

Forschung und Entwicklung für die Photovoltaik zwischen Evolution und Revolution



ISFH

Prof. Dr. Jan Schmidt
j.schmidt@isfh.de

Prof. Dr. Rolf Brendel
rolf.brendel@isfh.de

Fraunhofer ISE

Dr. Andreas Bett
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

ZAE Bayern

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov
vladimir.dyakonov@zae-bayern.de

Prof. Dr. Christoph Brabec
christoph.brabec@zae-bayern.de

HZB

Dr. Reiner Klenk
klenk@helmholtz-berlin.de

Dr. Bernd Stannowski
bernd.stannowski@helmholtz-berlin.de

Dr. Daniel Amkreutz
daniel.amkreutz@helmholtz-berlin.de

FZ Jülich

Prof. Dr. Uwe Rau
u.rau@fz-juelich.de

Prof. Dr. Thomas Kirchartz
t.kirchartz@fz-juelich.de

ZSW

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

Dr. Erik Ahlswede
erik.ahlswede@zsw-bw.de

In Deutschland hat PV-Strom bereits seit einigen Jahren Netzparität erreicht und hat sich zu einer wesentlichen Säule der Transformation unseres Energiemixes hin zu einem auf erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem entwickelt.

Derzeit betragen die Kosten für Strom aus neu installierten kleinen PV-Dachanlagen in Deutschland ca. 13 €/ct/kWh; für große Freiflächenanlagen liegen die Kosten sogar bei nur 9 €/ct/kWh. In Sicht sind nun die Stromgestehungskosten konventioneller Energieformen.

Um dieses wichtige Ziel zu erreichen, ist eine weitere deutliche Kostensenkung erforderlich. Diese lässt sich insbesondere realisieren über

- Steigerung der Wirkungsgrade
- Reduzierung des Materialeinsatzes
- hochproduktive Herstellungstechnologien.

In diesem Beitrag stellen wir exemplarisch einige ausgewählte aktuelle Forschungsergebnisse aus Mitgliedsinstituten des FVEE mit dem Ziel einer weiteren signifikanten Kostenreduktion der PV-Stromgestehungskosten vor.

Die Institute des FVEE decken dabei die gesamte Breite der PV-Forschung ab. An den Instituten werden neuartige Konzepte für die Solarzellen von morgen entwickelt sowie die prinzipielle Machbarkeit dieser Konzepte anhand von Laborsolarzellen mit Rekordwirkungsgraden demonstriert. In einem nächsten Schritt erfolgt dann der Transfer der meistversprechenden neuen Konzepte in die industrielle Fertigung in den Technologiezentren der FVEE-Institute. Diese Entwicklungen erfolgen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, wobei sowohl Maschinenbauer, Materialhersteller wie auch Solarzellen- und Modulproduzenten zu den Kooperationspartnern der FVEE-Institute gehören. Ein zentraler Punkt ist dabei die möglichst zeitnahe Überführung von Laborentwicklungen in die Produktion.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Ergebnisse beispielhaft vorgestellt.

Silizium-Wafer-basierte Photovoltaik

Die Silizium-Wafer-basierte Photovoltaik hat einen dominanten Marktanteil von ca. 90%. Die vorherrschende Solarzellentechnologie setzt dabei auf mittels Siebdruck hergestellte Metallkontakte auf der

Vorder- sowie der Rückseite der Solarzelle sowie auf Bor-dotierte multi- oder monokristalline Silizium-Wafer als Grundmaterial. Auf der Zellvorderseite wird im industriellen Standardprozess in einem Ofenprozess Phosphor eindiffundiert zur Ausbildung des ladungsträgersammelnden Emitters. Auf der Zellrückseite bildet sich während des Feuerschritts ein sogenanntes „Back Surface Field“ (BSF) aus durch Reaktion des Siliziums mit dem Aluminium aus der ganzflächig aufgedruckten Metallpaste.

