

# Qualitätssicherung und -kontrolle in der Photovoltaikproduktion

Dr. Stefan Rein  
Fraunhofer ISE  
stefan.rein@  
ise.fraunhofer.de

Dr. Karsten Bothe  
ISFH  
k.bothe@isfh.de

Bernd Sattler  
Manz Automation AG  
bsattler@manz-  
automation.com

## Einführung

Angesichts jährlicher Wachstumsraten von durchschnittlich 44% von 1999 bis 2006 und von beeindruckenden 69% in 2007 ist die weltweite Produktionskapazität der Photovoltaikindustrie in nur neun Jahren von 202 MW (1999) auf 4.28 GW (2007) angewachsen und hat sich damit mehr als verzwanzigfacht [1]. Obwohl dieses rasante Wachstum zu einer Verknappung von Silizium auf dem Weltmarkt geführt hat, hat die kristalline Siliziumtechnologie ihren Marktanteil in den vergangenen Jahren behaupten können und ist mit einem Marktanteil von zuletzt 89,6% (2007) weiterhin marktbeherrschend [1]. Trotz des mit der Materialverknappung einhergehenden Preisanstiegs für Siliziumwafer hat der zunehmende Wettbewerb für eine kontinuierliche Abnahme des Marktpreises für Solarzellen gesorgt. Aus diesem Grund hat sich die Reduktion der Herstellungskosten in den vergangenen Jahren zur treibenden Kraft des Photovoltaikmarktes entwickelt. Die Hauptansatzpunkte für eine Kostenreduktion sind:

1. Steigerung der Produktionseffizienz, indem der Automatisierungsgrad, der Durchsatz und die Ausbeute der Produktionslinien gesteigert werden.
2. Steigerung des Zellwirkungsgrades, indem neue Prozesstechnologien und Solarzellenkonzepte eingeführt werden mit einem Wirkungsgradpotenzial von über 16% auf multikristallinem Silizium und über 17% auf monokristallinem Silizium
3. Reduktion des Verbrauchsmaterials, indem die Zelldicke und der Ausschuss in der Produktionslinie reduziert werden.
4. Einsatz von kostengünstigerem Silizium mit geringerer Reinheit

Um das Verbesserungspotenzial in diesen Teilbereichen ausschöpfen zu können, ist eine detaillierte Prozesskontrolle zwingend erforderlich. Die wesentlichen Randbedingungen der Qualitätssicherung werden durch eine genauere Betrachtung der einzelnen Strategien deutlich.

Der Einsatz von kostengünstigerem Ausgangsmaterial macht neben einer kontinuierlichen Prozesskontrolle auch eine kontinuierliche Kontrolle der Qualität des Ausgangsmaterials erforderlich, um schwankende Materialeigenschaften bereits vor Beginn des Zellprozesses zu detektieren und das Material so einem an die Materialqualität angepassten Prozess zuführen zu können. Der Einsatz höherer effizienter Zellprozesse seinerseits erhöht die Anforderungen an die Empfindlichkeit der eingesetzten Charakterisierungstechniken. Berücksichtigt man zudem, dass moderne Fertigungslinien heute schon voll automatisiert sind und einzelne Maschinen bereits einen Durchsatz von 2400–3600 Wafern/Stunde erreichen, so wird klar, dass eine effiziente Qualitätskontrolle nur mit schneller Inline-Messtechnik möglich ist, die in Automatisierungssysteme integriert werden kann.

Die Tatsache, dass in einer Fertigungslinie mit einer üblichen Produktionskapazität von 30–50 MW<sub>p</sub>/Jahr ca. 8–13 Mio. Solarzellen pro Jahr bzw. 22.000–35.000 Solarzellen pro Tag gefertigt werden, unterstreicht schließlich die Notwendigkeit, für die Qualitätskontrolle leistungsfähige Systeme der statistischen Datenauswertung einzusetzen.

In diesem Beitrag werden zunächst die Teilschritte der Qualitätssicherung und die grundlegenden Anforderungen an die Inline-Messtechnik erläutert. Anschließend wird anhand einiger Beispiele ein Einblick in die gegenwärtig verfügbaren Inline-Messmethoden und deren Einsatzgebiet gegeben, um abschließend neue Ansätze für die Inline-Qualitätssicherung aufzuzeigen.

## Teilschritte der Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung umfasst im Allgemeinen drei Teilschritte:

- die Messung der relevanten Kontrollgrößen
- die zentrale Erfassung, Verarbeitung und Bewertung der Messdaten
- die Durchführung der Qualitätssicherungsmaßnahmen bei kritischen Abweichungen.

