

Fehlerströme und Schutztechniken in Photovoltaikanlagen

**Feldmessungen zum Einsatz von
Sicherungen in Photovoltaikanlagen**

Zwischenbericht 03.08.2011

□

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

□

1	Rückstromuntersuchungen am realen Solargenerator.....	2
2	Durchführung der Feldtests	2
2.1	Wechselrichterbetrieb mit Lichtbogen	4
2.2	Rückströme bei verkürztem Strang.....	8
2.3	Rückstrom im Leerlauf des Solargenerators.....	10
2.4	Rückstromverhältnisse bei vertauscht eingebauten Modulen	11
3	Langzeittest von Sicherungen unter realen Einsatzbedingungen	13
4	Zusammenfassung.....	17

1 Rückstromuntersuchungen am realen Solargenerator

Vorangegangene theoretische Betrachtungen haben ergeben, dass im regulären Betrieb eines Solargenerators keine signifikant hohen Rückströme auftreten, die zur Schädigung von Leitungen oder Solarmodulen führen könnten. Anders sieht dies im Fehlerfall aus. Es wurde gezeigt, dass Fehlerursachen sehr unterschiedlich sein können und vom Materialversagen über Ausfall von Bauteilen bis hin zu Installationsfehlern reichen. Im Wesentlichen sind dies:

Einfache oder mehrfache Erdschlüsse durch Versagen der Isolation bei Modulen, Leitungen oder Steckverbindungen. Häufigste Ursachen sind hier Materialversagen, konstruktive Mängel oder ein Verstoß gegen die anerkannten Regeln der Technik bei der Installation der Module

Immer häufiger sind defekte Bypassdioden Anlass dafür, dass Module oder Teile eines Moduls kurzgeschlossen werden. Defekte hier können durch atmosphärisch eingekoppelte Überspannungen oder durch nicht hinreichend ausgeführtes Wärmemanagement erfolgen.

Eher selten, aber dennoch gelegentlich Anlass für Rückströme sind Nachlässigkeiten bei der Planung oder Installation von Solarmodulen. Reicht die Dachfläche nicht aus werden gelegentlich verkürzte Stränge parallel zum Restgenerator betrieben. Gleiches trifft zu wenn Module in einem Strang mit falscher Polarität eingebaut werden.

Alle Fehlerursachen die zu einem Rückstrom führen sind also damit zu begründen, dass innerhalb eines Solargenerators verkürzte Stränge vorhanden sind. Letztendlich ist es egal wodurch diese Verkürzung verursacht wird. Bei den durchzuführenden Feldtests wurde dies in der Form berücksichtigt, dass Einzelmodule einfach kurzgeschlossen wurden. Auf diese einfache Weise konnten alle möglichen Fehlerfälle nachgestellt werden.

2 Durchführung der Feldtests

Ziel der Untersuchungen im Rahmen von Feldtests war es die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse durch Messungen zu bestätigen. Wie zuvor beschrieben wurde die Wirkung von Fehlern durch Kurzschließen einzelner Module nachempfunden. Es wurden also keine einzelnen Bypassdioden kurzgeschlossen oder bewusst Erdschlüsse hergestellt. Lediglich der Fall von vertauschten Modulen (umgekehrter Einbau) wurde messtechnisch untersucht.

Speziell für diese Untersuchungen wurde ein Test-Solargenerator mit 50 Modulen des Typs SM50 (Siemens) aufgebaut. Der Generator besteht aus 5 Strängen, wobei jeder Strang aus 10 seriell geschalteten Modulen besteht.

Moduldaten: Bemessungsleistung 50 Wp, Kurzschlussstrom 3,1 A, Leerlaufspannung 21,5 V

Es handelt sich dabei um ein Modul mit kristallinen Zellen. Die Messungen wurden bei guten Bestrahlungsstärkeverhältnissen im Bereich von 900 – 920 W/m² durchgeführt. Die Maximale Bemessungsleistung wurde somit nicht ganz erreicht. Für die gesamte Dauer der Versuche ist deshalb mit Strangströmen im Bereich von 2,6 bis 2,8 A zu rechnen.

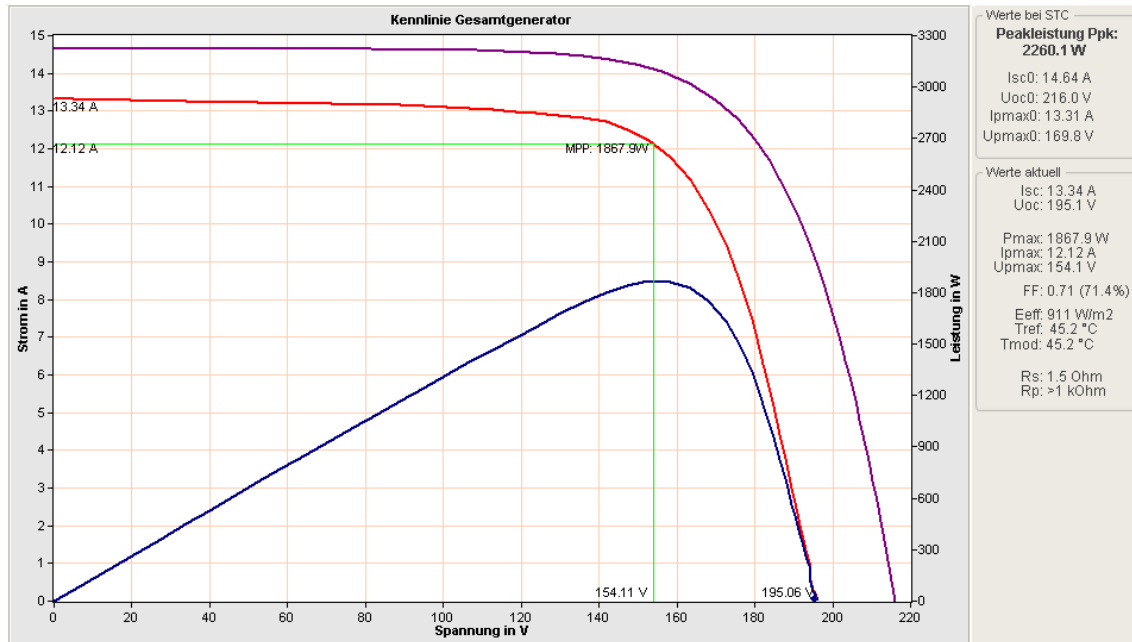


Bild 1: Gemessene Generatorkennlinie (rot) während der Versuchsdurchführung

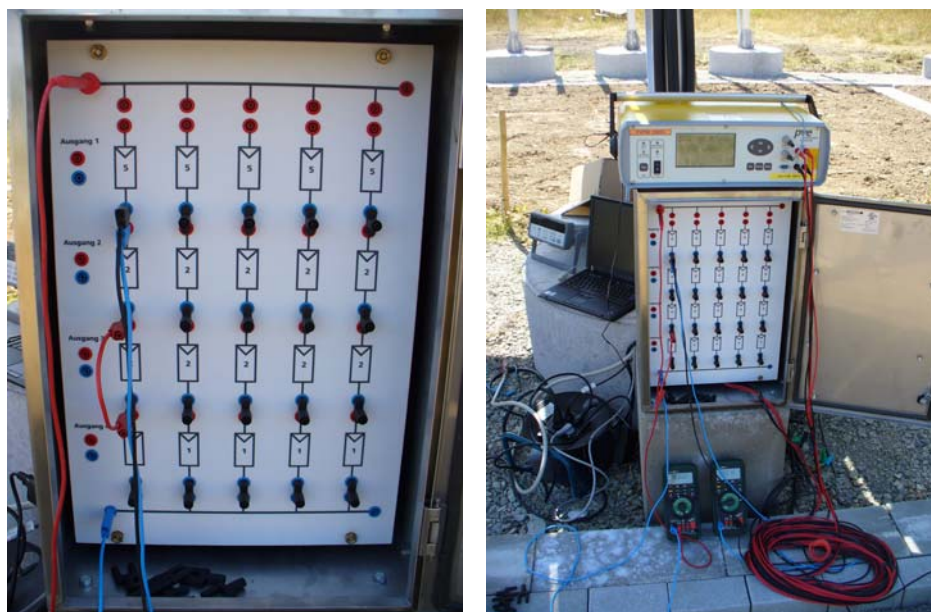


Bild 2: Messaufbau mit Messequipment

2.1 Wechselrichterbetrieb mit Lichtbogen

Bei den Fehlerbetrachtungen zum Rückstrompotenzial wurde ausgeführt, dass ein serieller Lichtbogen bei Betrieb des Solargenerators in Verbindung mit einem Wechselrichter keine Gefahr von Rückströmen birgt. Es wurde angenommen, dass lediglich eine Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Generatorkennlinie erfolgen wird.

