

# Lasertechnologie in der Silizium-Wafer-Photovoltaik

## Einführung

Höhere Solarzellenwirkungsgrade und geringere Herstellungskosten sind die beiden großen Leitlinien auf dem Weg zu geringeren Kosten des Solarstroms. Neben zukunftsweisenden Zellkonzepten sind dafür vor allem auch neue Bearbeitungsverfahren gefragt. Die rasante Entwicklung der Lasertechnologie lässt hierbei in den unterschiedlichsten Branchen neue Möglichkeiten entstehen und liefert entscheidende Impulse für weitergehende Innovation. Auch in der Photovoltaik-Industrie gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, Lasertechnologie sowohl für neue Fertigungsweisen als auch für die Umsetzung neuer Solarzellenkonzepte einzusetzen, die ohne Lasertechnologie nur schwer vorstellbar wären.

## Eine bewährte Partnerschaft

Laserbearbeitung von Solarzellen und Modulen spielt schon jetzt in der Photovoltaikproduktion eine wichtige Rolle. So hat sich in der industriellen Photovoltaik bereits das Schneiden von Silizium, das Beschriften und Markieren sowie die Kantenisolation mittels Laserablation<sup>1</sup> längst bewährt (Abb. 1a), ebenso wie die Strukturierung von Dünnschichtmodulen. Für die Verschaltung bzw. Strukturierung der Schichten von Dünnschichtmodulen kann der Laserstrahl Öffnungslinien sowohl direkt von der Rückseite als auch durch das Substrat hindurch ziehen (Abb. 1b).

Über diese wichtigen Teilprozessschritte hinaus hat die Lasertechnologie auch in der Vergangenheit schon die Rolle einer „befähigenden

Technologie“ gespielt: Das erste großindustriell umgesetzte Hocheffizienz solarzellenkonzept, die „Buried-Contact“-Solarzelle [1] der UNSW, Sydney, die durch BP Solar mit der „Saturn-Zelle“ kommerzialisiert wurde, basiert auf der Erzeugung grabenartiger Strukturen auf der Vorderseite der Solarzelle, die mittels Laserablation und nachfolgendem chemischem Ätzen des Siliziums hergestellt werden und in denen anschließend die vorderseitige Metallisierung der Solarzelle mittels Galvanik eingebracht d. h. „vergraben“ wird (Abb. 2): Die mit Metall gefüllten Gräben sind so schmal und tief, dass der Sammelbereich für das Licht vergrößert und der elektrische Widerstand der Leiterbahnen gering gehalten wird.