Die Kontrollgrößen lassen sich in zwei Klassen unterteilen: die Prozesskenngrößen und die Qualitätskenngrößen. Während die Prozesskenngrößen – wie z. B. Temperatur, Druck und Gasfluss – an der Prozessanlage gemessen werden und der Überwachung der Prozessbedingungen dienen, werden die Qualitätskenngrößen – wie z. B. Ätzabtrag, Schichtwiderstand, Schichtdicke – an den teilprozessierten Wafern gemessen und dienen der Kontrolle des Prozessergebnisses.

Zur Bestimmung der Kontrollgrößen wird verstärkt Inline-Messtechnik eingesetzt, da so eine 100%-Kontrolle der Produkte möglich ist. Ergänzend werden Stichproben aber auch mittels aufwändigerer Offline-Messtechnik untersucht, insbesondere um die Ursachen für auftretende technologische Probleme schneller identifizieren zu können.

Hinsichtlich der Bewertung der Inline-Messdaten und der daraus abgeleiteten Qualitätssicherungsmaßnahmen lassen sich drei Einsatzbereiche der Inline-Messtechnik unterscheiden:

### 1. Klassifikation und Sortierung

Anhand eines definierten Klassierschemas wird die gemessene Material- oder Produktqualität zunächst kategorisiert, um das Material anschließend in unterschiedliche Qualitätsklassen, sog. BIN-Klassen, zu sortieren. Diese Funktion kommt der Qualitätssicherung v. a. im Rahmen der Eingangs- und Ausgangskontrolle zu.

### 2. Qualitätskontrolle

Die gemessene Material- oder Produktqualität wird anhand von prozessspezifisch definierten Gut/Schlecht-Kriterien bewertet, um Schlechteile oder Ausschuss zu identifizieren und in einem frühen Prozessstadium auszusortieren.

### 3. Prozesskontrolle

Für die überwachten Prozess- oder Qualitätskenngrößen werden Toleranzgrenzen definiert, bei deren Über- oder Unterschreitung von der Prozessanlage eine Warnung oder ein Alarm ausgegeben wird (Statistical Process Control, SPC). Die erforderliche Nachführung der Prozesse erfolgt in der PV-Industrie gegenwärtig noch manuell, könnte in Zukunft aber auch automatisch über Steuerungsalgorithmen erfolgen (Advanced Process Control, APC).

## Grundlegende Anforderungen an Inline-Messsysteme

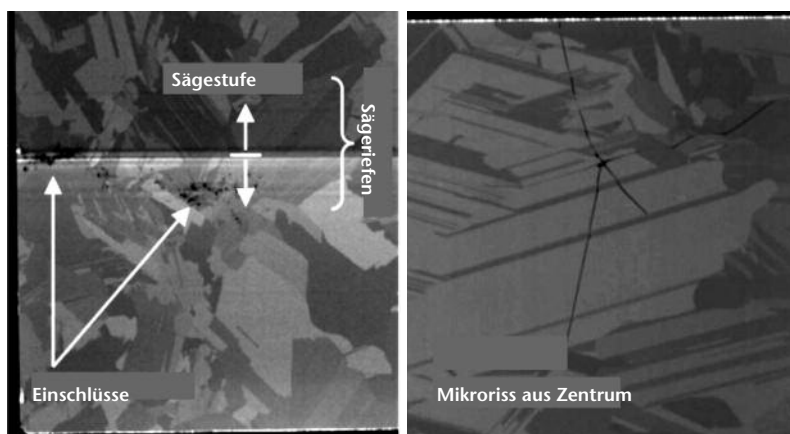
Für den Inline-Einsatz muss ein Messsystem einige grundlegende Anforderungen erfüllen:

- Zykluszeit <1 sec, um die Durchsatzanforderungen zu erfüllen
- berührungsloses Verfahren, um mechanischen Stress auf den Wafer zu vermeiden
- robuste Kalibrierung, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten
- wartungsfreundliches Verfahren, um die Unterhaltskosten gering zu halten
- keine spezielle Probenpräparation
- Ortsauflösung, sofern Messgrößen laterale Inhomogenitäten aufweisen können.