Ein dominanter Verlustmechanismus in Solarzellen ist die Ladungsträgerrekombination an den Oberflächen. Bei der Standard-Industrie-Solarzelle (im Folgenden auch „BSF-Solarzelle“ genannt) wird die Oberflächenrekombination auf der Zellvorderseite durch das Aufbringen einer dielektrischen Schicht aus Siliziumnitrid (SiN_x) vermindert. Die in einem Plasmaprozess abgeschiedene SiN_x -Passivierschicht auf dem Emitter der Zellvorderseite dient dabei auch als Antireflexschicht. Die Rückseite der Solarzelle wird durch das sich im Kontakt mit dem Aluminium ausbildende BSF ebenfalls in gewissem Maße passiviert. Typische Wirkungsgrade, die in der heutigen Solarzellenproduktion mit diesem Standard-BSF-Prozess erreicht werden, liegen im Bereich von 17–18% für Solarzellen auf multikristallinem Silizium und bei ca. 19% für monokristalline Si-Solarzellen.

Am ISFH sowie am Fraunhofer ISE wurden in den letzten Jahren viele neue Prozesse entwickelt mit dem Ziel, den Wirkungsgrad der industriellen Standard-solarzelle zu erhöhen ohne die Prozesskomplexität zu vergrößern.

Ein Ergebnis des ISFH auf diesem evolutionären Weg ist in **Abbildung 1** zu sehen.

Bei dieser PERC-Solarzelle handelt es sich um eine vollständig mittels Siebdrucktechnologie hergestellte Solarzelle, die einen unabhängig bestätigten Wirkungsgrad von 21,2% aufweist. Dies ist der höchste Wirkungsgrad, der bislang für eine derartige Solarzelle, die auf industrietypischen Anlagen prozessiert wurde, erreicht wurde. Einige wesentliche Innovationen des ISFH, die zu diesem Ergebnis führten, beinhalten:

- Ersetzen des konventionellen BSF durch eine dielektrische Rückseitenpassivierung bestehend aus der Schichtfolge $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ [1]
- lokales Öffnen der $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ -Schicht durch Laserablation
- optimiertes Vorderseitengitter [2].

Neben diesen evolutionären Entwicklungen, die ganz auf die zeitnahe Überführung von Innovationen der Institute in die industrielle Produktion ausgerichtet sind, gibt es auch zahlreiche Projekte, in denen revolutionäre neue Prozesse und Materialien erforscht werden. Zielsetzung ist hier das Erreichen höchster Wirkungsgrade (>24 %) mit einfachen Mitteln.

Ein sehr vielversprechender Ansatz sind z. B. neuartige ladungsträgerselektive und gleichzeitig exzellent passivierende Schichten. Sehr gute Ergebnisse wurden hier z. B. mit polykristallinen Si-Schichten erzielt. Durch Implementierung einer solchen poly-Si Schicht auf der Rückseite einer hocheffizienten Si-Solarzelle wurden am Fraunhofer ISE bereits Wirkungsgrade von 24,4 % für kleinflächige Laborsolarzellen erzielt [3].

Ein weiterer Forschungstrend ist die Kombination der etablierten Silizium-basierten PV mit Elementen der noch jungen organischen PV. Basierend auf diesem Konzept wurde am ISFH eine Solarzelle mit Polymer/Silizium-Heteroübergang entwickelt, die trotz sehr einfacher Prozessierung bereits einen Wirkungsgrad von 20,6 % aufweist [4]. Simulationsrechnungen zeigen, dass diese neuartige Generation von Solarzellen das Potenzial für sehr hohe Wirkungsgrade (>25 %) bei niedrigen Prozesskosten besitzt.

Die Überführung der skizzierten Technologien für sehr hohe Wirkungsgrade in die industrielle Produktion macht eine weitere deutliche Intensivierung der F&E-Anstrengungen im Bereich der kristallinen Si-Wafertechnologie zwingend erforderlich.

