im Fall natürlichen Sonnenlichts alternativ mit einem Pyranometer durchgeführt werden. Die Kalibrierung jeder Einrichtung für Messungen der Bestrahlungsstärke muss nach IEC 60904-4 rückverfolgbar sein. Der Ausgang des Referenzgeräts muss in Bezug auf die einfallende Bestrahlungsstärke, wie festgelegt in IEC 60904-10, linear über den

interessierenden Bereich der Bestrahlungsstärke sein. Bei einer zu prüfenden Einzelschicht-Einrichtung muss die PV-Referenzeinrichtung spektral angepasst sein, oder es muss eine spektrale Fehlanpassungskorrektur nach IEC 60904-7 vorgenommen werden. Der Prüfling und die PV-Referenzeinrichtung werden als spektral angepasst angesehen, wenn ihre spektralen Empfindlichkeiten gleich sind, sodass die nach IEC 60904-7 bestimmte spektrale Fehlanpassungskorrektur innerhalb von $\pm 1\%$ liegt. Die spektrale Fehlanpassung SMM (IEC 60904-7) muss mit den Messergebnissen in den Prüfbericht aufgenommen werden, wenn sie zur Korrektur der *I-U*-Kennlinien verwendet wurde. Bei einem Mehrschicht-Prüfling müssen die Anforderungen von IEC 60904-1-1 erfüllt sein.

- b) Die Temperatur der Referenzeinrichtung und des Prüflings müssen unter Verwendung von Messgeräten mit einer Messunsicherheit von $\pm 1\text{ °C}$ und einer Wiederholpräzision von $\pm 0,5\text{ °C}$ gemessen werden. Eine Temperaturmessung der Referenzeinrichtung ist nicht erforderlich, wenn es sich um ein Pyranometer handelt.

Temperaturfühler sollten so angeordnet werden, dass die Temperatur der entsprechenden Schicht der Einrichtung möglichst genau erfasst wird. Wenn ein Temperaturgradient zwischen dem Messfühler und der Schicht vermutet wird, sollte ein angemessener Beitrag zur Messunsicherheit berücksichtigt werden. Außerdem sollten jegliche mögliche Ungleichmäßigkeiten der Temperatur über jeder Einrichtung berücksichtigt werden, insbesondere für PV-Module, bei welchen die Temperatur einzelner Zellen aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften schwanken kann, vor allem bei Beleuchtung von Modulen unter Kurzschlussbedingungen. Das in IEC 60904-5 festgelegte Verfahren mit der gleichwertigen Zelltemperatur (ECT) kann nützlich beim Umgang mit einem Temperaturgradienten oder einer Ungleichmäßigkeit der Temperatur sein.

- c) Die aktive Fläche des Prüflings muss innerhalb einer Grenzabweichung von $\pm 3^\circ$ mit der aktiven Fläche der Referenzeinrichtung in der gleichen Ebene liegen.
- d) Spannungen und Ströme müssen mittels Messgeräten mit einer Messunsicherheit von höchstens $\pm 0,2\%$ der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms gemessen werden, wobei Leitungen verwendet werden, die von den Anschlüssen des Prüflings unabhängig und so kurz wie möglich zu halten sind. Die Messbereiche der Datenerfassung sollten sorgfältig ausgewählt werden. Mögliche Abweichungen zwischen der Kalibrierung des Messsystems (üblicherweise unter statischen Lastbedingungen) und ihre Verwendung während der Messungen von *I-U*-Kennlinien (dynamische Lastbedingungen) müssen berücksichtigt werden. Wenn es sich beim Prüfling um ein Modul, eine Baugruppe oder eine gekapselte Solarzelle handelt, sollte die 4-Leiterverbindung an den Anschlussklemmen oder am Steckverbinder beginnen. Wenn es sich beim Prüfling um eine blanken PV-Zelle handelt, sollte die 4-Leiterverbindung an den Sammelschienen (en: bus bars) der Zelle angebracht werden. Das Verfahren zum Anschließen einer blanken Zelle (d. h. bereitgestellt ohne Steckverbinder) sollte sorgfältig beurteilt werden. Es können Unterschiede auftreten, wenn Lötanschlüsse zur Verbindung oder lötfreie Methoden angewandt werden, wie Sammelschienen (Bars) mit Kontaktfedern oder Kontaktplatten mit einer großen Kontaktfläche zum Zellenrückkontakt. Lötfreie Methoden können zu höheren Füllfaktoren führen, als in den Modulen beobachtet werden. Die Kontaktierungsmethode sollte für den vorgesehenen Gebrauch der Zelle oder für die Messung geeignet sein.
- e) Die *I-U*-Kennlinie sollte so gemessen werden, dass sowohl der Punkt des Kurzschlussstroms als auch der Punkt der Leerlaufspannung innerhalb der Grenzwerte des Datensatzes liegen, einschließlich nach Korrektur auf die Bedingungen laut Bericht (Abschnitt 8). Für eine mögliche Extrapolation zur Berechnung dieser Punkte anhand gemessener Daten siehe Abschnitt 8.

4.2 Stabilisierung

Bei der Messung von metastabilen PV-Einrichtungen muss auf Sorgfalt geachtet werden. Wenn eine Stabilisierung der Einrichtung möglich ist, sollte eine Stabilisierung vor einer jeglichen Kennwertbestimmung (*I-U*-Messung oder Messung der spektralen Empfindlichkeit) erfolgen. Jegliche Stabilisierungsverfahren müssen zusammen mit den Prüfergebnissen im Prüfbericht angegeben werden. Die Normenreihe IEC 61215 stellt einen Leitfaden zu einer technologieabhängigen zweckmäßigen Stabilisierung bereit.

