

Photovoltaik-Innovationen entlang der Wertschöpfungskette



Fraunhofer ISE
Dr. Stefan Glunz
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

ZSW
Dr. Wiltraud Wischmann
wiltraud.wischmann@zsw-bw.de

HZB
Dr. Reiner Klenk
klenk@helmholtz-berlin.de

Jülich
Dr. Stefan Haas
st.haas@fz-juelich.de

ISFH
Dr. Thorsten Dullweber
t.dullweber@isfh.de

ZAE Bayern
Dr. Andreas Baumann
andreas.baumann@zae.uni-wuerzburg.de

Die Photovoltaik-Industrie hat in den letzten Jahren stürmische Zeiten durchlebt. Einerseits konnte die langjährige Preisreduktion erfolgreich weitergeführt werden und lag in den letzten Jahren sogar deutlich unter dem langjährigen Trend, sodass Photovoltaik-Module für Kunden und Installateure sehr kostengünstig und die resultierenden Stromgestehungskosten erfreulich niedrig sind. Andererseits ist der Kostendruck auf die Hersteller von Photovoltaik-Modulen dadurch sehr stark gestiegen. Um die Kosten für PV-Module weiter zu senken, spielt neben der Reduzierung der Produktionskosten insbesondere die Erhöhung des Wirkungsgrads eine starke Rolle, da diese besonders auch auf Systemniveau starke Auswirkungen hat.

Dieser Vortrag gibt eine Übersicht über die neuesten Entwicklungen und Innovationen in der Siliciumphotovoltaik, bei Dünnschichtsolarzellen aus Silicium und Chalkopyriten und in der organischen Photovoltaik. Neben der technologischen Weiterentwicklung des Materials, der Zellen und Module stehen auch die jeweiligen Systemlösungen im Fokus.

Die Forschungsinstitute des FVEE decken das komplette Spektrum der Wertschöpfungskette vom Material bis zum System ab. Gleichzeitig werden alle relevanten Materialsysteme wie kristallines Silicium, Dünnschicht-Photovoltaik bis hin zur organischen Photovoltaik untersucht. Dieser Beitrag kann daher nur einen kleinen Teil dieses Spektrums abdecken.

Exemplarisch werden an den verschiedenen Stationen der Wertschöpfungskette Forschungsergebnisse zu den verschiedenen Materialsystemen mit ihren speziellen Herausforderungen vorgestellt.

1. Material (CIGS-Dünnschicht)
2. Zelle (kristallines Silicium)
3. Modul (amorphes Silicium)
4. System (organische Photovoltaik)

In allen Bereichen können die an den verschiedenen Instituten entwickelten Innovationen maßgeblich zur weiteren Kostensenkung der Photovoltaik beitragen.

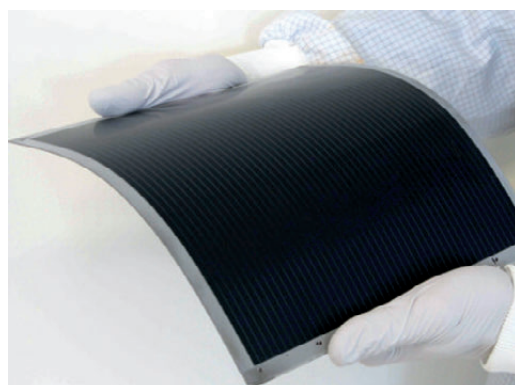
1. Material (CIGS-Dünnschicht)

Die Dünnschicht-Photovoltaik bietet dank ihres geringen Material- und Energieverbrauchs bei der Herstellung von Modulen einen großen Kostenvorteil, sofern es gelingt, zur herkömmlichen kristallinen Silicium-Technologie (Silicium-Wafer) vergleichbare Wirkungsgrade und Modulerträge zu erzielen.

Solarzellen basierend auf dem Materialsystem Kupfer-Indium-Gallium-Selen (Chalkopyrit oder kurz CIGS) erreichen derzeit mit 20,8%¹ die höchsten Wirkungsgrade aller Dünnschichttechnologien und übertreffen damit schon die Werte der multikristallinen Siliciumzellen (20,4%)². Diese hohen Wirkungsgrade werden im Labor auf Flächen von typischerweise Quadratcentimetern erzielt. Weiterentwicklungen sind möglich (theoretisches Limit noch nicht erreicht) und werden mit hoher Priorität erforscht. Die Hochskalierung und die Entwicklung der Prozesse zur Herstellung von Photovoltaik-Modulen erfolgen in produktionsnahen Technikumsanlagen der FVEE-Institute, die in enger Zusammenarbeit mit der Industrie den Technologietransfer bis zur großflächigen industriellen Produktion begleiten.

