

Produktionstechnologien für kosteneffiziente Solarzellen



ISFH
Dr. Thorsten Dullweber
dullweber@isfh.de

Prof. Robby Peibst
peibst@isfh.de

Fraunhofer ISE
Dr. Ralf Preu
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Oleksandr Astakhov
o.astakhov@fz-juelich.de

Dr. Kaining Ding
k.ding@fz-juelich.de

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

HZB
Prof. Dr. Rutger Schlatmann
rutger.schlatmann@helmholtz-berlin.de

ZAE
Dr. Hans-Joachim Egelhaaf
hans-joachim.egelhaaf@zae-bayern.de

ZSW
Dr. Stefan Paetel
stefan.paetel@zsw-bw.de
Dr. Wiltraud Wischmann
wiltraud.wischmann@zsw-bw.de

Einleitung

Die Kosten für die Herstellung von Solarmodulen sind in den letzten Jahrzehnten dramatisch gefallen, auf heute nur noch etwa 0,5 US\$/Wp, wie in *Abbildung 1* dargestellt. Diese sogenannte Lernkurve wurde zum einen ermöglicht durch gesteigerte Wirkungsgrade der Solarzellen von etwa 10% auf heute etwa 20%. Vor allem sind die Modulpreise aber gefallen durch die Entwicklung immer effizienterer Produktionsverfahren, welche den Durchsatz auf einige tausend Solarzellen pro Anlage und pro Stunde erhöht und zudem den Materialverbrauch drastisch reduziert haben, sodass die Herstellkosten um Größenordnungen gesenkt werden konnten.

Diese massiv gesunkenen Modulpreise haben dazu geführt, dass die Einspeisevergütung für Solarstrom in Deutschland auf etwa 12 €cent/KWh gesenkt werden konnte und dass in Auktionsverfahren für neue PV-Solkraftwerke Strompreise von nur noch 2,9 UScent/KWh geboten werden (Chile, 2016).

Durch die massiv gefallenen Stromerzeugungskosten ist Photovoltaik inzwischen zu einer weltweit gefragten Energiequelle geworden und das jährliche Produktionsvolumen neuer Solarmodule beträgt inzwischen 60 GWp. Verschiedene Studien [1] gehen davon aus, dass das Produktionsvolumen bis 2030 auf 200 GWp bis 800 GWp anwachsen wird und dadurch bis 2050 etwa 10% bis 30% der weltweiten Primärenergie durch Solarstrom gedeckt werden. Etwa 90% der aktuell weltweit produzierten Solarzellen verwenden dabei Silizium Wafer, die durch verschiedene Herstellschritte zu Solarzellen und Solarmodulen weiterverarbeitet werden.

Mit den produktionsnahen Forschungsaktivitäten der FVEE-Institute zu solchen Silizium-Solarzellen beschäftigt sich der folgende Abschnitt I. Die FVEE-Arbeiten zu Dünnschicht-Solarzellen aus dem Verbindungshalbleiter Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) werden in Abschnitt II dargestellt und die FVEE-Arbeiten zu organischen Dünnschicht-Solarzellen werden in Abschnitt III behandelt.

