

# Siliciumtechnologie

## SOLARZELLEN VON MORGEN UND ÜBERMORGEN

### Materialforschung

Die Photovoltaik, die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom, ist eine umweltverträgliche Möglichkeit der Stromerzeugung, da sie im Betrieb ohne Emission von Schadstoffen und ohne bewegliche Komponenten auskommt. Die Siliciumtechnologie wird mit großer Wahrscheinlichkeit auch in den kommenden Jahrzehnten die führende Photovoltaiktechnologie bleiben, denn es gibt entlang der gesamten Wertschöpfungskette zahlreiche Möglichkeiten, die Herstellungskosten zu senken.



Abbildung 1  
Kamerabasierte Charakterisierungsmethoden werden am ISFH entwickelt, um ein tieferes Verständnis der Auswirkungen von fundamentalen Materialeigenschaften auf Solarzellenkenngrößen zu gewinnen. Quelle: ISFH

Vor der Herstellung der Solarzelle ist es wichtig, die Qualität des zu verwendenden Siliciummaterials zu überprüfen. Insbesondere im kostengünstigen, multikristallinen Silicium gibt es zahlreiche Defekte und Verunreinigungen, die die Materialqualität vermindern. Eine sehr aussagekräftige Größe ist die Lebensdauer der lichtgenerierten freien Ladungen im Silicium, welche eine zuverlässige Vorhersage über die späteren Eigenschaften der Solarzelle erlaubt. Da Solarzellen großflächige Bauelemente sind, reicht eine lokale Bestimmung der Lebensdauer jedoch meist nicht aus. Die bisher eingesetzten Charakterisierungsmethoden messen die Siliciumscheibe Punkt für Punkt, was zu sehr langen Messdauern von bis zu einigen Stunden pro Siliciumscheibe führt.

Am ISFH werden kamerabasierte Methoden zur ortsaufgelösten Messung von Ladungsträgerlebensdauern entwickelt, die auf der freien Ladungsträgerabsorption von infrarotem Licht [1] oder auf der emittierten Lumineszenzstrahlung der Siliciumscheibe [2] basieren. Da diese Methoden hochauflösende Lebensdauerbilder innerhalb von Sekunden generieren, sind sie sogar für den Einsatz in Solarzellenproduktionslinien geeignet (»Inline Monitoring«). Die neuen kamerabasierten Me-



thoden helfen, zu verstehen wie sich Defekte und Verunreinigungen im Silicium auf die Solarzellenkenngrößen auswirken. Dies ermöglicht ein gezieltes »Defect Engineering«, also die Entwicklung von Prozessen, welche die Schädlichkeit unvermeidbarer Defekte reduzieren.

### Hocheffiziente Solarzellen

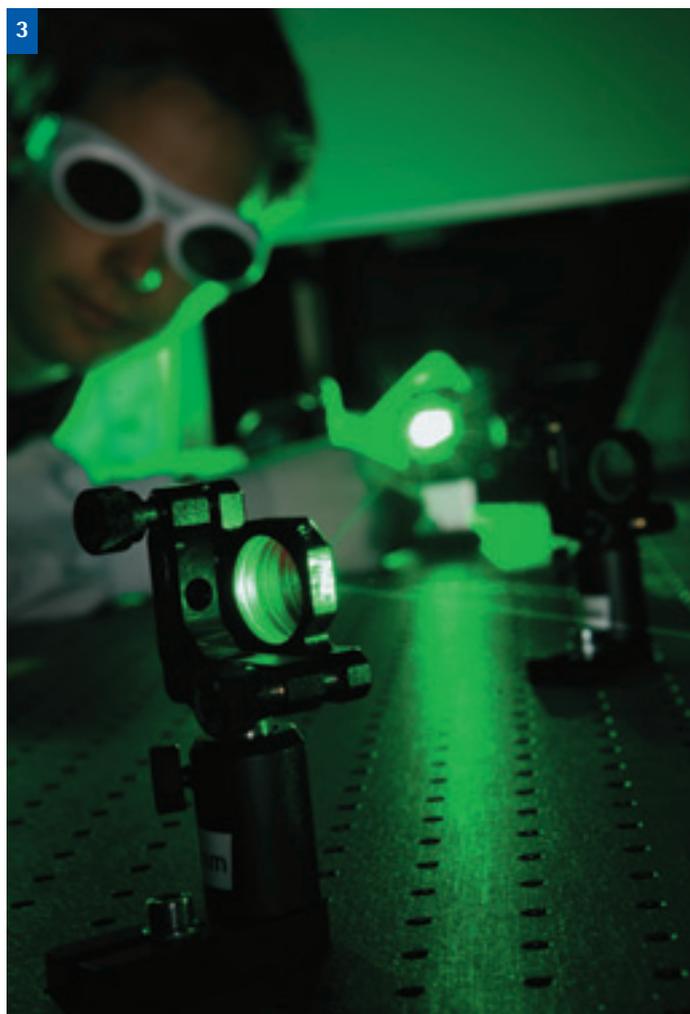
Der Energiewandlungsgrad von Solarzellen, also der Anteil der eingestrahelten Sonnenenergie, der in elektrische Energie umgewandelt wird, bestimmt in entscheidendem Maße die Kosten des generierten Solarstroms.

