

	DIN EN 60904-4 (VDE 0126-4-4)	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 2018-06-13

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60904-4
(VDE 0126-4-4):2010-06

Entwurf

**Photovoltaische Einrichtungen –
 Teil 4: Photovoltaische Referenzeinrichtungen –
 Verfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung
 (IEC 82/1355/CD:2017); Text Deutsch und Englisch**

Photovoltaic devices –
 Part 4: Reference solar devices –
 Procedures for establishing calibration traceability
 (IEC 82/1355/CD:2017); Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-04-13 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 ...

	Inhalt	Seite
1	Anwendungsbereich	4
2	Normative Verweisungen	4
3	Begriffe	4
4	Anforderungen an rückverfolgbare Kalibrierverfahren für PV-Referenzeinrichtungen	7
5	Unsicherheitsanalyse	8
6	Kalibrierbericht.....	8
7	Kennzeichnung.....	9
	Anhang A (informativ) Beispiele validierter Kalibrierverfahren	10
A.1	Allgemeines	10
A.2	Verfahren mit globalem Sonnenlicht	12
A.3	Differential-Spektralempfindlichkeits-Kalibrierung (DSR Kalibrierung)	16
A.4	Sonnensimulator-Verfahren	21
A.5	Verfahren mit direkter Sonnenstrahlung.....	23
	Bilder	
	Bild 1 – Schema der in den Rückverfolgbarkeitsketten für Solarbestrahlungsempfänger am häufigsten verwendeten Referenzmessgeräte und Übertragungsverfahren	7
	Bild A.1 – Blockschema zur Differential-Spektralempfindlichkeits-Kalibrierung, bei der modulierte monochromatische Strahlung $DE(l)$ und DC-Bias-Strahlung E_b eingeblendet wird	19
	Bild A.2 – Optische Anordnung für die Differential-Spektralempfindlichkeits-Kalibrierung	20
	Bild A.3 – Schematischer Aufbau der Apparatur für das Sonnensimulator-Verfahren.....	23
	Tabellen	
	Tabelle 1 – Beispiele für Referenzmessgeräte, die in der Rückverfolgungskette für die solare Bestrahlungsstärke verwendet werden	6
	Tabelle A.1 – Typische Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) für das Verfahren mit globalem Sonnenlicht.....	15
	Tabelle A.2 – Typische Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) des Differential-Spektralempfindlichkeits-Kalibrierverfahrens bei PV-Referenzeinrichtungen	19
	Tabelle A.3 – Beispiele zu Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) für die Kalibrierung nach dem Sonnensimulator-Verfahren	22
	Tabelle A.4 – Typische Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) für die Kalibrierung nach dem Sonnensimulator-Verfahren bei Verwendung eines auf WRR rückverfolgbaren Hohlraum-Strahlungsmessgerätes.....	22
	Tabelle A.5 – Typische Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) für das Verfahren mit direkter Sonnenstrahlung	25

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 82/1355/CD:2017 „Photovoltaic devices – Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability“ (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 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.

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.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60904-4 (VDE 0126-4-4):2010-06** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aufnahme von Arbeitsreferenzen in die Rückverfolgungskette
- b) aktualisierte WRR hinsichtlich SI
- c) Überarbeitung aller Verfahren und ihrer Unsicherheiten im Anhang
- d) in Bezug auf weitere IEC-Normen harmonisierte Symbole und Gleichungen

Photovoltaische Einrichtungen – Teil 4: Photovoltaische Referenzeinrichtungen – Verfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60904 legt die Anforderungen für die vorgesehenen Kalibrierverfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit (der Kalibrierung) von photovoltaischen Referenzeinrichtungen auf SI-Einheiten entsprechend der in IEC 60904-2 gestellten Forderungen fest.

Diese Norm gilt für photovoltaische (PV-)Referenzeinrichtungen, die zum Messen der Bestrahlungsstärke von natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht zum Zweck der quantitativen Bestimmung der Leistungsfähigkeit von PV-Einrichtungen verwendet werden. Die Verwendung einer PV-Referenzeinrichtung wird in der Anwendung von IEC 60904-1 und IEC 60904-3 gefordert.

Diese Norm wurde mit Blick auf PV-Einfach-Referenzeinrichtungen (Single-Junction-Referenzeinrichtungen), insbesondere mit kristallinem Silizium, geschrieben. Der Hauptteil der Norm ist jedoch ausreichend allgemeingültig, um andere Technologien einzuschließen. Die im Anhang A beschriebenen Verfahren sind aber auf Single-Junction-Technologien beschränkt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices*

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

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

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

ISO 9059, *Solar energy – Calibration of field pyrhemimeters by comparison to a reference pyrhemimeter*

ISO 9846, *Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrhemimeter*

ISO 9847, *Solar energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer*

ISO/IEC Guide 98-3: 2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe aus IEC 61836 und die folgenden. In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Referenz-Messgeräte für die Rückverfolgungskette der solaren Bestrahlungsstärke definiert und in Tabelle 1 aufgeführt. Bild 1 ist eine schematische Darstellung der gebräuchlichsten Rückverfolgungsketten auf Grundlage der in Anhang A beschriebenen Verfahren.

3.1

Primärnormal

Einrichtung, die eine der SI-Einheiten oder in direktem Zusammenhang stehende Größen physikalisch umsetzt. Primärnormale werden üblicherweise von nationalen metrologischen Instituten (NMI) oder ähnlichen Organisationen, die mit der „Pflege“ von Normalen für physikalische Größen betraut sind, Instand gehalten. Die physikalische Umsetzung ist so gewählt, dass Langzeitstabilität, Genauigkeit und Wiederholpräzision der

Messung der Größe, die vom oft auch nur „Primär“ genannten Normal wiedergegeben wird, im höchsten Maß, das die aktuelle Technologie ermöglicht, sichergestellt ist

Die „World Radiometric Reference“ (WRR), wie sie von der „World Standard Group“ (WSG) für Hohlraum-Strahlungsmessgeräte geschaffen wurde, ist das anerkannte Primärnormal für die Messung der solaren Bestrahlungsstärke (globalen Sonnenstrahlung).

