et ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN

ZEITSCHRIFT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT · RECHT · TECHNIK UND UMWELT Artikel-Pdf (18012) · Heft 4 | 19 · S. 24-26

Die nächste Solarzellen-Generation wird so günstig wie Fensterglas: Gedruckte „in-situ“-Photovoltaik ist lokal und nachhaltig produzierbar

Lukas Wagner, Simone Mastroianni und Andreas Hinsch

Die Photovoltaikindustrie entwickelt sich derzeit zum globalen Player im Energiesektor. Damit rückt auch zunehmend die Frage nach Ressourcenverbrauch und CO_2-Ausstoß bei der Solarzellenproduktion in den Fokus. Der „in-situ“-Ansatz für Perowskitsolarzellen ist ein neues Herstellungsverfahren für Solarzellen, welcher auf etablierten Druck- und thermischen Prozessen aus der glasverarbeitenden Industrie basiert. Durch Minimierung des Material- und Energieeinsatzes können so Kosten und Treibhausgasemissionen auf die der Glasversiegelung reduziert werden. Mit Perowskit-Materialien lassen sich dabei schon heute hohe Wirkungsgrade erzielen, welche mit der bestehenden Infrastruktur der deutschen Glasindustrie hochskaliert werden könnten.

Auf die erneuerbaren Energien entfallen derzeit zwei Drittel des globalen Investitionskapitals des Elektrizitätserzeugungssektors. Neben Windenergie ist Photovoltaik (PV) die zentrale Schlüsseltechnologie für eine CO_2-arme Stromversorgung der Zukunft. Trotz des starken Wachstums – 2018 hat die globale PV-Produktion die 100 GWp/a Marke überschritten – stellt die Solarenergie bis heute weniger als 2 % des weltweiten Strommix. Damit die Pariser Klimaziele erreicht werden, muss dieser Wert bis 2050 in Richtung 40 % ausgebaut werden [1]. Gemessen an der rasanten Entwicklung der PV-Industrie über die letzten beiden Jahrzehnte ist es realistisch, dass die notwendigen Produktionskapazitäten im Terrawatt-Bereich innerhalb der nächsten zehn Jahre erreicht werden könnten [2].

Mittlerweile werden fast alle Solarmodule in Ostasien hergestellt, jeweils nur 3-4 % in Europa und den USA [3]. Nachdem die Wirtschaftlichkeit von PV gezeigt wurde, müssen sich Politik, Wirtschaft und Wissenschaft fragen, wie der genannte Weg beschritten werden kann sowie inwiefern Deutschland und die EU Einfluss auf diese Entwicklung nehmen können.

Ein leeres Perowskit-Solarmodul wird mit verflüssigtem Perowskit-Photoabsorber befüllt. Anschließend wird der Perowskit in der glasversiegelten Solarzelle auskristallisiert. Mit der abgebildeten Menge geschmolzenen Perowskits (2 ml) können vier Quadratmeter der Modulfläche hergestellt werden
Bilder: Fraunhofer ISE

Durch die Fokussierung auf die Kostenreduktion stand in der Solarindustrie als grüne Zukunftstechnologie der Nachhaltigkeitsaspekt bisher nicht so sehr im Vordergrund. Jetzt ist der richtige Zeitpunkt, darüber nachzudenken, wie man auch den CO_2-Aspekt verbessern kann. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE arbeitet daran, etablierte Produktionstechnologien nachhaltiger zu machen. Gleichzeitig werden auch völlig neue Herstellungsverfahren und Solarzellentechnologien entwickelt.

Zurzeit ist bei Strom aus herkömmlichen Siliciumsolarzellen der CO_2-Fußabdruck mindestens zehnmal niedriger im Vergleich zu Kohlestrom und kann daher bereits erheblich zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Stromsektor beitragen, wenn Kohle durch PV ersetzt wird. Dennoch fällt bei der Produktion von PV-Modulen insbesondere durch das energieintensive Aufreinigen des Siliciums zurzeit noch eine noch nicht zu vernachlässigende Menge an CO_2-Emissionen an. Bei einer globalen PV-Produktion im Terawatt-Bereich würde die Herstellung der PV-Module mit dem heutigen Stand der Technik jährlich mehr CO_2 ausstoßen als der gesamte internationale Flug- oder Schiffverkehr [4]. Daher ist es trotz der Nettovermeidung von CO_2-Emissionen durch die Photovoltaik geboten, durch weitere Forschung Lösungswege für niedrigste CO_2-Emissionen in der Herstellung der PV-Module zu finden.

