Dünnschichtfotovoltaik auf der Probe

Autor(en): **Nüesch, Frank**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **102 (2011)**

Heft 3

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856791

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Dünnschichtfotovoltaik auf der Probe

Trends bei organischen und anorganischen Halbleiter-Solarzellen

Der ungebremste Verbrauch fossiler Energieträger beschert zukünftigen Generationen bereits zur nächsten Jahrhundertwende ein Mangelszenario. Erneuerbare Energiequellen sollten daher in keiner Energiedebatte fehlen. Die Fotovoltaik mit einem jährlichen Wachstum von über 30–40 % spielt hierbei eine wichtige Rolle. Zahlreiche Materialien und Technologien werden zurzeit erforscht, um künftig effizientere und kostengünstigere Solarzellen produzieren zu können.

Frank Nüesch

In südlich gelegenen Gebieten dürfte der Preis für Solarstrom bereits in den nächsten Jahren konkurrenzfähig werden. Die Schweiz, weltweite Pionierin auf dem Gebiet der Fotovoltaik in den 1980er-Jahren, produziert heute lediglich 1 ‰ ihres Elektrizitätsverbrauchs mit Fotovoltaik [1]. Seit Einführung der kostendeckenden Einspeisevergütung vor zwei Jahren wurden vermehrt Fotovoltaikanlagen installiert. Hält dies an, könnten wir bereits 2035 5 % unseres Strombedarfs durch Fotovoltaik decken – und bis 2050 sogar über 15 % [2]. Wie verschiedene Studien zeigen, ist das technische Potenzial bedeutend grösser; auf bebauten Flächen in der Schweiz könnten Solarzellen jährlich ungefähr 18 TWh Energie in Form von elektrischem Strom liefern [3], was etwa 25 % des heutigen Elektrizitätsverbrauchs in der Schweiz entspricht. Solch ehrgeizigen Ziele lassen sich nur dank anhaltenden Anstrengungen in Forschung und Entwicklung erreichen. Voraussetzung dazu ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie und Politik.

Kostensenkung durch Dünnfilmtechnologien

Die meisten derzeit betriebenen Fotovoltaikanlagen bestehen aus bläulich glänzenden kristallinen Siliziumsolarzellen. Bereits vor mehr als 50 Jahren entdeckten Daryl Chapin, Gerald Pearson und Calvin Fuller, dass Zwischenschichten aus p- und n-dotiertem Silizium einen fotovoltaischen Effekt mit einem energetischen Wirkungsgrad von 6 % ergeben [4]. Im Laufe der Jahre verbesserte sich die Technologie derart, dass heutige Rekordzellen einen Wirkungsgrad von 25 % erreichen [5], nur etwa 15 % vom theoretischen Maximum entfernt. Wenn auch das Grundprinzip der Ladungserzeugung in c-Si-Zellen sich über die Jahre nicht verändert hat, so sind die bereits von Chapin et al. erwähnten, kritischen Punkte erheblich verbessert worden. Durch die Züchtung von hochreinen Silizium-Kristallen (99,9999 % Reinheit) konnte die Rekombinationszeit der erzeugten Ladungsträger – also letzlich deren «Lebensdauer» – deutlich verlängert werden. Antireflexionsschichten und strukturierte Überschichten haben die Einkopplung von Sonnenlicht deutlich erhöht. Schliesslich hat eine intelligente Kontaktierung dazu geführt, die Ohm'schen Widerstände zu senken und die durch Kontakte verdeckte Fläche der Solarzellen zu verkleinern. Zudem hat die Hochskalierung der Produktionsprozesse die Preise kontinuierlich sinken lassen, mit einer durchschnittlich 60%-igen Preisreduktion bei jeder Verzehnfachung der Produktion **(Bild 1)**.

Tatsächlich ist der Chochralski-Prozess nach wie vor das wichtigste Herstellungsverfahren für kristallines Silizium, obwohl es originelle Ansätze gibt, zum Beispiel die Herstellung von kristallinen Bändern anstatt Ingots, was die Sägeverluste extrem reduziert, oder die sogenannten Silver Cells, mit einer Dicke von nur 50–70 µm [6]. In der kristallinen Siliziumtechnologie hat also die Forschung ihr letztes Wort noch nicht gesprochen. Trotzdem gibt es zahlreiche Anzeichen dafür, dass sich eine weitere massive Preissenkung nur durch fundamental andere Technologien erreichen lässt.

