

Leitfaden für die Anwendung von Sicherungen in Photovoltaikanlagen

Planungs- und Auslegungshilfe für Sicherungsanwender

Stand 20.01.2014



Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES
Bereich: Anlagentechnik und Netzintegration
Königstor 59
D-34119 Kassel

Dipl.-Ing. Peter Funtan
Tel.: 0561-7294-240
Fax.: 0561-7294-200
e-mail: peter.funtan@iwes.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich	3
2	Normative Verweise	3
3	Begriffe und Abkürzungen.....	4
4	Allgemeine Grundsätze.....	5
5	Anwendungsbereich und Rahmenbedingungen zum Einsatz von PV-Sicherungen	6
5.1	Spannungsauslegung der Sicherung	7
6	Berechnung des Sicherungs-Bemessungsstromes.....	9
7	Ermittlung der Abschaltzeiten im Fehlerfall	12
8	Planungs- und Dimensionierungshilfen	14
8.1	Strang- und Gruppensicherung	14
8.2	Einsatz von Blockdioden (Sperrdioden)	16
8.3	Kriterien zur Auswahl von Generatoranschlusskästen	16
8.4	Alterung von Sicherungen	19
8.5	Wartung und Austausch von Sicherungseinsätzen.....	20
8.6	Sicherungsüberwachung	21

1 Anwendungsbereich

Sicherungen dienen als Überstromschutzeinrichtungen, die einen elektrischen Stromkreis unterbrechen sollen, wenn der im Stromkreis fließende Strom eine festgelegte Stromstärke über eine vorgegebene Zeit hinaus überschreitet. In Photovoltaikanlagen dienen Sicherungen dem Schutz von Leitungen, allen Betriebsmitteln aus dem Bereich der Verbindungstechnik (Stecker, Klemmen) und den Solarmodulen selbst. Die Schutzfunktion erfolgt dabei auf Strangebene. Bei größeren PV-Anlagen kann zusätzlich die Absicherung von Teilgeneratoren erforderlich sein. Unzulässig hohe Ströme können zur Schädigung durch unzulässig hohe Erwärmung oder Lichtbogenausbildung führen. Sicherungen leisten deshalb auch einen wichtigen Beitrag zum Brandschutz.

Dieser Leitfaden richtet sich vorrangig an Anwender und soll Hilfestellung leisten, Photovoltaikanlagen in Bezug auf den bestimmungsgemäßen Einsatz von Sicherungen, nach dem aktuellen Stand der Technik zu planen und zu errichten. Hersteller von Solarmodulen, Systemkomponenten und Sicherungen sollen ermutigt werden, für die Planung erforderliche Informationen in Form von Datenblattangaben und Planungshilfen zur Verfügung zu stellen.

2 Normative Verweise

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Anwendungsregel zu beachten. Normen werden turnusmäßig auf ihren aktuellen Stand überprüft. Trotz internationaler Harmonisierung und formaler Angleichung der Normen können sich Unterschiede bei einzelnen nationalen Anforderungen und Vorgaben ergeben. Vom Anwender wird erwartet, dass er sich entsprechend über den aktuellen Stand informiert.

DIN VDE 0100-712; VDE 0100-712 (Ausgabe 2006-06) – Norm, Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art - Solar-Photovoltaik (PV) Stromversorgungssysteme (IEC 60364-7-712:2002, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-7-712:2005 + Corrigendum:2006

DIN IEC 60364-7-712; VDE 0100-712 (Ausgabe 2011-04) Norm-Entwurf, Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art - Photovoltaik-(PV)-Stromversorgungssysteme (IEC 64/1736/CD:2010)

DIN EN 61730-1; VDE 0126-30-1 (Ausgabe 2007-10) – Norm, Photovoltaik(PV)-Module - Sicherheitsqualifikation - Teil 1: Anforderungen an den Aufbau (IEC 61730-1:2004, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61730-1:2007

DIN EN 61730-2; VDE 0126-30-2 (Ausgabe: 2007-10) – Norm, Photovoltaik (PV)-Module - Sicherheitsqualifikation- Teil 2: Anforderungen an die Prüfung (IEC 61730-2:2004, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61730-2:2007

DIN EN 50380 (Ausgabe: 2003-09) – Norm Datenblatt- und Typschildangaben von Photovoltaik-Modulen; Deutsche Fassung

DIN EN 50524; VDE 0126-13 (Ausgabe: 2010-04) Norm, Datenblatt- und Typschildangaben von Photovoltaik-Wechselrichtern; Deutsche Fassung EN 50524:2009

DIN EN 60269-1; VDE 0636-1:2008-03 Norm, 2008-03 Niederspannungssicherungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60269-1:2006); Deutsche Fassung EN 60269-1:2007

DIN EN 60269-6; VDE 0636-6:2011-11 Norm, 2011-11 Niederspannungssicherungen - Teil 6: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungseinsätze für den Schutz von solaren photovoltaischen Energieerzeugungssystemen (IEC 60269-6:2010 + Corrigendum Dez. 2010); Deutsche Fassung EN 60269-6:2011

DIN EN 60127-1; VDE 0820-1:2011-12:2011-12 Norm Geräteschutzsicherungen - Teil 1: Begriffe für Geräteschutzsicherungen und allgemeine Anforderungen an G-Sicherungseinsätze (IEC 60127-1:2006 + A1:2011); Deutsche Fassung EN 60127-1:2006 + A1:2011

DIN VDE 0298-4; VDE 0298-4:2013-06:2013-06 Norm Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen - Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen

DIN EN 61439-2; DIN EN 61439-2; VDE 0660-600-2:2012-06:2012-06 Norm Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 2: Energie-Schaltgerätekombinationen (IEC 61439-2:2011); Deutsche Fassung EN 61439-2:2011

UL 2579; Low-voltage fuses – Fuses for Photovoltaic Systems, Edition Date: 2013-04

DIN VDE 0100-430:2010-10; VDE 0100-430:2010-10 Norm Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-43: Schutzmaßnahmen - Schutz bei Überstrom (IEC 60364-4-43:2008; Deutsche Übernahme HD 60364-4-43:2010

DIN IEC 62548; VDE 0126-42 (Ausgabe 2010-07) Norm-Entwurf - Installation und Sicherheitsanforderungen für photovoltaische Generatoren (IEC 82/592/CD:2009)

DIN VDE 0100-737; (Ausgabe 2002-01) Errichten von Niederspannungsanlagen - Feuchte und nasse Bereiche und Räume und Anlagen im Freien

DIN CLC/TS 61836; VDE V 0126-7 (Ausgabe 2010-04) Vornorm - Photovoltaische Solarenergiesysteme - Begriffe, Definitionen und Symbole (IEC/TS 61836:2007); Deutsche Fassung CLC/TS 61836:2009

3 Begriffe und Abkürzungen

Begriffe aus den Bereichen der Sicherungstechnik und der Photovoltaik sind den Normen gemäß IEC 60269-1 und IEC 61836 zu entnehmen.

STC - (**S**tandard **T**est **C**onditions) Standard-Testbedingungen für PV-Module gelten für eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² in Modulebene, einer Modultemperatur von 25 °C und einem definierten Spektrum des Sonnenlichts bei einer Air Mass (Luftmasse) von 1,5. Die ermittelte Leistung wird mit der Angabe „Peak“ versehen.

PV - Abkürzung für Photovoltaik. Die Abkürzung wird in Kombination mit anderen Begriffen verwendet (z. B. PV-Sicherung).

gPV - Kennzeichnung der Betriebsklasse von Sicherungen. Speziell für Photovoltaikanwendungen „Ganzbereichsschutz superflink“

GAK – Der Generatoranschlusskasten dient zum Anschluss und Parallelschalten von Strängen. Es können weitere Schutz- oder Überwachungskomponenten enthalten sein.

4 Allgemeine Grundsätze

Sicherungen in PV-Systemen müssen immer dann eingesetzt werden, wenn im Solargenerator ein unzulässig hoher Strom auftreten kann, der die vom Modulhersteller angegebene Rückstromtragfähigkeit des einzelnen Moduls dauerhaft übersteigt oder zur Überlastung von Leitungen oder anderer Systemkomponenten führt. Unzulässig hohe Ströme können in PV-Systemen ohne Speicher nur im Fehlerfall auftreten. In der Regel handelt es sich dann um Rückströme. Im einwandfreien Zustand der Anlage können im Betrieb keine unzulässig hohen Ströme auftreten. Ein einwandfreier Zustand liegt vor, wenn alle beteiligten Komponenten entsprechend ihrer Herstellerspezifikation Verwendung finden und entsprechend den anerkannten Regeln der Technik installiert und betrieben werden. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass eine sorgfältige Planung und Auslegung, unter Einhaltung der planerischen Vorgaben für Photovoltaikanlagen, durchgeführt wird. Bei Beachtung dieser Punkte können weder bei Teilabschattung, Temperaturunterschieden, abweichenden Ausrichtungen von Teilgeneratoren oder Schneebedeckung von Teilen des Solargenerators, unzulässig hohe Rückströme fließen. Es handelt sich trotz dieser Umstände um einen regulären Betriebszustand der Anlage.