Es stellt sich also die Frage, wie niedrig der CO_2-Fußabdruck von Solarmodulen überhaupt noch werden kann. Die ultimative untere Grenze für herkömmliche Anwendungsfelder bildet hierbei das Substrat, in dem die Solarzellen gegen Witterungseinflüsse versiegelt sind. Dies gilt unabhängig von der Solarzellen-Technologie. Dadurch ergibt sich also ein theoretischer unterer Wert von photovoltaisch-aktivem Flachglas. Der CO_2-Fußabdruck ist auch zunehmend eine maßgebliche Kenngröße für die Produktionskosten. Der CO_2-Ausstoß bei der Herstellung ist in erster Näherung proportional zum Energieverbrauch und stellt bei zunehmendem Preisdruck einen wesentlichen Kostenfaktor dar.

Photovoltaik in der Glasscheibe

Die Erforschung neuer PV-Technologien erfolgt herkömmlicherweise mit der Materialentwicklung. Dazu werden Solarzellen zunächst im Labormaßstab hergestellt und optimiert. Die Frage der Integration in produktfertige Module stellt sich erst relativ spät im Entwicklungsprozess, und man ist damit durch die Vorarbeiten bei der Auswahl von Konzepten in der Aufskalierung zum Modul bereits eingeschränkt. Mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten „in-situ“ Ansatz wird diese Herangehensweise umgekehrt: Ausgehend von einem herkömmlichen Flachglas-Substrat werden mittels Siebdruck poröse Elektrodenstrukturen aufgebracht (vgl. Abb. 1). Mikroporöses Titandioxid dient hierbei zur späteren Extraktion der Elektronen, die positiven Ladungsträger (Löcher) werden über eine wenige Mikrometer dicke Schicht aus mikronisiertem Graphit abtransportiert. Beide Elektroden sind durch eine isolierende Schicht aus Aluminium- oder Zirkonoxid vor Kurzschlüssen geschützt. Anschließend wird um die einzelnen Zellen herum Glaslotpulver verdruckt und eine zweite Flachglasscheibe auf dieses bedruckte Substrat positioniert. In einem Fügeofen schmilzt das Glaslot auf und verbindet beide Scheiben fest miteinander.

Durch die Anordnung der porösen Kontaktstrukturen sind Kapillaren entstanden, welche von Glaslotstreifen eingeschlossen werden. In die Kapillare wird nun in einem letzten Schritt das photoaktive Solarzellen-Material eingebracht. Hierfür wird eine neue Absorberklasse genutzt: Perowskite. Doppelsalze in der Perowskit-Kristallstruktur wurden erst vor zehn Jahren als Solarzellenmaterial entdeckt, erreichen dank intensiver internationaler Forschung aber bereits im kleinen Labormaßstab Rekordwirkungsgrade die über denen von polykristallinem Silicium liegen. Ein Vorteil von Perowskiten besteht darin, dass sie beispielsweise durch organische Lösungsmittel leicht verflüssigt werden können. In die in-situ-Module kann so eine Precursor-Flüssigkeit eingebracht werden, welche sich durch Kapillarkräfte quasi von selbst an der gewünschten Stelle organisiert. In einem letzten Prozessschritt kristallisiert dann durch Erhitzen die Precursor-Flüssigkeit in den porösen Kontaktstrukturen vor Ort – in-situ – aus.

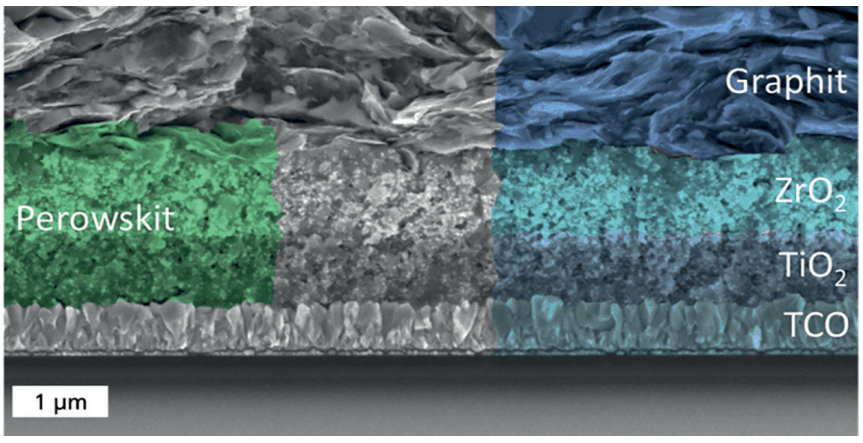

Abb. 1 **Die Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Querschnitts durch eine „in-situ“-Perowskitsolarzelle zeigt deren Schichtaufbau**