Dr. Nils-Peter Harder  
ISFH  
harder@isfh.de

Andreas Grohe  
Fraunhofer ISE  
andreas.grohe@ise.fraunhofer.de

Dominik Huljic  
Q-cells AG  
d.huljic@q-cells.com

Richard Hendel  
Carl Baasel Lasertechnik  
GmbH & Co.KG  
rh@baasel.de

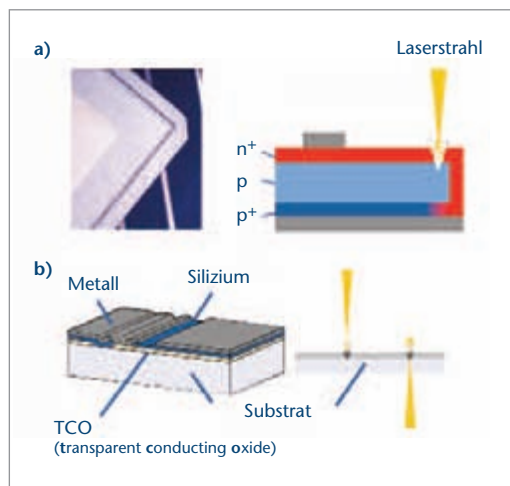


Abbildung 1  
a) Kantenisolation  
b) Strukturierung bei Dünnschichtmodulen

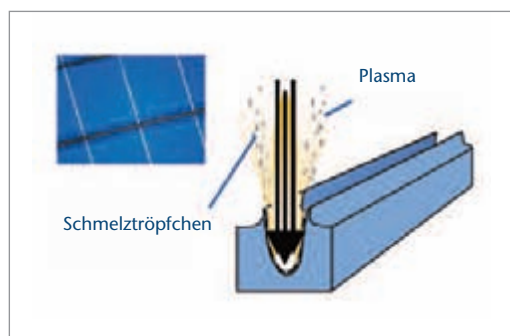


Abbildung 2  
Strukturierung für „Buried-Contact“-Solarzellen

<sup>1</sup> Als Laserablation wird das Abtragen von Material von einer Oberfläche bei Beschuss mit gepulster Laserstrahlung bezeichnet.

## Realisierung neuer Strukturen für Solarzellen und Module

### Laser-gefeuerte Kontaktherstellung

Bei der Erstellung einer neuen Solarzellstruktur ist die Frage nach der Kontaktierung des Halbleitermaterials stets eine spannende Frage. Dabei gilt es abzuwägen zwischen der Kontaktierung mit einem geringen elektrischen Widerstand und der Minimierung der Halbleiter/Metall-Grenzfläche, wo hohe Verluste der lichtgenerierten Ladungsträger entstehen. Die herkömmliche, vollflächige Siebdruck-Metallisierung auf der Rückseite (Abb. 3, rechts oben) schöpft wegen der großen metallisierten Fläche nicht das volle Wirkungsgradpotenzial aus. Ein geringerer Flächenanteil der Kontaktierung würde aus der Sicht des elektrischen Widerstandes schon ausreichen.

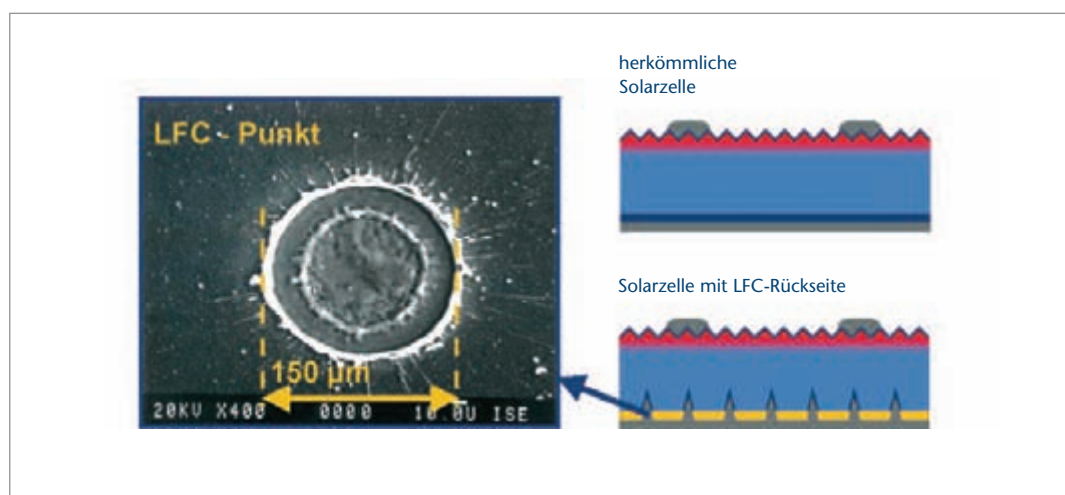
Die Minimierung dieser Metall/Halbleiter-Grenzfläche kann in eleganter Weise mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Konzept der „Laser-gefeuerten Kontakte (LFC)“ (Abb. 3, rechts unten) realisiert werden [2]. Dabei wird durch lokale Lasereinwirkung Metall durch eine Isolierschicht hindurch getrieben („gefeuert“). Die zwischen den Laser-gefeuerten Kontakten stehende dielektrische Schicht kann dabei in diesen Zwischengebieten eine gute Oberflächenpassivierung darstellen und gleichzeitig eine effektive Verspiegelung der Solarzellenrückseite. Die Rückspiegelwirkung wirft das Licht, das im ersten Durchgang durch die Solarzelle noch nicht absorbiert wurde, wieder

zurück in die Solarzelle hinein und vergrößert somit den Anteil der nutzbaren Lichtabsorption in der Solarzelle.

