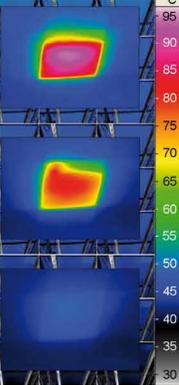


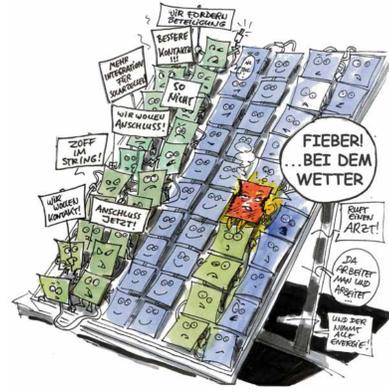
# Validierung der Vermessung gebrochener Zellen im Feld mittels Leistungs-PV-Thermografie



## 1 Motivation und Ziel

Die beiden häufigsten leistungsrelevanten Defekte auf Modulebene sind an erster Stelle Substrings mit Kontaktfehler (0,3 %\* aller Module), gefolgt von erhitzten Zellen mit Zellbrüchen (0,1 %\* aller Module). Während die langfristigen Verluste durch erstere leicht abschätzbar sind, besteht bei den

Zellteilabbrüchen noch Forschungsbedarf. Diese Arbeit will dazu beitragen Ertragsverluste durch Zellfehler auf Basis thermografischer Messungen besser einschätzen zu können.



\* aus interner Auswertung von Abnahme- und Gewährleistungsgutachten der Solarschmiede über 75 MW, 0-2 Jahre alte kristalline MW-Anlagen ohne vorher bekannte Beschädigungen; statistische Angaben für Module mit Leistungsverlusten über 10 %.

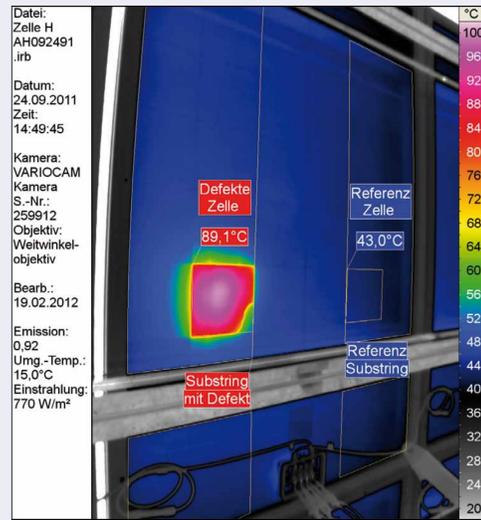
Im Comic die beiden häufigsten Modulfehler: Substring mit Kontaktfehler (links) und erhitzte Zelle mit Zellteilabbruch (rechts); (Quelle: Michael Hüter; Sonne, Wind & Wärme 2012/1 S.116 „Solarmodul aus der Sicht eines PV-Thermografen“)

## 2 Messablauf

Bereits der Energieerhaltungssatz legt nahe, dass Wärmeverluste erhitzter Zellen mit elektrischen Leistungsverlusten korrelieren müssen. Die physikalischen Zusammenhänge hierzu beschreibt der vorhergehende Beitrag [26. PV-Symposium, Poster B18, 2011]. Dieses theoretische Modell sollte nun über Vergleichsmessungen bestätigt bzw. optimiert werden, um noch genauer von erhöhten Zelltemperaturen auf Leistungsverluste schließen zu können. Die hierzu durchgeführten Freifeld-Analysen an mehreren Zellbrüchen von Standardmodulen (60 x polykristalline 6 Zoll Zellen) beinhalteten eine kontinuierliche:

- Thermografie der Zell- bzw. Modulrückseite
- Spannungsmessung über dem Substring mit der defekten Zelle und einem Referenz-Substring
- Messung der Rahmenbedingungen: Einstrahlung, Strangstrom, Wind, Lufttemperatur, Emissionsgrad, Umgebungstemperatur

Bei den vermessen Zelldefekten handelte es sich um typische Fehler, wie sie in praktisch jeder MW-Anlage anzutreffen sind. Die betroffenen Module befanden sich während der Messungen in normalem Betrieb (MPP) an Zentralwechselrichtern.



### Messaufbau im Thermogramm/ Einzelbild aus einem Messverlauf:

Das IR-Bild zeigt ein komplettes Modul einer Freiflächenanlage von der Unterseite, das sich im MPP-Betrieb befindet. Zusätzlich zu den Zelltemperaturen werden in der geöffneten Anschlussdose (unten) die Spannungen über den Substrings und der Stringstrom gemessen. Durch den direkten Blick auf die Bypassdioden ist zusätzlich deren Schaltverhalten sichtbar.