Anorganische Halbleiter sind heute dominant

Dünnfilmtechnologien besitzen bereits heute stattliche Marktanteile. Angeführt von Solarzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe) sowie aus amorphem Silizium, betrug der Anteil sogenannter Dünnfilmmodule an der gesamten produzierten fotovoltaischen Leistung letztes Jahr 20 % [7]. Für Schweizer Firmen wie VHF Technologies, Pramac und Oerlikon Solar, die sich mit der Herstellung von Dünnschicht-Si-Solarzellen beschäftigen, besteht ein grosser Konkurrenzdruck. So hat etwa Oerlikon Solar ihre Dünnfilm-Produktionsanlagen derart verbessert, dass damit im 2013 ein Modul-Herstellungspreis von 0.78 US$ pro Watt-Peak erreicht werden dürfte. Die US-Firma First Solar hat durch Hochskalieren ihrer CdTe-Technologie bereits heute einen Herstellungspreis von 0.77 US$ pro Watt-Peak realisiert [7]. Die Schweizer Firmen Flisom oder Von Roll Solar haben andere Dünnfilmtechnologien aufgegriffen, die Halbleitermaterialien wie zum Beispiel Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) verwenden. Hält der

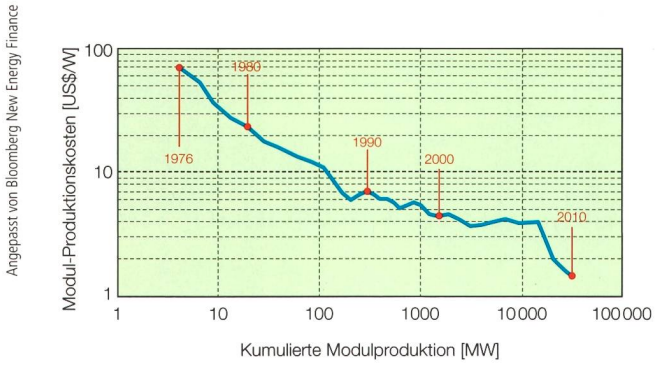
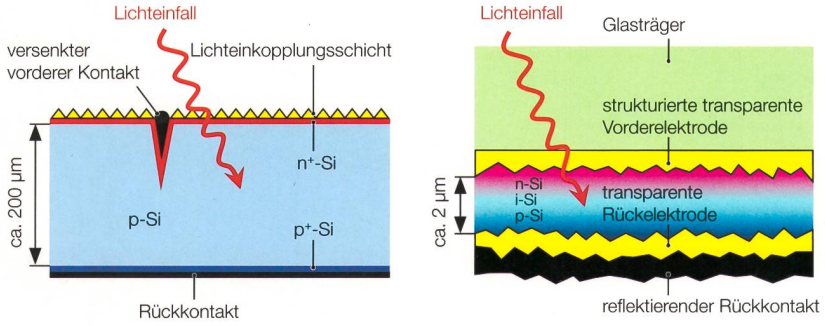


Bild 1 Langfristige Entwicklung der Kristallin-Si-Modulpreise.



Empa

Bild 2 Aufbau einer kristallinen Si-Zelle (links) und amorphen Si-Dünnschichtzelle (rechts).

stetige Fortschritt in der CIGS-Technologie an, so dürfte diese bald mit der Effizienz von polykristallinen Siliziummodulen konkurrieren. Da jedoch die Kosten für eine industrielle Dünnschicht-Produktionsanlage bedeutend höher liegen als bei der kristallinen Technologie, ist der Aufbau einer grossen Produktionsanlage mit einer erheblichen finanziellen Hürde verbunden. Deswegen werden kristalline Si-Zellen auch in den kommenden Jahren den Markt dominieren.

Dünnfilm vs. kristalline Zellen

Anders als bei den kristallinen Technologien wird die aktive, Licht absorbierende Schicht bei Dünnfilmsolarzellen nicht aus der Schmelze gezogen, sondern mit unterschiedlichsten Prozessen auf ein Substrat aufgetragen. Die Morphologie der Dünnfilme wird hauptsächlich durch die Abscheidungsparameter bestimmt und kann wesentlich von der Schichtdicke abhängen. Diese beträgt nur wenige Mikrometer, was den grossen Vorteil der Dünnschichttechnologien sofort erkennen lässt. Sie benötigen viel weniger Material als die herkömmliche kristalline Technologie. Allerdings müssen die Absorptionskoeffizienten dieser Materialien hoch genug sein, um das eingestrahlte Sonnenlicht effizient einfangen zu können. Auch enthalten dünne Filme zahlreiche Defekte, die den Ladungstransport beeinträchtigen. Daher muss eine transparente Elektrode über die dünne Schichtstruktur gelegt werden, um die Ladungen zu den Kontakten abzutransportieren. Dies ist bei der traditionellen kristallinen Siliziumtechnologie nicht nötig, da die Ladungsträger im hochreinen kristallinen Silizium sehr beweglich sind (Bild 2).

