

PV-Sicherungen –zuverlässiger Schutz für wertvolle Photovoltaikmodule

Sicherungen werden seit Ende des 19. Jahrhunderts erfolgreich zum Schutz elektrischer Stromkreise verwendet. Inzwischen entstanden neue Anwendungsfelder wie photovoltaische (PV) Energieerzeugungssysteme mit neuen Komponenten, neuen Verbindungstechniken und Installationsregeln, für die spezielle Sicherungen und Anwendungsregeln erforderlich sind.

Die zunehmende Nachfrage nach alternativen Energien und kräftige Unterstützung einiger Regierungen hat die Installation von PV-Stromerzeugungsanlagen rascher vorangetrieben, als sich allgemein anerkannte Regeln der Technik etablieren und internationale Normen erarbeitet werden konnten. Viele Begriffe, Definitionen und Prüfverfahren sind immer noch nicht ausreichend festgelegt und werden in unterschiedlicher Weise verwendet.

Dieser Fachbeitrag soll eine Anleitung zur richtigen Sicherungsauswahl für PV-Systeme geben, ohne den Anspruch zu erheben, bereits einen allgemein anerkannten Stand der Technik zu vertreten. PV-Module und Sicherungstechnologie entwickeln sich stetig weiter und die Ergebnisse laufender Forschungsprojekte und Feldversuche können Korrekturen erforderlich machen.

Nationale Installationsregeln verlangen generell einen Überstromschutz, wenn durch Überhitzung von elektrischen Leitern eine Brandgefahr entsteht. Überstromschutzeinrichtungen, besonders Sicherungen, können bei elektrischen Fehlern aber auch wertvolle Anlagen und Einrichtungen schützen, wenn sie richtig zugeordnet werden. Speziell zum Schutz von PV-Systemen wurden geeignete Sicherungen entwickelt, für die inzwischen ein Entwurf der Internationalen Norm IEC 60269-6 erarbeitet wurde, der die besonderen Anforderungen an die für PV-Generatoren typischen Gleichstromkreise berücksichtigt. Dabei muss man immer beachten, dass Sicherungen nicht unter allen Fehlerbedingungen Schutz gegen Brände bieten können, z. B. nicht bei stromschwachen Lichtbogenfehlern. Für solche Fehler müssen zusätzliche Schutzeinrichtungen vorgesehen werden.

Der erste Teil dieses Beitrags richtet sich an Anwendungs- und Betriebstechniker, die die richtigen Sicherungen einplanen oder abgeschaltete Sicherungen im Betrieb ersetzen müssen. Wer mehr über die Hintergründe der Sicherungsanwendung in PV-Generatoren erfahren möchte, kann direkt [zum Anhang springen](#).

PV-Sicherungs-Anwendungsleitfaden für schnelle Leser

-ausführliche technische Erläuterungen im Anhang

PV-Module sind strombegrenzte Bauteile, die alle Lastströme bis zu ihrem Bemessungskurzschlussstroms I_{SC_STC} und gelegentliche Überströme durch Einstrahlung über dem Normwert führen können. Tatsächlich kann verstärkte Einstrahlung den Betriebsstrom auf Werte bis zu 1,4 oder 1,6 I_{SC_STC} ¹ treiben.

Teilabschattung von Zellen in einem PV-Strang kann zu lokaler Überhitzung (Hotspots) führen und die Module schwer beschädigen. Da diese Schäden durch erhöhte Spannung bei normalen Betriebsströmen auftreten, bieten Sicherungen dagegen keinen Schutz. Hotspots können durch Bypassdioden (Bild A11) verhindert werden.

Sorgfältig dimensionierte PV-Generatoren benötigen im fehlerfreien Zustand keinen Überstromschutz.

Im Fehlerfall können PV-Module aber durch Rückströme beschädigt werden, wenn diese die Rückstromfestigkeit des Moduls $I_{MOD_REVERSE}$ überschreiten. Die Fehlerfolgen reichen von bleibenden Schäden an den Modulen mit entsprechender Leistungsminderung bis zu Leiterunterbrechungen mit Lichtbogenbildung und Brandauslösung.

¹ STC (standard test conditions): Zelltemperatur: 25 °C, Einstrahlung: 1.000 W/m², relative Luftmassenzahl: AM 1,5

Gefährliche Fehlerströme kommen stets von äußeren Stromquellen, d. h. von Modulen oder Strängen, die parallel zum fehlerhaften Strang geschaltet sind, von Pufferbatterien im PV-System oder durch Rückspeisung eines netzgekoppelten Umrichters.

Richtig bemessene PV-Strangsicherungen schützen Module und Stränge und deren Verdrahtung gegen gefährliche Rückströme.

Die folgende Anleitung zur Auswahl von PV-Strangsicherungen betrifft in erster Linie PV-Generatoren ohne Pufferbatterien oder mit Wechselrichtern, die keine Rückspeisung aus dem Netz zulassen. Batterien erfordern eigene Batteriesicherungen. In größeren PV-Anlagen können Summensicherungen (Generatorsicherungen oder Teilgeneratorsicherungen) zweckmäßig sein.

ANMERKUNG - Fehlerströme in PV-Generatoren werden durch die momentane Einstrahlung bestimmt und können deutlich kleiner als I_{SC_STC} sein. Somit können gefährliche Lichtbögen auftreten mit Stromstärken, die kein Überstromschutzorgan auslösen. Im Gegensatz zu Wechselstromlichtbögen verlöschen Gleichstromlichtbögen auch bei kleinen Strömen nicht von selbst.

Auswahl von PV-Strangsicherungen

a) Die Anzahl paralleler Stränge entscheidet, ob Sicherungen erforderlich sind

Die Auswahl von PV-Strangsicherungen richtet sich nach der Rückstromfestigkeit der Module $I_{MOD_REVERSE}$ und der Verdrahtung. Die Modulhersteller nennen die entsprechenden Werte als Vielfaches von I_{SC_STC} oder geben einen maximalen Sicherungsbemessungsstrom an. (Hier ist jedoch mangels einer einschlägigen Sicherungsnorm die Rücksprache mit einem Sicherungshersteller dringend angeraten!)

In PV-Anlagen mit nur einem oder zwei parallelen Strängen ist kein Schutz erforderlich, da Fehlerströme die Belastbarkeit der Module nicht überschreiten können. Bei Anlagen mit einer größeren Zahl paralleler Stränge wird der Einsatz von Strangsicherungen abhängig von der Rückstromfestigkeit der Module $I_{MOD_REVERSE}$ empfohlen. (Bild 1).

