



Schutzfunktion von Strangsicherungen in PV-Anlagen

Projektdurchführung: Peter Funtan, IWES, Kassel
Projektbetreuung im Auftrag des NH/HH-Recycling e. V. :
fuseXpert Dr.-Ing. Herbert Bessei, Bad Kreuznach



Eine Initiative der deutschen Sicherungshersteller

Wozu Sicherungen in PV-Anlagen?

Behauptung:

Sicherungen sind in PV-Anlagen nicht sinnvoll einzusetzen, weil

- Der maximale Strom durch die Sonneneinstrahlung begrenzt ist,
- der Kurzschlussstrom nur unwesentlich den maximalen Betriebsstrom überschreitet.



Diese Behauptungen treffen zu für den normalen Betrieb einer fehlerfreien Anlage.

Dazu Sicherungen in PV-Anlagen!

PV-Sicherungen schützen Module und Leitungen bei

- **Rückspeisungen aus dem Netz**
- **Rückspeisungen aus einer Batterie**
- **Rückströmen aus parallelen Strängen**

Im Rahmen des Projekts sollen Bedingungen für das Auftreten schädlicher Rückströme in PV-Anlagen untersucht werden.



Projektziele

- **Untersuchung der Betriebszustände mit Rückstrompotenzial in PV-Anlagen**
- **Ermittlung der Stromstärken von Rückströmen**
- **Berücksichtigung von Mehrfachfehlern**
- **Berücksichtigung möglicher Betriebszustände bei Fehlereintritt**

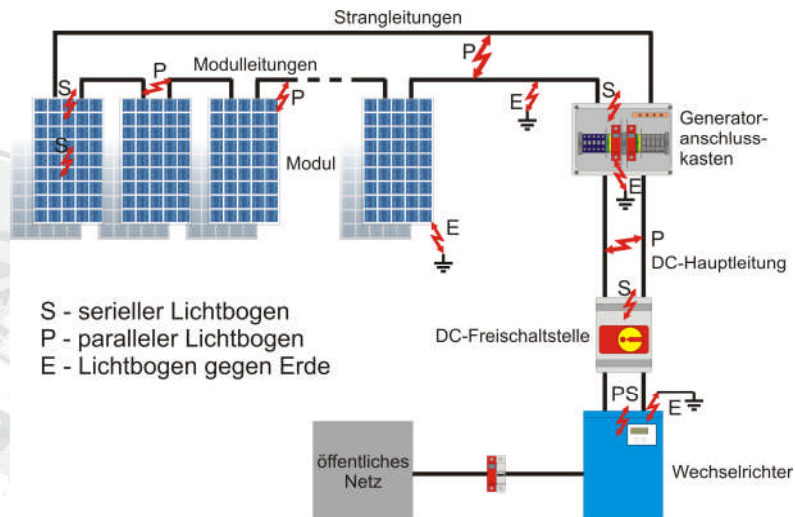


Projektvorgaben

- Es werden nur Module der Anwendungsklasse A berücksichtigt (Schutzklasse II).
- Es werden keine PV-Systeme mit separatem Speicher (z. B. Batterie).
- Die Untersuchungen konzentrieren sich ausschließlich auf PV-Anlagen zum Netzparallelbetrieb.
- Relevante Netzformen oder Wechselrichterkonzepte werden berücksichtigt.
- Der Einzelstrang als Last wird als „worst case“ betrachtet.

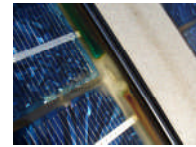
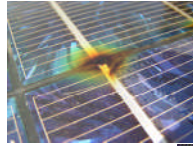