Einige Dünnfilmtechnologien wie CIGS weisen bereits Effizienzen auf, die es durchaus mit der kristallinen Technologie aufnehmen können. So erreichen CIGS-Solarzellen auf Glassubstraten Rekordwerte von 20,1 % Effizienz [8]. Die Gruppe von Prof. A. Tiwari an der Empa konnte CIGS-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 17,6 % sogar auf Plastiksubstrate aufbringen – ein neuer Weltrekord für flexible Solarzellen. Andere Technologien sind dagegen noch nicht auf diesen Stand gekommen; CdTe (16,7 %), mikromorphes Silizium (12,5 %), Farbstoffsolarzellen (11,2 %) haben noch Steigerungspotenzial, liegen aber mit zertifizierten Wirkungsgraden bereits über der Effizienz von amorphem Silizium (10,1 %) [8]. Mit 8 % Wirkungsgrad bleibt die jüngste Fotovoltaiktechnologie, auch organische Fotovoltaik genannt, der amorphen Si-Technologie dicht auf den Fersen. Der Wirkungsgrad ist jedoch nicht das einzige Kriterium, um Solarzellen zu bewerten. Dünnfilmtechnologien sind zum Beispiel auch bei diffusem Licht einsetzbar, um an einer Nordfassade oder gar im Innenraum Strom zu generieren. Der Wirkungsgrad von kristallinen Solarzellen nimmt bei abfallender Lichtintensität rapide ab, im Innenberich etwa auf einige wenige Prozent. Zudem kann man Dünnschichtsolarzellen biegbar und leicht herstellen, was völlig neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet (Bild 3). Eine dieser Möglichkeiten betrifft zum Beispiel den Ersatz von Batterien in Verbraucheranwendungen oder Ladegeräte für Anwendungen, die eine kleine Elektrizitätsmenge beziehen.

Farbstoffsolarzellen kommen auf den Markt

Bereits vor rund 140 Jahren berichtet die Arbeit von Hermann Wilhelm Vogel [9] über die Fotosensibilisierung von Silberhalid-Kristallen durch Farbstoffmoleküle. In späteren Jahren wurde ein ähnlicher Effekt auf Halbleiter-Fotoelektroden gemessen [10]. Der grosse Sprung zur fotovoltaischen Anwendung gelang allerdings erst 1991, als Michael Grätzel an der ETH Lausanne eine Farbstoffzelle mit nanoporöser TiO_2-Fotoanode entwickelte [11]. In diesem Typ von Solarzelle wird eine monomolekulare Farbstoffschicht auf der TiO_2-Anode als Sensibilisator adsorbiert. Die Aufgabe des Farbstoffs besteht darin, das Licht zu absorbieren und die so gewonnene Energie über einen Elektrontransferprozess zum TiO_2 in Ladungsträger umzuwandeln. Derartige Farbstoffzellen werden heute bereits im grossen Massstab produziert (G24i, Dyesol) und finden auf dem Markt erste Nischenanwendungen. In Zusammenarbeit mit der ETH Lausanne und der Schweizer Firma Solaronix SA forscht auch die Empa an neuen Sensibilisatoren [12].

Gehört die Zukunft den organischen Solarzellen?

Parallel zur Farbstoffsolarzelle entwarf Hans Meier Ende der 1950er-Jahre erstmals die Idee, Farbstoffmoleküle nicht als Sensibilisatoren, sondern als aktive organische Halbleiter zu verwenden [13]. Er konnte zeigen, dass die absorbierte Lichtenergie an der Grenzfläche zwischen zwei solchen organischen Halbleiterfilmen in Ladungsträger umgewandelt werden kann. Der Mechanismus, der zum fotovoltaischen Prozess

http://www.energy-sunbags.de

Bild 3 Umhängetasche mit Solarmodul (organische Fotovoltaik).

