

# Einsatz von Sicherungen in Photovoltaikanlagen

## Teil 1: Spannungsauslegung, Bemessungsstrom und Abschaltzeiten

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. Unzulässig hohe Ströme können zur Schädigung durch unzulässig hohe Erwärmung oder Lichtbogenbildung führen. Sicherungen leisten deshalb auch einen wichtigen Beitrag zum Brandschutz.

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.

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 (Bild 1). Die Ursachen für die Verkürzung von Strängen können unterschiedlich sein:

- defekte Bypassdioden;
- ein- oder mehrfacher Erdschluss;
- Verpolung von Modulen;
- Installationsfehler bei Verschaltung.

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 Generatoranteil, 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-Sicherungseinsätzen 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 Sicherungsbefähigt 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.

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 E DIN EN 50380 (VDE 0126-380) [1] muss das PV-Modul bei dem festgelegten Begrenzungsrückstrom bei  $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  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 (VDE 0126-30-1) [2] 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.

### Autor

Dipl.-Ing. Peter Funtan arbeitet im Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze am Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Kassel.

## Anwendungsbereich und Rahmenbedingungen

Gemäß DIN VDE 0100-712 (VDE 0100-712) [3] 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 (VDE 0298-4) [4] zu beachten (z. B. Häufung).

Die Rückstrom-Überlastprüfung für PV-Module ist in den Normen DIN EN 61730-1 (VDE 0126-30-1) [5] und DIN EN 61730-2 (VDE 0126-30-2) [6] 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 die in Tabelle 1 genannten Daten des eingesetzten PV-Moduls benötigt.

**Tabelle 1 Benötigte Datenblattangaben seitens des Modulherstellers**

Formelzeichen	Bezeichnung
$U_{OC\_Mod}$ in V	Leerlaufspannung bei STC
$I_{sc\_Mod}$ in A	Kurzschlussstrom bei STC
$T_{k\_Uoc}$ in %/K	technologieabhängiger Temperaturkoeffizient Leerlaufspannung
$T_{k\_Isc}$ in %/K	technologieabhängiger Temperaturkoeffizient Kurzschlussstrom
$I_{Mod\_rev}$ in A	Rückstrombelastbarkeit

## Spannungsauslegung

Die maximal zulässige Eingangsspannung eines Wechselrichters, die zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf (DIN EN 50524 (VDE 0126-13) [7]), gilt auch für die zum Einsatz kommenden Sicherungen.

Die maximale DC-Systemspannung einer PV-Anlage richtet sich nach der Anzahl der seriell geschalteten Module im Strang und der niedrigsten zu erwartenden 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 1 500 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/m<sup>2</sup>, AM 1,5). Für die Berechnung der maximalen Systemspannung  $U_{OC\_Gen}$  sind weitere vom Planer festzulegende Angaben erforderlich. Die minimale Modultemperatur wird durch die am Standort der Anlage zu erwartende geringste Umgebungstemperatur bestimmt. Extremsandorte ausgenommen, kann mit Umgebungstemperaturen von -20 °C bis -25 °C gerechnet werden.

$U_{OC\_Gen}$  berechnet sich wie folgt:

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-1 \quad (1)$$

Dabei sind  $U_{OC\_Gen}$  die Leerlaufspannung String bzw. Solargenerator bei minimaler Modultemperatur;  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen minimaler Modultemperatur (üblich -25 °C) und +25 °C und  $n_{Mod}$  Anzahl der Module im Strang.

Die maximale Leerlaufspannung  $U_{OC\_Gen}$  darf die Bemessungsspannung der Sicherung  $U_{n\_Si}$  nicht überschreiten:

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-2 \quad (2)$$

Abgesehen von extremen Einsatzbedingungen kann als Faustregel für die Bestimmung der maximalen Generatorspannung auch ein 20 %iger Aufschlag für die Leerlaufspannung bei STC angenommen werden ( $U_{OC\_Mod} \times n \times 1,2$ ).

## Sicherungs-Bemessungsstrom

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/m<sup>2</sup> und daraus resultierende höhere Betriebsströme;
- Temperaturabhängigkeit der Modulströme;

- Art der überwiegend von der Bestrahlungsstärke geprägten Strombelastung;
- Einbausituation der Sicherungen.

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 DIN EN 60269-6 (VDE 0636-6) [8] genannte Wert von 1,5 berücksichtigt die oben benannten Korrekturfaktoren nur teilweise. Er dient lediglich zur Vereinfachung der Dimensionierung, wenn keine besonderen Anforderungen vorliegen.

Nach IEC 62548 [9] muss der Bemessungsstrom ( $I_n$ ) des Strang-Sicherungseinsatzes im Bereich von liegen:

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-3 \quad (3)$$

Anmerkung: die IEC 62548 [9] ist momentan in Überarbeitung. In Kürze wird der Final Draft International Standard (FDIS) veröffentlicht. Der vorläufige minimale Bemessungsstrom der Sicherung  $I_{n\_min}$  kann zunächst mit entsprechender Faustformel bestimmt werden:

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-4 \quad (4)$$

Auf Basis des zu erwartenden Modul- bzw. Strangstrom, kann der Bemessungsstrom aus der Reihe der üblichen in Ampere ausgedrückten Bemessungsströme für Sicherungseinsätze vorläufig ausgewählt werden. Diese überschlägige Berechnung ist dann anwendbar, wenn sichergestellt ist, dass die Umgebungstemperatur für die Sicherung von +45 °C nicht überschritten wird.