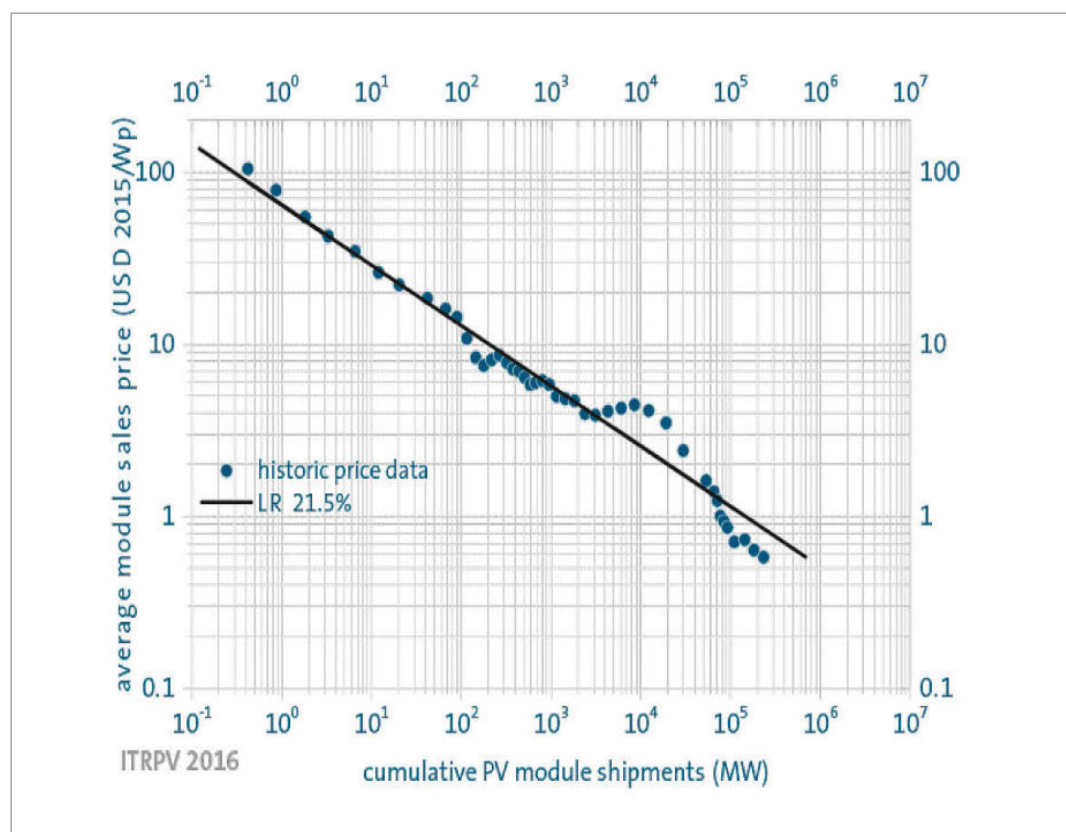


Abbildung 1
Lernkurve
für durchschnittliche
Modulverkaufspreise
[1]

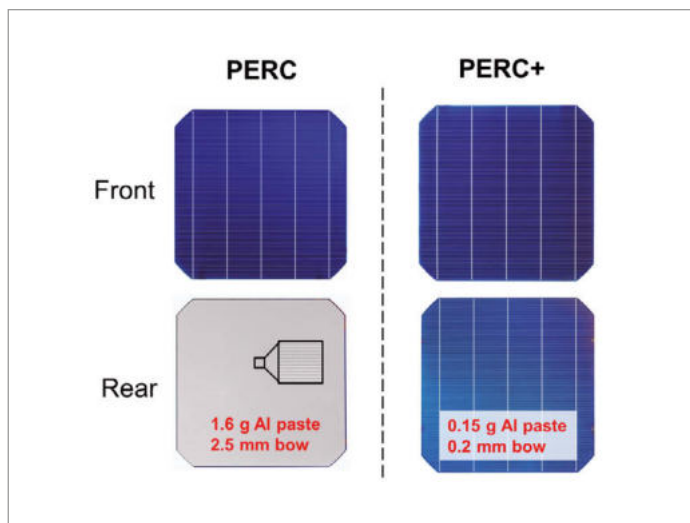


Abbildung 2

Bifaziale PERC+ Solarzellen [2] hergestellt mit einem industrietypischen PERC-Prozess aber mit einem Al Finger Grid anstelle eines ganzflächigen Al-Kontaktes. Die zusätzliche Lichtsammlung von der Rückseite liefert bis zu 10 % mehr Stromertrag für typische Freiflächenanlagen.

I. Solarzellen aus kristallinem Silizium

Aktuell werden die meisten Silizium-Solarzellen noch immer mit einem ganzflächig kontaktierenden Aluminium-Rückkontakt produziert, wodurch jedoch der Wirkungsgrad auf etwa 20 % limitiert ist.

Eine Weiterentwicklung sind die „Passivated Emitter and Rear Cell“ (PERC)-Solarzellen, bei denen beide Waferoberflächen mit einer dielektrischen Schicht passiviert werden. Dadurch werden bereits jetzt Wirkungsgrade bis 22,1 % mit industriellen PERC-Zellen erzielt. Entsprechend groß ist das Interesse vieler Zellhersteller, PERC-Zellen in die Produktion zu überführen. Das Fraunhofer ISE und das ISFH haben in den vergangenen Jahren den industriellen PERC-Prozess vorentwickelt und in ihren jeweiligen Technikums-Einrichtungen hochwertige industrielle PERC-Referenzprozesse etabliert. Damit unterstützen sie deutsche Zellhersteller wie SolarWorld sowie die deutschen Maschinenbauer und Materialhersteller dabei, neue, bessere Herstellverfahren für industrielle PERC-Zellen zu entwickeln. Laut ITRPV-Roadmap werden in 5 Jahren ca. 40 % aller Silizium-Solarzellen die PERC-Technologie verwenden.