Empa

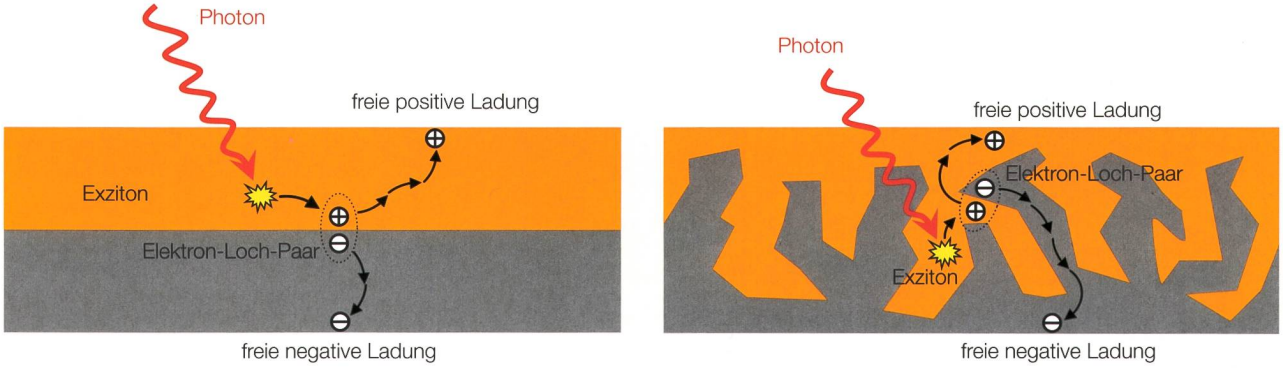


Bild 4 Funktionsprinzip einer organischen Solarzelle als Doppelschicht (links) und als Bulk-Heteroschicht (rechts).

führt, lässt sich wie folgt beschreiben: Licht wird vom Farbstofffilm absorbiert und bildet zunächst einen angeregten Zustand (genannt Exziton), der seine Energie an ein benachbartes Molekül im Film weitergeben kann. Dieser Prozess kann sich so oft wiederholen, bis der angeregte Zustand zerfällt, was typischerweise innerhalb von einer Nanosekunde geschieht. Um nun brauchbaren elektrischen Strom zu generieren, muss dieser angeregte Zustand innerhalb einer Nanosekunde in Ladungsträger umgewandelt werden. Dies erfolgt an der Zwischenfläche von zwei aufeinanderliegenden Farbstofffilmen. Allein jenes Licht, das in der Nähe der Zwischenfläche absorbiert wird, kann somit Exzitonen erzeugen, die an die Zwischenfläche diffundieren können und dort Ladungsträger bilden. Licht ausserhalb dieser aktiven Zone würde lediglich Exzitonen erzeugen, die durch Emission von Licht oder Wärme im Farbstofffilm wieder zerfallen. Mit diesem Prinzip erreichte im Jahre 1986 Chin Tang mit einer Laborsolarzelle einen Wirkungsgrad von knapp 1 % [14]. Viel später, nach der Entdeckung von effizienten organischen Halbleitermaterialien, gelang es der Gruppe um Richard Friend an der Cambridge University, mit Polymeren eine ähnliche Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von etwa 2 % zu realisieren [15]. In der Gruppe von Alan Heeger an der UCSB tauchte erstmals die Idee auf, die Donor-Akzeptor-Zwischenfläche zu vergrössern, indem man die beiden halbleitenden Molekülmaterialien so vermischte, dass die einzelnen Phasendomänen nicht viel grösser als 20 nm sind (Bulk-Heteroschicht) [16]. Somit können nahezu alle Exzitonen in Ladungen umgewandelt werden.

Dies führte dann zu einer steten Steigerung des Wirkungsgrads, der im letzten Jahr auf 8 % kletterte [17] **(Bild 5)**. Ausschlaggebend war die Synthese von konjugierten Materialien, die auch im nahen Infrarotspektrum Licht absorbieren können. Bemerkenswert ist, dass diese Leistung sowohl mit konjugierten Polymeren als auch mit kleineren Molekülen wie Farbstoffmolekülen erreicht werden konnte. Neben der Effizienz der organischen Solarzellen muss auch die Langzeitstabilität gewährt sein. Da Sauerstoff und Wasser die organischen Materialien sowie die Elektroden angreifen, ist eine zuverlässige Einkapselung essenziell. Diese garantiert bereits heute eine Modul-Lebensdauer von mehreren Jahren, was für Verbraucheranwendungen ausreicht [17]. Für netzgekoppelte Anwendungen muss die Langzeitstabilität bestimmt noch erhöht werden.