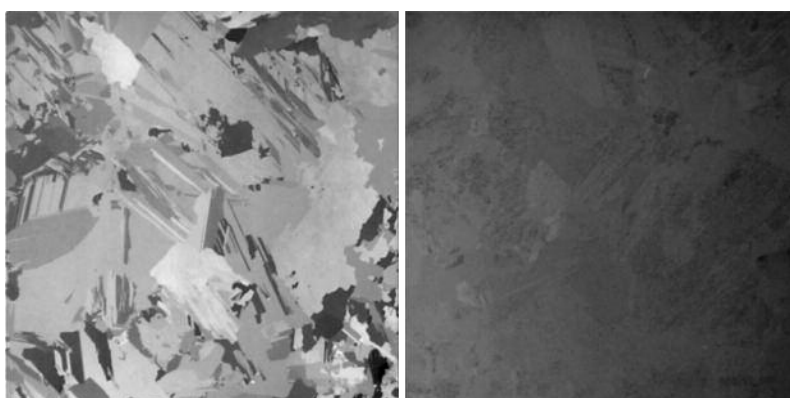
Im Hinblick auf die automatische Messdatenbewertung muss es möglich sein, geeignete Kriterien zur Unterscheidung von Gut- und Schlechteilen zu definieren. Diese Kriterien müssen so beschaffen sein, dass Schlechteile sicher identifiziert werden, ohne dass es zu einer ungewollten Aussonderung von Gutteilen kommt.

Insbesondere bei kamerabasierten Messverfahren ist eine leistungsfähige Bildverarbeitung erforderlich, die anhand geeigneter Algorithmen eine vollautomatische Bildauswertung zulässt. Für eine vollautomatische Bildbewertung sind zudem geeignete Klassierschemata erforderlich.

**Abbildung 1**  
Optische Inline-Prüfung mit IR-Durchlicht zur Detektion von Mikrorissen, Einschlüssen, Sägeriefen und Sägestufen (Eingangskontrolle).



**Abbildung 2**  
Optische Inline-Texturprüfung zur Bestimmung des Reflexionsgrades und der Homogenität einer so genannten sauren Textur: (links) schlechte Textur mit  $R_{min}=28,8\%$ , (rechts) gute Textur mit  $R_{min}=24,5\%$ .



## Eingesetzte Methoden der In-line-Qualitätskontrolle

Im Folgenden soll an einigen Beispielen erläutert werden, welche Qualitätskenngrößen in den unterschiedlichen Prozessschritten eines Standard-Siebdruck-Solarzellenprozesses gemessen werden und welche Methoden der In-line-Qualitätskontrolle hierbei zum Einsatz kommen. Einer der wichtigsten Schritte der Qualitätskontrolle ist die Wafer-Eingangskontrolle, die eine Reihe von optischen und elektrischen Prüfungen umfasst. Im Rahmen der optischen Prüfungen wird die Geometrie des Wafers vermessen und der Wafer auf Kantenausbrüche, Oberflächen - ausbrüche und Oberflächenverunreinigungen untersucht. Am wichtigsten ist jedoch die Überprüfung auf Mikrorisse, da Mikrorisse ab einer bestimmten Größe im Herstellungsprozess zu Bruch führen und somit gegebenenfalls zum Stillstand der Produktionslinie. Für die Mikrorissprüfung wird der Wafer mit UV-Licht [2] oder IR-Licht (siehe Abb. 1) hoher Intensität durchleuchtet und das Transmissionsbild aufgenommen. Wie in Abbildung 1 dargestellt, können bei der

Verwendung von IR-Licht, neben durchgehenden und nicht-durchgehenden Mikrorissen auch Sägeriefen und Sägestufen sowie Einschlüsse im Volumen (z. B. in Form von Siliziumcarbid Ausscheidungen) detektiert werden.

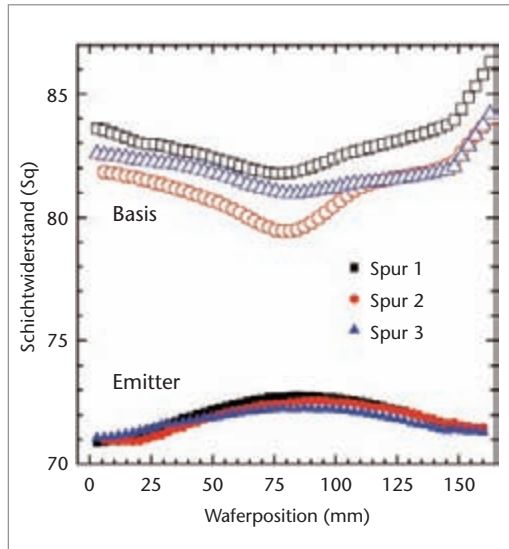
Im Rahmen der elektrischen Prüfungen werden die Waferdicke (kapazitive Messung) und der Basiswiderstand des Wafers (induktive Messung) vermessen. Da beide Messungen an der bewegten Probe erfolgen, liefern die Messsysteme in Transportrichtung ein orts aufgelöstes Profil der Kenngröße, aus dem sich neben dem Absolutniveau auch die Homogenität der Kenngröße ermittelt lässt. Für den Basiswiderstand sind charakteristische Profile in Abbildung 3 dargestellt (offene Symbole). Darüber hinaus kann durch Messung der Ladungsträgerlebensdauer die elektrische Materialqualität ermittelt werden. Diese Messung kann inline entweder mittels der Microwave-detected Photoconductance Decay (MWPCD) Methode oder aber mittels der von Sinton et al. entwickelten Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) Methode durchgeführt werden.

