

# Gesucht: die Wasserstoff-Solarzelle

Forscher der ETH Lausanne arbeiten an einer Solarzelle neuen Typs, die Sonnenlicht nicht in Strom, sondern in Wasserstoff umwandelt. Bei der Erforschung dieser PEC-Zelle sind erhebliche Fortschritte gelungen. Bis die Wasserstoff-Solarzelle indes reif ist für eine praktische Anwendung, haben Wissenschaftler noch eine Reihe kniffliger Probleme zu lösen. Im Zentrum steht die Frage, aus welchen Materialien PEC-Zellen von hoher Effizienz und Stabilität gebaut werden können.



EPFL-Forscher David Tilley zeigt eines von vielen beschichteten Plättchen, mit denen er und seine Kollegen Materialien für eine künftige PEC-Zelle untersuchen. Foto: BV

Benedikt Vogel, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE)

Was haben Postautos in der Region Brugg mit der neusten Generation der SBB-Minibar gemeinsam? Busse wie Minibars beziehen ihre Energie aus Brennstoffzellen, also aus Aggregaten, die Wasserstoff in elektrische Energie verwandeln. Mit dem Strom kann dann der Elektromotor der Busse bzw. eine Kaffeemaschine der Minibar betrieben werden. Wasserstoff ist ein patenter Energiespeicher. Er lässt sich aus Wasser einfach herstellen. Die im Wasserstoff gespeicherte Energie lässt sich

praktisch emissionsfrei nutzen. Daher wird in der Schweiz und international intensiv daran geforscht, welche Rolle Wasserstoff in der künftigen Energieversorgung spielen könnte.

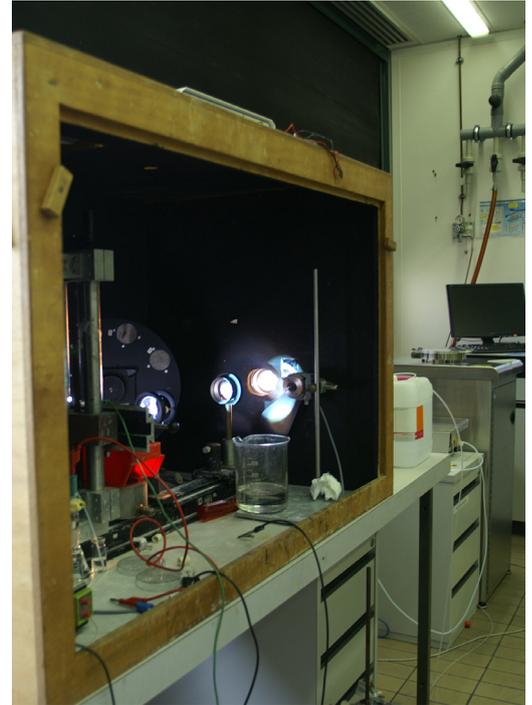
## **Wasserstoff dank Sonnenlicht**

Wasserstoff ist kein fossiler Energieträger, aber er ist deshalb nicht automatisch umweltfreundlich. Entscheidend ist vielmehr, auf welchem Weg Wasserstoff hergestellt wird. Der überwiegende Teil des heute produzierten Wasserstoffs stammt aus fossilen Quellen (per Dampfreformierung und partielle Oxidation). Eine andere Möglichkeit zur Herstellung

## 2 Gesucht: die Wasserstoff-Solarzelle

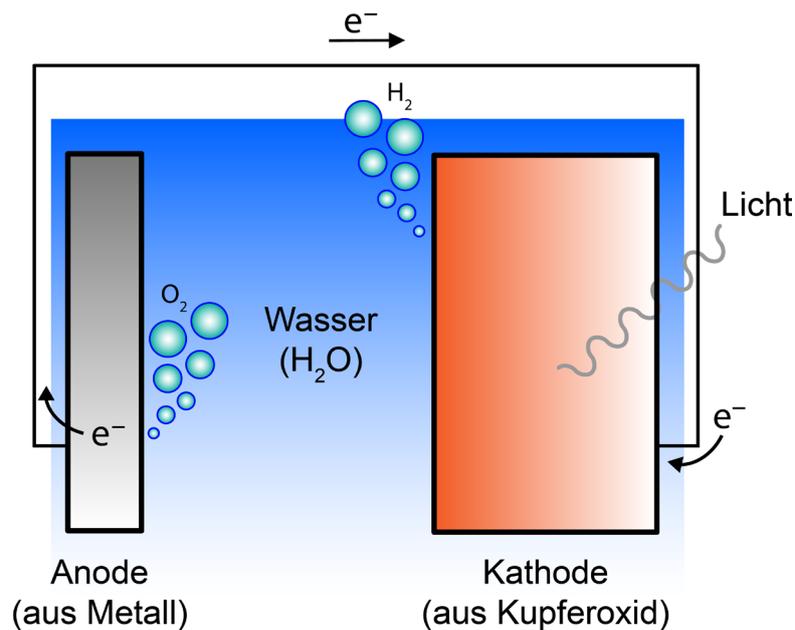
von Wasserstoff bietet die Elektrolyse: Wasser wird hier durch Zuführung von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Stammt der dafür benutzte Strom aus erneuerbaren Quellen, kann man von 'erneuerbarem' Wasserstoff sprechen. Wird Wasserstoff auf diesem Weg hergestellt, kann er einen bedeutenden Beitrag zu einer umweltfreundlichen Energieversorgung leisten. Daher sucht die Forschung nach möglichst effizienten Methoden für eine nachhaltige Wasserstoffproduktion. Dazu gehören solarthermische Verfahren, aber auch die Photoelektrolyse. Bei der Photoelektrolyse wird Wasser wie bei der klassischen Elektrolyse in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Dies geschieht aber nicht durch Zuführung von Strom, sondern direkt an einer Halbleiterschicht unter dem Einfluss des Sonnenlichts. Mittel zum Zweck ist ein neuer Typ von Solarzellen: photoelektrochemische Zellen, kurz PEC-Zellen.