Unzulässig Fehlerrückströme können nur auftreten, wenn Fehler bei der Planung oder Installation gemacht werden, oder durch äußere Einflüsse Beschädigungen an Komponenten oder Installationsmaterialien vorliegen. Ursache für einen Fehlerrückstrom ist immer eine elektrische Verkürzung eines oder mehrerer Stränge in einem Generatorverbund. Die Ursachen für die Verkürzung von Strängen können unterschiedlich sein:

- Defekte Bypassdioden,
- Ein- oder mehrfacher Erdschluss,
- Verpolung von Modulen,
- Installationsfehler bei Verschaltung.

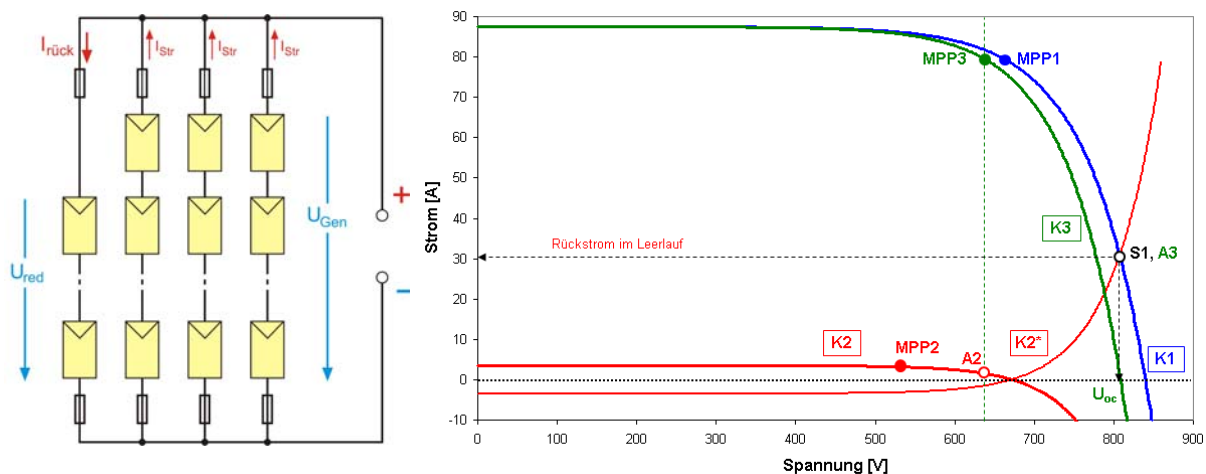


Abbildung 1: Fehlerkonstellation mit Rückstrompotenzial durch einen verkürzten Strang

Erklärung zu Abbildung 1: Die Kennlinien K1 kann einem intakten Solargeneratoren zugeordnet werden. Die Kennlinie K2 stellt einen, elektrisch verkürzten Einzelstrang dar, wie er sich in einem Fehlerfall (z. B. Kurzschluss von Modulen) ergeben würde. Wird dieser Strang parallel zum Solargenerator mit der Kennlinie K1 betrieben, ist er als angeschlossene Last anzusehen. Aus diesem Grund wird die Kennlinie K2 als Lastkurve K2* dargestellt (Spiegelung an Nullachse). Durch die Parallelschaltung ergibt sich eine neue Kennlinie K3. Aus dem Schnittpunkt (S1) der Kennlinien K1 und K2* kann die Leerlaufspannung U_{oc} der resultierenden Kennlinie K3 abgeleitet werden. Für alle Kennlinien sind die MPP-Punkte (MPP1, MPP2, MPP3) eingezeichnet.

Wird diese Konstellation z. B. an einem Wechselrichter im MPP betrieben (Punkte MPP3) würde der defekte Strang im Arbeitspunkt A2 außerhalb seines MPP-Punktes (MPP2) betrieben. Ein Rückstrom würde nicht fließen. Kritischer sieht es aus, wenn sich der Solargenerator im Leerlauf befindet, also der Wechselrichter ausgeschaltet oder vom Solargenerator getrennt ist. In diesem Fall stellt sich ein signifikant höherer Rückstrom ein (Arbeitspunkte A3). Der größere Teilgenerator befindet sich auf Leerlaufspannungsniveau und speist mit einem hohen Rückstrom in den defekten Einzelstrang ein. In diesem Fall könnte der Rückstrom zu Schäden führen, wenn keine Maßnahmen zur Absicherung getroffen werden.

Abgesehen von den momentanen Bestrahlungsverhältnissen kann als „worst case“ für einen solchen unzulässigen Betriebszustand des PV-Generators folgendes angenommen werden:

- Es ist nur ein einzelner Strang von der Strangverkürzung betroffen,
- Der Grad der Strangverkürzung bestimmt die Höhe des möglichen Fehlerrückstroms,
- Je größer das Verhältnis von intaktem Restgenerator (parallele Stränge) zum fehlerbehafteten Generatorteil, desto höher der Fehlerrückstrom,
- Module mit großem Füllfaktor (steile Kennlinien im Bereich zwischen MPP- und Leerlaufspannung) führen schneller zu höheren Fehlerrückströmen,
- Ungünstigster Betriebszustand für Fehlerrückströme ist der Leerlauf des Solargenerators.

Zur Absicherung einzelner Stränge werden üblicherweise Zylindersicherungen eingesetzt. Teilgeneratoren mit höheren Summenströmen werden mittels NH-Sicherungsansätzen mit Messerkontaktstücken entsprechender Baugröße abgesichert. Es ist unzulässig, nicht für PV-Anwendungen vorgesehene Sicherungen zu verwenden. Photovoltaiksicherungen weisen die Betriebsklasse der Sicherung durch den Aufdruck „gPV“ aus. Sie verfügen über eine Ganzbereichscharakteristik, welche die Sicherung befähigt auch kleine Überströme sicher abzuschalten. Die Auslösezeiten werden, wie bei Sicherungen üblich, in Zeit/Strom-Diagrammen vom Hersteller angegeben. Nach dem Abschalten einer Sicherung verbleibt diese permanent im unterbrochenen Zustand. Der fehlerbehaftete Teil des Solargenerators wird vom Restgenerator getrennt. Erst nach Behebung des ursächlichen Fehlers kann durch Austausch der Sicherung der bestimmungsgemäße Betrieb der Anlage wieder aufgenommen werden.

5 Anwendungsbereich und Rahmenbedingungen zum Einsatz von PV-Sicherungen

Typische Einsatzbereiche von Sicherungen sind Generatoranschlusskästen (GAK) und Sammelkästen in PV-Anlagen im größeren Leistungsbereich, in Verbindung mit Zentralwechselrichtern. Im Marktsegment kleinerer Leistungen werden in der Regel Strangwechselrichter eingesetzt, wo einzelne Stränge direkt am Wechselrichter angeschlossen werden. Die Sicherungen können sich dann, im Bedarfsfall, auch im Wechselrichter selbst befinden.

Für die Auswahl und korrekte Dimensionierung von PV-Sicherungen müssen, neben den elektrischen Kennwerten der verwendeten Module, auch die spezifischen Betriebsbedingungen am Einsatzort berücksichtigt werden.

Auslegungsgrundlage bilden die Vorgaben der Modulhersteller zur Rückstromtragfähigkeit des Moduls und normativ beschriebene Anforderungen. Gemäß EN 50380 muss das PV-Modul bei dem festgelegten Begrenzungsrückstrom bei 60 ± 2 °C Umgebungstemperatur (im Dunkeln) für acht Stunden betrieben werden können, ohne dass sich die maximale Leistung unter Kontrollmessungen bei STC um mehr als 5 % gegenüber dem Ausgangswert der Leistung ändert.

Nach DIN EN 61730-1 muss der Modulhersteller weiterhin den höchsten Bemessungswert für den Überstromschutz benennen. Angaben zur maximalen Reihen-/Parallelanordnung von Modulen müssen ebenfalls gemacht werden. Oft ist es so, dass diese Angaben gar nicht oder nicht exakt gemacht werden und somit vom Planer ermittelt werden müssen.

Gemäß dem vorliegenden Entwurf zur DIN VDE 0100-7-712 kann auf einen Schutz im Überlastfall verzichtet werden, wenn die Dauerstrombelastung von Leitungen und Kabel gleich oder größer ist als das 1,25-fache des Kurzschlussstromes bei STC-Bedingungen. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass dies nicht für die PV-Module selbst zutreffend ist. Hier müssen die Herstellerangaben vorrangig Berücksichtigung finden.

Hinweis: Bei der zulässigen Strombelastbarkeit der Leitungen ist die Art der Verlegung nach DIN VDE 0298-4 zu beachten (z. B. Häufung).

Die Rückstrom-Überlastprüfung für PV-Module ist in den Teilen 1 und 2 der EN 61730 beschrieben. Die Prüfung dient dazu, das Risiko einer Entzündung oder eines Brandes zu ermitteln. Die Mehrzahl der Hersteller gibt eine Rückstromtragfähigkeit ihrer Module mit doppeltem Kurzschlussstrom bei STC-Bedingungen an.

