

# SILIZIUMWAFER VERSUS DÜNNNSCHICHT

## WELCHE TECHNOLOGIE HAT DAS POTENTIAL FÜR TERAWATT?



Bild 1: Solarparks in Homberg mit Modulen auf der Basis kristalliner Silizium-Wafertechnologie und einer installierten Leistung von 7,44 MW<sub>p</sub> <sup>1)</sup>

### Wafer versus Dünnschicht

Die Photovoltaik verkörperte jahrelang wie keine andere Form der Erneuerbaren Energien die Energiewende, an der Jedermann teilhaben bzw. sie auch mitgestalten konnte. Durch die Installation einer Photovoltaikanlage auf dem eigenen Haus oder der Beteiligung an einer größeren Photovoltaikanlage wurde man zum Stromproduzenten. Da die Photovoltaik weltweit ein sehr großes Energieerzeugungspotential von mehreren Terawatt (TW) besitzt, steht sie für eine umweltfreundliche Zukunftstechnologie. Sie kann (fast) überall auf der Welt genutzt werden, auch wenn zeitweise die Bedeutung von Speichern, fluktuierender Energieerzeugung und Netzkompatibilität unterschätzt wurde.

Technologisch war diese Zeit u.a. von der Frage bestimmt, welcher der unterschiedlichen Solarzellentypen sich langfristig durchsetzen würde. Lange bestand die Ansicht, dass die Produktionskosten für Solarmodule der Silizium-Wafertechnologie durch die notwendigen ener-

gieintensiven Hochtemperaturprozesse zur Herstellung kristalliner Siliziumwafer und Solarzellen die Ein-Dollar-pro-Watt-Grenze nicht unterschreiten kann.

In Konkurrenz zur klassischen Silizium-Wafertechnologie mit einer Solarzellenschichtdicke von 180 bis 300 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) standen drei unterschiedliche Dünnschichttechnologien auf Basis von Cadmium-Tellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid/Disulfid (CIGS) und die Dünnschicht-Silizium-Tandemsolarzelle, bei denen die Solarzellendicke im Bereich von nur wenigen Mikrometern liegt. Die Materialersparnis in Kombination mit den niedrigeren Prozesstemperaturen zur Herstellung der Module, den großflächigen Abscheideverfahren (bis zu 5,7 Quadratmeter, z.B. mit Anlagen der amerikanischen Firma Applied Materials zur Herstellung der Dünnschichtsiliziumschichten) und der integrierten Serienschaltung stellten die wesentlichen Vorteile der Dünnschichttechnologie im Vergleich zu der Silizium-Wafertechnologie dar.

### Unterschiedliche Dünnschichttechnologien

Durch den starken Ausbau der weltweiten Solarmodulproduktion kam es in der Zeit von 2011 bis 2013 als Folge von Skaleneffekten und einer Überproduktion insbesondere im asiatischen Raum zu einem drastischen Preisverfall. Dabei profitierte die Silizium-Wafertechnologie von dem höheren Entwicklungsstand und der reiferen Produktionstechnologie durch eine ca. 20 Jahre früher eingesetzte Technologieentwicklung (1954) im Vergleich zu den Dünnschichttechnologien (1975 bis 1977). Von 2000 bis 2014 lag der Anteil der Dünnschichttechnologie am weltweiten Produktionsvolumen zwischen 10 bis 20 % und ist nun auf ein Niveau von ca. 10 % abgefallen.

Die größten Produktionskapazitäten im Dünnschichtbereich besitzt die Firma First Solar aus den USA für CdTe (jährliche Produktionsnennleistung > 2 GW<sub>p</sub>) und Solar Frontier aus Japan für CIGS (jährliche Produktionsnennleistung ca. 1 GW<sub>p</sub>). Aufgrund des niedrigen Modulwirkungsgrades zwischen 8,5 % bis 11 % der Silizium-Dünnschichttechnologie ist die Tandemzelle bestehend aus einer amorphen Silizium (a-Si:H) Topzelle und einer mikrokristallinen Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) Bottomzelle nahezu vom Markt verschwunden, da die erzielten Systemkosten pro Fläche und Leistung mit Abnahme der Modulpreise zunehmend an Bedeutung gewonnen haben. Lediglich die Firma ENEL aus Italien produziert noch in Europa Silizium-Dünnschichtmodule mit einer Kapazität von ca. 200 MW<sub>p</sub>, deren Installation in Parks durch eine eigene Projektgesellschaft erfolgt. Obwohl Silizium das zweithäufigste Element in der Erdkruste ist und damit praktisch unbegrenzt zur Verfügung steht, dominieren derzeit die ökonomischen Vorteile der beiden anderen Dünnschichttechnologien über die ökologischen Vorteile der Silizium-Dünnschichttechnologie.