Fotografische Farbstoffe absorbieren besser

Die Empa erforscht seit 5 Jahren den Einsatz besonderer Farbstoffmoleküle in organischen Solarzellen. Diese fotografischen Farbstoffe wurden im 20. Jahrhundert für die Sensibilisierung von Silberhalogeniden in fotografischen Emulsionen verwendet. Dementsprechend besitzen sie extrem starke Absorptionsbanden, und es existiert eine grosse Vielfalt an Derivaten mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften. Dies ist für die Anwendung in Solarzellen besonders wichtig, da möglichst viel Sonnenlicht in elektrischen Strom umgewandelt werden soll. Wie die Arbeiten an der Empa zeigen, bieten die hohen Absorptionskoeffizienten zudem einen weiteren Vorteil: Eine 20–30 nm dicke Farbstoffschicht genügt, um einen Grossteil des eingestrahlten Lichts zu absorbieren [18]. Somit müssen Exzitonen nur kurze Strecken bis zur organischen Zwischenschicht überwinden. Ebenso verkürzt sich der Weg für die Ladungsträger, was den elektrischen Widerstand beträchtlich verringert.

Diese Untersuchungen haben demonstriert, dass Farbstoffe der fotografischen Industrie sich grundsätzlich für die Herstellung von Solarzellen eignen. Mit

Empa

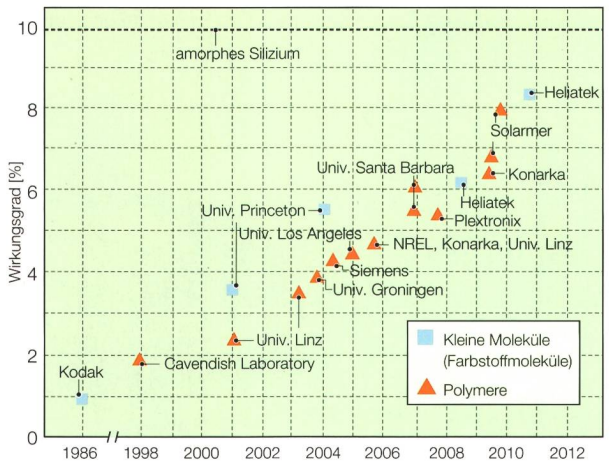
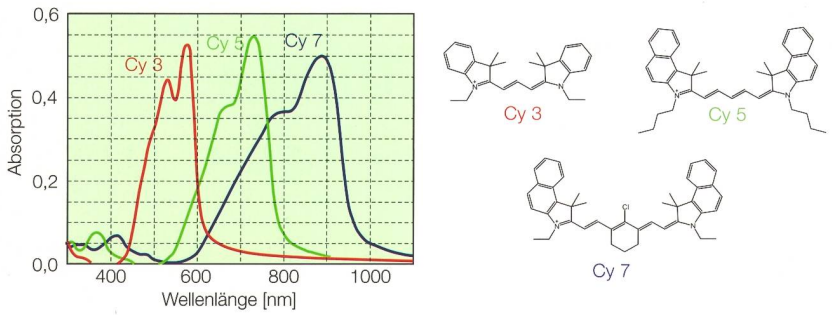


Bild 5 Entwicklung der Effizienz von organischen Solarzellen.

electrosuisse VSE



Empa

Bild 6 Spektren und Molekülstrukturen von Cyaninfarbstoffen.

einem typischen Cyaninfarbstoff wurde an der Empa eine Zelle mit einem Wirkungsgrad von über 3 % entwickelt [19]. Künftig sollen auch neue, an der Empa entwickelte Farbstoffe integriert werden, die nahes infrarotes Licht absorbieren, also mit einem Absorptionsmaximum bei etwa 1000 nm, nicht weit entfernt von der Bandlücke des klassischen Silizium-Halbleiters (Bild 6). Ob in Zukunft mit einer Farbstoffkombination die 10 %-Grenze überschritten werden kann, ist noch unklar. Sicher hingegen ist, dass diese Materialklasse eine kostengünstige Produktion und einen geringen Verbrauch in Aussicht stellt. Mit lediglich 1 g Farbstoff lassen sich ganze 10 m² Solarzellenfläche beschichten. Um die spannende Entwicklung organischer Solarzellen weiter voranzutreiben, ist ein interdisziplinärer Ansatz nötig. Forscher auf den Gebieten der Physik, der Chemie und den Materialwissenschaften sind gefordert.