Für die Auslegung von Sicherungen werden folgende Daten (hier exemplarisch) des eingesetzten PV-Moduls benötigt:

U_{oc_Mod}	Leerlaufspannung bei STC	37,6 V
I_{sc_Mod}	Kurzschlussstrom bei STC	8,56 A
T_{k_Uoc}	Technologieabhängiger Temperaturkoeffizient Leerlaufspannung	-0,33%/K
T_{k_Isc}	Technologieabhängiger Temperaturkoeffizient Kurzschlussstrom	0,05%/K
I_{Mod_rev}	Rückstrombelastbarkeit (Bemessungsstrom der Sicherung < 20 A)	20 A

Tabelle 1: Benötigte Datenblattangaben seitens des Modulherstellers (Beispiel)

5.1 Spannungsauslegung der Sicherung

Die max. zulässige Eingangsspannung eines Wechselrichters, die zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf (DIN EN 50524 Datenblatt- und Typschildangaben von Photovoltaik-Wechselrichtern), gilt auch für die zum Einsatz kommenden Sicherungen. Die max. DC-Systemspannung einer PV-Anlage richtet sich nach der Anzahl der seriell geschalteten Module im Strang und der niedrigsten zu erwarteten Modultemperatur. Für die Spannungsdimensionierung ist nicht die Bemessungsspannung, sondern die maximal zu erwartende Leerlaufspannung des Solargenerators maßgebend.

PV-Sicherungen werden für Bemessungsspannungen von 600 V bis 1500 V angeboten. Die Auswahl der entsprechenden Sicherung muss vom Planer bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden. Im Datenblatt der Module ist meist nur die Leerlaufspannung bei STC-Bedingungen angegeben (Standard Test Conditions +25 °C, 1000 W/m², AM 1,5). Für die Berechnung der max. Systemspannung sind weitere vom Planer festzulegende Angaben erforderlich. Die minimale Modultemperatur wird durch die am Standort der Anlage zu erwartende geringste Umgebungstemperatur bestimmt. Extremstandorte ausgenommen, kann mit Umgebungstemperaturen von -20 °C bis -25 °C gerechnet werden.

ΔT	Temperaturdifferenz zwischen min. Modultemperatur und +25 °C ¹⁾	50 °C
n	Anzahl der Module im Strang ¹⁾	20

¹⁾ Festlegung durch Planer

Tabelle 2: Planungsdaten seitens des Planers

$$\begin{aligned}
 U_{oc_Gen} &= U_{oc_Mod} (1 + (\Delta T \cdot T_{k_Uoc})) \cdot n_{Mod} \\
 U_{oc_Gen} &= 37,6V (1 + (50^\circ C \cdot 0,0033\% / ^\circ C)) \cdot 20 \\
 U_{oc_Gen} &= 876V
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

U_{oc_Mod}	Leerlaufspannung des Moduls bei STC
U_{oc_Gen}	Leerlaufspannung String bzw. Solargenerator bei minimaler Modultemperatur
T_{k_Uoc}	Technologieabhängiger Temperaturkoeffizient
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen minimaler Modultemperatur (üblich -25 °C) und +25 °C
n_{Mod}	Anzahl der Module im Strang
U_{n_Si}	Bemessungsspannung Sicherung

Die maximale Leerlaufspannung U_{oc_Gen} darf die Bemessungsspannung der Sicherung nicht überschreiten.

$$\begin{aligned}
 U_{n_Si} &> U_{oc_Gen} \\
 900V &> 876V
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Abgesehen von extremen Einsatzbedingungen kann als Faustregel für die Bestimmung der maximalen Generatorspannung auch ein 20%-iger Aufschlag auf die Leerlaufspannung bei STC angenommen werden ($U_{oc_Mod} \times n$) x 1,2. Im vorliegenden Fall wäre die berechnete maximale Leerlaufspannung geringfügig überschritten (902 V).

Hinweis: Die Datenblattangaben bezüglich der Bemessungsspannung für Sicherungen werden von den Herstellern unterschiedlich gehandhabt. Einmal ist die Bemessungsspannung gleich der Prüfspannung und andererseits wird neben der Bemessungsspannung eine zusätzliche Prüfspannung, die in der Regel höher ist, angegeben (z. B. 900 V (1000 V)). In jedem Fall ist die Bemessungsspannung ausschlaggebend. Es ist darauf zu achten, dass sich die Angabe auf Gleichspannung bezieht.

Bei der Verwendung von zwei Sicherungen in einem Strang (Plus-Pol und Minus-Pol) ist eine Spannungaufteilung (halbe Bemessungsspannung je Sicherung) nicht zulässig. Jede Sicherung ist auf volle Bemessungsspannung zu dimensionieren.

6 Berechnung des Sicherungs-Bemessungsstromes

Bei der Bemessung des richtigen Sicherungseinsatzes muss zwingend darauf geachtet werden, dass ein unerwünschtes Abschalten im regulären Betrieb nicht stattfindet. Des Weiteren sollen im Fehlerfall nicht die Sicherungen der speisenden parallelen Stränge, sondern nur die Sicherung im geschädigten Strang sicher abschalten. Rahmenbedingungen die teilweise in Form von Korrekturwerten vorliegen gilt es zu beachten:

- Höhere Umgebungstemperaturen,
- Erhöhte Bestrahlungsstärken über 1000 W/m² und daraus resultierende höhere Betriebsströme,
- Temperaturabhängigkeit der Modulströme,
- Art der überwiegend von der Bestrahlungsstärke geprägten Strombelastung,
- Einbausituation der Sicherungen.

Hinweis: Die Umgebungstemperatur für die Sicherungen, wird durch die Außentemperatur T_a und dem Temperaturunterschied ΔT_e zwischen der kühlenden Luft in direkter Sicherungsnähe und der Außentemperatur bestimmt. Die genauen Definitionen sind der DIN EN 60269-1 Begriffe zu entnehmen. Die Bestimmung von ΔT_e ist u. a. abhängig von weiteren Wärme abgebenden Bauteilen, dem Einbau in Gehäuse (ggf. auch Wechselrichter) und dem Installationsort (z. B. Sonne, Schatten). Durch den Temperaturkorrekturfaktor k_U werden diese Rahmenbedingungen berücksichtigt (Abbildung 2).

Datenblattangaben von PV-Modulen beziehen sich auf eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m². Tatsächlich ist aber auch mit höheren Bestrahlungsstärkewerten unterschiedlicher Zeitdauer zu rechnen. Entsprechend höhere Ströme können sich einstellen (Planungsgrundlage 1200 W/m²).

Der Bemessungsstrom der Sicherung muss aus diesem Grund immer höher sein als der Kurzschlussstrom des Moduls bzw. Stranges. Der in der speziell für PV-Sicherungen entwickelten Norm IEC 60269-6 genannte Wert von 1,4 berücksichtigt die oben benannten Korrekturfaktoren nur teilweise. Er dient lediglich zur Vereinfachung der Dimensionierung, wenn keine besonderen Anforderungen vorliegen.

Der vorläufige minimale Bemessungsstrom der Sicherung kann zunächst mit entsprechender Faustformel bestimmt werden:

$$I_{n_minv} \geq 1,4 \cdot I_{sc_Mod} \quad (3)$$

$$I_{n_min} \geq 1,4 \cdot 8,56A \quad I_{n_min} \geq 11,98A$$

I_{n_minv} vorläufiger minimaler Bemessungsstrom der Sicherung

Auf Basis des zu erwartenden Modul- bzw. Strangstrom, kann aus der Reihe der üblichen in Ampere ausgedrückte Bemessungsströme für Sicherungseinsätze vorläufig ausgewählt werden.

2A	4A	6A	8A	10A	12A	16A	20A	...
----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

$$12A \geq 11,98A \quad (\text{wäre erfüllt})$$

Diese überschlägige Berechnung kann angewandt werden, wenn sicher gestellt ist, dass die Umgebungstemperatur für die Sicherung von +45 °C nicht überschritten wird. Zudem wird eine

zeitlich begrenzte Bestrahlungsstärke von 1200 W/m^2 durch den Überhöhungsfaktor Φ_{ii} von 1,2 berücksichtigt.

Bei abweichenden Temperaturen sind die Reduktionsfaktoren aus den Diagrammen der Hersteller zu verwenden. Der für die Auslegung relevante Wertebereich für k_u liegt üblicherweise zwischen 0,8 und 1 (siehe Abbildung 2).

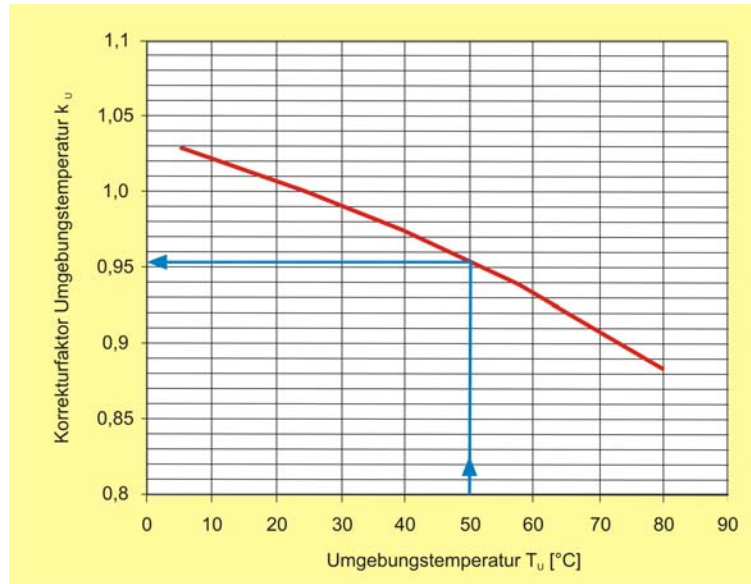


Abbildung 2: Korrekturfaktor k_u in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur im Generatoranschlusskasten

Für eine sorgfältige Auslegung der Sicherungen durch den Planer können weitere Faktoren und Rahmenbedingungen von Relevanz sein.

