

DIN EN IEC 60904-10
(VDE 0126-4-10)
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 2019-04-08

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60904-10
(VDE 0126-4-10):2010-10

Entwurf

Photovoltaische Einrichtungen –
Teil 10: Verfahren der linearen Abhängigkeit und Linearitätsmessungen
(IEC 82/1461/CD:2018);
Text Deutsch und Englisch

Photovoltaic devices –
 Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements
 (IEC 82/1461/CD:2018);
 Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-02-08 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 42 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	3
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	8
4 Auswahl der Einrichtung.....	9
5 Prüfvorrichtung	9
5.1 Allgemeine Anforderungen	9
5.2 Prüfvorrichtung für die Messung linearer Abhängigkeiten unter natürlichem Sonnenlicht oder mit einem Sonnensimulator	10
5.3 Prüfvorrichtung für Messungen von linearen Abhängigkeiten des Kurzschlussstroms durch Messungen der spektralen Empfindlichkeit.....	10
5.4 Prüfvorrichtung für die Messung der Linearität des Kurzschlussstrom nach dem Verfahren mit zwei Lichtquellen	10
6 Verfahren zur Messung linearer Abhängigkeiten unter natürlichem Sonnenlicht oder mit einem Sonnensimulator.....	11
6.1 Allgemeine Anforderungen	11
6.2 Montage unter natürlichem Sonnenlicht.....	11
6.3 Montage mit einem Sonnensimulator.....	12
6.4 Messungen der linearen Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke	12
6.5 Messungen der linearen Abhängigkeit von der Temperatur	14
7 Verfahren zur Messung von Linearität und linearer Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der absoluten spektralen Empfindlichkeit.....	15
8 Verfahren für die Messung der Kurzschlussstromlinearität nach dem Verfahren mit zwei Lichtquellen	16
8.1 Hintergrund	16
8.2 Messverfahren	16
9 Berechnung von linearer Abhängigkeit und Linearität	17
9.1 Bewertung der Messunsicherheit.....	17
9.2 Vorläufige allgemeine Überlegungen	17
9.3 Bestimmung von Abweichungen von der allgemeinen linearen Abhängigkeit.....	18
9.4 Bestimmung der Nichtlinearität von ISC in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke.....	18
9.5 Bestimmung der Linearität des Kurzschlussstroms nach dem Verfahren mit zwei Lichtquellen	19
9.6 Anforderungen für größte Abweichungen von der perfekt linearen Funktion	20
10 Prüfbericht	21
Literaturhinweise.....	22

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 82/1461/CD:2018 „Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements“ (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 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 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.

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 60904-10 (VDE 0126-4-10):2010-10** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Aufnahme einer erläuternden Einleitung über die Änderungen und die zugrunde liegenden Schlussfolgerungen;
- Aktualisierung des Anwendungsbereiches (**Abschnitt 1**) und der Aufstellung in den normativen Verweisungen (**Abschnitt 2**);
- Aufnahme eines neuen Abschnitts Begriffe (**Abschnitt 3**) mit einer Unterscheidung zwischen allgemeiner linearer Abhängigkeit und linearer Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der Bestrahlungsstärke (Linearität);

- d) Explizite Definition der gleichwertigen Probe ([Abschnitt 4](#));
- e) Technische Überarbeitung des Prüfaufbaus ([Abschnitt 5](#)), des Messverfahrens ([Abschnitt 6](#) bis [Abschnitt 8](#)) und der Datenanalyse ([Abschnitt 9](#)) mit Trennung der Datenanalyse der allgemeinen linearen Abhängigkeit von der speziell für die Beurteilung der Linearität (d. h. der Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der Bestrahlungsstärke). Zusätzlich Aufnahme des Einflusses spektraler Effekte auf die Beurteilung von sowohl der Linearität als auch der linearen Abhängigkeit;
- f) Änderung des Kriteriums zur Beurteilung der Linearität mit der Aufnahme einer Formel, die verwendet werden kann, um die Ablesung der Bestrahlungsstärke einer PV-Referenzeinrichtung hinsichtlich der Nichtlinearität ihres Kurzschlussstroms in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke zu korrigieren;
- g) Überarbeitung der Anforderungen für den Prüfbericht ([Abschnitt 10](#)), um die Klarheit darüber zu verbessern, welche Informationen immer notwendig sind und was von dem tatsächlich verwendeten Verfahren zur Messung der linearen Abhängigkeit abhängt, einschließlich der Art der gemessenen Abhängigkeit (allgemein oder Linearität).

Einleitung

Die Norm **IEC 60904-10** ist das Referenzdokument für mehrere IEC-Normen, die für eine photovoltaische (PV-) Einrichtung eine lineare Abhängigkeit eines oder mehrerer ihrer elektrischen Parameter von einem Prüfparameter erfordern, üblicherweise entweder von der Temperatur der Einrichtung oder der Bestrahlungsstärke. Um die verschiedenen zu behandelnden Fälle und die Besonderheiten der linearen Abhängigkeit des Kurzschlussstroms einer PV-Einrichtung von der Bestrahlungsstärke besser widerzuspiegeln, wurde die Norm **IEC 60904-10** umfassend überarbeitet.

