

**DIN EN IEC 60891
(VDE 0126-6)**
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

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60891
(VDE 0126-6):2010-10

Entwurf

**Photovoltaische Einrichtungen –
Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien
auf andere Temperaturen und Bestrahlungsstärken
(IEC 82/1541/CD:2019);
Text Deutsch und Englisch**

Photovoltaic devices –
Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics
(IEC 82/1541/CD:2019);
Text in German and English

Dispositifs photovoltaïques –
Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer
aux caractéristiques I-V mesurées
(IEC 82/1541/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 60 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 82/1541/CD:2019 „Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V 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 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 60891 (VDE 0126-6):2010-10** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Ergänzung eines Leitfadens dafür, welches Korrekturverfahren in Abhängigkeit von der Anwendung angewendet werden muss;
- Einführung eines Umrechnungsverfahrens 4, das für die kristalline Silizium(c-Si)-Technologie mit unbekannten Temperaturkoeffizienten gilt;

- c) Einführung verschiedener Erläuterungen für bestehende Verfahren zur Verbesserung der Messgenauigkeit und zur Verringerung der Messunsicherheit;
- d) Ergänzung eines informativen Anhangs mit zusätzlichen Verfahren zur Bestimmung des Reihenwiderstandes.

Inhalt	Seite
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Korrekturverfahren.....	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Korrekturverfahren 1.....	10
4.3 Korrekturverfahren 2.....	11
4.4 Korrekturverfahren 3.....	12
4.4.1 Allgemeines	12
4.4.2 Korrektur der Bestrahlungsstärke und der Temperatur aus zwei gemessenen I-U-Kurven	13
4.4.3 Korrektur für verschiedene Bestrahlungsstärken und Temperaturen aus drei I-U-Kurven.....	15
4.4.4 Korrektur für verschiedene Bestrahlungsstärken und Temperaturen aus vier gemessenen I-U-Kennlinien.....	16
4.5 Korrekturverfahren 4.....	17
5 Bestimmung der Temperaturkoeffizienten	18
5.1 Allgemeines	18
5.2 Prüfeinrichtung	19
5.3 Verfahren mit natürlichem oder simuliertem stationärem Sonnenlicht.....	20
5.4 Verfahren mit einem gepulsten Sonnensimulator	21
5.5 Berechnung der Temperaturkoeffizienten	21
6 Bestimmung des Reiheninnenwiderstandes R_S und R'_S	22
6.1 Allgemeines	22
6.2 Bestimmung von R_S in den Korrekturverfahren 1 und 4	23
6.3 Bestimmung von R'_S in Korrekturverfahren 2	24
6.4 Bestimmung von R_S in Korrekturverfahren 4.....	26
7 Bestimmung der Kennlinienkorrekturfaktoren κ und κ'	27
7.1 Allgemeines	27
7.2 Durchführung	28
8 Prüfbericht	29
Anhang A (informativ) Alternative Verfahren für die Bestimmung des Reihenwiderstandes	30
A.1 Differentieller Widerstand bei U_{oc} in Abhängigkeit vom inversen Bestrahlungsstärkeverfahren	30
Literaturhinweise.....	31
Bilder	
Bild 1 – Beispiele für die Korrektur der I-U-Kennlinien nach den Gleichungen (6) und (7).....	14
Bild 2 – Schematische Darstellung der Beziehung von G_3 und T_3 , die bei der gleichzeitigen Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur und bei feststehenden Werten von T_1 , G_1 , T_2 und G_2 nach den Gleichungen (8) und (9) gewählt werden kann	15

Bild 3 – Schematische Darstellung für den Vorgang der Korrektur der I-U-Kennlinie für verschiedene Bereiche von Bestrahlungsstärke und Temperatur auf der Basis von drei gemessenen Kennlinien	16
Bild 4 – Schematische Darstellung für den Vorgang der Korrektur der I-U-Kennlinie für verschiedene Bereiche von Bestrahlungsstärke und Temperatur auf der Basis von vier gemessenen Kennlinien	17
Bild 5 – Temperaturmessstellen am Prüfling hinter den Zellen	20
Bild 6 – Bestimmung des Reiheninnenwiderstandes	24
Bild 7 – Bestimmung des Reiheninnenwiderstandes, wenn sich die korrigierten I-U-Kennlinien schneiden	24
Bild 8 – Bestimmung des U_{OC} -Bestrahlungsstärkekorrekturfaktors und des Reiheninnenwiderstandes	26
Bild 9 – Bestimmung des Reiheninnenwiderstandes eines PV-Moduls aus einer einzelnen I-U-Kurve	27
Bild 10 – Bestimmung des Kennlinienkorrekturfaktors	29
Bild A.1 – Bestimmung des Reiheninnenwiderstandes	30
Tabellen	
Tabelle 1 – Überblick über Korrekturverfahren für Korrekturen der Bestrahlungsstärke (d. h. $T_1 = T_2$)	7
Tabelle 2 – Überblick über Korrekturverfahren für Korrekturen der Temperatur (d. h. $G_1 = G_2$)	9

Photovoltaische Einrichtungen – Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien auf andere Temperaturen und Bestrahlungsstärken

1 Anwendungsbereich

In dieser Internationalen Norm werden Verfahren beschrieben, die bei der Umrechnung von gemessenen I-U-Kennlinien (Strom-Spannungs-Kennlinien) (auch bezeichnet als I-U-Kurven) von photovoltaischen (PV-)Bauelementen einzuhalten sind. Ebenso werden die Verfahren festgelegt, die zur Bestimmung der Korrekturfaktoren anzuwenden sind. Die Anforderungen für die I-U-Messung von PV-Elementen sind in der Norm IEC 60904-1 und ihren betreffenden Teilen dargelegt.

Die PV-Elemente umfassen Einzelzellen mit oder ohne Schutzabdeckung, eine Solarzellenteilbaugruppe oder ein Modul. Für jeden Bauelementtyp gilt eine andere Gruppe der bestimmenden Parameter für die Korrektur der I-U-Kurve. Obwohl die Temperaturkoeffizienten für ein Modul (oder eine Teilbaugruppe von Zellen) aus den Messungen an einer Einzelzelle berechnet werden dürfen, sollte beachtet werden, dass der Reiheninnenwiderstand und der Kennlinienkorrekturfaktor für ein Modul oder eine Zellenteilbaugruppe getrennt bestimmt werden sollten.

Besondere Sorgfalt sollte hinsichtlich der Anwendung der I-U-Korrekturparameter angewendet werden. Diese Parameter haben Gültigkeit bei dem photovoltaischen Bauelement, bei dem sie gemessen worden sind. Innerhalb eines Fertigungsloses oder einer Typenklasse können Abweichungen auftreten.