Ein Lichtbogen kann prinzipiell an jeder Stelle innerhalb eines Stranges auftreten, wenn dafür die Voraussetzungen vorliegen. Man unterscheidet zwischen seriellen und parallelen Lichtbögen. Parallele Lichtbögen können z. B. mit Erdschlüssen einhergehen. Beschädigungen der Module oder des Leitungssystems können Gründe dafür sein. Diese Lichtbögen lassen sich in der Regel schwerer beherrschen als serielle Lichtbögen. Im ungünstigen Erdschlussfall mit Verkürzung eines Stranges können Strangsicherungen zumindest vermeiden, dass der nicht geschädigte Generatorteil den Lichtbogen an der Schadstelle zusätzlich speist. Stromkreise mit Lichtbögen innerhalb des Solargenerators lassen sich nicht beherrschen. Lichtbögen bergen immer eine Brandgefahr und sollten deshalb unbedingt vermieden werden. Teilweise wird auch der Einsatz von Sicherungen in DC-Systemen mit Vorbehalten betrachtet. Gute Kontaktbeschaffenheit der Sicherungshalter über die gesamte Lebensdauer der Anlage und ein sicheres Abschalten im Anforderungsfall sind deshalb unbedingt erforderliche Grundvoraussetzung für einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Dies gilt selbstverständlich auch für den Fall, dass die Sicherung im Falle eines Rückstromes auslösen muss.

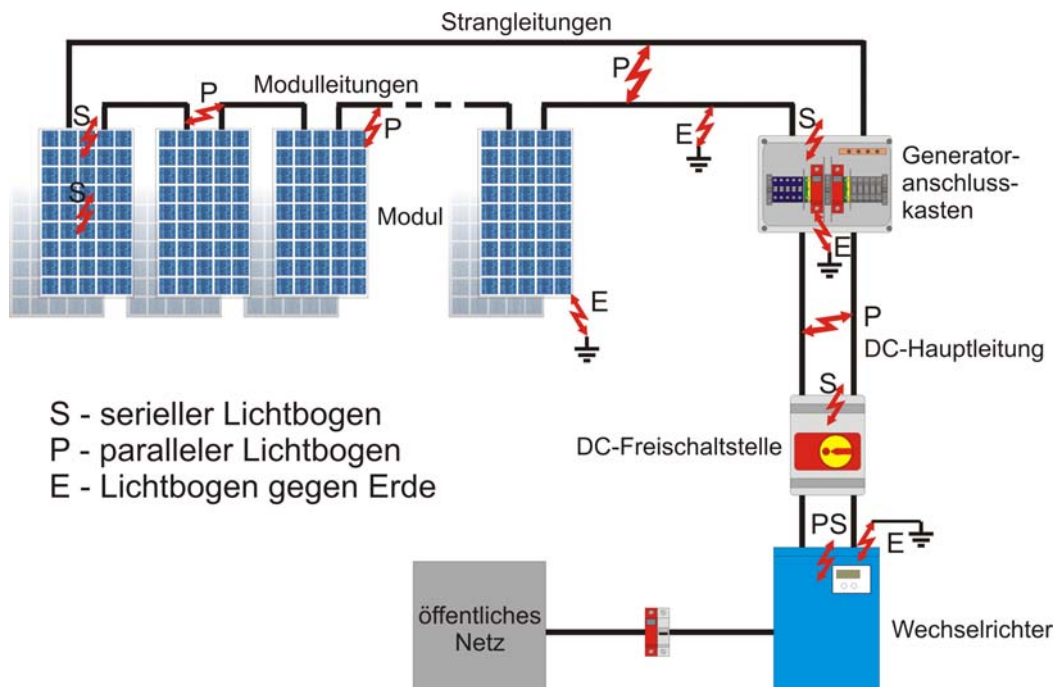


Bild 3: Möglichkeiten der Lichtbogenbildung bei Photovoltaik-Anlagen

Die durchgeführten Feldversuche mit Lichtbogenwirkung beziehen sich ausschließlich auf den seriellen Lichtbogen. Der parallele Lichtbogen wird gleichgesetzt mit einer Verkürzung eines Stranges durch einen Fehler und wird deshalb bei den nachfolgenden Betrachtungen angesprochen.

Zur Bewertung von seriellen Lichtbögen auf ein mögliches Rückstrompotenzial an einer aktiven Photovoltaikanlage wurde oben beschriebene Anlagenkonfiguration an einem Wechselrichter des Typs Safty String PS 1700 des Herstellers Aixcon betrieben. Von den fünf parallelen Strängen wurde in einem Strang ein serieller Lichtbogen durch manuelle Trennung von zwei Leitungsenden erzeugt. Bild 4 links zeigt einen Lichtbogen bei kurzgeschlossenem Strang. Beim Auseinanderziehen der Leitungsenden kann ein stehender Lichtbogen erzeugt werden.



Bild 4: Eingesetzter Wechselrichter (links), gezogener Lichtbogen im Leerlauf des Solargenerators (rechts)

Bei angeschlossenem Wechselrichter war die Ausprägung eines stehenden Lichtbogens nicht möglich. Die Wirkung beschränkte sich im Wesentlichen auf die Entstehung von Funken. Die nachfolgenden Bilder zeigen den zeitlichen Verlauf der Strangströme. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden der Strang 1 in dem der Lichtbogen gezündet wurde und die verbleibenden intakten Stränge 2-5 in unterschiedlichen Diagrammen dargestellt. Das Messintervall betrug 1 Sekunde. Es wird jeweils der zeitliche Verlauf dargestellt. Die gesamte Prüfdauer betrug 10 Minuten. Das obere Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf des Stromes in Strang 1.

Während der ersten Minuten werden alle Stränge gemeinsam am Wechselrichter betrieben. Die Stränge 2-5 befinden sich in etwa auf identischem Niveau in Bezug auf die Höhe des Strangstromes, wie Strang 1

Es folgt eine Phase von ca. 30 Sekunden in dem Strang 1 von den verbleibenden Stränge getrennt wird. Auf die verbleibenden Stränge und den Wechselrichter hat dies keine Auswirkungen.

Es folgt ein Zeitabschnitt von ca. 1,5 Minuten in dem Versucht wurde in Strang 1 einen Lichtbogen zu erzeugen. Während dieser Phase sind deutliche Einbrüche der Ströme in den vier verbleibenden

Strängen zu verzeichnen. Die Ströme sinken in den Bereich von 0,5 bis 0,8 A ab. In Bezug auf den Strom, erreicht Strang 1 hingegen wieder das Niveau des regulären Betriebsstromes.

Für die verbleibenden Minuten wurden zur Zündung des Lichtbogens zeitlich größere Abstände gewählt. Die etwas höheren Ströme sind auf Änderungen in der Bestrahlungsstärke zurückzuführen. Die Strangströme sinken auf ein noch niedrigeres Niveau ab. Zeitweise schaltet der Wechselrichter sogar komplett ab.