Um Verwirrung zu vermeiden, wird in dieser Norm das Wort „Linearität“ nur für die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms (I_{SC}) von der Bestrahlungsstärke verwendet, während alle anderen Abhängigkeiten als allgemeine lineare Abhängigkeiten bezeichnet werden (wenn nicht ausdrücklich beschrieben).

Drei wesentliche Änderungen wurden in diese dritte Ausgabe im Vergleich zur zweiten Ausgabe aufgenommen.

Die erste wesentliche Änderung ist die Abtrennung der Datenanalyse für die Linearität von der für die allgemeine lineare Abhängigkeit zu verwendenden (wie zum Beispiel $V_{OC}(T)$). Letztere behält den Ansatz bei, der bereits in der vorhergehenden Ausgabe enthalten war, d. h. die Methode der kleinsten Quadrate, mit der Ergänzung der empfohlenen Verwendung der Messunsicherheiten in der Datenanalyse; erstere wendet die Proportionalitätsfunktion an, die die Abhängigkeit zwischen I_{SC} und der Bestrahlungsstärke für eine ideale lineare PV-Einrichtung beschreibt, und die gewöhnlich bei jeder tatsächlichen Messung der Bestrahlungsstärke verwendet wird. Sie verwendet außerdem den Kalibrierwert von I_{SC} , um einen Bezugspunkt festzusetzen, auf den sich die Nichtlinearität explizit bezieht. Ebenso sind jetzt die Auswirkungen von Spektren und spektraler Fehlanpassung auf sowohl die Linearität als auch die allgemeine lineare Abhängigkeit enthalten.

Diesem neuen Ansatz für die Linearitätsbewertung folgend, schließt die zweite wesentliche Änderung eine leichte Modifizierung der Definition der Nichtlinearität (die sich nun ausdrücklich auf den Kalibrierwert bezieht) und die Aufnahme einer Formel zur Korrektur der gemessenen Bestrahlungsstärke der für ihre Messung verwendeten PV-Einrichtung ein. Die Korrektur der Bestrahlungsstärke für die Nichtlinearität wird mittels eines Multiplikationsfaktors durchgeführt, was demselben, in **IEC 60904-7** für die Korrektur der spektralen Fehlanpassung verwendeten Ansatz ähnelt. Diese Formel wurde eingeführt, um den ausdrücklichen Bezug der anderen Normen auf **IEC 60904-10** hinsichtlich der Behandlung nichtlinearer Einrichtungen zu berücksichtigen. Diese Formel kann ebenfalls für die bessere Handhabung von Abweichungen von der Linearität innerhalb der Akzeptanzgrenzen von Nutzen sein, sogar im Fall von als linear klassifizierten Referenzeinrichtungen nach der vorigen Ausgabe.

Die dritte wesentliche Änderung ist die Einführung einer speziellen Datenanalyse (hergeleitet aus Photometrieerfahrungen) für das Verfahren mit zwei Lichtquellen, das in der zweiten Ausgabe eine einfache Prüfung auf Bestehen/Nichtbestehen war und nun den Rang eines quantitativen Verfahrens erlangt. Diese Änderung wurde als entscheidend angesehen, um durch ein nach dieser Norm zulässiges Verfahren für Messungen der Linearität Ergebnisse zu bekommen, die innerhalb ihrer angegebenen Messunsicherheiten untereinander vollständig vergleichbar sind. Die Formel zur Korrektur der Bestrahlungsstärke wird auch für die Analyse des Verfahrens mit zwei Lichtquellen angegeben und beruht auf demselben Ansatz, der für die anderen Linearitätsverfahren verwendet wird. Mit diesen Änderungen wird das Verfahren mit zwei Lichtquellen zum einfachsten quantitativen Verfahren zur Beurteilung der Linearität (d. h. der Abhängigkeit von I_{SC} von der Bestrahlungsstärke) von PV-Einrichtungen, das nicht einmal eine Referenzeinrichtung erfordert, wenn es sich bei den zu prüfenden Einrichtungen um PV-Einzelzellen handelt.

Eine nachrangige Änderung, die eingeführt wurde, um das Aufsuchen des notwendigen Verfahrens innerhalb des Dokuments zu verbessern, ist die Unterscheidung zwischen den Fällen der Bestrahlungsstärke und der Temperatur als Prüfparameter, d. h. als Parameter, der verändert wird und dem gegenüber die Abhängigkeit überprüft wird.

Weiterhin dürfen, wenn die lineare Abhängigkeit eines Parameters der Einrichtung (z. B. I_{SC}) gegenüber mehr als einem einzelnen Prüfparameter zu beurteilen ist, Zwischenschritte unternommen werden, die die in dieser Norm beschriebenen Verfahren anwenden. Beispielsweise erfordert die Messung einer Leistungs-

matrix, wie sie in der Norm **IEC 61853-1** definiert ist, die Messung der höchsten Leistung als Funktion von sowohl Bestrahlungsstärke als auch Temperatur. In diesem Fall ist der geeignetste Weg zur Durchführung der Messung der Leistungsmatrix üblicherweise, einen Parameter zu variieren (z. B. die Temperatur), während der andere (z. B. die Bestrahlungsstärke) konstant gehalten wird, und dieses Verfahren dann bei verschiedenen Niveaus des zweiten Parameters zu wiederholen, bis die gesamte Matrix vervollständigt ist. Aus dieser Sicht würde der zweite Parameter als der feste betrachtet werden, und der erste wäre der Prüfparameter, dem gegenüber die lineare Abhängigkeit nach dieser Norm bewertet wird. Jedoch kann, wenn die vollständige Leistungsmatrix erst einmal gemessen wurde, die anschließende Datenanalyse der höchsten Leistung des Prüflings (ebenso wie jedes anderen elektrischen Parameters von Bedeutung) durchgeführt werden, indem einer der Parameter als Prüfparameter angesehen wird, solange der andere konstant gehalten wird. Daher kann eine lineare Abhängigkeit hinsichtlich des einen oder des anderen Parameters bewertet werden.