### Laser-Bohren und Flächenstrukturierung

Sowohl aus ästhetischen Gründen als auch aus Gründen der verbesserten Absorption des einfallenden Lichtes im Silizium wäre es vorteilhaft, keine Metallkontakte auf der Vorderseite der Solarzelle anzuordnen. Für eine Optimierung der Stromsammlung in der Solarzelle ist es jedoch sinnvoll, den stromsammelnden pn-Übergang bildenden Emitter auf der Vorderseite anzuordnen. Um den vorderseitigen Emitter nun durch rückseitige Metallfinger zu kontaktieren, sind emitterartige Verbindungskanäle zwischen Vorderseite und Rückseite sinnvoll, die mittels feiner Löcher durch die Solarzelle realisiert werden. Für diese Anwendung ist das Laser-Bohren von Löchern durch Silizium-Wafer geeignet. Disc-Laser können innerhalb einer Sekunde bis zu 3000 Löcher durch Siliziumwafer bohren und bieten somit die Möglichkeit, mit hohem Durchsatz die vorteilhaften Verbindungskanäle vorzubereiten. Neben der hohen Einzelpulsenergie ist es auch die lange Pulsdauer (ca. 1  $\mu$ s) der infraroten Disk-Laser-Strahlung, die es ermöglicht einen effizienten Bohrprozess zu gewährleisten.

Abbildung 3  
Laser-gefeuerte  
Kontakte [2]



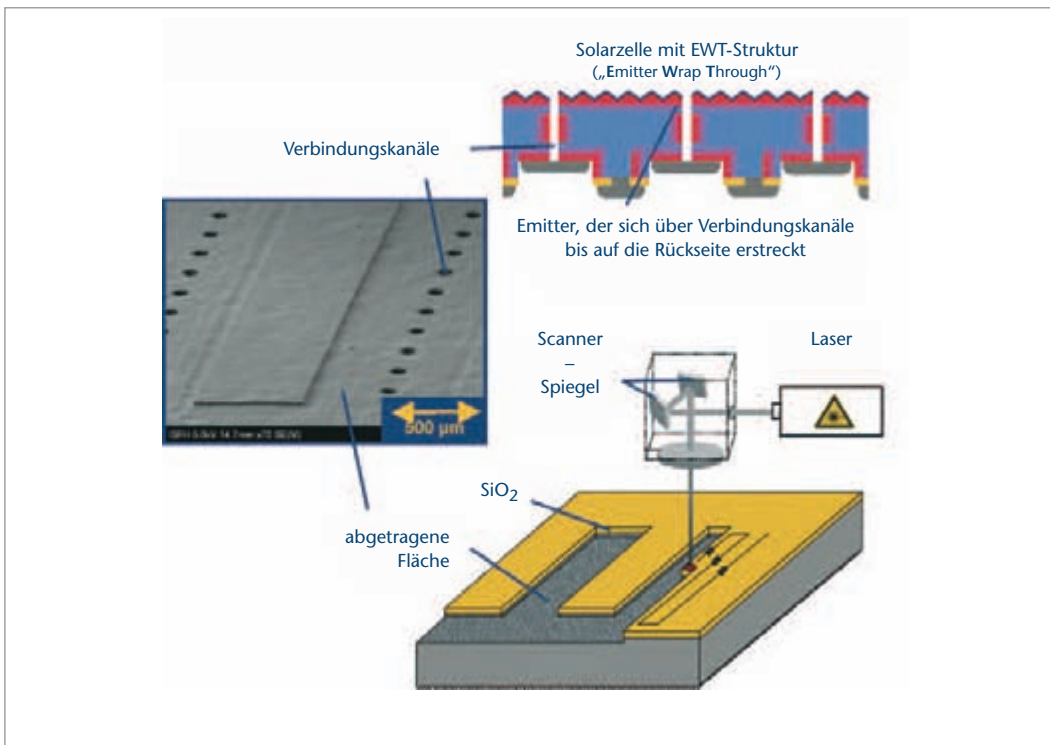


Abbildung 4  
Verbindungskanäle  
und Flächenstrukturierung  
bei der  
Herstellung von EWT-  
Solarzellen [3, 4, 5]

Nimmt man über den Prozess des Löcherbohrens hinaus außerdem noch eine flächige Strukturierung der Solarzellenrückseite vor, so kann zusätzlich zu Löchern und Vorderseite auch ein großer Flächenanteil der Solarzellenrückseite mit dem stromsammelnden pn-Übergang belegt werden.