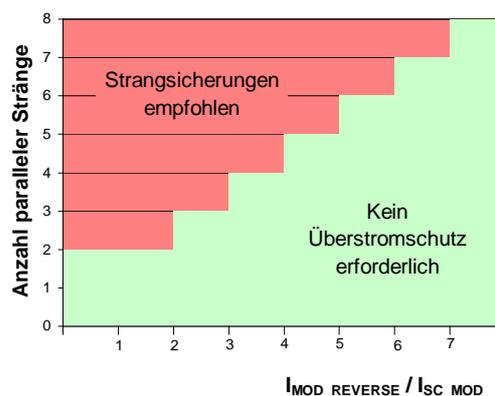


Bild 1 - Anwendung von Strangsicherungen

b) Nur spezielle "PV"-Sicherungen verwenden

Ungeeignete Sicherungen können eher Schäden verursachen als Schäden verhüten! Bis zur Veröffentlichung einer einschlägigen Norm für PV-Sicherungen sollten deshalb nur Sicherungen verwendet werden, die vom Hersteller ausdrücklich für diese Anwendung vorgesehen sind. (Im Vorgriff auf eine derzeit vorbereitete Norm werden die Kennzeichnungen „PV“ oder „gPV“ verwendet.)

c) Absicherung beider Pole erforderlich

Die in Europa üblichen ungeerdeten (potenzialfreien) PV-Systeme erfordern Überstromschutz und Trenneinrichtungen in beiden Polen. Für PV-Strangsicherungen wird die Verwendung von Sicherungs-Trennschaltern (Schalter-Sicherungseinheiten) empfohlen, die einen gefahrlosen Sicherungswechsel ermöglichen.

d) Bemessungsausschaltvermögen

PV-Strangsicherungen müssen ein Gleichstrom(DC)-Schaltvermögen haben! Dieses muss größer oder gleich dem größten zu erwartenden Fehlerstrom im PV-System sein. Der derzeitige Normentwurf IEC 60269-6 sieht einen Mindestwert von 10 kA vor. Größere Werte sind im Hinblick auf Speicherbatterien und NetZRückspeisung ebenfalls im Gespräch. Die Zeitkonstante des Stromkreises wird mit 1 bis 5 ms (in der Regel < 2 ms) angenommen, d. h. Sicherungen können in PV-Systemen ein größeres Ausschaltvermögen haben als in Gleichstromsystemen mit größeren Zeitkonstanten.

e) Ausschaltbereich

PV-Strangsicherungen müssen Ganzbereichs(„g“)-Sicherungen sein! Das heißt, sie müssen alle Ströme vom Mindestschmelzstrom bis zum Bemessungsausschaltvermögen sicher unterbrechen können. Häufig verwendet sind heute noch „gR“- oder „gS“-Sicherungen nach IEC 60269-4. Zukünftig ist mit dem generellen Einsatz von „gPV“-Sicherungen nach der derzeit vorbereiteten Norm IEC 60269-6 zu rechnen. In diesem Beitrag steht „PV“-Sicherungen für Sicherungen mit großem und kleinem Prüfstrom entsprechend dem derzeitigen Normentwurf

ANMERKUNG: - Teilbereichs(„a“)-Sicherungen dürfen auf keinen Fall verwendet werden, da sie gefährliche Lichtbögen erzeugen können, wenn sie unter ihrem Mindestausschaltstrom ausgelöst werden.

f) Bemessungsspannung

Die Bemessungsspannung U_n der Sicherung muss mindestens gleich der größten Leerlaufspannung U_{OC} des PV-generators sein:

$$U_n \geq 1,2 U_{OC_STC}$$

(Der Faktor 1,2 berücksichtigt, dass die Leerlaufspannung bei niedrigen Temperaturen steigt. In kalten Klimagebieten kann ein größerer Faktor erforderlich sein.)

g) Kleinster Bemessungsstrom für PV-Strangsicherungen

Die Sicherung soll unter normalen Betriebsbedingungen weder auslösen noch ihre Eigenschaften verschlechtern, damit unerwünschte Betriebsunterbrechungen vermieden werden. Da die dauerhafte Stromtragfähigkeit der Sicherung direkt von der Schmelzleitertemperatur abhängt, sollten Betriebsströme oberhalb des Sicherungs Bemessungsstroms vermieden werden. Diese Regel ist besonders streng einzuhalten, wenn die Sicherung häufigen Lastwechseln unterworfen ist, die für PV-Systeme mit ihren ständig wechselnden Betriebsströmen typisch sind.

Der Bemessungsstrom I_n von Strangsicherungen sollte deshalb größer sein als der größte Betriebsstrom des Strangs. Dieser liegt, abhängig von den örtlichen klimatischen Bedingungen und einschließlich eines Zuschlags für verstärkte Strahlung, zwischen $1,25 I_{SC_MOD}$ und $1,6 I_{SC_MOD}$. Die folgende Zuordnungsregel scheint deshalb angemessen:

$$I_n \geq 1,4 I_{SC_MOD}$$

ANMERKUNG: - Mögliche Reduktionsfaktoren der Sicherungshersteller für besondere Betriebsbedingungen, z. B. hohe Umgebungstemperaturen, Häufung von Sicherungseinsätzen in Gehäusen mit eingeschränkter Wärmeableitung und häufige Lastwechsel sind ebenfalls zu berücksichtigen (siehe unten).

Wie in Bild 2 gezeigt, sind PV-Sicherungen wegen ihres niedrigeren Wertes für den Großen Prüfstrom I_f anderen Sicherungstypen in ihrer Schutzwirkung überlegen.

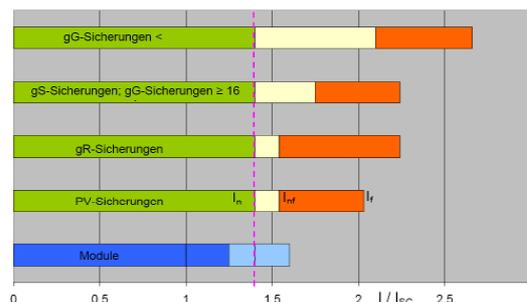


Bild 2 - Ausschaltbereich verschiedener Sicherungstypen

I_n - Sicherungs Bemessungsstrom
 I_{nf} - Kleiner Prüfstrom; I_f - Großer Prüfstrom

h) Größter Bemessungsstrom für PV-Strangsicherungen

Der Große Prüfstrom I_f des Sicherungseinsatzes soll kleiner oder gleich der Rückstromfestigkeit der zu schützenden Module sein. Daraus ergibt sich die folgende Zuordnung:

$$I_n \leq 0,9 I_{MOD_REVERSE} \text{ für PV-Sicherungen}$$

(Erläuterungen und Zuordnung anderer Sicherungstypen im Anhang).