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

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar devices*

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

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

IEC 60904-10, *Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linearity measurement*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 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

B

Bestrahlungsstärke-Korrekturfaktor für die Leerlaufspannung, mit der Thermospannung der pn-Sperrschicht der Diode V_t und n_s

3.2

n_s

Anzahl der geschalteten Zellen in Verbindung zu den zu prüfenden Geräten

3.3

ϵ

Produkt aus dem Idealitätsfaktor des Prüflings mit der Energiebandlücke des PV-Werkstoffs geteilt durch die Elementarladung des Elektrons an

4 Korrekturverfahren

4.1 Allgemeines

Für die Korrektur der gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinie auf andere Bedingungen von Temperatur und Bestrahlungsstärke wie z. B. Normprüfbedingungen (Standard Test Conditions, STC) können vier Verfahren angewendet werden. Das erste Verfahren beschreibt ein System von linearen Gleichungen für Strom und Spannung, das am besten für Korrekturen der Bestrahlungsstärke innerhalb von $\pm 40\%$ der Vorgabe-Bestrahlungsstärke anwendbar ist. Das zweite Verfahren ist ein alternatives algebraisches Korrekturverfahren, welches bei größeren Korrekturen der Bestrahlungsstärke (über $\pm 40\%$) zu besseren Ergebnissen führt. Bei beiden Verfahren ist es erforderlich, dass die Korrekturparameter der PV-Elemente bekannt sind. Wenn sie nicht bekannt sind, ist es notwendig, sie vor der Durchführung der Korrektur zu bestimmen. Das dritte Verfahren ist ein Interpolationsverfahren, bei dem keine Korrekturparameter als Eingangsgrößen erforderlich sind. Es kann angewendet werden, wenn für den Prüfling mindestens zwei Strom-Spannungs-Kurven aufgenommen worden sind. Diese zwei Strom-Spannungs-Kurven überstreichen den Temperatur- und Bestrahlungsstärkebereich, für den das Korrekturverfahren anwendbar ist. Das vierte Verfahren beruht auf dem Ein-Dioden-Modell und stellt eine Vorgehensweise zur Bestimmung eines Korrekturparameters R_S aus einer einzelnen I-U-Kurve bereit, wenn der Parameter unbekannt ist. Das Verfahren ist am besten für Korrekturen der Bestrahlungsstärke anwendbar, wenn die gemessene und die Vorgabe-Bestrahlungsstärke innerhalb von 300 W/m^2 bis $1\,200 \text{ W/m}^2$ liegen und der Reihenwiderstand R_S unbekannt ist. Es ist geeignet für Umrechnungen, wenn die Kennwerte bei STC aus einer einzelnen experimentell ermittelten I-U-Kurve zu bestimmen sind.

Tabelle 1 und [Tabelle 2](#) geben einen Überblick über die vier verschiedenen Korrekturverfahren und beschreiben qualitativ die Vorteile, Nachteile und die für jedes Verfahren erforderlichen Korrekturparameter. Der Zweck dieser Tabellen ist die Bereitstellung eines Leitfadens für den Anwender der vorliegenden Norm dafür, welches Korrekturverfahrens für die verschiedenen Anwendungen geeignet ist.

Tabelle 1 – Überblick über Korrekturverfahren für Korrekturen der Bestrahlungsstärke (d. h. $T_1 = T_2$) (1 von 2)

Korrekturverfahren	Vorteile	Nachteile	Anforderungen an Korrekturparameter
Verfahren 1	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für Korrekturen der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wird (gewöhnlich innerhalb von $\pm 40\%$ der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wurde). Bei linearen Bauelementen bezogen auf die Bestrahlungsstärke (gewöhnlich bei kristallinem Silizium der Fall) funktioniert dieses Verfahren über einen größeren Bereich der Korrekturen der Bestrahlungsstärke (gewöhnlich innerhalb von $\pm 80\%$ der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wurde) relativ gut. 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme der Überlagerung des Stroms bei allen Spannungen Kann für größere Korrekturen der Bestrahlungsstärke keine vollständigen I-U-Kurven erzeugen (Teil der I-U-Kurve zwischen $P_{\max}$ und U_{oc} fehlt) Extrapolation für U_{oc} notwendig 	Ein Parameter: R_S

Tabelle 1 (2 von 2)

Korrekturverfahren	Vorteile	Nachteile	Anforderungen an Korrekturparameter
Verfahren 2	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für Korrekturen der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wird (gewöhnlich innerhalb von ± 40 % der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wurde). Bei linearen Bauelementen bezogen auf die Bestrahlungsstärke (gewöhnlich bei kristallinem Silizium der Fall) funktioniert dieses Verfahren über einen größeren Bereich der Korrekturen der Bestrahlungsstärke (gewöhnlich innerhalb von ± 80 % der Bestrahlungsstärke, bei der R_S bestimmt wurde) relativ gut. Kann vollständige I-U-Kurven für größere Korrekturen der Bestrahlungsstärke erzeugen Liefert Informationen für einen relativen Vergleich der Modellierungsparameter des Prüflings, die im Ein-Dioden-Modell verwendet werden (Idealitätsfaktor und R_S) 	<ul style="list-style-type: none"> Erfordert die Kenntnis von mehr Parametern als in Verfahren 1 und 4 Nicht empfohlen für die I-U-Umrechnung für Bestrahlungsstärken über ± 40 % der Vorgabe-Bestrahlungsstärke, wenn der Prüfling einen erheblichen Ableitstrom (niedrigen Ableitwiderstand) aufweist 	Zwei Parameter: B, R_S'
Verfahren 3	<ul style="list-style-type: none"> Beste Genauigkeit für I-U-Korrekturen bei Interpolation Anpassungsparameter nicht erforderlich Wenig technologieabhängiges Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Erfordert die Kenntnis von I-U-Kurven bei höheren und niedrigeren Bestrahlungsstärkepegeln verglichen mit der Vorgabe-Bestrahlungsstärke Anpassungsparameter können nicht extrahiert werden Die Interpolation liefert bessere Ergebnisse als die Extrapolation. Extrapolation sollte vorsichtig erfolgen 	Kein Korrekturparameter erforderlich
Verfahren 4	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für Korrekturen, wenn der Korrekturparameter R_S unbekannt ist 	<ul style="list-style-type: none"> R_S sollte aus einer einzelnen I-U-Kurve bestimmt werden Nicht geeignet für Vorgehensweisen, die nicht dem Ein-Dioden-Modell entsprechen 	Ein Parameter: R_S

Tabelle 2 – Überblick über Korrekturverfahren für Korrekturen der Temperatur (d. h. $G_1 = G_2$)