- Temperaturabhängiger höherer Kurzschlussstrom des Moduls bzw. Strangs,
- Für photovoltaische Anwendungen wird momentan ein Wechsellastfaktor von 0,9 angenommen (eine Anpassung auf einen Wert von 0,8 ist derzeit in Diskussion),
- Bei Verwendung von Sicherungshaltern kann die Häufung durch einen entsprechenden Reduktionsfaktor k_h berücksichtigt werden (siehe Tabelle 3).

Hinweis: Die technologiebedingte Temperaturabhängigkeit von PV-Modulströmen wird mittels Temperaturkoeffizienten beschrieben. Mit steigenden Modultemperaturen erhöht sich auf Grund des positiven Temperaturkoeffizienten auch der Modulstrom.

Die Strombelastung der Sicherung ist direkt von der Bestrahlungsstärke abhängig. Bei klarem und bedecktem Himmel kann von einem zeitlich begrenzten, nahezu konstantem, Strom ausgegangen werden. Bei teilbewölktem Himmel ist jedoch von einer vom Wolkenzug abhängigen, dynamischen Strombelastung auszugehen. Der Wechsellastfaktor k_w berücksichtigt die damit verbundene Alterung der Sicherung.

Wenn erforderlich muss die Häufung der Sicherungshalter mit dem Korrekturfaktor k_h berücksichtigt werden (DIN EN 61439-2). Bis zu 3 Hauptstromkreisen kann mit einem Reduktionsfaktor von 0,9 gerechnet werden. Unter der Annahme, dass die Sicherungen nur bei reduziertem Bemessungsstrom betrieben werden, ist erst bei mehr Hauptstromkreisen mit einer weiteren Reduzierung zu rechnen. Es ist die maximale Leistungsabgabe der Sicherung zu berücksichtigen. Sicherungen mit geringeren Nennströmen haben in der Regel auch geringere Leistungsabgaben (siehe Herstellerangaben).

Die endgültige Bestimmung des geeigneten Sicherungssatzes mit reduziertem Bemessungsstrom bedarf einer Überprüfung auf der Basis der Korrekturfaktoren und Photovoltaik spezifischen Werten nach folgender Berechnung:

$$I_{n_min} = I_{n_min\ v} \cdot k_u \cdot k_w \cdot k_h \quad (4)$$

I_{n_min} minimaler Bemessungsstrom der Sicherung
 k_u Korrekturfaktor Umgebungstemperatur
 k_w Wechsellastfaktor
 k_h Bemessungsbelastungsfaktor (Korrekturfaktor Häufung Sicherungshalter)

$$I_{n_min} = 12\text{ A} \cdot 0,952 \cdot 0,9 \cdot 0,8$$

$$I_{n_min} = 8,2\text{ A}$$

Hinweis: Die Umgebungstemperatur im Anschlusskasten wird mit 50 °C angenommen. Der Anschlusskasten ist für 5 Hauptstromkreise ausgelegt.

Art der Belastung	Angenommener Belastungsfaktor
Energieverteilung – 2 und 3 Stromkreise	0,9
Energieverteilung – 4 und 5 Stromkreise	0,8
Energieverteilung – 6 bis 9 Stromkreise	0,7
Energieverteilung – 10 und mehr Stromkreise	0,6

Tabelle 3: Belastungsfaktoren k_h für Sicherungshalter nach DIN EN 61439-2

Unter Berücksichtigung des Überhöhungsfaktors $\Phi_{\bar{u}}$ für die Bestrahlungsstärke von 1,2 und einer erhöhten Modultemperatur von 75 °C muss von einem maximalen Kurzschlussstrom gemäß Berechnung ausgegangen werden.

$$I_{sc_max} = I_{sc_Mod} \cdot (1 + (\Delta T \cdot T_{k_Isc})) \cdot \phi_{\bar{u}} \quad (5)$$

$$I_{sc_max} = I_{sc} \cdot (1 + (50 \cdot 0,0005)) \cdot 1,2$$

$$I_{sc_max} = 10,5\text{ A}$$

Um der Forderung eines nicht vorzeitigen Anschaltens der Sicherung gerecht zu werden, muss folgende Beziehung erfüllt werden:

$$I_{n_min} > I_{sc_max} \quad (6)$$

$$8,2\text{ A} > 10,5\text{ A} \quad (\text{nicht erfüllt})$$

Ist die Bedingung nicht erfüllt muss in (4) eine erneute Berechnung mit dem nächst höherem Wert für I_{n_min} erfolgen, bis die Bedingung gemäß (6) zutreffend ist.

2A	4A	6A	8A	10A	12A	16A	20A	...
----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Hinweis: Wird ein Zwischenwert verlangt kann dieser gemäß DIN VDE 0820 nach der Normzahlreihe R10 (ISO 3-1973) oder Normzahlreihe R20 (ISO-1973) entnommen werden.

$$\text{nach (4)} \quad I_{n_min} = 16A \cdot 0,952 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 10,97A$$

$$\text{nach (6)} \quad 10,97A > 10,5A \quad (\text{erfüllt})$$

7 Ermittlung der Abschaltzeiten im Fehlerfall

Um Module und Anschlussleitungen zu schützen, muss die PV-Sicherung Fehlerströme rechtzeitig und sicher abschalten. Fehlerströme können nur bei den in Kapitel 4 benannten Fehlerfällen auftreten. Im fehlerfreien bestimmungsgemäßen Betrieb in Vorwärtsrichtung ist bei richtiger Auslegung (vorangegangenen Kapitel) ein vorzeitiges Abschalten der Sicherung ausgeschlossen worden. Im Fehlerfall kehrt sich die Stromrichtung im fehlerhaften Strang des Solargenerators um. Die Höhe des Stromes in Rückwärtsrichtung wird dabei im Wesentlichen durch die Anzahl von parallelen Modulsträngen bestimmt.

$$I_{f_rev} = I_{sc_max} \cdot (n_{Strang} - 1) \quad (7)$$

I_{f_rev} Fehlerrückstrom
 n_{Strang} Anzahl der parallelen Stränge des Solargenerators

$$42A = 10,5A \cdot (5 - 1)$$

Der Parallelschaltung von Modulsträngen sind Grenzen gesetzt, was in der Forderung gemäß DIN EN 61730-1 zum Ausdruck gebracht wird. Im Fehlerfall, könnte bei einer zu großen Anzahl von parallelen Strängen, der Fehlerrückstrom sehr schnell ein zerstörerisches Potenzial für Leitungen, Stecker oder Module erreichen. Die Höhe des Rückstroms steht dabei im direkten Zusammenhang mit der elektrischen Verkürzung des beschädigten Stranges. Die Problematik ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