Wenn eine Stabilisierung der Einrichtung nicht möglich ist, oder kein Versuch einer Stabilisierung unternommen wurde, muss dies im Messbericht angegeben werden.

4.3 Gleichwertigkeit der Leistung unter stationären Bedingungen

Die *I-U*-Kennlinie für den Prüfling muss so gemessen werden, dass sie so genau wie möglich die Leistung des Prüflings unter stationären Bedingungen wiedergibt, d. h. es liegt keine Beeinflussung durch Abweichungen der Bestrahlungsstärke, der Temperatur der Einrichtung oder der Durchlaufgeschwindigkeit

der Spannung vor. Auswirkungen der Durchlaufgeschwindigkeit treten auf, wenn die stufenweise Änderung der Vorspannung zu schnell erfolgt, um eine Stabilisierung der Einrichtung bei jeder Spannungsstufe zu ermöglichen. Diese Wirkung kann auf der Kapazität der PV-Einrichtung beruhen, wie es für einige PV-Einrichtungen aus kristallinem Silizium der Fall ist, oder sie kann auf einem komplexeren Verhalten der Einrichtung beruhen, wie es häufig bei vielen neu auf den Markt kommenden Dünnschicht-Einrichtungen, z. B. Perowskit-Zellen, beobachtet wird. Eine Kapazität einer PV-Einrichtung beruht üblicherweise auf einer Änderung der internen Ladungsträgerdichte der PV-Einrichtung und wird durch technologische Faktoren wie Zellendicke, Energie-Bandlücke, Dotierungsdichte und Reihenwiderstand der PV-Einrichtung beeinflusst. Die Kapazität einer PV-Einrichtung ist üblicherweise abhängig von der Schichtspannung.

Für PV-Einrichtungen mit Kapazität kann der gemessene Strom ausgedrückt werden als

$$I_{\text{meas}} = I_{\text{real}} - \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Dabei ist

I_{meas} der bei einer bestimmten Spannung gemessene Strom;

I_{real} der Strom, der bei der gleichen Spannung unter stationären Bedingungen gemessen würde;

$\frac{dQ}{dt}$ der kapazitive Strom, der durch Spannungsänderung erzeugt wird.

Der relative Fehler im gemessenen Strom kann ausgedrückt werden als

$$\text{err}_{\text{cap}} = 100 \times \frac{\frac{dQ}{dt}}{I_{\text{real}}} \quad (2)$$

Dabei ist

err_{cap} der Messfehler aufgrund von Kapazität, angegeben in Prozent;

Gleichungen (1) und (2) gelten für die Strommessung einer PV-Einrichtung unter Beleuchtung, unabhängig davon, ob die Lichtquelle der Beleuchtung natürliches Sonnenlicht, stationäres, simuliertes Sonnenlicht oder gepulstes, simuliertes Sonnenlicht ist. Sie gelten auch für den Strom einer PV-Einrichtung mit Stromeinspeisung bei Dunkelheit.

Fehler aufgrund von Kapazität einer PV-Einrichtung stehen im Zusammenhang mit der Kombination der PV-Technologie und den Parametern der Messung für die I - U -Kennlinie (Durchlaufgeschwindigkeit der Spannung (Vorwärts oder Rückwärts) und die Verzögerungszeit je Messpunkt). Die Fehler aufgrund von Kapazität der PV-Einrichtung sind am ausgeprägtesten am Punkt der höchsten Leistung und der Leerlaufspannung der I - U -Kennlinie im Vergleich zum Kurzschlussstrom.

Ein Verfahren zur Minimierung des Fehlers aufgrund von Kapazität ist der Nachweis (für jeden Datenpunkt in der I - U -Kennlinie), dass sowohl dV/dt als auch dI_{meas}/dt gegen Null gehen, wenn die Daten aufgezeichnet werden. Dies kann durch eine ausreichend lange Verzögerungszeit erreicht werden. Ein alternatives Verfahren ist der Vergleich der I - U -Kennlinien für Vorwärts- und Rückwärtsdurchläufe. Wenn alle Parameter von I - U -Kennlinien ([Abschnitt 8.2](#)) für beide Durchläufe übereinstimmen, ist dies der experimentelle Nachweis dafür, dass der Fehler aufgrund von Kapazität vernachlässigbar ist. Anderenfalls sollten die Messparameter oder das Verfahren geändert werden, bis die Übereinstimmung besser als 0,5 % ist. Die Differenzen müssen auch für die Messunsicherheit berücksichtigt werden. Das Vorgenannte ist hinreichend für kristallines Silizium und andere Dünnschicht-Technologien, jedoch nicht für neu aufkommende PV-Technologien wie Perowskit. In diesem Fall sollte die Übereinstimmung nicht nur für Vorwärts- und Rückwärtsdurchläufe geprüft werden, sondern zusätzlich bei unterschiedlichen Durchlaufgeschwindigkeiten. Der Fehler aufgrund von Kapazität kann nur dann vernachlässigt werden, wenn eine Übereinstimmung auch bei diesem Spektrum der Durchlaufbedingungen besteht.

Weitere Hinweise zur Sicherstellung einer ausreichend niedrigen Durchlaufgeschwindigkeit, um annähernd stationäre Bedingungen zu erreichen, sind in [Anhang B](#) enthalten.