Korrekturverfahren	Vorteile	Nachteile	Anforderungen an Korrekturparameter
Verfahren 1	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für Temperaturkorrekturen, solange der gemessene Bestrahlungsstärkepegel innerhalb von $\pm 30\%$ des Bestrahlungsstärkepegels liegt, bei dem die Temperaturkoeffizienten bestimmt wurden 	<ul style="list-style-type: none"> Nicht empfohlen für Temperaturkorrekturen, wenn der gemessene Bestrahlungsstärkepegel $\pm 30\%$ des Bestrahlungsstärkepegels übersteigt, bei dem die Temperaturkoeffizienten bestimmt wurden 	Vier Parameter: R_S, k, α und β
Verfahren 2	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für Temperaturkorrekturen, solange der gemessene Bestrahlungsstärkepegel innerhalb von $\pm 30\%$ des Bestrahlungsstärkepegels liegt, bei dem die Temperaturkoeffizienten bestimmt wurden Temperaturkorrekturen für lineare PV-Elemente bezogen auf die Bestrahlungsstärke (gewöhnlich bei kristallinem Silizium der Fall) gelten für den gesamten Bereich der Bestrahlungsstärke, für den das Bauelement nachweislich linear ist (nach IEC 60904-10) 	<ul style="list-style-type: none"> Für nichtlineare Bauelemente bezogen auf die Bestrahlungsstärke wird es für Temperaturkorrekturen nicht empfohlen, wenn der gemessene Bestrahlungsstärkepegel $\pm 30\%$ des Bestrahlungsstärkepegels übersteigt, bei dem die Temperaturkoeffizienten bestimmt wurden 	Vier Parameter: $R_S', k',$ α_{rel} und β_{rel}
Verfahren 3	<ul style="list-style-type: none"> Beste Genauigkeit für I-U-Korrekturen bei Interpolation Anpassungsparameter nicht erforderlich Wenig technologieabhängiges Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Erfordert die Kenntnis von I-U-Kurven bei höheren und niedrigeren Temperaturpegeln Anpassungsparameter können nicht extrahiert werden Die Interpolation liefert bessere Ergebnisse als die Extrapolation. Extrapolation sollte vorsichtig erfolgen 	Kein Korrekturparameter erforderlich
Verfahren 4	<ul style="list-style-type: none"> Für alle kristallinen Silizium-PV-Elemente kann der gleiche ε-Wert verwendet werden ε ist unabhängig von Temperatur und Bestrahlungsstärke 	<ul style="list-style-type: none"> Nicht geeignet für Vorgehensweisen, die nicht dem Ein-Dioden-Modell entsprechen 	Drei Parameter: $\varepsilon, \alpha_{rel}$ und n_S

Für die gleichzeitige Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur gelten die in [Tabelle 1](#) und [Tabelle 2](#) aufgeführten Vorteile und Einschränkungen gleichzeitig.

Für alle Verfahren gilt, dass die I-U-Kennlinien der PV-Elemente nach der Norm [IEC 60904-1](#) und ihren betreffenden Teilen zu messen sind.

Alle PV-Elemente sollten mindestens in dem Bereich der Bestrahlungsstärken und der Bauelementtemperatur, über dem Korrekturen vorgenommen wurden, linear sein. Einzelheiten zur Bewertung der Abweichung von der vollkommen linearen Abhängigkeit werden in [IEC 60904-10](#) beschrieben.

Es ist eine Schätzung für die Genauigkeit der Umrechnung erforderlich (siehe [Abschnitt 8](#)).

Üblicherweise muss die gesamte Bestrahlungsstärke G aus dem gemessenen Kurzschlussstrom (I_{RC}) des PV-Referenzelements nach den Festlegungen in [IEC 60904-2](#) und dessen Kalibrierwert bei STC ($I_{RC,STC}$) berechnet werden. Durchgeführt werden sollte eine Korrektur, um die tatsächliche Temperatur des

Referenzelements T_{RC} unter Anwendung des festgelegten relativen Temperaturkoeffizienten des Kurzschlussstroms des Referenzelements ($1/^\circ\text{C}$) zu berücksichtigen, der für 25°C und $1\,000\text{ W/m}^2$ angegeben ist.

$$G = \frac{1000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot I_{RC}}{I_{RC,STC}} \cdot [1 - \alpha_{RC} \cdot (T_{RC} - 25^\circ\text{C})]$$

Falls erforderlich, sollte darüber hinaus die Linearität des Referenzelements nach IEC 60904-10 korrigiert werden. Das PV-Referenzelement muss entweder spektral an den Prüfling angepasst werden oder die spektrale Fehlanpassung (SMM) (en: spectral mismatch,) muss nach IEC 60904-7 korrigiert werden. Da die spektrale Empfindlichkeit des Bauelements mit der Temperatur schwanken kann, werden die Fehlerquellen durch den spektralen Fehler und die Änderung des Temperaturkoeffizienten mit dem Spektrum nur durch eine Interpolationsmethode mit SMM-Korrektur verringert. Der Kurzschlussstrom des Referenzelements muss über dem gesamten betreffenden Bereich der Bestrahlungsstärke nach den Festlegungen in IEC 60904-10 linear sein. Wenn die Linearität des Referenzelements mit der Bestrahlungsstärke bekannt ist, müssen Korrekturen nach IEC 60904-10 erfolgen.

4.2 Korrekturverfahren 1

Das erste Verfahren beruht auf dem Grundsatz der Überlagerung der Ströme bei allen Spannungen, wobei angenommen wird, dass der Diodenstrom nicht vom Fotostrom abhängt. Das ist gewöhnlich nicht der Fall, wenn die Vorgabe-Bestrahlungsstärke erheblich von der gemessenen Bestrahlungsstärke abweicht.

Die gemessene Strom-Spannungs-Kennlinie muss mit den folgenden Gleichungen auf STC oder andere ausgewählte Temperatur- und Bestrahlungsstärkewerte korrigiert werden:

$$I_2 = I_1 + I_{SC1} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Dabei sind

- I_1, U_1 die Koordinaten der Punkte auf der gemessenen Kennlinie;
- I_2, U_2 die Koordinaten der entsprechenden Punkte auf der korrigierten Kennlinie;
- G_1 ist die mit dem Referenzelement gemessene Bestrahlungsstärke, korrigiert auf die Temperatur und die Linearität des Referenzelements und SMM;
- G_2 ist die Vorgabe-Bestrahlungsstärke für den Prüfling;
- T_1 ist die gemessene Temperatur des Prüflings;
- T_2 ist die Vorgabe-Temperatur des Prüflings;
- I_{SC1} ist der gemessene Kurzschlussstrom des Prüflings bei G_1 und T_1 ;
- α und β sind die absoluten Kurzschlussstrom- und Leerlaufspannungs-Temperaturkoeffizienten des Prüflings bei der Vorgabe-Bestrahlungsstärke für die Korrektur und innerhalb des zu untersuchenden Temperaturbereichs;
- R_S ist der Reiheninnenwiderstand des Prüflings;
- κ ist ein Kurvenkorrekturfaktor.

