

# Fließt kein Strom?

## Fehlersuche in Solargeneratoren und Modulen

von H. Schmidt

Solarmodule werden zu Recht als die zuverlässigsten Komponenten photovoltaischer Systeme bezeichnet. Dennoch sind bei einigen Produktionschargen eines Herstellers nach mehrjähriger Betriebszeit Ausfälle aufgetreten, die eine Identifikation der defekten Module innerhalb großflächiger Solargeneratoren und deren Austausch erforderlich machten. Für einen Modulhersteller ist es in einem solchen Fall von Vorteil, wenn er den Fehlerort innerhalb des Moduls auffinden und den Ausfallmechanismus untersuchen kann.

Ebenso ist eine laufende Kontrolle der Module während der Fertigung erforderlich, um einen hohen Qualitätsstandard zu gewährleisten.

Der Ausfall einzelner Module einer bestimmten Baureihe wurde verstärkt in Anlagen beobachtet, die extremen Witterungsbedingungen ausgesetzt sind, so zum Beispiel bei den Hütten des *Deutschen Alpenvereins DAV*. Er wurde aber auch bei Standardanwendungen beobachtet – beispielsweise im 1.000-Dächer-Programm oder auch auf dem Testfeld des *Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE*.

Die häufigste Fehlerursache war eine Unterbrechung der Zellverbinder innerhalb des Moduls. Delaminierungen oder Glasbrüche aufgrund von Verspannungen traten seltener auf. Die Unterbrechungen im Zellverbinder bestanden im allgemeinen aus feinen Haarrissen, die vor Ort visuell kaum auszumachen waren. In einigen Fällen entstand jedoch an der Unterbrechungsstelle ein Lichtbogen, dessen Wärmeentwicklung das Modul spektakulär aufblähen und platzen ließ.

Elektrisch äußerte sich der Fehler in einer verminderten Solargeneratorspannung und -leistung, wobei aufgrund der Bypassdioden die Form der Kennlinie nahezu unverändert blieb. Es traten nicht die charakteristischen Stufen wie bei einer Teilabschattung auf. Die Unterbrechungen machten sich teilweise auch abhängig von Modultemperatur oder -verspannung in Form eines „Wackelkontaktes“ bemerkbar.

### Identifikation defekter Module vor Ort

Für den Praktiker stellt sich dann natürlich die Frage, wie er auf einfache Art und Weise defekte Module innerhalb eines großflächigen und oft auch schwer zugänglichen Solargenerators identifizieren kann.

Der Ausfall einzelner Modulhälften läßt sich zunächst anhand einer Messung der Leerlaufspannung der einzelnen Strings feststellen – je ausgefallener Hälfte fehlen ca. 10 V bis

12 V an der Leerlaufspannung. Zum Aufsuchen der ausgefallenen Module war es bislang üblich, die Module nacheinander abzudecken und die Veränderung der Leerlaufspannung zu beobachten: bei intaktem Modul und einwandfreier Bypassdiode sinkt die Leerlaufspannung ab, während sie bei Abschattung eines defekten Moduls unverändert bleibt.

Von Nachteil bei dieser Vorgehensweise ist es, daß die Solarzellen bereits bei geringsten Einstrahlungen nahezu ihre volle Leerlaufspannung erreichen. Die Abdeckung des Moduls muß daher großflächig und lichtdicht sein – Forderungen, die in der Praxis schwer einzuhalten sind.

### Das „schwächste“ Modul im Generator bestimmt den Strom

Der hier vorgestellte und erprobte Ansatz nutzt die an sich sehr unangenehme Eigenschaft von Solargeneratoren, daß das „schwächste Glied in der Kette“ den Strom durch die Gesamtanordnung bestimmt. Dieses grundlegende Verhalten sei noch einmal anhand von Abb. 2 erläutert.