Silizium-Dünnschicht-basierte Photovoltaik

Zurzeit werden unterschiedliche Verfahren für extrem dünne (10–40 µm) kristalline Siliziumschichten entwickelt, wodurch die gegenüber der Si-Wafertechnologie benötigte Siliziummenge um ca. 90 % reduziert werden kann. Um trotz der geringen Dicke eine vergleichbare Stromausbeute zu erzielen, werden innovative Konzepte zum Lichteinfang eingesetzt, wie z. B. (periodisch) strukturierte Oberflächen und extrem lichtstreuende Reflektoren. Eine Herausforderung ist es, Siliziumschichten mit einer defektarmen Kristallstruktur und wenig Verunreinigungen zu erzielen. Für die Zell- und Modulfertigung müssen teilweise völlig neuartige, wenig komplexe und somit kostengünstige Zellkontaktierungs- und Verschaltungsprozesse entwickelt werden. Am HZB werden Solarzellen entwickelt, die aus 10–20 µm dicken kristallinen Siliziumschichten bestehen, die mittels eines linienförmigen Laser- oder Elektronenstrahls direkt auf dem Glassubstrat über die Flüssigphase kristallisiert werden.

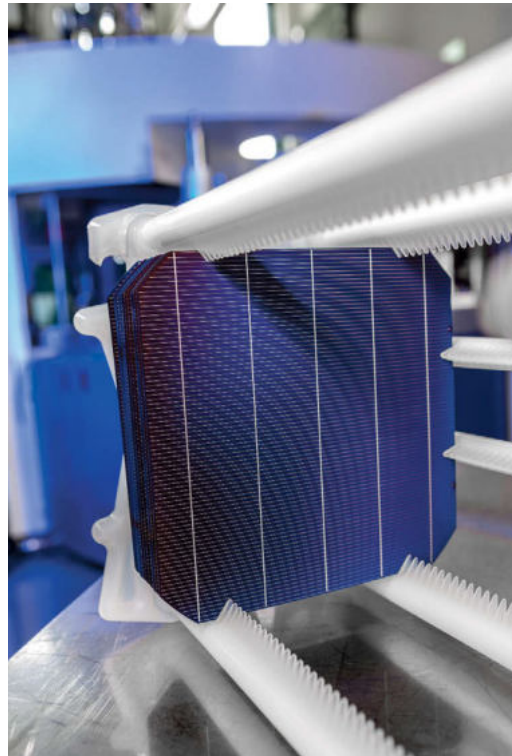


Abbildung 1
PERC-Solarzelle
(Passivated Emitter and Rear Cell) mit einem Rekordwirkungsgrad von 21,2 % für eine vollständig siebgedruckte Si-Solarzelle (15,6 x 15,6 cm²).
(Entwicklung des ISFH)

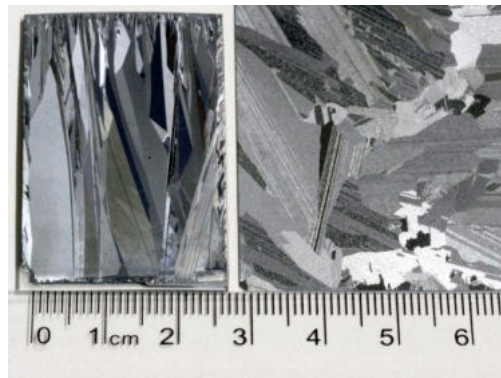


Abbildung 2
Dünnschicht-Silizium:
Flüssigphasen-kristallisiertes Silizium auf Glas (links) im Vergleich zu einem handelsüblichen multikristallinen Si-Wafers (rechts)
[aus Ref. 5].

Abbildung 2 zeigt eine solche Schicht im Vergleich zu einem herkömmlichen multikristallinen Siliziumwafer. Die Technik spart nicht nur Material und Energie, sie kann auch unmittelbar auf große Flächen skaliert werden. Die Entwicklung des Zell-Wirkungsgrades erlebte in den letzten Jahren einen starken Schub und liegt derzeit bei fast 12 %. Die hohe Materialqualität konnte dabei in Solarzellen durch das Erreichen sehr hoher Leerlaufspannungen von über 650 mV demonstriert werden, die damit im Bereich dessen liegen, was herkömmliche multikristalline Si-Wafer-Solarzellen liefern. Aufgrund dieser Ergebnisse [5] wird am HZB mittelfristig ein Wirkungsgrad von 18 % für realistisch erachtet.