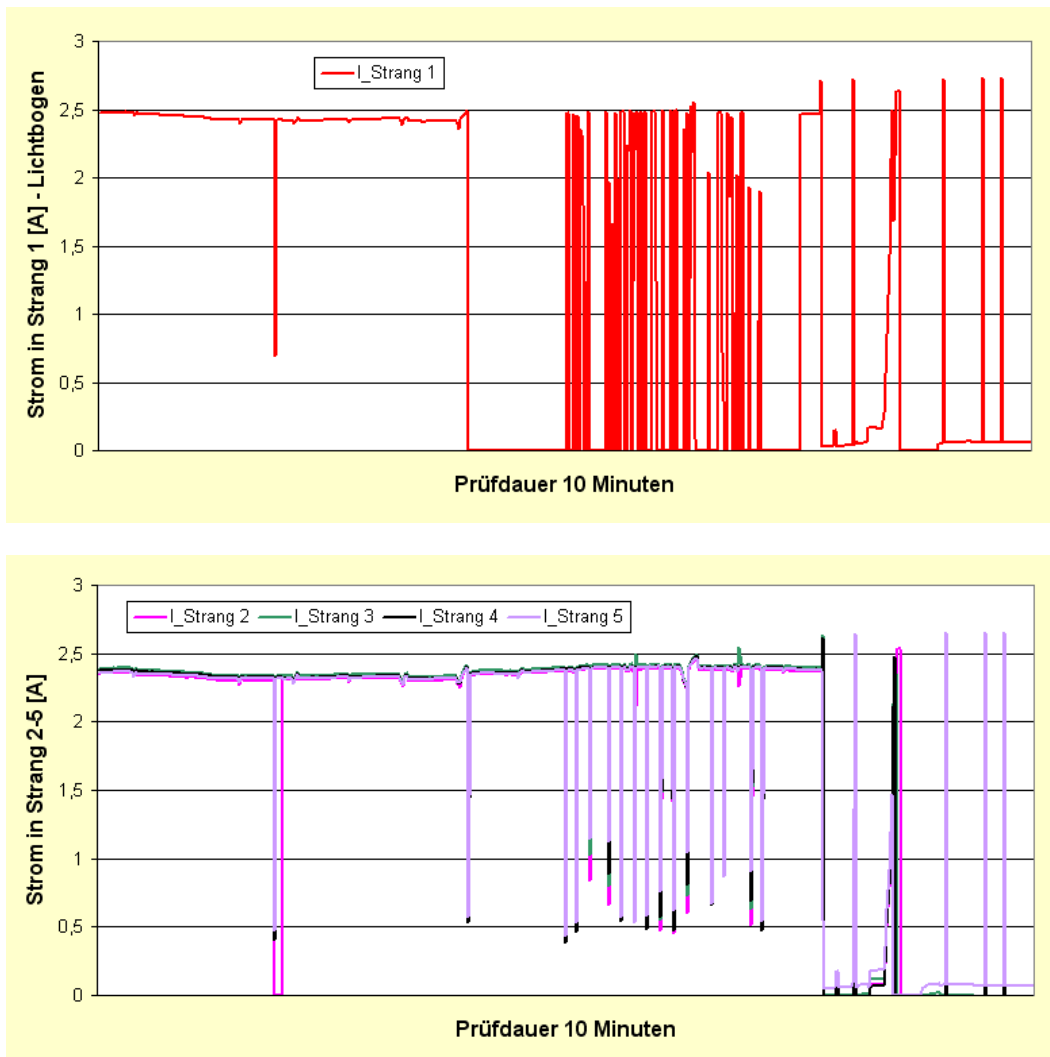


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Strangströme bei Lichtbogenausbildung

Das Wechselrichterverhalten am Solargenerator kann besser verstanden werden, wenn die Strom und Spannungsverhältnisse in den einzelnen Betriebszuständen auf die Generatorkennlinie bezogen werden. Im nachfolgenden Diagramm sind zum einen die Strom-/Spannungsverhältnisse am Wechselrichtereingang und in den Strängen 1 und 2 dargestellt. Parallel ist in Bild 7 der zeitliche Verlauf des Generatorstromes und -spannung während der Versuchsdurchführung dargestellt.

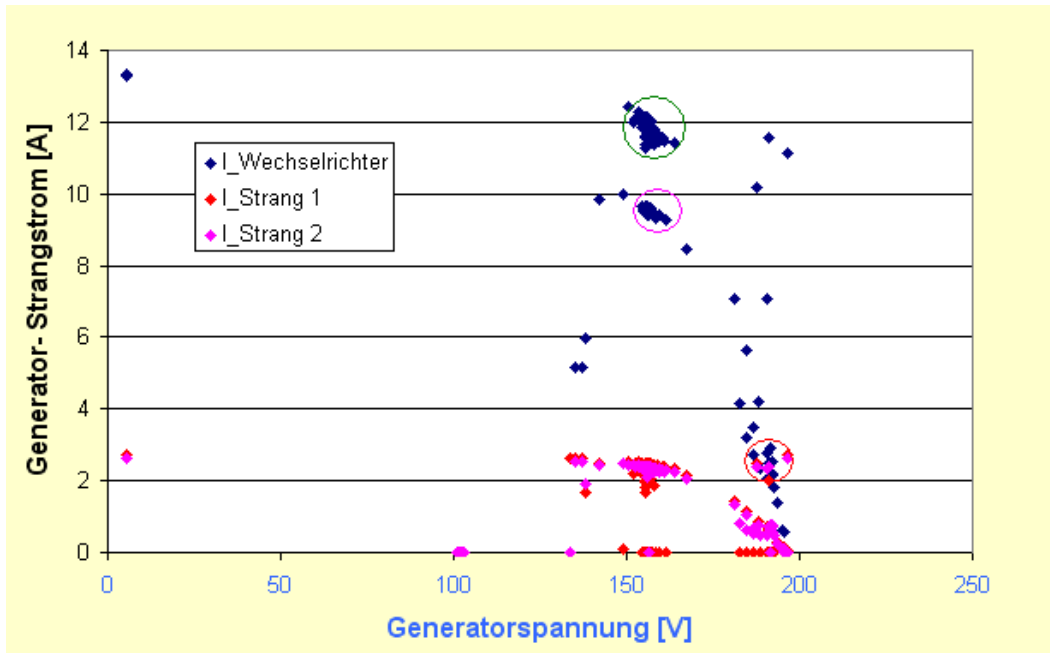


Bild 6: Strom- und Spannungsverhältnisse am Solargenerator

Die farblich markierten Betriebszustände zeigen an in welcher Position auf des Generator der Wechselrichter gerade betrieben wird. Tritt der Fall ein, dass innerhalb eines Stranges ein Lichtbogen entsteht, verschiebt der Wechselrichter seinen Arbeitspunkt in Richtung Leerlauf, was der Grund für die reduzierten Strangströme der intakten Stränge ist.

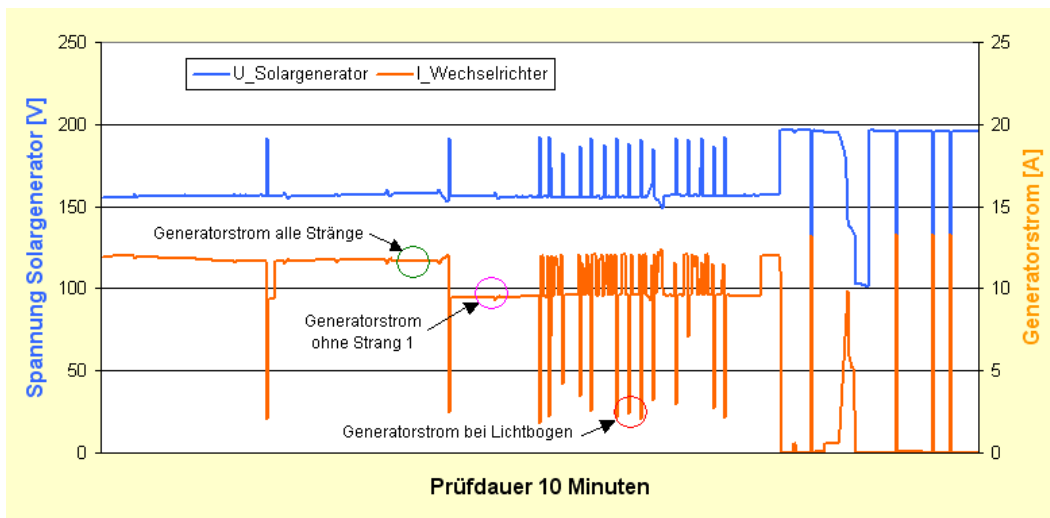


Bild 7: Zeitlicher Verlauf von Strangströmen und Generatorspannung

Das Verhalten des Wechselrichters kann deshalb dahingehend bewertet werden, dass durch die Verschiebung des Arbeitspunktes eine Lichtbogen löschende Wirkung erreicht wird. Es kann nicht abgeleitet werden, dass dies generell für alle Wechselrichter zutreffend ist.

