

Die Farbstoffsolarzelle

Solarstrom aus Früchtete

ANDREA EHRMANN | TOMASZ BŁACHOWICZ

Farbstoffsolarzellen werden seit ihrer ersten wissenschaftlichen Beschreibung intensiv erforscht. Sie können aus ungiftigen, preiswerten Materialien und sogar in textiler Form hergestellt werden. Höchste Wirkungsgrade über 20% erzielen sie allerdings derzeit nur mit toxischen Zutaten. Diese will die Forschung ersetzen.



Drehbare Paneelen mit Farbstoffsolarzellen an der Fassade des Modularen Innovationszentrums der Firma Merck in Darmstadt (Foto: L. Gruber | Colt International).

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Farbstoffsolarzellen mit nutzbaren Wirkungsgraden wurden 1991 erstmals in der wissenschaftlichen Literatur erwähnt [1]. Brian O'Regan und Michael Grätzel, nach dem die Farbstoffsolarzelle auch als Grätzel-Zelle bezeichnet wird, beschreiben in ihrem Artikel die grundsätzliche Funktionsweise und die Anforderungen an die einzelnen Schichten einer Farbstoffsolarzelle. In unserem Artikel skizzieren wir die aktuelle Forschung an Farbstoffsolarzellen, insbesondere für den Einsatz auf Textilien, und untersuchen zum Schluss eine typische Farbstoffsolarzelle, wie sie als Schulbausatz erhältlich ist.

Farbstoffsolarzellen bestehen aus zwei leitfähigen Elektroden, von denen mindestens eine durchsichtig sein muss, um Licht in die Zelle eindringen zu lassen. Die Frontelektrode wird mit einem Halbleiter, typischerweise TiO_2 (Titan-dioxid) oder auch ZnO (Zinkoxid), beschichtet, auf dem eine Monolage eines Farbstoffs abgelagert wird. Die Farbstoffmoleküle dienen dazu, Photonen zu absorbieren und so Elektronen im Farbstoff anzuregen, die in das Leitungsband des Halbleiters injiziert werden. Durch diesen und die Frontelektrode gelangen die Elektronen in einen äußeren Kreislauf, in dem sie einen Verbraucher antreiben. Den Wiedereintritt in die Solarzelle über die Gegenelektrode unterstützt eine Platin- oder Graphitschicht als Katalysator. Mit der Reduktion des Elektrolyten durch das Elektron und dem Elektronentransfer vom Elektrolyten in den Farbstoff wird der Kreislauf geschlossen. Abbildung 1 zeigt den generellen Aufbau solcher Farbstoffsolarzellen.

Wie O'Regan und Grätzel bereits beschreiben, sind dabei mehrere Punkte essentiell, um hohe Wirkungsgrade zu erreichen. Zum einen muss die Halbleiterschicht ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen haben, damit sich möglichst viele Farbstoffmoleküle anlagern können. Zum anderen muss der Farbstoff sehr effizient über den gesamten Wellenlängenbereich des Sonnenlichts Photonen absorbieren und sollte möglichst langzeitstabil sein. Aber auch die anderen Komponenten einer Farbstoffsolarzelle, wie die Elektroden, der Katalysator und der Elektrolyt, müssen möglichst effizient arbeiten und gut aufeinander abgestimmt sein.

Forschung und Anwendung

Heute werden Farbstoffsolarzellen in vielen Forschungsgruppen weltweit untersucht. Während O'Regan und Grätzel je nach Beleuchtungssituation 7–12% Wirkungsgrad erreichen konnten, sind inzwischen Wirkungsgrade von weit über 20% in der wissenschaftlichen Literatur zu finden [2]. Das macht Farbstoffsolarzellen zu ernsthaften Konkurrenten der siliziumbasierten Zellen.