Da durch eine Erhöhung des Wirkungsgrades die gleiche elektrische Leistung mit weniger Modulfläche erzielt werden kann, verringern sich sämtliche flächenproportionale Kosten des Photovoltaik-Systems. Wichtige Voraussetzung ist allerdings, dass die Herstellung der hocheffizienten Solarzellen möglichst nicht kostspieliger ist als die herkömmlicher Zellen. Dies macht die Entwicklung neuartiger, auf hohe Wirkungsgrade zugeschnittener einfacher Prozesse erforderlich. Am ISFH werden Hocheffizienzzellen entwickelt, die Wirkungsgrade bis zu 22 Prozent [3] erreichen (Wirkungsgrade industriell produzierter Solarzellen liegen derzeit im Bereich von 14 bis 17 Prozent) und dennoch für eine industrielle Produktion geeignet sind. Einige dieser Solarzellenkonzepte werden derzeit gemeinsam mit der Industrie in eine Pilotlinienproduktion überführt. Eine besonders erfolgreiche Entwicklung sind rückseitenkontaktierte Solarzellen, die auf der Vorderseite keine Metallfinger zur Stromsammmlung mehr benötigen. Als Folge ist die Abschattung der Lichteinstrahlung reduziert, was zu einem erhöhten Photostrom führt. Durch sehr gut passivierende dielektrische Schichten wie zum Beispiel Siliciumdioxid, Siliciumnitrid oder Aluminiumoxid wird die Rekombination der lichtinduzierten Ladungsträger an den Oberflächen der Solarzellen weitgehend unterdrückt.

Eine Besonderheit der am ISFH entwickelten neuartigen Solarzellenprozesse ist die berührungslose Prozessierung mithilfe von Lasern. So können auch sehr dünne Siliciumscheiben (< 150 Mikrometer) verwendet werden, ohne die Bruchrate zu erhöhen. Die Lasertechnologie ist automatisierbar und gut in einen kontinuierlichen Herstellungsprozess integrierbar.

### Dünnschichtsolarellen

Ein großer Kostenfaktor bei den derzeit industriell produzierten Siliciumsolarellen stellt die etwa 200 Mikrometer dicke Siliciumscheibe dar. Mit dem am ISFH verfolgten PSI (poröses Silicium)-Konzept [4] ist es möglich, die Solarzellendicke um eine Größenordnung auf 5 bis 25 Mikrometer zu verringern und so einen großen Teil des teuren Siliciums einzusparen.



Im PSI-Prozesses wird eine monokristalline Siliciumscheibe an ihrer Oberfläche elektrochemisch porös geätzt. Auf der porösen Oberfläche wird anschließend mittels Epitaxie, also einer Form des Kristallwachstums, eine 5 bis 25 Mikrometer dünne Siliciumschicht abgeschieden. Nach-

dem der Solarzellenprozess auf der sehr dünnen Siliciumschicht durchgeführt wurde,



Abbildung 2  
Rückseitenkontaktierte Hocheffizienzsolarzelle. Die mittels Laser erzeugten Löcher in der Solarzelle erlauben die Verwendung von kostengünstigem Siliciummaterial mittelmäßiger Qualität. Die gezeigte Solarzelle befindet sich derzeit in der Überführung in eine industrielle Pilotproduktion. Quelle: ISFH

Abbildung 3  
Ein Mitarbeiter justiert das am ISFH entwickelte Picosekunden-Lasersystem. Der Einsatz moderner Lasertechnologie erlaubt die berührungslose Herstellung hocheffizienter Solarzellen auch aus sehr dünnen Siliciumscheiben (< 150 Mikrometer). Quelle: ISFH

■ ■ ■  
Zwei Wissenschaftler des  
Instituts für Festkörperphysik  
der Leibniz Universität Hannover  
und des Instituts für Solar-  
energieforschung Hameln  
(ISFH) berichten über in-  
novative Prozesstechnologien.

schließlich für die Herstellung der nächsten Dünnschichtsolarzelle verwendet werden. Eine Mutterscheibe kann auf diese Weise für die Herstellung von 10 bis 50 Dünnschichtzellen eingesetzt werden.

hohes Maß an Flexibilität. Für die Herstellung von Solarmodulen aus rückkontaktierten Hocheffizienzzellen wurde ein vollautomatisiertes Robotersystem mittels Laserlöten entwickelt.