Bei intakten Zellen und Bypassdioden sowie gleichmäßiger Beleuchtung wird an den Klemmen des Solargenerators bei einer bestimmten Einstrahlung die Kennlinie ① gemessen. Bei einer Teilabschattung einer einzigen Zelle innerhalb der mit den Bypassdioden beschalteten Teilgeneratoren in Abb. 2 ergibt sich hingegen die Kennlinie ②. Die in diesem Beispiel zu etwa 90% abgeschattete Zelle 36 kann die vom Restgenerator erzwungene Stromstärke  $I_{SG}$  nicht erbringen – die Spannung über diesem Teilgenerator kehrt sich um, so daß die Bypassdiode leitend wird und der Solargeneratorstrom  $I_{SG}$  sich in  $I_z$  und  $I_D$  aufteilt. Die Spannung an den äußeren Klemmen ist daher gemäß Abb. 2 um die Spannung aller 18 Zellen und die Diodenspannung  $U_D$  vermindert, obwohl nur eine einzige Zelle abgeschattet wurde!

Durchläuft man die Kennlinie weiter in Richtung Leerlauf, so kann ab dem mit ③ gekennzeichneten Punkt die abgeschattete Zelle wieder den Gesamtstrom aufbringen – der Strom durch die Bypassdiode wird zu Null und die Kennlinie nähert sich wieder der ursprünglichen Kennlinie ① an.

Es ist zu erkennen, daß bei Leerlauf eine sehr gute Abschattung des Solarmoduls vorliegen muß, um eine deutliche Spannungsänderung an den äußeren Klemmen hervorzurufen. Nur bei einer idealen Abschattung, einer Unterbrechung im Modul oder einem Kurzschluß der Bypassdiode wird die gestrichelt weitergeführte Kennlinie erreicht.