„PEC-Zellen haben das Potenzial, solaren Wasserstoff günstiger und effizienter herzustellen als wenn der Wasserstoff über die klassische Elektrolyse mittels Solarstrom gewonnen wird“, sagt Dr. David Tilley, ein in den USA ausgebildeter Chemiker, der seit



Mit dieser Messbox untersuchen EPFL-Forscher die elektrischen und optischen Eigenschaften verschiedener Metalle bei Bestrahlung mit sonnenähnlichem Licht. Foto: BV

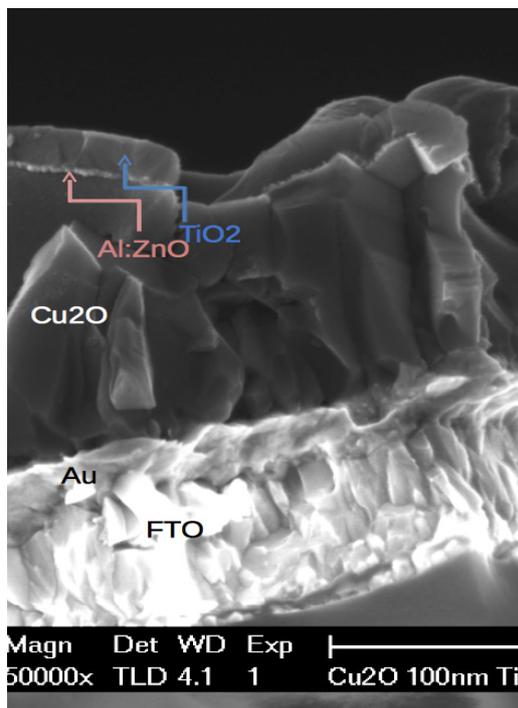
gut vier Jahren an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) forscht. Um dieses ambitionierte Fernziel zu erreichen, hat die EPFL 2007 ein Kompetenzzentrum



Schema einer Kupferoxid-PEC-Zelle: Fällt Licht auf die photoaktive Kathode, wird das Wasser in Wasserstoff (an der Kathode) und Sauerstoff (an der Anode) gespalten. Grafik: Tilley

### 3 Gesucht: die Wasserstoff-Solarzelle

trum für photoelektrochemische Solarzellen unter dem Namen 'PEChouse' in Betrieb genommen. Heute arbeiten dort sieben Wissenschaftler. Zwei weitere Forscher der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (zhaw) in Winterthur steuern Modellrechnungen zu dem Projekt bei. Hinzu kommen Beiträge internationaler Partner. 'PEChouse2' (2011-2014) wird wie schon das Vorgängerprojekt 'PEChouse1' (2007-2010) vom Bundesamt für Energie finanziert.



Das Mikroskop zeigt, wie die aus Kupferoxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) bestehende Kathode der PEC-Zelle mit zwei Schutzschichten aus Aluminium-dotiertem Zinkoxid ( $\text{Al:ZnO}$ ) und Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) gegen Korrosion geschützt wird. Foto: EPFL

Gängige Solarzellen wandeln rund 20 % der im Sonnenlicht gespeicherten Strahlungsenergie in elektrischen Strom um. Wird dieser Strom dafür genutzt, per Elektrolyse Wasserstoff zu gewinnen, können unter optimalen Bedingungen bis zu 12 % der Sonnenenergie in Wasserstoff gespeichert werden, wobei die praktisch erzielten Wirkungsgrade heute bei etwa 7 % liegen. Mit der PEC-Zellen-Technologie könnten deutlich höhere Umwandlungsraten gelingen, langfristig bis zu 30 %.