Da die Datenpunkte U_{oc1} von der ursprünglichen Achse weg verschoben werden, wenn von niedrigeren zu höheren Bestrahlungsstärken umgerechnet wird, ist der umgerechnete Wert U_{oc2} durch lineare Extrapolation aus mindestens drei Datenpunkten zu bestimmen, die in der Nähe und unterhalb von U_{oc2} liegen (d. h. für

negative Ströme). Zur Verringerung von durch Extrapolation verursachten Fehlern wird empfohlen, dass I-U-Kurven möglichst weit in die Durchlassspannung hinein über U_{oc} hinaus gemessen werden.

U_{oc2} darf auch durch eine Polynomannpassung der I-U-Kurve extrapoliert werden. Diese Vorgehensweise wird vor allem dann empfohlen, wenn der gemessene U_{oc1} -Wert in einen I-U-Datenpunkt mit Strom-Offset umgerechnet wird. Bei der Polynomannpassung müssen alle I-U-Datenpunkte im Spannungsbereich größer als U_{Pmax} berücksichtigt werden. Die resultierende Kurve muss im gesamten Spannungsbereich von U_{Pmax} bis U_{oc} nachvollziehbar sein. Alternative Methoden zur linearen Extrapolation (wie Diodenannpassung) sind auch zulässig; in diesem Fall muss im Bericht die Methode zusammen mit einer Aussage über die geschätzte Unsicherheit des umgerechneten U_{oc2} -Wertes angegeben werden.

ANMERKUNG Für kristalline Silizium-PV-Elemente ist α üblicherweise positiv und β negativ.

Die Verfahren zur Bestimmung der I-U-Korrekturparameter des Prüflings werden in den [Abschnitten 5 bis 7](#) beschrieben.

[Gleichung \(1\)](#) ist nur für I-U-Kennlinien anwendbar, die bei Bestrahlungsstärken gemessen wurden, die während der Erfassung der gesamten I-U-Kennlinie konstant sind. Bei gepulsten Sonnensimulatoren mit abnehmender Bestrahlungsstärke oder anderen Arten von Bestrahlungsstärkeschwankungen während der I-U-Messung ist [Gleichung \(1\)](#) von daher nicht anwendbar. In diesem Fall ist jede aufgenommene I-U-Kennlinie anhand einer äquivalenten I-U-Kennlinie bei konstanter Bestrahlungsstärke zu korrigieren, wodurch ein zusätzlicher Skalierungsfaktor hinsichtlich I_{SC1} erforderlich wird. Aus praktischen Gründen wird dieser Skalierungsfaktor auf die Bestrahlungsstärke bezogen, die dem gemessenen I_{SC1} entspricht. Bei nichtkonstanter Bestrahlungsstärke wird [Gleichung \(1\)](#) zur folgenden Umrechnungsgleichung:

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC1}} \cdot I_{SC1} \cdot \left(\frac{G_2}{G'_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

Dabei ist G_{SC1} der Wert der Bestrahlungsstärke zum Zeitpunkt der I_{SC1} -Messung und G'_1 ist die Bestrahlungsstärke, die zum Zeitpunkt der Datenerfassung der einzelnen I-U-Datenpunkte gemessen wurde.

Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die normierten Spektren für G_1 und G_2 identisch sind. Wenn das nicht der Fall ist, muss eine zusätzliche Unsicherheitskomponente für die Änderung von α mit dem Spektrum berücksichtigt werden.

4.3 Korrekturverfahren 2

Dieses Verfahren beruht auf dem vereinfachten Ein-Dioden-Modell von PV-Elementen. Die semi-empirischen Umrechnungsgleichungen enthalten fünf Korrekturparameter für die I-U-Kurve, die durch Messung der I-U-Kennlinien bei unterschiedlichen Temperatur- und Bestrahlungsstärkebedingungen bestimmt werden können (siehe [Abschnitte 5 bis 7](#)). Neben den relativen Temperaturkoeffizienten für den Kurzschlussstrom (α_{rel}) und die Leerlaufspannung (β_{rel}) wird üblicherweise ein weiterer Temperaturkoeffizient (κ') verwendet, der für die Änderungen des Reiheninnenwiderstandes (und des Füllfaktors) in Abhängigkeit von der Temperatur steht. Für dieses Korrekturverfahren sind die folgenden Gleichungen für Strom und Spannung festgelegt:

$$I_2 = I_1 \cdot [1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)] \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (4)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left[\beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + B \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right] - R'_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Dabei sind

I_1, U_1 die Koordinaten der Punkte auf der gemessenen I-U-Kennlinie;

I_2, U_2	die Koordinaten der entsprechenden Punkte auf der korrigierten I-U-Kennlinie;
G_1	ist die mit dem Referenzelement gemessene Bestrahlungsstärke, korrigiert auf die Temperatur und die Linearität des Referenzelements und SMM;
G_2	ist die Vorgabe-Bestrahlungsstärke für die korrigierte I-U-Kennlinie;
T_1	ist die gemessene Temperatur des Prüflings;
T_2	ist die Vorgabe-Temperatur des Prüflings;
U_{OC1}	ist die Leerlaufspannung unter Prüfbedingungen G_1 und T_1 ;
α_{rel} und β_{rel}	sind die relativen Strom- und Spannungs-Temperaturkoeffizienten des Prüflings, gemessen bei 1 000 W/m ² ; sie drücken die relative Änderung des Kurzschlussstroms und der Leerlaufspannung bezogen auf ihre Werte bei STC aus; beide Koeffizienten werden in Prozent je Temperatureinheit angegeben und sollten auf ein Hundertstel skaliert werden, wenn sie in die Gleichungen eingesetzt werden (z. B. $\alpha_{rel} = 0,045\% K^{-1} = \frac{0,045}{100} K^{-1}$);
B	ist der Bestrahlungsstärkekorrekturfaktor für die Leerlaufspannung, die mit der Thermo-spannung der p-n-Sperrschicht der Diode D und der im Prüfling in Reihe geschalteten Anzahl der Zellen n_S in Verbindung steht;
R'_S	ist der Reiheninnenwiderstand des Prüflings;
κ'	wird interpretiert als Temperaturkoeffizient des Reiheninnenwiderstandes R'_S .

Es sollte darauf geachtet werden, dass die Zahlenwerte für κ' und R'_S für das Verfahren 2 anders als die Werte von κ und R_S für das Korrekturverfahren 1 sein können.

ANMERKUNG 1 Ein typischer Bereich für den Bestrahlungsstärkekorrekturfaktor B ist $0,05 \pm 0,01$.

