



## Wärmebildkameras - ein schnelles und zuverlässiges Werkzeug für die Überprüfung von Solarmodulen.

Qualitätssicherung ist bei Solarmodulen von größter Wichtigkeit. Der störungsfreie Betrieb der Module ist Grundvoraussetzung für effiziente Stromerzeugung, lange Betriebsdauer und schnelle Amortisierung der Investition. Um diesen einwandfreien Betrieb sicherzustellen, bedarf es einer schnellen, einfachen und zuverlässigen Methode zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Solarmoduls, sowohl während der Fertigung als auch nach seiner Montage.

Zu diesen Zwecken mit einer Wärmebildkamera zu arbeiten bringt gleich mehrere Vorteile. Auffälligkeiten lassen sich auf einem Wärmebild klar erkennen und - im Gegensatz zu anderen Verfahren - können Wärmebildkameras zur Untersuchung montierter Solarmodule verwendet werden, auch während diese in Betrieb sind. Außerdem können mit Infrarotkameras innerhalb kürzester Zeit große Flächen untersucht werden.

In Forschung und Entwicklung (F&E) sind Wärmebildkameras bereits ein gängiges Werkzeug zur Überprüfung von Solarzellen und -modulen. Für diese technisch anspruchsvollen Messungen kommen zumeist hochleistungsfähige Kameras mit gekühlten Detektoren unter kontrollierten Laborbedingungen zum Einsatz.

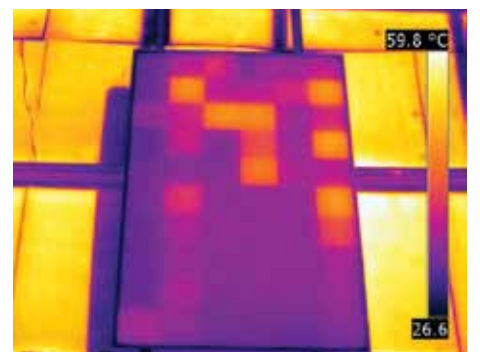
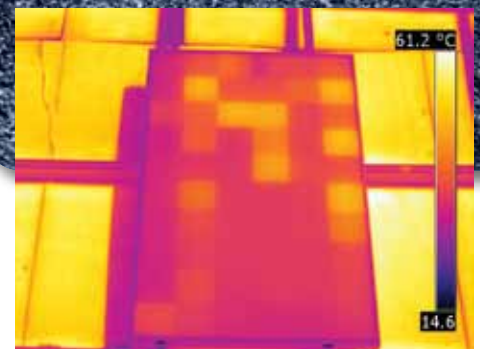
Trotzdem beschränkt sich die Verwendung von Wärmebildkameras für die Untersuchung von Solarmodulen nicht allein auf die Forschung. Ungekühlte Wärmebildkameras unterstützen immer öfter die Qualitätskontrolle von Solarmodulen vor der Montage und die regelmäßigen Kontrollen im Rahmen der vorbeugenden Wartung nach deren Montage. Da diese preiswerten Kameras nicht viel wiegen und sich einfach handhaben lassen, sind sie vor Ort sehr flexibel einsetzbar.

Mit einer Wärmebildkamera können

potentielle Probleme entdeckt und behoben werden, bevor es zu Störungen oder gar Ausfällen kommt. Aber nicht jede Wärmebildkamera eignet sich für die Kontrolle von Solarzellen und zudem müssen einige Regeln und Richtlinien beachtet werden, damit die Untersuchung erfolgreich ist und keine falschen Schlüsse gezogen werden. Die Beispiele in diesem Artikel beziehen sich auf PV-Module mit kristallinen Solarzellen; aber die Regeln und Richtlinien gelten genauso für die Untersuchung von Dünnschichtzellen, da die thermografischen Grundprinzipien allgemein gültig sind.

### Verfahren zur Untersuchung von Solarmodulen mit Wärmebildkameras

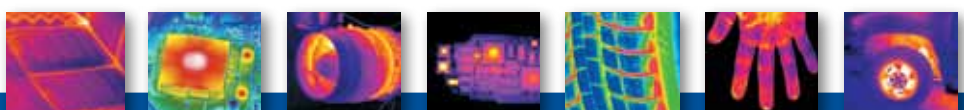
Während des Entwicklungs- und Fertigungsprozesses werden die Solarzellen entweder elektrisch oder mithilfe von gepulstem Licht (Blitzlampen) angeregt. Dies sorgt für einen ausreichenden thermischen Kontrast, um genaue



Thermogramm mit Level und Span im Automatikmodus (oben) und im manuellen Modus (unten).

thermografische Messungen zu gewährleisten. Dieses Verfahren kann jedoch vor Ort nicht angewendet werden und die Energiezufuhr geschieht einzig durch die Sonneneinstrahlung.