Lichtbogen- und Erdschlussrisiko

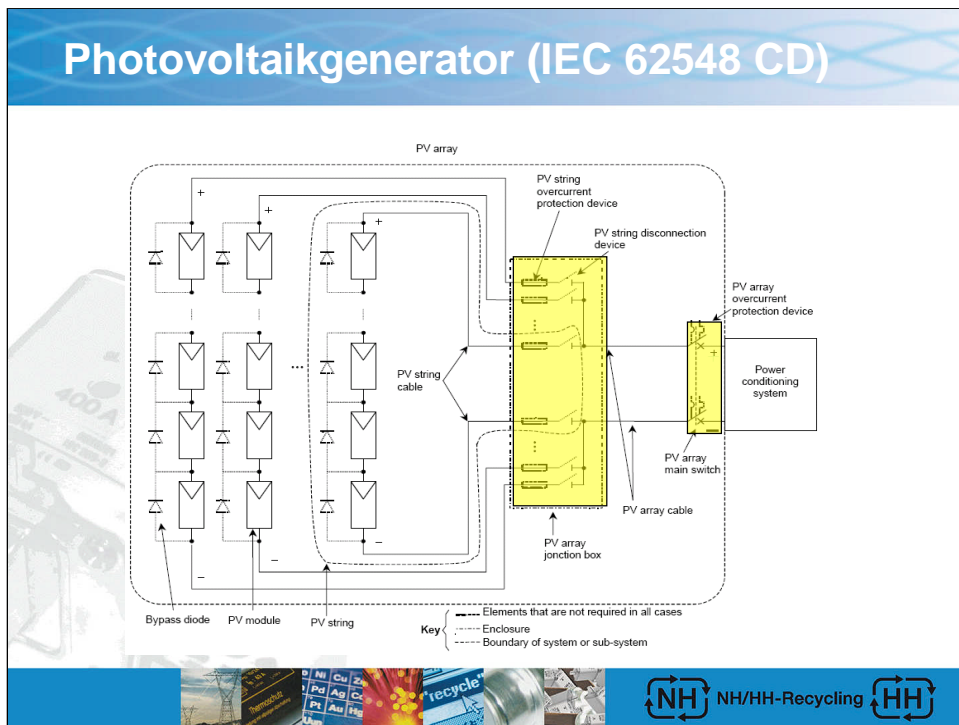


Fehlerursachen

- Materialversagen
- Ausfall von Bauteilen
- Installationsfehler
- Konstruktive Mängel
- Planungsfehler
- Atmosphärische Überspannungen
- Witterungseinflüsse
- Materialermüdung
- Mechanische Schäden



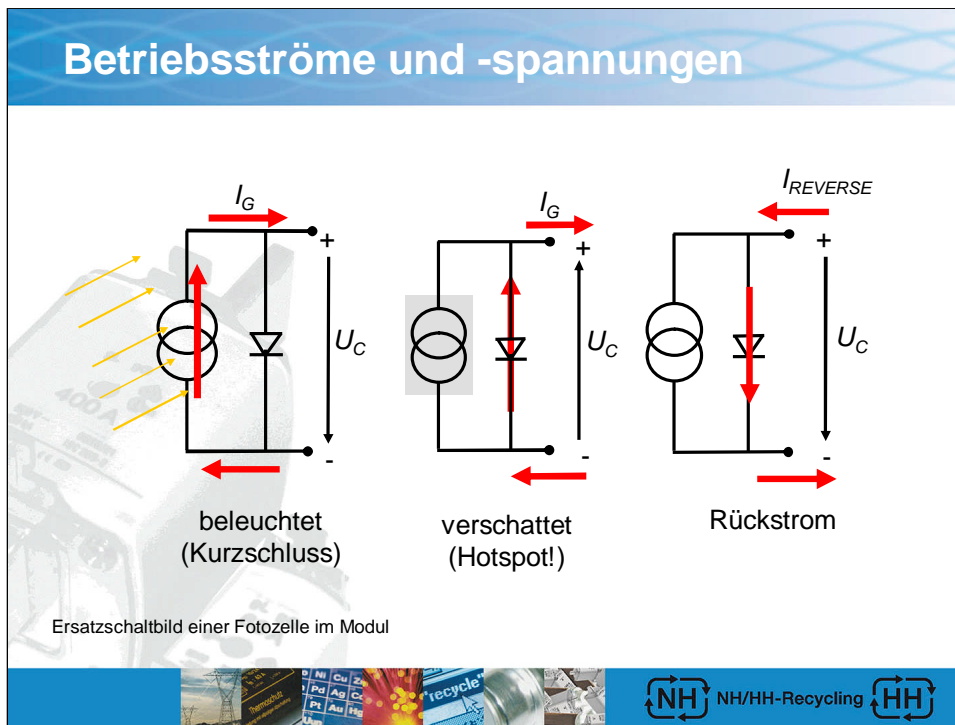
Photovoltaikgenerator (IEC 62548 CD)



Bei größeren PV-Generatoren werden eine Vielzahl von PV-Modulen zu Strängen in Serie geschaltet, um die gewünschte Generatorspannung zu erhalten. Durch Parallelschaltung mehrerer Stränge wird der Generatorstrom erhöht.