Der Beitrag der Messbedingungen zur Gesamtmessunsicherheit muss berücksichtigt werden.

4.4 Bedingungen laut Bericht

Im Allgemeinen werden Prüfergebnisse für verschiedene Bedingungen in den Bericht aufgenommen. Die drei wichtigsten Parameter, die zusammen mit jeglichen Prüfergebnissen in den Prüfbericht aufgenommen werden müssen, sind:

- i) Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene;

- ii) spektrale Bestrahlungsstärke;
- iii) Schichttemperatur des Prüflings.

Die gebräuchlichsten Bedingungen laut Bericht sind die *Normprüfbedingungen* (STC), wobei diese einer Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene von $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ mit einer spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke nach den Festlegungen in **IEC 60904-3** (global) und einer Schichttemperatur der Einrichtung von 25 °C entsprechen. Manchmal sind jedoch Prüfergebnisse unter anderen Bedingungen gewünscht. Für jegliche Prüfergebnisse müssen die drei wichtigsten vorgenannten Prüfberichtsparameter deutlich angegeben werden.

Wenn eine Angabe der Messungen im Prüfbericht bei STC vorgesehen ist, muss die Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene während der Messung zwischen $900\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ und $1100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ betragen, um Korrekturen auf ein Mindestmaß zu begrenzen.

4.5 Übertragung von Messbedingungen auf Bedingungen laut Bericht

Manchmal unterscheiden sich die Bedingungen, bei welchen die *I-U*-Kennlinie gemessen wird, von jenen, für welche die Prüfergebnisse im Bericht angegeben werden. Folglich kann eine Übertragung der *I-U*-Kennlinie von den Prüfbedingungen auf die Bedingungen laut Bericht erforderlich sein. Diese Übertragung muss nach **IEC 60891** (Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur) im Zusammenhang mit **IEC 60904-7** (Korrektur für spektrale Bestrahlungsstärke) und **IEC 60904-10** (Korrektur für Nichtlinearität) vorgenommen werden. Charakteristische Parameter eines Moduls (z. B. Reihenwiderstand oder Temperaturkoeffizienten) können sich erheblich auf das Ergebnis auswirken, wenn Korrekturen von Temperatur und Bestrahlungsstärke über einen großen Bereich durchgeführt werden. Folglich muss sorgfältig auf die Bedeutung der Modulparameter geachtet werden, die für das Verfahren der Übertragung der *I-U*-Kennlinie herangezogen werden, und ihr Beitrag zur Unsicherheit in der übertragenen *I-U*-Kennlinie muss berücksichtigt werden.

Der Beitrag zur Messunsicherheit aufgrund der Abweichung von Prüfbedingungen von den Bedingungen laut Bericht muss beurteilt werden.

Es stehen zwei Korrekturverfahren zur Verfügung, mit deren Hilfe sich eine Messung einer *I-U*-Kennlinie auf die spektrale Bestrahlungsstärke laut Bericht beziehen lässt:

- i) Wenn möglich, wird die Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene angepasst, z. B. durch Verwendung einer (spektral) angepassten Referenzeinrichtung und Anpassung der Intensität des Sonnensimulators, sodass die effektive Bestrahlungsstärke entsprechend der Bestimmung nach **IEC 60904-7** gleich der Bestrahlungsstärke laut Bericht ist. Die tatsächliche spektrale Bestrahlungsstärke, welche diese effektive Bestrahlungsstärke ergibt, erzeugt den gleichen Kurzschlussstrom oder die gleiche höchste Leistung, wie die spektrale Bestrahlungsstärke laut Bericht bei der Bestrahlungsstärke laut Bericht. Es wird fortgefahren mit der Messung der *I-U*-Kennlinie nach [Abschnitt 6](#) oder [Abschnitt 7](#).
- ii) Anderenfalls wird die *I-U*-Kennlinie mit der gegebenen Bestrahlungsstärke gemessen. Die effektive Bestrahlungsstärke bei der spektralen Bestrahlungsstärke laut Bericht wird unter Anwendung von **IEC 60904-7** bestimmt. Dann wird die *I-U*-Kennlinie unter Anwendung von **IEC 60891** mit der entsprechend bestimmten effektiven Bestrahlungsstärke auf die Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene laut Bericht übertragen.

Verfahren i) ist vorzugsweise bei simuliertem Sonnenlicht anzuwenden, da die eigentliche Messung beim korrekten Kurzschlussstrom durchgeführt wird, wodurch Fehler und Unsicherheiten aufgrund der Übertragung der *I-U*-Kennlinien auf ein Mindestmaß reduziert werden. Verfahren ii) wird üblicherweise für Messungen bei natürlichem Sonnenlicht gewählt, da die spektrale Bestrahlungsstärke und die Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene dieses Lichts nicht ohne Weiteres geregelt werden können.