3.2

Sekundärnormal

Einrichtung, die durch regelmäßigen Vergleich mit einem Primärnormal zum Aufrechterhalten der Konformität zu SI-Einheiten an anderen Orten als dem (Standort) des Primärnormal dient. Das Sekundärnormal muss nicht unbedingt auf den gleichen technischen Prinzipien wie das Primärnormal beruhen, jedoch wird eine ähnliche Langzeitstabilität, Präzision und Wiederholpräzision angestrebt

Typische Sekundärnormale für die solare Bestrahlungsstärke sind Hohlraum-Strahlungsmessgeräte, die regelmäßig (üblicherweise alle 5 Jahre) in den internationalen Pyrheliometer-Vergleich (IPC) mit der WSG einbezogen werden.

3.3

Primärreferenz

Referenzmessgerät, das ein Laboratorium zum Kalibrieren von Sekundärreferenzen verwendet. Es wird in regelmäßigen Zeitabständen mit einem Sekundärnormal verglichen. Primärreferenzen können oft mit viel niedrigeren Kosten realisiert werden als Sekundärnormale

Üblicherweise wird eine PV-Zelle als Referenzeinrichtung für die Messung der natürlichen oder simulierten solaren Bestrahlungsstärke verwendet. Primärreferenzen werden üblicherweise von Mess- und Prüflaboratorien eingesetzt.

3.4

Sekundärreferenz

die für tägliche Routinemessungen oder zum Kalibrieren von Arbeitsreferenzen verwendete Messeinrichtung, die in regelmäßigen Zeitabständen gegen eine Primärreferenz kalibriert wird

Die am häufigsten verwendeten Sekundärreferenzen für die Messung der natürlichen oder simulierten solaren Bestrahlungsstärke sind PV-Zellen und PV-Module. Sekundärreferenzen werden üblicherweise von Mess- und Prüflaboratorien, jedoch manchmal auch in der industriellen Produktion eingesetzt.

3.5

Arbeitsreferenz

die für tägliche Routinemessungen verwendete Messeinrichtung, die in regelmäßigen Zeitabständen gegen eine Sekundärreferenz kalibriert wird

Die am häufigsten verwendeten Arbeitsreferenzen für die Messung der natürlichen oder simulierten solaren Bestrahlungsstärke sind PV-Zellen und PV-Module. Arbeitsreferenzen werden üblicherweise in der industriellen Produktion eingesetzt.

3.6

Rückverfolgbarkeit

Anforderung an jede PV-Referenzeinrichtung, dass deren Kalibrierwert an SI-Einheiten in einer ununterbrochenen und dokumentierten Kette von Kalibrierübertragungen einschließlich angegebener Unsicherheiten gebunden ist

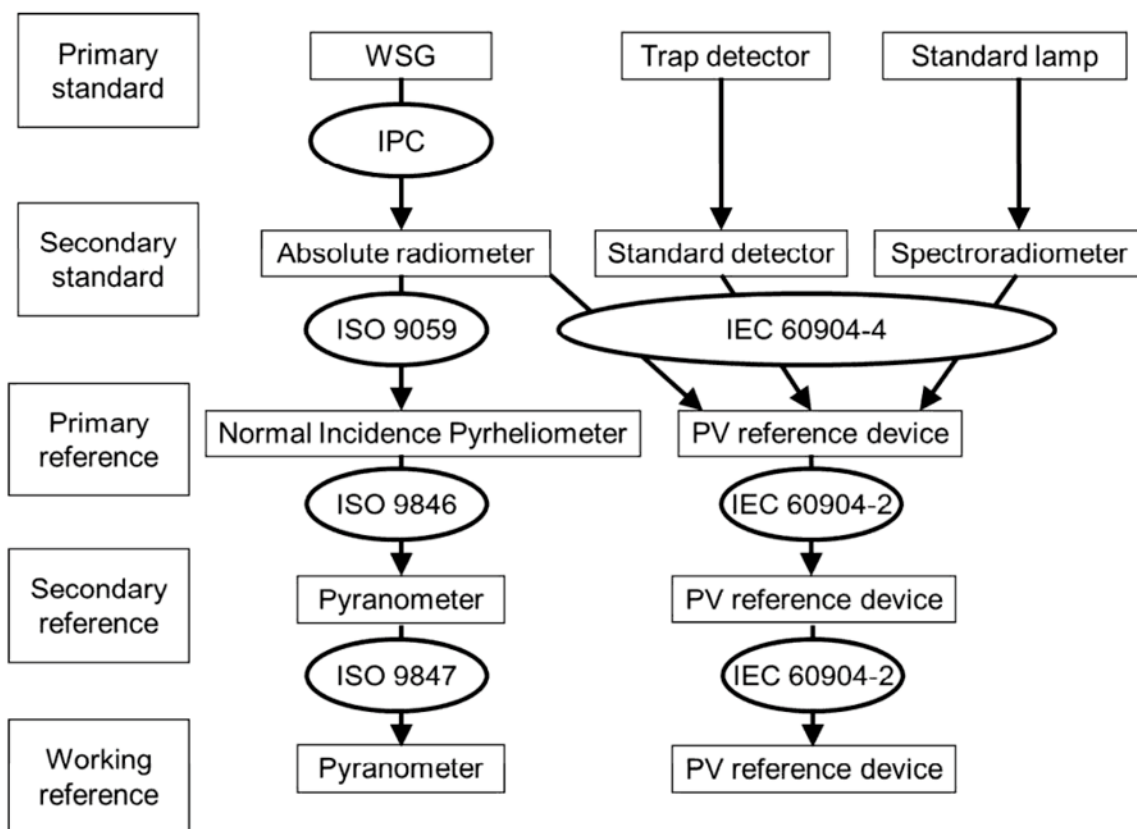
Die WRR wurde mehrere Male mit der SI-Radiometrieskala verglichen. Während in früheren Vergleichen die beiden Skalen innerhalb der Vergleichunsicherheit nicht zu unterscheiden waren, wurde bei letzten Vergleich der Skalen festgestellt, dass es zwischen den Skalen eine systematische Verschiebung gibt, nach der mit WRR eine 0,34 % höhere Bestrahlungsstärke als mit der SI-Skala ermittelt wird. Die Unsicherheit dieser Verschiebung wurde mit 0,18 % ($k = 2$) angegeben. Deshalb liefert die Rückverfolgbarkeit auf WRR eine Rückverfolgbarkeit auf SI-Einheiten. Die Verschiebung zwischen den beiden Skalen darf jedoch für die auf WRR rückführbaren Messungen korrigiert werden. Die Unsicherheit des Skalenvergleichs muss in das Unsicherheitsbudget einbezogen werden. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten für Messungen, die über WRR auf die SI-Einheiten rückführbar sind. Erstens, es wird keine Korrektur der Skalendifferenz angewendet und es muss eine größere Unsicherheit von 0,3 % (Rechteckverteilung) verwendet werden. Zweitens, eine eindeutige Korrektur der Skalendifferenz um 0,34 %. In diesem Fall beträgt der Beitrag der Unsicherheit