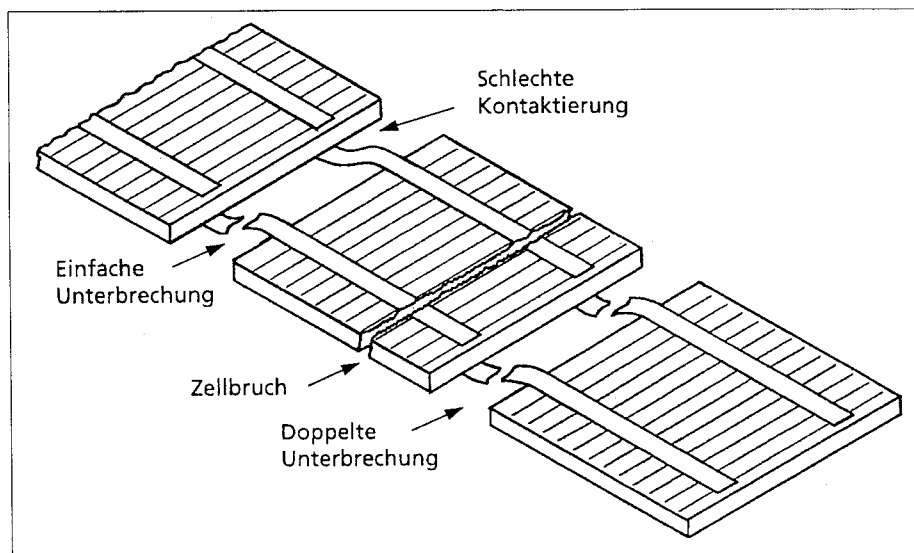


Abb 1: Typische Ausfallursachen innerhalb von Solarmodulen

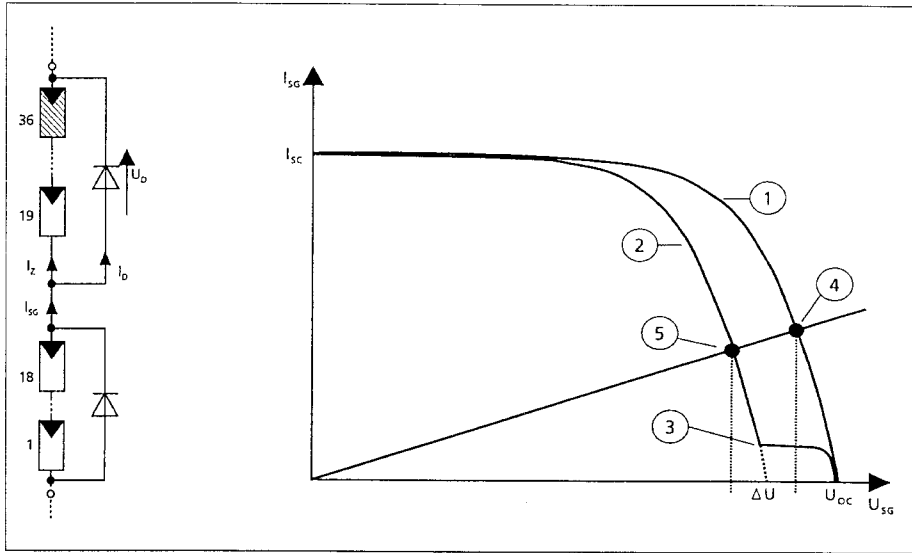


Abb. 2: Schaltbild eines 36-zelligen Solarmoduls mit Bypassdioden innerhalb eines längeren Strings von in diesem Beispiel vier Modulen (hier nicht dargestellt) und schematischer Verlauf der zugehörigen Kennlinien

**Vermessung eines Solar-  
generators im Grundlastbetrieb**

Die Anforderungen an die Abschattung bei der Untersuchung eines Solargenerators nach defekten Modulen lassen sich drastisch reduzieren, wenn die Vermessung nicht im Leerlauf, sondern bei einer bestimmten Grundlast vorgenommen wird.

Hierzu wird der Solargenerator mit einem Widerstand (z. B. eine Glühlampe) so belastet, daß etwa ein Drittel des momentan möglichen Kurzschlußstromes fließt. Dann stellt sich ohne Abschattung der Arbeitspunkt ④ ein, der bei Teilabschattung nur einer Zelle sprunghaft in den Arbeitspunkt ⑤ wechselt, was eine sehr deutliche und leicht detektierbare Änderung der Solargeneratorspannung um ca. 10 V bis 12 V bewirkt.

Die dafür erforderliche Abschattung läßt sich in der Praxis sehr einfach mit einer Pappe in der Größe eines Tischtennisschlägers erreichen, die gemäß Abb. 3 an einer langen Rute befestigt ist. Der Schatten der Rute auf den übrigen Modulen ist dabei zu gering, um ein „Umkippen“ des Arbeitspunktes zu bewirken.

Das beschriebene Verfahren erlaubt eine sehr schnelle, zuverlässige und obendrein kostengünstige Methode der Fehlersuche. So war es zum Beispiel möglich, innerhalb von ca. 30 Minuten alle 216 Modulhälften des in Abb. 3 dargestellten Solargenerators zu vermessen und ca. 20 defekte Module zu identifizieren.

Die beschriebene praxiserprobte Meßmethode kann an einigen Punkten verbessert werden. So muß z. B.

während der (kurzen) Meßphase eine relativ gleichmäßige Einstrahlung vorherrschen. Diese Forderung kann abgemildert werden, wenn man die einfache Ohm'sche Last durch eine Konstantstromsenke ersetzt, deren Stromstärke über eine Referenzzelle der momentanen Einstrahlung nachgeführt wird.

Weiterhin ist es möglich, die Teilabschattung periodisch mit einer Frequenz von einigen Hertz mittels eines mechanischen oder LCD-Choppers vorzunehmen. Die Folge ist ein mit gleicher Frequenz schwankendes Ausgangssignal des Solargenerators, welches mittels Korrelationsempfang einfach und störsicher aus der Gesamtspannung des Generators detektiert werden kann. Diese Methode ermöglicht eine Vermessung der Module im laufenden Betrieb.

**Fehlersuche im Modul**

Für einen Modul-Hersteller ist es von Interesse, die Fehlerstellen innerhalb des Moduls aufzufinden, um mögliche Ausfallmechanismen zu identifizieren.