5 Prüfgerät

Zusätzlich zu den allgemeinen Messanforderungen in [4.1](#) ist die folgende Einrichtung zur Messung der *I-U*-Kennlinie erforderlich:

- a) Eine Referenzeinrichtung, welche die in Punkt a) von [4.1](#) angegebenen Bedingungen erfüllt;
- b) Mittel, um die Temperatur der Referenzeinrichtung und des Prüflings zu messen, welche die in Punkt b) von [4.1](#) angegebenen Bedingungen erfüllen;
- c) Für Messungen im simulierten Sonnenlicht eines Sonnensimulators nach **IEC 60904-9**, der eine räumliche Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke der Klasse B, oder besser, eine Kurzzeinstabilität

(STI) der Klasse A und eine Langzeitinstabilität der Klasse C (LTI), oder besser, aufweist. Die festgelegte Messfläche muss gleich oder größer als die durch den Prüfling ausgefüllte Fläche einschließlich seines Rahmens oder Gehäuses sein;

- d) Für Messungen unter natürlichem Sonnenlicht ein zweiachsiges Sonnen-Nachführsystem, um den Prüfling zuzüglich der Referenzeinrichtung zu halten und der Sonne mit einer Genauigkeit von $\pm 5^\circ$ (für PV-Kalibrierung) nachführen zu können oder eine feste Gestellmontage (z. B. für Energiebemessung und Überwachung). Das zweiachsige Sonnen-Nachführsystem ist für die PV-Kalibrierung erforderlich, darf jedoch nach Wahl des Anwenders für andere Arten von Messungen verwendet werden, z. B. für die Energiebemessung von PV-Modulen;
- e) Eine Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke, welche die Momentan-Bestrahlungsstärke während der Erfassung der *I-U*-Kennlinien verfolgt. Diese Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke sollte einen linearen Ausgang in Bezug auf die einfallende Bestrahlungsstärke nach **IEC 60904-10** in dem Bereich von Bestrahlungsstärken haben, über welchen die Messungen vorgenommen werden und ein zeitliches Verhalten aufweisen, das ausreichend schnell ist, um zeitliche Schwankungen der einfallenden Bestrahlungsstärke anzeigen zu können. Die Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke muss verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Bestrahlungsstärke in der Ebene für den Prüfling die gleiche ist, wie sie für die Referenzeinrichtung war (Messstrategie 2 in **Abschnitt 7**). Die von der Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke aufgezeichneten Daten müssen für die Bewertung der Stabilitätskriterien und die Korrektur der zeitlichen Instabilität der Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene für jeden Datenpunkt der *I-U*-Kennlinie verwendet werden. Die Referenzeinrichtung darf als eine solche Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke dienen, sofern sie die vorgenannten Anforderungen erfüllt und sie zeitgleich mit dem Prüfling gemessen werden kann (Messstrategie 1 in **Abschnitt 7**);
- f) Ein Spektralradiometer, das geeignet ist, die spektrale Bestrahlungsstärke des natürlichen oder simulierten Sonnenlichts im Bereich der spektralen Empfindlichkeit des Prüflings und der Referenzeinrichtung zu messen, sofern spektrale Fehlanpassungskorrekturen erforderlich sind. Für Messungen, die der Kalibrierung unter natürlichem Sonnenlicht dienen, muss das Spektralradiometer entweder durch Montage in einer Sonnen-Nachführvorrichtung oder auf eine andere geeignete Weise auf die Sonne ausgerichtet werden. Bei simuliertem Sonnenlicht sollte bei Verwendung von Lampen mit begrenzten intensiven Spitzenwerten in ihrer spektralen Bestrahlungsstärke, z. B. Xenonlampen oder manche LED-Lampen, Vorsicht walten, wenn PV-Zellen mit einer spektralen Empfindlichkeit geprüft werden, die eine erhebliche Abhängigkeit von der Temperatur aufweisen. Da sich die Bandlücken aufgrund von Temperatur ändern, kann das Verhalten der Einrichtung verschiedene Emissionslinien der spektralen Bestrahlungsstärke der Lampe durchlaufen und zu großen Schwankungen der spektralen Fehlanpassung und zu Leistungssprüngen führen.

BEISPIEL Kristallines Silizium ist ein bekanntes Beispiel eines Werkstoffs mit indirekten Bandlücken, der eine spektrale Empfindlichkeit aufweist, die stark abhängig von der Temperatur ist.

6 Messungen im natürlichem Sonnenlicht

Messungen im natürlichem Sonnenlicht dürfen nur durchgeführt werden, wenn die globale Bestrahlungsstärke der Sonne während der Messung einer vollständigen *I-U*-Kennlinie stabil innerhalb von $\pm 1\%$ liegt.

Es sollten zwei Arten von Messungen unterschieden werden: Erstens Messungen der elektrischen Leistungsfähigkeit des Prüflings, die üblicherweise bei den Bedingungen laut Bericht bei STC (Bedingungen für typische PV-Kalibrierung) angestrebt wird, aber manchmal auch bei anderen maßgeblichen Bedingungen (z. B. für Leistungsbemessung nach der Beschreibung in **IEC 61853-1**). In diesem Fall werden sowohl der Prüfling als auch die Referenzeinrichtung in einem zweiachsigen Nachführsystem montiert. Zweitens die Messung der elektrischen Leistungsfähigkeit im Laufe der Zeit, üblicherweise für Energiebemessung und Überwachung von Prüflingen. In diesem Fall werden sowohl der Prüfling als auch die Referenzeinrichtung(en) in einem festen Gestell montiert (um die Bedingungen in einer PV-Anlagen-Installation in der „realen Welt“ zu simulieren oder installierte PV-Module regelmäßig zu messen. Die vorliegende Norm gilt für beide Arten von Messungen und deshalb sind die im Folgenden angegebenen entsprechenden Listenelemente der Prüfverfahren als getrennt für jeden Fall zu verstehen, sofern nicht anderweitig festgelegt.

