

Let it glow!

Wie man ins Innenleben von Solarmodulen schauen kann – und was solche Bilder zeigen

Solarzellen können nicht nur Strom erzeugen, sondern auch leuchten. Denn der photovoltaische Effekt ist umkehrbar: Wird Spannung an eine Zelle angelegt, strahlt diese Licht aus, allerdings im Infrarotbereich, der für das menschliche Auge unsichtbar bleibt. Spezielle Kameras machen das Phänomen sichtbar – und liefern aufschlussreiche Bilder: Was darauf nicht leuchtet, erzeugt im Normalbetrieb auch keinen Strom. In unserer Übersicht zeigen wir, wie Defekte und mögliche Fehlerquellen aussehen und wie sie entstehen.

Schadensbilder von Solarmodulen sind für Martin Regehly eigentlich alltägliches Geschäft. Seine Firma Greateyes GmbH entwickelt und verkauft Spezialkameras für Elektrolumineszenzaufnahmen (EL-Aufnahme). Damit lässt sich das Innenleben von Zellen und Modulen erkunden – die charakteristischen schwarz-weißen Bilder machen die elektrische Aktivität von Zellen sichtbar und zeigen, ob sie korrekt arbeiten oder zum Beispiel Mikrorisse und andere Defekte aufweisen. Als Regehly für einen Kunden im Hafen von Rotterdam 600 Solarmodule eines chinesischen Herstellers durchleuchtete, war er verblüfft: 13 Prozent der fabrikneuen Module wiesen bereits feine Risse in ihren Zellen auf. »Ich hätte nicht gedacht, dass so viele Module davon betroffen sind«, sagt Regehly. In vier Prozent aller untersuchten Module fand er zudem weitere Auffälligkeiten und Defekte aus dem Herstellungsprozess. Nach dem Weitertransport in einen italienischen Solarpark maß Regehly noch einmal nach:



Auf dem Prüfstand: Für eine Elektrolumineszenzaufnahme wird ein Solarmodul bestromt. Das Leuchten der Zellen ist für das menschliche Auge allerdings unsichtbar.

Nun waren bereits 20 Prozent der Module von Mikrorissen durchzogen.

Glücklicherweise sind so umfangreiche Schäden eher die Ausnahme. Auch wirken sich Herstellungs- und Transportschäden nicht immer negativ auf den Ertrag eines Solarmoduls aus. Selbst wenn kleine Bereiche einer verbauten Zelle gar keinen Strom produzieren, muss dies die Leistung des Moduls nicht unbedingt mindern. Inaktive Zellbereiche werden vom Hersteller schlicht »eingepreist«. Der Kunde zahlt schließlich für eine bestimm-

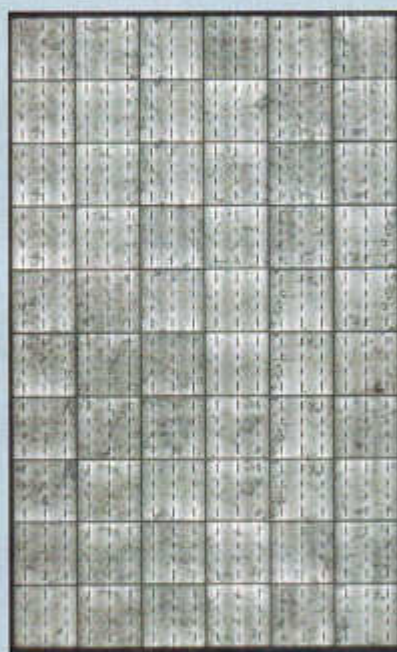
te Modulleistung und die wird erst am Ende des Produktionsprozesses ermittelt.

Fehler, die sich erst noch kritisch entwickeln könnten, fallen im Produktionsprozess auf – jedenfalls wenn der Hersteller über eine funktionierende Qualitätskontrolle verfügt. Das Modul wird dann aussortiert. Doch nicht alle Hersteller haben die dafür notwendigen Messverfahren in ihre Fertigungsabläufe integriert. Und Transportschäden können auf diese Weise ebenfalls nicht erfasst werden, treten sie doch naturge-

mäß erst auf, nachdem die Module das Werkstor passiert haben. Manche Defekte treten zudem abhängig von den lokalen Klimabedingungen erst im bereits installierten Modul zutage.