Hierbei ist zu bedenken, daß in Modulen auch Mehrfachfehler auftreten können. Bei den vom *Fraunhofer ISE* untersuchten defekten Modulen beispielsweise waren an mehreren Stellen beide Zellverbinder unterbrochen.

Außerdem wurde nachgewiesen, daß bei einer Anzahl von Modulen bereits einer der beiden Verbinder unterbrochen war, was sich allerdings noch nicht in dem beschriebenen Ausfall geäußert hatte.

Am *Fraunhofer ISE* wurden eine Reihe verschiedener Methoden zur

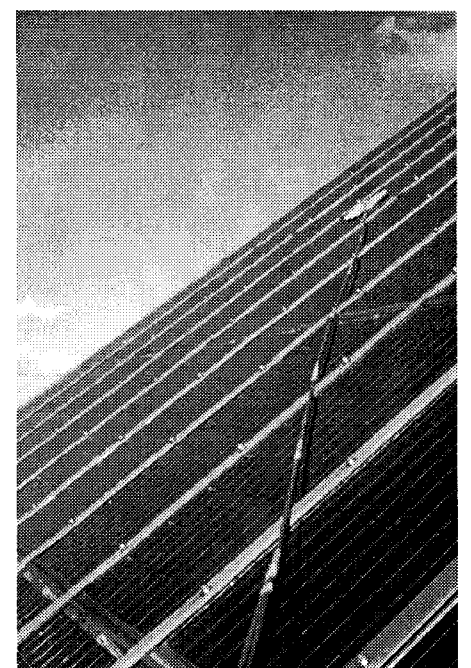
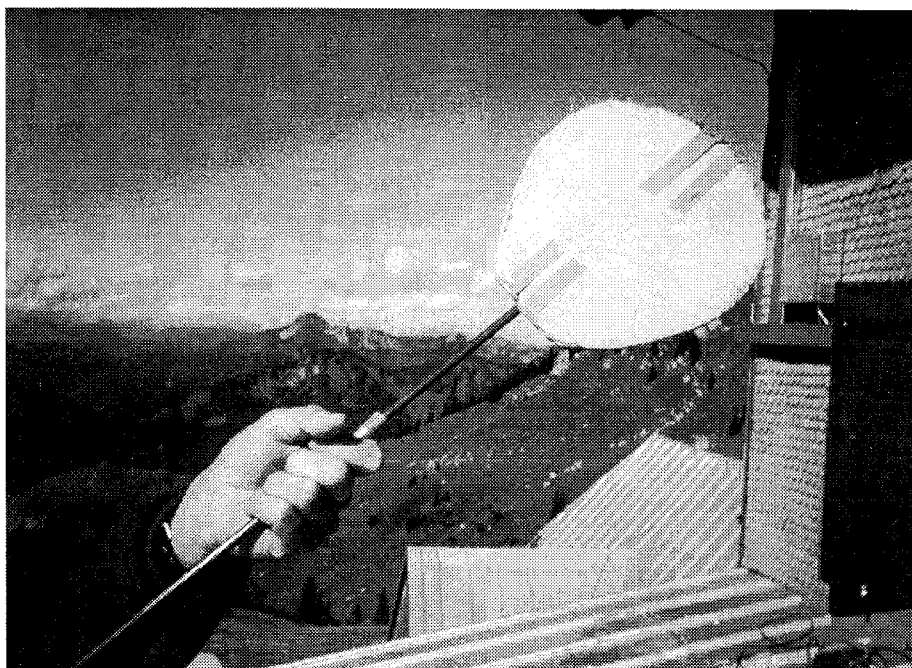


Abb. 3: Improvisierte Abschattungseinrichtung und Einsatz bei einem dachintegrierten Solargenerator des DAV

Suche beider Fehlerarten entwickelt. Neben einer Erkennung der beschriebenen Totalausfälle erlauben einige dieser Verfahren auch eine qualitative Aussage über den Zustand der Zellverbinder. Im folgenden werden zwei Grundprinzipien dargestellt, die in vielfacher Form abgewandelt und den jeweiligen Randbedingungen angepaßt werden können.