Die Stränge werden in einem Anschlusskasten parallel geschaltet. Dieser Kasten enthält in der Regel auch die PV-Strangsicherungen.

Betriebsströme und -spannungen



Je nach Betriebszustand können sich an den PV-Zellen und Modulen verschiedene Ströme und Spannungen einstellen. Dabei kann die Zelle als Stromquelle oder als Last betrieben werden.

Bei kurzgeschlossenem Modul fließt kein Strom über die Diode (links dargestellt).

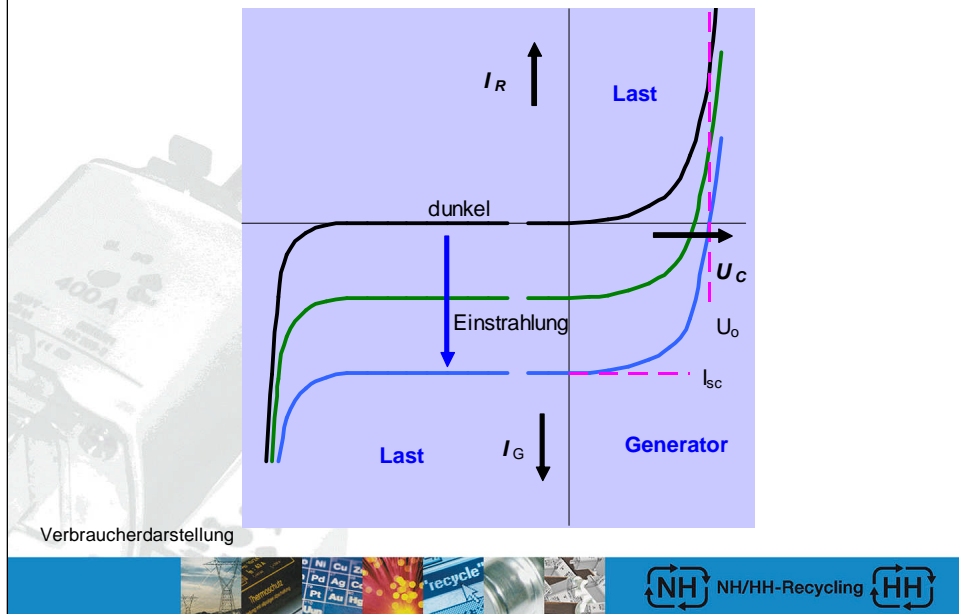
Bei MPP-Betrieb fließt der Differenzstrom, bei Leerlauf der gesamte Strom im Rückschluss über die Diode (nicht dargestellt).

Bei totaler Verschattung einer PV-Zelle im Modul fließt der Strom in Sperrrichtung über die Diode und erzeugt einen Hotspot (Mitte).

Ist die Generatorspannung größer als die Strangspannung, kehrt sich die Stromrichtung um. Der Rückstrom fließt in Durchlassrichtung über die Diode (rechts dargestellt).

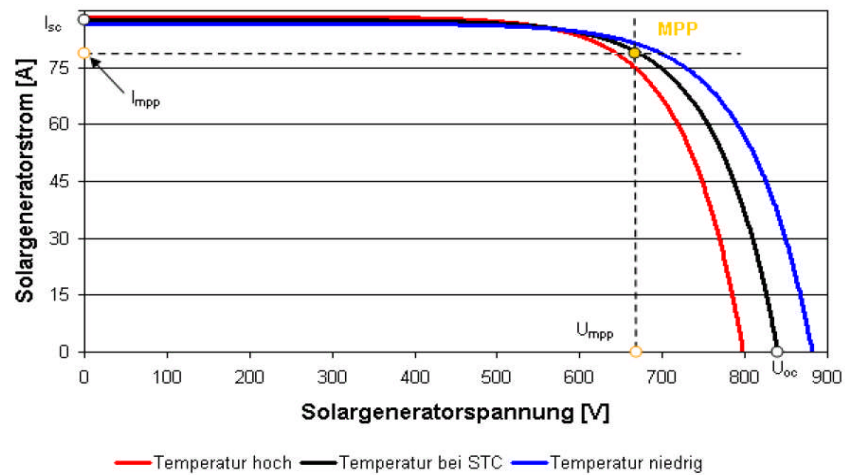
Ein Überstromschutz durch PV-Strangsicherungen ist nur erforderlich, wenn die Zellen und Module durch Spannungsumkehr in Durchlassrichtung beansprucht werden.