0,18 % ($k = 2$). Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm ist der Wert von 0,34 % für die Skalendifferenz der aktuellste Wert. Zu möglichen Aktualisierungen dieser Differenz und ihrer Unsicherheit sollte die wissenschaftliche Literatur herangezogen werden. So ist es in der Zukunft möglich, dass die WRR angepasst wird, um diese Differenz einzurechnen und mit den SI-Einheiten in Übereinstimmung zu bringen. In einem derartigen Fall darf keine weitere Korrektur vorgenommen werden.

A Fehlmann, G Kopp, W Schmutz, R Winkler, W Finsterle, N Fox, *metrologia* 49 (2012) S34

Tabelle 1 – Beispiele für Referenzmessgeräte, die in der Rückverfolgungskette für die solare Bestrahlungsstärke verwendet werden

Referenzmessgerät	Solare Bestrahlungsstärke
Primärnormal	Gruppe von Hohlraum-Strahlungsmessgeräten, die die World Standard Group (WSG) der World Radiometric Reference (WRR) darstellen Kühlfallendetektor (-empfänger) Normallampen
Sekundärnormal	Handelsübliche Hohlraum-Strahlungsmessgeräte, die alle regelmäßig (in der Regel alle 5 Jahre) beim internationalen Pyrheliometer-Vergleich (IPC) verglichen werden Normalempfänger, kalibriert gegen Trapempfänger Spektralradiometer, kalibriert gegen Normallampe
Primärreferenz	Pyrheliometer mit senkrechtem Einfall (NIP, en: normal incidence pyrheliometer) (ISO 9059) PV-Referenzeinrichtung (IEC 60904-2 und IEC 60904-4)
Sekundärreferenz	Pyranometer (ISO 9846) PV-Referenzeinrichtung (IEC 60904-2)
Arbeitsreferenz	Pyranometer (ISO 9847) PV-Referenzeinrichtung (IEC 60904-2)



Text im Bild:

englisch

Primary standard
Secondary standard
Primary reference
Secondary reference
Working reference
Absolute radiometer
Normal Incidence Pyrheliometer
Pyranometer
Trap detector
Standard detector
PV reference device
Standard lamp
Spectroradiometer

deutsch

Primärnormal
Sekundärnormal
Primärreferenz
Sekundärreferenz
Arbeitsreferenz
Absolutradiometer
Pyrheliometer mit senkrechtem Einfall
Pyranometer
Trapempfänger
Normalempfänger
PV-Referenzeinrichtung
Normallampe
Spektralradiometer

ANMERKUNG Die direkte Rückverfolgbarkeit von Absolutradiometern auf die radiometrische SI-Skala kann auch gegeben sein.

Bild 1 – Schema der in den Rückverfolgbarkeitsketten für Solarbestrahlungsempfänger am häufigsten verwendeten Referenzmessgeräte und Übertragungsverfahren

4 Anforderungen an rückverfolgbare Kalibrierverfahren für PV-Referenzeinrichtungen

Ein rückverfolgbares Kalibrierverfahren ist notwendig, um die Kalibrierung von einem Solarbestrahlungs-Normal oder -Referenzgerät (wie z. B. Hohlraumstrahlungsmessgerät, Pyrheliometer oder Pyranometer) auf eine PV-Referenzeinrichtung zu übertragen. Die Anforderungen an derartige Verfahren sind folgende:

- a) Jedes für das Übertragungsverfahren erforderliche und verwendete Messgerät muss ein Messgerät mit ununterbrochener Rückverfolgungskette sein;
- b) eine dokumentierte Unsicherheitsanalyse;
- c) dokumentierte Wiederholpräzision, wie z. B. Messergebnisse von Laborringversuchen (Vergleichsmessungen), oder Dokumente der Laborqualitätskontrolle;
- d) inhärente Absolutpräzision, gegeben durch eine begrenzte Anzahl an Zwischenübertragungen.