Genaue Untersuchungen hinsichtlich der Kristallschädigung durch den Laser haben ergeben, dass für die flächige Strukturierung Laser, die grünes Licht emittieren, besonders

vorteilhaft sind. Bei der flächigen Strukturierung kann ausgenutzt werden, dass der Materialabtrag durch den Laser auch auf dem Silizium befindliche Oxidschichten entfernt, die in Folgeprozessen auf den Bereichen, die nicht durch Laser bearbeitet wurden, bei der Herstellung des pn-Überganges als Diffusionsbarriere dienen können.

Die in dieser Weise hergestellte so genannte „Emitter-Wrap-Through (EWT)“-Struktur [3] ist beispielhaft anhand der am ISFH entwickelten

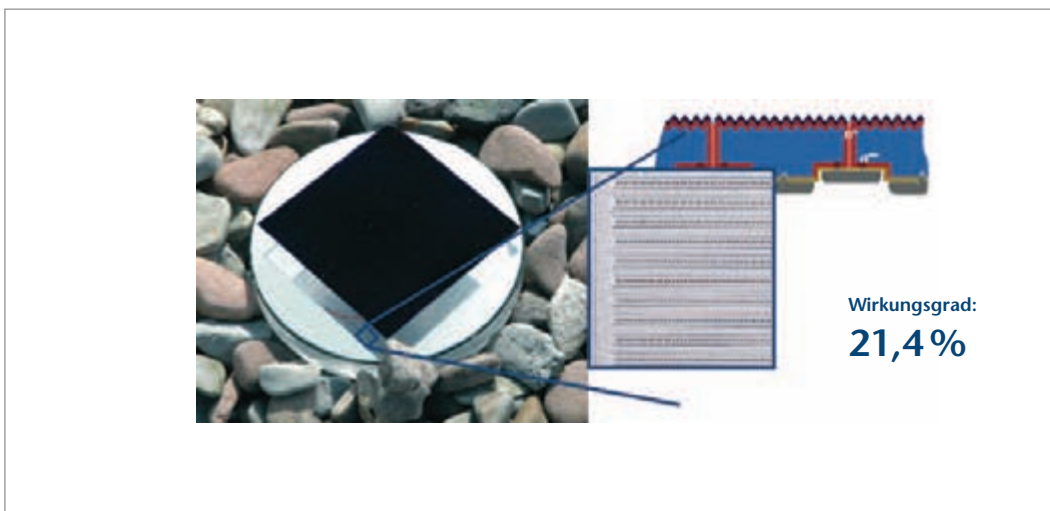


Abbildung 5  
Am ISFH entwickelte  
RISE-EWT-Solarzelle:  
Vorderseitenansicht,  
vergrößerter Ausschnitt  
der Rückseite und  
schematischer  
Querschnitt [4, 6]

RISE-EWT Solarzelle [4, 5] in *Abbildung 4* gezeigt und ermöglicht eine sehr effiziente Stromsamm- lung auch im Falle von relativ geringer Silizium- qualität. Eine solche Solarzelle weist durch ihre homogene Vorderseitenansicht nicht nur ein hohes Maß an Ästhetik auf, wie in *Abbildung 5* zu sehen ist, sondern erreicht bei Verwendung von hoher Siliziumqualität darüber hinaus außerdem sehr hohe Wirkungsgrade oberhalb von 21 %, trotz relativ einfachen Prozessflusses [6].