Ziel der Eingangskontrolle ist es, die mechanisch oder elektrisch defekten Wafer von vorneherein auszusortieren und einem Recyclingprozess zuzuführen, um Bruch in der Produktionslinie zu vermeiden und die Ausbeute zu steigern.

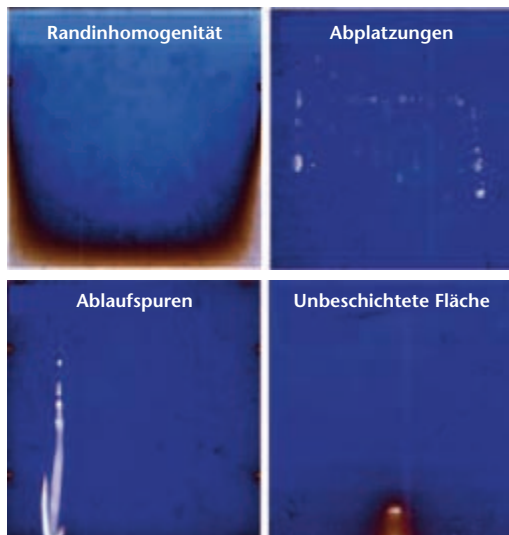
Außerdem besteht die Möglichkeit, Wafer unterschiedlicher Dicke und Materialqualität in unterschiedliche Klassen zu sortieren, um sie nachfolgend einer angepassten Prozessierung zuzuführen. Bei der Mikrorissprüfung und der Lebensdauerermessung besteht die Herausforderung allerdings darin, geeignete Bewertungskriterien zu definieren, mit denen nur das wirklich schadhafte Material ausgesondert wird.

Im ersten Prozessschritt, der Oberflächenreinigung und -texturierung, sind die relevanten Qualitätskenngrößen der Ätzabtrag, der inline mittels Mikrowaagen gemessen wird, sowie der Reflexionsgrad und die Homogenität der Textur, die sich inline mit einem optischen Prüfsystem bestimmen lassen, das auf Reflexionswerte kalibriert wurde. Aufnahmen einer guten und einer schlechten Textur sind in *Abbildung 2* exemplarisch dargestellt.

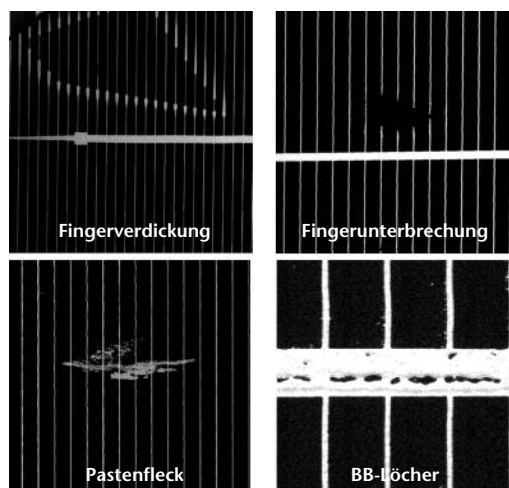
Die relevanten Qualitätskenngrößen des zweiten Prozessschrittes, der Emittendiffusion, sind das Absolutniveau und die Homogenität des Emitterschichtwiderstandes. Inline lassen sich diese beiden Parameter entweder mit Hilfe der Vier-Spitzen-Methode oder der Surface Photovoltage (SPV) Methode [3] bestimmen oder aber induktiv [4]. Da es sich bei dem induktiven Wirbelstromverfahren um eine integrale Messung über die gesamte Probenstärke handelt, erfordert die Bestimmung des Emitterschichtwiderstandes ein zweistufiges Verfahren mit je einer Messung vor und nach der Emittendiffusion, die dann miteinander verrechnet werden. Durch Messung an der bewegten Probe erhält man die in *Abbildung 3* dargestellten Profile des Emitterschichtwiderstandes (geschlossene Symbole), die außer dem Absolutniveau auch Aufschluss über die laterale Homogenität des Diffusionsprozesses geben. Aktuelle Untersuchungen haben gezeigt [4], dass das induktive Messverfahren insbesondere auf strukturierten Oberflächen zuverlässigere Messergebnisse liefert als das 4-Spitzenverfahren, das in der Industrie gegenwärtig häufig eingesetzt wird.