ANMERKUNG 2 Ein typischer Bereich für den Temperaturkoeffizienten α_{rel} von c-Si-Modulen ist $0,03\% / ^\circ C$ bis $0,06\% / ^\circ C$ bezogen auf I_{SC} bei STC.

4.4 Korrekturverfahren 3

4.4.1 Allgemeines

Dieses Verfahren darf nur für Bauelemente verwendet werden, die nach IEC 60904-10 nachweislich linear sind. Es beruht auf der linearen Interpolation oder Extrapolation zweier gemessener I-U-Kennlinien. Verwendet werden mindestens zwei I-U-Kennlinien, und es sind keine Korrekturparameter oder Anpassungsparameter erforderlich. Die gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien müssen mit den folgenden Gleichungen auf STC oder andere Vorgabe-Temperatur- und Bestrahlungsstärkewerte korrigiert werden:

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (6)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (7)$$

Die Wertepaare (I_1, U_1) und (I_2, U_2) sollten so gewählt werden, dass gilt: $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$

Dabei sind

I_1, U_1	die Koordinaten der Punkte auf der gemessenen Kennlinie bei einer Bestrahlungsstärke G_1 und einer Temperatur T_1 ;
I_2, U_2	die Koordinaten der Punkte auf der gemessenen Kennlinie bei einer Bestrahlungsstärke G_2 und einer Temperatur T_2 ;

- I_3, U_3 die Koordinaten der entsprechenden Punkte auf der korrigierten Kennlinie bei einer Bestrahlungsstärke G_3 und einer Temperatur T_3 ;
- I_{SC1}, I_{SC2} ist der gemessene Kurzschlussstrom des Prüflings bei den Bestrahlungsstärken G_1 und G_2 ;
- a ist eine Konstante für die Interpolation, die mit der Bestrahlungsstärke und Temperatur in folgender Beziehung steht:

$$G_3 = G_1 + a \cdot (G_2 - G_1) \quad (8)$$

$$T_3 = T_1 + a \cdot (T_2 - T_1) \quad (9)$$

Dieses Verfahren sollte für die meisten PV-Technologien anwendbar sein. Die Gleichungen (6) bis (9) können für die Bestrahlungsstärkekorrektur, Temperaturkorrektur und die gleichzeitige Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur angewendet werden. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die normierten Spektren für G_1 , G_2 und G_3 identisch sind. Wenn das nicht der Fall ist, gibt es eine zusätzliche Unsicherheitsquelle in G_3 . Die Messung von G_1 und G_2 mit SMM-Korrekturen auf der Basis der spektralen Empfindlichkeit, die bei T_1 und T_2 nach IEC 60904-8 gemessen wird, verringert diesen Fehler. Wenn die spektrale Empfindlichkeit nichtlinear bezogen auf die Bestrahlungsstärke ist, sollten die Messung bei Bias-Lichtintensitäten von G_1 und G_2 erfolgen.

4.4.2 Korrektur der Bestrahlungsstärke und der Temperatur aus zwei gemessenen I-U-Kurven

Im Folgenden wird das Verfahren für die Korrektur der I-U-Kennlinie hinsichtlich der Bestrahlungsstärke und Temperatur (G_3, T_3) aus zwei I-U-Kennlinien beschrieben, die bei den Bestrahlungsstärken und Temperaturen von (G_1, T_1) und (G_2, T_2) wie folgt gemessen worden sind (Bild 1(a) und 1(b)):

- Messung der beiden I-U-Kennlinien bei den Bestrahlungsstärken und Temperaturen von (G_1, T_1) bzw. (G_2, T_2) (durchgezogene Kurvenzüge in Bild 1(a)). Ermitteln der Werte I_{SC1} und I_{SC2} .
- Berechnen von a mit Gleichung (8) oder Gleichung (9) nach Auswahl einer Vorgabe-Bestrahlungsstärke oder -Temperatur. Wenn z. B. die beiden gemessenen I-U-Kurven aufgenommen wurden bei:

$$G_1 = 1\,000 \text{ W/m}^2 \text{ und } T_1 = 50 \text{ °C}$$

$$G_2 = 500 \text{ W/m}^2 \text{ und } T_2 = 40 \text{ °C}$$

und die Vorgabe-Bestrahlungsstärke $G_3 = 800 \text{ W/m}^2$ beträgt,

dann wird nach Gleichung (8) $a = 0,4$

und nach Gleichung (9) $T_3 = 46 \text{ °C}$.

- Auf der I-U-Kurve 1 wird ein Punkt (U_1, I_1) ausgewählt. Es wird ein Punkt (U_2, I_2) auf der I-U-Kurve 2 ermittelt, für den die Bedingung $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ erfüllt ist (Bild 1 (b)).
- Berechnen von U_3 und I_3 mit den Gleichungen (6) und (7).
- Auf der I-U-Kurve 1 werden mehrere Wertepaare (U_1, I_1) ausgewählt, mit denen jeweils nach den Schritten c) und d) das Wertepaar (U_3, I_3) berechnet wird.
- Die I-U-Kennlinie 3 bei der Bestrahlungsstärke G_3 und der Temperatur T_3 wird mit dem Wertepaar (U_3, I_3) erhalten (gestrichelter Kurvenzug in Bild 1 (b)).

Bild 1 (a) und Bild 1 (b) zeigen ein Beispiel für die Bestrahlungsstärkekorrektur ($T_1 = T_2$). Bild 1 (c) zeigt ein Beispiel für die Temperaturkorrektur ($G_1 = G_2$). Bild 1 (d) zeigt eine gleichzeitige Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur. Bei $0 \leq a \leq 1$ wird das Verfahren der Interpolation angewendet. Anderenfalls wird Extrapolation angewendet.