Farbstoffsolarzellen haben mehrere Vorteile gegenüber konventionellen anorganischen Solarzellen. Einerseits lassen sie sich preiswerter und mit geringerem Energieaufwand herstellen und benötigen weder hochreine Materialien noch einen Reinraum. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind vielfältiger, da sie in verschiedenen Farben [3] und auf unterschiedlichen Substraten produziert werden können, unter anderem auch auf flexiblen, transparenten Folien. Im

Gegensatz zu herkömmlichen Solarzellen können Farbstoff-solarzellen vollständig aus ungiftigen, reichlich vorhandenen Materialien hergestellt werden, während Solarzellen der zweiten Generation typischerweise CdTe, Indium, Selen oder andere giftige, seltene Schwermetalle enthalten [4]. Zudem sind Farbstoffsolarzellen dafür bekannt, schwaches Licht besser nutzen zu können als siliziumbasierte Zellen; häufig steigt der Wirkungsgrad sogar bei schwachem, indirektem Licht, während er bei herkömmlichen Solarzellen unter diesen Bedingungen sinkt.

Bisher sind die Wirkungsgrade, die mit Farbstoffsolarzellen erreicht werden, jedoch noch nicht konkurrenzfähig, wenn es um herkömmliche Anwendungen wie Solarfarmen oder Solarpaneele auf Hausdächern geht. Interessant sind Farbstoffsolarzellen insbesondere dort, wo sie ihre Vorteile ausspielen können und man auch mit einer geringeren Effizienz auskommen kann. Ein Beispiel sind nahezu vollständig durchsichtige Scheiben für Wintergärten, die im Sommer nicht nur Energie gewinnen, sondern auch einen Teil der Infrarotstrahlung absorbieren und damit das Aufheizen des Wintergartens reduzieren. Weitere Beispiele sind farbige Teile einer Glasfassade, die Design und Energiegewinnung verbinden [5], oder Elemente textiler Architektur, angefangen von Zelten für Krisensituationen bis hin zu textilbasierten Gebäuden in Wüstenregionen, wo große Flächen zur Verfügung stehen, in die flexible Farbstoffsolarzellen integriert werden können.

Materialforschung

Ein bisher ungelöstes Problem der Farbstoffsolarzellen besteht darin, dass man nicht alle ihre Vorteile zugleich nutzen kann. Insbesondere lassen sich die bisher erwähnten, relativ hohen Wirkungsgrade nicht mit ungiftigen, preiswerten Materialien erreichen. Auch das Hochskalieren der Farbstoffsolarzellen auf große Flächen, wie man sie gerne in Fassaden oder textiler Architektur nutzen möchte, führt zu einer deutlichen Reduzierung des Wirkungsgrades. Das Problem liegt in der zu geringen Leitfähigkeit der Elektroden. Meist wird es durch Aufbringen von Silberleitungen gelöst, die den Strom zu den Anschlüssen leiten, gleichzeitig aber auch die effektive Fläche der Solarzelle reduzieren. Und nicht zuletzt leiden viele Farbstoffe an mangelnder Langzeitstabilität.

Momentan gibt es daher noch deutliche Unterschiede zwischen den Wirkungsgraden, die man als Spitzenwerte in der wissenschaftlichen Literatur findet, und den im Alltag mit kommerziell erhältlichen Farbstoffsolarzellen erreichbaren Werten. Umso wichtiger ist die Forschung an neuen Materialien, Materialkombinationen, Vor- oder Nachbehandlungen etc., um diese Probleme zu lösen. Hier geben wir einen Überblick über verschiedene Materialien, die momentan im Fokus der Forschung stehen.

Stellt man Farbstoffsolarzellen mithilfe der von verschiedenen Herstellern erhältlichen „Bausätze“ im Schulversuch her, so arbeitet man mit unproblematischen Materialien (Abbildung 2). Die Elektroden bestehen meist aus

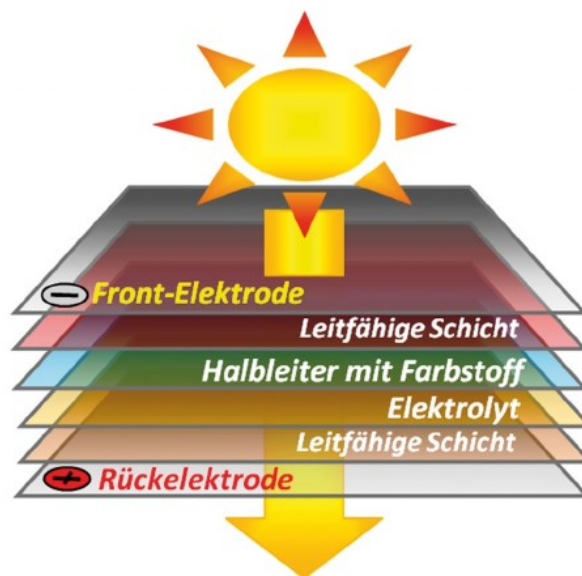


Abb. 1 Aufbau einer Farbstoffsolarzelle (nach [7]).