Mit einer zu CIGS strukturell verwandten Materialklasse, den Kupfer-Zink-Zinn-Schwefel-Selen-Verbindungen (Kesterit oder kurz CZTS), gelingt es, die seltenen Elemente Indium und Gallium zu ersetzen. CZTS-Solarzellen erreichen heute Wirkungsgrade von 11% und müssen durch grundlagenorientierte Forschung ihre Eignung als kostengünstiges PV-Material erst noch nachweisen.

Abbildung 1
Flexibles CIGS-Modul



¹ Pressemitteilung <http://www.zsw-bw.de/uploads/media/pi18-2013-ZSW-WeltrekordCIGS.pdf>.

² O. Schultz, S. W. Glunz, and G. Willeke, Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12, pp. 553-558 (2004).

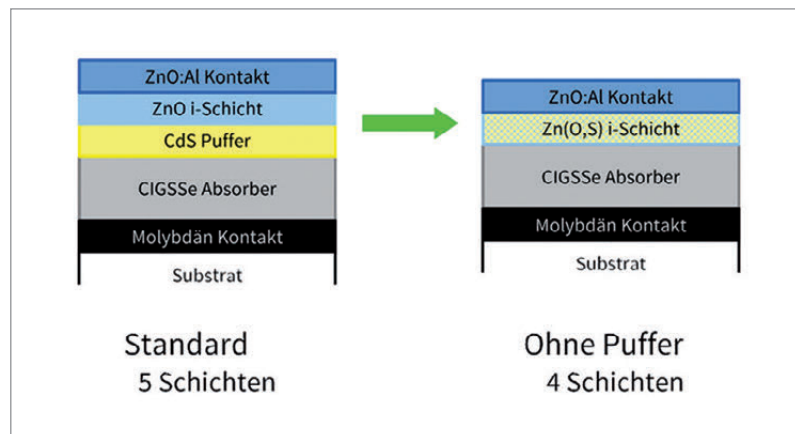


Abbildung 2

Cadmium-freie Solarzelle:
Modifizierte i-ZnO-Schicht als Ersatz für CdS-Pufferschicht

Eine neue Entwicklung verspricht eine einfachere Struktur der Zelle (siehe *Abbildung 2*) und die kostengünstige Herstellung Cadmium-freier Solarzellen. Durch das Sputtern von Zn(O,S) statt ZnO kann die Grenzfläche zum CIS soweit verbessert werden, dass die Cadmiumsulfid-Pufferschicht entfallen kann.^{3,4}

2. Zelle (kristallines Silicium)

Die Kosten für Siliciumsolarzellen sind in den letzten Jahren dramatisch gesunken. Während der Preis für eine 10–100 kWp Anlage Anfang 2006 noch bei 5000 Euro/kWp lag, sank dieser Preis bis Anfang 2013 auf unter 1500 Euro/kWp. Gleichzeitig hat sich die Aufteilung zwischen Modul- und Systemkosten stark in Richtung System verschoben (von 70:30 in 2006 auf 50:50 in 2013). Da die Systemkosten aber stark mit dem Wirkungsgrad der Module skalieren, ist eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades der Zellen und Module von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig sollten die Produktionskosten bei steigendem Wirkungsgrad nicht steigen, sondern im besten Fall weiter gesenkt werden.

Da die Materialqualität des verwendeten Siliciums verbessert wurde und gleichzeitig die Zelldicke auf unter 200 µm gesenkt wurde, kommt den Oberflächen der Zellen eine immer größere Bedeutung zu. Insbesondere an den Kontakten der Solarzellen kommt es zu einer erhöhten Rekombinationsaktivität, das heißt die durch das Licht erzeugten Ladungsträger gehen dort verloren. Der Idealzustand wären sogenannte „passivierte Kontakte“ bei denen zwar der Ladungsträgertransport der Majoritätsladungsträger (also z. B. der Elektronen im Falle von n-Typ Silicium)

aus der Zelle gut funktioniert aber gleichzeitig keine oder nur wenige Minoritätsladungsträger rekombinieren. Dies kann zum Beispiel durch eine Schichtabfolge aus einem sehr dünnen Tunneloxid und einer hochdotierten Siliciumschicht erreicht werden (siehe *Abbildung 3*). Das dünne Tunneloxid sorgt für eine gute Passivierung der Grenzfläche, darf aber den Ladungsträgertransport nicht behindern.