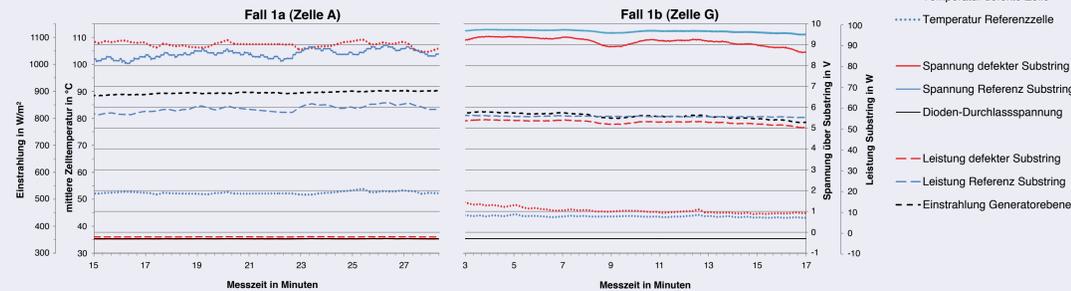
Die Messungen zeigen, dass viele defekte Zellen einen Spannungsabfall ihrer Substrings bewirken, bis hin zur Schließenspannung der Bypassdioden (Schottky bei ca. -0,3 V). Das Thermogramm zeigt in diesen Fällen allerdings, dass die Ströme über den Dioden dabei im unteren mA-Bereich bleiben. Der Leistungsumsatz der Dioden ist trotz der hohen Temperaturauflösung der verwendeten IR-Kamera (besser als 0,03 K) nicht nachweisbar. Zum Vergleich, die typische Erwärmung einer bei STC voll durchgeschalteten Bypassdiode beträgt ca. 40 K.

## 3 Messergebnisse

Aus früheren Messungen war bereits bekannt, dass manche Zellfehler in ihren Temperaturen und Leistungsverlusten von Tag zu Tag stark variieren können. Die neuen detaillierteren Messungen zeigten allerdings noch wesentlich weniger Zellen mit stabilen Verlusten als ursprünglich erhofft. Anstelle des Abgleichs des theoretischen Modells mit den selten vorgefundenen stabilen Zellen mussten daher zunächst Erklärungen für das auf den ersten Blick meist völlig chaotische Zellverhalten gefunden werden. Die ersten noch nicht verifizierten Klassifizierungsversuche mehrfach beobachteter Phänomene sind:

1. Stabile Leistungsverluste:
  - 1a: vollständiger Verlust des Substrings
  - 1b: kaum Verluste trotz Zellteilabbruch
  - 1c: Zwischenniveaus (nicht bei Brüchen)
2. Periodisch wechselnde Leistungsverluste:
  - 2a: langsam (T ~ 3 min) Wärmeausdehnung
  - 2b: schnell (T ~ 20 s) durch MPP-Tracking
3. Vollständige Zustandswechsel zwischen Fall 1a und 1b, sowohl im Tagesverlauf als auch von Tag zu Tag beobachtet

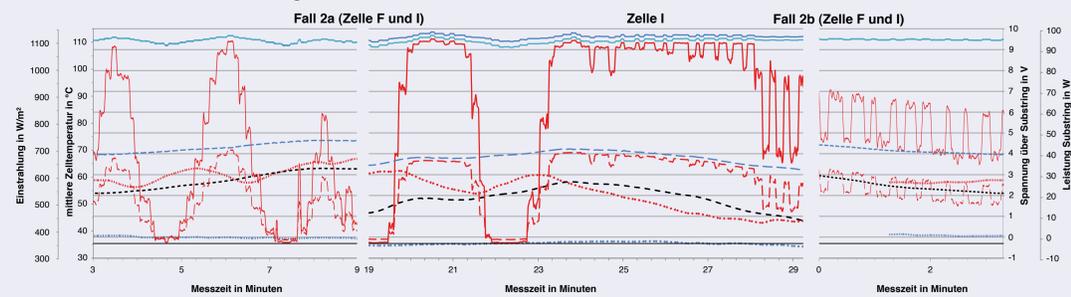
### 1. Stabile Leistungsverluste



Fall 1a (Zelle A): Der erste Graph zeigt den Verlauf einer typischen Zelle mit einem großflächigen Zellteilabbruch (über 15%). Die Spannung über dem von der defekten Zelle betroffenen Substring ist permanent vollständig zusammengebrochen.

Fall 1b (Zelle G): Nur bei erwärmten Zellen bei denen keine Zellbrüche erkennbar sind und bei denen die Erwärmung und Verluste auf andere Zellfehler (z. B. falsch verlotete Leistungsklassen) zurückgehen, sind stabile Zwischenniveaus der Spannungen bzw. Verluste beobachtbar.