Der Versuch zeigt, dass ein einmaliges kurzes Auftrennen eines Stranges zwar einen Lichtbogen zur Folge hat, dies zunächst jedoch keine Rückwirkung auf den Weiterbetrieb des Wechselrichters haben muss. Tritt jedoch eine im schnellen Wechsel andauernde Unterbrechung mit Lichtbogenfolge auf, kann dies sehr wohl Rückwirkungen auf den Betriebspunkt des Wechselrichters haben. Dass es durch die Entstehung eines Lichtbogens zu relevanten Rückströmen kommt, kann durch die Versuche ausgeschlossen werden.

2.2 Rückströme bei verkürztem Strang

Wie aus den theoretischen Betrachtungen bekannt ist können diverse Ursachen für das Auftreten von Rückströmen verantwortlich sein. Immer ist ein verkürzter Strang in einem Solargenerator dafür verantwortlich. Die Höhe des Rückstromes ist im Wesentlichen vom Grad der Strangverkürzung und der Größe des Restgenerators (Anzahl der Stränge) abhängig.

Der anschließend beschriebene Versuch deckt somit gleichzeitig mehrere Fehlersituationen ab (defekt leitende Bypassdiode, Erdschluss bzw. Erdschlüsse und Missachtung der Installationsvorschrift für PV-Module bezüglich der gleichen Modulanzahl im Strang).

In drei Schritten wird der Strang 1 jeweils um ein, zwei und drei Module verkürzt. Dieser Strang wird im Verbund mit 4 intakten Strängen an einem Wechselrichter betrieben.

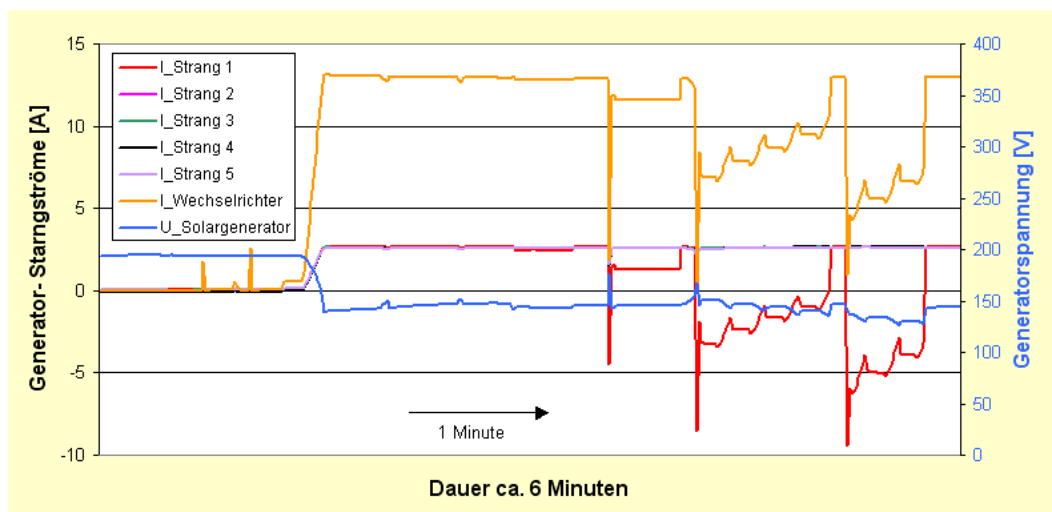


Bild 8: Zeitlicher Verlauf der Ströme und Generatorspannung bei Verkürzung eines Stranges im Betrieb mit dem Wechselrichter

Zu Beginn der Messung (alle Stränge intakt) befindet sich der Generator im Leelauf. Die Spannung liegt geringfügig unter 200 V (blaue Kennlinie). Der Strom beträgt 0 A, bis auf drei Spitzen, die auf das Prüfen des Einschaltkriteriums durch den Wechselrichter zurückzuführen sind. Anschließend geht der Wechselrichter in den MPP-Betrieb über. Mit dem steilen Stromanstieg ist das Absinken der Generatorspannung auf die MPP-Spannung von annähernd 150 V verbunden. In den drei folgenden

zeitlichen Abschnitten wird die oben angesprochen Verkürzung des Strangs 1 vorgenommen. Zwischen den Phasen wird der reguläre Zustand des Solargenerators immer wieder hergestellt (Generatorstrom erreicht ursprüngliches Niveau). Während in Phase 1 noch kein Rückstrom fließt, ändert sich die in den beiden darauf folgenden Phasen. Durch die Suchbewegung des Wechselrichters wird der Rückstrom kleiner, erreicht in der Zeit jedoch kein positives Niveau mehr. Zwischen Phase 2 und 3 ist eine deutliche Zunahme des Rückstroms zu erkennen. Die Generatorspannung sinkt in dem Maße, wie es zu erwarten war.

Im folgenden Bild sind der zeitliche Verlauf der Ströme und Spannungen aus Bild 8 noch einmal im Koordinatensystem dargestellt. Diese Darstellungsart vermittelt einen besseren Einblick über die Strom- und Spannungsverhältnisse auf der Solargeneratorseite bei Reduzierung der Modulzahl in einem Strang.

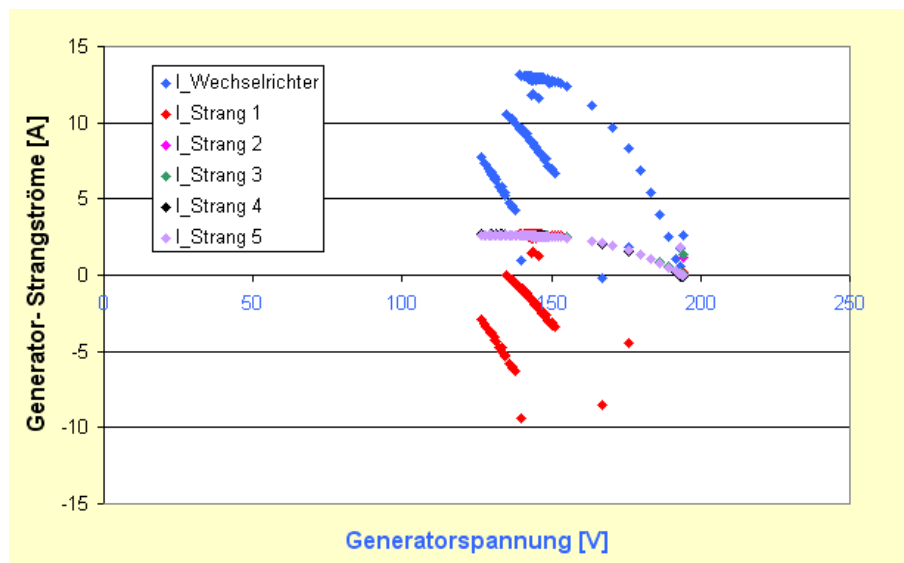


Bild 9: Strom- und Spannungsverhältnisse bei Verkürzung eines Strangs

Die obere blaue Kennlinie beinhaltet sowohl das Anlaufen als auch den regulären Betrieb des Wechselrichters, am intakten Solargenerator. Deutlich zu erkennen ist die Auswirkung der stufenweise vorgenommenen Strangverkürzung. Im gleichen Maße, wie sich die Verkürzung des Strangs 1 (rot) auf den Rückstrom auswirkt erfolgt eine zeitgleiche Reduzierung des DC-seitigen Generatorstromes in den Wechselrichter (blau). Bei der Verkürzung um ein Modul fließt nach wie vor ein positiver, jedoch reduzierter Strom und trägt somit zur Energieproduktion bei. Mit zunehmender Verkürzung kehrt sich die Stromrichtung jedoch um und es kommt zu einem Rückstrom. Die horizontalen und vertikalen Strom- und Spannungsänderungen sind auf das Regelverhalten des Wechselrichters zurückzuführen. Während in Stufe 1 der Verkürzung kaum Auswirkungen auf den Arbeitspunkt auf der Generatorkennlinie hat rufen die beiden nächsten Stufen jedoch stärkere Suchbewegungen des Wechselrichters hervor.