Chalkopyrit-basierte Photovoltaik

Unter den Dünnschicht-Technologien zeigt das Materialsystem $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (Chalkopyrit oder kurz CIGS), das intensiv am ZSW und HZB erforscht wird, derzeit das höchste Wirkungsgradpotenzial. Die Arbeiten der Institute bringen neue Technologien und Materialien hervor, mit deren Einsatz die Industrie die Produktpalette erweitern kann. Beispiele sind Folien-substrate für flexible und leichte Bauelemente, unter anderem auch für die Anwendung im Weltraum. Die Entwicklung einer durchgehenden Laserstrukturierung ermöglicht auch auf diesen Substraten die monolithische Verschaltung; bei konventionellen Modulen auf Glas kann die nicht-aktive Fläche verkleinert und der Modulwirkungsgrad verbessert werden. Die Forschung an neuen Pufferschichten ermöglicht vollständig Cadmium-freie Produkte und öffnet Optionen für durchgehend trockene in-line Prozesse. Eine wichtige Rolle der Institute besteht darin, das Wirkungsgradpotenzial der Chalkopyrite mit Rekordzellen zu demonstrieren und die Übertragung der Fortschritte in die industrielle Fertigung zu begleiten. Ein neuer Ansatz ist hier die gezielte Beeinflussung der CIGS-Absorberoberfläche durch eine Behandlung mit Kaliumfluorid [6], die zu einem Wirkungsgrad von 20,8% führte. Die weitere Prozessoptimierung resultierte kürzlich am ZSW in einem neuen Weltrekordwirkungsgrad von 21,7%. Untersuchungen der Oberfläche mit Synchrotron-Strahlung tragen dazu bei, den Mechanismus der Kalium-induzierten Oberflächenpassivierung besser zu verstehen [7].

In der Vorlaufforschung für die nächsten Generationen der Chalkopyrit-Dünnschichttechnologie wird an weiter verbesserter Passivierung, an Punktkontakten und Hybrid-Strukturen gearbeitet. Bessere Passivierung soll zusammen mit neuen Konzepten zur Licht-einkopplung auch den Materialeinsatz weiter verringern. Zu nennen sind hier Rückkontakte mit geringer Rekombinationsgeschwindigkeit und hoher Reflektivität, Ansätze für Mikro-Konzentration sowie Fensterschichten mit verringerten Absorptionsverlusten. Lokale Abscheidung (z. B. Drucken) und Nano-Strukturierung sind wichtige Bausteine auf dem Weg zu diesen zukünftigen Zellstrukturen.