Glasplättchen, die mit einer dünnen, durchsichtigen Lage FTO (Fluorine-doped Tin Oxide, Fluor-Zinn-Oxid) beschichtet sind. Auf die Frontelektrode rakelt man eine dünne Schicht TiO_2 auf. Dazu versieht man zum Beispiel die Ränder des Plättchens mit Klebestreifen als Abstandhalter und zieht darüber die TiO_2 -Lösung mit einer Glasplatte ab. Diese Schicht muss dann bei etwa $450\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ gesintert werden, um die einzelnen TiO_2 -Partikel zu verbinden und zugleich eine poröse Schicht mit großer innerer Oberfläche zu erzeugen.

Anschließend färbt man die TiO_2 -Schicht, normalerweise mit Naturfarbstoffen aus Hibiskusblüten oder Früchte-tee. Neben den hieraus gewonnenen Anthocyanen, das sind in der Natur weit verbreitete wasserlösliche Pflanzenfarben, sind viele weitere Naturfarbstoffe oder Mischungen daraus möglich. Auf die Gegenelektrode wird, im einfachsten Fall per Bleistift, Graphit aufgetragen. Anschließend fügt man beide Elektroden mit den leitfähigen Seiten nach innen zusammen und verklebt sie. Dann füllt man den Spalt zwischen ihnen mit einem Elektrolyten, meist Iod-Kaliumiodid, der sich durch die Kapillarkwirkung in die Zelle hineinzieht. Nun kann man die fertige Farbstoffsolarzelle untersuchen.

Mit solchen einfachen Zellen erreicht man typischerweise Wirkungsgrade von deutlich unter 1% [6, 7]. Dank ihrer simplen und preiswerten Herstellung kann man sie für Stand-alone-Anwendungen wie Rettungsinseln oder Zelte durchaus nutzen, etwa um einen Notrufsender aufzuladen. Doch sie sind keine ernsthafte Konkurrenz zu konventionellen Solarzellen. Dieses Problem wird in der Literatur leider häufig durch schlichte Rechenfehler verschleiert. Typischerweise wird die Intensität des einfallenden Lichts während der Messung um einen Faktor 10 zu niedrig angenommen, sodass man häufig sehr optimistische Werte für den Wirkungsgrad von Farbstoffsolarzellen auf Basis

