

**Abb. 1:** Gesamtstrom bei 0,53 V und einer Stromdichte von 0 bis 5 mA/cm<sup>2</sup>

**Abb. 2:** Komponente 1 des Dunkelstroms bei 0,53 V und einer Stromdichte von 0 bis 5 mA/cm<sup>2</sup>

**Abb. 3:** Komponente 2 des Dunkelstroms bei 0,53 V und einer Stromdichte von 0 bis 5 mA/cm<sup>2</sup>

**Abb. 4:** Ausschnitt einer der untersuchten Solarzellen. Die verschiedenen Kristallite werden durch die unterschiedlichen Farben gut erkennbar.



## Lokale Dunkelstrom-Analyse von Hochleistungs-Solarzellen mittels Lock-In-Thermografie

**Lock-In-Thermografie (LIT) als eine Variante der Aktiv-Thermografie hat sich als bildgebendes Verfahren zur Qualitätsanalyse von Solarzellen etabliert. Mit dieser Methode können die lokalen Ursachen erhöhter Dunkelströme erkannt werden, die maßgeblich die von Solarzellen erzeugte elektrische Leistung beeinflussen.**

### **Einfluss des Dunkelstroms auf den Wirkungsgrad einer Solarzelle**

Silizium-Solarzellen werden heute millionenfach in Photovoltaik-Anlagen eingesetzt. Sie sind im Wesentlichen großflächige Silizium-Dioden, die in Durchlassrichtung ab einer bestimmten Spannung Strom leiten und in Sperrrichtung, zumindest im Dunkeln, nicht. Wird eine Solarzelle beleuchtet, dann erzeugt die Lichtabsorption

einen Photostrom, der die Zelle in Durchlassrichtung vorspannt. Die Solarzelle ist also im Betrieb in Durchlassrichtung vorgespannt. Ab einer bestimmten Durchlassspannung fließt auch der Durchlassstrom der Zelle, der den Photostrom mehr und mehr kompensiert. Dieser Durchlassstrom wird als Dunkelstrom bezeichnet. Im Gegensatz zum Photostrom fließt er auch im Dunkeln. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle bei der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie hängt maßgeblich von der Größe des Dunkelstroms ab. Je größer dieser bei einer bestimmten Durchlassspannung ist, desto geringer ist die von der Zelle erzeugte elektrische Energie.

### **Die Homogenität des Dunkelstroms**

Dunkelstrom fließt praktisch nie homogen in der ganzen Fläche der Zelle. Es gibt Bereiche mit niedrigem Dunkelstrom und Stellen, an denen er lokal erhöht ist, oft um einen Faktor 10 bis zu 1.000. Dies gilt vor allem für Zellen aus multikristallinem Material, aus dem die meisten der heute verwendeten Solarzellen bestehen. Diese Bereiche werden Shunts genannt, auch wenn sie keine Kurzschlüsse im elektrotechnischen Sinn darstellen. In den meisten Solarzellen wird der gesamte Dunkelstrom durch solche Shunts dominiert. Die Lock-In-

Thermografie ermöglicht es, solche Shunts in Solarzellen zu erkennen und quantitativ zu beurteilen. Drei verschiedene Komponenten charakterisieren den Dunkelstrom: Die Komponente 1, deren Ursachen Defekte im Material und an den Oberflächen sind. Die Komponente 2, die durch Defekte im p-n-Übergang der Zelle hervorgerufen wird. Und Komponente 3, die aufgrund von Shunts mit linearer Strom-Spannungs-Kennlinie entsteht. Diese drei Komponenten zeigen verschiedene Spannungsabhängigkeiten des Dunkelstroms. Wer diese Spannungsabhängigkeit der lokalen Ströme misst und auswertet, kann alle Komponenten getrennt voneinander abbilden.

### **Spannungsabhängige Analyse des Dunkelstroms von Solarzellen**

Das automatisierte System PV-LIT von InfraTec zur Solarzellen- und Solarmodulprüfung eignet sich für eine solche Analyse. Die Lock-In-Thermografie bildet hier den lokal bei einer bestimmten angelegten Spannung fließenden Dunkelstrom ab, indem sie die durch diese Ströme hervorgerufene lokale Temperaturerhöhung registriert. Die Messungen erfolgen im Dunkeln mit einer Wärmebildkamera der High-End-Serie ImagerIR® bei mehreren an die Solarzelle angelegten pulsieren-

den Spannungen zwischen -1 V und +0,7 V. Die Modulationsfrequenz beträgt üblicherweise 10 Hz. Die Steuerung und Verarbeitung der Messergebnisse erfolgt mit der Thermografiesoftware IRBIS® 3 active. Für die Auswertung der Thermogramme dient eine spezielle Software. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen die Ergebnisse einer solchen Auswertung für eine aktuelle Hochleistungszelle aus multikristallinem Silizium. **Abb. 1**

zeigt den gesamten Strom, der bei einer angelegten Spannung von 0,52 V fließt. Die gewählte Spannung orientiert sich am üblichen Arbeitspunkt der Zelle. **Abb. 2** gibt die Komponente 1 des Stroms wieder und **Abb. 3** die Komponente 2. Bei dieser Beispielmessung fiel Komponente 3 vernachlässigbar klein aus. Die Aufnahmen verdeutlichen, dass die Komponenten 1 und 2 an verschiedenen Stellen in der Zelle fließen. Komponente 1 ist

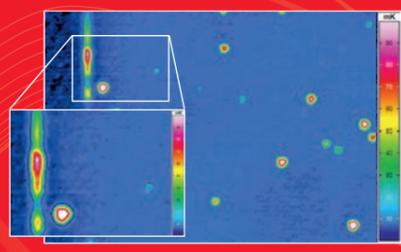
vor allem in gewissen Defektbereichen erkennbar. Teilweise gilt dies auch für Komponente 2. Vorwiegend tritt diese jedoch am Rand der Zelle auf. Auch im Bereich der in **Abb. 3** mit zwei Pfeilen markierten nahezu horizontalen Struktur findet sich nur Strom der Komponente 2. Derart detaillierte Ergebnisse nutzen z. B. Akteure der Solarbranche um den Wirkungsgrad von Solarzellen weiter zu verbessern.





## Lock-In-Thermografie

### Qualitätsanalyse an Solarzellen und -modulen



- Zuverlässige Defekterkennung (Shunts), z. B. von Dunkelströmen, an Solarzellen und -modulen per Lock-In-Thermografie
- Einsatz von High-Speed-Thermografiekameras im MegaPixel-Format
- Auswahl vom Labormessplatz bis zum automatisierten Komplettsystem PV-LIT für Inline-Messungen während der Fertigung
- Untersuchung von Messobjekten mit Strukturen bis hin zu wenigen µm und einer thermischen Auflösung im Mikrokkelvin-Bereich
- Thermografiesoftware IRBIS® 3 active für Speicherung, umfangreiche Analyse sowie Vergleich der Messdaten

Amplitudenbild eines Dünnschichtmoduls

Qualität aus Deutschland

## Kontakt

**InfraTec GmbH**  
 Infrarotsensorik und Messtechnik  
 Gostritzer Straße 61–63  
 D-01217 Dresden  
 Tel.: +49 (0)351 871-8620  
 Fax: +49 (0)351 871-8727  
 thermo@InfraTec.de  
[www.InfraTec.de](http://www.InfraTec.de)