2.3 Rückstrom im Leerlauf des Solargenerators

Wird ein Solargenerator mit einem verkürzten Strang an einem Wechselrichter im MPP betrieben, kann davon ausgegangen werden, dass die Gefahr eines Rückstroms mit schädigender Wirkung nicht auftritt. Der Wechselrichter stellt auf der resultierenden Kennlinie aus intaktem Solargenerator und fehlerhaftem Strang einen neuen Arbeitspunkt ein. In Abhängigkeit der Spannungsverhältnisse zwischen Solargenerator und geschädigten Strang kann die momentane Abgabeleistung der Anlage entsprechend geringer sein, dass der Restgenerator nicht mehr im optimalen Arbeitspunkt betrieben wird. Diese Verhältnisse ändern sich jedoch gravierend, wenn der Solargenerator in den Leerlauf übergeht. Als eher unkritisch, in Bezug auf Rückströme, ist der Leerlauf des Solargenerators vor dem morgendlichen Einschalten bzw. nach dem abendlichen Abschalten des Wechselrichters zu sehen, weil die hier ggf. noch auftretenden Strangströme sehr gering sind. Kritisch wird es jedoch wenn der Wechselrichter bei angemessener Bestrahlungsstärke für Wartungszwecke oder bei Störung abgeschaltet wird. Die hier möglichen Rückströme können dann im ungünstigen Fall zu Modulschädigungen führen.

Im folgenden Versuch wurden die Verhältnisse im Leerlauf des Solargenerators bei guten Einstrahlungsverhältnissen untersucht. Ausgehend vom Leerlauf wurde wiederum Strang 1 um jeweils 1 bis 5 Module verkürzt. Das folgende Diagramm zeigt zunächst die Stromverhältnisse im Leerlauf des Solargenerators bestehend aus 5 Strängen. Die durch Fertigungstoleranzen hervorgerufenen Ausgleichströme liegen im mA-Bereich und stellen deshalb keine Gefahr da. Im vorliegenden Fall speisen die Stränge 2, 3 und 5 in die Stränge 1 und 4 einen geringen Rückstrom ein.

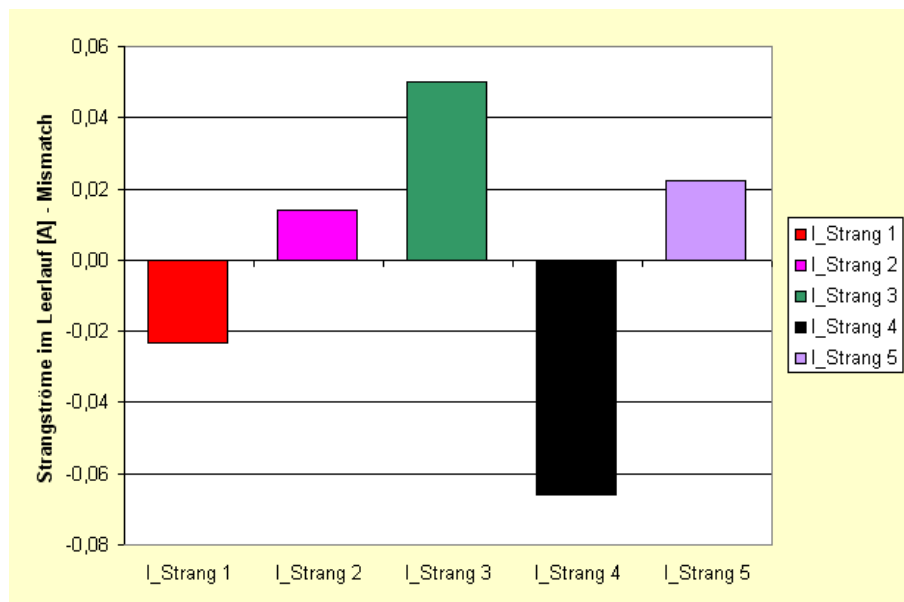


Bild 10: Rückstromverhältnisse im Leerlauf verursacht durch Fertigungstoleranzen

Die im obigen Diagramm dargestellten Verhältnisse werden im Folgediagramm im Punkt 1 abgebildet. Die Punkte 2 bis 6 entsprechen der Verkürzung des Strangs 1 um 1 bis 5 Module. Die Kennli-

nien und die sich für jede Konstellation einstellenden Rückströme sind im Diagramm entsprechend bezeichnet.

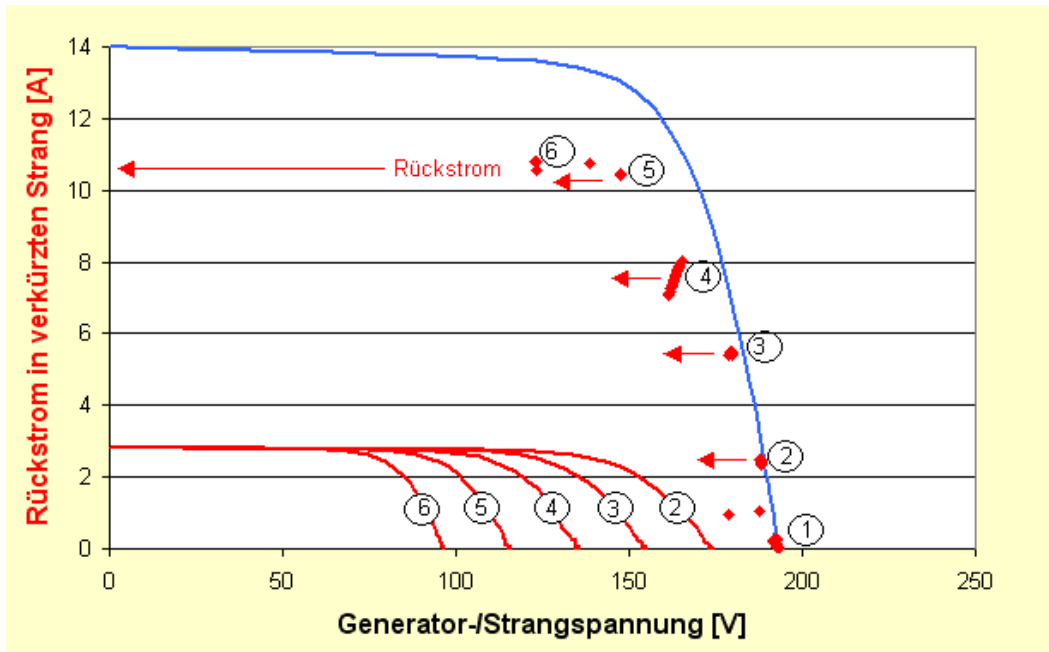


Bild 11: Rückstromverhältnisse durch verkürzten Strang im Leerlauf des Solargenerators

Erwähnenswert ist, dass die Verkürzungen um 1,2,3 oder 4 Module relativ große Änderungen des Rückstroms zur Folge haben. Die Verkürzung von 4 auf 5 Module (Übergang 5 nach 6), zieht wegen des flachen Verlaufs der Generatorkennlinie in diesem Bereich, keine sehr große Stromänderung mehr nach sich.

2.4 Rückstromverhältnisse bei vertauscht eingebauten Modulen

Werden Module innerhalb eines Strangs in Bezug auf ihre Polarität falsch eingebaut, kommt dies der zuvor beschriebenen Verkürzung von Strängen gleich. In diesem Fall übernehmen die im falsch eingebauten Modul befindlichen Bypassdioden die Weiterleitung des Rückstroms. Hier besteht die Gefahr der Überhitzung, da der Rückstrom unzulässig hohe Werte erreichen kann. Für diesen Fall wird die Brandgefahr durch die Photovoltaik signifikant erhöht.

Die beiden folgenden Diagramme zeigen zum einen den zeitlichen Verlauf des Versuchs, und zum anderen die sich einstellenden Rückströme in Bezug auf die Generatorkennlinie. Die sich einstellenden Rückströme sind betragsmäßig identisch mit den Strömen aus dem Leerlaufversuch. Der Rückstrom in Strang 1 resultiert aus den Summenströmen der Stränge 2 bis 5.