PV-Zellenkennlinien



Bei Modulkennlinien wird nur der 4. Quadrant in Generatordarstellung (mit geklappter Y-Achse) gezeigt.

Kennlinie eines PV-Generators



MPP = Maximum Power Point.

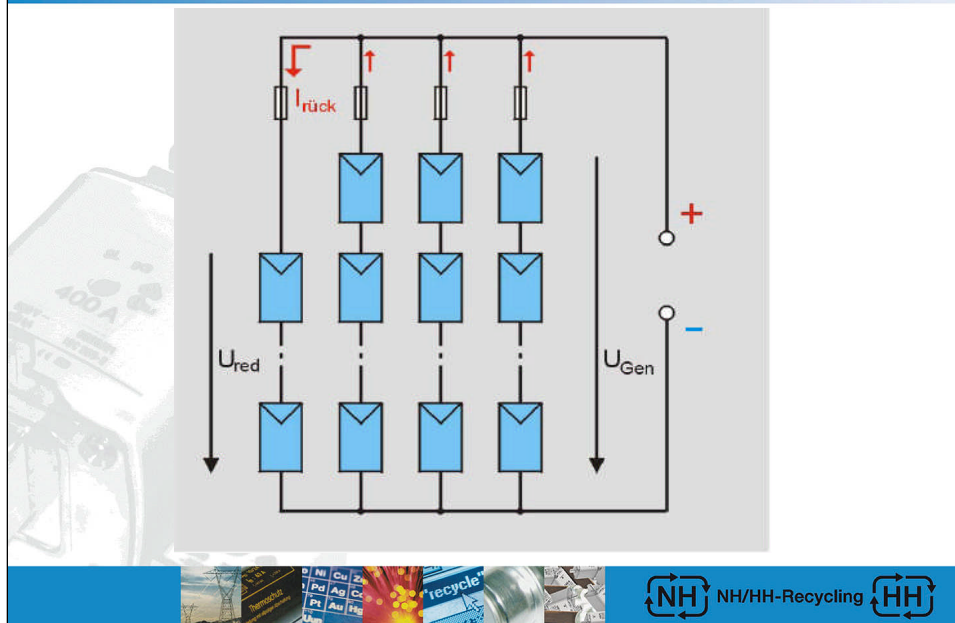
Dieser Betriebspunkt wird vom Wechselrichter automatisch gesucht und entsprechend den Witterungsverhältnissen nachgeführt.

STC = Standard Test Conditions: Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 , eine Umgebungstemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein Air Mass (AM) Faktor von 1,5. Dieser Faktor definiert die spektrale Verteilung des Sonnenlichts.

Der Kurzschlussstrom (I_{sc}) eines Solargenerators kommt zum Fließen, wenn beide Pole des Solargenerators direkt miteinander verbunden werden. Er ist proportional der Bestrahlungsstärke. Nach EN 61730-1 müssen mögliche höhere Bestrahlungsstärken mit einem Faktor von 1,25 berücksichtigt werden. Bemessungsstrom = $1,25 I_{sc}$.



Rückströme, eine Folge reduzierter Strangspannung



Rückströme treten generell auf, wenn ein PV-Strang eine gegenüber den parallelen Strängen reduzierte Leerlaufspannung hat.

Rückströme können ein Vielfaches des Bemessungskurzschlussstroms erreichen.

Die Rückstrombelastbarkeit von PV- Modulen ist begrenzt.

Rückströme

Mögliche Ursachen im regulären Betrieb:

- Unterschiedliche Bestrahlungsstärke
- Unterschiedliche Modultemperaturen
- Teilverschattung durch Schnee
- Hohe Temperaturdifferenz
- Modulmismatching



Rückströme

Mögliche Ursachen im fehlerhaften Betrieb:

- Unterbrechungen
- Erdschlüsse
- Defekte Bypassdioden
- Installationsfehler
- Planungsfehler