### BIPV mit Dünnschicht

Ein weiterer Vorteil der Dünnschichttechnologie im Vergleich zur Wafertechnologie ist der Einsatz von großflächigen

Modulen für Anwendungen in der Gebäude integrieren Photovoltaik (BIPV), die zu einem sehr homogenen und ästhetisch ansprechenden Erscheinungsbild führen kann. Auch in diesem Bereich zeichnete sich insbesondere die Silizium-Dünnschicht-Photovoltaik dadurch aus, dass man Aufmaß bezogene semitransparente Module herstellen konnte, bei der der Transmissionsgrad nahezu beliebig über die Glasscheibe eingestellt werden konnte.

Die Anwendung eines semitransparenten ökologisch unbelasteten Silizium-Dünnschichtmoduls mit einer Transparenz von nur 20 % als Warmfassade zeigt Bild 2 (Außenansicht) und Bild 3 (Innenansicht). Mit dieser Technologie bestand die Möglichkeit, die Transparenz der Scheibe in vertikaler Richtung kontinuierlich von 10 % nach 30 % und wieder auf 10 % zu variieren, und so weitere Funktionen in die Fassade zu integrieren. Der obere Bereich des Solarfensters mit einer Transmission von 10 % wäre so als Sonnenschutz ausgelegt. Im mittleren Bereich des Solarfensters mit einer 30 %-Transmission kann hinreichend Licht in das Gebäude eindringen und es ist möglich ohne Einschränkung der Sicht aus dem Fenster zu schauen. Im unteren Bereich kann ein Sichtschutz entstehen, wenn dort eine Transmission von nur 10 % eingestellt wird. Diese Variation kann alleine durch programmiertes Weglasern bei der Modulherstellung erreicht werden.

Obwohl beispielsweise die Firma Malibu GmbH & Co KG diesen hohen technischen Produktionsgrad erreicht hatte und eine über 24 Stunden an sieben Tagen laufende Produktion von Solar-Fassadenelemente betrieben hat, konnte der Bereich „BIPV“ die Kostenentwicklung

einer Silizium-Dünnschichtmodulproduktion nicht signifikant positiv beeinflussen. Das theoretische Potential von BIPV ist sehr groß, jedoch würde selbst eine kleine Modulproduktion (100 MW<sub>p</sub> pro Jahr) die enorme Menge von einer Millionen Quadratmeter „Solarglas“ bei einem Wirkungsgrad von 10 % produzieren. Dieses Volumen nimmt der Fassadenmarkt derzeit nicht auf. Einige Gründe für die kleine Marktdurchdringung im BIPV-Bereich sind u.a., dass

- der BIPV-Markt immer noch von Leuchtturmprojekten dominiert wird,
- im Bereich der Fassadenelemente keine Standardgrößen definiert werden können und als Folge dessen ein höherer manueller Aufwand bei deren Herstellung von BIPV-Modulen im Vergleich zu der vollautomatischen Herstellung der Solarmodule besteht,
- höhere Installationskosten entstehen, da einem Fassadenbauer die Verschaltung von stromerzeugenden Elementen nicht gestattet ist,
- eine länderspezifische Zertifizierungen der Fassadenelemente gefordert wird und
- ein sehr hoher Qualitätsstandard insbesondere hinsichtlich der Farbtreue im Fassadengeschäft besteht, was eine besondere Herausforderung bei der Zellherstellung darstellt.

Derzeit fehlt der Silizium-Dünnschichttechnologie aufgrund des niedrigen Wirkungsgrads etwas die Konkurrenzfähigkeit, auch wenn sie viele inhärente Vorteile und das Potential für neue innovative Produkte aufweist.