Photovoltaische Einrichtungen – Teil 10: Verfahren der linearen Abhängigkeit und Linearitätsmessungen

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60904 beschreibt die Verfahren, die verwendet werden, um die Abhängigkeit irgendeines elektrischen Parameters (Y) einer photovoltaischen (PV-) Einrichtung hinsichtlich eines Prüfparameters (X) zu messen und den Grad zu bestimmen, bis zu dem diese Abhängigkeit einer perfekt linearen Funktion nahekommt. Er gibt auch eine Anleitung, wie Abweichungen von der idealen linearen Abhängigkeit zu berücksichtigen sind und wie im Allgemeinen mit Nichtlinearitäten elektrischer Parameter von PV-Einrichtungen umzugehen ist.

Typische Parameter der Einrichtung sind der Kurzschlussstrom I_{SC} , die Leerlaufspannung V_{OC} und die höchste Leistung P_{max} . Typische Prüfparameter sind die Temperatur und die Bestrahlungsstärke. Dieselben in dieser Norm beschriebenen Prinzipien können jedoch mit geeigneter Anpassung des Verfahrens zur Veränderung des Parameters selbst auf jeden anderen Prüfparameter angewendet werden.

Die Leistungsbeurteilung von photovoltaischen Modulen und Systemen sowie die Übertragung eines Satzes von Temperatur- und Bestrahlungsstärkebedingungen auf einen anderen Satz verlassen sich oft auf die Verwendung von linearen Gleichungen (siehe zum Beispiel [IEC 60891](#), [IEC 61853-1](#) und [IEC 61829](#)). Diese Norm erläutert die Anforderungen an die Prüfverfahren der linearen Abhängigkeit, die Datenanalyse und die Akzeptanzgrenzen der Ergebnisse, um zu sichern, dass diese linearen Gleichungen befriedigende Ergebnisse liefern. Sie gibt außerdem ein Verfahren an, wie Abweichungen des Kurzschlussstroms von der perfekten linearen Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke für PV-Einrichtungen zu korrigieren sind, die nach den in [9.6](#) gesetzten Grenzen als linear oder nichtlinear klassifiziert sind. Die Auswirkung von Spektren auf die Linearität der Bestrahlungsstärke ist enthalten für Messungen unter einem Sonnensimulator oder unter natürlichem Sonnenlicht. Diese Anforderungen schreiben auch die Bereiche der Temperatur und der Bestrahlungsstärke vor, über die die linearen Gleichungen verwendet werden dürfen.

Die hier beschriebenen Messverfahren gelten für sämtliche PV-Einrichtungen, wobei bei Mehrschicht-PV-Einrichtungen einige Vorsicht geboten ist, und werden an einer Probe oder einer vergleichbaren Einrichtung mit identischer Technologie durchgeführt, die nach den im einschlägigen Teil von IEC 61215 gesetzten Kriterien stabil ist. Diese Messungen sollten vor sämtlichen Messungen und Korrekturverfahren ausgeführt werden, die ein lineares Bauelement erfordern oder Einschränkungen für nichtlineare Einrichtungen vorschreiben. Die in dieser Norm angewendete wesentliche Methodologie beruht auf einem Anpassungsverfahren, bei dem eine lineare (Geraden-) Funktion an eine Reihe von gemessenen (d. h. unkorrigierten) Datenpunkten $\{X_i, Y_i\}$ angepasst wird. Die lineare Funktion verwendet ein Berechnungsverfahren zur Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate, das in der fortgeschrittensten Analyse auch die erweiterte kombinierte Unsicherheit ($k = 2$) der Messung berücksichtigt. Die lineare Funktion muss im Fall von Kurzschlussstromdaten über der Bestrahlungsstärke durch den Ursprung gehen. Weiterhin wird die Abweichung der Daten von dieser Funktion berechnet und die Definition des Grades der Linearität wird als zulässige prozentuale Abweichung ausgedrückt.

Allgemeine Verfahren zur Bestimmung des Grades der Linearität für diese und alle anderen Leistungsparameter werden in den [Abschnitten 6](#) (Messungen unter natürlichem Sonnenlicht und mit Sonnensimulator), [7](#) (Messungen der spektralen Empfindlichkeit) und [8](#) (Messungen mit dem Verfahren mit zwei Lichtquellen) beschrieben. Datenanalysen zur Bestimmung der Abweichungen von der linearen Funktion werden in [Abschnitt 9](#) angegeben.

Eine Einrichtung wird als linear angesehen, wenn die Anforderungen von [9.6](#) eingehalten werden.