Zudem wird eine zeitlich begrenzte Bestrahlungsstärke von 1200 W/m<sup>2</sup> durch den Überhöhungsfaktor  $\Phi_{\text{Ü}}$  von 1,2 berücksichtigt.

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

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 Wechselastfaktor 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 Belastungsfaktor  $k_n$  berücksichtigt werden (Tabelle 2).

**Tabelle 2 Belastungsfaktoren  $k_h$  für Sicherungshalter nach DIN EN 61439-2 [10]**

Art der Belastung	angenommener Belastungsfaktor
Energieverteilung mit zwei und drei Stromkreisen	0,9
Energieverteilung mit vier und fünf Stromkreisen	0,8
Energieverteilung mit sechs und neun Stromkreisen	0,7
Energieverteilung mit zehn und mehr Stromkreisen	0,6

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

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-5 \quad (5)$$

$k_u$  Korrekturfaktor Umgebungstemperatur  
 $k_w$  Wechsellastfaktor  
 $k_h$  Bemessungsbelastungsfaktor (Korrekturfaktor Häufung Sicherungshalter)

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

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-6 \quad (6)$$

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

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-7 \quad (7)$$

Ist die Bedingung nicht erfüllt, muss in Gleichung 5 eine erneute Berechnung mit dem nächst höheren Wert für  $I_{n\_min}$  erfolgen, bis die Bedingung gemäß Gleichung 7 zutreffend ist.

## Abschaltzeiten im Fehlerfall

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.

$$ep0618-ep1196-Funtan-GI-8 \quad (8)$$

$I_{f\_rev}$  Fehlerrückstrom

$n_{Strang}$  Anzahl der parallelen Stränge des Solargenerators

Der Parallelschaltung von Modulsträngen sind Grenzen gesetzt, was in der Forderung gemäß DIN EN 61730-1 (VDE 0126-30-1) [2] zum Ausdruck gebracht wird. Im Fehlerfall, könnte bei einer zu großen Anzahl von parallelen Strängen der Fehlerrückstrom sehr schnell ein zerstörerisches Potential 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 Bild 3 dargestellt.

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 (VDE 0126-30-2) [6] 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.

Im aktuellen Normenentwurf E DIN EN 60269-6/A1 (VDE 0636-6/A1) [11] werden die PV-Sicherungen in Strangsicherungen (bis 32 A) und Teilanlagen- oder Anlagensicherungen (größer 32 A)

unterschieden. Die Strangsicherungen müssen demnach bei einem Prüfstrom, der dem 1,35-fachen des Bemessungsstromes der Sicherung entspricht, spätestens nach zwei Stunden abschalten.

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.

### Literatur

- [1] E DIN EN 50380 (VDE 0126-380):2017-10 Datenblatt- und Typenschildangaben von Photovoltaik-Modulen.
- [2] DIN EN 61730-1 (VDE 0126-30-1):2007-10 Photovoltaik(PV)-Module - Sicherheitsqualifikation – Teil 1: Anforderungen an den Aufbau.

- [3] DIN VDE 0100-712 (VDE 0100-712):2016-10 Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Photovoltaik-(PV)-Stromversorgungssysteme.
- [4] DIN VDE 0298-4 (VDE 0298-4):2013-06 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.
- [5] DIN EN 61730-1 (VDE 0126-30-1):2007-10 Photovoltaik(PV)-Module – Sicherheitsqualifikation – Teil 1: Anforderungen an den Aufbau.
- [6] DIN EN 61730-2 (VDE 0126-30-2):2012-09 Photovoltaik(PV)-Module – Sicherheitsqualifikation – Teil 2: Anforderungen an die Prüfung.
- [7] DIN EN 50524 (VDE 0126-13):2010-04 Datenblatt- und Typenschildangaben von Photovoltaik-Wechselrichtern.
- [8] DIN EN 60269-6 (VDE 0636-6):2011-11 Niederspannungssicherungen – Teil 6: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungseinsätze für den Schutz von solaren photovoltaischen Energieerzeugungssystemen.
- [9] IEC 62548:2016 Photovoltaic (PV) arrays – Design requirements.
- [10] DIN EN 61439-2 (VDE 0660-600-2):2012-06 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 2: Energie-Schaltgerätekombinationen.
- [11] E DIN EN 60269-6/A1 (VDE 0636-6/A1):2017-05 Niederspannungssicherungen – Teil 6: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungseinsätze für den Schutz von solaren photovoltaischen Energieerzeugungssystemen.
- [12] Funtan, P.: Leitfaden für die Anwendung von Sicherungen in Photovoltaikanlagen – Planungs- und Auslegungshilfe für Sicherungsanwender, Herausgeber NH/HH-Recycling, Stamsried, 1. Auflage 2018.

### Bildunterschriften

**Bild 1 Fehlerkonstellation mit Rückstrompotential durch einen verkürzten Strang**

**Bild 2 Korrekturfaktor  $k_u$  in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur im Generatoranschlusskasten**

**Bild 3 Rückstrombelastung von elektrisch verkürzten Strängen**

### ep TIPP

Lesen Sie in unserer nächsten Ausgabe: Einsatz von Sicherungen in Photovoltaikanlagen – Teil 2: Planungs- und Dimensionierungshilfen