## Hoffungsvolle organische PV?

Eine vergleichbare Wirkungsgradargumentation wie bei der Silizium-Dünnschichttechnologie kann auch für organische Solarzellen geführt werden. Zwar haben diese insbesondere in den Jahren zwischen 2005 und 2012 erhebliche Fortschritte in der Wirkungsgradentwicklung gemacht und einen Zellwirkungsgrad von 12 % erreicht, aber seither gab es keine weitere Steigerung. Eine Aufskalierung auf große Flächen oder eine Massenproduktion konnte bisher auch noch nicht demonstriert werden. Dieser Zelltyp wird eher für Nischenanwendungen wie beispielsweise flexible Solarfolie geeignet sein, da sich der Massenmarkt mit einem Produktionsvolumen im GW<sub>p</sub>-Bereich bereits sehr weit entfernt hat.

## Situation in Deutschland

Nachdem die erste Phase der Energiewende in Deutschland mit der erfolgreichen Demonstration des Beitrags der Erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung von 27,4 % (Ende 2014) und einem PV-Beitrag von 6 % in 2014 [1] (7,5 % in 2015 [2]) abgeschlossen ist, herrscht in Deutschland als Folge des geringen Zuwachses an Neuinstallationen von 3,3 GW<sub>p</sub> (2013), 1,9 GW<sub>p</sub> (2014) und ca. 1,4 GW<sub>p</sub> (2015) im PV-Bereich im Vergleich zum nahezu konstanten Zubau von ca. 7,5 GW<sub>p</sub> in den Jahren 2010 bis 2012 als Auswirkung der EEG-Reform der Bundesregierung eine starke Verunsicherung vor. Einhergehend mit einer erheblichen Marktkonsolidierung, der Schließung vieler Produktionsstandorte in Deutschland in den Jahren (2011 bis 2015), dem Rückzug namhafter Firmen aus der Solarzellenproduktion und -vertrieb und dem Verlust von über 60.000 Arbeitsplätzen in den krisengeschüttelten Jahren 2013 und 2014 im Vergleich zum Stand von 2012 mit einer Brutto-Beschäftigungszahl von 113.900 [3] kann man den Eindruck gewinnen, dass die Solarenergie im deutschen Energie-Mix keine große Bedeutung mehr hat.

Auch wenn die exakten Zahlen noch nicht vorliegen, so hat Deutschland wahrscheinlich seine weltweit führende Position (39,6 GW<sub>p</sub> Ende 2015) bei der globalen installierten Photovoltaikkapazität eingebüßt und wurde im letzten Jahr von China mit ca. 43 GW<sub>p</sub> überholt. Im Bereich der Solarmodulproduktion wurde Deutschland schon im Jahr 2008 von China übertroffen, weit bevor im Jahr 2011 erstmal die Solarproduktion oberhalb der Nachfrage lag und die Krise im PV-Bereich begann. Somit löst China Deutschland als führende PV-Nation mehr und mehr ab.

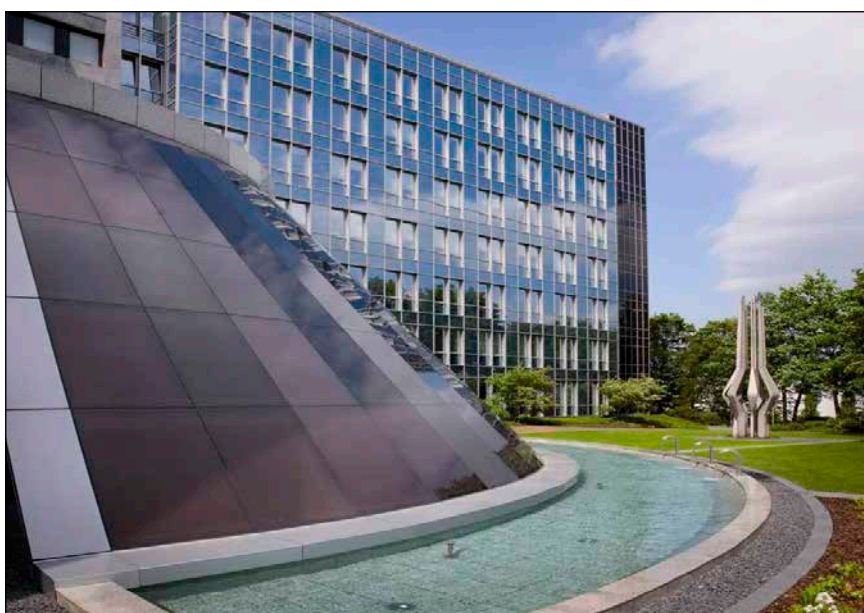


Bild 2: Semitransparente Solarmodule als großflächige Warmfassade (Außenansicht)