## Laserdotierung

Eine Alternative zur Erzeugung lokaler Dotierung oder selektiver Emitter mit Hilfe von Diffusions- barrieren kann das Laserdotieren bieten. Eine Schicht, zum Beispiel ein phosphorhaltiger Flüssigkeitsfilm, wird auf dem Siliziumwafer aufgebracht und der Dotierstoff mittels des Laserenergieeintrages in das Silizium eingetrie-

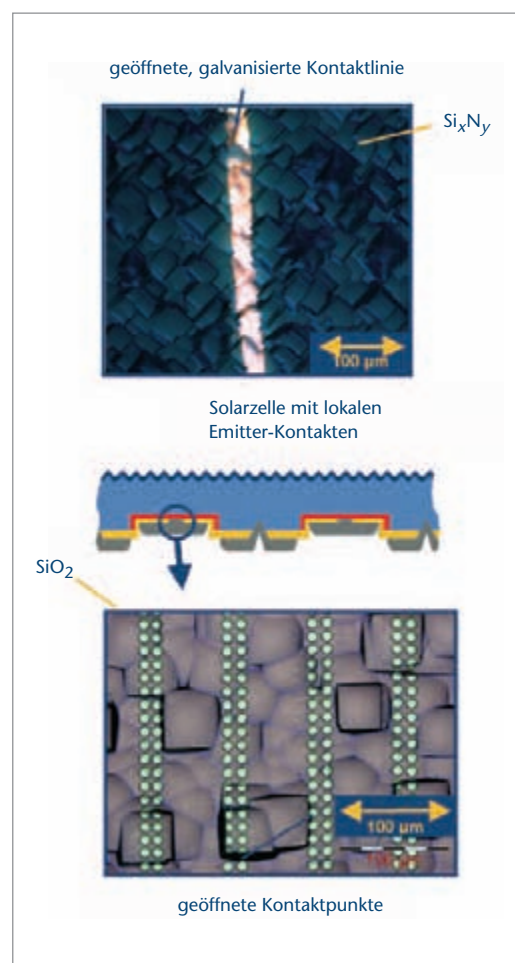
ben. Für einen besonders tiefen Eintrag der Dotieratome kann hierbei das Silizium mittels der Laserenergie oberflächlich aufgeschmolzen werden, wobei das flüssige Silizium beim anschließenden Erstarren die Kristallstruktur des Substrates wieder übernimmt und der Tiefe der Laserinduzierten Aufschmelzung den Dotierstoff in den Siliziumkristall einbaut [7, 8]. Durch das schreibende Verfahren der Laserbearbeitung können in dieser Weise beliebig strukturierte dotierte Bereiche in die Oberfläche des Wafers eingebracht werden, ohne dass aufwändige Maskierungen oder Ätzschritte vorgenommen werden müssen.

## Abtrag von Isolatorschichten auf Silizium

Die Oberfläche des Siliziumwafers ist bei Hoch- effizienz solarzellen verantwortlich für den größten Teil der Rekombinationsverluste licht- generierter Ladungsträger. Um diese Verluste zu minimieren, sind verschiedene Oberflächen- passivierungstechniken entwickelt worden. Besonders gute Passivierungseigenschaften haben oxidierte Siliziumoberflächen oder Siliziumnitrid beschichtete Oberflächen. In beiden Fällen ist jedoch das Silizium unter einer isolierenden Schicht verborgen, die für die Kontaktierung der Solarzelle lokal entfernt werden muss. Während hierfür in einer Labor- anwendung die Photolithographie sehr leistungsfähig ist, verbietet sich ihr Einsatz jedoch aus Kostengründen in einer industriellen Produktion von einem billigen Massenprodukt wie Solarzellen.