Das Prüfverfahren ist wie folgt:

- a) Die Referenzeinrichtung wird so nahe wie möglich an und in der gleichen Ebene mit dem Prüfling montiert. Für PV-Kalibrierung und Leistungsbemessung mit Verwendung einer Sonnen-

Nachführeinrichtung müssen beide innerhalb von $\pm 5^\circ$ senkrecht zum direkten Sonnenstrahlenbündel liegen. Die notwendigen Geräte werden angeschlossen.

- b) Wenn der Prüfling und die Referenzeinrichtung mit Temperaturreglern ausgerüstet sind, werden diese auf den gewünschten Wert eingestellt. Die Temperatur der Referenzeinrichtung sollte so nah wie möglich an den Temperaturwert gebracht werden, bei welchem sie kalibriert wurde und die Temperatur des Prüflings auf die laut Bericht gewünschte Temperatur. Wenn aktive Temperaturregler nicht verfügbar sind, kann Letzteres erreicht werden, indem der Prüfling an einen Punkt unterhalb der Zieltemperatur gebracht wird und ihm eine natürliche Erwärmung unter natürlicher Sonneneinstrahlung in Kombination mit einer zeitweiligen Abschattung ermöglicht wird. Im Allgemeinen können während des Aufwärmens Differenzen zwischen der mittleren Temperatur der Einrichtung und der mittleren Messfühlertemperatur vorliegen. Deshalb muss eine Korrektur oder eine ordnungsgemäße Berücksichtigung dieser Tatsache bei der Berechnung der Unsicherheit erfolgen.
- c) Es werden gleichzeitige Ablesungen des Stroms und der Spannung des Prüflings zeitgleich mit der Aufzeichnung des Ausgangs der Referenzeinrichtung vorgenommen. Die Temperatur beider Einrichtungen muss ebenfalls aufgezeichnet werden, aber eine Messung für jede Einrichtung während der Erfassung der *I-U*-Kennlinie oder unmittelbar davor und danach ist ausreichend. Sofern Letzteres zutrifft, werden die Messungen unmittelbar nach dem Entfernen der Abdeckung durchgeführt. In den meisten Fällen begrenzt die thermische Trägheit des Prüflings und der Referenzeinrichtung den Temperaturanstieg während der ersten Sekunden und ihre Temperaturen bleiben ausreichend gleich. Der Beitrag zur Messunsicherheit muss jedoch beurteilt werden.
- d) Es wird sichergestellt, dass die Temperaturen von Prüfling und Referenzeinrichtung stabil und innerhalb von $\pm 1^\circ\text{C}$ konstant sind und dass die Bestrahlungsstärke, die durch die Referenzeinrichtung gemessen wird, während der Aufzeichnungsdauer für jede *I-U*-Kennlinie innerhalb von $\pm 1\%$ konstant bleibt. Letzteres kann üblicherweise nur durch Verwendung einer PV-Einrichtung als Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke bestimmt werden, da ein Pyranometer üblicherweise eine Antwortzeit aufweist, die länger als die zur Messung einer vollständigen *I-U*-Kennlinie erforderliche Zeit ist.
- e) Messungen sollten an einem klaren sonnigen Tag (keine wahrnehmbaren Wolken um die Sonne herum, Teile von diffuser Sonnenbestrahlung nicht höher als 30 %) durchgeführt werden. Bei Verwendung eines Pyranometers oder einer nicht angepassten PV-Referenzeinrichtung als Referenzeinrichtung, wird eine gleichzeitige Messung der spektralen Bestrahlungsstärke unter Verwendung des Spektralradiometers durchgeführt, wobei dieses übereinstimmend mit dem Prüfling ausgerichtet wird (d. h. auf die Sonne ausgerichtet für Messungen mit Sonnen-Nachführeinrichtung und senkrecht zur Prüfebene bei Modulmontage in festem Gestell). Die effektive Bestrahlungsstärke für den Prüfling bei der spektralen Bestrahlungsstärke laut Bericht (siehe [IEC 60904-7](#)) wird mittels Anwendung seiner Daten der spektralen Empfindlichkeit berechnet, die nach [IEC 60904-8](#) bestimmt wurden.

7 Messungen in simuliertem Sonnenlicht

Sonnensimulatoren (stationär oder gepulst) für Messungen von *I-U*-Kennlinien einer PV-Einrichtung müssen nach [IEC 60904-9](#) charakterisiert werden. Die räumliche Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung in der Prüffläche muss bekannt sein und regelmäßig überprüft werden. Bei gepulsten Sonnensimulatoren darf die *I-U*-Kennlinie entweder vollständig während eines einzelnen Blitzes erfasst werden oder durch Kombination der Messungen von Teilen der *I-U*-Kennlinie, die getrennt in einer Reihe von aufeinander folgenden Blitzes erfasst werden. Die Wahl ist abhängig von der verfügbaren Blitzpulsdauer und von elektrischen Kenngrößen des Prüflings, insbesondere von seiner Kapazität. Siehe [Anhang B](#) für weitere Informationen und einen Leitfadens.