Ob ein Modul einen ernsten Defekt aufweist und wann es sich lohnt, Auffälligkeiten im Auge zu behalten, all dies lässt sich in den meisten Fällen anhand einer EL-Aufnahme klären. Auf den folgenden Seiten stellen wir eine Reihe typischer Defekte vor und erklären, wodurch sie hervorgerufen werden. **Stefan Korn**

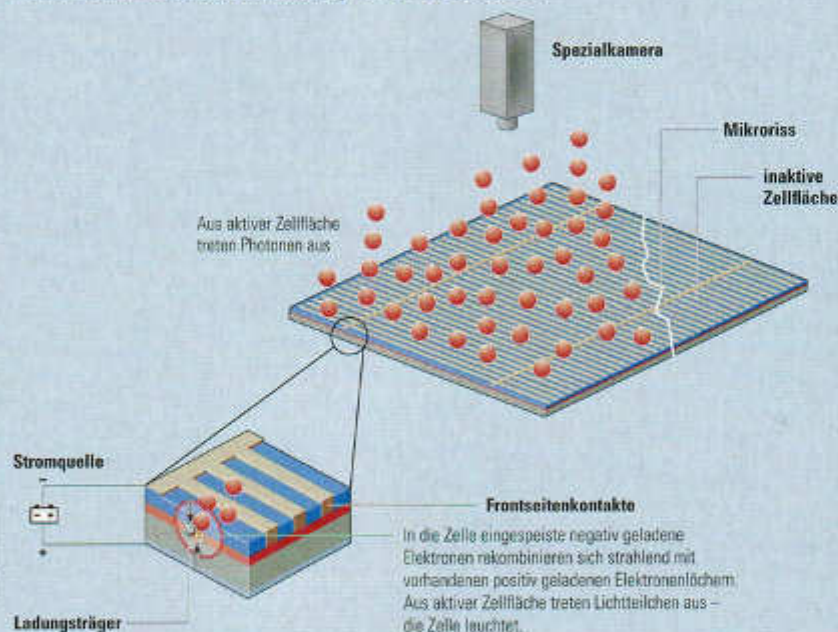
Elektrolumineszenz bei Solarzellen



Elektrolumineszenzaufnahme eines polykristallinen Solarmoduls

Normalerweise wandelt eine Solarzelle einfallendes Licht in elektrischen Strom um. Das funktioniert auch umgekehrt. Wird an eine Zelle eine Spannung angelegt, setzt sie Photonen frei – sie fängt an zu leuchten (siehe Infografik). Das abgestrahlte Licht liegt bei kristallinen Zellen jedoch im nahen infraroten Bereich und ist für das menschliche Auge nicht sichtbar. Daher kommen spezielle Kameras zum Einsatz: die Elektrolumineszenzkameras (EL-Kameras). Um die Lichtteilchen einzufangen, waren bis vor wenigen Jahren lange Belichtungszeiten unausweichlich. Heute aber lassen sich hochauflösende Aufnahmen einer Zelle oder eines Moduls im Sekundentakt anfertigen. Mit Preisen zwischen 10.000 und 35.000 Euro liegen die Spezialkameras für die allermeisten Unternehmen zudem im erschwinglichen Bereich. Sogar handelsübliche Spiegelreflexka-

Elektrolumineszenzmessung einer Solarzelle



meras lassen sich zu EL-Kameras umbauen, etwa die Canon EOS 400D. Lediglich der Infrarotfilter vor dem Sensorchip muss dafür entfernt werden. Außerdem bedarf es eines Objektivs, das Lichtwellen des nahen Infrarotbereichs passieren lässt. Zudem ist eine recht lange Belichtungszeit einzukalkulieren und die Kontraste des aufgenommenen Bildes müssen verbessert werden.

Immer mehr Zell- und Modulhersteller integrieren professionelle Messsysteme direkt in ihre Fertigungslinien. Insbesondere nach fehleranfälligen Produktionsschritten wie der Versträngung der Zellen (siehe Kasten »Fingerabriss«) werden inzwischen zunehmend Qualitätskontrollen eingesetzt. Überschreitet eine bestimmte Auffälligkeit einen Toleranzwert, wird die Zelle aussortiert und ersetzt, bevor das Modul weitere Produktionsschritte durchläuft. Betreiber und Versicherungsunterneh-

men können die Elektrolumineszenzprüfung nutzen, um unsichtbare Schäden zu identifizieren. Speziallabore bieten die Prüfungen für rund 100 Euro pro Modul an. Auch mobile Messungen sind inzwischen möglich. Verdächtige Module lassen sich dadurch ohne vorherige Demontage direkt vor Ort inspizieren.