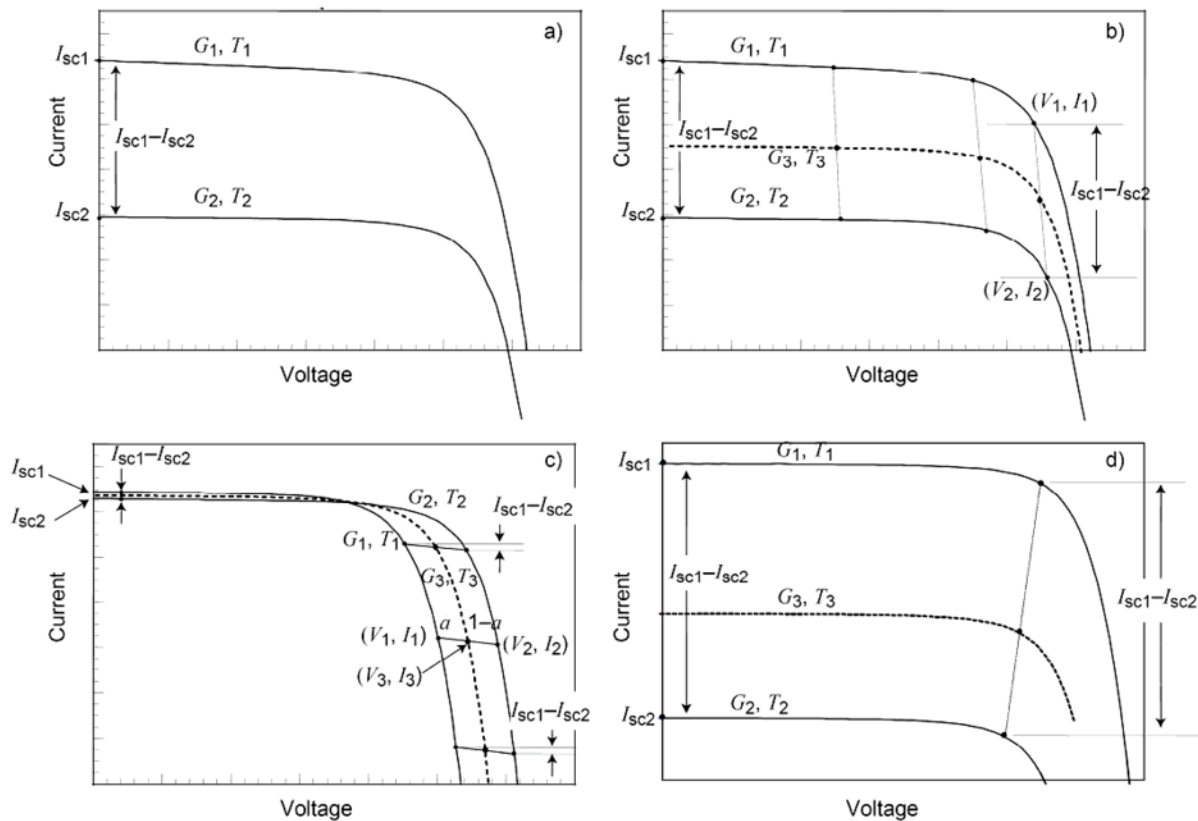
Es sollte beachtet werden, dass bei festen Werten für G_1, G_2, T_1 und T_2 die Werte für G_3 und T_3 nicht unabhängig ausgewählt werden dürfen, weil die in den Gleichungen (8) und (9) angegebenen Beziehungen

gelten (Bild 2). Wenn beispielsweise $G_1 = 1\,000\text{ W/m}^2$, $T_1 = 20\text{ °C}$, $G_2 = 0\text{ W/m}^2$, $T_2 = 60\text{ °C}$ (I-U-Dunkelkennlinie bei 60 °C) sind und ein neuer Kurvenzug bei $G_3 = 750\text{ W/m}^2$ ermittelt werden soll, wird α nach Gleichung (8) mit 0,25 berechnet. Deshalb sollte nach Gleichung (9) $T_3 = 30\text{ °C}$ sein.

Wenn $I_{SC1} \neq I_{SC2}$ ist und eine korrigierte I-U-Kennlinie um die Leerlaufspannung gefordert ist, sollte die gemessene Kennlinie über U_{OC} hinausgehend aufgenommen werden.

Wenn es keine aufgenommenen Datenpunkte gibt, die exakt der Bedingung $I_2 = I_1 + (I_{SC2} - I_{SC1})$ entsprechen, dann dürfen U_2 und I_2 aus der Interpolation der Datenpunkte in der I-U-Kurve 2 berechnet werden.

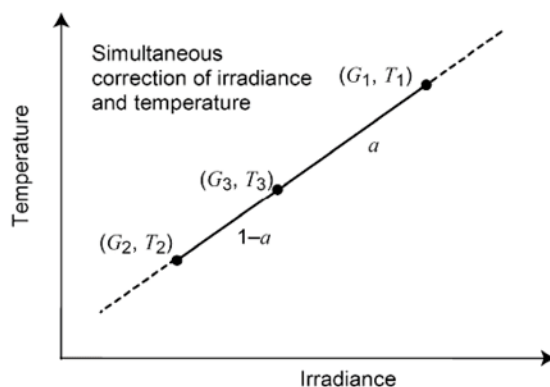
Diese Methode gilt sowohl für die Interpolation ($0 \leq \alpha \leq 1$) als auch die Extrapolation ($\alpha < 0$ oder $\alpha > 1$). Die Interpolation liefert bessere Ergebnisse als die Extrapolation. Eine Extrapolation sollte vorsichtig erfolgen.



Englisch	Deutsch
Voltage	Strom
Current	Spannung

In den Teilbildern (a) und (b) sind Korrekturen der Bestrahlungsstärke ($T_1 = T_2$), in Teilbild (c) ist die Temperaturkorrektur ($G_1 = G_2$) und in Teilbild (d) die gleichzeitige Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur dargestellt.

Bild 1 – Beispiele für die Korrektur der I-U-Kennlinien nach den Gleichungen (6) und (7)



Englisch	Deutsch
Simultaneous correction of irradiance and temperature	Gleichzeitige Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur
Temperature	Temperatur
Irradiance	Bestrahlungsstärke

Der durchgezogene Kurvenzug und der gestrichelte Kurvenzug zeigen die Bereiche von G_3 und T_3 , die mit der Interpolation bzw. Extrapolation berechenbar sind.

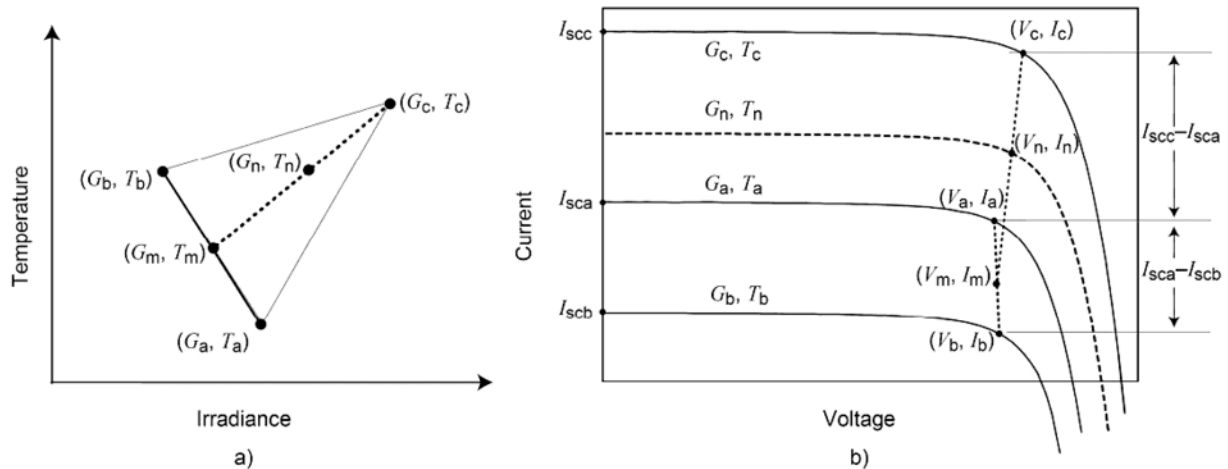
Bild 2 – Schematische Darstellung der Beziehung von G_3 und T_3 , die bei der gleichzeitigen Korrektur von Bestrahlungsstärke und Temperatur und bei feststehenden Werten von T_1 , G_1 , T_2 und G_2 nach den Gleichungen (8) und (9) gewählt werden kann