ANMERKUNGEN: - *Maximale Sicherungs-Bemessungsströme, die vom Modulhersteller angegeben sind, müssen in jedem Fall eingehalten werden.*

Bei großen Werten für $I_{MOD_REVERSE} / I_{SC_MOD}$ und einer großen Anzahl von parallelen Strängen muss zusätzlich geprüft werden, ob der Leitungsschutz für die Strangleitungen gegeben ist.

i) Leistungsabgabe und Umgebungstemperatur

PV-Sicherungseinsätze haben gegenüber anderen Überstromschutzeinrichtungen oder Sperrdioden eine sehr geringe Leistungsabgabe. Allerdings können Generatoranschlusskästen hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sein und eine größere Anzahl von Sicherungseinsätzen und anderen Komponenten, z. B. Sperrdioden, enthalten, die insgesamt einen erheblichen Temperaturanstieg in dem Gehäuse bewirken. Im Unterschied zu Verteilergehäusen nach IEC 60439-1 dürfen auch bei einer größeren Anzahl von Stromkreisen keine Belastungsfaktoren < 1 bei der Erwärmungsprüfung angesetzt werden. Erwärmungsberechnungen und -Prüfungen müssen von gleichzeitiger Belastung aller Stromkreise mit dem maximalen Betriebsstrom ausgehen. Die von Sicherungsherstellern für hohe Temperaturen angegebenen Reduktionsfaktoren müssen berücksichtigt werden.

j) Wechsellast

PV-Sicherungen werden häufig wechselnden Lastströmen unterworfen und dürfen deshalb unter dem Einfluss ständiger Temperaturwechsel ihre Eigenschaften nicht verschlechtern. Für den Sicherungsbemessungsstrom können deshalb Reduktionsfaktoren entsprechend den Datenblättern und Richtlinien des Herstellers zu berücksichtigen sein.

k) Sicherungsüberwachung

Das Ansprechen einer Strangsicherung in einem Generator oder Teilgenerator mit vielen Strängen fällt nicht unbedingt sofort auf. Elektronische Sicherungsüberwachung ist daher empfohlen, um ein solches Ereignis zu melden und die unmittelbare Untersuchung und Beseitigung des Fehlers einzuleiten, damit der Ausfall erzeugter Energie möglichst gering bleibt.

Auswahl von PV-Sicherungen für PV-Teilgeneratoren und PV-Generatoren

Die Auswahl von PV-Sicherungen für Generatoren und Teilgeneratoren folgt im Hinblick auf den kleinsten Bemessungsstrom den selben Regeln wie für PV-Strangsicherungen. Der Sicherungsbemessungsstrom muss größer sein als der größte Betriebsstrom eines Teilgenerators aus n PV-Strängen bzw. als der größte Betriebsstrom eines Generators mit n_A PV-Teilgeneratoren:

$$I_n \geq 1,4 I_{SC_SUB_ARRAY} = n \cdot 1,4 I_{SC_MOD} \text{ und}$$

$$I_n \geq 1,4 I_{SC_ARRAY} = n_A \cdot 1,4 I_{SC_SUB_ARRAY}$$

Der größte Sicherungsbemessungsstrom für PV-Generatoren und PV-Teilgeneratoren richtet sich nach dem Schutz der angeschlossenen Leitungen und muss kleiner oder gleich der Belastbarkeit der angeschlossenen Leiter sein:

$$I_n \leq I_{Z_ARRAY_CABLE} \text{ bzw.}$$

$$I_n \leq I_{Z_SUB_ARRAY_CABLE}$$

Der Leitungsschutz für PV-Generator- und PV-Teilgeneratorleitungen ist nur bei Anlagen mit Batterien erforderlich oder wenn im Fehlerfall andere Stromquellen in die PV-Anlage einspeisen.

Selektivität

Der Überstromschutz in einer PV-Anlage soll so koordiniert werden, dass im Fehlerfall das Schutzelement auf der niedrigsten Generatorebene (Strang < Teilgenerator < Generator), welches den Fehlerstrom führt, zuerst abschaltet. Bis eine neue PV-Sicherungsnorm möglicherweise spezifische Selektivitätsregeln festlegt, muss die Selektivität der Sicherungen auf den verschiedenen Ebenen der PV-Anlage anhand der Zeit/Strom-Kennlinien abgestimmt werden.

Nicht verwendbare Sicherungstypen

Für den Schutz von PV-Strängen, PV-Teilgeneratoren und PV-Generatoren dürfen nur Sicherungen mit einem ausreichenden Gleichstromschaltvermögen verwendet werden. Leider müssen die meisten im Markt erhältlichen Sicherungstypen als ungeeignet betrachtet werden, obwohl sie die selben Abmessungen haben oder scheinbar die selben Bemessungsspannungen und –Ströme wie geeignete PV-Sicherungen. Besondere Vorsicht gilt bei den folgenden mit einiger Wahrscheinlichkeit wegen ihres nicht ausreichenden Schaltvermögens ungeeigneten Sicherungstypen:

- Geräteschutzsicherungen
- Kraftfahrzeugsicherungen
- Haushaltssicherungen

Sicherungen für die Benutzung durch Laien nach IEC 60269-3 (Haushaltssicherungen) sind generell Wechselstromsicherungen und nicht für PV-Anwendungen geeignet.

Ausnahme: D-Sicherungen sind auch für Gleichstrom geeignet, da sie auch in industriellen Anlagen verwendet werden.

ANHANG

Basiswissen über die zu schützende Anlage

PV-Generatoren verhalten sich sowohl in Bezug auf Betriebsströme als auch Kurzschlussströme völlig anders als übliche Stromgeneratoren. Deshalb sind solide Grundkenntnisse des physikalischen Prinzips und der Betriebsbedingungen notwendige Voraussetzung für die richtige Sicherungsauswahl und Koordination. Im Gegensatz zu anderen elektrischen Generatoren ist der Kurzschlussstrom von PV-Generatoren kaum größer als der maximale Betriebsstrom. Die üblichen Regeln zur Sicherungsauswahl können daher nicht angewandt werden.