Perowskite wecken durch die hohen Wirkungsgrade große Erwartungen. Ein ungelöstes Problem besteht jedoch noch in der Langzeitstabilität, da sich das Material unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit und Sauerstoff zersetzt. Die solide Glaslot-Verkapselung bieten hier einen idealen Lösungsansatz für einen Luftabschluss über Jahrzehnte hinweg.

Weltrekord für gedruckte Solarzellen

Eine große Herausforderung bei der Herstellung von in-situ Solarzellen bestand lange im letzten Prozessschritt der Kristallisation. Hierbei muss der gelöste Perowskit in den porösen Kontaktschichten so kristallisieren, dass die Ladungsträger effizient extrahiert werden können. Außerdem muss eine gleichmäßige Kristallisation über die gesamte Zellfläche erreicht werden. Hierzu werden von vielen Forschungsgruppen organische Lösungsmittel eingesetzt.

In den glasverkapselten Kapillaren bereitet das Austreiben des Lösungsmittels jedoch große Schwierigkeiten. Hier wurde am Fraunhofer ISE mit einer verblüffenden Entdeckung ein Durchbruch erreicht: Überströmt man Perowskitpulver mit einem polaren Gas, so verflüssigt sich der Perowskit. Das Gas bewirkt quasi ein Herabsetzen des Schmelzpunktes unter die Umgebungstemperatur und es entsteht ein sog. „geschmolzenes Salz“. Dieses kann wie gewohnt in die porösen Strukturen eingebracht werden, die Kristallisation erfolgt nun aber wesentlich kont-

rollierter. Anders als bei einer chemischen Fällung aus dem Lösungsmittel verfestigt sich das geschmolzene Salz vor Ort wieder, wenn das polare Gas ausgetrieben wird. So kann eine sehr gleichmäßige, dichte Porenfüllung erreicht werden (Abb. 2).

Auf diese Weise gelang es uns, Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 12,6 % hergestellt werden [5]. Der Wert wurde vom Kalibrierlabor (CalLab) des Fraunhofer ISE, einem international anerkannten akkreditierten Labor, in stabilisierter Form gemessen und zertifiziert. Obwohl hier noch Luft nach oben besteht – das Potenzial von Perowskiten liegt bei über 20% - stellt dieser Rekord bereits den höchsten Wert für vollständig gedruckte Perowskitsolarzellen dar.

Chancen für die deutsche Glasindustrie

Mit den Prototypen ist somit der Machbarkeitsnachweis für das „in-situ"-Konzept erbracht. Die Aufskalierung der Füge- und Druckprozesse folgt jenen der Glasindustrie, welche beispielweise für Architektur- und Auto-Glas bereits etabliert sind. Das „in-situ"-Konzept wurde schon 2013 vom Fraunhofer ISE zum Patent angemeldet und stellt ein Basispatent für Perowskitmodule dar. Bei der Wahl der verwendeten Materialien wurde besonderes Augenmerk auf die niedrigsten Kosten jeder Schicht gelegt. Da die Schichtdicke der gedruckten aktiven Schichten im Mikrometerbereich liegen, können die Materialkosten minimiert werden: Die im Aufmacherbild gezeigte Menge von 2 ml geschmolzenem Perowskit genügt für die Herstellung von 4 m² Modulfläche. Dadurch reduzieren sich die Materialkosten nahezu auf die der Glassubstrate.

Für die zukünftige industrielle Herstellung kann das Geschäftsmodell der Glasproduzierenden und -verarbeitenden Industrie übernommen werden. In der Glasindustrie sind im Vergleich zur bestehenden PV-Industrie die Transportkosten anteilsmäßig so hoch, dass sich ein dezentraler Markt mit Transportwegen in der EU unterhalb 500 km etabliert hat. Das bedeutet, dass beim „in-situ"-Ansatz die lokale Herstellung und der lokale Vertrieb gegenüber in Ostasien zentralisierten Geschäftsmodellen von Vorteil sind. Beim Anlagenbau für die Glasindustrie ist Deutschland führend. Durch die Reduktion des Energieaufwands auf die des Flachglases weisen solche Solarzellen zudem eine optimale Klimabilanz auf: Mit dem in-situ-Konzept kann der CO_2-Fußabdruck von PV im Vergleich zu Silicium-solarzellen nochmal drastisch um einen Faktor 10 bis 20 gesenkt werden.