Die Übertragung würde üblicherweise von einem Sekundärnormal auf eine PV-Referenzeinrichtung, die eine Primärreferenz darstellt, erfolgen.

Die Übertragung von einer PV-Referenzeinrichtung auf eine andere wird in IEC 60904-2 behandelt.

5 Unsicherheitsanalyse

Für jedes rückverfolgbare Kalibrierverfahren muss eine nach ISO/IEC-Guide 98-3:2008 vorgenommene Abschätzung der Unsicherheit bereitgestellt werden. Diese Abschätzung muss Angaben über die Unsicherheit des Kalibrierverfahrens und quantitative Angaben zu folgenden Unsicherheitsfaktoren für jedes bei der Ausführung des Kalibrierverfahrens verwendete Messgerät enthalten. Dies sind insbesondere:

- a) die aus Zufallseffekten entstehende Unsicherheitskomponente (Typ A);
- b) die aus systematischen Effekten entstehende Unsicherheitskomponente (Typ B).

Dennoch muss für die Implementierung des Kalibrierverfahrens eine vollständige Unsicherheitsanalyse durch ein bestimmtes Laboratorium durchgeführt werden.

6 Kalibrierbericht

Der Kalibrierbericht hat der in ISO/IEC 17025 gestellten Anforderung zu entsprechen und muss normalerweise mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- a) Titel (z. B. „Kalibrierzertifikat“);
- b) Name und Anschrift des Laboratoriums und Ort, an dem die Prüfungen und/oder Kalibrierungen durchgeführt wurden, falls dieser von der Anschrift des Laboratoriums abweicht;
- c) eindeutige Kennzeichnung des Berichts (z. B. eine Seriennummer) und jeder Seite, die Gesamtanzahl an Seiten und das Ausstellungsdatum;
- d) Name und Anschrift des Auftraggebers;
- e) Beschreibung und unverwechselbare Identifizierung des bzw. der geprüften oder kalibrierten Objekte;
- f) Daten des Eingangs des bzw. der Kalibrierungsobjekte und Datum bzw. Daten der Durchführung der Prüfung oder Kalibrierung entsprechend dem jeweiligen Fall;
- g) Kalibrierergebnisse und deren Unsicherheiten einschließlich der Temperatur der Einrichtung, bei der die Kalibrierung durchgeführt wurde;
- h) Verweisung auf die vom Laboratorium angewendeten Probenahmeverfahren, wenn diese für die Gültigkeit oder Anwendung der Ergebnisse von Bedeutung sind;
- i) Name(n), Titel und Unterschrift(en) oder gleichwertige Identifizierung der Person(en), die den Bericht autorisiert bzw. autorisieren;
- j) falls zutreffend, einen Hinweis darauf, dass sich die Ergebnisse nur auf die geprüften oder kalibrierten Objekte beziehen;
- k) falls zutreffend, die spektrale Empfindlichkeit der PV-Referenzeinrichtung;
- l) falls zutreffend, der Temperaturkoeffizient der PV-Referenzeinrichtung.

7 Kennzeichnung

Die kalibrierte PV-Referenzeinrichtung muss mit einer Seriennummer oder Referenznummer und den folgenden beigefügten oder als Begleitzertifikat mitgelieferten Angaben gekennzeichnet werden:

- a) Datum der (eigentlichen oder vorliegenden) Kalibrierung;
- b) Kalibrierwert und dessen Unsicherheit.

Anhang A (informativ)

Beispiele validierter Kalibrierverfahren

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang beschreibt Beispiele zu Kalibrierverfahren für PV-Referenzeinrichtungen als primäre Referenzeinrichtungen zusammen mit deren ausgewiesenen Unsicherheiten. Diese Verfahren dienen der Feststellung der Rückverfolgbarkeit von PV-Referenzeinrichtungen auf SI-Einheiten, wie in IEC 60904-2 gefordert. Nach diesen Verfahren kalibrierte primäre Referenzelemente dienen zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit weiterer PV-Referenzeinrichtungen.

Wie bereits im Anwendungsbereich erwähnt, sind die in diesem Anhang beschriebenen Verfahren auf die PV-Einfachzellen-Technologie (PV-Single-Junction-Technologie) begrenzt. Außerdem sind sie derzeit nur für Techniken mit kristallinem Silizium validiert worden, sie sollten jedoch auch für andere Technologien gelten.

Die Verfahren wurden weltweit in verschiedenen Laboratorien umgesetzt und in internationalen Rundvergleichsmessungen validiert, wobei die „World Photovoltaic Scale“ (WPVS) besonders zu erwähnen ist. Die Beschreibung in dieser Norm wurde jedoch verallgemeinert. Bezüglich der Einzelheiten der einzelnen Implementierungen sind am Ende jedes Verfahrens Verweisungen auf von Fachleuten begutachtete Veröffentlichungen angegeben.

Die Unsicherheitsschätzungen beruhen auf U_{95} (Erweiterungsfaktor $k = 2$) für alle einzelnen Komponenten. Die kombinierte erweiterte Unsicherheit wird als Quadratwurzel der Summe der Quadratzahlen aller Komponenten berechnet. Die angegebenen Unsicherheiten sind vereinfachte (auf Hauptkomponenten begrenzte) Versionen, wie sie vom Laboratorium, das das Verfahren umsetzte, angegeben wurden. Diese Unsicherheitsberechnungen dienen als Anleitungen und müssen auf die jeweilige Implementierung jedes Verfahrens in einem bestimmten Laboratorium abgestimmt werden. Die durch jegliche Implementierung dieser Verfahren erzielten Unsicherheiten können sich beträchtlich unterscheiden. Ausgewiesene Unsicherheiten müssen auf einer expliziten Analyse beruhen und können nicht unter Bezug auf die in dieser Norm enthaltenen Unsicherheitsschätzungen angegeben werden.