Referenzen

[1] Für eine Übersicht der kumulierten installierten Fotovoltaikleistung siehe Report IEA_PVPS T1-19_2010, p. 5.
[2] Energie Trialog Schweiz 2009: Energie-Strategie 2050 – Impulse für die schweizerische Energiepolitik. Grundlagenbericht.
[3] IEA-PVPS T7-4: 2002.
[4] C. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, Journal of Applied Physics. 25, (1954): p. 676.
[5] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, F. Ferrazza, Applied Physics Letters, 73, (1998), p. 1991.
[6] L. L. Kazmerski, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 150, (2006), p. 105.
[7] S. Metha, Photovoltaics International, November 2010, p. 123.
[8] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18, (2010), p. 436.
[9] W. West, Proc. Vogel Centennial Symp. Photogr. Sci. Eng. 18 (1874), p. 35.
[10] J. Moser, Monatshefte für Chemie 8 (1887), p. 373.
[11] B. O'Regan, M. Grätzel, Nature, 335 (1991), p. 737.
[12] T. Geiger, S. Kuster, J.-H. Yum, S.-J. Moon, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, F. Nüesch, Advanced Functional Materials. 19, (2009), p. 2720.
[13] H. Meier, A. Haus, Angewandte Chemie 72, (1960), p. 631.
[14] C. W. Tang, Applied Physics Letters, 48, (1986), p. 183.
[15] M. Granstrom, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, M. R. Andersson, R. H. Friend, Nature, 395 (1998), p. 257.
[16] G. Yu , J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, Science, 270, (1995), p. 1789.
[17] C.J. Brabec, S. Gowrisanker, J. J. M. Halls, D Laird, S. Jia, S. P. Williams, Advanced Materials, 22, (2010), p. 3839.
[18] R. Hany, B. Fan, F. A. Castro, J. Heier, W. Kylberg, and F. Nüesch, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip. 1049.
[19] B. Fan, F. A. Castro, B.T.T. Chu, J. Heier, D. Opris, R. Hany, F. Nüesch, Journal of Materials Chemistry, 20, (2010), p. 2952.

Angaben zum Autor

Dr. **Frank Nüesch** ist seit 1989 diplomierter Physiker ETH. 1995 promovierte er mit einer fotophysikalischen Untersuchung eines Merocyanin-Farbstoffs an der ETH Lausanne unter der Leitung von Prof. Michael Grätzel. Er ist seit 2004 Abteilungsleiter der Organisationseinheit «Funktionspolymere» an der Empa. Er koordiniert eine schweizerische Dünnfilm-Fotovoltaik-Forschungsplattform im Kompetenzzentrum der ETH für Energie und Mobilität.
Empa, 8600 Dübendorf, frank.nueesch@empa.ch

Résumé

Evaluation des cellules photovoltaïques en couche mince

Cellules solaires organiques et inorganiques à base de semi-conducteurs: tendances actuelles

Avec une croissance annuelle de l'ordre de 30 à 40 %, le secteur photovoltaïque joue un rôle important parmi les nouvelles énergies renouvelables. De nombreux matériaux et technologies font actuellement l'objet de recherches afin de permettre à l'avenir la production de cellules solaires performantes à moindre coût. Cet article offre un tour d'horizon des tout derniers développements réalisés dans le domaine photovoltaïque à l'aide de couches minces inorganiques et organiques. No

Anzeige

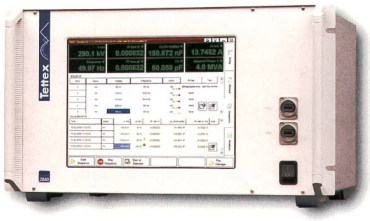
Tettex INSTRUMENTS

TAN δ MEASURING BRIDGE

HANNOVER MESSE 2011
Halle 12, Stand C 69

Perfekte Funktionalität und einfachste Bedienung: Das neue Tettex 2840 setzt als Referenzgerät den Standard für die Messung elektrischer Verluste.

- Genauigkeit tan δ 1 x 10⁻⁵ Kapazität 0.02%
- Intuitive Benutzerführung
- Grosser Touchscreen
- Breites Anwendungsfeld



www.haefely.com
sales@haefely.com

a brand of HAEFELY

Haefely is a subsidiary of Hubbell Incorporated.
High Voltage Test Business