Eine Weiterentwicklung der PERC-Technologie sind bifaziale PERC+ Solarzellen [2], die statt der ganzflächigen Aluminium-Metallisierung ein Aluminium-Finger-Grid auf der Rückseite verwenden, wie in *Abbildung 2* dargestellt. Dadurch kann auf die Rückseite des Solarmoduls fallendes Streulicht ebenfalls von der Solarzelle absorbiert und in elektrische Energie umgewandelt werden. Unter typischen Installationsbedingungen können somit etwa 5 % bis 10 % mehr elektrische Energie erzeugt werden als mit konventionellen monofazialen Modulen [2]. Die PERC+ Solarzelle wurde am ISFH entwickelt und wird von SolarWorld in der Pilotproduktion erprobt.

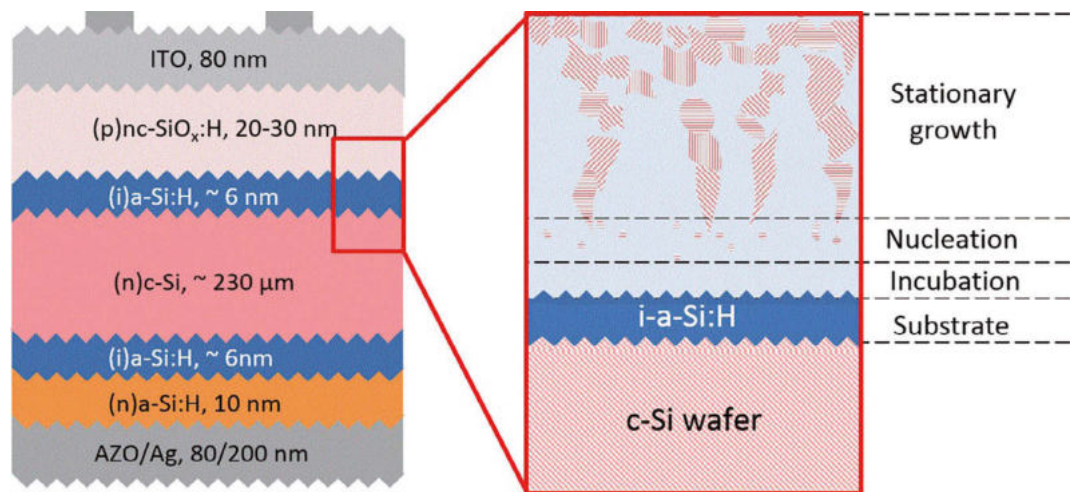
Am Fraunhofer ISE wird im Verbundprojekt „KoKobi“ an sehr ähnlichen Konzepten gearbeitet, die den Wirkungsgrad der Zell-Rückseite weiter erhöhen sollen und somit potenziell zu noch höheren Mehrerträgen führen können.

Neben den PERC-Solarzellen sind zudem die sogenannten Heterojunction-Solarzellen ein vielversprechender Kandidat für die Massenproduktion von Silizium-Solarzellen mit sehr hohen Wirkungsgraden. Bei den Heterojunction-Solarzellen wird der ladungstrennende pn-Übergang durch dotierte nanometerdünne Schichten aus amorphem Silizium (a-Si) erzeugt, welches durch Plasmaabscheidung auf beide Waferseiten aufgebracht wird. Die Metallkontakte werden dabei auf transparente, leitfähige Oxid-Schichten aufgebracht, wodurch insgesamt eine exzellente Passivierung der Waferoberflächen erreicht wird (*siehe Abbildung 3*). Dieses Technologiekonzept ermöglicht extrem hohe Wirkungsgrade und erzielte vor kurzem einen neuen Weltrekord-Wirkungsgrad für Silizium-Solarzellen von 26,3 %.

Das FZ Jülich und das HZB arbeiten daran, die Optik von Heterojunction-Solarzellen weiter zu verbessern. Das typischerweise verwendete a-Si absorbiert UV-Licht sehr stark, welches dann aber nicht zur Ladungsträgertrennung beiträgt. Hier ist das nanokristalline (nc) SiO_x ein spannender Kandidat, welches eine höhere Bandlücke aufweist als a-Si und somit optisch transparenter ist bei weiterhin sehr guten elektrischen Eigenschaften. Mit diesem Verfahren konnten sowohl am FZ Jülich als auch am HZB sehr hohe Kurzschlussströme mit Heterojunction-Solarzellen erzielt werden, wodurch der optische Vorteil der nc SiO_x-Schichten demonstriert werden konnte.