Das ist bei denen am Fraunhofer ISE entwickelten passivierten Kontakten⁵ sehr gut gelungen. So konnte ein exzellenter Wirkungsgrad von 24 % auf kleinen Flächen (4 cm²) erreicht werden.

Rückkontakt-Solarzellen sind ein vielversprechender Zelltyp für zukünftige Wirkungsgradsteigerungen, da beide Polaritäten auf der Rückseite der Zelle kontaktiert werden und somit die Abschattungsverluste der Vorderseitenkontakte entfallen. Dieses erfordert jedoch lokal unterschiedliche Dotierungen auf der Zellrückseite, welche bislang nur in sehr aufwendigen Prozesssequenzen erzeugt werden konnten.

Das ISFH hat in Kooperation mit BOSCH Solar und Applied Materials einen neuartigen Herstellungsprozess entwickelt, bei dem die lokalen Dotierungen mittels Ionenimplantation erzeugt werden.⁶ Der Trick dabei ist, in den Strahlengang des Ionenimplanters Schattenmasken zu integrieren, welche den Silicium-Wafer nur noch lokal implantieren. Dieses neuartige Verfahren reduziert die Komplexität des Herstellungsprozesses erheblich und erzielt exzellente Wirkungsgrade bis 22,1 % sowie mit 5,32 Wp eine der weltweit höchsten elektrischen Leistungen einer Silicium-Solarzelle.

³ A. Grimm, D. Kieven, I. Laueremann, M.Ch. Lux-Steiner, F. Hergert, R. Schwieger, R. Klenk, Zn(O,S) layers for chalcopyrite solar cells sputtered from a single target, *EPI Photovoltaics* 3, 30302 (2012).

⁴ R. Klenk, A. Steigert, T. Rissom, D. Greiner, C.A. Kaufmann, T. Unold, M.C. Lux-Steiner, Junction formation by Zn(O,S) sputtering yields CIGSe-based cells with efficiencies exceeding 18 %, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, im Druck.

⁵ F. Feldmann, Martin Bivour, Christian Reichel, Martin Hermle, Stefan W. Glunz, Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120, pp. 270-274 (2014).

⁶ Pressemitteilung <http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2013/kw33/photovoltaik-weltrekord-bosch-solar-und-isfh-erreichen-532-watt-spitzenleistung-mit-grossflaechigen-ionen-implantierten-ibc-solarzellen.html>

Abbildung 3

Hocheffiziente Silicium-Solarzellen mit passiviertem Rückseitenkontakt

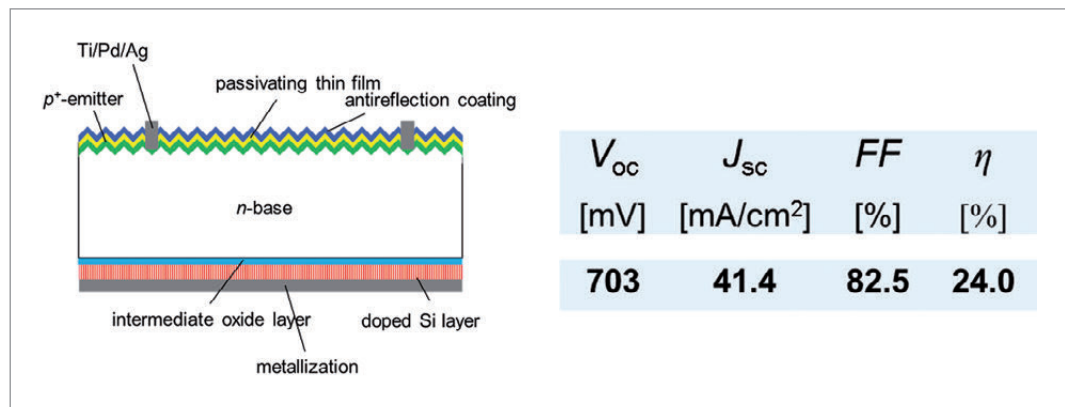


Abbildung 4

Rückkontakt-Silicium-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 22,1 % und einer Rekordleistung von 5,32 Wp, die am ISFH in Kooperation mit BOSCH Solar und Applied Materials hergestellt wurde.