Foto: GeckoLogic GmbH



Rückstrompotenzial

Betriebszustand

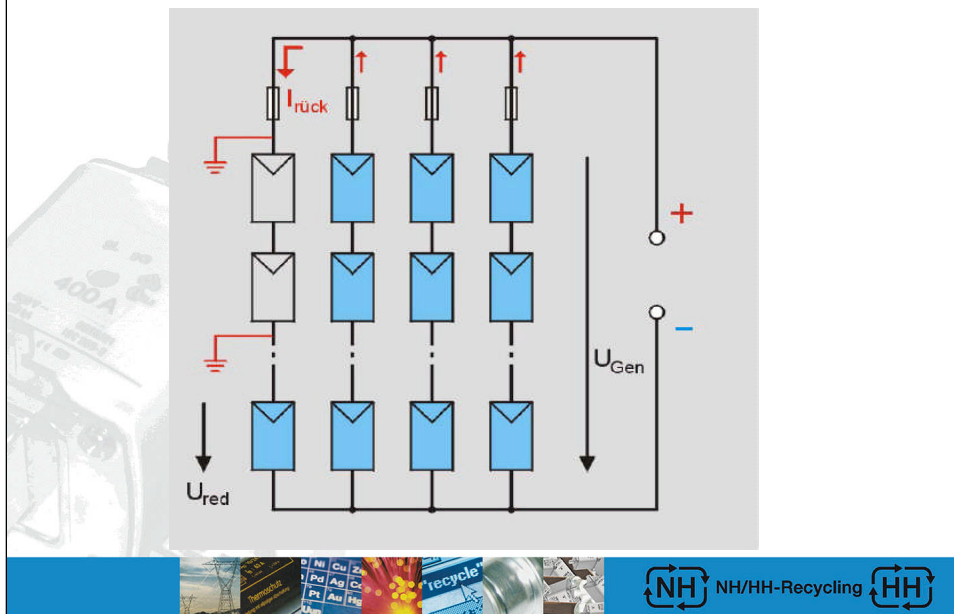
- Regulärer Betrieb
- Abweichende Bestrahlung
- Schneebedeckung
- Großer Temperaturunterschied
- Mismatch
- Leitend defekte Bypassdioden
- Erdschluss (einfach)
- Doppelerdschluss
- Installationsfehler (falsche Polung)

Rückstrompotenzial

- Keine Rückströme
- Keine Rückstromrelevanz
- Keine Rückströme möglich
- Mögliche Rückströme unkritisch
- nicht rückstrom-relevant
- Schädliche Rückströme nur bei mehreren defekten Dioden
- Keine Auswirkungen
- Schädliche Rückströme je nach Lage der Erdschlüsse
- Schädliche Rückströme möglich



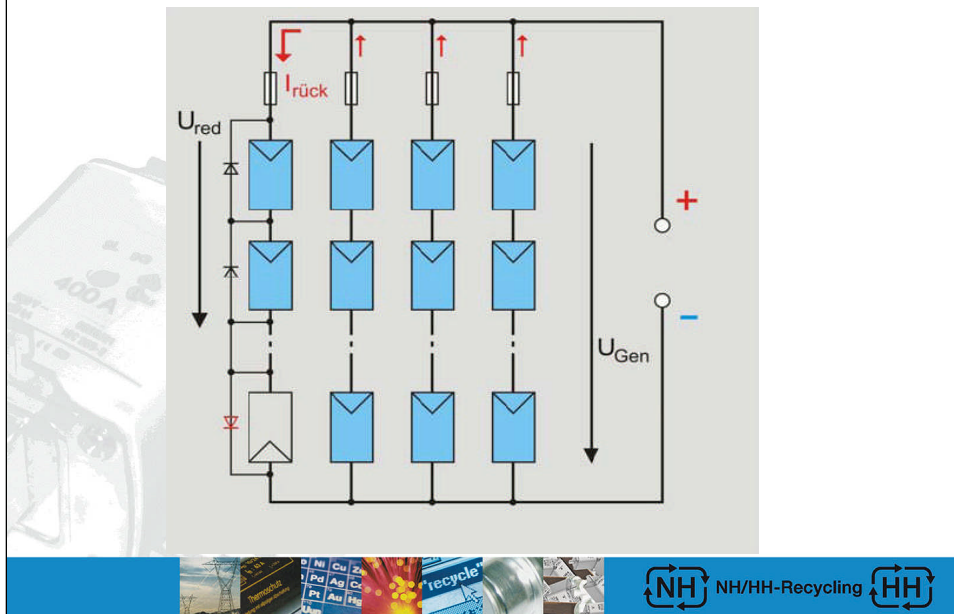
Doppelerdschluss im Strang



Je nach Anzahl der kurzgeschlossenen Module und der parallelen Stränge können schädliche Rückströme fließen.