PV-Zellen

Tabelle A1 - Zellengrößen und Ströme (typische Werte von Siliziumzellen)		
Zellengröße		I_{SC}
4 "	10 x 10 cm ²	3,5 A
5 "	12,5 x 12,5 cm ²	5 A
6 "	15,6 x 15,6 cm ²	7,5 A
8 "	21 x 21 cm ²	14 A

PV-Zellen, allgemein auch Solarzellen genannt, sind die Grundbausteine der photovoltaischen Stromerzeugung. PV-Zellen sind Halbleiterdioden mit einer dem Sonnenlicht zugänglichen Sperrschicht, die bei Lichteinfall Strom erzeugt. Im Dunkeln verhalten sich PV-Zellen wie normale Dioden (siehe Kennlinien in Bild A1).

ANMERKUNG: - In diesem Aufsatz wird durchgehend das Verbraucherdiagramm verwendet, da bei Verschattung oder Rückströmen alle zu schützenden Komponenten als Verbraucher arbeiten.

PV-Zellen sind passive Verbraucher, wenn sie in den Quadranten I und III gemäß Bild A1 betrieben werden. Elektrische Energie wird nur beim Betrieb in Quadrant IV erzeugt. Dieser Quadrant mit invertierter Stromachse (Generatorstromdiagramm: Achse I_G zeigt nach oben) dient allgemein zur Darstellung der Kennlinien von PV-Zellen, -Modulen und -Generatoren (siehe Bild A2).

ANMERKUNG: - Ströme in Durchlassrichtung der Dioden sind als „Rückströme“ ($I_{REVERSE}$) definiert, da sie den Generatorströmen entgegengesetzt fließen (siehe Bild A7).

Der größte Kurzschlussstrom I_{SC} , den eine PV-Zelle liefern kann, ist durch die Zellengröße begrenzt (siehe Tabelle A1) und proportional zur Einstrahlungsleistung (Bild A1). Die von einer PV-Zelle erzeugte Spannung entspricht der Schwellenspannung der Diode und beträgt bei einer Siliziumdiode etwa 0,5 V. Die Leerlaufspannung U_{OC} handelsüblicher PV-Zellen liegt typisch zwischen 0,5 V and 0,7 V bei 25 °C Zellenbetriebstemperatur (NOCT). Für wirtschaftliche Anwendungen wird deshalb eine

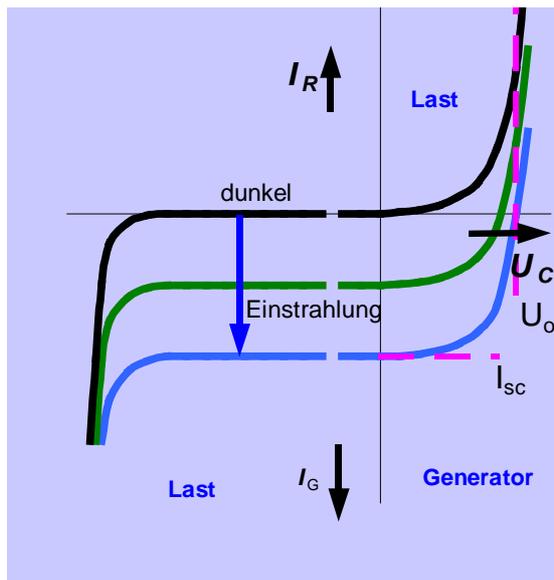


Bild A1 – PV-Zellen-Kennlinien (Verbrauchersystem)

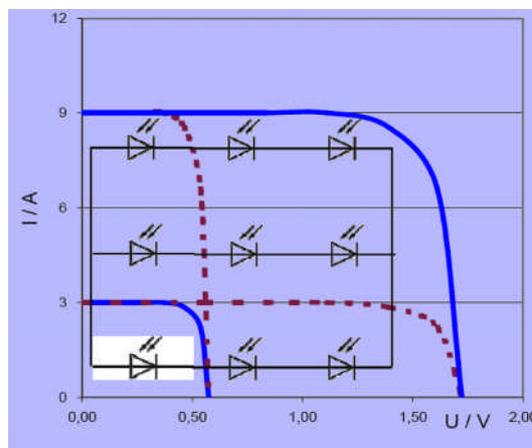


Bild A2 - Generatorstromkennlinien von PV-Zellen in Reihen- und Parallelschaltung

größere Zahl von PV-Zellen in Reihe und parallel geschaltet, um die gewünschte Erzeugungsleistung zu erzielen. Bei Serienschaltung summiert sich die erzeugte Spannung, während sich bei Parallelschaltung die Ströme addieren (siehe Bild A2).

Für die Prüfung und Bemessung von PV-Zellen and PV-Modulen wurden in IEC 61215 die folgenden Standardprüfbedingungen festgelegt, die mit dem Index „STC“ gekennzeichnet werden:

- Zelltemperatur $T_{STC} = 25\text{ °C}$
- Strahlungsleistung $G_{STC} = 1.000\text{ W/m}^2$
- Lichtspektrum (relative optische Luftmasse) $AM = 1,5$

ANMERKUNG: - Die Standardprüfbedingungen repräsentieren ungefähr die Umweltbedingungen in Mitteleuropa. Lokale und temporäre Wetterbedingungen können deutlich davon abweichen.

Während die PV-Zellentemperatur den Maximalstrom der Zelle kaum beeinflusst, fällt die Zellenspannung und folglich die abgegebene elektrische Leistung mit steigender Temperatur deutlich ab, wie Bild 3 zeigt. Niedrige Umgebungs- und PV-Zellentemperaturen steigern die PV-Generatorspannung und die gelieferte Energie.

Die PV-Zellenkennlinien finden sich mit unterschiedlichen Maßstäben für Strom und Spannung wieder bei PV-Modul-, PV-Strang- und PV-Generatorkennlinien.