Für die aufgenommenen Bilder gilt: Je mehr Photonen ein Zellbereich abstrahlt, desto aktiver ist dieser auch in der Stromerzeugung. Auf den Aufnahmen erscheinen elektrisch aktive Regionen daher als hell, inaktive Bereiche werden dunkel dargestellt. Mit den Messungen lassen sich auch Auffälligkeiten nachweisen, die bislang keine oder nur geringe Leistungseinbußen verursachen. Und schließlich lässt sich anhand einer EL-Aufnahme sogar abschätzen, ob in dem betroffenen Modul in Zukunft Probleme auftreten könnten. sk

Mikrorisse

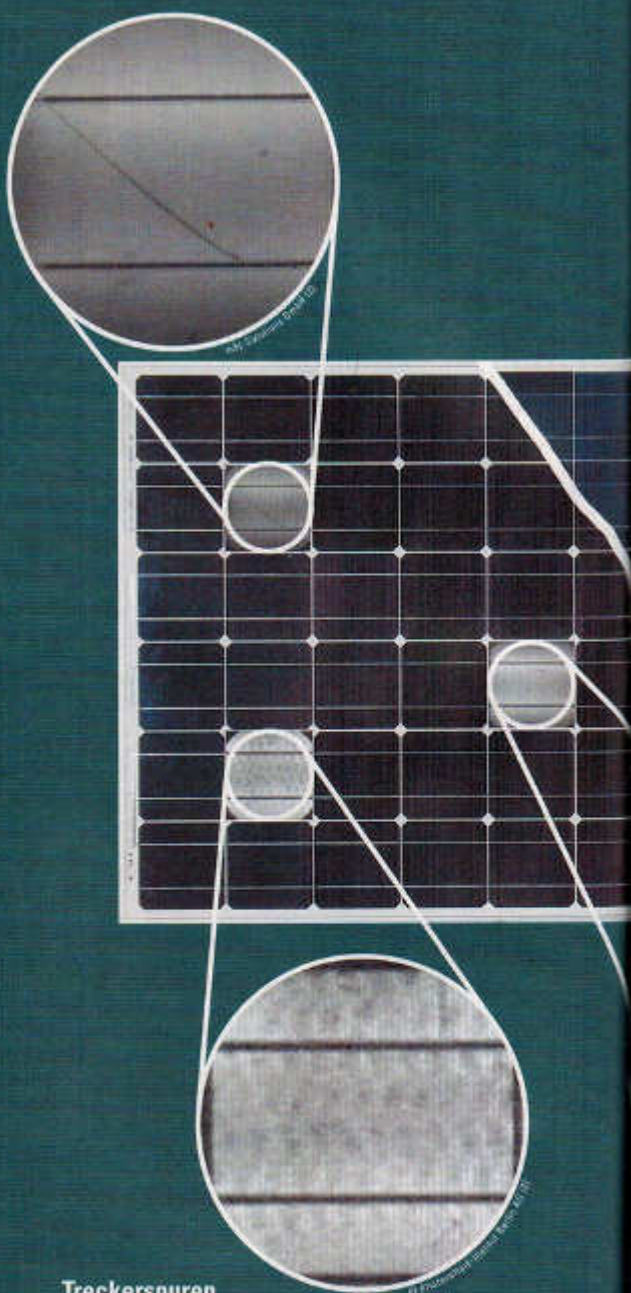
Mikrorisse sind wohl die bekannteste Auffälligkeit, die sich mittels EL-Aufnahme nachweisen lässt. Die Ursachen für die feinen, mit dem bloßen Auge meist nicht erkennbaren Risse sind vielfältig. Eine Solarzelle ist hauchdünn – nur etwa dreimal so dick wie ein menschliches Haar. Ein Stoß, ein Rütteln während des Produktionsprozesses oder des Transports – und ein unsichtbarer Riss durchzieht das Silizium. Sogar die Herstellungsschritte selbst können Risse verursachen: etwa das Sägen der Wafer oder das Verlöten der einzelnen Zellen zu Strings (siehe Kasten »Fingerabrisse«). Selbst in fabriktrenen Modulen sind daher oft Mikrorisse zu finden.

In bereits installierten Modulen kommt es aufgrund von Temperaturschwankungen zu wechselnden Spannungen zwischen verschiedenen Materialien. Auch hierdurch können neue Risse entstehen oder bereits vorhandene größer werden. Wind, Schnee oder Hagel sind weitere Faktoren, die Module mechanisch belasten.