Um bei einer Inspektion von Solarzellen vor Ort über einen ausreichenden thermischen Kontrast zu erreichen, ist eine Sonneneinstrahlung von 500 W/m<sup>2</sup>, besser 700 W/m<sup>2</sup>, erforderlich. Ein optimales Ergebnis lässt sich bei einer Strahlungsintensität von 700 W/m<sup>2</sup> erzielen. Die Sonneneinstrahlung beschreibt die momentane Energieeinwirkung auf eine Fläche in der Einheit kW/m<sup>2</sup> und lässt sich entweder mit einem Pyranometer (für globale Sonneneinstrahlung) oder einem Pyrheliometer (für direkte

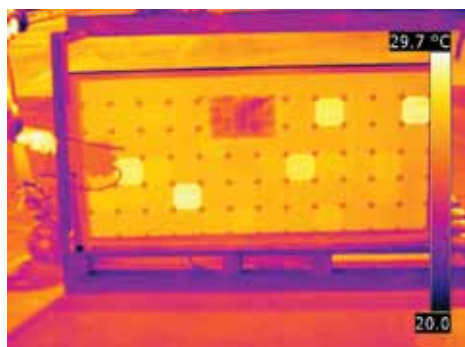


Sonneneinstrahlung) messen. Dabei über Standort und lokale Wetterbedingungen einen großen Einfluss aus. Niedrige Außentemperaturen können ebenfalls den thermischen Kontrast erhöhen.

## Welche Kamera ist die richtige für Sie?

Portable Wärmebildkameras für Inspektionen im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung sind normalerweise mit einem ungekühlten Mikrobolometer-Detektor ausgestattet, der im Wellenbereich 8–14 µm arbeitet. Glas ist in diesem Wellenlängenbereich nicht transparent. Wenn PV-Module von vorne untersucht werden, erfasst eine Wärmebildkamera zwar die Wärmeverteilung direkt auf der Glasoberfläche, aber nur indirekt die Wärmeverteilung in den darunter liegenden Zellen. Darum können die Temperaturunterschiede, die für die Glasoberfläche des Solarmoduls gemessen und angezeigt werden, klein sein. Um diese Unterschiede sichtbar machen zu können, benötigen die für solche Inspektionen eingesetzten Wärmebildkameras eine thermische Empfindlichkeit von  $\leq 0,08$  K. Für eine deutliche Anzeige geringer Temperaturunterschiede auf dem Wärmebild sollte mit der Kamera auch eine manuelle Justierung von Level und Span möglich sein.

Im allgemeinen werden PV-Module auf stark reflektierende Aluminiumrahmen montiert, die auf dem Wärmebild als kalte Zonen erscheinen, da sie die Wärmestrahlung des Himmels reflektieren. Für die Praxis heißt das, dass die Wärmebildkamera die Rahmentemperatur als deutlich unter 0 °C anzeigen wird. Da sich aber ihr Histogramm-



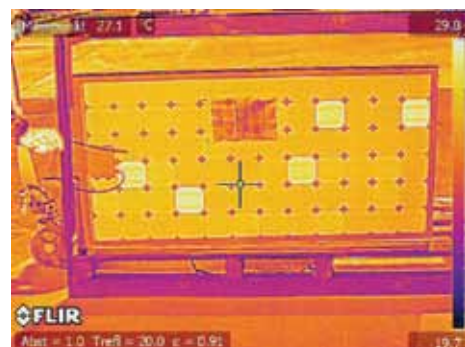
Wärmebild ohne DDE (links) und mit DDE (rechts).

Ausgleich automatisch an die höchsten und niedrigsten gemessenen Temperaturen anpasst, werden viele geringe thermische Auffälligkeiten nicht sofort sichtbar sein. Für einen hohen thermischen Kontrast des Wärmebilds müssen Level und Span darum ständig von Hand nachkorrigiert werden.

Die sogenannte DDE-Funktion (Digital Detail Enhancement) liefert hier die Lösung des Problems. DDE optimiert automatisch den Bildkontrast in Szenen mit hohem Dynamikbereich, so dass das Wärmebild nicht länger von Hand justiert zu werden braucht. Eine Wärmebildkamera mit DDE ist darum ideal für schnelle und exakte Überprüfungen von PV-Modulen.