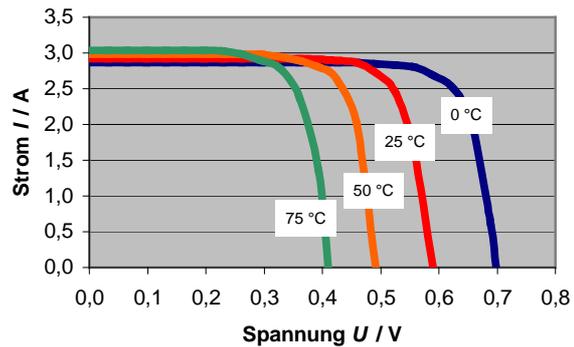


Bild A3 - Zellenkennlinien bei verschiedenen Temperaturen

PV-Module

PV-Zellen sind zerbrechliche Produkte. Sie benötigen deshalb mechanischen Schutz und Schutz gegen Witterungseinflüsse, damit sie handhabbar werden und unter Freiluftbedingungen eingesetzt werden können. Da einzelne PV-Zellen wegen ihrer geringen Ausgangsspannung von nur etwa 0,5 V kaum von praktischem Nutzen sind, wird in der Regel eine größere Anzahl von Zellen, typisch 36 bis 120 Stück, in einem stabilen Rahmen zu PV-Modulen zusammengefasst, in Reihe geschaltet und gegen Witterungseinflüsse versiegelt. Da es nicht üblich ist, PV-Zellen innerhalb eines Moduls parallel zu schalten, ist der Modulstrom gleich dem Zellenstrom.

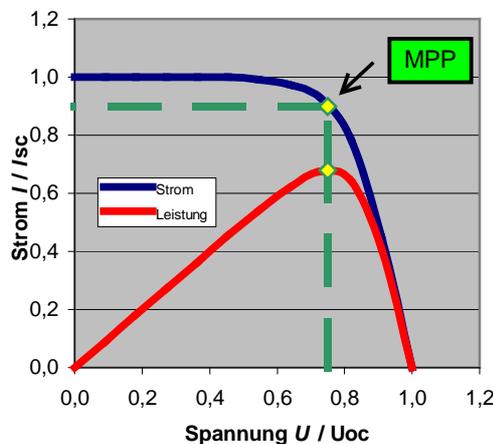


Bild A4 - Modulkennlinien

PV-Module haben auf der Rückseite Anschlussdosen mit Leitungen und Steckverbindern für den Anschluss weiterer Module. Bypassdioden (Bild A11) sind entweder in die Module integriert oder in die Anschlussdosen eingebaut.

PV-Modul-Hersteller liefern technische Daten wie Kurzschlussstrom I_{SC} , Leerlaufspannung U_{OC} und optimale Betriebsparameter I_{MPP} und U_{MPP} , die den Punkt maximaler Leistung MPP (Maximum Power Point) des Moduls definieren (Bild A4). Für die maximale Ausnutzung der Solarstrahlung muss der PV-Generator stets so nah wie möglich an Betriebspunkt MPP betrieben werden. Wechselrichter, die PV-Generatoren mit dem Stromver-

sorgungsnetz verbinden, enthalten dazu ausgeklügelte elektronische Regler, sogenannte MPP-Tracker, die auf die stetig wechselnden Witterungsbedingungen reagieren (Bild A5).

PV-Generatoren (PV-Arrays)

PV-Generatoren umfassen die gesamten Gleichstromkomponenten in einem PV-System außer Energiespeichern und Wechselrichtern oder Verbrauchern (Bild A5). Ein Modul mit 36 Zellen kann z. B. zum Laden einer 12 V-Batterie als Einzelanwendung genutzt werden. Bei dieser Anwendung wäre ein einziges Modul ein PV-Generator oder ein PV-Array. Größere netzgekoppelte Systeme erfordern eine größere Anzahl von PV-Modulen, die zu PV-Strängen in Reihe geschaltet sind (Bild A5), damit die erforderliche Spannung erreicht wird. Größere Ströme erhält man durch Parallelschaltung mehrerer Stränge zu einem PV-Generator (PV Array). Dieser kann sich wiederum aus mehreren PV-Teilgeneratoren (PV-Subarrays) zusammensetzen. Die Strangleitungen der beiden Polaritäten werden üblicherweise in Generatoranschlusskästen zusammenschaltet (Bild A6). Diese enthalten die Strangsicherungen und ggf. Überspannungsschutzeinrichtungen und Sperrdioden.

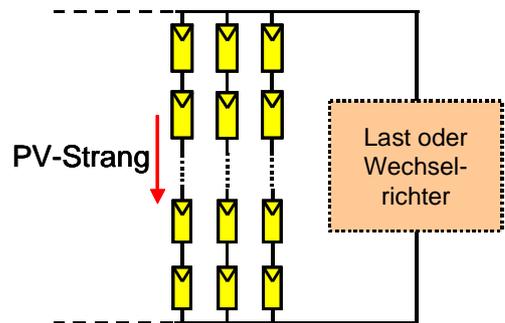


Fig. A5 - PV-Generator

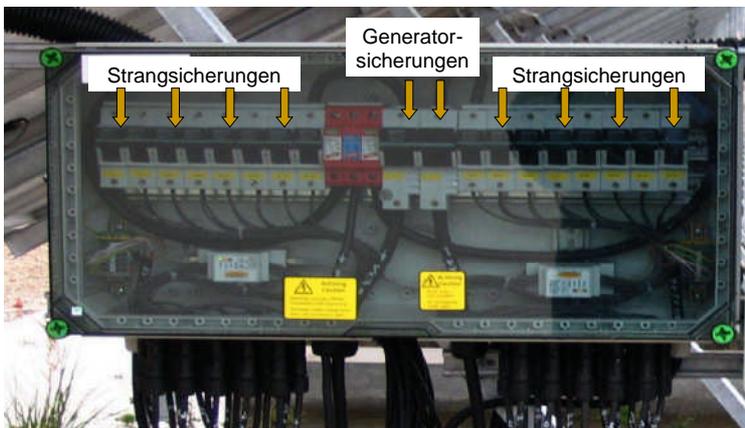


Bild A6 - Generator-Anschlusskasten

Es gibt im Grunde genommen keine Begrenzung der durch Reihen- und Parallelschaltung von PV-Modulen zu erzielenden Leistung. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass nur gleiche Module mit möglichst identischen, eng tolerierten Merkmalen zusammenschaltet werden. Merkbliche Toleranzen in den Modulkennlinien oder auch in der Einstrahlung haben erhebliche Einbußen bei der Leistung und beim Generatorwirkungsgrad zur Folge.

Es gibt im Grunde genommen keine Begrenzung der durch Reihen- und Parallelschaltung von PV-Modulen zu erzielenden Leistung. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass nur gleiche Module mit möglichst identischen, eng tolerierten Merkmalen zusammenschaltet werden. Merkbliche Toleranzen in den Modulkennlinien oder auch in der Einstrahlung haben erhebliche Einbußen bei der Leistung und beim Generatorwirkungsgrad zur Folge.