In dieser Situation hat sich in jüngster Zeit die Anwendung von sogenannten „Kurzpuls-Lasern“ als fruchtbar erwiesen, deren Pulse nur Billionstel Sekunden andauern. Wenn die Laser- leistung auf so kurze Zeiten konzentriert wird, können nichtlineare Effekte auftreten, durch die üblicherweise transparente Isolatoren zu absorbieren beginnen. Wesentlich für den gewinnbringenden, d. h. schonenden Einsatz von KurzpulsLasern bei der Entfernung von Silizium-Oxid und -Nitridschichten ist vor allem, dass während der kurzen Pulsdauer dem Substrat darunter kaum Zeit bleibt, sich zu

*Abbildung 6*  
Abtrag von Silizium- nitrid und Siliziumoxid zur lokalen Kontakt- öffnung mit Piko- sekunden-Laserpulsen [6, 9, 10, 11]



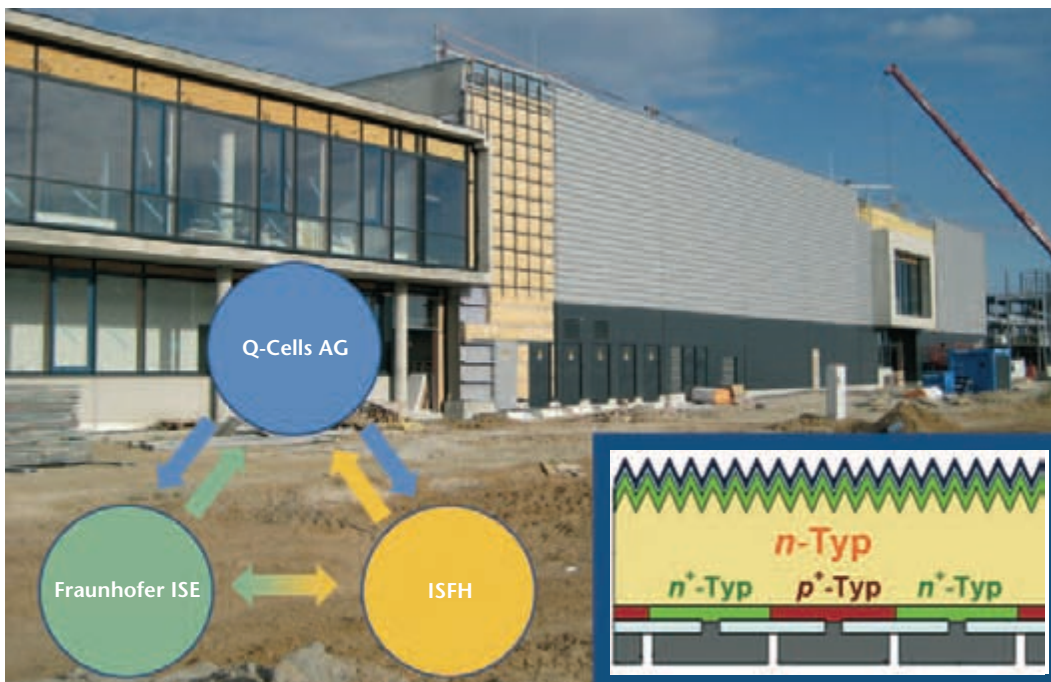


Abbildung 7  
Konstellation des  
Quebec-Projektes

Schematische  
Darstellung der  
entwickelten Solarzelle,  
sowie Foto des Baus  
der Testlinie für die  
industrielle Umsetzung  
der Quebec-Zelle bei  
der Q-Cells AG

erhitzen bzw. die Hitze in die Tiefe zu leiten. Die Wirkung des Energieeintrages des Lasers, der zur oberflächlichen Materialabspregung führt, bleibt somit auf oberflächennahe Schichten beschränkt und ruft keine Tiefenschädigung des Siliziums hervor. Dadurch ist eine besonders schonende Bearbeitung möglich, die sich für die Herstellung von lokalen Kontaktöffnungen (Abbildung 6) für Hocheffizienz-solarzellen eignet. Solarzellen, deren lokale Kontaktierung mittels einer solchen Kurzpuls-laser-Prozessierung hergestellt wurden, haben durch ihre hohe Effizienz von bis zu oberhalb 21 % besonders deutlich illustriert, dass passivierende Isolatorschichten wie Silizium-nitrid und -oxid mittels Laserablation abgetragen werden können, ohne darunter liegende Emitterschichten signifikant zu schädigen [6, 9, 10, 11].