3. Modul (amorphes Silicium)

Die Herstellung der integrierten Serienschaltung von Dünnschichtsolarmodulen aus a-Si/μ-Si ist ein alternierender Prozess aus Schichtabscheidung und Schichtauftrennung (siehe *Abbildung 5*). Hierbei wird die Auftrennung typischerweise linienförmig ausgeführt, so dass einzelne aktive Zellstreifen entstehen. Zur Auftrennung werden technologieabhängig Laser oder Nadeln eingesetzt.

Die Auftrennungsgräben stellen eine „Totzone“ dar, wodurch die Effizienz eines Moduls um 3–6 % relativ reduziert wird. *Abbildung 6a* zeigt eine Mikroskopaufnahme eines typischen Verschaltungsbereichs. Durch den Einsatz von Laserprozessen kann eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitungsgeometrie erzielt werden.⁷ Diese Flexibilität wurde für ein alternatives Verschaltungskonzept ausgenutzt, um die Totzone in einem Dünnschichtsolarmodul erheblich zu verringern (siehe *Abbildung 6b*). Im gezeigten Beispiel wurden punktuelle Verbindungen zwischen benach-

⁷ Stefan Haas, Sebastian Krumscheid, Andreas Bauer, Andreas Lambert, Uwe Rau, Novel series connection concept for thin film solar modules, Progress in Photovoltaics Research and Application 21, pp. 972-979 (2013).

barten Solarzellen eingesetzt, und zudem die notwendigen Auftrennungen der Kontaktschichten platzsparender angeordnet. Damit konnte der Flächenverlust durch die Verschaltung um 50 % reduziert werden.

4. System (organische Photovoltaik)

Die organische Photovoltaik hat in den letzten Jahren von einem enormen Forschungsinteresse profitiert. Der Wirkungsgrad konnte so in wenigen Jahren auf über 10% im Labor gesteigert werden. In einer nächsten Stufe suchen nun organische Solarmodule den Einstieg in den großen PV-Markt. Im Gegensatz zu der herkömmlichen anorganischen Photovoltaik bietet die organische PV dabei gewisse Vorzüge. So bestehen organische Solarzellen aus aktiven Schichtdicken von nur wenigen 100 nm und sind deshalb sehr leicht und flexibel in ihrer Handhabbarkeit. Des Weiteren können die aktiven Schichten mittels großflächiger Applikationsverfahren, wie dem Rolle-zu-Rolle-Verfahren, aufgebracht werden, so dass ein hoher Durchsatz bei der Herstellung garantiert werden kann. Dies soll zu geringen Produktionskosten führen.

Zugleich eröffnet die Möglichkeit einer gewissen Semitransparenz organischer Solarmodule ganz neue Anwendungsgebiete, wie etwa die Integration in Verglasungen oder Fenster (siehe *Abbildung 7*).

In Zukunft wird neben dem Preis von PV-Modulen auch die Integrationsfreiheit von Modulen in Gebäudeteile eine gewisse Rolle spielen. Dabei wird es immer Kriterien geben, die eine hohe Ausbeute bei nur geringem Flächenangebot verlangen, wie etwa Gebäudedächer.

Ganz im Sinne der Energiewende sollen Gebäude künftig zumindest genauso viel produzieren wie sie verbrauchen (Null-Energiehäuser) oder sogar mehr Energie gewinnen, als sie selbst verbrauchen (Plus-Energiehäuser). Dafür genügt es nicht, die Dachflä-