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*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*

IEC 60904-1-1, *Photovoltaic devices – Part 1-1: Measurement of current-voltage characteristics of multijunction 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 photovoltaic reference devices*

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

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

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

IEC 60904-8-1, *Photovoltaic devices – Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multijunction photovoltaic (PV) devices*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

IEC 61215 (ALL PARTS), *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

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

ISO TS 28037, *Determination and use of straight-line calibration functions*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC unterhalten terminologische Datenbanken zur Verwendung in der Normung unter folgenden Adressen:

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

3.1

lineare Abhängigkeit

jede allgemeine lineare Abhängigkeit eines Parameters einer PV-Einrichtung von einem Prüfparameter

BEISPIEL Eine übliche lineare Abhängigkeit für PV-Einrichtungen ist die zwischen dem Kurzschlussstrom und der Temperatur der PV-Einrichtung.

3.2

Linearität

die lineare Abhängigkeit, die den Kurzschlussstrom der PV-Einrichtung mit der sie beleuchtenden Bestrahlungsstärke verknüpft

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Konzept der Linearität in der Physik, das auch auf PV-Einrichtungen anwendbar ist, impliziert die direkte Proportionalität zwischen den beiden beteiligten Variablen.

3.3

strombegrenzende Sperrschicht

Sperrschicht in einer photovoltaischen Mehrschichteinrichtung, in der unter vorgegebenen Beleuchtungsbedingungen der niedrigste photovoltaische Strom erzeugt wird

[QUELLE: IEC 60904-1-1:2017, 3.1]

4 Auswahl der Einrichtung

Das Messverfahren muss, soweit möglich, an einer Einrichtung in Originalgröße durchgeführt werden. Wenn dies nicht möglich ist, sollte eine kleinere Probe verwendet werden, welche hinsichtlich Aufbau und Werkstoffen gleichwertig ist.

Eine kleine Probe wird als gleichwertig zur zu prüfenden PV-Einrichtung in Originalgröße angesehen, wenn ihre für die zu messende lineare Abhängigkeit wesentlichen physikalischen Eigenschaften dieselben sind wie bei der PV-Einrichtung in Originalgröße. Diese Anforderung gilt für die Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke ebenso wie für die Abhängigkeit von der Temperatur.

Insbesondere müssen für die lineare Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke, für die nur der Kurzschlussstrom zu messen ist, die wesentlichen optischen Eigenschaften der kleinen Einrichtung (einschließlich der Verpackung) dieselben sein wie bei der repräsentierten Einrichtung. Diese Anforderung schließt beispielsweise die Verwendung derselben Glasart und desselben Aperturwinkels ein, die in der Einrichtung in Originalgröße verwendet werden. Im Fall von auf beiden Seiten aktiven (Bifacial-) PV-Einrichtungen gilt die Anforderung für beide Seiten der Einrichtung. Auch sollte die Konfiguration der elektrischen Verbindungen gut repräsentiert sein.

Wenn die Äquivalenz zur Einrichtung in Originalgröße mit einer kleinen Probe nicht erreicht werden kann, muss der Prüfbericht der Messergebnisse die Grenzen ihrer Gültigkeit angeben.

5 Prüfvorrichtung

5.1 Allgemeine Anforderungen

Eine Unsicherheitsberechnung muss immer durchgeführt werden, bei der der verwendete spezielle Aufbau und die ausgeführten Messungen ausdrücklich berücksichtigt werden (siehe 9.1 für ergänzende Einzelheiten).

Wenn der Prüfparameter die Bestrahlungsstärke ist und ein anderes Messverfahren als das Verfahren mit zwei Lichtquellen für Einzelzellen (für letzteres siehe 5.4 a)) verwendet wird, müssen die Ausrüstung und das Verfahren für die Änderung mit einem Spektralradiometer verifiziert werden. Ein Radiometer ist nur zulässig, wenn die Referenzeinrichtung an den Prüfling spektral angepasst ist und der Aufbau ein Sonnensimulator ist, der mit hinsichtlich des Lichtspektrums spektral neutralen Filterelementen benutzt wird. Damit sie nur als Unsicherheitsbeitrag zur gesamten Messunsicherheit angesehen wird und daher keine systematische Korrektur erforderlich macht, darf die Änderung der relativen spektralen Bestrahlungsstärkeverteilung nicht zu einer Änderung von mehr als $\pm 0,5$ % des Kurzschlussstroms des Prüflings über den gesamten interessierenden Bereich der Bestrahlungsstärke führen (siehe IEC 60904-7 und IEC 60904-8 oder IEC 60904-8-1 für die korrekte Berechnung der spektralen Fehlanpassung (en: spectral mismatch, SMM)). Hinsichtlich der räumlichen Gleichmäßigkeit sollte jede Änderung aufgrund der Schwankung des Niveaus der Bestrahlungsstärke zu einer Änderung von nicht mehr als $\pm 0,5$ % des Kurzschlussstroms des Prüflings führen.