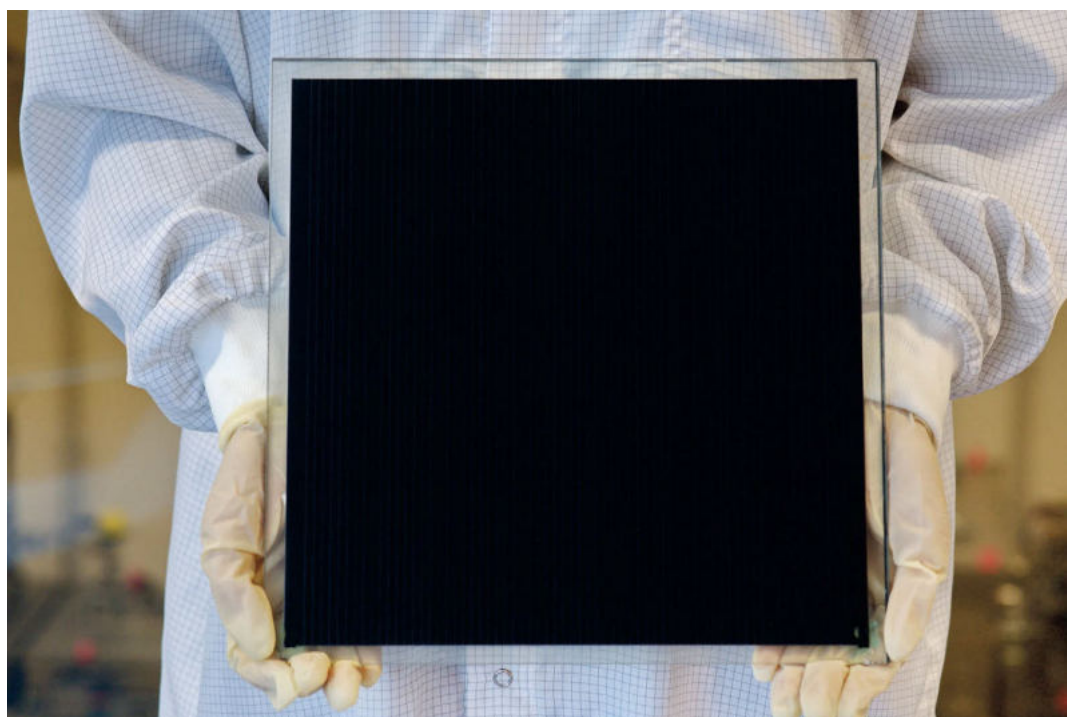
Konzentrierende Photovoltaik

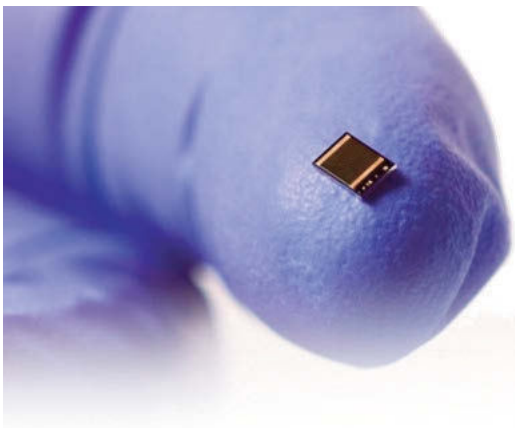
Bei der konzentrierenden Photovoltaik wird das Sonnenlicht zunächst mit einem kostengünstigen optischen Konzentrator gebündelt und erst dann auf eine sehr kleine, nur einige Quadratmillimeter große Zelle gelenkt (*Abbildung 4*). Der große Vorteil bei diesem Ansatz, der bereits heute niedrige Stromerzeugungskosten von $< 8 \text{ €cent/kWh}$ an Standorten mit hoher direkter Sonneneinstrahlung erzielt, liegt darin, dass nur ein 500stel – 1000stel der normal benötigten Halbleiterfläche als Photovoltaikzelle benötigt wird. Das erlaubt nun, auch teurere Halbleitermaterialien, die aber hohe Wirkungsgrade ermöglichen, einzusetzen.

Abbildung 3

Chalkopyrit-basierte Photovoltaik:

Im Technikumsmaßstab am ZSW hergestellte Module ($30 \times 30 \text{ cm}^2$) erreichen Wirkungsgrade oberhalb von 15%.





Organische Photovoltaik

Die Organische Photovoltaik (OPV) zählt zu den neuen innovativen Dünnschicht-Technologien in der Photovoltaik-Branche mit vielversprechenden Perspektiven gerade hinsichtlich kostengünstiger Herstellung. Auf dem OPV-Gebiet haben sich vor allem die so genannten Bulk-Heterojunction-Solarzellen auf Basis von konjugierten Polymeren und Fullerenen, welche auf nasschemischen Verfahren beruhen, bzw. die Zellen mit vakuumprozessierten kleinen Molekülen etabliert und den Sprung zu hohen Wirkungsgraden geschafft. Organische Solarzellen erreichen gegenwärtig zertifizierte Wirkungsgrade von über 10 % auf Laborskala. Es ist daher der richtige Zeitpunkt, als nächsten wichtigen Schritt hin zur Markteinführung der OPV, über weitere, bisher wenig beachtete Aspekte dieser PV-Technologie nachzudenken. Im Rahmen eines Großprojekts „Solarfabrik der Zukunft“ arbeitet das ZAE Bayern derzeit intensiv daran, Solarzellen mittels großflächiger Druckverfahren zu entwickeln. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung der Umweltverträglichkeit.