Mikrorisse können, müssen sich aber nicht negativ auf Ertrag und Lebensdauer eines Moduls auswirken. Solange ein Mikroriss – wie in diesem Fall – nicht die Metallisierung der Zelle verletzt, kann weiterhin Strom fließen. Ob ein elektrisch trennender Riss Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Zelle hat, ist von verschiedenen Faktoren

abhängig. Erst wenn ein Teil der Zelle isoliert ist, kann der Strom nicht mehr von den Kontaktfingern zu den Stromsammelschienen abfließen (siehe Infografik).

Wie Wissenschaftler des Instituts für Solarenergieforschung in Hameln herausgefunden haben, liegt die Minderleistung eines Moduls, bei dem acht Prozent der gesamten Zellfläche aufgrund von Mikrorissen betroffen sind, bei weniger als 2,5 Prozent – solange die Kontakte auf der Zelloberfläche nicht durchtrennt sind. Die Minderleistung unterschreitet in diesem Fall die Messtoleranz. Bei einzelnen Mikrorissen lässt sich gar kein Verlust feststellen. Je nach Ausprägung des Risses lässt sich abschätzen, ob eine kritische Entwicklung der Risse wahrscheinlich ist. Zellen, in denen ein größerer Bereich von einem Mikroriss elektrisch isoliert wurde, werden von verantwortungsvollen Modulherstellern aussortiert. Denn solche Zellen können bei mechanischer Belastung oder Temperaturschwankungen weiterreißen, bis der Riss elektrisch wirksam wird (siehe Kasten »Zellbruch oder aktiver Riss«). Dabei gilt: je dünner der verwendete Wafer, desto höher das Bruchrisiko. Da die Hersteller Materialkosten einsparen wollen, werden die Zellen immer dünner – das Risiko von Mikrorissen steigt. sk



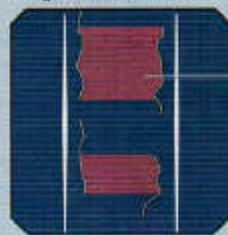
Wie sich Mikrorisse auswirken

seitliche isolierende Risse



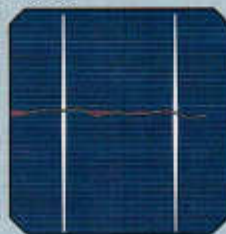
Bei diesen beiden Zellen haben Mikrorisse die Kontaktfinger so durchtrennt, dass der Strom in manchen Bereichen nicht mehr zu den Sammelschienen abfließen kann. Die Zellbereiche sind inaktiv.

mittige isolierende Risse



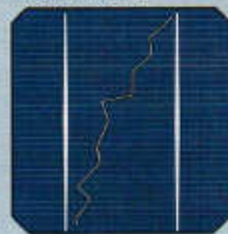
— inaktive Zellfläche

Querriss



Bei dieser Zelle verläuft der Riss quer zu den Sammelschienen. Der Strom wird weiterhin von den Kontaktfingern abgeleitet.

mittiger Längsriss



Ein längs verlaufender Riss in der Mitte der Zelle hat keine Auswirkungen. Der Strom wird über die jeweils andere Sammelschiene abgeführt.

© iStock, © Wang Bao/istockphoto

Treckerspuren

Nein, hier ist kein Traktor drüber gefahren. Das kreuzartige Muster auf dieser EL-Aufnahme hat seinen Ursprung vielmehr in der Zellfertigung. Ähnlich wie auf der Vorderseite einer Zelle feine Metallgitter und die verbindenden Busbars aufgedruckt werden, wird auch auf der Rückseite zur Kontaktierung eine Metallpaste aufgebracht, meist aus Aluminium. Wie die Metallisierung auf der Vorderseite, wird auch diese Schicht in einem Durchlaufofen bei 800 bis 900 Grad Celsius eingetrocknet. Das Transportband, auf dem die Zelle befördert wird, kann allerdings eine ungleichmäßige Hitzeverteilung verursachen. Auf der Rückseite der Zelle entsteht dann das mit bloßem Auge nicht sichtbare Muster. Auf die Leistungsfähigkeit der Zelle haben »Treckerspuren« allerdings keine messbare Auswirkung. Sie fallen daher in die Kategorie der Kuriositäten. sk