Anmerkungen

[1] Siehe hierzu beispielsweise Berechnungen aus Shell Scenarios, „Sky Scenario- Meeting the Goals of the Paris Agreement" (2018) oder C. Breyer et al. „On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios", Progress in Photovoltaics: Res. Appl. (2017).

[2] Weiter ausgeführt in N. Haegel et al., „Terawattscale photovoltaics: Trajectories and challenges" Science, (2017).

[3] Fraunhofer ISE, „Photovoltaics report" (2018). https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html

[4] Eine detaillierte Berechnung findet sich in: L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, „Constraints and opportunities for CO_2-neutral photovoltaics: in-situ perovskite solar cell manufacturing enables reaching the ultimate carbon footprint limit of the glass substrate", aktuell im Peer-Review in Joule. Vorabdruck unter: https://ssrn.com/abstract=3345549.

[5] Technische Details unter L. Wagner et al., „High photovoltage of 1 V on a steadystate certified hole transport layer-free perovskite solar cell by a molten-salt approach", ACS Energy Letters (2018).

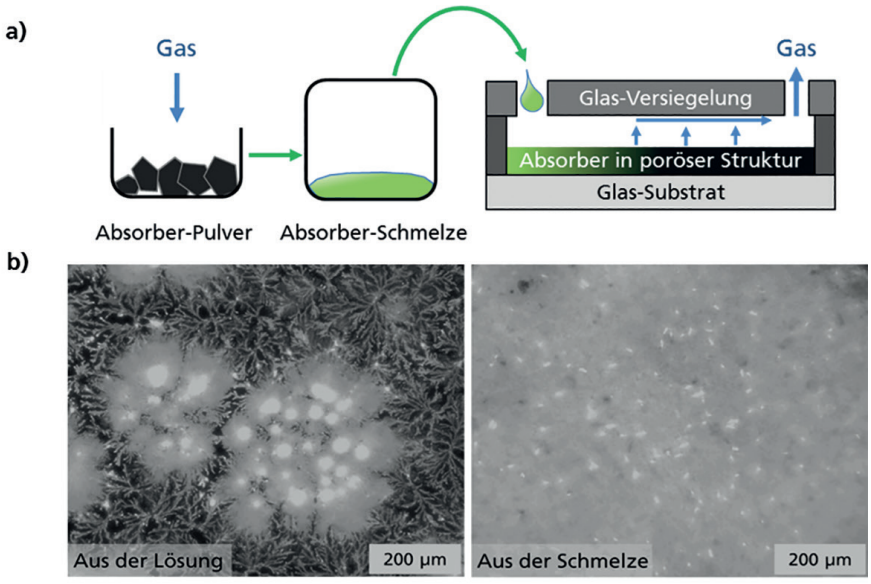

Abb. 2 **a) Perowskitpulver wird mithilfe eines polaren Gases bei Raumtemperatur aufgeschmolzen und in die Kapillare einer in-situ-Zelle gefüllt. Die Kristallisation in den Kontaktstrukturen erfolgt durch Entfernen des Gases. b) Mikroskopische Photolumineszenzaufnahmen von Perowskitschichten in „in-situ"-Zellen. Die Kristallisation aus einem Lösungsmittel (links) führt zu inhomogener Kristallisation. Durch Kristallisation aus der Schmelze (rechts) hingegen werden sehr gleichmäßige Schichten erreicht**

L. Wagner, Dr. S. Mastroianni und Dr. A. Hinsch, Abteilung Organische und Perowskit-Photovoltaik am Fraunhofer ISE, Freiburg
Lukas.Wagner@ise.fraunhofer.de

Weiterführende Informationen

https://blog.innovation4e.de/2018/05/16/gedruckte-in-situ-perowskit-solarzellen-ressourcenschonend-und-lokal-produzierbar/
https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovoltaik/neuartige-photovoltaik-technologien/farbstoff-und-perowskitsolarzellen.html

Projektförderung

MesoPIN: BMBF FKz 03SF0484A
PeroTec: Fraunhofer MAVO
L. Wagner dankt der DBU für die Unterstützung durch ein Promotionsstipendium.