Diese Ausbeute ist gegenwärtig allerdings noch eine Vision. Die Forscher der EPFL streben im Rahmen des 'PEChouse2'-Projekts eine Umwandlungseffizienz von 10 % an. Das ist durchaus realistisch, wie die bisherigen Ergebnisse zeigen. Für PEC-Zellen von  $1 \text{ cm}^2$  Fläche sind die 10 % heute im Labormassstab erreicht, für Zellen von  $100 \text{ cm}^2$  Fläche immerhin schon 8 %. Damit erreicht die direkte solare Wasserstoffproduktion vergleichbare Effizienzen wie die Elektrolyse mit Photovoltaik-Strom, wobei bei diesem Vergleich zu bedenken ist, dass PEC noch eine Labortechnologie ist, während Photovoltaik-Strom heute im industriellen Massstab hergestellt wird. In jedem Fall ist den Lausanner PEC-Forschern ein weiterer bedeutender Zwischenschritt gelungen, nachdem die Wasserstoff-Forschung schon in den letzten Jahren rapide Fortschritte mit bemerkenswerten Steigerungen beim Wirkungsgrad erzielt hat.

#### Komplexe Anforderungen

David Tilley, Leiter des 'PEChouse2'-Projekts, führt den Besucher durch sein Labor auf dem EPFL-Campus bei Lausanne. Die mit Flaschen und Pipetten belegten Experimentiertische erinnern an ein Chemielabor. David Tilley zieht eine Schublade aus einem der Tische. Hier lagern Kunststoffschachteln, gefüllt mit glänzenden Plättchen. Von Auge kaum zu erkennen, sind die Plättchen hauchdünn mit verschiedenen Metallen beschichtet. In einer Messbox können diese Plättchen mit Licht bestrahlt werden. Hier untersuchen die Forscher, wie sich die elektrischen Eigenschaften dieser Metallplättchen unter dem Einfluss des Lichts verändern. Die Optimierung der Materialbeschichtungen ist ein entscheidender Schritt bei der Entwicklung funktionstüchtiger PEC-Zellen.

Die mit den Plättchen untersuchten Metalle sollen in Zukunft das Herzstück der PEC-Zellen bilden: die sonnenlichtabsorbierende Anode (oder Kathode), welche die Herstellung von Wasserstoff möglich macht (vgl. Textbox). Die Suche nach geeigneten photoaktiven Materialien und ihre Verarbeitung

steht heute im Zentrum der weltweiten PEC-Zellen-Forschung. Verschiedene Halbleiter kommen in Frage. Die Anforderungen an die Materialien sind hoch: Sie müssen so beschaffen sein, dass die aus ihnen gefertigte Anode (oder Kathode) die für die Wasserspaltung notwendige Spannung liefert (hinreichend grosse Bandlücke) und einen relevanten Photostrom erzeugt (hohe Solar-zu-Wasserstoff-Umwandlungseffizienz). Die Materialien – in der Regel in Kontakt mit dem Elektrolyten (Wasser) – müssen langlebig sein (Korrosionsbeständigkeit über 10 bis 20 Jahre). Ferner sollen sie ungiftig sein und eine kostengünstige Herstellung der PEC-Zellen erlauben.

### Erfolge mit Kupferoxid und Hämatit

Der Forschungsschwerpunkt der Lausanner Wissenschaftler liegt auf zwei photoaktiven Materialien: Wo die *Anode* als Absorber der PEC-Zelle ausgelegt ist, favorisieren sie Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Bei der PEC-Zelle, bei der die *Kathode* als Absorber fungiert, setzen sie auf Kupferoxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Beide Materialien sind im Prinzip für den Bau von PEC-Zellen geeignet, haben allerdings Vor- und Nachteile: Hämatit ist sehr korrosionsbeständig, erzeugt aber bei Bestrahlung mit Sonnenlicht einen relativ bescheidenen Photostrom. Gerade umgekehrt Kupferoxid: Dieser Halbleiter erzeugt einen grossen Photostrom, ist aber im Elektrolyt Wasser sehr instabil.