Bei der hochkonzentrierenden Photovoltaik (HCPV) werden sogenannte III-V Verbindungshalbleiter eingesetzt; Vertreter dieser Halbleiterklasse sind z. B. Galliumarsenid (GaAs), Galliumindiumphosphid (GaInP), Indiumphosphid (InP) und Indiumgalliumarsenidphosphid (InGaAsP). Die unterschiedlichen Halbleitermaterialien werden übereinander gestapelt und bilden somit Mehrfach-Solarzellen. Dieser Ansatz erlaubt, das Sonnenlicht weit effizienter zu nutzen. Die am Fraunhofer ISE entwickelten Dreifach-Solarzellen wurden bereits zum Industriepartner AZUR Solar transferiert und werden heute mit Wirkungsgraden von 42 % gefertigt.

In einer neueren Entwicklung hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem HZB und den französischen Partnern Soitec Solar und CEA-Leti nun erste Vierfach-Solarzellen entwickelt.

Hierbei werden zwei unterschiedliche Tandemsolarzellen mittels metallorganischer Gasphasen-Epitaxie hergestellt und dann über ein Wafer-Bonding-Verfahren zusammengefügt. In 2013 konnte damit ein neuer Weltrekord von 44,7% erzielt werden [8]. Durch weitere Verbesserungen konnte in 2014 der Wirkungsgrad bereits auf 46,7% gesteigert werden [9]. In **Abbildung 5** sind die Struktur der Vierfach-Solarzelle (a) und die Kennlinie (b) zu sehen.

Erste Vierfach-Solarzellen wurden bereits in einem vom Fraunhofer ISE entwickelten FLATCON Modul eingesetzt. Es konnte so ein Weltrekordwirkungsgrad für PV-Module von 36,7% (bei CSTC: concentrator standard testing conditions, 1000 W/m², 25 °C Zelltemperatur) erzielt werden [10]. Die aktuellen Arbeiten zielen nun auf weitergehende Material- und Strukturverbesserungen, damit letztlich ein Solarzellenwirkungsgrad von 50% erreicht wird.

Abbildung 4
Konzentratorsolarzelle

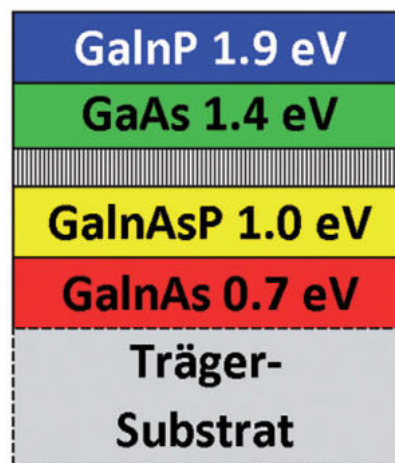
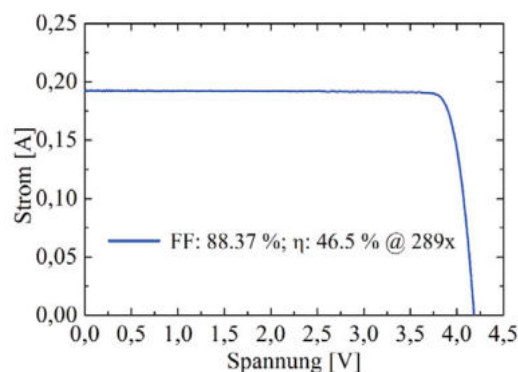
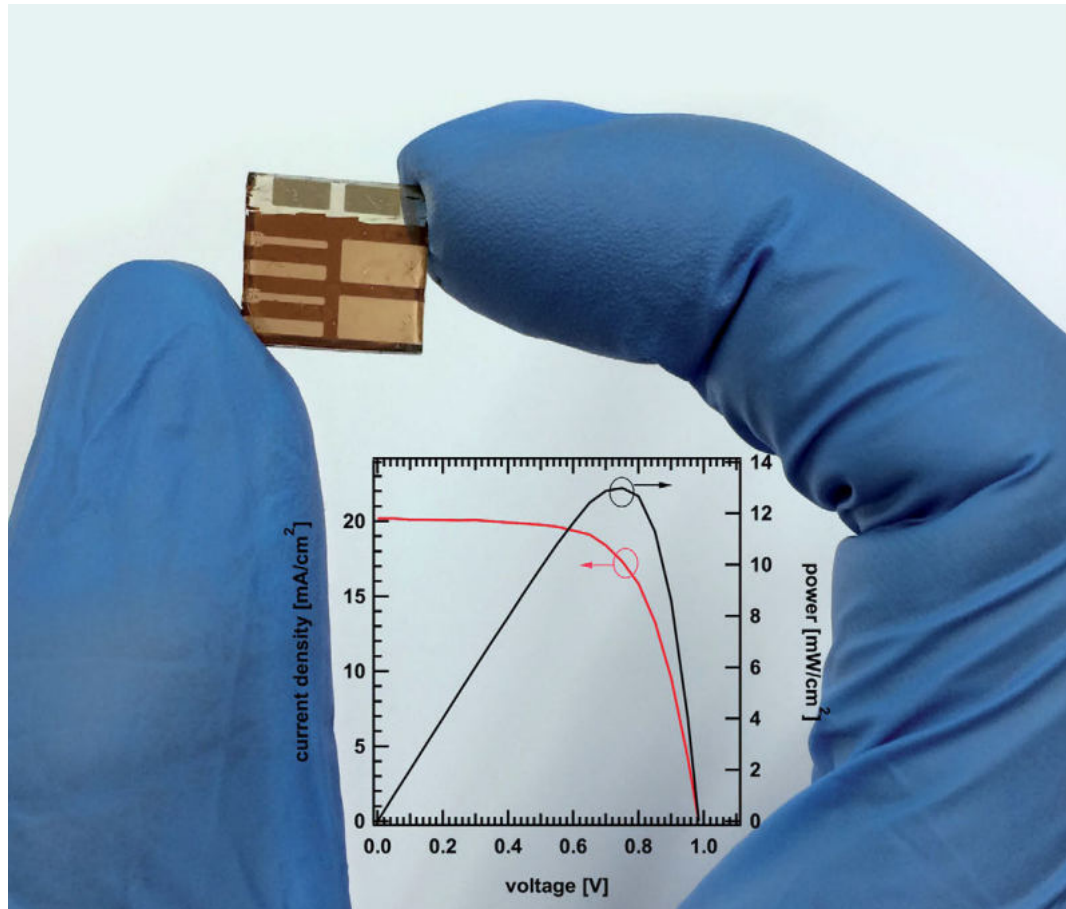