Es sind zwei grundlegende Messstrategien möglich:

- 1) Sowohl der Prüfling als auch die Referenzeinrichtung werden gleichzeitig beleuchtet, indem sie nebeneinander auf der Prüfebene angeordnet werden. Dies erfordert, dass die Prüfebene ausreichend groß ist, um beide aufzunehmen. Da gleichzeitige Messungen an beiden Einrichtungen vorgenommen werden, müssen zeitliche Schwankungen der Bestrahlungsstärke durch Verwendung des Signals von der Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke korrigiert werden. Es ist am zweckmäßigsten, die Referenzzelle als Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke zu verwenden, aber eine separate Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke ist ebenfalls zulässig. Diese Strategie wird üblicherweise für die Kalibrierung von PV-Modulen anhand von PV-Referenzzellen angewendet. Es muss darauf geachtet werden, die Auswirkungen einer räumlichen Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke zu begrenzen. Eine zulässige Abweichung bei dieser Strategie ist die Beleuchtung

des Prüflings und der Referenzeinrichtung nacheinander, sofern eine separate Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke zur Kontrolle der zeitlichen Instabilität verwendet wird.

- 2) Sowohl der Prüfling als auch die Referenzeinrichtung werden getrennt beleuchtet, indem sie nacheinander in der gleichen Position auf der Prüfebene gemessen werden. Die zeitlichen Schwankungen der Bestrahlungsstärke müssen durch Verwendung der Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke korrigiert werden. Wenn die Ausführung der gewählten Referenzeinrichtung in Bezug auf Abmessungen und elektrische Eigenschaften (für Referenzmodule betrifft diese Anforderung die Zellenanzahl, den Zellentyp, Schaltkreise zur Zellenverbindung und die Verkapselung) identisch mit dem Prüfling ist, wirkt sich die räumliche Ungleichmäßigkeit auf beide Messungen in gleicher Weise aus, und wird folglich aufgehoben, und spektrale Fehlanpassung ist vernachlässigbar, da beide Einrichtungen als spektral angepasst angesehen werden. Dies ist der übliche Fall in der PV-Industrie, wenn Module aus der Fertigung anhand eines Referenzmoduls des gleichen Typs gemessen werden (häufig als „goldenes Modul“ bezeichnet). Wenn die Referenzeinrichtung und der Prüfling nicht identisch sind, müssen die Auswirkungen einer räumlichen Ungleichmäßigkeit und eine spektrale Fehlanpassung bewertet werden und entweder für die Bestimmung der Unsicherheit korrigiert oder bei dieser berücksichtigt werden.

Die Auswirkungen einer räumlichen Ungleichmäßigkeit müssen bewertet werden (für einen Leitfaden siehe Nachgenanntes) und mehrere Strategien sind möglich, um die Auswirkungen zu mindern. Die einfachste ist die Anwendung einer mit dem Prüfling identischen Referenzeinrichtung, wie vorgenannt in Messstrategie 2 erwähnt. Bei unterschiedlicher Größe von Prüfling und Referenzeinrichtung wird empfohlen, die kleinere Einrichtung an verschiedenen Stellen innerhalb der Gesamtfläche der größeren Einrichtung zu messen und den Mittelwert der Ergebnisse zu verwenden. Aus der Charakterisierung der Ungleichmäßigkeit nach **IEC 60904-9** ergibt sich, dass es auch möglich sein könnte, das kleinere Gerät so in der Prüfebene anzuordnen, dass es die mittlere Bestrahlungsstärke über der Gesamtfläche des größeren Geräts aufnimmt.

Das Prüfverfahren ist wie folgt:

- a) Die Referenzeinrichtung wird in der Prüfebene so angeordnet, dass ihre aktive Oberfläche innerhalb von $\pm 5^\circ$ in der gleichen Ebene mit der Prüfebene liegt.
- b) Die Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators wird so eingestellt, dass die effektive Bestrahlungsstärke, wie in **IEC 60904-7** definiert, gleich der Bestrahlungsstärke laut Bericht nach **Abschnitt 4** ist. Alternativ wird die Bestrahlungsstärke so eingestellt, dass die Referenzeinrichtung ihren kalibrierten Kurzschlussstrom oder die höchste Leistung der gewünschten Stufe erzeugt (siehe nachgenannten Leitfaden). Die Temperatur der Referenzeinrichtung wird aufgezeichnet.
- c) Sofern erforderlich, wird die Referenzeinrichtung entfernt und der Prüfling wird wie in 7 a) beschrieben in der Prüfebene angeordnet. Wenn die Prüffläche ausreichend groß und die Bestrahlungsstärke ausreichend gleichmäßig ist, darf der Prüfling neben der Referenzeinrichtung angeordnet werden.
- d) Wenn Temperaturregler für die Referenzeinrichtung und den Prüfling verwendet werden, werden diese auf die gewünschte Stufe eingestellt. Die Temperatur der Referenzeinrichtung muss so nah wie möglich an den Temperaturwert gebracht werden, bei welcher sie kalibriert wurde und die Temperatur des Prüflings auf die laut Bericht gewünschte Temperatur. Der häufigste Fall ist, wenn beide Temperaturen 25°C betragen. In Fällen nahe letztgenanntem, darf die Laboratoriumsumgebung nahe der Zieltemperatur geregelt werden und der Prüfling in ein thermisches Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht werden, sofern aktive Temperaturregler nicht verfügbar sind. Letzteres gilt insbesondere im Fall von gepulsten Sonnensimulatoren. Bei stationären Sonnensimulatoren sind möglicherweise auch Strategien anwendbar, die vergleichbar jenen sind, die unter natürlichem Sonnenlicht verwendet wurden (siehe **Abschnitt 6**).
- e) Es werden gleichzeitige Ablesungen des Stroms und der Spannung des Prüflings zeitgleich mit der Aufzeichnung des Ausgangs der Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke vorgenommen. Die Temperatur des Prüflings und der Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke muss ebenfalls aufgezeichnet werden, aber es ist eine Messung für jede Einrichtung während der Erfassung der *I-U*-Kennlinie oder unmittelbar davor und danach ausreichend.
- Bei stationären Sonnensimulatoren werden die Messungen unmittelbar nach dem Entfernen der Abdeckung durchgeführt. In den meisten Fällen begrenzt die thermische Trägheit des Prüflings und der Referenzeinrichtung den Temperaturanstieg während der ersten Sekunden und ihre Temperaturen bleiben ausreichend gleich. Der Beitrag zur Messunsicherheit muss jedoch beurteilt werden.
- In einigen Sonnensimulatoren kann die Einrichtung zur Überwachung der Bestrahlungsstärke in ein Rückkopplungssystem integriert werden, um die abgegebene Bestrahlungsstärke der Lichtquelle zu stabilisieren. In diesem Fall sind die vorgenannten Ablesungen des Ausgangs der Einrichtung zur