*Abbildung 3*  
Charakteristische Profile des Basiswiderstandes- (offene Symbole) und des Emitterschichtwiderstands (geschlossene Symbole) eines Wafers, gemessen mit dem induktiven Messsystem entlang von drei Messspuren.



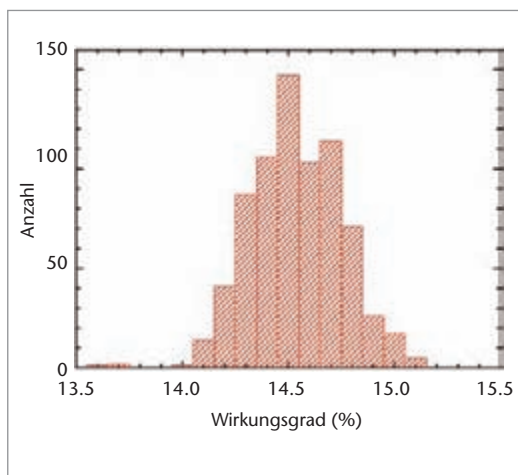
*Abbildung 4*  
Optische Inline-Farb-Prüfung zur Bestimmung der absoluten Schichtdicke und ihrer Homogenität und zur Detektion unterschiedlicher Oberflächen-defekte.



*Abbildung 5*  
Optische Inline-Prüfung des VS-Druckbildes zur Bestimmung der Vollständigkeit, Position und Finger- bzw. Busbarbreiten und zur Detektion verschiedener Defekte (Beispiele).



**Abbildung 6**  
Inline-Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie im Hell- und Dunkelfeld zur Bestimmung der elektrischen Leistungsklasse (Ausgangskontrolle). Hier: Verteilung für 770 mc-Si Industriesolarzellen.



Die relevanten Qualitätskenngrößen der Antireflexbeschichtung sind die Absolutdicke und die Homogenität der Antireflexschicht. Da die Färbung der Schicht unmittelbar von der Schichtdicke abhängt, kann durch Auswertung eines Farbbildes die Schichtdicke orts aufgelöst ermittelt werden. Zur Kalibrierung des eingesetzten Kamerasystemes müssen die prozessspezifischen Farbklassen mittels eines Referenzprobensatzes verglichen werden. Wie in *Abbildung 4* dargestellt, ermöglicht das Verfahren auch eine Oberflächeninspektion, bei der unbeschichtete Flächen, Bereiche mit abgeplatzter Antireflexschicht (Blistering) und Verfärbungen durch Ablaufspuren oder Oberflächenverunreinigungen detektiert werden können.

Die Metallisierung wird nach jedem Druckschritt mittels optischer Prüfsysteme inspiziert. Hierbei werden u. a. die Druckposition und die Fingerbreiten vermessen und das Druckbild auf Voll-

ständigkeit, Fingerunterbrechungen und Pastenflecken untersucht. Die Fehlerdetektion beruht dabei auf dem Vergleich des gemessenen mit einem zuvor eingelernten idealen Druckbild. Einige typische Defekte des Vorderseitendrucks sind in *Abbildung 5* dargestellt.