Normale und abweichende Betriebsbedingungen

Es ist klar, dass PV-Zellen normalerweise in Quadrant IV betrieben werden sollten (Bild A1), d. h., es sollte Strom erzeugt werden. Davon abweichender Betrieb in den Quadranten I und III kann aber nicht immer vermieden werden. Das kann zu Überhitzung bis zur thermischen Zerstörung der PV-Zellen führen. Zum besseren Verständnis des elektrischen Verhaltens von PV-Zellen kann ein elektrisches Ersatzschaltbild gemäß Bild A7 herangezogen werden. Eine Stromquelle mit parallel geschalteter Diode gibt das Betriebsverhalten unter den verschiedenen Bedingungen recht gut wieder:

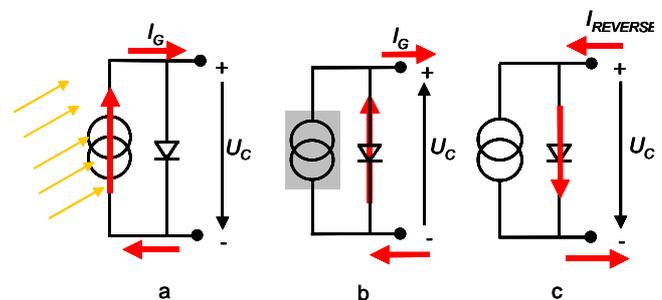


Fig. A7 - Ersatzschaltbild einer PV-Zelle
a) beleuchtet b) verschattet c) Rückstrom

- **Im Sonnenlicht** (Bild A7 a) erzeugen PV-Zellen einen (Vorwärts-) Strom I_G und eine Spannung U_c entsprechend dem Betrieb in Quadrant IV der Zellenkennlinie (Bild A1).

Die Betriebsströme einschließlich der Kurzschlussströme sind durch die Stromquelleneigenschaft der PV-Zellen begrenzt und können einer richtig dimensionierten PV-Anlage normalerweise keinen Schaden zufügen.

- **Teilweise Verschattung** von einzelnen PV-Zellen in einem Strang aus vielen PV-Zellen wird den Strangstrom kaum beeinflussen, aber den Betriebspunkt der verschatteten Zellen in den Quadranten III verlagern, d. h. die Polarität der Zellenspannung umkehren (Bild A7 b) und auf die Durchbruchspannung der Sperrschicht von $U_C \approx -15\text{ V}$ bis -25 V anheben (Bild A9). Die Verlustleistung von verschattete Zellen in einem PV-Strang steigt gegenüber normalem Betrieb um mehr als eine Größenordnung an und erzeugt lokale Temperaturerhöhungen, (Hotspots, Bild A8), welche die PV-Module dauernd beschädigen können. Leider bieten Schmelzsicherungen keinen Schutz gegen Hotspots, da diese nicht durch Überströme sondern durch hohe Rückspannungen verursacht werden (Bild A9). Hotspots können weitgehend durch Bypassdioden vermieden werden, die in (Vorwärts-) Richtung des Generatorstroms parallel zu mehreren Zellen oder zu einem Modul geschaltet werden (Bild A11). Hotspots können nur durch regelmäßige Inspektion mit Infrarotkameras zuverlässig entdeckt werden.

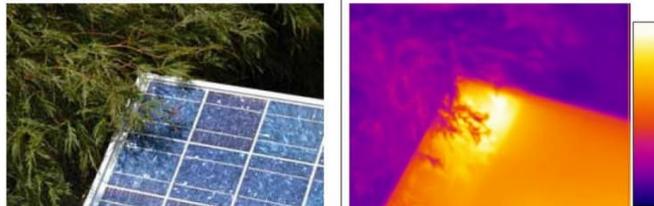


Bild A8 - Hotspot durch Teilverschattung

Photo: Photovoltaik-Systemtechnik Schlussbericht von Luciano Borgna, Christof Geissbühler, Dr. Heinrich Häberlin, Martin Kämpfer, Urs Zwahlen, Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Fachbereich Elektro- und Kommunikationstechnik, Photovoltaiklabor, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf
heinrich.haebelin@bfh.ch / www.pvtest.ch

Rückströme bei Verschattung

Wie in Bild A7 c dargestellt, kann in ein verschattetes PV-Modul durch voll beleuchtete parallel geschaltete Module ein Rückstrom eingespeist werden. Das verschattete Modul wird dabei als Verbraucher in Quadrant I betrieben (Bild A1). Bei fehlerfreier PV-Anlage ist die Betriebsspannung auf die größte Leerlaufspannung U_{oc} begrenzt. Folglich kann in einem fehlerfreien System der Rückstrom das Niveau des Modulkurzschlussstroms nicht überschreiten.

In fehlerfreien PV-Anlagen entstehen durch Rückströme keine gefährlichen Belastungen, für die ein Schutz durch Sicherungen erforderlich wäre.

Dagegen können in fehlerbehafteten PV-Generatoren an einzelnen Modulen Spannungen auftreten, welche die normale Leerlaufspannung weit überschreiten. Dadurch können so große Rückströme fließen, dass die Module überhitzt werden. In diesen Fällen müssen Strangsicherungen den Fehlerstrom abschalten, bevor Schäden an den Modulen auftreten. (Bild A9).

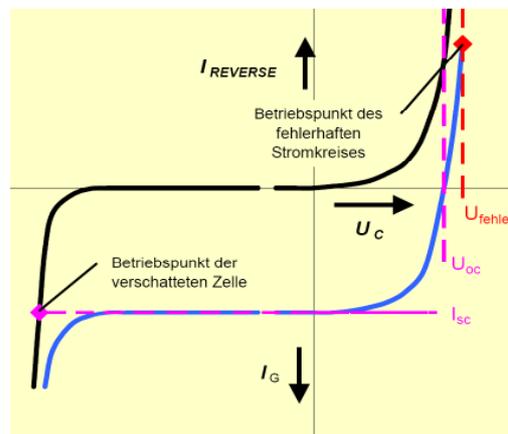


Bild A9 - Verschattung und Fehlerströme

Fehlerströme in PV-Systemen

Während Kurzschlüsse im Lastkreis bei PV-Systemen keine gefährlichen Überströme hervorrufen, können gefährliche Rückströme auftreten bei Kurzschlüssen in Modulen, in Anschlusskästen oder bei (Doppel-)Erdschlüssen in den Verbindungsleitungen. Obwohl die Module selbst nur einen durch die Einstrahlung begrenzten Strom erzeugen können, können sie durch

Rückströme aus parallelen PV-Strängen oder externen Quellen (z. B. Batterien) oder durch beides überlastet werden.