## Nützliche Funktionen

Eine weitere nützliche Funktion für eine Wärmebildkamera ist die Referenzierung von Wärmebildern mit GPS-Daten. Damit lassen sich fehlerhafte Module problemlos in großen Anlagen wie z.B. Solarparks lokalisieren und auch die Wärmebilder, etwa



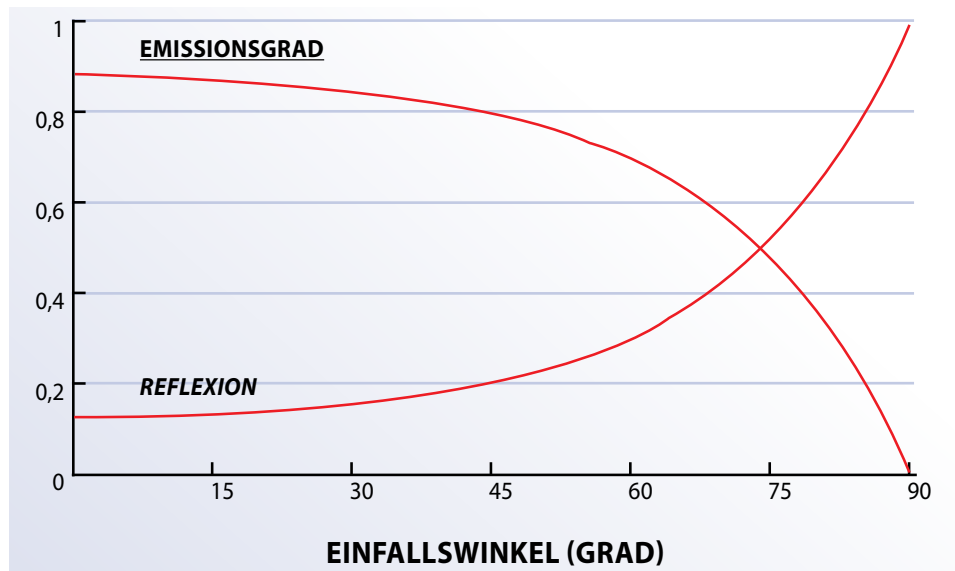
in Berichten, den Modulen zuordnen.

Die Wärmebildkamera sollte mit einer integrierten Digitalkamera ausgestattet sein, damit das zugeordnete Tageslichtbild (Digitalfoto) zusammen mit dem entsprechenden Wärmebild gespeichert werden kann. Auch ein sogenannter Fusion-Modus, bei dem das Wärmebild das Digitalbild überlagert, ist sinnvoll. Gesprochene und schriftliche Kommentare, die zusammen mit dem Wärmebild in der Kamera gespeichert werden können, vereinfachen die anschließende Berichterstellung.

## Positionieren der Kamera: Reflexionen und Emissionsgrad berücksichtigen

Obwohl Glas im Wellenlängenbereich von 8..14 µm einen Emissionsgrad von 0,85..0,9 besitzt, sind thermische Messungen auf Glasoberflächen nicht einfach auszuführen. Glas reflektiert gerichtet, d.h. Objekte aus der Umgebung, die eine abweichende Temperatur aufweisen, sind deutlich im Wärmebild zu erkennen. Schlimmstenfalls führt dies zu Fehlinterpretationen (vermeintliche 'hot spots') und Messfehlern.

Um Reflexionen der Wärmebildkamera und des Bedieners im Glas zu vermeiden, sollte die Kamera nicht senkrecht zu dem zu untersuchenden Modul positioniert

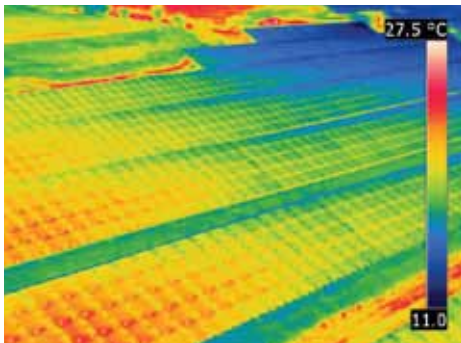


Winkelabhängigkeit des Emissionsgrads von Glas



Empfohlener (grün) bzw. zu vermeidender (rot) bei thermografischen Untersuchungen.