Dabei erkennt ein induktives Verfahren alle Fehlerarten, während ein kapazitives Verfahren nur bei doppelten Unterbrechungen anspricht. Die Kombination beider Verfahren in einem Handgerät, wie es weiter unten beschrieben wird, ermöglicht das Auffinden aller Fehler und deren Unterscheidung.

Bei dem **induktiven Verfahren** gemäß Abb. 4a wird in die Leiter schleife, die aus den beiden Zellverbindern sowie der ober- bzw. unterseitigen Zellmetallisierung gebildet wird, mittels einer außen an dem Modul aufgetragenen Spule eine Wechselspannung induziert. Diese ruft – abhängig vom Widerstand dieser Schleife – einen Strom hervor, der wiederum auf die Spule zurückwirkt.

Diese Wechselwirkung läßt eine berührungslose Vermessung des Übergangswiderstandes oder die Erkennung vollständiger Unterbrechungen zu. Dabei spielt es keine Rolle, ob nur einer oder beide Zellverbinder unterbrochen sind.

Bei dem **kapazitiven Verfahren** werden außen auf das Modul gemäß Abb. 4b zwei flächige Elektroden oberhalb benachbarter Zellen aufgelegt. Diese bilden mit der jeweiligen Zelle einen Plattenkondensator, dessen Kapazität in Abhängigkeit von

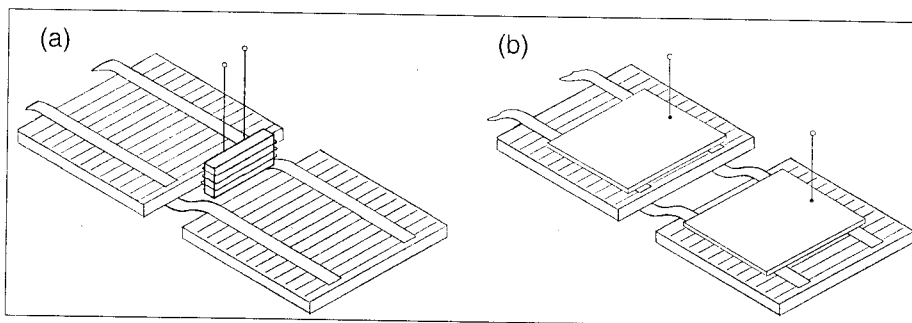


Abb. 4: Prinzip des induktiven (a) bzw. des kapazitiven (b) Meßverfahrens

der Elektrodenfläche und Dicke der Glasplatte bis zu 100 pF beträgt.

Die beiden Kondensatoren sind über die Zellverbinder elektrisch in Reihe geschaltet, so daß beim Anlegen einer Wechselspannung an die Elektroden ein Strom fließen kann. Sind beide Verbinder unterbrochen, ist nur ein deutlich verminderter Stromfluß möglich. Das kann durch eine entsprechende Schaltung ausgewertet werden.

#### Das Handgerät INTERRUPT

Die beschriebenen Meßverfahren wurden in dem in Abb. 5 dargestellten batterieversorgten Handgerät INTERRUPT vereint. Das Gerät erlaubt eine schnelle und zuverlässige Fehlerortung in Modulen und ist bestens geeignet zum Einsatz in Labor und Fertigung sowie bei Felduntersuchungen.

Die Vermessung erfolgt ohne Anschlüsse an das Modul und kann im eingebauten, aktiven Zustand sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite des Moduls erfolgen.

Das Gerät wurde für Standardmodule in Glas/Glas-Technologie ausgelegt, kann jedoch bei allen Modulen mit ähnlichen Geometrien ohne

Aluminiumrückseite ebenfalls eingesetzt werden.

#### Ausblick

Mit den beschriebenen Methoden werden sowohl dem Installateur vor Ort, dem Entwicklungsingenieur als auch dem Qualitätsverantwortlichen in der Modulfertigung Werkzeuge in die Hand gegeben, die eine einfache Ortung von Fehlern in Solargeneratoren und Modulen ermöglichen.