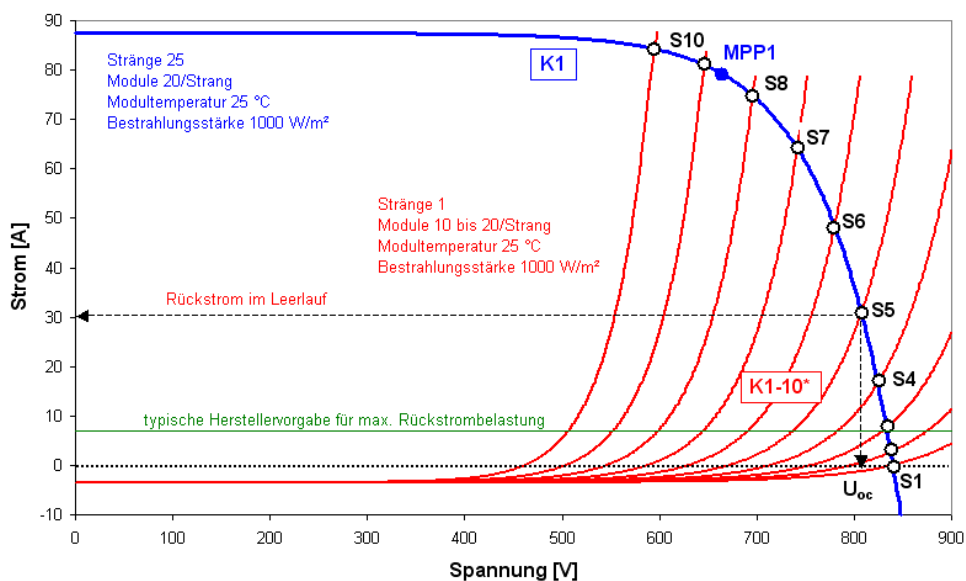


Abbildung 3: Rückstrombelastung von elektrisch verkürzten Strängen

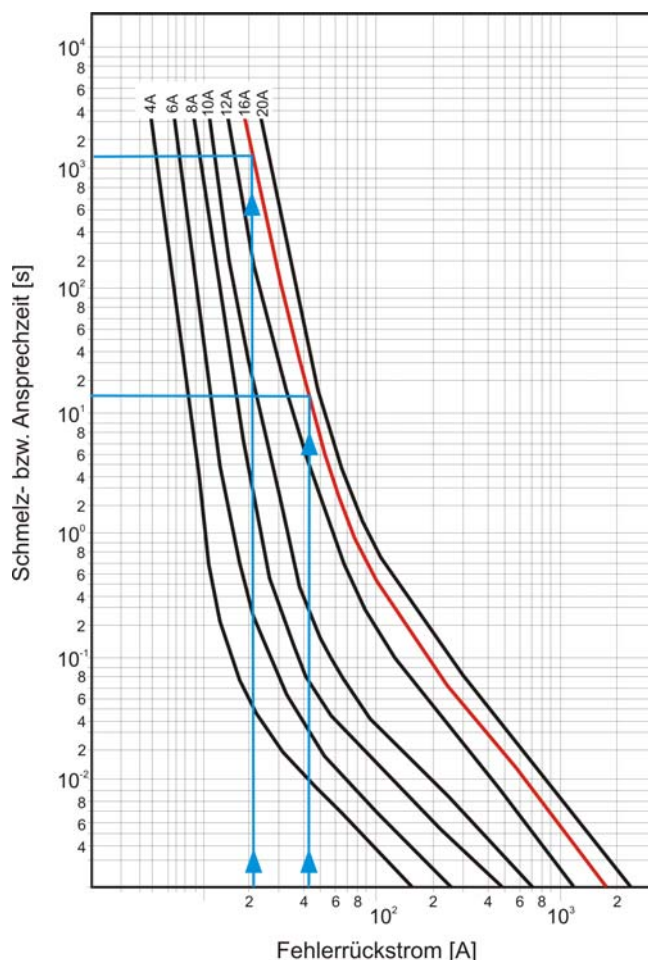
Erklärung zu Abbildung 3: Der Schnittpunkt S1 entspricht einem nicht elektrisch verkürzten Strang im Vergleich zum Restgenerator. Bei höheren Spannungsdifferenzen stellen sich entsprechend höhere Rückströme ein. Es ist jeweils ein um 1 bis 10 Module verkürzter Strang dargestellt (K2-10*). Es kann davon ausgegangen werden, dass ein um ca. 10 % spannungsverkürzter Strang mit kristalliner Modultechnologie, den resultierenden Rückstrom gerade noch dauerhaft führen kann.

In der Regel (Rückstromtragfähigkeit $2 \times I_{sc}$) kann dann davon ausgegangen werden, dass ab drei Modulsträngen Sicherungen einzusetzen sind. Es sei denn, vom Modulhersteller werden andere Angaben zur Rückstromtragfähigkeit des Moduls angegeben.

Bei der Rückstrom-Überlastprüfung nach DIN EN 61730-2 wird das PV-Modul mit dem 1,35-fachen Bemessungswertes, des vom Hersteller angegebenen Modul-Überstromschutzes für zwei Stunden beaufschlagt. Zum Schutz des Moduls benötigt man daher eine Sicherung, die unter den vorgegebenen Bedingungen früher abschaltet, um einen Schaden am Modul oder eine Überlastung der Leitung zu vermeiden.

PV-Sicherungen sind so bemessen, dass sie bei einem Prüfstrom, der dem 1,35-fachen des Bemessungsstromes entspricht, spätestens nach einer bzw. zwei Stunden eine Abschaltung bewirken (Bemessungsstrom $I_n \leq 63 \text{ A}$ eine Stunde, $63 \text{ A} < I_n \leq 160 \text{ A}$ zwei Stunden). Eine Vereinheitlichung auf generell 2 Stunden wird derzeit in den Normungsgremien diskutiert.

Hinweis: Internationale und amerikanische Normung unterscheiden sich bislang bezüglich der Festlegung des Prüfstromes. Für Sicherungen mit Bemessungsströmen $\leq 63 \text{ A}$ betrug der große Prüfstrom nach IEC-Norm das 1,45-fache des Bemessungsstromes. Nach UL-Norm ist ein Referenzwert von 1,35 festgelegt. Ein Abgleich auf den Referenzwert von 1,35 erfolgte mit Corrigendum 1 (Ed 1) 2010-12 zu IEC 60269-6 Ed 1 2010-09.



Die Dauer bis zur Abschaltung der Sicherung wird als Schmelz- oder Ansprechzeit bezeichnet. Sie ist definiert als Dauer des Zeitintervalls zwischen dem Beginn eines Stroms, dessen Stromstärke genügt, eine Abschaltung der Sicherung zu bewirken, bis zu dem Zeitpunkt wo der Lichtbogen eintritt. Die Höhe des fehlerbedingten Rückstroms hat Einfluss auf die Ansprechzeit des Schmelzleiters. Die Ermittlung der Schmelzzeit erfolgt aus einem Zeit/Strom-Diagramm, das vom Sicherungshersteller bereitgestellt wird (Abbildung 4).

Abbildung 4: Zeit/Strom-Kennlinien-Diagramm einer PV-Sicherung

In Bezug auf den bislang durchgeführten Rechengang zur Auslegung der Strangsicherungen (16 A) ist im ungünstigsten Fall von einem Fehlerrückstrom von 42 A auszugehen. Daraus resultiert eine Ansprechzeit der Sicherung von ca. 16 Sekunden. Wird der Rückstrom aus der Überlastprüfung nach DIN EN 61730-2 angenommen ($1,35 \times 16 \text{ A}$) würde die Sicherung nach ca. 1400 Sekunden (knapp 24 Minuten) abschalten.

8 Planungs- und Dimensionierungshilfen

Photovoltaikanlagen sollten unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten so geplant und ausgelegt werden, dass sie einen maximalen Ertrag erbringen. Das bedeutet unter anderem, dass Ausfallzeiten nach Möglichkeit nicht auftreten. Sicherungen sollten deshalb so ausgewählt und dimensioniert werden, dass eine Abschaltung auch nur im Fehlerfall erfolgt. Unbeabsichtigtes Abschalten ist durch eine sorgfältige Planung zu vermeiden. Eine Abschaltung von Sicherungen kann ohne Sicherungsüberwachung nur sehr schwer festgestellt werden. Während dies bei kleinen Anlagen, mit einer übersichtlichen Anzahl von Strängen, noch relativ schnell bemerkt werden kann, ist dies mit zunehmender Systemgröße oftmals schwieriger. Um ein unbeabsichtigtes Auslösen von Sicherungen zu vermeiden, müssen Rahmenbedingungen für den Betrieb unbedingt berücksichtigt werden. Ergänzend zu der zuvor durchgeführten Dimensionierung können jedoch, insbesondere bei der Planung und Ausführung, Fehler gemacht werden die es gilt bereits im Vorfeld zu vermeiden.

8.1 Strang- und Gruppensicherung

Üblicherweise werden Strangsicherungen an der Stelle des Generatorverbundes eingesetzt, wo die Parallelschaltung der Stränge erfolgt. Ob eine einfache (nur Plus des PV-Generators) oder doppelte (Plus und Minus des PV-Generators) Absicherung eines Stranges erforderlich ist, wird oft kontrovers diskutiert.

Von den Herstellern von Generatoranschlusskästen werden Varianten angeboten, die beide Optionen beinhalten. Die Notwendigkeit einer ein- oder allpoligen Absicherung wird davon abhängig gemacht, ob der PV-Generator geerdet oder ungeerdet ist.

In Europa üblich werden viele, insbesondere Anlagen kleiner und mittlerer Leistungen, mit einem ungeerdeten Solargenerator betrieben. Das bedeutet, dass die Potenzialverhältnisse nicht exakt definiert sind (floatendes Potenzial). Auf Grund eines fehlenden Bezugspotenzials führt ein Isolationsfehler nicht sofort zu einer Gefährdungssituation. Die tritt erst ein, wenn gleichzeitig ein zweiter Fehler in Generatorverbund vorhanden ist. Um einer Personengefährdung zu begegnen werden solche Systeme mit einer Isolationsüberwachung betrieben, die meist im Wechselrichter implementiert ist.

Bei geerdeten PV-Generatoren sind hingegen die Potenzialverhältnisse klar festgelegt. Es kann zwischen eine einpoligen Erdung oder Mittelpunktserdung unterschieden werden. Bei der Mittelpunktserdung wird bei symmetrischer Generatorkonfiguration, bei halber Systemspannung, über einen Mittelpunktsteiter eine niederohmige Verbindung zur Erde hergestellt. Die verwendeten Systemkomponenten (Sicherungen) müssen in diesem speziellen Fall auch nur auf die halbe maximale PV-System-Leerlaufspannung ausgelegt werden.

Wird ein einzelner Pol (Plus oder Minus) des Solargenerators geerdet, wird auch hier eine klare Potenzialfestlegung getroffen. Nachteilig aus Sicht des Personenschutzes ist hier, dass bereits bei einem Isolationsfehler eine hohe Berührungsspannung anstehen kann. Unter Berücksichtigung des Wechselrichterkonzeptes (keine Potenzialtrennung) müssen alle Systeme mit geerdeten PV-Generatoren mit einem allstromsensitiven Fehlerstrom-Schutzschalter ausgestattet sein. Bereits bei einem Isolationsfehler erfolgt die Trennung vom Netz.