A.1.1 Beispiele validierter Verfahren

- A.2 Global sunlight method
- A.3 Differential spectral responsivity calibration
- A.4 Solar simulator method
- A.5 Direct sunlight method

A.1.2 Liste der üblichen Formelzeichen

I_{SC}	Kurzschlussstrom der PV-Referenzeinrichtung
T_j	Temperatur der PV-Referenzeinrichtung
M_G	Bestrahlungsstärke-Korrekturfaktor (siehe unten)
M_T	Temperatur-Korrekturfaktor (siehe unten)
T_{coef}	Temperaturkoeffizient α des Kurzschlussstromes (IEC 60891), normalisiert auf den Kurzschlussstrom bei 25 °C und angegeben in 1/K
SMM	spektraler Fehlanpassungsfaktor (IEC 60904-7)
λ	Wellenlänge
$s(\lambda)$	spektrale Empfindlichkeit der PV-Referenzeinrichtung
$\tilde{s}(\lambda)$	Differential-Spektralempfindlichkeit der PV-Referenzeinrichtung
$E_{meas}(\lambda)$	spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung von natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht
$E_{ref}(\lambda)$	spektrale Normal- oder Referenz-Bestrahlungsstärkeverteilung nach IEC 60904-3

G_{dir}	direkte Bestrahlungsstärke
G_{dif}	diffuse Bestrahlungsstärke in der Ebene
G_{T}	Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene
G_{STC}	Bestrahlungsstärke bei STC (= 1 000 Wm ⁻²)
CV	Kalibrierwert, d. h. I_{SC} bei STC
AM	Luftmasse
STC	Normalprüfbedingungen (1 000 Wm ⁻² , 25 °C und $E_{\text{s}}(\lambda)$)
P	örtlicher Luftdruck
P_0	101 300 Pa
θ	solarer Höhenwinkel

A.1.3 Allgemeingültige Gleichungen

Für die in A.2, A.4 und A.5 beschriebenen Verfahren gelten einige Gleichungen gemeinsam, die in diesem Unterabschnitt behandelt werden. Einzelheiten zu den verschiedenen Implementierungen werden dann in dem jeweiligen Abschnitt beschrieben.

I_{SC} wird üblicherweise nicht bei genau 1 000 Wm⁻² gemessen, sondern bei einer Bestrahlungsstärke nahe diesem Wert. Unter der Annahme, dass sich I_{SC} der PV-Referenzeinrichtung mit der Bestrahlungsstärke linear ändert, wird folgende Korrektur vorgenommen:

$$I_{\text{SC}}(G_{\text{STC}}) = I_{\text{SC}} M_{\text{G}} = I_{\text{SC}} \frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{T}}} \quad (\text{A.1})$$

Wenn die Messung der Bestrahlungsstärke auf die WRR rückführbar ist, dann darf der Messwert der Bestrahlungsstärke um die Skalendifferenz zu den SI-Einheiten korrigiert werden.

Die Normalprüfbedingungen (STC) schreiben eine Elementtemperatur von 25 °C vor, jedoch werden die Messungen nicht immer bei dieser Temperatur vorgenommen. Die Abweichungen in der Temperatur sollten beim Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Es ist auch möglich, I_{SC} bezüglich der Messtemperatur T_{j} durch Multiplizieren mit dem Temperatur-Korrekturfaktor M_{T} entsprechend folgender Gleichung auf 25 °C zu korrigieren:

$$I_{\text{SC}}(25\text{ °C}) = I_{\text{SC}}(T_{\text{j}}) M_{\text{T}} = \frac{I_{\text{SC}}(T_{\text{j}})}{1 - T_{\text{coef}}(25\text{ °C} - T_{\text{j}})} \quad (\text{A.2})$$

Die Korrektur der Differenz in der spektralen Empfindlichkeit zwischen der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung und der zum Messen der Bestrahlungsstärke verwendeten Einrichtung kann als spektrale Fehlanspassung SMM folgendermaßen wiedergegeben werden:

$$SMM = \frac{\int_0^{\infty} E_{\text{ref}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\text{meas}}(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int_0^{\infty} E_{\text{meas}}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\text{ref}}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (\text{A.3})$$

ANMERKUNG Dies ist die gleiche Gleichung wie in IEC 60904-7 für den Fall eines Thermosäulen-Empfängers, bei dem die spektrale Empfindlichkeit der zu prüfenden Einrichtung nun die spektrale Empfindlichkeit der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung ist.

Der Integrationsbereich geht über alle Wellenlängen. Für $E_{\text{ref}}(\lambda)$ ist die Bestrahlungsstärke unterhalb von 280 nm gleich null. Dies gilt üblicherweise auch für $E_{\text{meas}}(\lambda)$, besonders unter natürlichem Sonnenlicht. Aus praktischen Gründen kann das explizite Integral nicht für Wellenlängen über 4 000 nm berechnet werden, weil $E_{\text{ref}}(\lambda)$ nicht explizit definiert ist, sondern nur die integrale Bestrahlungsstärke zwischen 4 000 nm und

unendlich. $E_{\text{meas}}(\lambda)$ wird üblicherweise für einen noch kleineren Wellenlängenbereich gemessen, z. B. bis 2 500 nm. Geeignete Annäherungen (Verkürzung der Integrale) oder Erweiterung der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärkedaten durch Extrapolation oder Modellierung können für die Berechnung der Integrale angewendet werden, sind aber zwingend in die Unsicherheitsberechnungen einzubeziehen. Beispielsweise führt das Abschneiden der Integrale bei 4 000 nm für DSM zu einem Fehler von 0,025 %, während das Abschneiden bei 2 500 nm zu einem Fehler von 0,116 % führt. Diese Werte wurden aus der direkten und globalen spektralen Bestrahlungsstärke bestimmt, wie sie in IEC 60904-3 definiert ist.