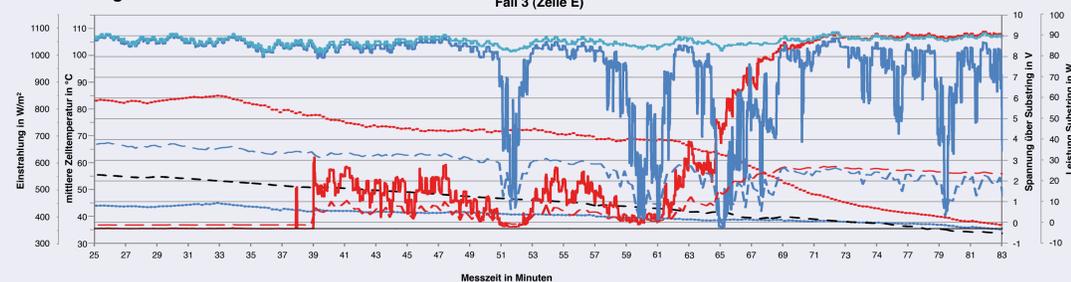
### 2. Periodisch wechselnde Leistungsverluste



Fall 2a (Zelle F und I): Periodendauer ca. 3 min. Die Temperatur läuft der Spannung aufgrund der thermischen Trägheit nach. Interpretation: Durch die steigende Temperatur der Zelle und deren thermische Ausdehnung wird der Kontakt am Bruch wieder hergestellt. Daraufhin arbeitet die Zelle wieder normal und kühlt ab, bis sie wieder trennt und der Zyklus von vorn beginnt.

Fall 2b (Zelle F und I): Periodendauer ca. 20 s entspricht dem Zyklus des MPP-Trackers; Interpretation: Die defekte Zelle kann der zyklischen Stromerhebung (Spannungsabsenkung) nicht mehr folgen und gerät in den Rückwärtsbetrieb. Die Rückwärtskennlinie der defekten Zelle ist flacher als die der intakten Zellen => die Spannungsschwankungen trägt primär die defekte Zelle.

### 3. Vollständiger Zustandswechsel



Fall 3 (Zelle E): Dargestellt ist der Fall einer vollständigen Selbstheilung einer Zelle. Die thermografische Sequenz der Zelle zeigt der Kopf des Posters. Die Ursache ist nicht eindeutig interpretierbar. Im Fall spielen viele zusätzliche Effekte rein, die zu berücksichtigen sind: Die Einstrahlung sank gegen Abend unter 500 W/m<sup>2</sup>. Es wurden im Zeitraum der Selbstheilung unerwartet mehrere Zellen desselben Moduls (dunkel blauer Substring) durch eine Modulklammer verschattet. Eine mögliche indirekte Interaktion mehrerer defekter (oder verschatteter) Zellen ist aktuell wegen ihrer Komplexität kaum interpretierbar, in der Praxis aber sicher auch öfter anzutreffen.

## 4 Konsequenzen

Das Ergebnis, dass speziell Zellteilabbrüche kaum stabile Verlust-Leistungs-Niveaus außerhalb der Extrema (Substring An und Aus) zeigen, war unerwartet. Es verhindert eine weitere Optimierung des theoretischen Modells, das eben von diesen Zwischen-Niveaus ausgeht. Noch weiter, verhindert das chaotische Zellverhalten prinzipiell eine genaue Berechnung von Ertragsverlusten auf Ba-

sis momentaner Leistungsverluste. Gegebenenfalls lässt sich die bisherige grobe Verlust-Leistungs-Abschätzung über Zelltemperaturen aber durch eine zusätzliche Vermessung der prozentualen Zellabbruchflächen verbessern. Eine entsprechende Beurteilung findet auch bereits länger im Rahmen der Elektrolumineszenz statt. Dies würde allerdings eine deutlich höhere optische Auflösung

der IR-Bilder als die bisher als Mindeststandard genannten 4 x 4 Pixel pro Zelle erfordern. Selbst die als besserer Standard genannten 6 x 6 Pixel wären in diesem Fall noch knapp bemessen. Zumindest Anbieter hochauflösender IR-Systeme wären hier von sicher begeistert.

<sup>1)</sup> Solarschmiede GmbH  
Thermografie im Engineering  
Schwanthalerstr. 75a  
80336 München  
Tel.: +49(0)89/9901384-26  
Fax: +49(0)89/9901384-9  
weinreich@solarschmiede.de  
www.solarschmiede.de

<sup>2)</sup> Hochschule München  
Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik  
Arbeitsgruppen Netzintegration und PV-Systeme  
Studiengang Regenerative Energien  
Lothstr. 64  
80335 München