Abbildung 3
Heterojunction-Solarzelle
(schematischer Aufbau des Querschnitts)

Auf der Vorderseite wird dabei das a-Si durch eine nanokristalline (nc) SiO_x-Schicht ersetzt, welche optisch transparenter ist und somit die Absorption des Lichtes im Wafer erhöht.



Eine andere Entwicklungsrichtung von Heterojunction-Solarzellen sind die sogenannten POLO (= Poly-Si on Oxide)-Zellen, bei denen statt des a-Si ein Schichtstapel aus SiO₂ und dotiertem polykristallinem Silizium verwendet wird. Dieser Aufbau hat unter anderem den Vorteil, dass diese Schichten hochtemperaturstabil sind und somit die industrietytische Siebdruckmetallisierung verwendet werden kann.

Das ISFH, in Kooperation mit dem MBE, Centrotherm und Meyer Burger, verfolgt im BMWi-geförderten Projekt POLO eine beidseitig kontaktierte Zellstruktur mit POLO-Kontakten für beide Polaritäten, um Rekombinationsverluste so weit wie möglich zu minimieren und erzielt damit bislang Wirkungsgrade bis 21,4%.

FZ Jülich arbeitet an einem ähnlichen Konzept bestehend aus SiO₂ und dotiertem mikrokristallinem Siliziumkarbide ($\mu\text{-SiC:H}$) zur Realisierung einer transparenten Variante des Kontaktes.

II. Chalkopyrit-basierte Solarzellen

Die Produktionskapazität für Dünnschicht-PV-Module auf Basis von CIGS hat bereits 1 GW überschritten und es gibt Ankündigungen für weitere Modulfabriken. Aktuell geht man von Produktionskosten von 0,4 US\$/Wp für eine 150-MW-Fabrik aus. Durch weitere Verbesserungen des Modulwirkungsgrads und Ausnutzung von Skaleneffekten einer Multi-GW-Fabrik wird eine weitere Reduktion um 25–40% erwartet, siehe <http://www.cigs-pv.net>.

Eine Aufgabe der Forschungsinstitute ZSW und HZB besteht darin, vielversprechende Prozesse, die in Laboranlagen erforscht wurden, auf Anlagen zu

übertragen, die mit produktionsrelevanten Techniken, wie z.B. Inline-Prozessen, den komplexen Schichtstapel von nur wenigen μm Dicke herstellen. Durch diesen Zwischenschritt wird das Risiko des Technologietransfers für die Industriepartner reduziert.

Ein Beispiel ist die Entwicklung eines schnelleren Depositionsprozesses für eine Pufferschicht aus Zn(O,S), einer Cd-freien Alternative zum etablierten CdS. Durch eine Änderung des chemischen Ausgangsstoffs wurde am ZSW die Freigabe von Schwefel beschleunigt, und die Kontrolle der nasschemischen Reaktionsgeschwindigkeit erfolgte dann durch eine gezielte Variation der Liganden, die das Zink umgeben. Neben der Reduktion der Abscheidezeit konnte auch eine erhebliche Reduktion des Materialverbrauchs erreicht werden [3].

Alternativ dazu entwickelt das HZB die Abscheidung der Zn(O,S)-Pufferschicht durch die Abscheidung aus der Gasphase mittels Atomlagenabscheidung oder Sputtern. Damit konnten ebenfalls sehr gute Wirkungsgrade erzielt werden, die vergleichbar oder besser waren als die bisherige CdS-Schicht.

Neben den dominierenden Modulen mit Glassubstraten werden für flexible, leichte Module auf unterschiedlichen Substraten wie Polymerfolie oder Stahlsubstraten Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsprozesse und -techniken entwickelt, u. a. hinsichtlich Verschaltung und Verkapselung. Auf emailliertem Stahl konnten am ZSW bereits 15,4% Wirkungsgrad für ca. 50 cm² große Module erzielt werden.