Es wird angenommen, dass Hohlraum-Strahlungsmessgeräte, die für Messungen der Bestrahlungsstärke eingesetzt werden, die Bestrahlungsstärke bei allen Wellenlängen perfekt empfangen. Mögliche Abweichungen von einer derartigen perfekten Kennlinie sollten bei der Messunsicherheit korrigiert oder einberechnet werden.

Der Kalibrierwert (CV) der PV-Referenzeinrichtung wird dann folgendermaßen berechnet:

$$CV = I_{\text{SC}} \frac{M_{\text{G}} M_{\text{T}}}{S_{\text{MM}}} \quad (\text{A.4})$$

A.1.4 Verweisungen

- C. R. Osterwald et al. "The results of the PEP'93 intercomparison of reference cell calibrations and newer technology performance measurements: Final Report", NREL/TP-520-23477 (1998) 209 pages.
- C. R. Osterwald et al. "The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program", *Progress in Photovoltaics* 7 (1999) 287–297.
- K. Emery "The results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration", NREL/TP-520-27942 (2000) 14 pages.
- Winter et al.: "The results of the Second World Photovoltaic Scale Recalibration", Proc. of the 31st IEEE PVSC 3-7 January 2005, Orlando, Florida, USA, pp. 1011–1014.

A.2 Verfahren mit globalem Sonnenlicht

Die Feststellung der Rückverfolgbarkeit beruht auf der Kalibrierung nach dem in ISO 9846 beschriebenen kontinuierlichen Sonne-Schatten-Verfahren. Die zu kalibrierende PV-Referenzeinrichtung wird mit Hilfe von natürlichem Sonnenlicht abgeglichen mit zwei Referenz-Strahlungsmessgeräten, d. h. ein die direkte solare Bestrahlungsstärke messendes Pyrheliometer und ein die diffuse solare Bestrahlungsstärke, erhalten unter normalen Einfallbedingungen durch Anwendung einer kontinuierlichen Abschattungseinrichtung, messendes Pyranometer. Die solare Gesamtbestrahlungsstärke wird als Summe der direkten Bestrahlungsstärke und der diffusen Bestrahlungsstärke in der Ebene bestimmt. Als Pyrheliometer wird ein Sekundärnormal in Form eines Hohlraum-Absolutstrahlungsmessgerätes verwendet, das regelmäßig mit der World Standard Group (WSG), die die World Radiometric Reference (WRR) festlegt, verglichen wird. Der Kalibrierfaktor der Photovoltaik-Referenzeinrichtung wird aus dem gemessenen Kurzschlussstrom bestimmt, nach Gleichung (A.4) korrigiert, die auf der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke des globalen Sonnenlichts und der relativen spektralen Empfindlichkeit der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung beruht.

Unter bestimmten Bedingungen ist das „vereinfachte Verfahren mit globalem Sonnenlicht“ anwendbar. Der Kurzschlussstrom der PV-Referenzeinrichtung wird mit den Gleichungen (A.1) und (A.2) korrigiert und dann gegen die druckkorrigierte geometrische Luftmasse aufgetragen. Der Kalibrierwert wird aus einer linearen Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Regressionsgerade) bei der Luftmasse 1,5 bestimmt. Eine Korrektur nach Gleichung (A.3) ist nicht erforderlich, da die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke des natürlichen Sonnenlichts und der spektralen Empfindlichkeit der PV-Referenzeinrichtung nicht notwendig sind. Bei der vereinfachten Form des Verfahrens mit globalem Sonnenlicht wird die explizite Korrektur nach Gleichung (A.3) durch Bedingungen ersetzt, die sicherstellen sollen, dass die spektrale Bestrahlungsstärke des natürlichen Sonnenlichts ausreichend nahe der definierten spektralen Normal-Bestrahlungsstärke (IEC 60904-3) ist, damit die Unsicherheitskomponente kleiner als die in Tabelle A.1 angegebene ist. Obwohl dies durch die in der nachfolgenden Beschreibung des Verfahrens angeführten Bedingungen sichergestellt sein dürfte, sollte es explizit nachgeprüft werden (vorzugsweise mit Hilfe des Verfahrens mit globalem Sonnenlicht). Nach dieser Validierung kann das vereinfachte Verfahren angewendet werden, solange die Grenzbedingungen die gleichen sind wie bei der Validierung.

Die Verifizierung und Validierung wird für beide Verfahren Zahlenwerte liefern. Wenn die Übereinstimmung dieser Zahlenwerte innerhalb des Unsicherheitsbudgets der Verfahren liegt, muss das vereinfachte Verfahren als validiert betrachtet werden. Das vereinfachte Verfahren liefert genaue Ergebnisse für Einrichtungen mit einer spektralen Empfindlichkeit über einen breiten Bereich des Sonnenspektrums, z. B. Solarelemente mit kristallinem Silizium, jedoch können von Einrichtungen mit einem schmalen spektralen Empfindlichkeitsbereich signifikante Fehler eingeführt werden.