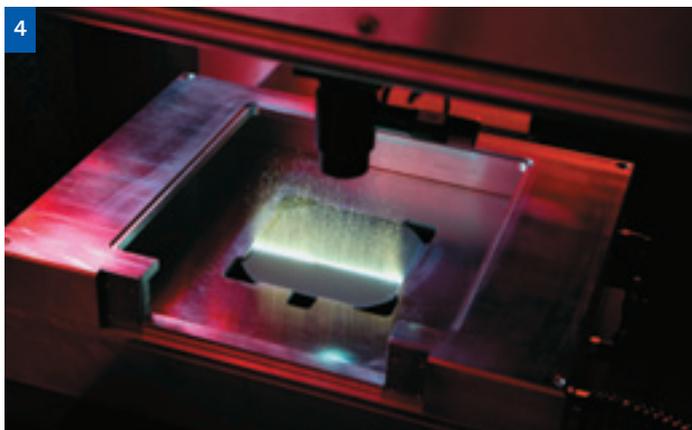


Abbildung 4  
Ein moderner Scheibenlaser bohrt in wenigen Sekunden 30.000 Löcher in den Siliciumwafer.  
Quelle: ISFH

Abbildung 5  
Nachdem der Solarzellenprozess auf der Siliciumschicht durchgeführt wurde, wird die 5 bis 25 Mikrometer dicke Siliciumschicht mit einem transparenten Kleber auf eine Glasscheibe geklebt und mechanisch von der Mutterscheibe abgetrennt, die für den nächsten Prozessdurchgang vorbereitet wird.

Quelle: ISFH

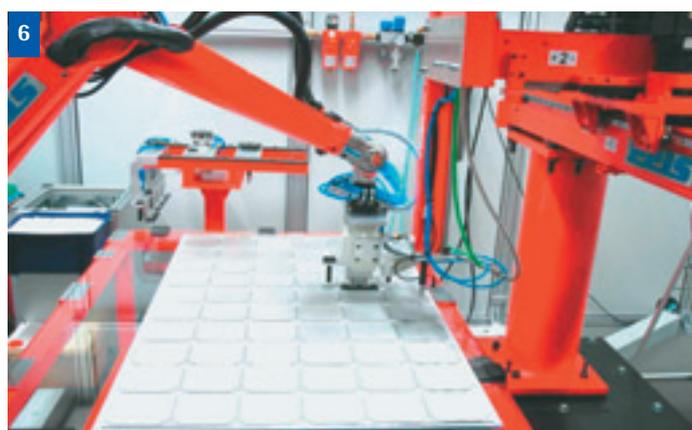
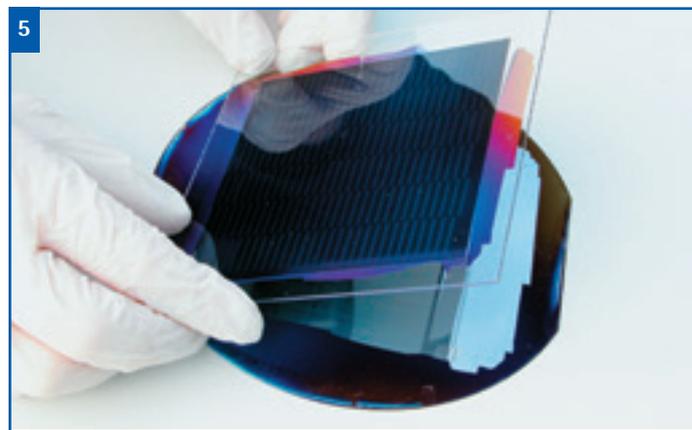
Abbildung 6  
Automatisiertes Laserlöten von Rückkontaktsolarzellen auf der Laminierfolie reduziert den Handhabungsaufwand und die Bruchrate.

Quelle: ISFH

Im Gegensatz zu herkömmlichen Dünnschichttechnologien ist das Wirkungsgradpotenzial der PSI-Technologie wesentlich höher, da es sich bei den so hergestellten Siliciumschichten um hochwertiges monokristallines Material handelt. Wirkungsgrade bis zu 18 Prozent werden erreichbar sein. Im Labor wurden bereits Wirkungsgrade von 15,6 Prozent erzielt.