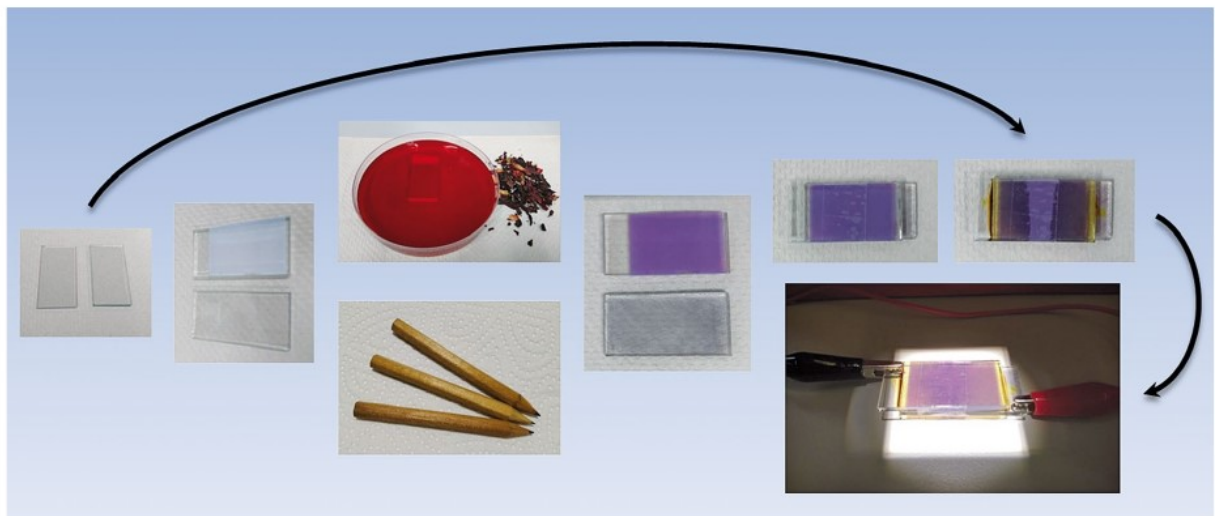


Abb. 2 Herstellung einer einfachen glasbasierten Farbstoffsolarzelle.

natürlicher Farbstoffe findet (einige Beispiele sind in [6] und [8] aufgeführt). Durch die regelmäßige Wiederholung solcher Rechenfehler scheinen auch Gutachter von Publikationen sich an angebliche Wirkungsgrade von einigen Prozent zu gewöhnen und diese Werte nicht mehr nachzurechnen.

Neben den ungiftigen, preiswerten Naturfarbstoffen, die im einfachsten Fall aus Beeren oder anderen Pflanzenteilen gewonnen werden können, werden häufig Ruthenium-Farbstoffe genutzt, wie bereits in der ursprünglichen Arbeit von O'Regan und Grätzel [1]. Solche Ruthenium-Polypyridyl-Komplexe sind beispielsweise unter den Namen N3 oder N719 kommerziell erhältlich und ermöglichen Wirkungsgrade von über 10% [9]. Leider ist aber auch Ruthenium nicht nur teuer, sondern in Form dieses Komplexes auch besonders umweltgefährdend, hochgiftig und karzinogen [4]. Weniger giftige Ruthenium-Komplexe wie der ebenfalls kommerziell erhältliche Farbstoff N712 sind deutlich teurer und gleichzeitig weit weniger effizient [7].

Andere Ansätze konzentrieren sich beispielsweise auf Quantenpunkte, die je nach genutzten Materialien sehr breite Absorptionsspektren aufweisen können, insbesondere wenn verschiedene Größen von Quantenpunkten und damit Energiebandlücken kombiniert werden. Typische Materialien sind beispielsweise CdS oder CdSe [10]. Auch hier ist also wieder das als hochgiftig und karzinogen eingestufte Kadmium enthalten. Solche Farbstoffe sind sicherlich interessant für Grundlagenuntersuchungen im Labor, aber nicht für den kommerziellen Einsatz geeignet. Um eine industrielle Anwendung zu erreichen, besteht daher gerade im Bereich der Farbstoffe noch Forschungsbedarf, um die Vorteile der hocheffizienten Farbstoffe mit denen der ungiftigen Naturfarbstoffe zu verbinden.

Auch der Halbleiter ist Gegenstand aktueller Forschung. Hierbei besteht die Herausforderung weniger in der Nutzung ungiftiger Komponenten als vielmehr im Sinterschritt, der

bei TiO_2 im Normalfall notwendig ist. Durch diese thermische Behandlung bei Temperaturen von mindestens $300\text{ }^\circ\text{C}$, meist eher $450\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$, wird es schwierig, sobald man die Glaselektroden durch Folien, textile Materialien oder auch andere flexible Substrate ersetzen möchte. Es gibt daher viele Ansätze, diesen Sinterschritt zu vermeiden oder bei niedrigeren Temperaturen zu sintern, was im Labormaßstab bereits gelungen ist [7]. Damit sind jedoch normalerweise geringere Wirkungsgrade erreichbar als beim üblichen Hochtemperaturesintern.

Interessanterweise erlaubt die Nutzung von Nanovliesen, die mit der Methode des Elektrosplinnens leicht herstellbar sind, die Einbettung von TiO_2 ohne thermische Behandlung [11]. Die auf diese Weise hergestellten TiO_2 -Schichten sind einerseits mechanisch fixiert und werden beim Färben nicht ausgewaschen; andererseits weisen sie auch ohne den Sinterschritt eine große innere Oberfläche auf, sodass der Färbeprozess zu vergleichbaren Resultaten führt wie bei herkömmlichen gesinterten Oberflächen.