Überwachung der Bestrahlungsstärke und der Temperatur möglicherweise nicht verfügbar. In diesem Fall muss ein Nachweis der zeitlichen Stabilität der Bestrahlungsstärke erbracht werden und das Ergebnis bei der Berechnung der Unsicherheit verwendet werden.

Siehe [Anhang B](#) für einen Leitfaden zur Durchlaufgeschwindigkeit.

Wenn ein PV-Modul als Referenzeinrichtung benutzt wird, muss sorgfältig ausgewertet werden, ob der Kurzschlussstrom oder die höchste Leistung der entsprechende Parameter für die Einstellung der Bestrahlungsstufe des Sonnensimulators ist. Das Verfahren mit dem Kurzschlussstrom ist nahezu unabhängig von der Modultemperatur und von der Modulverbindungstechnik, kann aber Fehler aufgrund von ungleichmäßiger Bestrahlungsstärke einbringen (siehe nachgenannt). Das Verfahren mit der höchsten Leistung kann räumliche Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke ausgleichen (siehe nachgenannt), kann jedoch Fehler aufgrund der Modultemperatur, der Modulverbindungstechnik und der Kapazität einbringen. Die genauesten Ergebnisse werden erreicht, wenn die Stufe der Bestrahlungsstärke so eingestellt ist, dass sich sowohl der Kurzschlussstrom als auch die höchste Leistung des Referenzmoduls ergeben, zusammen mit einer spektralen Fehlanpassungskorrektur, sofern erforderlich. Deshalb wird einer der zwei Parameter verwendet, um die Stufe der Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators einzustellen und nachzuweisen, dass der andere Parameter innerhalb der gewünschten Genauigkeit (zum Beispiel 1 %) liegt. Sofern dies nicht der Fall ist, sollte der Grund für die Abweichung untersucht und wenn möglich korrigiert werden, bevor fortgefahren wird. Wenn es dann weiterhin nicht möglich ist sowohl den Kurzschlussstrom als auch die höchste Leistung zu erreichen, sollte bei geringer räumlicher Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke das Verfahren mit Kurzschlussstrom gewählt werden, wohingegen bei größerer räumlicher Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke der Punkt der höchsten Leistung verwendet werden sollte.

ANMERKUNG Eine mögliche hilfreiche Überprüfung ist die regelmäßige Rotation der Position des Referenzmoduls im Simulator und ein Vergleich der Ergebnisse.

Die Auswirkung räumlicher Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke auf die gemessene *I-U*-Kennlinie eines PV-Moduls (bestehend aus einer Reihe verbundener Zellen) ist abhängig von der Verteilung der Bestrahlungsstärke, der Verteilung von Kurzschlussströmen und umgekehrten *I-U*-Kennlinien für die einzelnen Zellen und den Bypass-Dioden im Modul. Auswirkungen der Ungleichmäßigkeit sollten sorgfältig analysiert und bei der Analyse der Unsicherheiten berücksichtigt werden.

In [Bild 3](#) sind die Auswirkungen räumlicher Ungleichmäßigkeit auf die Parameter der *I-U*-Kennlinie dargestellt, beruhend auf einer Monte-Carlo-Simulation der für eine konstante mittlere Bestrahlungsstärke nach dem Zufallsprinzip geänderten Verteilung der Bestrahlungsstärke. Der Wert von I_{sc} des Moduls nimmt bei zunehmender Ungleichmäßigkeit stetig ab, während der Füllfaktor (FF) größer wird. Auswirkungen auf P_{max} sind viel geringer und eine Abweichung größer 0,5 % wird nur bei Werten der Ungleichmäßigkeit größer 5 % beobachtet. Wenn die Gesamtungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke geringer als 5 % ist, treten Artefakte in der *I-U*-Kennlinie in der *I-U*-Kennlinie nur zwischen den Punkten von I_{sc} und P_{max} auf, wobei die *I-U*-Kennlinie ihre charakteristische Kurvenform verliert. Wenn die Gesamtungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke größer als 5 % ist, können einzelne Zellen strombegrenzend werden, was zum Einschalten von Bypass-Dioden während der *I-U*-Messung und folglich zu Stufen in der *I-U*-Kennlinie führt. In diesem Fall ist es nicht möglich, eine Auswirkung auf I_{sc} zu sehen.

Da der Wert von P_{max} im Allgemeinen nur eine geringe Abhängigkeit von räumlicher Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke zeigt (bei konstanter mittlerer Bestrahlungsstärke), muss bei Vorhandensein einer signifikanten räumlichen Ungleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke dieser Parameter für die Einstellung des Sonnensimulators verwendet werden.