### Modulentwicklung

Bei der konventionellen Herstellung von Photovoltaikmodulen erfolgt die Verbindung der Solarzellen mittels Kontakt-, Heißluft- oder Wärmestrahlungslöten. Dabei heizt sich die Solarzelle samt Verbinder auf und es entstehen thermomechanische Spannungen, die zu Zellbrüchen führen können. Das am ISFH entwickelte »Auf-Laminat-Laser-Löten« [5], bei dem die Solarzellen direkt auf der Laminatfolie mittels Laser verlötet werden, ermöglicht – im Unterschied zu den konventionellen Löttechniken – einen lokal begrenzten Energieeintrag, kurze Prozesszeiten und ein



Als Optimierungshilfe für die Modulentwicklung werden numerische Simulationsrechnungen auf der Basis der Finite-Elemente-Methode verwendet, um die thermomechanischen Belastungen im Modul bei Erhitzung und Abkühlung vorherzusagen. Die Simulation ermöglicht es, die Komponenten im Modulaufbau unter thermomechanischen Gesichtspunkten zu optimieren. So wird beispielsweise berechnet, welche Verbinderform optimal für eine niedrige Zellbelastung ist und ob der Einbau bestimmter Materialien thermomechanisch günstig für künftige Modulbauformen ist.

### Zusammenfassung

Trotz der erheblichen Fortschritte in der Produktionstechnologie für Siliciumbasierte Solarzellen und -module der letzten Jahre, gibt es nach wie vor ein großes Potenzial für weitere Kostensenkungen. Die Forschung des ISFH verfolgt den Ansatz, den Materialeinsatz durch Verwendung sehr dünner Siliciumscheiben zu verringern sowie den Solarzellenwirkungsgrad durch die Entwicklung neuartiger Herstellungstechniken wie Laserprozessen deutlich zu erhöhen. Dabei wird eine große Bandbreite von grund-

lagenorientierter Forschung bis hin zur Überführung neuer Solarzellenkonzepte in die Industrie abgedeckt.

### Literaturangaben

- 1 J. Schmidt, P. Pohl, K. Bothe, and R. Brendel, *Advances in Contactless Silicon Defect and Impurity Diagnostics Based on Lifetime Spectroscopy and Infrared Imaging*, *Advances in Optoelectronics* 2007, 92842/1–9 (2007).
- 2 S. Herlufsen, J. Schmidt, D. Hinken, K. Bothe, and R. Brendel, *Photoconductance-calibrated Photoluminescence Lifetime Imaging of Crystalline Silicon*, *phys. stat. sol. (RRL)* 2, 245–247 (2008).
- 3 P. Engelhart, N. P. Harder, R. Grischke, A. Merkle, R. Meyer, and R. Brendel, *Laser Structuring for Back Junction Silicon Solar Cells*, *Progress in Photovoltaics* 15, 237–243 (2007).
- 4 R. Brendel, *A Novel Process for Ultrathin Monocrystalline Silicon Solar Cells on Glass*, *Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1354 (Stephens & Bedford, 1997).
- 5 M. Gast, M. Köntges, and R. Brendel, *Lead-free On-laminate Laser Soldering: a New Module Assembling Concept*, *Progress in Photovoltaics* 16, 151–157 (2008).

### Über das ISFH

Das ISFH ist ein An-Institut der Leibniz Universität Hannover und eine Forschungseinrichtung des Landes Niedersachsen. Die Abteilung Solarenergie im Institut für Festkörperphysik und das ISFH werden von Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel geleitet. Derzeit arbeiten 143 Mitarbeiter in den Bereichen Photovoltaik und Solarthermie, darunter 21 Doktoranden und 20 Studierende. Das ISFH erwirtschaftet 75 Prozent seiner Einnahmen aus Drittmittelprojekten. Die im September 2008 in Betrieb genommene Technologiehalle eröffnet die Möglichkeit, zukünftig verstärkt Herstellungsprozesse auf industrierelevanten Produktionsmaschinen zu erforschen. Das ISFH arbeitet intensiv mit der deutschen Photovoltaikindustrie zusammen und hat jährliche Industrieerlöse von etwa 4 Millionen Euro. Weitere Informationen: [www.isfh.de](http://www.isfh.de).



#### Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel

Jahrgang 1961, ist seit 2004 Leiter und Geschäftsführer des Instituts für Solarenergieforschung ([www.isfh.de](http://www.isfh.de)), einem An-Institut der Leibniz Universität Hannover. Weiterhin leitet er seither die Abteilung Solarenergie im Institut für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover. Kontakt: [r.brendel@isfh.de](mailto:r.brendel@isfh.de)



#### PD Dr. Jan Schmidt

Jahrgang 1967, ist seit 2001 Gruppenleiter des Forschungsschwerpunkts Photovoltaik-Materialien am Institut für Solarenergieforschung und seit 2005 Privatdozent für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Kontakt: [j.schmidt@isfh.de](mailto:j.schmidt@isfh.de)