Ist der Prüfling eine Mehrschichteinrichtung, so sollte die räumliche Änderung der spektralen Bestrahlungsstärke während der Änderung des Niveaus der Bestrahlungsstärke sorgfältig erwogen werden. Insbesondere darf sie keine Änderung der strombegrenzenden Sperrschicht hinsichtlich der, die unter dem entsprechenden, in IEC 60904-3 definierten Referenzspektrum begrenzend wirkt, verursachen. Außerdem muss die Berücksichtigung der korrekten SMM bei jedem Bestrahlungsstärkeniveau wie in Abschnitt 7 von IEC 60904-1-1 gefordert vor der Berechnung der Linearität der Mehrschichteinrichtung erfolgen.

ANMERKUNG Von Gitterfiltern oder Filtern von Lichtquellen wird angenommen, dass sie das am besten geeignete Verfahren zur Änderung der Bestrahlungsstärke auf großen Flächen sind.

Ist der Prüfparameter die Temperatur, so muss die Gleichmäßigkeit der Temperatur der zu prüfenden Einrichtung in der Unsicherheitsberechnung der Messung berücksichtigt werden.

5.2 Prüfvorrichtung für die Messung linearer Abhängigkeiten unter natürlichem Sonnenlicht oder mit einem Sonnensimulator

Die folgende Ausrüstung muss verwendet werden. Wenn keine ausdrückliche Festlegung getroffen wird, muss der aufgezählte Gegenstand als erforderlich für jeden Prüfparameter angesehen werden.

- a) Ausrüstung, die zur Messung von I-U-Kurven des Prüflings unter natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht notwendig ist (siehe IEC 60904-1 oder ihren betreffenden Teil). Die Ausrüstung darf auf diejenige beschränkt werden, die zur Messung des Kurzschlussstroms (I_{SC}) notwendig ist, falls die Messungen der linearen Abhängigkeit (in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke oder Temperatur) Referenzzellen betreffen.
- b) Mittel zur aktiven Regelung der Temperatur des Prüflings und der Referenzeinrichtung. Alternativ, Mittel zur Begrenzung der Belichtung mit einer gepulsten Lichtquelle oder einem abnehmbaren Schirm im Fall von Messungen unter natürlichem Sonnenlicht oder mit einem Dauerlicht-Sonnensimulator.
- c) Ist der Prüfparameter die Bestrahlungsstärke, jede Ausrüstung, die notwendig ist, diese über den interessierenden Bereich zu ändern, ohne die relative spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung und die räumliche Gleichmäßigkeit zu beeinflussen (siehe 6.4).
- d) Ist der Prüfparameter die Temperatur, jede Ausrüstung oder jedes Mittel zur Änderung der Temperatur des Prüflings über den interessierenden Bereich (siehe 6.5).

5.3 Prüfvorrichtung für Messungen von linearen Abhängigkeiten des Kurzschlussstroms durch Messungen der spektralen Empfindlichkeit

- a) Ausrüstung zur Messung der spektralen Empfindlichkeit des Prüflings nach IEC 60904-8 (für Einschicht-einrichtungen) oder IEC 60904-8-1 (für Mehrschichteinrichtungen) bis zu einer Wiederholbarkeit von $\pm 2\%$ der Ablesung.
- b) Ist der Prüfparameter die Temperatur, jede Ausrüstung zur Änderung der Temperatur des Prüflings über den interessierenden Bereich.

5.4 Prüfvorrichtung für die Messung der Linearität des Kurzschlussstrom nach dem Verfahren mit zwei Lichtquellen

Es ist keine Referenzeinrichtung erforderlich. Die folgende Ausrüstung ist erforderlich:

- a) Zwei Lichtquellen A und B, die einzeln geregelt werden können, mit einer gesamten erreichbaren Bestrahlungsstärke der gleichen Ebene mit den kombinierten Quellen A + B, die mindestens so hoch ist wie die obere Grenze des interessierenden Bereichs. Die Lichtquellen A und B dürfen zwei einzelne Lampen sein, zwei Gruppen von Lampen oder eine einzelne Lampe mit geeigneter Maskierung davor, um einen Aufbau mit zwei Lampen nachzubilden (siehe Literaturverzeichnis für Beispiele). Im Fall einer PV-Einzelzelle sind die Änderung der spektralen Bestrahlungsstärke und die der räumlichen Ungleichmäßigkeit der Lichtquellen nicht entscheidend für die Messungen nach diesem Verfahren, und es gibt daher für sie keine Einschränkung. Im Fall von PV-Einrichtungen, die aus in Reihe geschalteten Zellen bestehen, sollten die beiden Lichtquellen mit Klasse BBA oder besser nach IEC 60904-9 über die Fläche übereinstimmen, die von dem Prüfling bedeckt wird. Sowohl für Einzelzellen- als auch für in Reihe geschaltete PV-Einrichtungen muss die Kurzzeinstabilität des Lichts (siehe IEC 60904-9) kleiner sein als 0,5 % während der zur Messung jedes der erforderlichen Signal-Triplets notwendigen Zeitdauer (siehe 8.1). Ist dies nicht erreichbar, so muss eine Überwachungszelle an der Prüfebene montiert und ihr Ablesewert zur Korrektur des Kurzschlussstromsignals des Prüflings für die zeitweilige Instabilität des Lichts verwendet werden. In jedem Fall muss die Änderung der Bestrahlungsstärke, die nicht korrigiert wird, in die Berechnung der Messunsicherheit einbezogen werden.
- b) Notwendige Ausrüstung zur Messung des Kurzschlussstroms des Prüflings mit einer Wiederholbarkeit von $\pm 0,1\%$ der Ablesung.