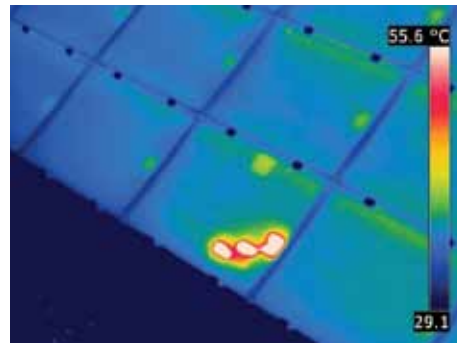
Um falsche Schlussfolgerungen zu vermeiden, muss die Wärmebildkamera bei der Überprüfung von Sonnenkollektoren im richtigen Winkel gehalten werden.

werden. Der Emissionsgrad ist jedoch für die Senkrechte am größten und nimmt mit zunehmendem Winkel ab. Ein Betrachtungswinkel von 5 bis 60° ist ein guter Kompromiss (0° entspricht dabei der Senkrechten).

### Beobachtungen aus größeren Entfernungen

Es ist nicht immer einfach, beim Aufbau einer Messung einen geeigneten Betrachtungswinkel zu finden. In vielen Fällen ist die Verwendung eines Stativs eine Lösung. In schwierigeren Situationen kann es erforderlich sein, mobile Arbeitsplattformen zu verwenden oder sogar mit einem Hubschrauber über die Solarmodule zu fliegen. Dabei bietet die größere Entfernung den Vorteil, große Bereiche auf einmal betrachten zu können. Damit eine entsprechende Qualität des Wärmebilds sichergestellt wird, sollte bei diesen großen Entfernungen eine Wärmebildkamera mit einer Auflösung von mindestens 320 x 240 Pixeln, besser noch mit 640 x 480 Pixeln verwendet werden.

Die Kamera sollte außerdem eine Wechseloptik besitzen, so dass der Bediener bei Fernaufnahmen, zum Beispiel vom Hubschrauber aus, mit einem



Mit einer FLIR P660 aufgenommenes Wärmebild während der Überfliegung einer Solaranlage. (Thermogramm mit freundlicher Genehmigung von Evi Müllers, IMM)

Teleobjektiv arbeiten kann. Generell ist zu empfehlen, dass Teleobjektive nur zusammen mit Wärmebildkameras mit einer hohen Bildauflösung benutzt werden. Wärmebildkameras mit niedriger Bildauflösung sind nicht in der Lage, die geringen Temperaturunterschiede darzustellen, die mit einem Teleobjektiv aus großen Entfernungen erfasst werden und Defekte bei einem Solarmodul anzeigen.

### Blick aus einer anderen Perspektive

Meistens lassen sich montierte PV-Module auch von ihrer Rückseite aus mit einer Wärmebildkamera untersuchen. Dadurch werden störende Reflexionen durch Sonne oder Wolken vermieden. Außerdem können die auf der Rückseite auftretenden Temperaturen höher sein, da die Zelle direkt gemessen wird und nicht durch die Glasoberfläche.

### Umgebungs- und Messbedingungen

Für die Durchführung einer thermografischen Untersuchung sollte der Himmel wolkenlos sein, da Wolken die Sonneneinstrahlung verringern und zusätzlich störende Reflexionen verursachen. Dennoch lassen sich aussagekräftige Bilder auch bei Bewölkung erzielen, unter der Voraussetzung, dass die verwendete Wärmebildkamera

empfindlich genug ist. Ebenso ist Windstille wünschenswert, da jeder Luftstrom auf der Oberfläche des Solarmoduls zu einer Abkühlung durch Konvektion führt, und den thermischen Gradienten verringert. Je niedriger die Lufttemperatur, desto höher der mögliche thermische Kontrast. Thermografische Untersuchungen am frühen Morgen durchzuführen ist daher eine Möglichkeit.

Eine weitere Möglichkeit, den thermischen Kontrast zu erhöhen, besteht darin, die Solarzellen von elektrisch zu trennen und damit den Stromfluss zu verhindern, so dass es zu einer Erwärmung allein durch Sonneneinstrahlung kommt. Dann werden die Zellen wieder angeschlossen und während der Aufwärmphase betrachtet.