Hinweis: Eine Abschaltung des Wechselstromnetzes hat zur Folge, dass der PV-Generator in den Leerlauf übergeht. Wie zuvor beschrieben ist dies jedoch ein Kriterium den „worst case“ in Bezug auf einen Rückstrom herbeizuführen.

Wegen der Komplexität der denkbaren Fehlermöglichkeiten, die beim Betrieb einer PV-Anlage auftreten können, sollten sowohl der Plus- als auch der Minuspol eines jeden Stranges mit einer sorgfältig dimensionierten Sicherung versehen werden.

Bei größeren PV-Systemen wird der Solargenerator in Untergruppen aufgeteilt. Einzelne Gruppen, bestehend aus mehreren parallelen Strängen, müssen dann separat allpolig mit Sicherungen ausgestattet werden. Auch hier ist nur der Einsatz von gPV-Ganzbereichssicherungen zugelassen. Üblicherweise handelt es sich hier um Sicherungen in NH-Bauform. Für die Baugröße 1 stehen Standard-Sicherungsunterteile zur Verfügung. Herstellerspezifisch werden für andere Baugrößen spezielle Sicherungsunterteile angeboten.

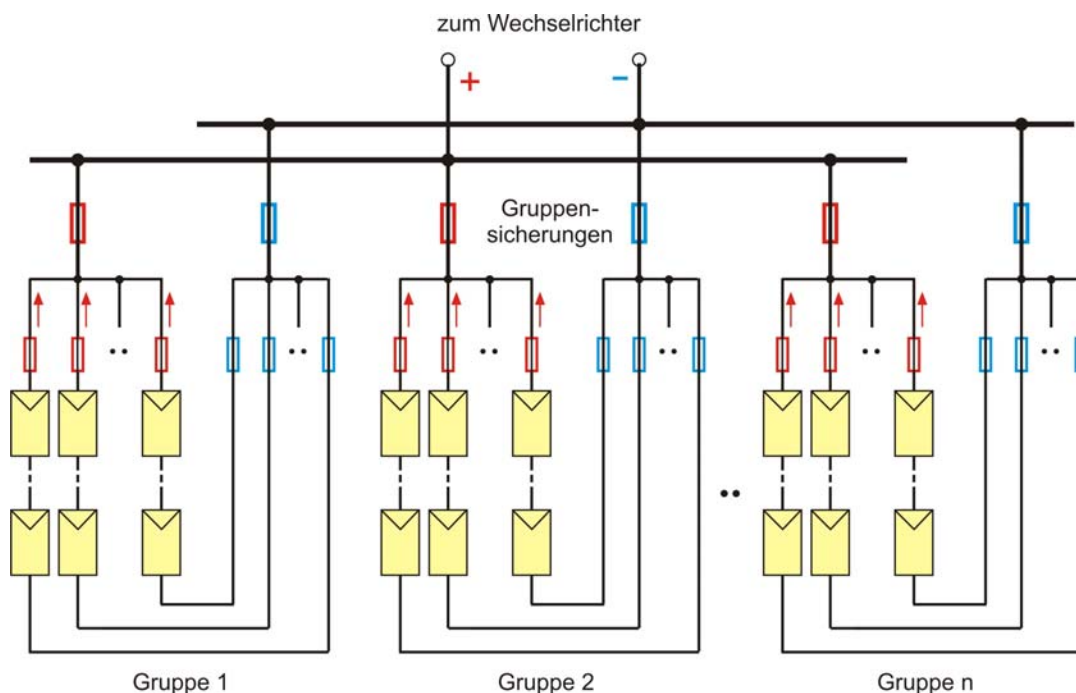


Abbildung 5: Prinzip der abgestuften Absicherung in PV-Systemen

Die Auslegung der Gruppensicherung erfolgt in gleicher Weise wie die von Strang-sicherungen. Es sind die gleichen Kriterien in Bezug auf die Einsatzbedingungen zu berücksichtigen. Auf den Belastungsfaktoren k_h für Sicherungshalter kann in der Regel verzichtet werden, da die Sicherungsunterteile für NH-Sicherungen in offener Bauweise eingesetzt werden. Der maximale Strom ergibt sich aus der Summe der maximalen Strangströme einer Gruppe. Beim Abschalten der Sicherung wird die gesamte Gruppe vom verbleibenden Restgenerator getrennt. Sollte die Kombinierbarkeit einzelner Gruppen an systembedingte Grenzen stoßen, wäre eine weitere Unterteilung erforderlich. Auch bei dieser Konstellation müssten dann mehrere Gruppen mittels einer übergeordneten Sicherung geschützt werden. Als begrenzende Größe sind hierbei die

Wechselrichter zu sehen. Üblicherweise werden diese in Leistungsklassen produziert, die einer Absicherung in zwei Ebenen entsprechen. Die Positionierung der Gruppensicherungen kann projektabhängig in Anschlusskästen im Feld oder in den Wechselrichtern selbst erfolgen. Entsprechende Einsatzbedingungen sind hier zu beachten.

Die Auslegung der Gruppensicherung muss ebenso mit großer Sorgfalt erfolgen. Nicht zuletzt deshalb, weil die Auslegung der Leitungen auf Grund des größeren Querschnittes und den damit verbunden Kupferkosten, eher knapper erfolgen wird. Dies sollte nicht dazu führen, dass Sicherungen unbeabsichtigt früher abschalten. Strangleitungen sind aufgrund des zu führenden Modulstromes in der Regel überdimensioniert. Oft werden die Leitungen direkt im Erdreich verlegt. Hier müssen Reduktionsfaktoren nach DIN VDE 0298-4 berücksichtigt werden. Die Auslegungsbestimmung gemäß DIN VDE 0100-430 „Schutz von Kabeln und Leitungen bei Überstrom“ sind in jedem Fall einzuhalten.

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (8)$$

I_b max. Strang- bzw. Summenstrom einer Gruppe (I_{n_min} oder $I_{n_min} \times n_{Strang}$)
 I_n Bemessungsstrom der Überstromschutzeinrichtung (PV-Sicherung)
 I_z Strombelastbarkeit der Kabels bzw. Leitung

8.2 Einsatz von Blockdioden (Sperrdioden)

Prinzipiell können Blockdioden zur Unterbindung von Rückströmen eingesetzt werden. Sie sind jedoch nicht als Ersatz für Sicherungen anzusehen, da sie eine signifikante Fehlerquelle darstellen (Hinweis siehe DIN IEC 60364-7-712). Wenn sie dennoch eingesetzt werden sind sie in Reihe mit den zusätzlich erforderlichen Strangsicherungen geschaltet. Sie führen ebenso wie Sicherungen den gesamten Strangstrom, verursachen jedoch, im Vergleich zur Sicherung, je nach Diodentyp die 4-6-fache Verlustleistung. Innerhalb eines Generatoranschlusskastens sind Dioden deshalb als potenzielle Wärmequelle anzusehen. Im Fehlerfall werden sie in Bezug auf den Rückstrom in Sperrrichtung betrieben und verhindern so, dass dieser in den defekten Strang hineinfließen kann. Neben der permanenten Strombelastung sind Blockdioden empfindlich in Bezug auf Überspannung. Beim Versagen der Diode geht diese, so die Erfahrungswerte, meist in den permanent leitenden Zustand über. Die gewünschte Blockfunktion gegenüber Rückströmen ist damit nicht mehr gegeben. Von einer defekten Diode geht eine potenzielle Brandgefahr aus.

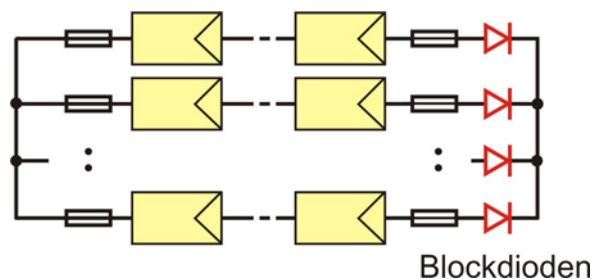


Abbildung 6: Blockdioden als Rückstromschutz

8.3 Kriterien zur Auswahl von Generatoranschlusskästen

Generatoranschlusskästen werden, überwiegend anschlussfertig bereitgestellt, im mittleren bis großen Leistungsbereich von PV-Anlagen angeboten. Sie dienen in erster Linie dazu einzelne Stränge parallel zu einem Teilgenerator zusammen zu schalten. Des Weiteren dienen sie zur

Aufnahme von Schutz-, Schalt-, Steuer- und ggf. Monitoringkomponenten. Die Kästen sind in Abhängigkeit der verwendeten Komponenten und der möglichen Anschlusskapazität zum Teil sehr verschieden ausgeführt. Nachstehend einige Hinweise, die in Bezug auf den Einsatz von Sicherungen, beachtet werden sollten:

- Der Generatoranschlusskasten muss für den Einsatzbereich tauglich sein (Materialeigenschaften, Schutzart, UV-Beständigkeit). Kondensatbildung oder das Eindringen von Wasser in den GAK muss vermieden werden, da die Kontaktstücke von Sicherungen oft frei liegen und sich Feuchtigkeit niederschlagen könnte.
- Wenn zwecks Inspektion transparente Deckel benötigt werden, sollten zumindest getönte Deckel zur Anwendung kommen, da dadurch der Wärmeeintrag in den Kasten gemindert und die Temperaturbelastung auch für die Sicherung reduziert wird. Falls nicht erforderlich, sollten nicht transparente Deckel verwendet werden.
- Generatoranschlusskästen sollten niemals der direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt werden. Es muss für Regionen im mitteleuropäischen Bereich von Temperaturunterschieden von mindestens 10 °C ausgegangen werden (Sonnen/Schatten).