Einige Fehlermöglichkeiten in einem PV-Generator mit n parallelen Strings und die entsprechenden maximalen Fehlerströme bei Leerlaufspannung unter Standard Testbedingungen STC und ohne Berücksichtigung externer Stromquellen sind in Bild A10 erläutert:

a) Modulkurzschluss

Die Summenspannung des fehlerhaften Strangs ist um die Spannung des kurzgeschlossenen Moduls kleiner als die Generatorspannung (Spannung der gesunden Stränge, siehe auch Bild A9). Folglich speisen die n-1 parallelen Stränge einen Rückstrom in den fehlerhaften Strang ein (Bild A10, Fehler a). Dieser kann bis zu

$$I_{\text{REVERSE}} \approx (n - 1) I_{\text{SC}} \text{ betragen.}$$

Die erzeugte Verlustleistung von

$$P_v = U_{\text{MODULE}} \times I_{\text{REVERSE}}$$

belastet die gesunden Module und die Verbindungsleitungen im fehlerhaften Strang. Der Strom in den Leitungen der Kurzschlusschleife ist noch größer und beträgt $I_{\text{fault}} \approx n I_{\text{SC}}$.

b) Doppelerdschlussfehler

Bei gleichzeitigen Erdschlüssen in einem Strang und einer Sammelschiene (Bild A10, Fehler b) fließt ein Erdschlussstrom von $I_{\text{fault}} \approx n I_{\text{SC}}$. Der Rückstrom in dem Strangabschnitt zwischen der Fehlerstelle und dem Gegenpol beträgt

$$I_{\text{REVERSE}} \approx (n-1) I_{\text{SC}}, \text{ entsprechend einer Verlustleistung von } P_v = U_{\text{MODULE}} \times I_{\text{REVERSE}}$$

In beiden Fällen können Module und Leitungen thermisch überlastet werden, weshalb bei entsprechender Anzahl paralleler Stränge Überstromschutz erforderlich wird (siehe Bild 1). Doppelerdschlussfehler können natürlich auch in umgekehrter Polarität als in Bild A10 dargestellt auftreten. Deshalb sind in einem ungeerdeten System Sicherungen in beiden Polen jedes Strangs erforderlich.

Rückstromschutz mit PV-Strangsicherungen

In den meisten größeren PV-Anlagen sind Überstromschutzeinrichtungen erforderlich, um Leitungen und Module bei Isolationsfehlern gegen Überhitzung zu schützen. Sicherungen werden wegen ihrer Zuverlässigkeit, kompakten Abmessungen, niedrigen Kosten und ihrer geringen Verlustleistung bevorzugt. Die Verbindungsleitungen werden in der Regel für einen geringen Spannungsfall dimensioniert und haben deshalb praktisch immer eine ausreichende Stromtragfähigkeit. **Hauptaufgabe der Sicherungen ist deshalb der Schutz wertvoller PV-Module gegen Wärmeschäden durch Rückströme.**

Ein wichtiger Eckpunkt für die Sicherungsauswahl ist deshalb der Rückstrom den ein Modul vorübergehend führen kann, ohne Schaden zu nehmen. Diesen

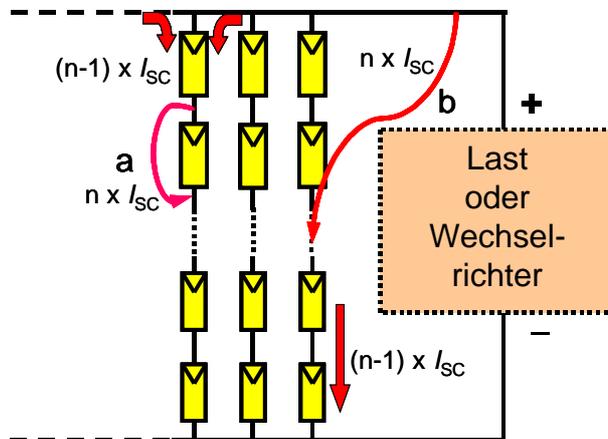


Bild A10 - Fehlerströme in einem schutz-isolierten PV-System

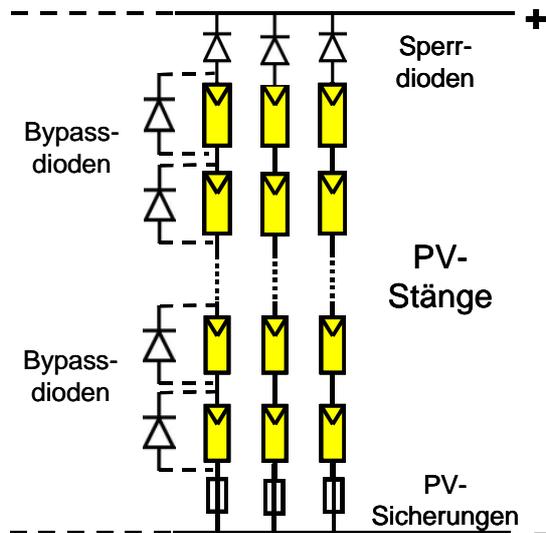


Bild A11 - Schutzeinrichtungen im PV-Generator

Strom muss die Sicherung rechtzeitig unterbrechen. Typische Werte von $I_{REVERSE}$ liegen bei PV-Modulen aus kristallinem Silizium zwischen $2 I_{SC_STC}$ und $3 I_{SC_STC}$. (Auch größere Werte können, je nach Zellenmaterial und Modulkonstruktion von den Herstellern angegeben werden.)

Der Schutz bei Fehlerströmen ist nicht erforderlich in PV-Anlagen, die nur aus einem oder zwei parallelen Strängen bestehen und keine Speicherbatterie enthalten, wenn die Rückstromfestigkeit $I_{MOD_REVERSE}$ der PV-Module mindestens ihrem Kurzschlussstrom I_{SC_STC} entspricht (siehe Bild 1).

Die Modulhersteller geben für jeden Modultyp entweder Werte für die Rückstromfestigkeit oder alternativ den größten Sicherungsbemessungsstrom an. Dieser ist allerdings ohne genauere Sicherungsspezifikation nicht sehr aussagekräftig.