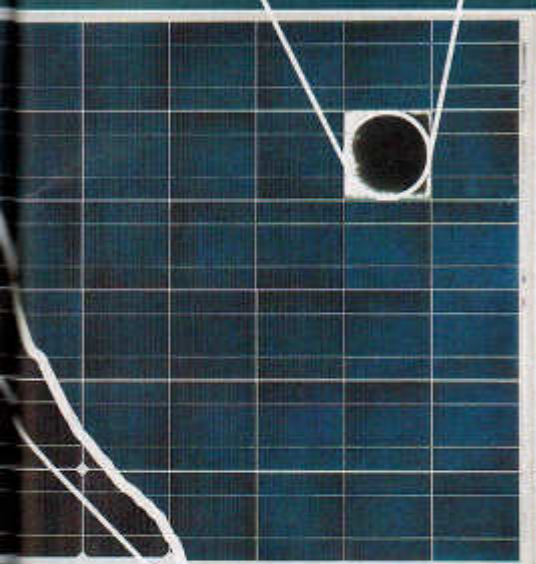
Überfeuert

Als wäre ein Tintenfass ausgelaufen: Diese Zelle leistet so gut wie gar nichts mehr. Große Bereiche bleiben daher dunkel. Die Ursache liegt in der Zellfertigung: Die stromabnehmenden Kontakte auf der Zelloberfläche wurden durch das sogenannte »Sintern« im Durchlaufofen zerstört. Eigentlich dient dieses Verfahren dazu, die mittels eines Siebdruckverfahrens aufgetragenen Kontaktfinger und Bus-

bars in die Zelle hineinzubrennen, damit sie sich mit der Emitterschicht im Inneren der Zelle verbinden. Erst dann kann Elektrizität aus der Zelle abgeleitet werden. In diesem Fall fand die Metallisierung allerdings bei mehr Hitze statt als nötig. In einem fertigen Modul sollte eine solche Zelle nicht auftauchen, weil sie spätestens bei der Leistungsmessung durchgefallen sein müsste. sk



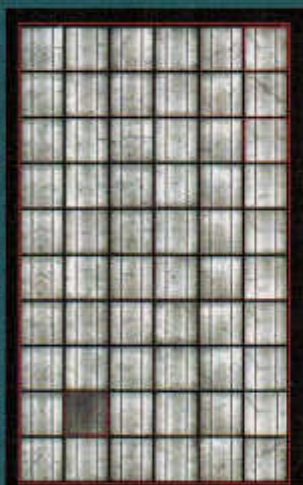
mit: Solarwatt Solar 10



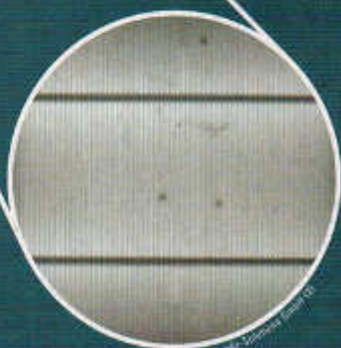
mit: Solarwatt Solar 10

Schlecht sortiert

In dieses polykristalline Modul hat sich eine Solarzelle mit geringerer Leistung eingeschlichen. Auf der Aufnahme erscheint sie daher etwas dunkler. Die Leistung jeder Zelle wird vom Hersteller am Ende des Produktionsprozesses gemessen, woraufhin nach Leistungsklassen sortiert wird. Unterschiede resultieren dabei hauptsächlich aus der Qualität des verwendeten Siliziums. Modulhersteller verlassen sich auf die Angaben ihrer Lieferanten und verbauen Zellen einer Leistungsklasse in ein Modul. Gelangt trotzdem eine Zelle aus einer anderen Leistungsklasse in ein Modul, sinkt die Leistung des gesamten Zellstrings. sk



mit: Solarwatt Solar 10



mit: Solarwatt Solar 10

Kurzschlüsse

Eine Verunreinigung in der Kristallstruktur des Wafers, Aluminiumpartikel auf der Zelloberfläche oder eine im Produktionsprozess durch Mikrorisse lokal beschädigte Emitterschicht kann Kurzschlüsse verursachen. Diese »Shunts« erscheinen auf EL-Aufnahmen als dunkle Stellen, da sie die Spannung in ihrer Umgebung reduzieren. Das kann sich zu einem Problem entwickeln: Wird in einem Kurzschluss elektrische Leistung in Wärme umgewandelt, entstehen Hotspots. Insbesondere bei einer Teilverschattung kann das gefährlich werden. Eine verschattete Zelle produziert zwar keinen Strom. Da die restlichen Zellen jedoch weiterhin aktiv sind,