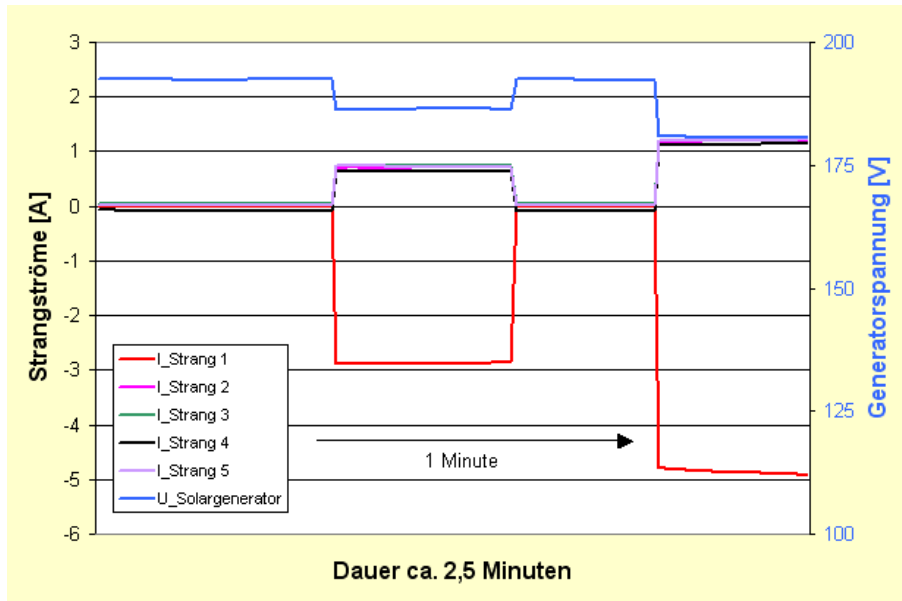


Bild 12: Zeitlicher Verlauf bei Einbau eines bzw. zweier Module mit falscher Polung

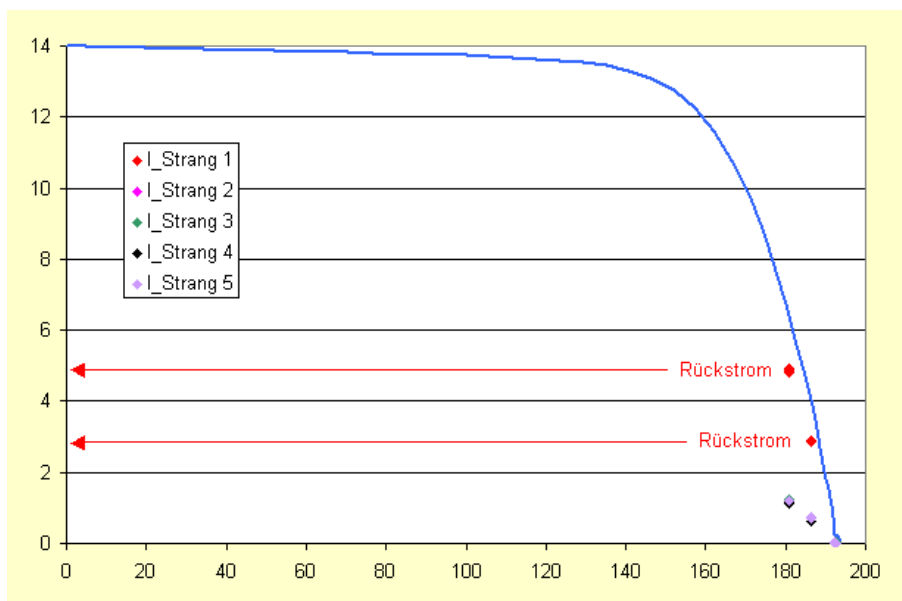


Bild 13: Rückstromverhältnisse durch vertauschte Module innerhalb eines Strangs

Die durchgeführten Feldtests bestätigen die zuvor angestellten theoretischen Betrachtungen gänzlich. Es wird unter Beweis gestellt, dass im Fehlerfall, unter Berücksichtigung der Generatorkonstellation durchaus unzulässig hohe Rückströme fließen können. Es ist deshalb ratsam den Einsatz von Sicherungen in der Planungsphase zu berücksichtigen. Klare Vorgaben in Form von Normen oder Richtlinien sind Voraussetzung dafür, die Verwendung von Sicherungen, nach den anerkannten Regeln der Technik einzusetzen. Eine Übersicht von derzeit relevanten Normen zum Themenkomplex des Sicherungseinsatzes wurde im 1. Zwischenbericht gegeben.

3 Langzeittest von Sicherungen unter realen Einsatzbedingungen

Die Umgebungstemperatur als auch die Verlustwärme in der Sicherung haben Einfluss auf die Dimensionierung. In Abhängigkeit der Außentemperatur und der Temperatur im Anschlusskasten kann sich das Abschaltverhalten der Sicherung ändern. Hier müssen die Korrekturfaktoren der Hersteller für den entsprechenden Sicherungstyp berücksichtigt werden. In der Regel ist davon auszugehen, dass dies bei Temperaturen oberhalb der Bemessungsprüfbedingungen für die Sicherung der Fall ist. Packungsdicht der Sicherungshalte ist dabei ebenfalls zu beachten. Großen Einfluss auf das Temperaturverhalten in der unmittelbaren Umgebung der Sicherung hat vor allem der Installationsort des Anschlusskastens. Nicht selten wird dies von Planern verkannt, da die Sicherung als robustes, passives Bauelement angesehen wird.

Um die Auswirkungen eines geeigneten bzw. ungeeigneten Installationsortes aufzeigen zu können, wurden zwei identische Anschlusskästen einmal der direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt, während der zweite Anschlusskasten im Schatten eines Solargenerators betrieben. Beide Kästen wurden mit 12 A PV-Zylindersicherungen und den entsprechenden Sicherungshalten bestückt.

Die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Langzeitmessungen wurden im 1. Zwischenbericht beschrieben. Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich vom 1. Januar bis 31. Oktober 2010. Die Datenbasis bilden 15-Sekundenwerte der Temperaturen. Für die Auswertung wurden daraus 10-Minuten-Mittelwerte gebildet.

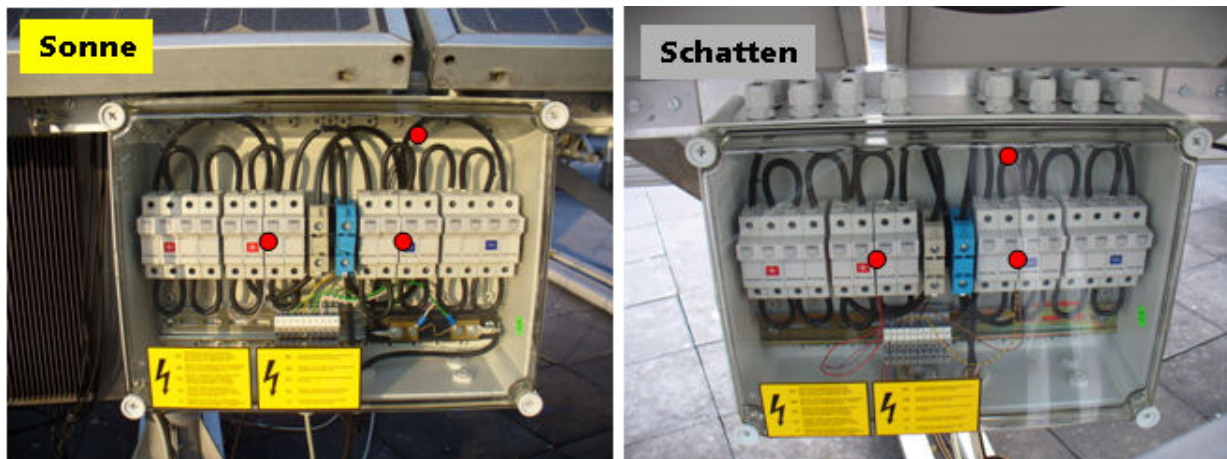


Bild 14: Aufnahme der beiden Anschlusskästen (Sonne links, Schatten rechts)

Die Temperatur-Messstellen zwischen den Sicherungshaltern und der Gehäuseinnentemperatur sind durch rote Punkte gekennzeichnet. Die Anschlusskästen sind für den Außenbereich geeignet und wurden im Großhandel eingekauft.

Für eine erste Abschätzung der Temperaturverhältnisse in den Anschlusskästen wurde eine thermographische Aufnahme des Anschlusskastens im Schatten, bei sehr guten Einstrahlungsbedingungen gemacht. Die Aufnahmen belegen bereits, dass zwischen der Oberfläche und den Zwischenräumen der Sicherungshalter große Temperaturunterschiede bestehen.