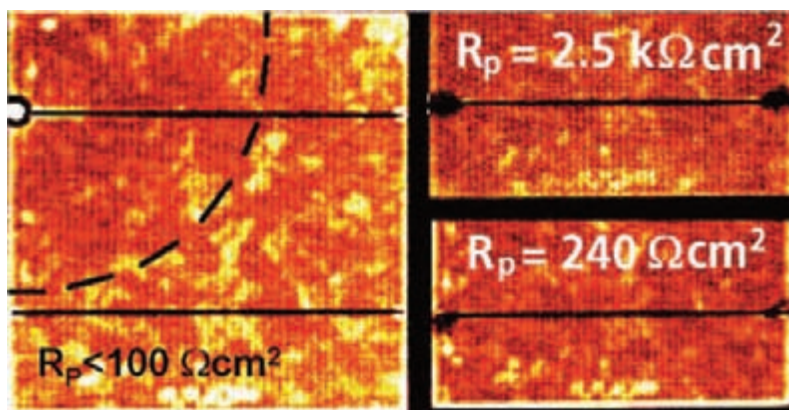
Die beiden folgenden Prozessschritte sind der Feuerprozess zur Kontaktbildung und der Laserkantenisoliationsprozess zur Beseitigung des diffusionsbedingten Kurzschlusses über die Waferkanten. Die einzigen Qualitätskenngrößen dieser beiden Prozessschritte, die gegenwärtig inline gemessen werden können, sind der Serien- und der Parallelwiderstand der Probe, die im Rahmen der Ausgangskontrolle bei der Strom-Spannungs-Kennlinienmessung bestimmt werden.

Diese Ausgangskontrolle ist der wohl wichtigste Schritt der Qualitätskontrolle, da hier die fertigen Solarzellen vollständig elektrisch vermessen und optisch inspiziert werden. Im Rahmen der optischen Inspektion wird die Solarzelle umfassend auf Kantenausbrüche und Fehler im Druckbild auf der Vorder- und Rückseite untersucht. Zudem wird anhand der Farbe der Zelle die Dicke und die Homogenität der Antireflexschicht gemessen und die Oberfläche auf Oberflächendefekte wie z. B. Blistering und Kratzer untersucht. Eingesetzt werden dabei die gleichen Bildverarbeitungssysteme, mit denen die jeweiligen Merkmale bereits in einem früheren Prozessstadium inspiziert wurden. Herzstück der Ausgangskontrolle ist jedoch die Strom-Spannungs-Kennlinienmessung im Hell- und Dunkelfeld, bei der die effektiven Leistungsdaten der

**Abbildung 7**  
Offline-Messungen mittels Hellthermographie (ILIT) zur Bestimmung der lokalen Verlustleistungen und zur Detektion der technologischen Ursachen für einen reduzierten Parallelwiderstand:

(links) punktförmiger Shunt am Busbar

(rechts) unterschiedliche Shunts entlang des Lasergrabens der Laserkantenisolation



gute Kantenisolation

schlechte Kantenisolation

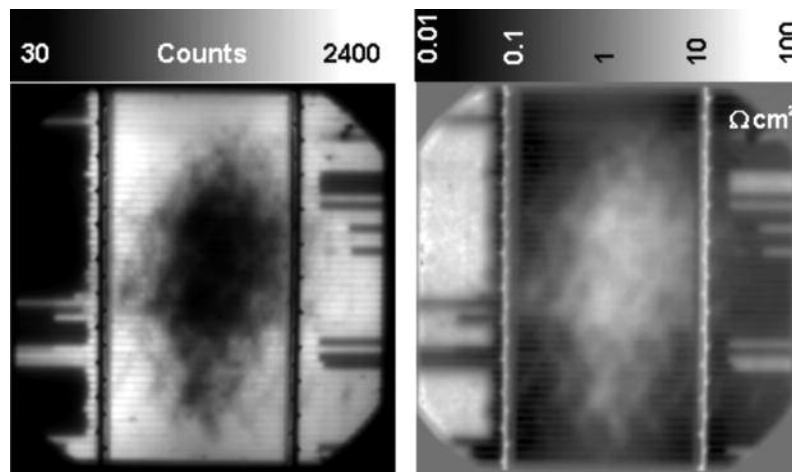


Abbildung 8  
Offline-Messung  
mittels Elektrolumineszenz zur Bestimmung  
der lokalen Serienwiderstandsverteilung:

(links) Verteilung der  
Lumineszenzintensität,

(rechts) Verteilung der  
absolute Serienwiderstände

Solarzelle ermittelt werden, anhand derer die Qualität des Gesamtprozesses bewertet werden kann. *Abbildung 6* zeigt exemplarisch eine Statistik des Wirkungsgrades für eine Charge aus 770 multikristalline Silizium-Solarzellen aus einer industriellen Fertigung: Mittelwert und Verteilungsbreite geben Aufschluss über die Qualität und die Stabilität des Gesamtprozesses.