Bereits mit improvisierten Geräten konnte sehr effektiv gearbeitet werden.

Es besteht allerdings noch ein großes Potential, die gezeigten Grundprinzipien weiterzuentwickeln und in Geräte für den Feld- und Laboreinsatz umzusetzen oder in produktspezifische großflächige Prüfadapter, die eine fortlaufende automatisch Qualitätsprüfung in der Produktion ermöglichen.

Ein Teil der beschriebenen Verfahren wurde vom *Fraunhofer ISE* inzwischen zum Patent angemeldet.

*Dr. Heribert Schmidt* ist Leiter der Gruppe Photovoltaische Systemkomponenten in der Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg.

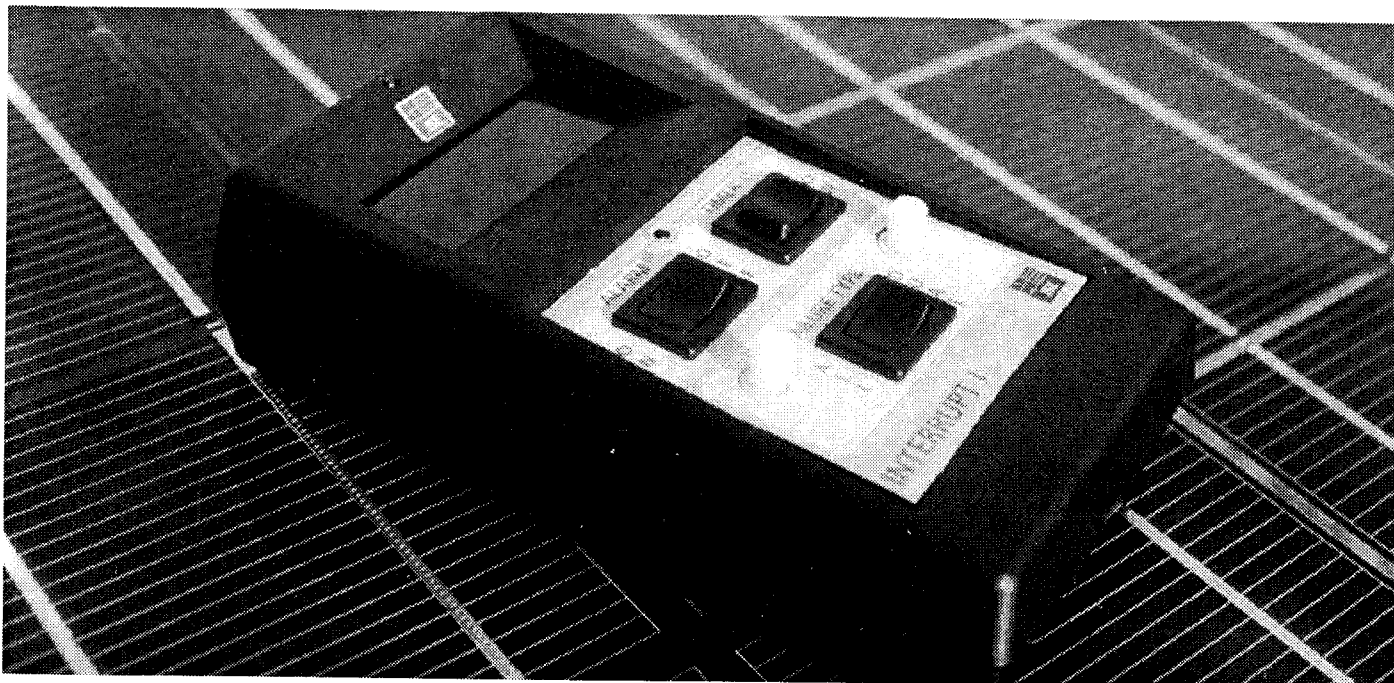


Abb. 5: Handgerät INTERRUPT zur Fehlerortung in Solarmodulen