A.2.1 Geräte

- a) Eine Montageplattform, die während des gesamten Kalibrierverlaufs mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ senkrecht zur Sonne ausgerichtet werden kann.
- b) Ein Hohlraum-Strahlungsmessgerät, das auf WRR rückverfolgbar ist.
- c) Ein Pyranometer, das auf WRR rückverfolgbar ist.
- d) Eine Abschattungseinrichtung zum Abschatten des in c) geforderten Pyranometers. Der aus dem Schatten resultierende Feldwinkel, der Betrachtungswinkel und der Aperturwinkel müssen die jeweiligen deskriptiven Winkel des in b) geforderten Hohlraum-Strahlungsmessgerätes kompensieren.
- e) Ein temperaturgeregelter Montageblock für die untersuchte PV-Referenzeinrichtung, mit dem die Temperatur der Einrichtung während des Kalibrierverlaufs auf $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ gehalten werden kann.
- f) Rückverfolgbare Instrumente zum Messen des Kurzschlussstromes der PV-Referenzeinrichtung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ oder besser.
- g) Rückverfolgbare Instrumente zum Messen des Signals des Pyranometers mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ oder besser.
- h) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Ein Spektroradiometer zur Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der natürlichen Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene.
- i) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Eine Apparatur zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit der PV-Referenzeinrichtung nach IEC 60904-8.
- j) Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich: Mittel zum Messen der Sonnenhöhe auf $\pm 2^\circ$. Alternativ dazu kann die Höhe der Sonne während der Datenerfassung aus Jahrbüchern entnommen oder berechnet werden, solange die Präzisionsanforderung für den jeweiligen Zeitpunkt der Datenerfassung eingehalten wird. Letzteres erfordert üblicherweise rückverfolgbare Mittel zum Messen der Zeit für die Berechnung der Luftmasse.
- k) Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich: Ein Manometer zum Messen des örtlichen Luftdrucks P mit einer Genauigkeit von $\pm 250\text{ Pa}$ oder besser.

A.2.2 Messungen

Eine Kalibrierung nach dieser Norm muss an klaren, sonnigen Tagen ohne sichtbare Bedeckung der Sonne von 30 Grad durch Wolken durchgeführt werden.

- a) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung nach IEC 60904-8.
- b) Der Ort und/oder die Jahreszeit sind so auszuwählen, dass sichergestellt ist, dass die Sonne im Verlauf des Tages eine Höhe mit einem Winkel erreicht, der AM 1,5 ($41,8^\circ$ bei P_0) entspricht.
- c) Das Hohlraum-Strahlungsmessgerät ist auf der Sonnenausrichtungsplattform (A.2.1 a)) anzubringen. Die erhältlichen Strahlungsmessgeräte haben ihre eigene Elektroneinheit, die an das Messgerät entsprechend den Herstellerempfehlungen angeschlossen werden muss. Der Elektroneinheit ist ausreichend Zeit zum Stabilisieren einzuräumen.
- d) Die zu kalibrierende PV-Referenzeinrichtung ist planparallel auf die Montageplattform zu setzen und am Montageblock anzubringen, und die Temperatur der Einrichtung ist auf $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ zu halten.
- e) Das zum Messen der diffusen solaren Bestrahlungsstärke vorgesehene Pyranometer ist planparallel auf der Montageplattform anzubringen. Es ist sicherzustellen, dass innerhalb des (effektiven) Messfelds des Pyranometers keine reflektierenden Oberflächen die Messergebnisse beeinflussen können. Die Abschattungseinrichtung ist anzubringen, wobei sicherzustellen ist, dass die empfindliche Fläche des Pyranometers in Richtung des Mittelpunkts der Abschattung zeigt.

- f) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Das Spektroradiometer ist planparallel auf der Montageplattform anzubringen.
- g) Es sind Simultanmesswerte entsprechend folgenden Schritten zu nehmen:
 - 1) Die ordnungsgemäße Ausrichtung aller Messgeräte in Bezug auf die Sonne und die der Abschattungseinrichtung ist sicherzustellen.
 - 2) Es ist sicherzustellen, dass die Temperatur der PV-Referenzeinrichtung innerhalb der in d) vorgegebenen Grenzen liegt.
 - 3) Für die direkte normale Bestrahlungsstärke G_{dir} ist der Anzeigewert des Hohlraum-Strahlungsmessgerätes aufzuzeichnen.
 - 4) Für die diffuse Bestrahlungsstärke in der Ebene G_{dif} ist der Anzeigewert des Pyranometers aufzuzeichnen.
 - 5) Der Kurzschlussstrom I_{SC} der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung ist aufzuzeichnen.
 - 6) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\text{meas}}(\lambda)$ des globalen natürlichen Sonnenlichts ist aufzuzeichnen.
 - 7) Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich: Es ist der solare Höhenwinkel θ zu messen oder es sind die Stunde, Minute und Sekunde (Uhrzeit) der Datenerfassung aufzuzeichnen und die Sonnenhöhe zu berechnen.
 - 8) Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich: Der örtliche Luftdruck P ist zu messen.
 - 9) Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich: Die Schritte 1 bis 6 sind mehrmals zu wiederholen.
 - 10) Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich: Die Schritte 1 bis 5, 7 und 8 sind mindestens alle 5 Minuten für mehrere Stunden vor und nach dem Sonnenzenit zu wiederholen, wobei der Luftmassenbereich von unter AM 1,5 bis über AM 3,0 in beiden Zeitspannen überstrichen werden muss.
- h) Das gesamte Messverfahren ist an mindestens zwei weiteren Tagen zu wiederholen.