Basierend auf den Strom-Spannungs-Messdaten wird anhand eines Klassierschemas für jede Solarzelle eine elektrische Klasse bestimmt. Eine genaue Sortierung der Solarzellen gemäß dieser elektrischen Leistungsklassen ist erforderlich, um bei der Serienschaltung der Solarzellen im Modul maximale Modulleistungen erzielen zu können. Da in vielen Anwendungen auch die optische Erscheinung der Module ein wichtiges Kriterium darstellt, werden die Solarzellen zusätzlich nach Farbe sortiert. Bei einer Sortierung in drei Farbklassen verdreifacht sich somit die Anzahl an benötigten Sortierklassen. In gängigen Klassierautomaten ist eine Sortierung in über 50 Klassen möglich.

Über den gesamten Solarzellenprozess werden in den neuesten Qualitätssicherungssystemen insgesamt an die 100 Kenngrößen gemessen und in einem System zur statistischen Prozesskontrolle (SPC) verarbeitet. Die Verknüpfung der in unterschiedlichen Prozessstadien gewonnenen Messdaten erfolgt bisher in der Regel rein lospezifisch und nicht waferspezifisch, da ein Einzelwaferverfolgung durch den gesamten Produktionsprozess mangels geeigneter Methoden der Waferidentifikation bisher schwer zu realisieren ist.

## Neue Ansätze für die Inline-Qualitätskontrolle

Ein wesentlicher Trend der letzten Jahre ist die Entwicklung von kamerabasierten Charakterisierungstechniken, mit denen sich elektrische und materialspezifische Eigenschaften orts aufgelöst innerhalb kurzer Messzeiten bestimmen lassen. Treibende Kraft hierbei ist die Tatsache, dass erst diese orts aufgelösten Messungen Aufschluss über die technologischen Ursachen für eine reduzierte Leistungsfähigkeit der Solarzellen geben. Im Zentrum der untersuchten kamerabasierten Messverfahren stehen die Lock-In Thermographie (LIT) [5,6,7] sowie das Photolumineszenz-Imaging (PL) und das Elektrolumineszenz-Imaging (EL) [8,9,10].

Mit Hilfe der Thermographie-Methode lässt sich die lokale Verlustleistung in Solarzellen bestimmen. Hierzu werden lokale Erwärmungen, die nach einer Anregung von Ladungsträgern in der Solarzelle auftreten, mit einer Infrarot-Kamera detektiert. Ursachen für solche lokalen Erwärmungen sind z. B. laterale Variationen im Serienwiderstand, eine erhöhte Dissipation<sup>1</sup> elektrischer Energie an Shunts oder eine erhöhte Ladungsträgerrekombination.

*Abbildung 7* zeigt in der rechten Hälfte die Hellthermographiebilder zweier Zellen mit guter (oben) und schlechter (unten) Kantenisolation. Wie zu erwarten, leuchtet der Rand bei schlechter Kantenisolation kräftig aufgrund der

<sup>1</sup> Dissipation ist die Umwandlung in thermische Energie, die nicht oder nur begrenzt verhindert werden kann.

fließenden Shuntströme [11]. Im Falle einer lokal kurzgeschlossenen Zelle, deren Hellthermographiebild in der linken Hälfte von *Abbildung 7* dargestellt ist, leuchtet dagegen nur der Punktshunt selbst. Zudem erscheint das Bild in einem großen Bereich um den Punktshunt dunkler, da die Ladungsträger aus diesem Bereich effektiv in den Shunt abgesaugt werden [11].

Bei den Lumineszenz-Methoden wird die Intensitätsverteilung der strahlenden Rekombination detektiert, was üblicherweise mit einer Silizium CCD-Kamera erfolgt. Da die Intensität der strahlenden Rekombination direkt proportional zum Produkt der Elektronen- und Löcherdichte ist, sind im Lumineszenzbild generell alle Effekte sichtbar, die zu einer lokalen Reduzierung der Ladungsträgerkonzentration führen. Dies sind z. B. lokale Schwankungen in der Ladungsträgerlebensdauer, Shunts, Serienwiderstände und Mikrorisse.

Das Lumineszenzsignal einer Solarzelle ist im linken Teil von *Abbildung 8* dargestellt. Die scharf umrandeten dunklen Bereiche an beiden Rändern der Solarzelle sind auf Fingerunterbrechungen zurückzuführen. Die dunklen Bereiche in der Mitte der Solarzelle deuten dagegen auf einen erhöhten Serienwiderstand hin, wie er bei einer Unterfeuerung der Kontakte auftritt.

Kürzlich konnte gezeigt werden [12], dass aus einer Serie von Lumineszenzbildern, die bei unterschiedlichen Anregungsspannungen aufgenommen werden, die lokale Serienwiderstandsverteilung einer Solarzelle quantitativ bestimmt werden kann. Diese Serienwiderstandsverteilung ist im rechten Teil von *Abbildung 8* dargestellt. Die Tatsache, dass die Bereiche hohen Serienwiderstandes mit den Bereichen niedriger Lumineszenzintensität zusammenfallen, bestätigt die qualitative Interpretation des einfachen Lumineszenzbildes.