Für weitere Einzelheiten siehe die Literaturhinweise.

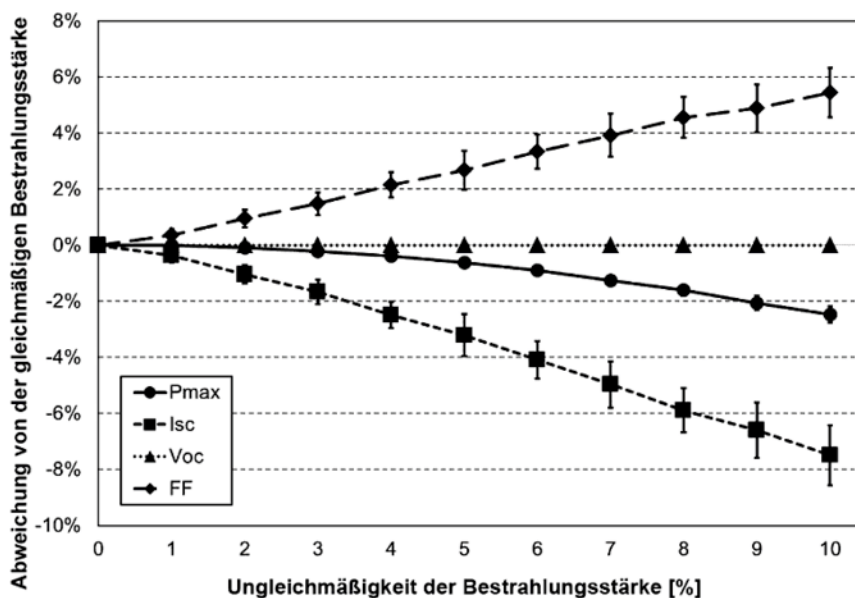


Bild 3 – Monte-Carlo-Simulation eines 60-Zellen-PV-Moduls mit Zellen des Typs mit hohem Nebenwiderstand (Shunt). Für jeden Durchlauf wurde die Verteilung der Bestrahlungsstärke nach dem Zufallsprinzip berechnet und die mittlere Bestrahlungsstärke wurde auf einen konstanten Wert normalisiert.

Im Fall von gepulsten Sonnensimulatoren ohne Stabilisierung der Bestrahlungsstärke (abfallender Puls), werden *I-U*-Daten möglicherweise über einen großen Bereich von Bestrahlungsstärken aufgezeichnet. Bei der Verwendung von Modulparametern zur Korrektur der Bestrahlungsstärke muss Vorsicht walten. Der Schwellenwert (en: Trigger) sollte so eingestellt werden, dass sich positive und negative Korrekturen der Bestrahlungsstärke ergeben, die auf die Zielbestrahlungsstärke zentriert sind.

8 Datenanalyse

8.1 Übertragung von Messbedingungen auf Bedingungen laut Bericht

Wenn die Bestrahlungsstärke oder die Temperatur der Referenzeinrichtung oder des Prüflings während der Messung nicht den gewünschten Werten entsprachen, wird die gemessene *I-U*-Kennlinie für lineare Einrichtungen nach **IEC 60891** auf die gewünschten Werte korrigiert. Für nicht lineare Einrichtungen ist auf **IEC 60904-10** als Leitfaden Bezug zu nehmen, um zu ermitteln, über welchen Bereich die Einrichtung als linear betrachtet werden kann, und welche Korrekturen von Nichtlinearität möglich sind. Die gemessenen Daten sollten einen ausreichend großen Bereich abdecken, sodass die Punkte des Kurzschlussstroms und der Leerlaufspannung innerhalb der Grenzen des Datensatzes bleiben, nachdem die Übertragung durchgeführt wurde.

Im Allgemeinen sollten Korrekturen nach **IEC 60891** durchgeführt werden, wenn die Abweichung der Parameter eine erhebliche Auswirkung auf die Ergebnisse hat. Allgemeine Anforderungen für alle möglichen Fälle können hier nicht angegeben werden, aber nachgenannt wird eine Anleitung bereitgestellt. In allen Fällen müssen alle Abweichungen zwischen den Bedingungen bei Messung und den Bedingungen laut Bericht als Beiträge zur Messunsicherheit berücksichtigt werden, wobei die Korrektur selbst eine Unsicherheit aufweist, die ausdrücklich bewertet werden muss. Sie wird durch die Unsicherheit der ursprünglichen Messbedingungen beeinflusst und durch die Unsicherheit der Korrekturparameter. Als allgemeiner Leitfaden sollte die Korrektur durchgeführt werden:

- wenn die Temperatur der PV-Referenzeinrichtung (bei Verwendung des Kurzschlussstroms) um mehr als 2 °C von der Temperatur abweicht, bei welcher sie kalibriert wurde;
- wenn die Temperatur der PV-Referenzeinrichtung (bei Verwendung der höchsten Leistung) um mehr als 0,5 °C von der Temperatur abweicht, bei welcher sie kalibriert wurde;
- wenn die Temperatur des Prüflings um mehr als 1 °C von der Temperatur laut Bericht abweicht;
- wenn die Bestrahlungsstärke um mehr als 1 % von der Bestrahlungsstärke laut Bericht abweicht.

Eine Temperaturkorrektur der Referenzeinrichtung ist nicht erforderlich, wenn diese ein Pyranometer ist.