4.4.3 Korrektur für verschiedene Bestrahlungsstärken und Temperaturen aus drei I-U-Kurven

Die Korrektur der I-U-Kennlinien für verschiedene Bereiche der Bestrahlungsstärke und Temperatur ist durch Kombination der in 4.4.2 beschriebenen Verfahren möglich. Wenn z. B. drei gemessene I-U-Kennlinien bei den Bestrahlungsstärken und Temperaturen von (G_a, T_a) , (G_b, T_b) und (G_c, T_c) zur Verfügung stehen, wie in Bild 3 (a) dargestellt, dann können die I-U-Kennlinien bei beliebigen Bestrahlungsstärken und Temperaturen (G_n, T_n) unter der Annahme eines linearen PV-Elements wie folgt berechnet werden.

- Die Kennlinien bei (G_m, T_m) werden aus denen bei (G_a, T_a) und (G_b, T_b) berechnet.
- Die Kennlinien bei (G_n, T_n) werden aus denen bei (G_m, T_m) und (G_c, T_c) berechnet.

BEISPIEL 1: Wenn (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) und (G_n, T_n) die Werte von $(950 \text{ W/m}^2, 15 \text{ °C})$, $(850 \text{ W/m}^2, 25 \text{ °C})$, $(1\,100 \text{ W/m}^2, 30 \text{ °C})$ bzw. $(1\,000 \text{ W/m}^2, 25 \text{ °C})$ aufweisen, dann ist (G_m, T_m) gleich $(900 \text{ W/m}^2, 20 \text{ °C})$.



Englisch	Deutsch
Voltage	Strom
Temperature	Temperatur
Irradiance	Bestrahlungsstärke

Der unterlegte Bereich in Teilbild (a) zeigt den Bereich, der nur durch Interpolation berechnet werden kann. Teilbild (b) zeigt ein Beispiel für die I-U-Kennlinie, die der Darstellung in (a) entspricht.

Bild 3 – Schematische Darstellung für den Vorgang der Korrektur der I-U-Kennlinie für verschiedene Bereiche von Bestrahlungsstärke und Temperatur auf der Basis von drei gemessenen Kennlinien

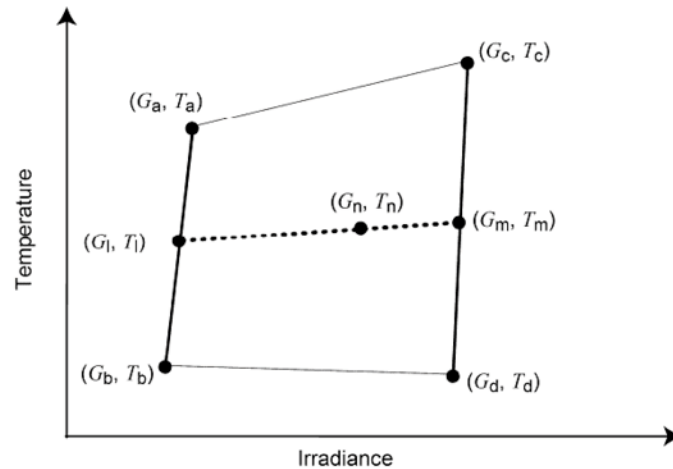
4.4.4 Korrektur für verschiedene Bestrahlungsstärken und Temperaturen aus vier gemessenen I-U-Kennlinien

Wenn vier I-U-Kennlinien zur Verfügung stehen, die bei den Bestrahlungsstärken und Temperaturen von (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) und (G_d, T_d) gemessen wurden, so wie in Bild 4 dargestellt, dann können die I-U-Kennlinien bei beliebigen Bestrahlungsstärken und Temperaturen (G_n, T_n) wie folgt berechnet werden. Dieser Vorgang ist für die Korrektur der Kennlinien in einem weiten Bereich von Bestrahlungsstärke und Temperatur anwendbar. Obwohl das Wertepaar von (G_l, T_l) und (G_m, T_m) für die Berechnung der Kennlinie bei (G_n, T_n) nicht eindeutig ist, liegen üblicherweise gute Korrekturergebnisse vor, wenn die Bedingung $(G_a - G_l)/(G_a - G_b) = (G_c - G_m)/(G_c - G_d)$ erfüllt ist.

- Die Kennlinie bei (G_l, T_l) wird aus denen bei (G_a, T_a) und (G_b, T_b) berechnet.
- Die Kennlinie bei (G_m, T_m) wird aus denen bei (G_c, T_c) und (G_d, T_d) berechnet.
- Die Kennlinie bei (G_n, T_n) wird aus denen bei (G_l, T_l) und (G_m, T_m) berechnet.

BEISPIEL 2: Wenn G_a, T_a , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) , (G_d, T_d) und (G_n, T_n) die Werte von $(500 \text{ W/m}^2, 55 \text{ °C})$, $(400 \text{ W/m}^2, 31 \text{ °C})$, $(1\,000 \text{ W/m}^2, 60 \text{ °C})$, $(950 \text{ W/m}^2, 32 \text{ °C})$ bzw. $(800 \text{ W/m}^2, 45 \text{ °C})$ aufweisen, dann sind (G_l, T_l) und (G_m, T_m) gleich $(450 \text{ W/m}^2, 43 \text{ °C})$ bzw. $(975 \text{ W/m}^2, 46 \text{ °C})$.

Die I-U-Kennlinie in dem Bereich der Bestrahlungsstärke und Temperatur, die durch den unterlegten Bereich in Bild 4 dargestellt ist, kann durch lineare Interpolation berechnet werden. Die Kennlinien im Bereich außerhalb des unterlegten Bereichs dürfen durch lineare Extrapolation berechnet werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass übertriebene Extrapolation zu falschen Korrekturergebnissen und schlechter Korrekturgenauigkeit führen kann.