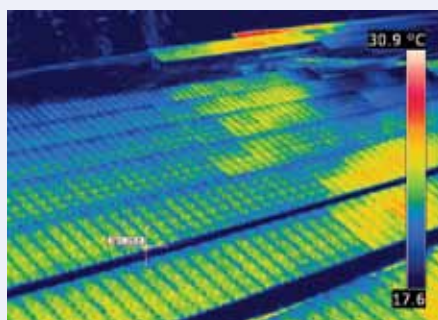
Im Normalfall sollte das System jedoch bei den standardmäßigen Betriebsbedingungen, sprich im Lastbetrieb, untersucht werden. Je nach Solarzellentyp und Art des Defekts können Messungen im Leerlauf oder Kurzschluss zusätzliche Informationen liefern.

### Messfehler

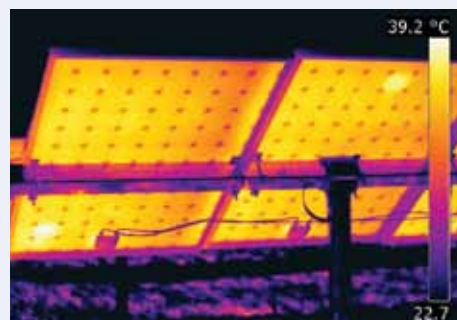
Messfehler entstehen in erster Linie durch eine ungünstige Positionierung der Kamera und nicht optimale Umgebungs- und Messbedingungen. Typische Messfehler entstehen durch:

- zu flachen Betrachtungswinkel
- fluktuierende Sonneneinstrahlung während der Aufnahme (beispielsweise durch wechselnde Bewölkung)
- Reflexionen (beispielsweise Sonne, Wolken, höhere Gebäude in der Umgebung, Aufbau der Messung)
- Teilabschattung (beispielsweise durch umgebende Gebäude oder andere Einrichtungen).

### Was sieht man auf dem Wärmebild?

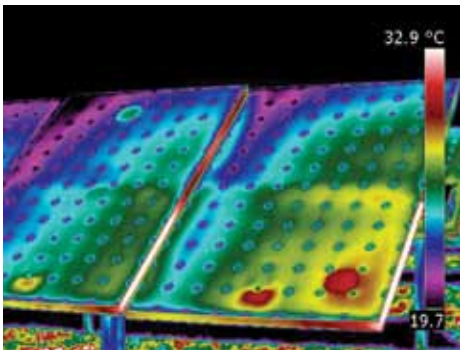


Dieses Wärmebild zeigt große Bereiche erhöhter Temperatur. Ohne zusätzliche Informationen ist nicht ersichtlich, ob es sich dabei um thermische Auffälligkeiten oder Abschattung/Reflexionen handelt.

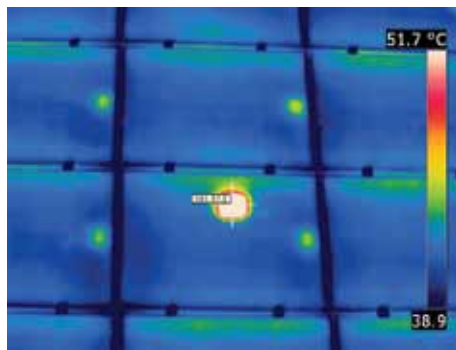


Mit einer FLIR P660 aufgenommenes Wärmebild von der Rückseite eines Solarmoduls. Das entsprechende Tageslichtbild ist rechts zu sehen.

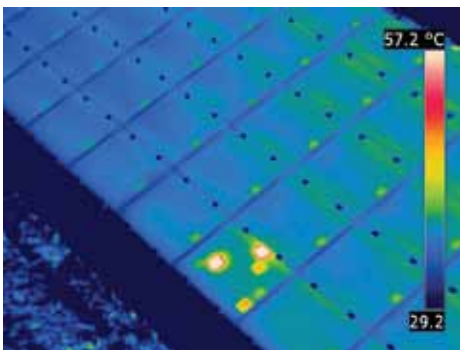




Diese roten Stellen zeigen Module an, die ständig wärmer sind als der Rest, und liefern somit einen Hinweis auf fehlerhafte Anschlüsse.



Diese heiße Stelle in einer Solarzelle weist auf eine physikalische Beschädigung im Zellinnern hin.



Dieses Wärmebild zeigt ein Beispiel für ein sogenanntes "Patchwork-Muster", das bei einer fehlerhaften Bypass-Diode der Solarzelle erscheint.

Wenn Teile des Solarmoduls heißer sind als andere, werden die warmen Bereiche deutlich im Wärmebild dargestellt. Je nach Form und Position können diese heißen Stellen und Bereiche Anzeichen für unterschiedliche Defekte sein. Die Überhitzung von Modulen weist dabei auf Verschaltungsfehler hin.