## Solarzellentwicklung auf der Grundlage von Laserprozessen

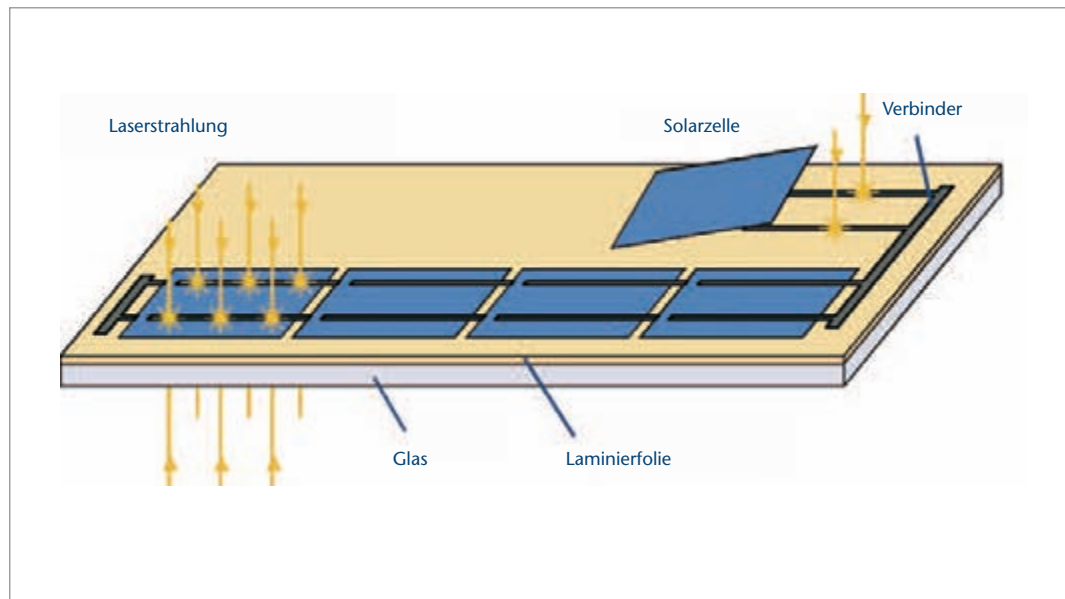
Die Q-Cells AG startete früh gemeinsam mit den beiden auf dem Gebiet der Siliziumwafer-solar-zellen führenden deutschen Forschungsinstituten, dem ISFH und Fraunhofer ISE, ein ambitioniertes Zellentwicklungsprojekt, dessen tragende Säule

die Laserprozessierung darstellte. In diesem Projekt „Quebec“, dessen Name sich herleitet von der lautmalerschen Verschmelzung des Anfangsbuchstaben der Q-Cells AG und dem Laut „back“ wie „back-contacted“, wurde eine Hocheffizienz-solarzelle mit Wirkungsgraden oberhalb von 20 % für die industrielle Massenfertigung entwickelt [12]. Nach dem Projekterfolg baute Q-Cells AG eine Testlinie, in der die industrielle Fertigung der Quebec-Zellen ihren Anfang nehmen wird.

## Laserlöten auf Lamierfolien: Berührungslose Zellenverbindungstechnik

Nicht nur in der Weiterentwicklung der einzelnen Zellen befähigt die Lasertechnik neue Konzepte, sondern auch bei der Verschaltung zum Modul. Abbildung 8 zeigt den Prozessablauf beim Auf-Lamimat-Laser-Löten, das am ISFH entwickelt wurde [13]. Einige aufwändige Handhabungsschritte der Solarzellenstrings des konventionellen Verfahrens können entfallen, da beim Auf-Laminat-Lötprozess die einzelnen Zellen direkt am Einbauort im Modul, d. h. auf der Laminierfolie des Moduls, verlötet werden.

Abbildung 8  
Laserlöten auf  
Laminierfolie [13],  
womit aufwändige und  
risikoreiche Handling-  
schritte der Solar-  
zellenstrings vermei-  
den werden können.