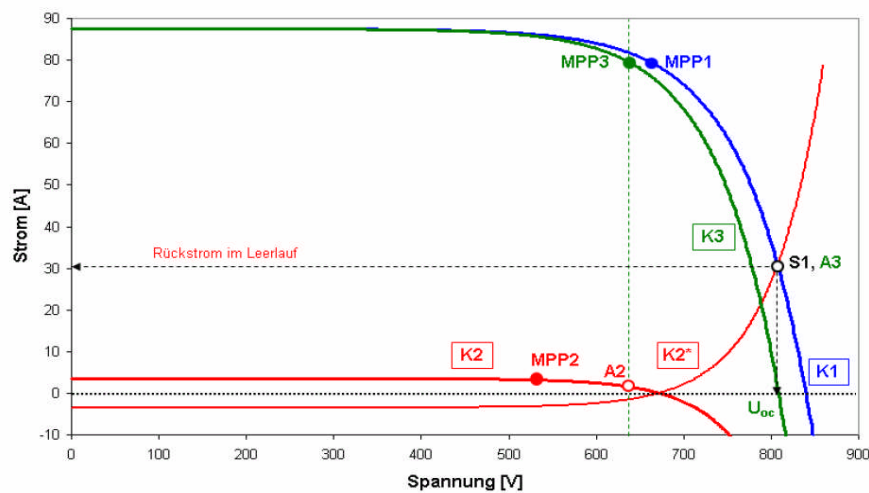
Wahrscheinlichster Fehlerfall.

Falsche Polung



Bewirkt wie ein Doppelerdschluss eine Strangverkürzung.
Kommt bei unübersichtlichen PV-Anlagen vor.

Rückstrom in el. verkürztem Strang



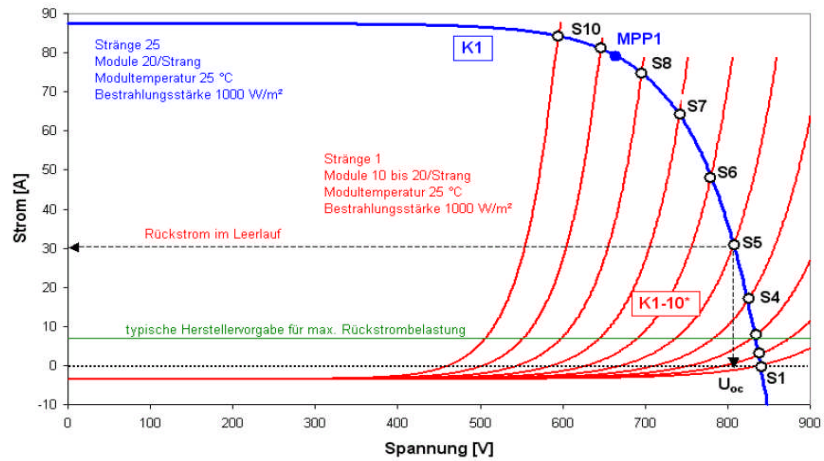
Die Kennlinie K1 kann einem Solargenerator mit 25 Strängen zugeordnet werden.

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 abgeleitet werden. Für alle Kennlinien sind die MPP-Punkte (MPP1, MPP2, MPP3) eingezeichnet.

Der größte Rückstrom ergibt sich bei leer laufendem Generator (Arbeitspunkt A3).

Größe des Rückstroms



Der Schnittpunkt S1 entspricht einem nicht elektrisch verkürzten Strang im Vergleich zum Restgenerator. Bei höheren Spannungsdifferenzen stellen sich entsprechend höhere Rückströme ein. Im Bild 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 den resultierenden Rückstrom gerade noch dauerhaft führen kann. Rückströme können aber wesentlich größer werden.

Größe des Rückstroms

- Die Größe des Rückstroms steigt mit der elektrischen Verkürzung des geschädigten Strangs und der Anzahl paralleler Stränge.
- Rückströme können ein Vielfaches des Modul-Bemessungsstroms betragen.
- Als „worst case“ muss der Leerlauf eines kristallinen Solargenerators angenommen werden.
- Aus Herstellerangaben ergibt sich eine typische Rückstrombelastbarkeit in Größe des zweifachen Kurzschlussstroms I_{C-STC} .