Die Erwärmung einzelner Zellen und Zellstränge ("Patchwork"-Muster) im Modul wird i.A. durch defekte Bypassdioden, interne Kurzschlüsse und Zellmismatch verursacht.

Abschattung und Zellrisse erscheinen als heiße Stellen oder polygonale Flecken im Wärmebild. Der Temperaturanstieg einer Zelle oder von Teilen einer Zelle ist ein Zeichen für eine defekte Zelle oder Abschattung. Wärmebilder, die unter Last-, Leerlauf- und Kurzschlussbedingungen aufgenommen wurden, sollten miteinander verglichen werden. Auch ein Vergleich von Wärmebildern der Vorder- und Rückseite des Moduls kann wertvolle Informationen liefern. Für die korrekte Identifizierung des Defekts müssen Module, bei denen Auffälligkeiten festgestellt wurden, natürlich auch elektrisch und visuell geprüft werden.

## Fazit

Die thermografische Untersuchung von Photovoltaiksystemen ermöglicht das schnelle Lokalisieren möglicher Defekte auf Zell- und Modulebene sowie möglicher Verschaltungsfehler. Die Inspektionen werden unter normalen Betriebsbedingungen durchgeführt und erfordern keine Abschaltung der Anlage.

Für die Aufnahme korrekter und aussagekräftiger Wärmebilder sollten bestimmte Randbedingungen und Messanweisungen eingehalten werden:

- eine geeignete Wärmebildkamera mit dem richtigen Zubehör sollte verwendet werden;
- ausreichende Sonneneinstrahlung ist erforderlich (mindestens 500 W/m<sup>2</sup> – nach Möglichkeit eine Strahlungsintensität von mehr als 700 W/m<sup>2</sup>);
- der Betrachtungswinkel muss innerhalb der sicheren Grenzwerte liegen (zwischen 5° und 60°);
- Abschattung und Reflexionen müssen vermieden werden.

Wärmebildkameras werden in erster Linie zur Lokalisierung von Defekten eingesetzt. Die Klassifizierung und Bewertung der entdeckten thermischen Auffälligkeiten erfordert fundierte Kenntnisse der Solartechnik und umfassende Kenntnis der untersuchten Anlage sowie zusätzliche elektrische Messungen. Sorgfältige Dokumentation ist natürlich Pflicht und sollte alle Inspektionsbedingungen, zusätzlichen Messungen und andere relevante Informationen enthalten.

Inspektionen mit einer Wärmebildkamera - angefangen bei der Qualitätskontrolle während der Installationsphase und gefolgt von regelmäßigen Überprüfungen - ermöglichen eine umfassende und einfache Zustandsüberwachung der Anlage und tragen somit zum Erhalt ihrer Funktionsfähigkeit und Verlängerung ihrer Lebensdauer bei. Der Einsatz von Wärmebildkameras bei der Inspektion von Solarmodulen verbessert daher deutlich die Rendite der Betreibergesellschaft.

Fehlerart	Beispiel	Erscheint im Wärmebild als
Produktionsfehler	Verunreinigungen und Gaseinschlüsse	"Hot Spot" oder "Cold Spot"
	Zellrisse	Zellerwärmung, meist längliche Form
Beschädigung	Risse	Zellerwärmung, meist längliche Form
	Zellrisse	Teil einer Zelle erscheint wärmer
Temporäre Abschattung	Verschmutzung	Punktförmige Erwärmung
	Vogeldreck	
	Luftfeuchtigkeit	
Fehlerhafte Bypass-Diode (verursacht Kurzschluss und setzt Verschattungsschutz herab)	k. A.	Ein "Patchwork-Muster"
Verschaltungsfehler	Modul oder Modulstrang nicht angeschlossen	Ein Modul oder ein Modulstrang ist gleichmäßig wärmer

Tabelle 1: Liste mit typischen Modulfehlern (Quelle: ZAE Bayern e.V., "Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen", 2007)

Weiterführende Informationen erhalten Sie unter [www.flir.com](http://www.flir.com) oder wenden Sie sich an:

emitec messtechnik ag  
birkenstrasse 47 6343 rotkreuz switzerland  
tel +41 (0)41 748 60 10 fax +41 (0)41 748 60 11  
service +41 (0)41 748 60 19  
info@emitec.ch www.emitec.ch

leader in test and measurement...