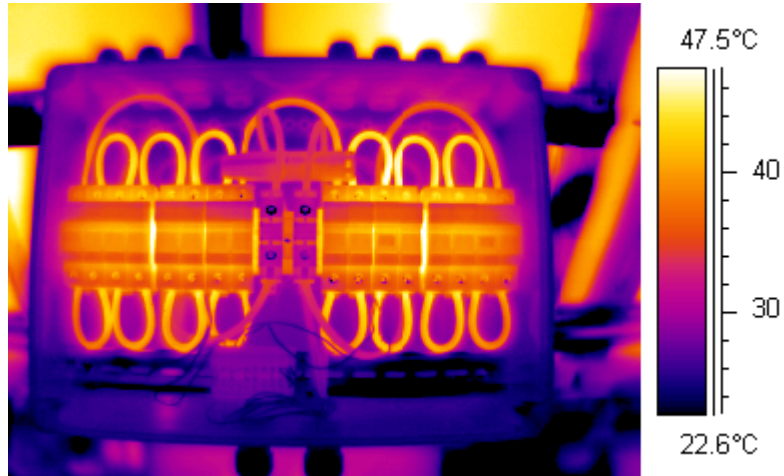


Bild 15: Thermographische Aufnahme des Anschlusskastens im Schatten

Die ersten Auswertungen zeigen, dass sich bei beiden Generatoranschlusskästen keine gravierenden Unterschiede bezüglich Ihres Temperaturprofils ergeben. In den Daten sind Tag- und Nachtwerte enthalten.

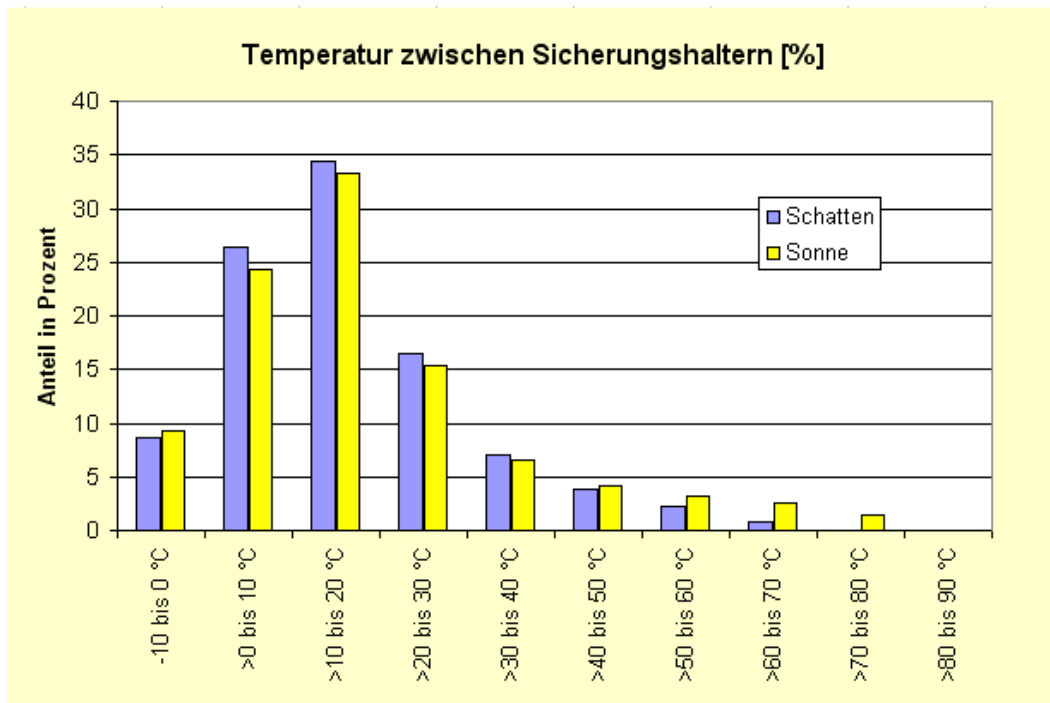


Bild 16: Prozentuale Verteilung der gemessenen Temperaturen zwischen den Sicherungshaltern

Abgesehen von der niedrigsten Temperaturklasse (-10 °C bis 0 °C) weist der Sicherungshalter innerhalb des im Schatten installierten Generatoranschlusskastens sogar einen geringfügig höheren prozentualen Anteil der Temperaturen auf. Im Wesentlichen ist dies auf den geschützten Installationsort hinter den Modulen zurückzuführen. Es kann angenommen werden, der Kühleffekt durch Wind

geringer ist. Ab den Temperaturklassen $>40\text{ °C}$ stellen sich in dem von der Sonne beschienenen Anschlusskasten durchgängig höhere Temperaturen ein. Die zwischen den Haltern gemessenen Temperaturen zeigen auch, dass eine Temperaturkorrektur bei der Dimensionierung von Sicherungen beachtet werden muss. Da eine Sicherung zu jedem Zeitpunkt funktionieren muss, hat die Auslegung auf die maximal zu erwartende Temperatur zu erfolgen.

Die Auswertung aus dem oben angegebenen Zeitraum zeigt, dass bei direkter Sonnenbestrahlung zeitweise $10\text{-}15\text{ °C}$ höhere Temperaturen erreicht werden. Bis zu Bestrahlungsstärken um 300 W/m^2 bestehen keine nennenswerten Temperaturunterschiede für beide Installationsorte. Es kann davon ausgegangen werden dass es sich im Wesentlichen um diffuse Einstrahlung handelt. An Tagen mit hohem direktem Strahlungsanteil ist die Wirkung durch Stromwärme und äußere einstrahlungsbedingte Wärmewirkung (seitlicher Lichteinfall) in diesen Bestrahlungsstärkebereich eher gering. Die maximalen Temperaturen die erreicht werden betragen ca. 80 °C .

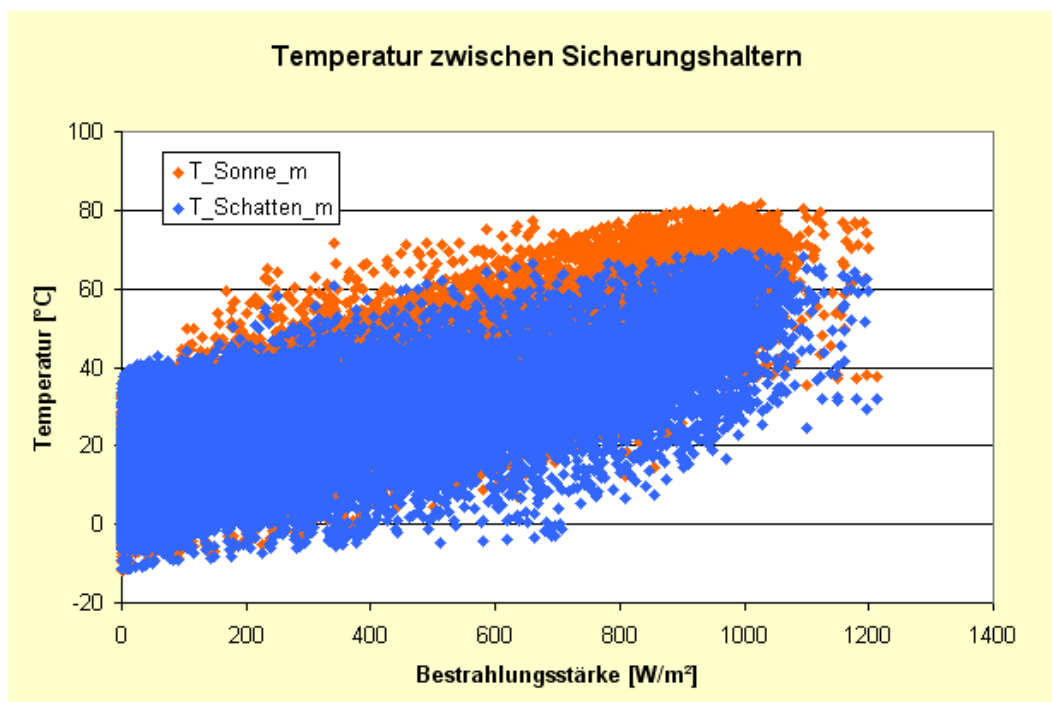


Bild 17: Vergleich der Temperaturen zwischen den Temperaturhaltern

Die saisonalen Temperaturunterschiede betragen ca. 50 °C . Dies gilt sowohl für den beschatteten als auch für den der Sonne ausgesetzten Anschlusskasten.