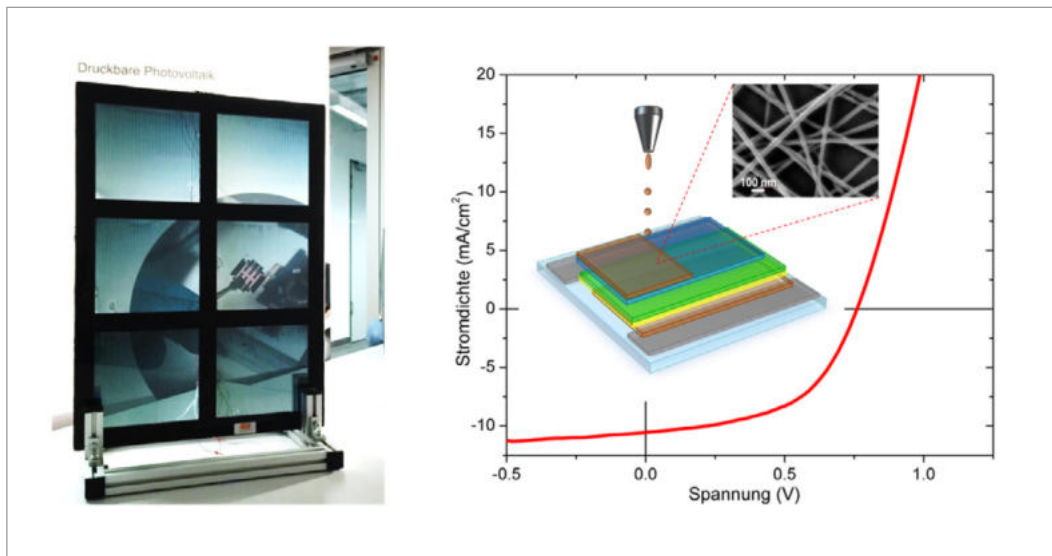


Abbildung 4

Organische Solarmodule

Links: Integrierte, semitransparente organische Module in Doppelverglasung

Rechts: Kennlinie einer vollständig Tintenstrahlgedruckten Solarzelle

III. Organische Solarmodule

Organische Solarmodule können mit verschiedenen Druckverfahren auf vielfältige Substrate aufgebracht werden und bieten so ein breites Spektrum an Anwendungsfeldern. Für die Herstellung werden kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Prozesse verwendet. Durch die Kombination von Schlitzdüsenbeschichtung und Laserstrukturierung können hocheffiziente Solarmodule mit geometrischen Füllfaktoren (Verhältnis von aktiver Fläche zu gesamter Modulfläche) von über 98% realisiert werden. Weiterhin erlaubt die Verwendung von Tintenstrahlverfahren Module in der größtmöglichen Designfreiheit hinsichtlich Form und Farbe zu gestalten. Die Verwendung von Elektrodenmaterial aus Silbernanodrähten, welche über eine hohe Transmission des sichtbaren Lichts von >90% bei gleichzeitigem geringen Schichtwiderstand von < 15 /sq verfügen, ermöglicht die Herstellung von semitransparenten Modulen [4]. Dieses eröffnet einzigartige Einsatzmöglichkeiten wie z. B. Fensterapplikationen. Darüber hinaus ist es möglich, über die einstellbare Bandlücke der organischen Halbleiter Module in unterschiedlichsten Farben zu realisieren. Das direkte Abscheiden der Module auf Glassubstraten ermöglicht eine einfache Integration der Module in Fassadenelemente. Dies gilt sowohl für das Kombinationsverfahren aus großflächiger Beschichtung und Laserstrukturierung als auch für das Tintenstrahlverfahren.

Referenzen

- [1] International Roadmap for Photovoltaics (ITRPV), März 2016, (<http://www.itrpv.net/>)
- [2] T. Dullweber, C. Kranz, R. Peibst, U. Baumann, H. Hannebauer, A. Fülle, S. Steckemetz, T. Weber, M. Kutzer, M. Müller, G. Fischer, P. Palinginis, and H. Neuhaus, Prog. Photovolt: Res. Appl., 24, 1487–1498 (2016).
- [3] D. Hariskos, P. Jackson, W. Hempel, S. Paetel, S. Spiering, R. Menner, W. Wischmann, and M. Powalla, IEEE Journal of Photovoltaics, (2016), DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2589361
- [4] L. Lucera, F. Machui, P. Kubis, H. D. Schmidt, J. Adams, S. Strohm, T. Ahmad, K. Forberich, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, Energy Environ. Sci. 2016, 9, 89.