Alternativ gibt es auch die Möglichkeit, ZnO statt TiO_2 zu nutzen. Dieses kann beispielsweise mit Laserstrahlverdampfen (PLD, Pulsed Laser Deposition) abgeschieden werden, was jedoch zu relativ geringen Wirkungsgraden führt. Häufiger werden daher hochtemperaturfeste Materialien wie verschiedene Drähte oder Glasfasergewebe in Kombination mit TiO_2 oder ZnO genutzt, um faserförmige Farbstoffsolarzellen herzustellen. Diese kann man zu flexiblen textilen Flächen verweben oder direkt textile Flächen mit den einzelnen Schichten einer Farbstoffsolarzelle beschichten. Die erreichten Wirkungsgrade hängen dabei nicht nur vom verwendeten Halbleiter und seiner Integration in die Farbstoffsolarzelle ab, sondern wie oben erwähnt auch von den genutzten Farbstoffen und den weiteren Materialien [7].

Als Katalysator auf der Gegenelektrode wird typischerweise Graphit oder – teurer, aber effizienter – Platin aufge-

tragen. Als Alternativen zu Platin werden heutzutage beispielsweise kohlenstoffbasierte Materialien wie Ruß, Aktivkohle, Kohlenstoff-Nanoröhrchen und Graphen untersucht. Eine interessante weitere Möglichkeit bietet die Untersuchung von Polypyrrol oder ähnlichen leitfähigen Polymeren, die in geeigneten Materialkombinationen ebenfalls als Katalysator eingesetzt werden können [12].

Leitfähig beschichtete Gläser dienen als unproblematische Standardelektroden. Flexible Elektroden sind dagegen eine gewisse Herausforderung, zumal mindestens eine der Elektroden durchsichtig sein sollte. Dennoch lassen sich Textilien durchaus als Elektroden nutzen, beispielsweise herkömmliche Baumwollgewebe, die metallisiert [12] oder auch mit Graphen oder anderen leitfähigen Materialien beschichtet wurden. Ein weiterer leicht herstellbarer Kandidat sind die schon erwähnten Nanovliese. Diese kann man mit verschiedenen leitfähigen Polymeren auf unterschiedliche Weise beschichten und dadurch leitfähig machen, wobei solche Elektroden je nach Dicke dieser Beschichtung einen guten Kompromiss zwischen hoher Leitfähigkeit und nanostrukturierter Oberfläche darstellen können [13].

Textilbasierte Farbstoffsolarzellen

Textilien stellen eine ganz besondere Herausforderung dar, wenn sie als Substrate für Farbstoffsolarzellen dienen sollen. Daran forscht auch ein Team der Autorin an der FH Bielefeld. Ein großes Problem stellt der Elektrolyt dar, wie bei allen unverkapselten Farbstoffsolarzellen. Die Textilien verhalten sich wie nicht versiegelte Solarzellen, das heißt, dass die üblicherweise flüssigen Elektrolyten herausdiffundieren können. Zwei Ansätze sollen dieses Problem umgehen. Eine Möglichkeit bieten Fest- oder Gelelektrolyte, eine andere Nanovliese oder weitere textile, poröse oder ähnliche Strukturen, die den Elektrolyten wie ein Schwamm speichern [14]. Ein weiteres Problem ist die sogenannte Biegeschlaffheit von Textilien. Das bedeutet, dass die Textilien sehr kleine Biegeradien zulassen, die eine aufgetragene Farbstoffsolarzelle überstehen muss.

Bei unverkapselten Farbstoffsolarzellen stehen giftige Komponenten nicht zur Debatte, weshalb nur geringe Wirkungsgrade zu erwarten sind, sodass wiederum große Flächen genutzt werden sollten. Faserbasierte Farbstoffsolarzellen bieten hier eine Alternative zu flächigen Beschichtungen. Sie müssen aber ausreichend mechanisch stabil sein, um beispielsweise verwebt zu werden. Auch die Kontaktierung der einzelnen Fasern oder Fäden erfordert intelligente Lösungen. Obwohl viele Forschungsgruppen an diesem Thema arbeiten und es im Labormaßstab einige gute Ansätze gibt, ist die Übertragung in einen industriellen Maßstab noch nicht absehbar. Insbesondere in diesem Bereich der Farbstoffsolarzellen ist daher noch viel weitere Forschung und Entwicklung notwendig.