entstehen sogenannte Rückströme. Diese fließen bevorzugt durch den betroffenen Bereich, da dort ein geringerer elektrischer Widerstand herrscht. Durch die hohe lokale Belastung kann sich die Stelle stark aufheizen – die Zelle beginnt zu schmoren. Ertragsausfälle sind dann unvermeidlich. Im schlimmsten Fall kann das Modul sogar Feuer fangen. Ob sich ein Kurzschluss zu einem Hotspot entwickeln könnte, lässt sich allerdings erst durch das Anlegen eines Rückstroms und eine Thermografie nachweisen (siehe Kasten »Weitere Messverfahren«). Auf einem Elektrolumineszenzbild bleiben alle Arten von Kurzschlüssen schlichtweg dunkel. sk

Fehlerhafte Kantenisolierung

Damit Solarzellen funktionieren, müssen Vorder- und Rückseite des verwendeten Siliziumwafers elektrisch voneinander getrennt sein. Um die in der Waferherstellung aufgetragene n-dotierte Phosphorschicht wieder vom p-dotierten Silizium zu trennen, werden die Kanten isoliert. Dies geschieht meist durch nasschemisches Ätzen oder mit Hilfe eines Lasers. Funktioniert der Ätzwang nicht korrekt oder ist der Laser nicht richtig kalibriert, kann eine fehlerhafte Isolierung

die Folge sein. Die betroffenen Randbereiche sind, wie hier im Bild sichtbar, elektrisch weniger aktiv. Eine solche Minderleistung wird gewöhnlich eingepreist. Elektrisch gesehen ist eine fehlerhafte Kantenisolierung ebenfalls eine Art von Kurzschluss. Auch in diesen Bereichen kann es daher zu Hotspots kommen, worauf eine Thermografie hinweisen kann (siehe Kasten »Weitere Messverfahren«). Auf unserem Bild sind außerdem noch punktförmige Kurzschlüsse zu sehen. sk