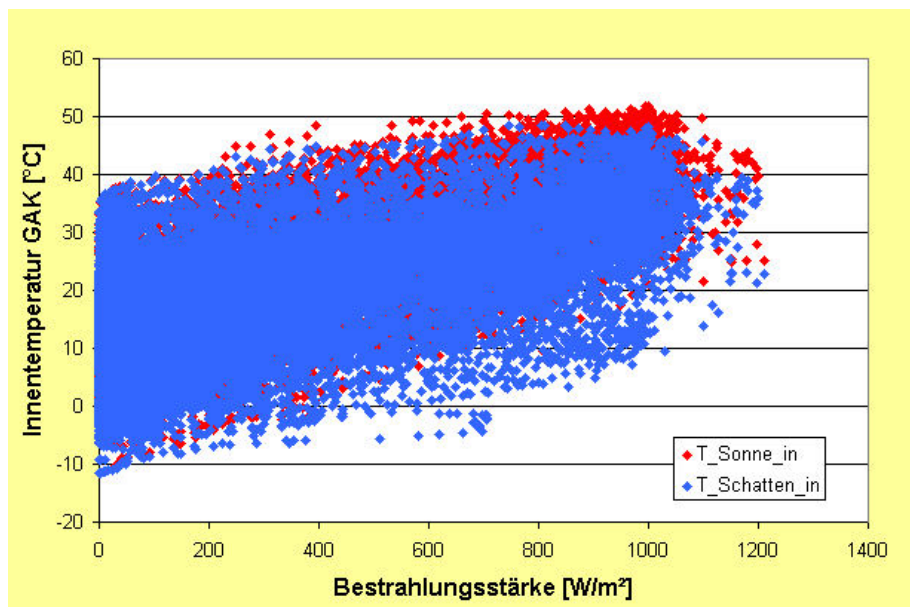


Abbildung 7: GAK-Innentemperatur bei Installation in der Sonne und im Schatten (getönter Deckel)

- Es ist darauf zu achten, dass sowohl Plus- als auch Minuspol der Stränge abgesichert werden,
- PV-Strangsicherungen werden in verschiedenen Ausführungen angeboten. Es besteht die Möglichkeit Sicherungen in offener Bauform auf Platinen oder in Sicherungshaltern einzusetzen,

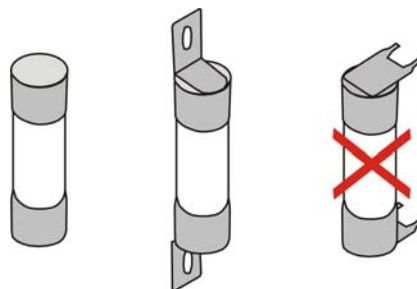


Abbildung 8: Übliche Bauformen von Sicherungseinsätzen

- Sicherungseinsätze die nicht in geschlossenen Sicherungshaltern, sondern auf Platinen geschraubt oder gelötet sind, können üblicherweise auf einem niedrigeren Temperaturniveau betrieben werden,
- Für photovoltaische Anwendungen wird vom gelöteten Einbau jedoch auf Grund der schwierigen Austauschbarkeit abgeraten,
- Übliche angebotene Maße der Sicherungseinsätze sind 10 x 38 mm bzw. 10 x 85 mm. Einziges Unterscheidungsmerkmal ist die höhere Bemessungsspannung bis zu 1500 V der 10 x 85 mm Sicherung.
- Bei Verwendung von Sicherungshaltern ist der Korrekturfaktor bei Häufung gemäß Tabelle 3 zu beachten. Bei einer größeren Anzahl von Sicherungshaltern ist es empfehlenswert Einbauabstände einzuhalten, um eine gute Wärmeableitung sicher zu stellen,

Das folgende Diagramm zeigt die Temperaturverhältnisse beim Einsatz im mitteleuropäischen Bereich.

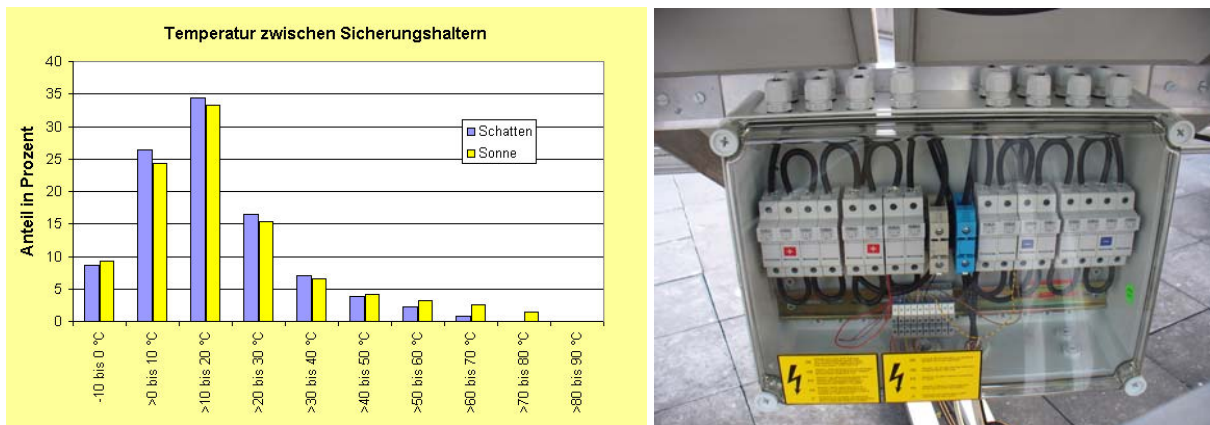


Abbildung 9: Häufigkeit von Temperaturbereichen, gemessen zwischen Sicherungshaltern

- Für eine kurz- und erdschlussichere Ausführung aller Systemkomponenten einer PV-Anlage sollten die Sicherungshalter für Plus und Minus örtlich voneinander getrennt angeordnet werden (ggf. Trennplatten verwenden),
- Mit Sicherungshaltern ist der Sicherungswechsel gefahrlos und ohne zusätzliches Werkzeug möglich. Dadurch ist auch im Reparatur- oder Wartungsfall eine galvanische Trennung von Restgenerator möglich (Hinweisschild, „Nicht unter Last schalten“),
- Ein übersichtlicher Aufbau des GAK stellt sicher, dass ein Wärmestau zwischen den Komponenten vermieden wird (kompakte Bauweisen sind zu vermeiden),
- Ein größeres Volumen und die damit größere Gehäuseoberflächen des GAK stellen sicher, dass eine bessere Wärmeverteilung im Gehäuse ermöglicht wird. Sicherungen sollten deshalb bevorzugt im unteren Drittel des GAK angeordnet werden,
- Die ohnehin geforderten hohen IP-Schutzarten behindern eine bessere Wärmeabfuhr.
- Zusätzlich Wärmequellen (z. B. Blockdioden) im GAK müssen bei der Planung berücksichtigt werden,
- Strangseitige PV-Steckverbinder am GAK ermöglichen nach Trennung einen spannungsfreien Sicherungstausch (Hinweis: Die Steckverbinder dürfen nicht unter Last getrennt werden!).
- Eine wechselrichterseitige DC-Trennvorrichtung im GAK stellt sicher, dass keine Rückspannung von Speichern oder Eingangskondensatoren der Wechselrichter anliegt.

8.4 Alterung von Sicherungen

Alle Materialien und Bauteile unterliegen, abhängig von der Intensität und Dauer ihrer Belastung, einer natürlichen Veränderung ihrer Eigenschaften. Dies ist auch bei Sicherungen im PV-Bereich zutreffend. Der Einsatz in photovoltaischen Anlagen hat starke Temperaturschwankungen des Sicherungseinsatzes, durch den einstrahlungsbedingten Stromfluss zur Folge. Weiterhin sind Sicherungen saisonalen, tagesgangabhängigen und unmittelbaren Einstrahlungsänderungen ausgesetzt. Bei photovoltaischen Anwendungen mit Betriebszeiträumen von 20 Jahren und mehr ist dies für alle verwendeten Materialien und Komponenten von besonderer Bedeutung. In Bezug auf eine Sicherung, soll diese im Fehlerfall nach 20 Jahren den gleichen Schutz gewährleisten wie am ersten Tag. Dies kann durch ein geeignetes Sicherungsdesign und die Gestaltung der Betriebsbedingungen für den Sicherungseinsatz erreicht werden.