Elektrische Charakterisierung

Neben chemischen und elektrochemischen Untersuchungsmethoden, die nicht in jedem Labor zur Verfügung stehen,

werden Farbstoffsolarzellen typischerweise anhand ihrer Strom-Spannungs-Kennlinien untersucht. Diese Methode stellen wir am Beispiel einer herkömmlichen Farbstoffsolarzelle aus einem Schulbausatz vor (Abbildung 3). Rechts im Foto ist ein Solarsimulator zu sehen, in der Mitte eine SMU (Source Measure Unit). Dieses elektronische Multifunktionsgerät liefert meist zuverlässigere Messwerte als eine Kombination aus Multimetern und einer Widerstandsdekade.

Die Strom-Spannungs-Kennlinien erlauben die Darstellung und Berechnung einiger für Solarzellen ganz allgemein wichtiger Größen, die auch Farbstoffsolarzellen charakterisieren: die Leerlaufspannung U_{LL} , den Kurzschlussstrom I_{KS} , die maximale Leistung P_{max} , die sich aus der I - U -Kennlinie berechnen lässt, und den Füllfaktor FF , der als Quotient aus P_{max} und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom definiert ist (s. auch Physik in unserer Zeit 2013, 44(2), 84). Für eine rechteckige I - U -Kennlinie wäre der Füllfaktor 1. Eine solche ideale Solarzelle wäre also eine Konstantstromquelle, die unabhängig von der anliegenden Spannung – bis zur maximalen Betriebsspannung – immer die gleiche Strommenge liefern könnte.

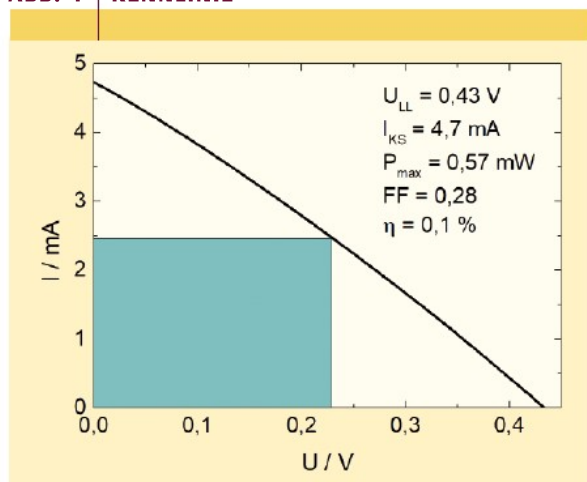
Bei einer realen Solarzelle jedoch sinkt die Stromstärke mit wachsender Spannung, und die Form dieser Kurve beschreibt ihre charakteristischen Eigenschaften. Typisch für Farbstoffsolarzellen ist eine nahezu gerade Kennlinie, wie bei unserem Beispiel (Abbildung 4). Damit sinkt der FF auf etwa 0,25. In Abbildung 4 ist er identisch mit dem Quotienten aus der grün markierten Fläche, die die Kennlinie im Punkt der höchsten Leistung trifft, und der Gesamtfläche unter der Kennlinie.

Um den Wirkungsgrad zu bestimmen, messen wir die eingestrahlte Leistung P_{ein} . Meist werden solche Messungen bei standardisierten Bedingungen durchgeführt. Dazu erzeugt ein Solarsimulator näherungsweise ein Sonnenspektrum, und man stellt eine Leistungsdichte von 100 mW/cm^2



Abb. 3 Versuchsaufbau zur Messung von Strom-Spannungs-Kennlinien: Computer (links), Source Measure Unit (SMU, eine Kombination aus Netzteil und Multimeter) und Solarsimulator (rechts).

ABB. 4 KENNLINIE



Typische Strom-Spannungs-Kennlinie einer mit Naturfarbstoffen hergestellten, glasbasierten Farbstoffsolarzelle mit einer effektiven Fläche von 6 cm^2 .

an der Oberseite der Solarzelle ein. Gerade für Farbstoffsolarzellen sind aber auch andere Spektren und Lichtintensitäten, wie man sie typischerweise im Inneren von Gebäuden findet, interessant. Berechnet man nun die maximale Leistungsdichte, also für eine Solarzelle mit einer effektiven Fläche (ohne Kontakte) A_{eff} den Wert $P_{\text{max}}/A_{\text{eff}}$, so lässt sich der Wirkungsgrad η als Quotient aus maximaler Leistungsdichte und eingestrahelter Leistungsdichte ermitteln.