Bildquelle: Schuco International KG

## Entwicklung des Silizium-Massenmarktes

Unabhängig von der eher pessimistischen Stimmung der deutschen Öffentlichkeit, die insbesondere von der Diskussion um die Einspeisevergütung und die wirtschaftliche Situation der deutschen Solarindustrie bestimmt wird, wurden in den letzten drei Jahren die Rekordwirkungsgrade nahezu aller Solarzellentypen signifikant weiterentwickelt. Nahezu wie ein Phönix aus der Asche hat die Perowskit-Solarzelle einen Wirkungsgrad von 20,1 % erreicht und in den Forschungslaboren einen neuen Hype ausgelöst. Auch wenn dieser Wert nicht den stabilisierten Wirkungsgrad angibt, die Umweltverträglichkeit dieses Materialsystems durch den Einbau von Bleiatomen nicht gegeben ist und dieser Zelltyp noch weit von einer möglichen Produktion entfernt ist, zeigt die Perowskit-Solarzelle jedoch das Potential für neue Materialsysteme auf.

Verstärkt wird der weltweit positive Trend im Bereich PV auch dadurch, dass sich der weitere Anstieg der weltweiten kumulierten, installierten PV-Kapazität Ende 2015 auf über 200 GW<sub>p</sub> fortgesetzt hat. Im Jahr 2014 lag der Wert noch bei 177 GW<sub>p</sub>. Als imposantes Beispiel sei hier Europas größtes Solarkraftwerk genannt, welches in der Nähe von Bordeaux errichtet wurde, Ende Oktober 2015 ans Netz ging und eine Nennleistung von 300 MW<sub>p</sub> ausweist. Für 10,2 Cent pro Kilowattstunde wird der Strom aus dem neuen Solarkraftwerk über die nächsten 20 Jahre verkauft [4]. Dieses Beispiel demonstriert die kontinuierliche Entwicklung dieser Technologie. Auch wenn die Photovoltaik weiterhin auf eine Subvention durch das EEG angewiesen ist, so hat

die Bundesnetzagentur am 06.01.2016 bekannt gegeben, dass der Zuschlagswert der dritten Ausschreibungsrunde für Photovoltaik-Freiflächenanlagen von 8,47 auf 8,00 Cent pro Kilowattstunde (ct/kWh) weiter gesunken ist [5].

Nach der Konsolidierung in den letzten Jahren im PV-Bereich – die sicher auch noch nicht vollständig abgeschlossen ist – haben einige Solarfirmen (z.B. Trina Solar, First Solar usw.) in 2014 wieder Gewinne erwirtschaftet, auch wenn keine der reinen börsennotierten Solarmodulhersteller ab 2011 eine Dividende gezahlt haben. Dieser positive Trend setzt sich auch in 2015 fort und z.B. die Firma Trina Solar Limited (TSL) hat Ende 2015 zwei neue Wirkungsgradrekorde für Zellen mit multikristallinen Wafern (21,25 %) und Bor-dotierten Czochralski-Wafern (monokristalliner Wafer, hergestellt mit dem Czochralski-Verfahren; 22,13 %) unter Verwendung von Produktionsprozessen vorgestellt, was die zügige Weiterentwicklung der Wafertechnologie zeigt.