Ähnlich wie bei Batteriesicherungen werden bei PV-Sicherungen Silberschmelzleiter verwendet, die sich durch eine hohe Alterungsbeständigkeit auszeichnen. Dadurch wird eine zeitlich unabhängige, immer konstante Charakteristik des Sicherungseinsatzes erreicht.



Abbildung 10: PV-Sicherung mit freigelegtem perforierten Schmelzleiter (links). Einseitiger, unvorteilhafter Anschluss der Gleichstromhauptleitung an der Sammelschiene (rechts)

Trotz eines optimalen Sicherungsdesigns hat die direkte Umgebungstemperatur der Sicherungen dennoch Auswirkung auf die Alterung des Sicherungseinsatzes. Niedrige Umgebungstemperaturen tragen für gewöhnlich dazu bei, die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Materialien und Komponenten zu erhöhen.

Die direkte Umgebungstemperatur wird durch die Verlustwärme der Sicherung selbst, aber auch durch die Wärmeentwicklung durch andere Komponenten im GAK, bestimmt.

Ein Vergleich der maximalen Temperaturen aus den Diagrammen in Abbildungen 7 und 9 zeigt, dass der Temperaturunterschied zwischen Sicherungshalter und der Temperatur im Anschlusskasten selbst, sehr groß sein kann. Sicherungshalter befinden sich in direkter Wechselwirkung mit der umgebenden Luft im GAK. Abgesehen vom Installationsort und der Beschaffenheit des GAK-Gehäuses sollte wenn möglich auf interne Wärmequellen verzichtet werden.

Die Bestimmung des GAK ist es, viele Strangströme im Bereich von üblicherweise 8 bis 9 A zu einem Gesamtstrom aufzusummieren. Je nach Anzahl der Stränge sind Summenströme von 100 A schnell erreicht. Es sollte jedem Planer bewusst sein, dass Verluste mit dem Quadrat des Stromes einhergehen. Es gilt zu beachten:

- Leitungsabschnitte im GAK sollten auf ein Minimum beschränkt bleiben ($100\text{A}^2 \times 0,01 \Omega = 10 \text{ W}$),
- Klemm- Schraubstellen sollten minimale Übergangswiderstände aufweisen (Käfigklemmen, keine Schraubklemmen beim Stranganschluss, Drehmomente bei Schraubverbindungen beachten),
- Die Querschnitte der Strang- und Gleichstromhauptleitungen sollten unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit großzügig ausgelegt werden,
- Abgriffe der Gleichstromhauptleitungen sollen aus Gründen einer besseren Stromaufteilung sinnvoll erfolgen (Negativbeispiel: Abbildung 10 , rechts),
- Werden Komponenten zu Monitoringzwecken eingesetzt, sollte auf minimale Verlustleistungen geachtet werden,
- Wenn es angebracht ist können Plus und Minus in separaten Anschlusskästen untergebracht werden.

Die Ausführungen zeigen, dass bei der Gestaltung, Auswahl und Installation von Generatoranschlusskästen viele Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen, um die Lebensdauer der Sicherung optimal zu gestalten. Die richtige Einschätzung der Betriebsbedingungen für Sicherungen ist auf Grund der fehlenden detaillierten Datenbasis sicher nicht einfach. Dennoch, wenn die zuvor beschriebenen Argumente weitestgehend beherzigt werden, kann man eventuell bestehende Unsicherheiten ausschließen.

Bei der Analyse von Alterungsvorgängen an Sicherungseinsätzen spielt die Temperatur eine bedeutende Rolle. Der Einfluss von zyklischen oder impulsförmigen Strombelastungen durch Einstrahlungsänderungen spielt eine zusätzliche Rolle.

8.5 Wartung und Austausch von Sicherungseinsätzen

Ein Austausch von Sicherungseinsätzen sollte nur von eingewiesenem Fachpersonal erfolgen. Sicherungseinsätze müssen grundsätzlich nicht gewartet werden. Folgende Punkte sollten jedoch beachtet werden:

- Sicherungen dürfen grundsätzlich nie unter Last entnommen werden (Lichtbogengefahr, Verbrennungsgefahr),
- Werden keine allpolig trennenden Sicherungshalter verwendet, sollte die Spannungsfreiheit an den Sicherungen hergestellt werden. Dabei sollte folgende Reihenfolge eingehalten werden (Wechselrichter ausschalten → gleichstromseitige Freischaltstelle öffnen → Modulstränge vom GAK trennen → Spannungsfreiheit überprüfen). Sollte eine Trennung der PV-Stränge nicht möglich sein, muss für den Tausch von Sicherungen isoliertes Werkzeug und spannungsfeste Handschuhe verwendet werden. Die von Hersteller vorgeschriebenen Entnahmevorrichtungen sind zu verwenden. Eine Zuschaltung sollte in oben genannter umgekehrter Reihenfolge durchgeführt werden,
- Ein optimaler Anschluss von Strangleitungen an Sicherungshaltern ist sicher zu stellen. Unzureichende Verbindungen können zur Überhitzung der Kontaktstellen führen (Lichtbogen, Brandgefahr). Zu geringe Leiterquerschnitte können ebenfalls zu Temperaturerhöhungen an den Kontaktstellen führen. Die Vorgaben bezüglich des Leiterquerschnittes sind deshalb zu beachten,
- Hat eine Sicherung im Strang abgeschaltet, kann davon ausgegangen werden, dass die zweite Sicherung im Strang kurzzeitig ebenfalls eine Stromüberhöhung erfahren hat, ohne den Auslösestrom erreicht zu haben (Herstellungsstreuung). Dadurch kann eine Vorschädigung der Schmelzleiters erfolgen, die dann beim weiteren Betrieb zu einem

vorzeitigen Abschalten der Sicherung führen könnte. Deshalb wird empfohlen, beide Strangsicherungen zu erneuern,

- Unter allen Umständen ist es zu vermeiden PV-Sicherungen durch konventionelle Sicherungen zu ersetzen. Es besteht akute Brandgefahr. Baugleiche Standard-sicherungen, Miniatur-sicherungen oder Sicherungen aus dem Kfz-Bereich sind absolut ungeeignet, in PV-Systemen eingesetzt zu werden. Sie verfügen nicht über die Ganzbereichscharakteristik (gPV-Kennzeichnung) von PV-Sicherungen,
- Mitunter können die Metallteile von Sicherungen eine Braunverfärbung aufweisen. Die direkten Kontaktstellen sind davon jedoch nicht betroffen. In der Regel handelt es sich um Silberoxid. Silberoxid ist gut leitend und hat keinen Einfluss auf die Funktion. Ein Austausch muss nicht erfolgen,
- Ob eine Sicherung ausgelöst hat oder nicht kann visuell nicht festgestellt werden. Es besteht die Möglichkeit dies über eine Strommessung mit einer Stromzange, einer Spannungsmessung über der Sicherung oder durch eine berührungslose Messung mit einer Thermokamera festzustellen. Eine unmittelbare Abschaltung einer Sicherung kann so natürlich nicht festgestellt werden. Dazu wäre eine Sicherungsüberwachung erforderlich (Abschnitt 8.6).
- Sicherungen in Wechselrichtern müssen den Vorgaben des Wechselrichterherstellers entsprechen. Werden Sicherungen aus vorhandenen Nachrüstsätzen entnommen, sind diese umgehend zu ersetzen.

8.6 Sicherungsüberwachung

Schaltet eine Sicherung ab, muss davon ausgegangen werden, dass ein Fehler in der Anlage vorliegt. Der durch die Sicherung abgeschaltete Strang trägt nicht mehr zur Stromproduktion bei. Wenn eine Abschaltung nicht unmittelbar erkannt wird, kann dies zu erheblichen Energieeinbußen führen. Abhängig von der Fehlerursache können lange Zeiträume vergehen, bis das Auslösen der Sicherung überhaupt bemerkt wird. Eine Überwachung von Sicherungen ist deshalb durchaus sinnvoll.

Die Methoden zur Überwachung von Sicherungen reichen von optischen Anzeigen in Verbindung mit Sicherungshaltern bis hin zu Monitoringelektronik in der Anschlussdose in Einzelmodulen. Optische Anzeigen machen in ausgedehnten, großflächigen PV-Anlagen nur wenig Sinn, da sie permanent durch Begehung kontrolliert werden müssten. Befinden sich die Generatoranschlusskästen zentral an einem zugänglichen Installationsort, kann dies in Betracht gezogen werden. Energieeinbußen in Abhängigkeit der zyklisch durchgeführten Inspektion sind in Kauf zu nehmen.

Intelligente Strangüberwachungen messen kontinuierlich Strom und Spannung einzelner Stränge oder Stranggruppen. Die Sicherung selbst wird nicht überwacht. Durch Strom oder Leistungsvergleich können abgeschaltete Sicherungen zielgerichtet ermittelt werden. Im Störfall werden Fehlermeldungen per e-mail oder SMS versendet. Dies ermöglicht eine schnelle Beseitigung des Fehlers.

Wechselrichter für den direkten Anschluss mehrerer Stränge verfügen meist über eine integrierte Sicherungsüberwachung. Fehlermeldungen werden an Überwachungseinheiten weitergeleitet oder über Displays am Wechselrichter selbst zur Anzeige gebracht.