- c) Ausrüstung zur Regelung der Temperatur des Prüflings, falls nötig, um sie innerhalb von $\pm 2\text{ °C}$ bei der Zieltemperatur zu halten.

ANMERKUNG Die Verwendung einer Referenzeinrichtung während der Linearitätsmessung ist für das Verfahren mit zwei Lichtquellen nicht notwendig, obwohl es nützlich sein kann, um unmittelbar zu bestätigen, dass der interessierende Bereich der Bestrahlungsstärke vollständig abgedeckt wird. Wird sie nicht verwendet, kann ein iterativer Ansatz verfolgt werden, um den Bestrahlungsstärkebereich auf den interessierenden zu erweitern.

6 Verfahren zur Messung linearer Abhängigkeiten unter natürlichem Sonnenlicht oder mit einem Sonnensimulator

6.1 Allgemeine Anforderungen

6.1.1 Natürliches Sonnenlicht

Messungen unter natürlichem Sonnenlicht dürfen nur durchgeführt werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind, zusätzlich zu den allgemeinen, die in 5.1 festgesetzt sind:

- die Gesamtbestrahlungsstärke in der gleichen Ebene ist mindestens so hoch wie die obere Grenze des interessierenden Bereichs.
- Veränderungen der Bestrahlungsstärke, die durch kurzzeitige Schwankungen (Wolken, Dunst oder Rauch) hervorgerufen werden, sind kleiner als $\pm 2\%$ der an der Referenzeinrichtung gemessenen Gesamtbestrahlungsstärke in der gleichen Ebene. Diese Variationen müssen ohnehin durch Verwendung des Ablesewerts der Referenzeinrichtung korrigiert werden.
- Die Windgeschwindigkeit ist kleiner als 2 m/s.

6.1.2 Sonnensimulatoren

Lichtquellen, die durch starke Spitzen über einem breiten Kontinuum gekennzeichnet sind, wie zum Beispiel Xenonquellen oder einige Lampen, die auf lichtemittierenden Dioden (LED) basieren, sollten vor der Verwendung sorgfältig bewertet werden (siehe 5.1). Tatsächlich ändert sich bei einigen PV-Technologien die Bandlücke des Prüflings aufgrund von Temperaturänderungen. In einigen Fällen kann sie sich auch mit dem Niveau der Bestrahlungsstärke ändern. Daher kann sie verschiedene Emissionslinien im Spektrum der Lampe passieren und Verschiebungen der Leistung hervorrufen, die als Abweichungen von der linearen Abhängigkeit fehlinterpretiert werden könnten. Jedoch kann, beruhend auf der gemessenen spektralen Empfindlichkeit des Prüflings als Funktion von Temperatur oder Bestrahlungsstärke, je nachdem, was zutrifft, und auf der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke, die Stärke dieses Effekts durch Ausführen einer SMM-Berechnung nach IEC 60904-7 als Funktion von Temperatur oder Bestrahlungsstärke (je nachdem, was zutrifft) berechnet werden. Die SMM-Berechnung kann dann als SMM-Korrektur auf jede einzelne Messung bei allen Temperaturen angewendet werden, die sich von den STC unterscheiden, oder bei allen von $1\,000\text{ W/m}^2$ verschiedenen Bestrahlungsstärkeniveaus (je nachdem, was zutrifft), oder sie kann, wenn die Änderung der SMM nicht größer als 1 % über den gesamten Bereich der Temperaturen oder Bestrahlungsstärken ist, als Komponente der Unsicherheit der SMM in die Berechnung der Messunsicherheit einbezogen werden.

6.2 Montage unter natürlichem Sonnenlicht

6.2.1 Die Referenzeinrichtung und der Prüfling sind in derselben Ebene zu befestigen, so dass sich beide mit einer Abweichung von $\pm 5^\circ$ senkrecht zum direkten Sonnenlicht befinden. Die notwendigen Geräte sind anzuschließen. Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Messungen sollten so schnell wie möglich innerhalb einiger Stunden am gleichen Tag durchgeführt werden, um Auswirkungen von Veränderungen der spektralen Bedingungen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Wenn dies nicht möglich ist, so ist eine SMM-Berechnung nach IEC 60904-7 erforderlich, wenn die Referenzeinrichtung an den Prüfling nicht spektral angepasst ist oder der Prüfparameter die Temperatur ist. Die SMM-Berechnung kann dann als SMM-Korrektur auf jede einzelne Messung bei allen Temperaturen angewendet werden, die sich von den STC unterscheiden, oder sie kann, wenn die Änderung der SMM nicht größer als 1 % über den gesamten Bereich der Temperaturen ist, als Komponente der Unsicherheit der SMM in die Berechnung der Messunsicherheit einbezogen werden.