A.2.3 Datenanalyse

Auf alle erfassten Datenpunkte sind folgende Schritte in angegebener Reihenfolge anzuwenden:

- a) Die Datenpunkte, bei denen G_{dir} , G_{dif} oder I_{SC} im Vergleich zum vorherigen Datenpunkt um mehr als $\pm 3\%$ abweicht, sind zu verwerfen.
- b) Die Gesamtbestrahlungsstärke wird mit $G_{\text{T}} = G_{\text{dir}} + G_{\text{dif}}$ berechnet.
- c) Der gemessene Kurzschlussstrom I_{SC} der zu kalibrierenden PV-Referenzeinrichtung ist nach [Gleichung \(A.1\)](#) auf G_{STC} umzurechnen.
- d) Die Temperatur ist nach [Gleichung \(A.2\)](#) zu korrigieren. Dies ist normalerweise nicht erforderlich, da die Temperatur entsprechend der Beschreibung in [A.2.2 d\)](#) aufrechterhalten wird und die zulässige Temperaturabweichung im Unsicherheitsbudget berücksichtigt wird.
- e) Bezüglich der Differenzen der spektralen Empfindlichkeit wird eine Korrektur nach [Gleichung \(A.3\)](#) vorgenommen, dabei ist $E_{\text{meas}}(\lambda)$ die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke des globalen natürlichen Sonnenlichts.
- f) Der Kalibrierwert ist nach [Gleichung \(A.4\)](#) zu berechnen.
- g) Von allen an einem Tag erhaltenen Kalibrierwerten ist der Mittelwert zu bilden, um CV_1 zu erhalten.
- h) Die Schritte a) bis g) sind für die anderen Tage zu wiederholen, um die entsprechenden CV_2 , CV_3 , ... CV_n zu ermitteln.
- i) Von allen der bei den obigen Schritten ermittelten n CV_i -Werten ist der Mittelwert zu bestimmen, der den endgültigen Kalibrierwert für die PV-Referenzeinrichtung darstellt:

$$CV = (CV_1 + CV_2 + \dots + CV_n)/n. \quad (\text{A.5})$$

j) Beim vereinfachten Verfahren werden die Schritte e) bis g) folgendermaßen ersetzt:

- 1) Die Datenpunkte, bei denen der Quotient G_{diff}/G_T entweder kleiner als 0,1 oder größer als 0,3 ist, sind zu verwerfen. Ebenso sind die Datenpunkte zu verwerfen, bei denen G_T außerhalb des Bereiches $G_{\text{STC}} \pm 20 \%$ liegt. Dies dient der Sicherstellung, dass die für die Analyse verwendeten Daten unter atmosphärischen Bedingungen genommen wurden, die dem Standardreferenzspektrum nahe kommen.
- 2) Mit dem Sonnenhöhenwinkel und dem Luftdruck ist die Luftmasse (AM) zum Zeitpunkt der Messung folgendermaßen zu berechnen:

$$AM = P / (P_0 \times \sin(\theta)) \quad (\text{A.6})$$

- 3) Alle Datenmengen, für die AM größer als 3 ist, sind zu verwerfen.
- 4) Der nach Schritt d) erhaltene Wert von I_{sc} ist gegen die Luftmasse AM_i für jede zusammengehörige Messwertgruppe aufzutragen.
- 5) Durch Anwendung eines linearen Regressionsverfahrens sind der Anstieg m und die Verschiebung b der Ausgleichsgeraden des Datensatzes zu berechnen. Um die Anpassung anzugleichen, sollten vor Durchführung der Regression alle Kurzschlussstrom-Messwerte für AM-Datenmengen von 0,01 gemittelt werden. Sowohl der Morgen als auch der Nachmittag müssen mindestens 33 % zur Gesamtanzahl der für die lineare Regression verwendeten Messwertpaare beitragen. Um eine gute Ausgleichsgerade zu erhalten, müssen 10 Datenpunkte als Minimum betrachtet werden. Je mehr Datenpunkte der linearen Regression dicht an AM 1,5 liegen desto kleiner ist die Unsicherheit des Verfahrens. Es ist zulässig, lediglich Daten von einem halben Tag zu verwenden. In die abschließende Mittelwertbildung müssen jedoch mindestens Daten von drei verschiedenen Tagen mit mindestens zwei Morgen- und zwei Nachmittagsmessungen einbezogen werden.
- 6) Der Kalibrierwert der PV-Referenzeinrichtung ist mit folgender Gleichung zu berechnen:

$$CV_1 = m \times AM + b \quad \text{mit } AM = 1,5 \quad (\text{A.7})$$

- 7) Die Schritte h) und i) sind auszuführen.

A.2.4 Unsicherheitsschätzungen

In Tabelle A.1 sind typische Werte für die Unsicherheitskomponenten für das Verfahren mit globalem Sonnenlicht (linke Spalte) und für dessen vereinfachte Form (rechte Spalte) angegeben, die zu einer kombinierten erweiterten Unsicherheit U_{95} (mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,7 % bzw. 0,8 % führen.

Tabelle A.1 – Typische Unsicherheitskomponenten ($k = 2$) für das Verfahren mit globalem Sonnenlicht

Unsicherheit in der Messung des Kurzschlussstromes	< 0,1 %	
Unsicherheit auf Grund instabiler Temperatur der Einrichtung ($\pm 2 \text{ K}$)	< 0,1 %	
Unsicherheit der direkten Bestrahlungsstärke	< 0,25 %	
Unsicherheit der diffusen Bestrahlungsstärke	< 1,6 %	
Unsicherheit der Gesamtbestrahlungsstärke (80 % direkt und 20 % diffus)	< 0,5 %	
Unsicherheit der Skalendifferenz von WRR zu SI	0,18 %	
Unsicherheiten auf Grund der Korrektur mit Gleichung (A.3) oder Abweichungen in der spektralen Bestrahlungsstärke zwischen den Prüfbedingungen und der spektralen Referenz-Bestrahlungsstärke von AM 1,5G (IEC 60904-3)	0,4 %	0,5 %
Kombinierte erweiterte Unsicherheit	< 0,7 %	< 0,8 %