ANMERKUNG - Manche Modulhersteller geben einerseits einen maximalen Rückstrom an, der etwa gleich dem Bemessungskurzschlussstrom I_{SC_MOD} ist, und andererseits einen wesentlich größeren Sicherungsbemessungsstrom. Diese verwirrenden Angaben beruhen anscheinend darauf, dass der maximale Rückstrom für die Begrenzung absichtlich zur Eis- und Schneebeseitigung eingespeiste Rückströme gilt und der Sicherungsbemessungsstrom für den Schutz im Fehlerfall.

Wenn der Modulhersteller einen größten Sicherungsbemessungsstrom angibt, muss dieser eingehalten werden. Im Zweifelsfall muss der genaue Sicherungstyp mit dem Hersteller geklärt werden.

Wenn der Modulhersteller einen Wert für $I_{MOD_REVERSE}$ angibt, kann man davon ausgehen, dass dieser nach IEC 61730 einen 2 h-Test bei $1,35 I_{MOD_REVERSE}$ ohne Schäden überstanden hat. Daraus folgt, dass ein wirksamer Schutz vorhanden ist, wenn die Sicherung im Modulstromkreis bei $1,35 I_{MOD_REVERSE}$ innerhalb von zwei Stunden anspricht.

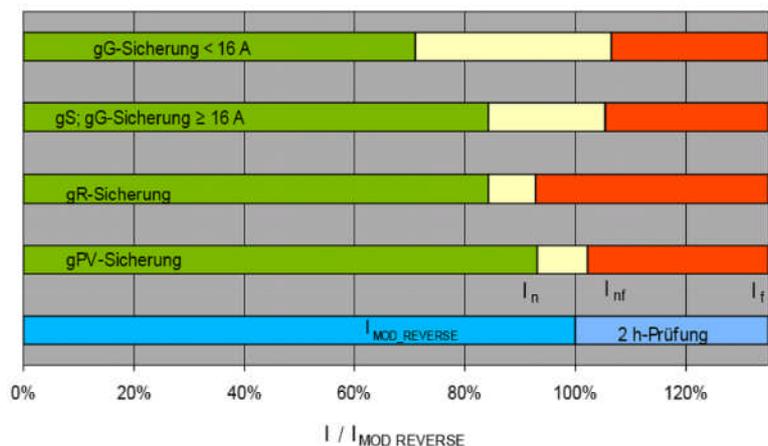


Bild A12 - Zuordnung von Strangsicherungen

I_n - Sicherungsbemessungsstrom I_{nf} - Kleiner Prüfstrom; I_f - Großer Prüfstrom

Für verschiedene Sicherungstypen mit unterschiedlichen konventionellen Schmelzzeiten und konventionellen Schmelzströmen I_f gibt es deshalb unterschiedliche Zuordnungsregeln, wie unten aufgeführt und in Bild A12 dargestellt. Da die konventionelle Schmelzzeit üblicher Strangsicherungen 1 h beträgt und somit deutlich unter der Stehzeit des Moduls von 2 h liegt, enthält die folgende Auswahlregel für den größten Sicherungsbemessungsstrom I_n von Strangsicherungen noch eine zusätzliche Sicherheitstoleranz:

$$I_f \leq 1,35 I_{MOD_REVERSE}$$

Für genormte Sicherungen nach IEC 60269 gelten damit die folgenden Auswahlregeln:

$$I_n \leq 0,85 I_{MOD_REVERSE} \text{ für "gR", "gS" oder "gG" Sicherungseinsätze } > 10 \text{ A}$$

$$I_n \leq 0,7 I_{MOD_REVERSE} \text{ für "gG" Sicherungseinsätze } \leq 10 \text{ A}$$

gPV-Sicherungseinsätze, die speziell für den Schutz von PV-Strängen entwickelt wurden und noch nicht genormt sind, haben einen konventionellen Schmelzstrom von $I_f = 1,45 I_n$ und die entsprechende Zuordnung

$$I_n \leq 0,9 I_{MOD_REVERSE}$$

Bis zur Veröffentlichung einer Norm für diesen Sicherungstyp sollte diese Anwendungsregel nur mit Zustimmung des Sicherungsherstellers angewandt werden.

Sicherungen oder Sperrdioden?

In manchen Anlagen werden Sperrdioden in den Strangleitungen zur Sammelschiene eingebaut. Diese können einen Teil der Rückströme verhindern (z. B. bei Fehler a in Bild A10) aber nicht alle (z. B. nicht bei Fehler b in Bild A10). Sperrdioden sind kein Ersatz für Strangsicherungen. Sie können in Anlagen mit Speicherbatterien aber notwendig sein, um die nächtliche Entladung zu verhindern. Ihre Anwendung sollte auch auf diese Fälle begrenzt sein und ansonsten vermieden werden.

Sperrdioden sind kein zuverlässiger Schutz gegen zu große Rückströme, da sie selbst bei Überströmen und Überspannungen fehleranfällig sind. Außerdem haben sie im Vergleich zu Sicherungen um ein Vielfaches größere Verlustleistungen (Bild A13), wodurch sie den Wirkungsgrad von PV-Anlagen merklich beeinträchtigen können und erheblich zur Erwärmung der Anschlusskästen beitragen.

Da sich die Sicherungstechnik und die internationale Normung im Einklang mit Photovoltaiktechnik noch ständig weiterentwickeln, sind die Anwender gut beraten, sich stets auf dem Laufenden zu halten und aktuelle und detaillierte Information bei den in [Pro Fuse International](#) organisierten Sicherungsspezialisten einzuholen.

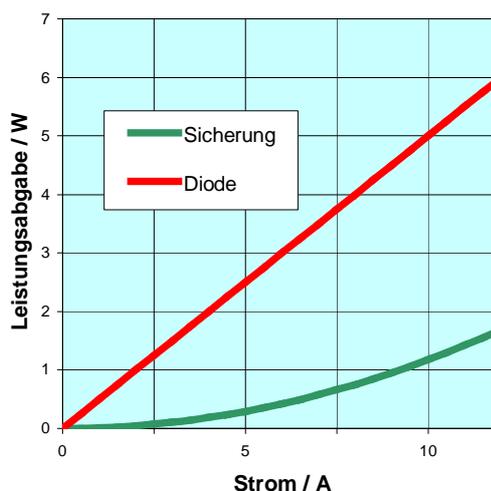


Bild A13 - Leistungsabgabe von Sperrdioden und PV-Strangsicherungen