Bei der Betrachtung eines Tagesganges der Temperatur wird deutlich, dass beim gleichen durch die Sicherung fließenden Strom die Nachmittagswerte der Temperaturen um ca. 40 °C höher sind als dies vormittags der Fall ist. Im Wesentlichen ist eine höher Umgebungstemperatur am Nachmittag und die eingeschränkte Möglichkeit der Gehäuse die Abwärme an die Umgebung abzugeben dafür verantwortlich. Unter ansonst gleichen Betriebsbedingungen kann der Temperaturunterschied an den Scheitelpunkten beider Kurven als Maß für die unterschiedliche Wahl des Standortes angesehen

werden. Für gemäßigte Zonen ist davon ausgegangen, dass bei einer ungünstigen Positionierung des Anschlusskastens mit höheren Sicherungstemperaturen von durchschnittlich 10 °C gerechnet werden kann. Je nach Packungsdichte dürften die Temperaturen geringfügig nach oben oder unten variieren.

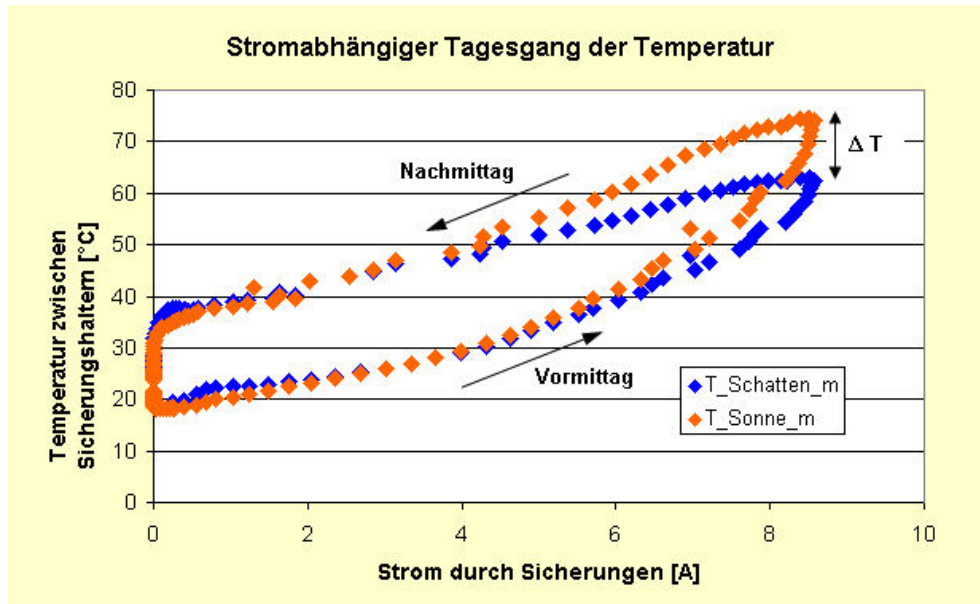


Bild 18: Stromabhängiger Tagesgang der Temperaturen zwischen den Sicherungshaltern

Bei den Innentemperaturen der Anschlusskästen sind die Temperaturunterschiede nicht so gravierend. Sie betragen lediglich 5 °C.

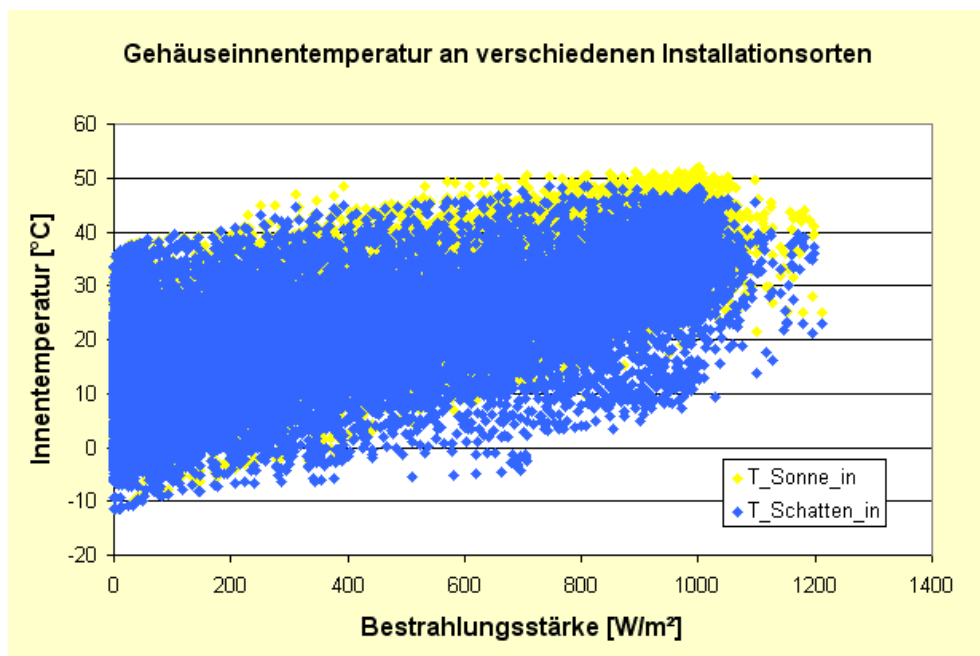


Bild 19: Vergleich der Innentemperaturen in den Anschlusskästen

Eine ab Mitte Januar durchgeführte Messung direkt am metallischen Kontaktstück des Sicherungshalters hat zu keinen neuen Erkenntnissen geführt. Eine höhere Temperatur als zwischen den Haltern konnte nicht gemessen werden.

4 Zusammenfassung

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen bestätigen die zur angestellten theoretischen Betrachtungen vollends. Je nach Grad der Verkürzung eines Stranges kommt es zu mehr oder weniger hohen Rückströmen, die ein Modul zerstören können. Im schlimmsten Fall kann somit ein Modul, Ursache für einen Brand sein. Ungeachtet der bislang bestehenden normativen Ausführungen, dass ein Doppelfehler nicht in Betracht gezogen wird, muss dieser dennoch Berücksichtigung finden. Insbesondere beim Errichten der Anlage und gegen Ende der Betriebsdauer sind derartige Fehler durchaus wahrscheinlich. Als besonders kritisch ist es anzusehen, dass sich der Leerlaufbetrieb des Solargenerators (z. B. nach einem einzelnen Isolationsfehler und Abschaltung des Wechselrichters) als ungünstigster Betriebszustand, in Bezug auf Rückstromgefahr, erweist.

Nach derzeitigem Sachstand, kann davon ausgegangen werden, dass die Rückstromproblematik neu bewertet wird. Elektronische Abschaltvorrichtungen in den Anschlussdosen, müssen Ihre Zuverlässigkeit erst noch unter Beweis stellen. Das Kurzschließen von Modulen, zur Vermeidung von hohen DC-Spannungen, zum Schutz von Feuerwehr-Einsatzkräften, befindet sich zurzeit in Diskussion. Bei Fehlfunktion werden Rückströme geradezu provoziert.

Zu bedenken ist auch, dass die Rückstromtragfähigkeit von Solarmodulen durch viel dünnere Zellen, im Vergleich zu älteren Modulen, geringer sein dürfte. Über die Ausfallmechanismen von aktuellen Modulen müssten neue Untersuchungen durchgeführt werden.

Die bislang aus dem Betrieb von DC-Anschlusskästen gewonnenen Erkenntnisse zur Temperaturbelastung von Sicherungen geben wichtige Hinweise auf die Auslegung von Sicherungen (Derating). Ein Abgleich mit Herstellerangaben wäre hier wünschenswert.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von Sicherungen in PV-Systemen nicht nur erwünscht, sondern gefordert werden muss. Dabei sollte aber nicht außer Acht gelassen werden, dass die Sicherung als Betriebsmittel auf die Anforderungen aus dem Photovoltaikbereich abgestimmt sein muss. Die bestehenden Normen sollten deshalb daraufhin überprüft werden. Der noch ausstehende Versuch Sicherungen an einem Solarsimulator auszulösen, soll erste Erkenntnisse dazu bringen.