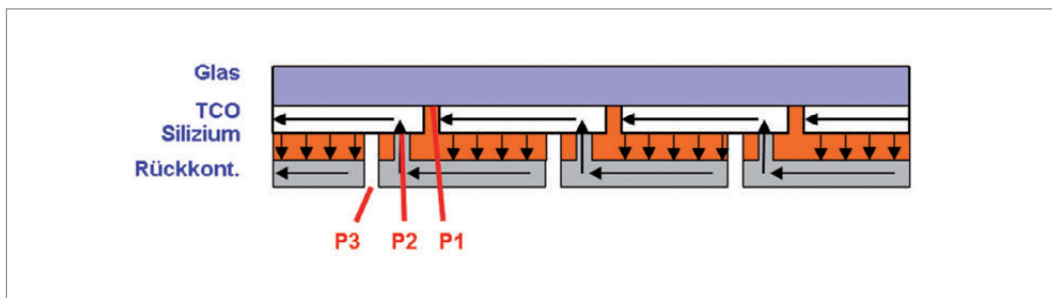


Abbildung 5

Integrierte Serienschaltung eines α -Si/ μ Si-Moduls. P1 bis P3 bezeichnen die drei notwendigen Auftrennungsgräben.

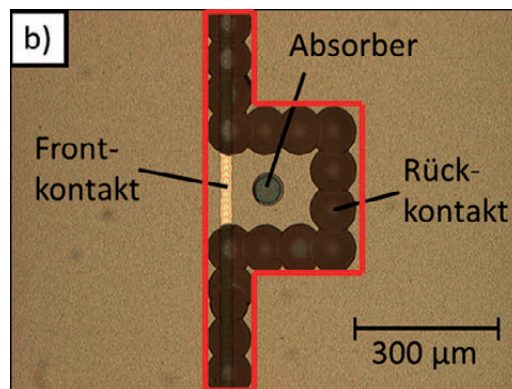
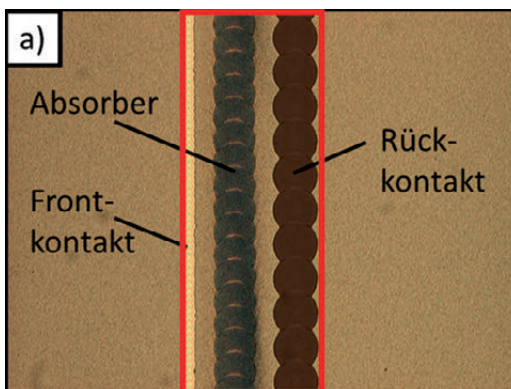


Abbildung 6

a) **Typischer Verschaltungsbereich** eines Dünnschichtsolarmoduls (Mikroskopaufnahme).
b) **Alternatives Verschaltungskonzept** basierend auf punktuellen Verbindungen zwischen benachbarten Zellstreifen. Benannt sind die jeweils aufgetrennten Schichten.

chen von Gebäuden zu nutzen, sondern es müssen auch die Fassaden- und Fensterflächen in Betracht gezogen werden. Auch ästhetische Gesichtspunkte spielen eine Rolle, die durch OPV in verschiedenen Farben und Formen besonders gut erfüllt werden können. Im Haus der Zukunft werden also die verschiedenen Flächen eines Gebäudes durch einen Mix unterschiedlicher PV-Technologien sinnvoll genutzt werden, wobei die OPV dank ihrer Eigenschaften ihre speziellen Einsatzgebiete finden wird.



Abbildung 7

Gebäudeintegrierte OPV: Organische Solarmodule in den Verglasungen am „Energy Efficiency Center“ des ZAE Bayern am Standort Würzburg (Planungsgrafik und Foto⁸)

Zusammenfassung

Die Kosten der photovoltaischen Stromgestehung sind durch technologische Weiterentwicklungen und starken Wettbewerb in den letzten Jahren extrem gesunken. Dies ist für die Anwender von Solarmodulen ein sehr positiver Trend und photovoltaisch generierter Strom spielt in Deutschland bereits eine signifikante Rolle im Energiemix. Auf der anderen Seite bereiten dieser Preisverfall und der starke Wettbewerb den Herstellern weltweit große wirtschaftliche Probleme.



Um wieder in den Bereich auskömmlicher Margen zu kommen, sind Innovationen heute notwendiger denn je. Die FVEE-Institute entwickeln in enger Zusammenarbeit mit der Industrie Lösungen für verschiedene Materialsysteme entlang der gesamten Wertschöpfungskette und helfen so die Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie zu erhalten bzw. zu stärken.

8 „Energy Efficiency Center“ (EEC) des ZAE Bayern am Standort Würzburg <http://www.energy-efficiency-center.de>.