Entscheidend für diese Zellverbindungsmethode ist eine präzise Prozesskontrolle, die den Hitze-eintrag des Lasers auf ein Minimum reduziert, so dass die hitzeempfindliche Laminierfolie nicht beschädigt wird.

## Ausblick: eine Solarzelle pro Sekunde

In der Photovoltaik gibt es ambitionierte Ziele für zukünftige Produktionsanlagen. Mit „Eine Solarzelle pro Sekunde“ kann die zentrale Herausforderung bei der industriellen Umsetzung von Laserprozessen ausgedrückt werden. Daher haben jene neuen Prozesse, die nur einen kleinen Flächenanteil mit dem Laserstrahl bearbeiten, ein besonders hohes Potenzial, sich in naher Zukunft durchzusetzen. Gleichzeitig erscheinen kontinuierlich neue Strahlquellen auf dem Lasermarkt mit immer größerer Puls-geschwindigkeit (Repetitionsrate) und Leistung. Zusätzlich werden die Möglichkeiten zur Strahlformung und Strahlführung beständig erweitert. Daher wird auch die Strukturierung großer Flächenanteile der Solarzellen für die industrielle Produktion kostengünstig umsetzbar sein.

Die Lasertechnologie bietet der Photovoltaik viele Vorteile:

- industriell einsetzbare Alternativen zur Photolithographie
- zehntausende Löcher durch Siliziumwafer in Sekunden
- berührungslos dünne Wafer prozessieren
- lokal dotieren
- Entwicklung neuer Zellkonzepte stimulieren
- Hitzeintrag bei Lötprozessen minimieren

Die hier dargestellten Erfolge wurden durch die Forschungsförderung der öffentlichen Hand ermöglicht.

## Literatur

- [1] M.A. Green, A.W. Blakers, S.R. Wenham, S. Narayanan, M.R. Willison, M. Taouk, T. Szpitalak, Proceedings of the 18<sup>th</sup> IEEE PV Specialists Conference (1989) 39.
- [2] E. Schneiderlöchner, R. Reu, R.Lüdemann, S.W. Glunz, and G. Willeke. Proceedings of the 17<sup>th</sup> EC-PVSEC, Munich (2001) 1303.
- [3] J.M. Gee, W.K. Schubert, P.A. Basore. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> IEEE PV Specialists Conference, Louisville (1993) 265.
- [4] P. Engelhart, A. Teppe, A. Merkle, R. Grischke, R. Meyer, N.-P. Harder, and R. Brendel. Technical Digest of the PVSEC-15, Shanghai (2005) 802.
- [5] P. Engelhart, N.-P. Harder, R. Grischke, A. Merkle, R. Meyer, and R. Brendel. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 15 (2007), 237.
- [6] S. Hermann, P. Engelhart, N.-P. Harder, B. Fischer, R. Meyer, and R. Brendel. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> EC-PVSEC, Milano (2007) 970.
- [7] J. R. Köhler, M. Ametowobla, and A. Esturo-Breton Proceedings of the 20<sup>th</sup> EC-PVSEC, Dresden (2006) 851.
- [8] A. Grohe, T. Wütherich, A.Knorz, J. Nekarda, N. Mingirulli, C. Harmel, R. Preu, S. Glunz. Proceedings of the EC-PVSEC, Milano (2007) 1751.
- [9] P. Engelhart, N.-P. Harder, T. Horstmann, R. Grischke, R. Meyer, and R. Brendel. Proceedings of the WCPEC-4, Hawaii (2006) 1024
- [10] P. Engelhart, S. Hermann, T. Neubert, H. Plagwitz, R. Grischke, R. Meyer and R. Brendel. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 15 (2007) 521,
- [11] A. Knorz, A. Grohe, C. Harmel, R. Preu, J. Luther. Proceedings of the 21<sup>st</sup> EC-PVSEC, Milano (2007) 1488.
- [12] D. Huljic et al., präsentiert auf der 21<sup>st</sup> EC-PVSEC, Milano, 2007
- [13] M. Gast, M. Köntges, R. Brendel "Lead-Free On-Laminat-Laser-Soldering: A new module assembling concept", Progress in Photovoltaics: Research and Application. (in press)