Rückstrombelastbarkeit

Die Norm DIN EN 50380 „Datenblatt und Typschildangaben von Photovoltaik-Modulen“ fordert vom Hersteller folgende Angaben:

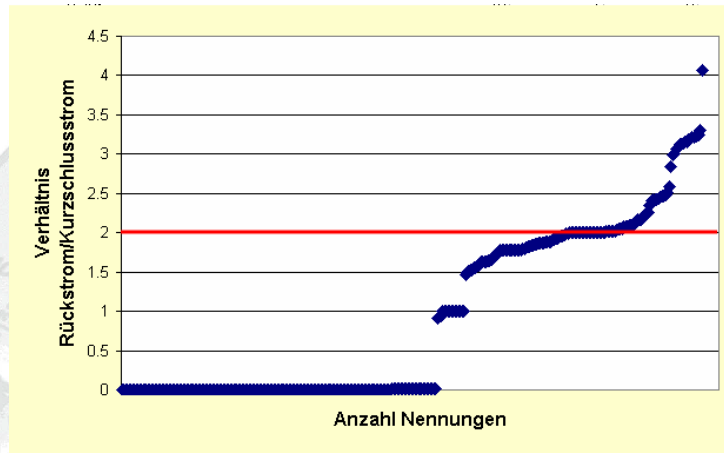
- Rückstrombelastbarkeit des Moduls
- Art des Überstromschutzes

Die dafür erforderlichen Prüfungen sind in den maßgebenden Normen beschrieben. Jedoch werden diese Angaben in den Datenblättern nach wie vor nicht konsequent aufgeführt. Das trifft besonders auf die Art der Absicherung zu.



Werden mehrere Modulstränge in einem Solargenerator gemeinsam parallel betrieben, muss die Rückstrombelastbarkeit der verwendeten Module berücksichtigt werden. Diese definiert sich durch eine maximale Stromstärke, mit der das Modul in Durchlassrichtung betrieben werden kann, ohne eine dauerhafte Schädigung des Moduls zu verursachen.

Herstellerangaben zur Rückstrombelastbarkeit



Einfluss der Modultechnologie

- **Dünnschichtmodule sind aufgrund der flacheren Kennliniencharakteristik weniger rückstromgefährdet als kristalline Module.**
- **Mit Angaben zur Rückstrombelastbarkeit von Dünnschichtmodulen sind die Hersteller allerdings vorsichtiger.**
- **Dünnere Gläser bei kristallinen Modulen vermindern ebenfalls die Rückstrombelastbarkeit.**



Sind Sicherungen erforderlich?

Kriterien zur Beantwortung dieser Frage:

- **Anzahl der parallel verfügbaren Stränge,**
- **Ursache einer Rückspeisung in Art und Intensität,**
- **Erdungskonzept des Solargenerators,**
- **Wechselrichtertopologie,**
- **Technischen Daten der Module und deren Technologie**



Keine Strangsicherungen sind erforderlich

- bei Anlagen mit Modulwechselrichtern (Wechselstrommodulen),
- bei Anlagen mit Strangwechselrichtern,
- wenn der Summenstrom der parallelen Stränge die Rückstrombelastbarkeit der Module nicht überschreitet

und

- keine Rückspeisung aus dem Netz möglich ist,
- keine Batterie im Gleichstromkreis vorhanden ist.



Strangsicherungen sind erforderlich,

- wenn schädliche Rückspeisungen aus anderen Energiequellen möglich sind,
 - wenn der Summenstrom des Generators die Rückstrombelastbarkeit der Module überschreitet
- und
- fehlerhafte Verkürzungen eines Stranges nicht auszuschließen sind.



Fazit

- Im regulären Betrieb von Solargeneratoren sind auch bei großer Strangzahl keine gravierenden Rückströme zu erwarten.
- Im Fehlerfall (el. Strangverkürzung) können unzulässig hohe Rückströme auftreten.
- Ein um mehr als 10 % verkürzter Strang eines größeren Generators kann zu unzulässig hohen Rückströmen führen.
- Der Leerlauf des PV-Generators ist als „worst case“ anzunehmen.
- Bei PV-Anlagen muss mit Mehrfachfehlern durch Verschleiß und äußere Einwirkungen gerechnet werden.
- Bei Dünnschichtmodulen sind sowohl die Rückströme als auch die Reststrombelastbarkeit tendenziell geringer.
- Neuere Module mit dünneren Gläsern haben ebenfalls tendenziell geringere Rückstrombelastbarkeit.