Da die Messzeiten der Thermographie- und Lumineszenz-Methoden bereits im Sekundenbereich liegen, haben beide Methoden das Potenzial, mittelfristig als Inline-Methoden im Prozessmonitoring oder in der Ausgangskontrolle eingesetzt zu werden. Die Herausforderungen, um dieses Ziel zu erreichen, bestehen in einer Quantifizierung der lokal auftretenden Verluste und in der Entwicklung von Verfahren für eine automatisierte Bildbeurteilung. Nur auf

dieser Basis können Bewertungskriterien definiert werden, die eine sichere Identifikation von Schlechtteilen zulassen. All diese Fragestellungen sind Gegenstand aktueller Forschung.

## Zusammenfassung

Angesichts der rasant wachsenden Produktionskapazitäten und der immer effizienter werdenden Zellkonzepte und -prozesse gewinnt die Qualitätssicherung in der Solarzellenfertigung zunehmend an Bedeutung. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades und des steigenden Durchsatzes der Fertigungslinien erfordert eine effiziente Qualitätskontrolle schnelle Inline-Messtechnik und leistungsfähige Systeme der statistischen Datenauswertung.

Die wichtigsten Schritte der Qualitätskontrolle sind die Eingangs- und die Ausgangskontrolle, bei der Qualität der angelieferten Rohwafer bzw. der gefertigten Solarzellen detailliert inspiziert wird. In vielen Prozessschritten sind bereits Inline-Messmethoden verfügbar, mit denen sich die relevanten Qualitätskenngrößen bestimmen lassen. Allerdings existieren für manche Methoden, wie z. B. die Mikrorisskontrolle, noch keine zuverlässigen Gut/Schlecht-Kriterien für die Bewertung der Messdaten. Um die elektrischen und materialspezifischen Eigenschaften der Wafer und Solarzellen in Zukunft orts aufgelöst inline messen zu können, wird intensiv an kamerabasierten Thermographie- und Lumineszenzmessmethoden geforscht. Messzeiten im Sekundenbereich sind dabei vielversprechend.

Die Hauptaufgaben der Forschung bestehen einerseits in der konsequenten Weiterentwicklung existierender PV-spezifischer Offline-Messtechniken für den Inline-Einsatz und andererseits in der Qualifizierung neuer Inline-Messtechniken aus anderen Branchen für den Einsatz in der Solarzellenfertigung.

## Literatur

- [1] W.P. Hirshman, G. Hering, M. Schmela, Photon International 03/2008, Solar Verlag GmbH, Aachen, S. 140
- [2] E. Rühland, S. Recht, S. Wansleben, H. Feist, P. Fath, Proc. 19th EU-PVSEC, Paris (2004), S. 810
- [3] E. Rühland et al., Proc. 3<sup>rd</sup> WCPEC, Osaka (2003), p. 1085
- [4] M. Spitz, U. Belledin, S. Rein, Proc. 22nd EU-PVSEC, Milan (2007), p. ???
- [5] O. Breitenstein, J. Isenberg, C. Ballif, S.W. Glunz and W. Warta, Proc. 2nd WCPEC, Vienna (1998), S. 1382
- [6] M. Bail, R. Brendel, and M. Schulz, Proc. 28<sup>th</sup> IEEE PVSC, New York (2000), S. 99
- [7] J. Isenberg and W. Warta, Prog. Photovolt: Res. Appl. 12 (2004), S. 339
- [8] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, and Y. Uraoka, Applied Physics Letters 86 (2005), S. 262108
- [9] K. Bothe, P. Pohl, J. Schmidt, T. Weber, P.P. Altermatt, B. Fischer, and R. Brendel, Proc. 21<sup>st</sup> EU-PVSEC, Dresden (2006), S. 597
- [10] T. Trupke, R.A. Bardos, M.C. Schubert, and W. Warta, Applied Physics Letters 89 (2006), S. 044107
- [11] W. Kwapil, M. Kasemann, J. Ebser, S. Rein, W. Warta, Proc. 22nd EU-PVSEC, Milan (2007), S. 1596
- [12] D. Hinken, K. Bothe, K. Ramspeck, B. Fischer, R. Brendel, Applied Physics Letters 18 (2007), S. 182