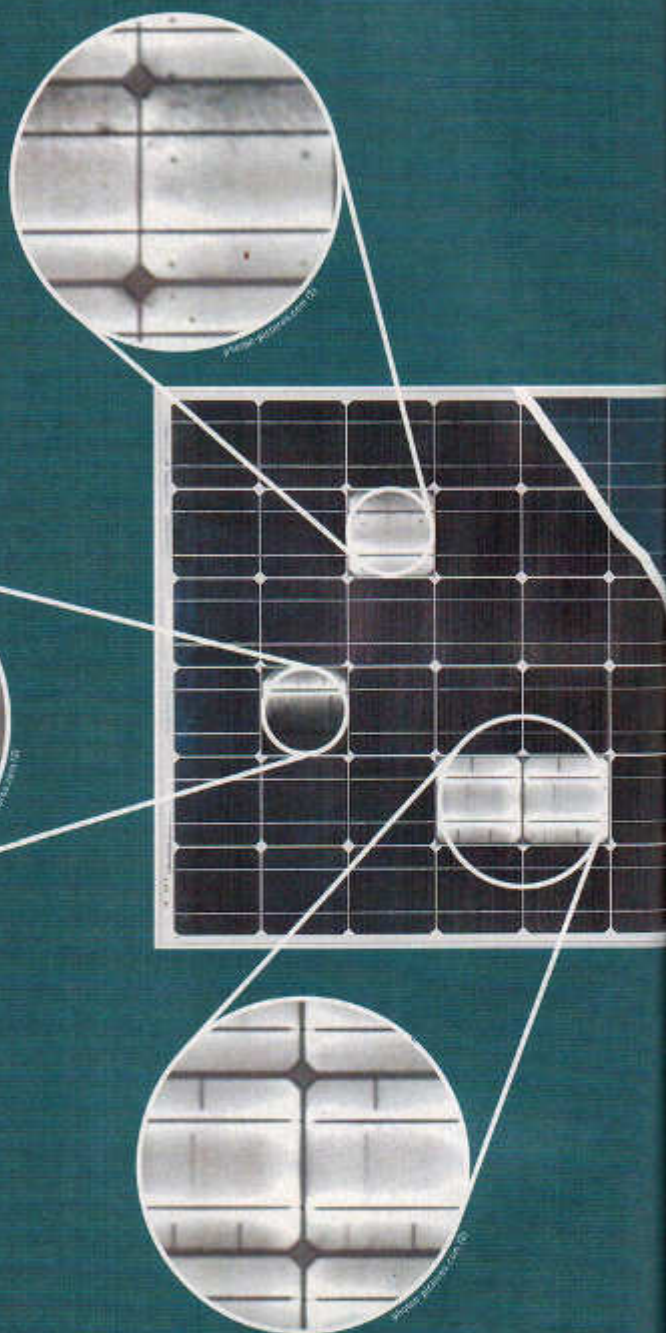
Kontaktierungsfehler

Bei der Modulherstellung kann es vorkommen, dass ein Busbar nur teilweise oder gar nicht mit der Zelle verbunden wird, beispielsweise durch einen Fehler beim Lötten. Der Strom wird dann nur über eine Schiene abgeführt. Entsprechend erscheint der Bereich um die andere Schiene dunkler. Eine nicht korrekt kontaktierte Zelle führt zu einem Leistungsverlust des gesamten Moduls. Gleichzeitig erwärmt sich der kontaktierte Zellteil, da er den gesamten Strom leitet. sk

Weitere Messverfahren

Mit der Elektrolumineszenzmessung lässt sich eine Vielzahl von Defekten nachweisen. Die Methode hat allerdings auch zwei wesentliche Nachteile: Messungen sind nur an bereits fertigen Solarzellen mit aufgedruckten Kontakten möglich, da eine Spannung angelegt werden muss. So können Fehler in vorhergehenden Produktionsschritten, beispielsweise am Wafer, nicht festgestellt werden. Um Fehler bereits vor der Metallisierung der Zelle zu erkennen, wird das Verfahren der Photolumineszenz angewandt, das der Elektrolumineszenz ähnelt. Doch anstatt Energie durch einen elektrischen Kontakt in das Silizium zu leiten, wird dieses mit einem Laser oder mit Leuchtdioden bestrahlt. Das Silizium gibt die zugeführte Energie daraufhin als Strahlung im nahen Infrarotbereich wieder ab. Diese Lichtteilchen können wiederum von einer Spezialkamera sichtbar gemacht werden. Damit gleichzeitig belichtet und gemessen werden kann, wird zur Anregung der Zelle eine Wellenlänge deutlich unterhalb des Spektrums verwendet, das die Zelle selbst ausstrahlt.

Bei bereits kontaktierten Zellen stößt die Elektrolumineszenzmessung an ihre Grenzen, wenn es um die Identifizierung von Hotspots geht. Ob ein Kurzschluss lokal Wärme produziert, zeigt nur eine Thermografie. Es gibt zwei Methoden: Bei der sogenannten Dark-Lock-In-Thermografie wird die Zelle mit Strom beaufschlagt, während die Wärmeentwicklung mit einer Spezialkamera eingefangen wird. Bei der Illuminated-Lock-In-Thermografie wird die Zelle hingegen ähnlich wie bei der Photolumineszenzmethode mit Licht bestrahlt – eine Kontaktierung ist hier ebenfalls überflüssig. Abhängig von der durch die Zelle umgewandelten Strommenge ergibt sich in den verschiedenen Zellbereichen eine lokale Temperaturverteilung, an der sich auch der elektrische Widerstand erkennen lässt. Beide Thermografiemethoden sind geeignet, Stellen mit besonders niedrigem Widerstand (Kurzschlüsse/Shunts) zu identifizieren, da an diesen Stellen Wärme als Verlustleistung entsteht. sk