Die PEChouse-Forscher versuchen die Nachteile der jeweiligen Materialien durch geeignete Massnahmen wettzumachen, also dem Hämatit einen höheren Photostrom abzurufen bzw. das Kupferoxid beständiger zu machen. „Welcher Weg unter dem Strich zum besseren Resultat führt, steht zur Zeit noch nicht fest. Momentan hat von den beiden Materialien Kupferoxid die Nase vorn, weil wir damit unser Ziel von 10 % Umwandlungseffizienz erreichen und die Stabilität stark verbessern konnten“, umreisst Tilley ein zentrales Ergebnis des 'PEChouse2'-Projekts. Um die Stabilität der Kathode zu verbessern, wurde das Kupferoxid mit zwei Schutzschichten überzogen: zuerst mit einer 20 nm dicken

Schicht aus Zinkoxid (Aluminium-dotiert), dann einer 100 nm dicken Schicht aus Titandioxid. Die Forscher konnten im Laborversuch nachweisen, dass dieses Materialsystem während 8 h kaum Degradation zeigt, was auf eine hohe Stabilität auch im Langzeitbetrieb hoffen lässt. Wichtig dabei: die Schutzschichten sind so ausgelegt, dass der erzeugte Photostrom nicht geschmälert wird.

### Verbesserungen Schritt für Schritt

Für die Forscher der EPFL ist das ein Zwischenschritt. Sie wollen mit beiden Materialien weiterarbeiten, um das maximale Potenzial von Kupferoxid wie auch Hämatit für die Herstellung von PEC-Zellen auszuloten. Eine aktuelle Stossrichtung ist dabei der sogenannte 'Guest-Host-Ansatz', bei dem erst eine transparente, leitfähige Schicht auf eine poröse Trägerstruktur abgeschieden und auf diese dann das Absorbermaterial Hämatit aufgebracht wird. Mit diesem Ansatz konnten die PEChouse-Forscher die Solar-zu-Wasserstoff-Umwandlungseffizienz von Hämatit bereits erheblich steigern auf über 5 %, und selbst die 10 %-Marke liegt laut Tilley in Reichweite.

Eine weiterer Schwerpunkt der aktuellen Forschung besteht in der Entwicklung hocheffizienter Tandem-Zellen, indem beispielsweise eine PEC-Zelle mit einer 'klassischen' Solarzelle kombiniert wird. PEC-Zellen sind ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet. Zur Zeit ist noch offen, ob – und wenn ja wann – PEC-Zellen den technischen Reifegrad und die wirtschaftliche Attraktivität erreichen, um für die Wasserstoffproduktion eingesetzt werden zu können.

- » Weitere Auskünfte zum Projekt erteilt Dr. Stefan Oberholzer, Leiter des BFE-Forschungsprogramms 'Wasserstoff': [stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)
- » Weitere Fachbeiträge über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Wasserstoff finden Sie unter dem folgenden Link: [www.bfe.admin.ch/CT/H2](http://www.bfe.admin.ch/CT/H2)

### An der EPFL werden zwei Typen von PEC-Zellen erforscht

Photoelektrochemische Zellen (PEC-Zellen) zur Herstellung von Wasserstoff aus Sonnenlicht gibt es in verschiedenen Ausprägungen, abhängig davon, welches Material bzw. Materialsystem als Absorber für das Sonnenlicht herangezogen wird. Das Interesse der EPFL-Forscher richtet sich hauptsächlich auf zwei Arten von PEC-Zellen. In beiden Fällen besteht der photoaktive Teil der Zelle (Absorber) aus einem dotierten Halbleitermaterial, das heisst einem Trägermaterial, dessen elektrische Eigenschaften durch Einbringen von Fremdatomen gezielt verändert wurden:

PEC-Zelle auf der Grundlage von Hämatit: Diese PEC-Zelle verfügt über eine photoaktive Anode (aus einem n-dotierten Halbleiter wie Hämatit) und eine nicht-photoaktive Kathode (aus Metall). Anode wie Kathode befinden sich in einem Elektrolyten (Wasser). Trifft nun Sonnenstrahlung oder anderes Licht auf die Anode, wird dadurch eine Elektrolyse in Gang gesetzt, die Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff spaltet. Dieser Prozess der Wasserspaltung verläuft – vereinfacht dargestellt – wie folgt ab: Das Licht wird von der Anode absorbiert, dabei entstehen Elektronen (negative Ladungsträger) und Löcher (positive Ladungsträger). Die Elektronen werden zur metallischen Kathode geleitet und erzeugen dort – über eine Reduktion – Wasserstoff. Mit diesem Wasserstoff liegt die zuvor im Sonnenlicht gespeicherte Energie nun in Form eines speicherfähigen Gases vor. Der Sauerstoff, der bei der Wasserspaltung ebenfalls erzeugt wird, ist ein Überschussprodukt.

PEC-Zelle auf der Grundlage von Kupferoxid: Bei dieser PEC-Zelle fungiert nicht die Anode, sondern die Kathode als Absorber des Sonnenlichts. In diesem Fall besteht die Kathode aus einem p-dotierten Halbleiter (beispielsweise Kupferoxid), die Anode hingegen aus einem (nicht-photoaktiven) Metall. Auch in dieser Anordnung wird das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten und dabei die im Sonnenlicht enthaltene Energie im Wasserstoff chemisch gespeichert. BV