Möglich wurden die hohen Wirkungsgrade im Bereich der Silizium-Wafertechnologie u.a. durch die produktionstechnische nahe Umsetzung der PERC-Struktur (passivated emitter rear contact) oder weiterentwickelter Konzepte. Mit dieser PERC-Struktur wurde bereits im Jahr 1998 ein Rekordzellwirkungsgrad von 24,7 % und mit der PERL-Struktur (passivated emitter rear locally diffused) von 25 % im Labor erreicht. Der Zellweltrekord von 25 % für Silizium-Wafersolarzellen hatte bis zum Jahr 2015 Bestand. Stellt man an dieser Stelle die zentrale Frage nach der Solarzellentechnologie über das Jahr 2020 hinaus, so kann man damit rechnen, dass diese auch weiterhin von der Silizium-Wafertechnologie

dominiert wird. Im Bereich der Wafertechnologie

- besteht ein sehr großes weltweites Forschungsnetzwerk,
- wurde ein erhebliches Produktions-equipment entwickelt und durch Standardisierung von vielen Firmen weltweit unterstützt,
- wurde inzwischen eine weltweite, jährliche Produktionskapazität von über 50 GW<sub>p</sub> aufgebaut, was ein weiteres Fortschreiten der Lernkurve mit einer mittleren Kostenreduktion von 21,5 % bei Verdopplung der kumulativ produzierten Solarmodule ermöglicht,
- erwirtschaften die Solarfirmen wieder erste Gewinne und
- existiert eine interessante Roadmap u.a. mit der Umstellung auf Phosphor-dotierte Wafer oder die Zellentwicklung auf Basis der HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer)-Struktur. Beide Ansätze versprechen eine höhere offene Klemmenspannung [6] und damit eine weitere Steigerung der Moduleffizienz.

## Bewertung der verschiedenen Dünnschichttechnologien

Unter den Dünnschichttechnologien kann die Perspektive der CdTe-Technologie durchaus positiv bewertet werden, auch wenn als Folge der begrenzten Materialressourcen die weltweite Produktionskapazität nicht auf ein mit der Wafertechnologie vergleichbares Volumen von 50 GW<sub>p</sub> ausgebaut werden kann. Tellur zählt zu den sehr seltenen Elementen und wird als Nebenprodukt bei der Kupfer- und Nickelherstellung gewonnen. Außerdem ist Cadmium toxisch. Durch den bereits etablierten Recyclingprozess von „alten“ CdTe-Modulen und einer weiteren Optimierung der Zellstruktur ist jedoch bei den langfristigen Ausbauplänen von First Solar auf eine Produktionskapazität zwischen 3,5 bis 4 GW<sub>p</sub> pro Jahr bis 2018 keine Tellurverknappung zu erwarten, ebenso werden Umweltprobleme vermieden. Die begrenzte jährliche Tellurproduktion und die dominante Marktstellung von First Solar im CdTe-PV-Bereich, mit ihrer langjährigen Entwicklungs- und Produktionserfahrung, macht das Auftreten eines zweiten Players mit GW<sub>p</sub>-Produktionskapazität eher unwahrscheinlich. First Solar als Technologieführer im Bereich der CdTe-Technologie führt das Leben eines Einzelkämpfers. Mit einer Produktionskapazität von über 2 GW<sub>p</sub> pro Jahr liegt sie im Bereich der großen kristallinen Solarmodulhersteller (z.B. Trina Solar Limi-

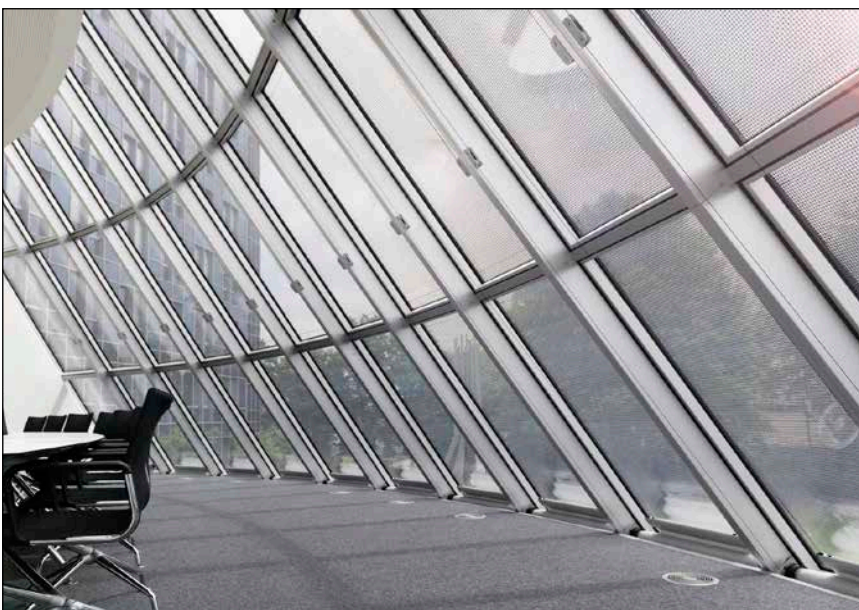


Bild 3: Semitransparente Solarmodule als großflächige Warmfassade (Innenansicht)