Abbildung 5
a) Schemazeichnung einer Vierfach-Solarzelle:
Es wurden zwei Tandemsolarzellen mittels Wafer-Bonding zusammengefügt.



b) Strom-Spannungskennlinie der besten Vierfach-Solarzelle mit einem Weltrekord-Wirkungsgrad von 46,5 %.

Abbildung 6
Perowskit-Solarzelle
 mit einem Wirkungs-
 grad von 13 %
 (Entwicklung des ZAE
 Bayern)



Gerade bei flüssigprozessierbaren organischen Solarzellen muss der Fokus auf umweltfreundlichen Lösemitteln liegen, da bisher fast alle Polymer-Fulleren Rekord-Solarzellen aus den problematischen halogenierten Lösungsmitteln hergestellt werden.

Zur allerneuesten Technologieentwicklung im Bereich der Dünnschicht-Photovoltaik gehören die Perowskit-Solarzellen (PSZ). In nur wenigen Jahren konnten die Wirkungsgrade dieser PV-Technologie von 3,8% auf über 17% im Labor gesteigert werden und nähern sich damit den herkömmlichen Dünnschicht-Systemen.

Ein großer Vorteil dieser noch sehr jungen Technologie besteht darin, dass PSZ ähnlich den organischen Solarzellen mittels großtechnischer Anlagen aus der Flüssigphase aufgebracht werden können. „Perowskit“ bezeichnet eine bestimmte Kristallstruktur mit der Strukturformel ABX_3 , die in einer Vielzahl verschiedener Zusammensetzungen in der Natur existiert. Perowskite mit PV-Eigenschaften sind aus

organischen und anorganischen Komponenten (Kationen und Anionen) aufgebaut. Die am ZAE Bayern in Kooperation mit der Uni Würzburg entwickelte PV-Analytik erlaubt es, das Potenzial von PSZ anhand von Messungen der sogenannten Strahlungseffizienz zu untersuchen [11]. Diese Untersuchungen liefern eine Grundlage für die gezielte Optimierungen der Perowskit-Absorber. Die Grundlagen der PSZ und deren Funktionsweise sind allerdings nur teilweise bekannt und bergen noch viele ungeklärte Fragen, deren Beantwortung für eine nachhaltige und kosteneffiziente Technologieentwicklung essentiell ist.