6.2.2 Wenn der Prüfling und die Referenzeinrichtung mit Temperaturreglern ausgerüstet sind, sind die Regler auf den gewünschten Wert einzustellen. Werden keine Temperaturregler eingesetzt und wird Abschattung des Prüflings von der Sonne angewendet, ist dem Prüfling zu gestatten, sich bis auf $\pm 1^\circ\text{C}$ bei der Zieltemperatur zu stabilisieren, bevor die Messungen beginnen. Um die Temperatur des Prüflings in die Nähe des Zielwerts zu bringen, ist es gestattet, die Einrichtung vorzukühlen oder vorzuwärmen, solange das Abschatten/Nicht-Abschatten die Stabilisierung innerhalb der Grenzen erlaubt. Die Referenzeinrichtung sollte vor dem Fortfahren ebenfalls innerhalb $\pm 1^\circ\text{C}$ auf ihre Gleichgewichtstemperatur angepasst sein.

6.3 Montage mit einem Sonnensimulator

6.3.1 Der Prüfling und die Referenzeinrichtung werden in der gleichen Prüfebene des Sonnensimulators befestigt, so dass beide innerhalb einer Abweichung von $\pm 2^\circ$ senkrecht zur Mittellinie des Strahls liegen. Die notwendigen Geräte sind anzuschließen.

6.3.2 Wenn der Prüfling und die Referenzeinrichtung mit Temperaturreglern ausgerüstet sind, sind die Regler auf den gewünschten Wert einzustellen. Werden keine Temperaturregler verwendet, so ist dem Prüfling und der Referenzeinrichtung zu erlauben, sich in der Temperatur innerhalb von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ zu stabilisieren, wenn notwendig und durchführbar, sogar durch Einwirkung auf die Raumtemperatur. Im Fall von Dauerlicht-Sonnensimulatoren darf ein abnehmbarer Schirm verwendet werden, um die Temperatur des Prüfling und der Referenzeinrichtung zu regulieren, wie unter natürlichem Sonnenlicht.

6.3.3 Die Bestrahlungsstärke in der Prüfebene ist auf den oberen Grenzwert G_0 des interessierenden Bereichs zu setzen, indem der gemessene Kurzschlussstrom I_{RC} der Referenzeinrichtung und dessen Kalibrierwert $I_{\text{RC,STC}}$ bei Normprüfbedingungen (en: Standard Test Conditions, STC) verwendet werden (siehe Formel (1)).

6.4 Messungen der linearen Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

6.4.1 Die Bestrahlungsstärke G_0 muss aus dem gemessenen Kurzschlussstrom (I_{RC}) der PV-Referenzeinrichtung und deren Kalibrierwert bei Normprüfbedingungen ($I_{\text{RC,STC}}$) berechnet werden. Zur Berücksichtigung der Temperatur der Referenzeinrichtung $T_{\text{m,RC}}$ sollte eine Korrektur unter Anwendung des festgelegten Temperaturkoeffizienten der Referenzeinrichtung α_{RC} und nach Formel (1) durchgeführt werden.

$$G_0 = \frac{1000 \cdot I_{\text{RC}}}{I_{\text{RC,STC}}} \cdot [1 - \alpha_{\text{RC}} (T_{\text{m,RC}} - 25)] \quad (1)$$

6.4.2 Die Bestrahlungsstärke des Prüflings ist auf einen bekannten Bruchteil k_i von G_0 zu verringern, ohne die räumliche Gleichmäßigkeit und die spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung zu beeinflussen (siehe 5.1). Es gibt verschiedene Verfahren, um dies zu erreichen; wenn nicht ausdrücklich eine Prüfvorrichtung erwähnt wird, darf das Verfahren unter natürlichem Sonnenlicht ebenso wie das mit Sonnensimulator angewendet werden:

- Unter Verwendung von kalibrierten Gitter- oder Neutralfiltern gleichmäßiger Dichte, deren Größe geeignet ist, den Prüfling vollständig abzudecken. Wenn dieses Verfahren ausgewählt wird, darf die Referenzeinrichtung nicht mit dem Filter abgedeckt werden, um die Messung der einfallenden Bestrahlungsstärke zu ermöglichen. In diesem Fall ist k_i der Kalibrierparameter des Filters (Bruchteil des durchgelassenen Lichts). Kein ungefiltertes Sonnenlicht sollte den Prüfling erreichen.

ANMERKUNG 1 Wenn angenommen wird, dass die Kalibrierung der Filter durch besondere Messbedingungen beeinflusst wird, können die Filter als unkalibriert behandelt und es kann dem entsprechenden, im nächsten Punkt beschriebenen Verfahren gefolgt werden.

- Unter Verwendung von unkalibrierten Gitter- oder Neutralfiltern gleichmäßiger Dichte, deren Größe geeignet ist, den Prüfling und die Referenzeinrichtung wenigstens einzeln vollständig abzudecken. Zusätzlich müssen, falls das Filter nicht beide Einrichtungen gleichzeitig abdecken kann, die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- i) die Referenzeinrichtung muss auf der Prüfebene nahe dem Prüfling für natürliches Sonnenlicht und an derselben Stelle für den Sonnensimulator angeordnet werden;
- ii) für Messungen unter natürlichem Sonnenlicht ist dieses Verfahren nur zulässig, wenn die kurzzeitigen Schwankungen der Bestrahlungsstärke kleiner sind als 1 % der gesamten Bestrahlungsstärke der gleichen Ebene, wie durch die Referenzeinrichtung gemessen;
- iii) für Sonnensimulatoren ist dieses Verfahren nur zulässig, wenn der Sonnensimulator bezüglich der zeitlichen Stabilität wenigstens Klasse A nach IEC 60904-9 ist;
- iv) das Niveau der Bestrahlungsstärke muss durch die Referenzeinrichtung nach dem Prüfling gemessen werden, mit dem Filter an beiden Einrichtungen nacheinander montiert.