Bildquelle: Schuco International KG



Quelle: Manz AG

Bild 4: CIGS Beschichtungsanlage

ted, Hanwa Gruppe beide mit ca. 5 GW<sub>p</sub> Produktionskapazität) und kann dabei Skaleneffekte ausnutzen. Weiterhin hat First Solar dank einer sehr guten Forschungs-, und Technologieentwicklung im Sommer 2015 einen neuen Modulwirkungsgrad von 18,2 % aufgestellt, was das weitere Potential dieser Technologie widerspiegelt. Neben der Modulproduktion wurden auch ein Projektgeschäft und eine umfangreiche Installationspipeline aufgebaut. Die wirtschaftlich gute Situation von First Solar wird auch durch die Eigenkapitalquote von 75 % (Ende 2014) demonstriert, was im Vergleich zu den meisten anderen reinen Solarfirmen sehr hoch ist.

Obwohl für die CIGS-Solarzelle im Labor der höchste Wirkungsgrad aller drei Dünnschichttechnologien von 21,7 % erreicht wurde, bestehen derzeit Bedenken, ob man der fortschreitenden Entwicklung der Silizium-Wafertechnologie folgen kann. Zwar weist die Firma Solar Frontier eine Produktionskapazität von fast einem GW<sub>p</sub> aus, hat aber in den letzten Jahren stark von dem japanischen Markt und den Stillstandszeiten der japanischen Atomkraftwerke nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima profitiert. Die Ankündigung des Chefs von Hanergy (China), der für die nächsten Jahre den Wirkungsgrad der CIGS-Technik auf über 16 % zu steigern versprach und die Massenproduktion solcher Dünnschichtzellen ankündigte, ließ vor einiger Zeit aufhorchen. Dass diese Ziele realistisch sind, zeigt auch das Rekordmodul der Firma Manz AG aus dem Frühling 2015, womit ein Modulwirkungsgrad von 16 % demonstriert und ein wichtiger Meilenstein erreicht wurde. Auch CNBM, Chinas größter Baustoffkonzern und Muttergesellschaft des deutschen Modulherstellers AVANCIS, hat im Oktober 2015 den Spatenstich für eine der größten CIGS Produktionsstätten in China vorgenommen. Mit der schrittweisen Errichtung einer Solarfabrik mit einer Jahresleistung von 1,5 GW<sub>p</sub> soll eine der größten Produktionsstätten für CIGS-Module gebaut werden. Im ersten Schritt wird eine Produktionskapazität von 300 MW<sub>p</sub> errich-

tet. Dabei werden insbesondere die chinesischen Hersteller langfristig von den Indiumressourcen Chinas profitieren, da der Preis von Indium als sehr seltenes Metall durch die hohe Nachfrage aus der Displaytechnologie stark angestiegen ist. Indium wird fast ausschließlich als Nebenprodukt der Zink- und Blei-Produktion gewonnen. Unter Berücksichtigung der Ressourcen- und gegenwärtigen Verbrauchsangaben aus [7] könnte man mit der heutigen CIGS-Technologie schon eine 10 GW<sub>p</sub> Produktionskapazität versorgen, wenn man nur die Hälfte der jährlichen chinesischen Indiumproduktion berücksichtigen würde. Somit hat die CIGS-Technologie im Vergleich zur Cd-Te-Solarzelle das Potential, einen deutlich höheren Marktanteil zu gewinnen und einen höheren Beitrag zur erneuerbaren Stromerzeugung zu leisten. Auch bei der CIGS-Technologie wird allerdings ein toxisches Material, Selen, eingesetzt. Für die CIGS-Technologie wäre es wünschenswert, wenn die Kostenreduktion als Folge von größeren Produktionskapazitäten schnellstmöglich demonstriert werden könnte.