Zusammenfassung

Der Preis von Photovoltaik-Systemen ist in den letzten 7 Jahren um über 70 % gesunken, so dass aktuelle Stromgestehungskosten der Photovoltaik in Deutschland im Bereich von nur noch 9 €/ct/kWh (Freiflächenanlage) bis 13 €/ct/kWh (Dachanlage) liegen.

Eine weitere drastische Kostenreduktion ist durch intensive F&E-Anstrengungen erreichbar, so dass die PV in absehbarer Zeit auch in Deutschland mit fossilen Energieträgern konkurrieren kann und schließlich sogar die kostengünstigste Energieform werden wird.

Eine wichtige Aufgabe der FVEE-Institute ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung neuer Konzepte und Materialsysteme sowie die Demonstration von Prototypen mit hohen Wirkungsgraden. Die zweite entscheidende Aufgabe besteht darin, die Innovationen in die industrielle Produktion zu transferieren. Hier leisten insbesondere die in den letzten Jahren entstandenen Technologiezentren der FVEE-Institute wichtige Beiträge. Die in diesem Artikel vorgestellten neuesten Entwicklungen zeigen, dass die FVEE-Institute im Bereich der Photovoltaik-F&E zur Weltspitze gehören, sowohl bei der Entwicklung neuer Konzepte mit Rekordwirkungsgraden als auch im Bereich der industrienahen PV-Entwicklung.

Literatur

- [1] J. Schmidt, B. Veith, and R. Brendel, Effective surface passivation of crystalline silicon using ultrathin Al_2O_3 films and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ stacks, *Phys. Status Solidi RRL* 3, 287-289 (2009).
- [2] H. Hannebauer, T. Dullweber, U. Baumann, T. Falcon, and R. Brendel, 21.2 %-efficient fineline-printed PERC solar cell with 5 busbar front grid, *Phys. Status Solidi RRL* 8, 675-679 (2014).
- [3] F. Feldmann, M. Bivour, H. Steinkemper, M. Hermle, and S. W. Glunz, Tunnel oxide passivated contacts as an alternative to partial rear contacts, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131, 46-50 (2014).
- [4] J. Schmidt, D. Zielke, W. Lövenich, and A. Elschner, Organic-silicon heterojunctions: a promising new concept for high-efficiency solar cells, *Tech. Digest of the 6th World Conf. Photovolt. Solar Energy Conv., Kyoto, Japan* (2014), p. 869.
- [5] J. Haschke, D. Amkreutz, L. Korte, F. Ruske, and B. Rech, Towards wafer quality crystalline silicon thin-film solar cells on Glass, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 128, 190-197 (2014).

[6] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, W. Wischmann, and M. Powalla, Compositional investigation of potassium doped $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells with efficiencies up to 20.8 %, *Phys. Status Solidi RRL* 8, 219-222 (2014).

[7] P. Pistor, D. Greiner, C.A. Kaufmann, S. Brunken, M. Gorgoi, A. Steigert, W. Calvet, I. Laueremann, R. Klenk, T. Unold, and M.-C. Lux-Steiner, Experimental indication for band gap widening of chalkopyrite solar cell absorbers after potassium fluoride treatment, *Appl. Phys. Lett.* 105, 063901 (2014).

[8] F. Dimroth et al., Wafer bonded four-junction $\text{GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs}$ concentrator solar cells with 44.7% efficiency, *Progress in Photovoltaics* 22, 277-282 (2014).

[9] T. Tibbits et al., New efficiency frontiers with wafer-bonded multi-junction solar cells, *Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Amsterdam, Netherlands* (2014), in press.

[10] M. Steiner et al., FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells, *Progress in Photovoltaics* (2014), in press.

[11] K. Tvingstedt et al., Radiative efficiency of lead iodide based perovskite solar cells, *Sci. Rep.* 4, 6071 (2014).