Druckfehler

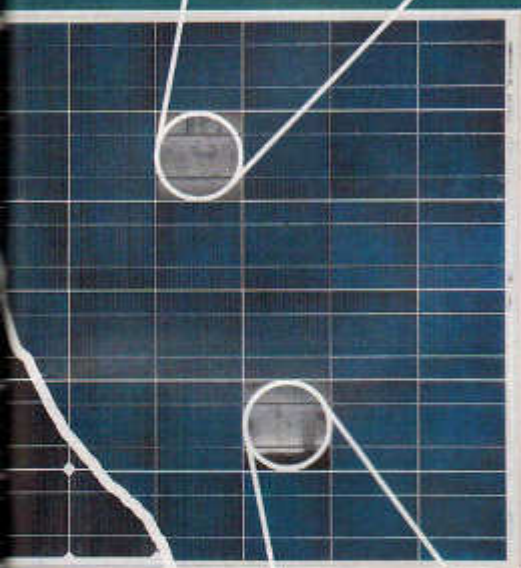
Auf dieser Aufnahme sind einzelne Kontaktfinger unterbrochen. Das Muster wiederholt sich über zwei Zellen hinweg. Das weist auf einen Fehler im Siebdruckverfahren hin, mit dem die Kontaktfinger und Busbars auf die Zelle aufgebracht werden. Ist das Drucksieb teilweise verunreinigt, verstopft oder beschädigt, wird die Metallpaste nicht richtig aufgetragen. Die entsprechenden Stellen bleiben dunkel. Zwar haben vereinzelt fehlende Kontaktfinger keine signifikante Auswirkung auf die Zellleistung. Doch auf ein Verbesserungspotenzial in der Zellproduktion weisen sie allemal hin – denn ein Bereich, der nicht kontaktiert ist, ist auch nicht elektrisch aktiv. sk

Fingerabriss

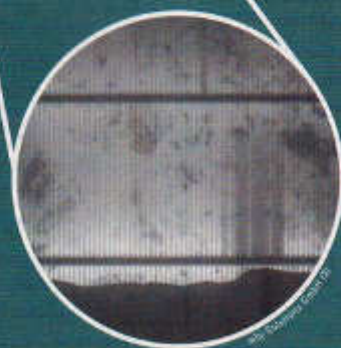
Einen typischen Fehler, der beim »Verstringen« der Zellen entsteht, kann man auf dieser Aufnahme beobachten. In diesem Produktionsschritt wird der Pluspol einer Zelle durch ein Metallbändchen, den sogenannten Zellverbinder, mit dem Minuspol einer anderen Zelle verbunden. Die Zellverbinder werden hierfür entweder automatisch oder manuell auf der zuvor aufgedruckten Stromsammelschiene (Busbar) festgelötet. Dabei kann es passieren, dass die kleinen Kontaktfinger, die den Strom von der Zelloberfläche ableiten, beim Abkühlen direkt an der Sammelschiene abreißen. Wird zu heiß gelötet, kann die aufgedruckte Silberpaste in der Nähe der Stromsammelschienen auch einfach verdampfen. Auch hier gilt: Nicht erschlossene Zellbereiche produzieren keinen Strom. sk



© HP Solarware GmbH 12

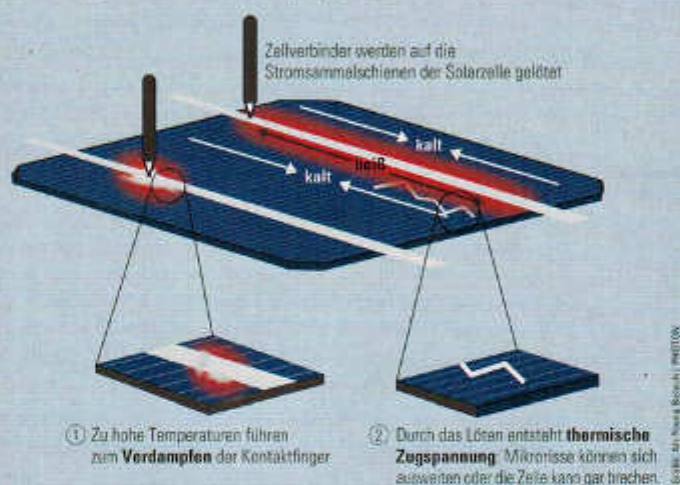


© HP Solarware GmbH 12



© HP Solarware GmbH 12

Fehlerquellen im Lötvorgang



Zellbruch oder aktiver Riss

Eine solche Zelle sollte im fertigen Modul schon bei einer optischen Kontrolle auffallen, muss es aber nicht. Denn außer der mechanischen Trennung eines Zellteils durch einen Bruch kann es sich auch um einen unsichtbaren, aber aktiven Zellriss handeln. In diesem Fall hat der Riss die Metallisierung auf der Zelloberfläche durchtrennt. Strom kann dort in keinem Fall fließen – der Be-

reich bleibt dunkel. Ein solcher Bruch oder aktiver Riss kann ebenso durch mechanische Einwirkung bei der Handhabung der Zelle entstehen wie auch bereits im Herstellungsprozess, beispielsweise durch thermische Zugspannung beim Löten der Zellverbinder (siehe Infografik). Eine solche Zelle kann sich negativ auf die Gesamtleistung des Moduls auswirken. sk