Für die Kennlinie, die wir an unserer Schulversuch-Farbstoffsolarzelle ohne größere Optimierungen der einzelnen Schichten gemessen haben, finden wir einen Wirkungsgrad von $0,1\%$. Dieser Wert ist durchaus nicht unüblich für Farbstoffsolarzellen, die mit Naturfarbstoffen hergestellt werden. Hohe Wirkungsgrade, mit denen Farbstoffsolarzellen auf Basis von Ruthenium-Farbstoffen und ähnlichen hochentwickelten Alternativen einen nennenswerten Beitrag zur Energiewende leisten könnten [15], sind momentan bei Farbstoffsolarzellen, die vollständig aus ungiftigen und leicht verfügbaren Materialien bestehen, noch nicht in Sicht.

Zusammenfassung

Farbstoffsolarzellen bieten eine interessante Alternative zu herkömmlichen Solarzellen. Ihre Herstellung benötigt keine Reinräume und viel weniger Energie als etwa Siliziumsolarzellen. Allerdings sind ihre aktuellen Wirkungsgrade besonders bei Nutzung preiswerter, ungiftiger Materialien sehr niedrig. Sie genügen noch nicht, um einen essentiellen Bei-

trag zur Energiewende zu leisten. Farbstoffsolarzellen können aber bereits jetzt für Stand-alone-Lösungen, in textiler Architektur oder auf anderen großen Flächen eingesetzt werden. Dies kann sinnvoller und umweltschonender sein als der Einsatz herkömmlicher siliziumbasierte Zellen.

Stichwörter

Farbstoffsolarzellen, textile Farbstoffsolarzellen, Naturfarbstoffe, Ruthenium-Farbstoffe, Quantenpunkte, Nanovliese, Wirkungsgrad, Schulversuch.

Literatur

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, *Nature* **1991**, 353, 737.
- [2] M. Freitag et al., *Nat. Photonics* **2017**, 11, 372.
- [3] H.Glass, <https://h.glass.de/technology/>
- [4] R. Hemmatzadeh, A. Mohammadi, *JTAP* **2013**, 7, 57.
- [5] Energieglas-Fassade – Science Tower, <http://info.science-tower.at/energieglas/#text-container>
- [6] A. Ehrmann, T. Blachowicz, *Chem. Phys. Lett.* **2019**, 714, 227.
- [7] A. Ehrmann, T. Blachowicz, *AIMS Mater. Sci.* **2019**, 6, 234.
- [8] I. Juhász Junger et al., *Materials* **2019**, 12, 2692.
- [9] P.-P. Sun et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2014**, 16, 21827.
- [10] Y. G. Lei et al., *Appl. Catal. B: Environmental* **2017**, 216, 59.
- [11] A. Mamun et al., *Fibers* **2019**, 7, 60.
- [12] Q. Xu et al., *Org. Electron.* **2016**, 29, 107–113.
- [13] I. Juhász Junger et al., *Materials* **2018**, 11, 1604.
- [14] I. A. Sahito et al., *J. Mater. Sci.* **2017**, 52, 13920–13929.
- [15] A. Kleidon, *Physik in unserer Zeit* **2019**, 50 (3), 120.

Die Autoren



Andrea Ehrmann studierte Physik und promovierte im Bereich Magnetooptik an der RWTH Aachen sowie im Bereich Spintronics an der Silesian University of Technology. Heute ist sie Professorin für Physik, Messtechnik und Textile Technologien an der FH Bielefeld.



Tomasz Blachowicz ist Professor an der Silesian University of Technology, Institute of Physics, in Gliwice, Polen. Dort forscht er insbesondere auf den Gebieten der magnetischen Anisotropien, Magnetisierungsdynamik und Nanoelektronik.

Anschrift

Prof. Dr. Dr. Andrea Ehrmann, FH Bielefeld, Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik, Interaktion 1, 33619 Bielefeld. andrea.ehrmann@fh-bielefeld.de