In diesem Fall ist k_i das Verhältnis des Kurzschlussstroms der Referenzeinrichtung I_{RC} zu deren Kalibrierwert $I_{RC,STC}$. Ungefiltertes Licht sollte während der Zeitdauer, in der ihr Ausgang gemessen wird, weder den Prüfling noch die Referenzeinrichtung erreichen.

Werden Gitterfilter verwendet, so sollte ihre größte Gitterweite kleiner als 1 % des kleinsten Längsmaßes von sowohl Referenzeinrichtung als auch Prüfling sein, weil sonst ein veränderlicher Fehler aufgrund der Positionierung entstehen kann. Außerdem sollte für Messungen an Sonnensimulatoren der Öffnungsdurchmesser des Gitters viel größer sein als die Dicke, um Änderungen der spektralen Bestrahlungsstärke zu begrenzen.

Wird eines der Verfahren mit Neutralsichtfilter gewählt und die Filter sind an einer Halterung zu montieren, die den vorderen Aperturwinkel des Prüflings begrenzt, so sollte dieselbe Halterung mit der Einrichtung verwendet werden, falls sie anschließend als Referenzeinrichtung für Bestrahlungsstärkemessungen verwendet wird. Auch ändert sich üblicherweise der Transmissionsgrad optischer Neutralsichtfilter um 10 % mit der Wellenlänge über den festgelegten Wellenlängenbereich und sogar noch mehr außerhalb dieses Bereichs. Wenn die Änderung der SMM zwischen den Filtern, die zur Änderung des Bestrahlungsstärkeniveaus verwendet werden, kleiner ist als 1 %, darf sie als Bestandteil der SMM-Unsicherheit in die Berechnung der Messunsicherheit einbezogen werden; andernfalls muss sie korrigiert werden.

- c) Mit Sonnensimulatoren durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Prüfebene und Lichtquelle. Wenn die Referenzeinrichtung koplanar zum Prüfling ist, ist k_i das Verhältnis des Kurzschlussstroms der Referenzeinrichtung I_{RC} zu deren Kalibrierwert $I_{RC,STC}$.

ANMERKUNG 2 Dieses Verfahren wird als geeignet für einen begrenzten Bereich von Bestrahlungsstärken angesehen, da eine Änderung der Bestrahlungsstärke von 1 100 W/m² auf 100 W/m² (wie nach IEC 61853-1 erforderlich) bedeuten würde, die Prüfebene zu einem Abstand von ungefähr dem Dreifachen des ursprünglichen von der Lichtquelle wegzubewegen. Dies wären typischerweise mehr als 20 m bei Sonnensimulatoren mit großer Fläche für Modulmessungen und in der Größenordnung von 30 cm bei Sonnensimulatoren für Zellen. Unter realistischen Bedingungen kann dieses Verfahren jedoch angemessen sein, um die Linearität der PV-Einrichtung innerhalb des nach IEC 60904-1 zulässigen Bereichs für nach IEC 60891 korrigierte Messungen von I-U-Kurven zu prüfen.

- d) Mit Sonnensimulatoren unter Verwendung von einer oder mehrerer optischer Linsen. In diesem Fall ist k_i das Verhältnis des Kurzschlussstroms der Referenzeinrichtung I_{RC} zu deren Kalibrierwert $I_{RC,STC}$. Es muss darauf geachtet werden, sicherzustellen, dass durch die Linsen keine erhebliche Veränderung der relativen spektralen Bestrahlungsstärke in dem Wellenlängenbereich auftritt, in dem der Prüfling und die Referenzeinrichtung ansprechen (siehe 5.1). Auch sollte die Einführung der zusätzlichen Optik die räumliche Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke nicht signifikant verändern; letzteres wird als weniger wichtig erachtet, wenn die Referenzzelle und der Prüfling nacheinander an derselben Position gemessen werden und sie gleichwertige PV-Einrichtungen sind.
- e) Mit Sonnensimulatoren, die mit Filtern mit gleichmäßiger Dichte im Lampengehäuse (manchmal Masken genannt) ausgestattet sind, durch Benutzung solcher Filter. Wird dieses Verfahren gewählt, so muss die Referenzeinrichtung die gefilterte Bestrahlungsstärke wie der Prüfling empfangen. In diesem Fall ist k_i das Verhältnis des Kurzschlussstroms der Referenzeinrichtung I_{RC} zu deren Kalibrierwert $I_{RC,STC}$.
- f) Im Fall von Sonnensimulatoren mit mehreren gleichen Lichtquellen, die einzeln blockiert werden können, durch Änderung der Anzahl von Lichtquellen, die die Prüfebene beleuchten. In diesem Fall ist k_i das Verhältnis des Kurzschlussstroms der Referenzeinrichtung I_{RC} zu deren Kalibrierwert $I_{RC,STC}$. Es muss darauf geachtet werden, wesentliche Änderungen der spektralen Bestrahlungsstärke und der räumlichen Gleichmäßigkeit bei den verschiedenen Bestrahlungsstärkeniveaus zu vermeiden (siehe 5.1).