### Fazit

Die endgültige Antwort auf die Frage nach dem zukünftigen Solarzellentyp kann zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben werden. Aber es ist unwahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren an der dominanten Rolle der Silizium-Wafertechnologie gerüttelt werden kann.

Das weltweite Wachstum im PV-Bereich ist weiterhin ungebrochen und der derzeitige mittlere Modulpreis von 50 €-Cent-Pro-Wattpeak [2, 6] ermöglicht auch die kostengünstige lokale Elektrifizierung von urbanen Bereichen in Entwicklungsländern. Die Photovoltaik ist schon jetzt vielerorts die billigste Stromerzeugungstechnik, was sicherlich auch ein großer Erfolg des EEG von Deutschland ist.

Auch wenn der PV-Bereich in Deutschland etwas aus dem aktuellen Fokus geraten ist, weltweit leuchtet ihm die Sonne. Mit der installierten Solarleistung von 200 GW<sub>p</sub> kann man aus industrieller Sicht nur am Anfang einer neuen Technologie stehen, wenn man von einem globalen, langfristigen Ziel von mehreren TWp (Terawattpeak) installierter Leistung ausgeht.

Die nähere Zukunft gehört der Silizium-Wafertechnologie, jedoch ist das Limit für diese Technologie bezüglich einer weiteren Wirkungsgradsteigerung fast erreicht, weshalb an neuen Konzepten wie beispielsweise die Kombination von unterschiedlichen Technologien [8], alternativen Zellkonzepten und neuen

Materialsystemen geforscht wird. Innovationen aus der Nanotechnologie und die Verfolgung von Ansätzen der „3rd Generation PV“ [8] werden zur Weiterentwicklung der PV-Technologie beitragen. Aufgrund ihrer Umweltverträglichkeit und ihrer nahezu unbegrenzten Materialverfügbarkeit ist eine neue Silizium-basierte Dünnschichttechnologie wünschenswert.

### Literatur

- [1] [www.erneuerbare\\_energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung\\_der\\_erneuerbaren\\_energien\\_in\\_deutschland\\_im\\_jahr\\_2014.pdf](http://www.erneuerbare_energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_im_jahr_2014.pdf)
- [2] Dr. Harry Wirth, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de)
- [3] M. O'Sullivan, U. Lehr, D. Edler, Forschungsvorhaben des BMWi: „Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland und verringerte fossile Brennstoffimporte durch erneuerbare Energien und Energieeffizienz, 2015
- [4] [www.faz.net/aktuell/wirtschaft/energiepolitik/in-bordeaux-steht-der-groesste-solar-park-europas-13942975.html](http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/energiepolitik/in-bordeaux-steht-der-groesste-solar-park-europas-13942975.html)
- [5] [www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2016/kw01/zuschlagswert-in-der-dritten-photovoltaik-freiflaechenausschreibung-von-849-ctkwh-auf-800-ctkwh-gesunken.html](http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2016/kw01/zuschlagswert-in-der-dritten-photovoltaik-freiflaechenausschreibung-von-849-ctkwh-auf-800-ctkwh-gesunken.html)
- [6] International Technology roadmap for Photovoltaic (ITRPV), sixth edition, April 2015, [www.itrpv.net](http://www.itrpv.net)
- [7] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2015-indiu.pdf>
- [8] [www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2015/kw44/forscher-entwickeln-monolithische-tandem-solarzelle-aus-silizium-und-perowskit-mit-rekord-wirkungsgrad.html](http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2015/kw44/forscher-entwickeln-monolithische-tandem-solarzelle-aus-silizium-und-perowskit-mit-rekord-wirkungsgrad.html)
- [9] M.A. Green, Third Generation Photovoltaics, Springer Berlin Heidelberg, 2003, ISBN: 978-3-540-26562-7

### Fußnote

- 1) [www.tauber-solar.de/de/ffa-details/items/solarpark-homberg-efze.html](http://www.tauber-solar.de/de/ffa-details/items/solarpark-homberg-efze.html)

### ZUM AUTOR:

► Prof. Dr. Helmut Stiebig  
Universität Bielefeld, Fakultät für Physik / Lehrstuhl für Molekül- und Oberflächenphysik

[hstiebig@physik.uni-bielefeld.de](mailto:hstiebig@physik.uni-bielefeld.de)