Englisch	Deutsch
Temperature	Temperatur
Irradiance	Bestrahlungsstärke

Der unterlegte Bereich zeigt den Bereich, der nur durch Interpolation berechnet werden kann.

Bild 4 – Schematische Darstellung für den Vorgang der Korrektur der I-U-Kennlinie für verschiedene Bereiche von Bestrahlungsstärke und Temperatur auf der Basis von vier gemessenen Kennlinien

4.5 Korrekturverfahren 4

Wenn die Parameter der Korrekturleistung unbekannt sind, bietet das Korrekturverfahren 4 eine Vorgehensweise für Korrekturen von I-U-Kurven [3]. Das Verfahren beruht grundsätzlich auf dem Ein-Dioden-Modell und erfordert nur, dass die Energiebandlücke des Werkstoffs und die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen bekannt sind. Es ist für einen großen Temperaturbereich für die kristalline Silizium-technologie bestätigt worden. Am besten ist das Verfahren für Korrekturen der Bestrahlungsstärke geeignet, wenn die gemessene und die Vorgabe-Bestrahlungsstärke innerhalb von 300 W/m² und 1 200 W/m² liegen. Es ist unter Umständen nicht anwendbar für Bauelemente, die nicht dem Ein-Dioden-Modell entsprechen, wie leistungsgeminderte und teilweise abgeschattete Bauelemente.

Der R_S -Wert, der für die Korrektur der Bestrahlungsstärke in Gleichung (11) verwendet wird, kann aus einer einzelnen I-U-Kurve nach der Beschreibung in 6.4 bestimmt werden. Der ε -Wert, der für die Korrektur der Temperatur in Gleichung (13) verwendet wird, ist grundsätzlich unabhängig von der Temperatur und der Bestrahlungsstärke. Für kristalline Silizium-PV-Elemente ist ein typischer Wert von 1 232 V anwendbar.

Die gemessenen Strom-Spannungs-Kurve muss mit den folgenden Gleichungen auf die Vorgabe-Temperatur- und Bestrahlungsstärkewerte korrigiert werden:

$$I'_1 = I_1 + I_{SC1} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) \quad (10)$$

$$V'_1 = V_1 - R_S \cdot (I'_1 - I_1) \quad (11)$$

$$I_2 = I'_1 \cdot [1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)] \quad (12)$$

$$V_2 = V'_1 + (T_2 - T_1) \times \frac{1}{T_1} \cdot (V'_1 - n_S \cdot \varepsilon) \quad (13)$$

Dabei sind

I_1, U_1	die Koordinaten der Punkte auf der gemessenen Kennlinie;
I'_1, U'_1	die Koordinaten der Punkte auf der für die Bestrahlungsstärke korrigierten Kennlinie;
I_2, U_2	die Koordinaten der entsprechenden Punkte auf der für die Bestrahlungsstärke und die Temperatur korrigierten Kennlinie;
G_1	ist die mit dem Referenzelement gemessene Bestrahlungsstärke;
G_2	ist die Vorgabe-Bestrahlungsstärke;
T_1	ist die gemessene Temperatur des Prüflings;
T_2	ist die Vorgabe-Temperatur;
I_{SC1}	ist der gemessene Kurzschlussstrom des Prüflings bei G_1 und T_1 ;
α_{rel}	ist der relative Strom-Temperaturkoeffizient des Prüflings, gemessen bei $1\,000\text{ W/m}^2$; er drückt die relative Änderung des Kurzschlussstroms bezogen auf seinen Wert bei STC aus; der Koeffizient wird in Prozent je Temperatureinheit angegeben und sollte auf ein Hundertstel skaliert werden, wenn er in die Gleichungen eingesetzt wird (z. B. $\alpha_{rel} = 0,045\% K^{-1} = \frac{0,045}{100} K^{-1}$); für handelsübliche kristalline Siliziumelemente darf ein typischer Wert von $0,045\% K^{-1}$ verwendet werden, wenn kein spezifischer Wert verfügbar ist.
R_S	ist der Reiheninnenwiderstand des Prüflings;
n_S	ist die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen;
ε	ist eine vom Bauelement abhängige Konstante, angegeben in der Einheit Volt. Die Konstante gibt das Produkt aus dem Idealitätsfaktor des Prüflings mit der Energiebandlücke des PV-Werkstoffs und geteilt durch die Elementarladung des Elektrons an; für kristalline Siliziumelemente beträgt der Wert gewöhnlich $1\,232\text{ V}$. Für andere als kristalline Siliziumelemente sollte der Wert optimiert werden, um die besten Umrechnungsergebnisse zu erzielen.

ANMERKUNG Ein typischer Bereich für den Temperaturkoeffizienten α_{rel} von c-Si-Modulen ist $0,03\% / ^\circ\text{C}$ bis $0,06\% / ^\circ\text{C}$ bezogen auf I_{SC} bei STC.

5 Bestimmung der Temperaturkoeffizienten

5.1 Allgemeines

Für PV-Elemente werden die Temperaturkoeffizienten (TCs) üblicherweise für die folgenden elektrischen Parameter angewendet: Kurzschlussstrom ($TC = \alpha$), Leerlaufspannung ($TC = \beta$) und maximale Leistung ($TC = \delta$).

Diese Parameter dürfen aus Messungen bei natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht bestimmt werden. Es ist zwischen absoluten Temperaturkoeffizienten (in der entsprechenden Einheit/K) und relativen Temperaturkoeffizienten, angegeben in Prozent je Temperatureinheit ($\%/K$ oder $\%/^\circ\text{C}$), zu unterscheiden.

- Die absoluten Temperaturkoeffizienten (α , β und δ) sind nur für den Wert der Bestrahlungsstärke und das Spektrum gültig, bei denen sie gemessen worden sind. Die so bestimmten absoluten Koeffizienten gelten bei der Bestrahlungsstärke, bei der die Messungen durchgeführt wurden. Bei linearen PV-Elementen bezogen auf die Bestrahlungsstärke (gewöhnlich bei kristallinem Silizium der Fall) dürfen die absoluten Koeffizienten über einen Bestrahlungsstärkebereich von $\pm 30\%$ dieses Wertes angewendet werden.
- Relative Temperaturkoeffizienten (α_{rel} , β_{rel} und δ_{rel}), die in Prozent je Temperatureinheit ($\%/K$ oder $\%/^\circ\text{C}$) angegeben werden, können bestimmt werden durch Division des berechneten Wertes der absoluten Temperaturkoeffizienten α , β und δ durch die Werte von Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und maximaler Leistung, die nach der Methode der kleinsten Quadrate bei $25\text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt werden. Die so bestimmten relativen Koeffizienten gelten für die Bestrahlungsstärke und das Spektrum, bei denen die