

Unter Stress arbeiten sie am besten:  
Mikroalgen als Wasserstofffabriken

## Wasserstoff aus eigenem Anbau

**Auf der Suche nach alternativen, umweltfreundlichen Energiequellen sind Mikroalgen viel versprechend. Sie können Wasserstoff herstellen, der in Brennstoffzellen als Stromlieferant dient. Im EU-Projekt „Solar-H“ versuchen Forscher, das System Alge zu optimieren. Das Ziel: Der Algenfermenter für den Hausgebrauch.**

Als viel versprechender Kandidat unter den Energieträgern der Zukunft bietet sich Wasserstoff an. Das einfach aufgebaute Molekül  $H_2$  hat einen hohen Energiegehalt und lässt sich relativ einfach speichern. In einer Brennstoffzelle verbindet sich der Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Luft zu reinem Wasser. Dabei

Die mikroskopisch kleinen, einzelligen Pflanzen, die auch im Gartenteich vorkommen, betreiben Photosynthese, verwandeln also Lichtenergie in chemische Energie (Zucker). Zwei Enzymsysteme sind hauptsächlich daran beteiligt: Photosystem 2 (PS2) spaltet Wasser, Photosystem 1 (PS1) leitet die Elektronen, die letztlich zur Umwandlung von  $CO_2$  in Zucker benötigt werden, lichtgetrieben weiter. Das allein würde die Alge natürlich noch nicht besonders interessant machen; zur Photosynthese sind alle grünen Pflanzen in der Lage. *Chlamydomonas reinhardtii* hat aber ein weiteres Ass im Ärmel: Die Fähigkeit, mittels eines bestimmten Enzyms (Hydrogenase) reinen Wasserstoff herzustellen, bis zu 5000 Moleküle  $H_2$  pro Sekunde, praktisch als Abfallprodukt der Photosynthese (Abb. 2).

Nun hat die Sache aber einen Haken: Geht es der Alge gut, bildet sie die Hydrogenase nicht, also auch keinen Wasserstoff. Nur wenn man sie auf Diät setzt, ihr einen wichtigen Nährstoff wie etwa Schwefel entzieht und so ihr Wachstum hemmt, bildet sie Wasserstoff, um die überschüssige Energie aus der Photosynthese loszuwerden. Nur unter diesen eigentlich ungünstigen Bedingungen

veratmet die Alge auch mehr Sauerstoff als sie durch die Photosynthese selbst produziert. Das ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass die Hydrogenase funktioniert. Beim Kontakt mit Sauerstoff wird das Enzym nämlich zerstört. Unter diesen Diätbedingungen bringt die Alge allerdings nur einen Bruchteil ihrer maximal möglichen  $H_2$ -Menge zustande.

In einem geschlossenen System und bei strenger Diät funktioniert ein entsprechender Algenreaktor schon. Allerdings ist er nichts für den Hausgebrauch.

Zwar liegt der Wirkungsgrad der Alge mit circa fünf bis zehn Prozent schon ungefähr so hoch wie bei der Wasserstoffherzeugung mittels Strom aus Solarzellen. Weil die tiefgrünen Algen aber Licht brauchen, kann man sie in höchstens 20 Zentimeter tiefen Gefäßen halten. Um einen Dreipersonenhaushalt mit Strom aus einer Brennstoffzelle zu versorgen, würde man rund 50 Kubikmeter Algenkultur benötigen, die

Forscher basteln aus Bauteilen der Alge eine Biobatterie

eine Fläche von etwa 250 Quadratmetern einnehmen würden. Das System muss also „getunt“ werden. Auf dem Weg zur effizienten Nutzung des genialen Prinzips beschreiten die Forscher des EU-Projekts „Solar-H“ (s. Info), das am Lehrstuhl von Prof. Dr. Matthias Rögner von Prof. Dr. Thomas Happe koordiniert wird, zwei verschiedene Wege.

Zum einen bedienen sie sich der „Bauteile“ dieser und anderer Algen und basteln daraus ein semi-artifizielles System, oder einfacher: eine Biobatterie (Abb. 3). „Der Vorteil ist, dass man darin die Einzelteile verschiedener Organismen kombinieren kann“, erklärt Prof. Rögner. Das

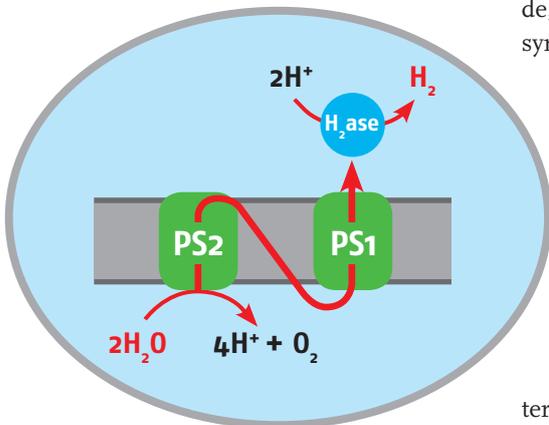
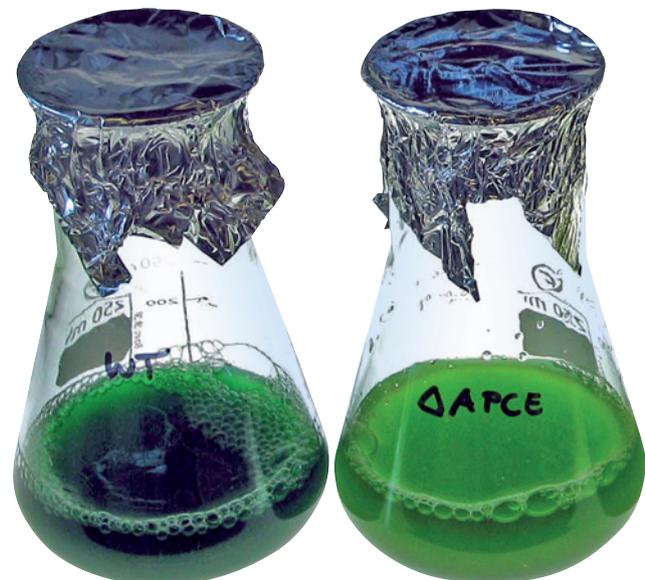


Abb. 2: Als Abfallprodukt entsteht in der Alge unter Stressbedingungen Wasserstoff.

wird Strom erzeugt, der sich beliebig nutzen lässt. Im Kleinen funktioniert das schon, etwa in Autos.

So weit so gut, aber woher soll der notwendige Wasserstoff kommen? Noch gewinnt man ihn durch Wasserspaltung mittels Strom, der aus fossilen Brennstoffen hergestellt wird. Diese wiederum sind begrenzt und bei ihrer Verbrennung wird  $CO_2$  frei – es ist nichts gewonnen. Für die Zukunft haben Biologen aber einen kleinen Helfer ausgemacht: Die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii*.



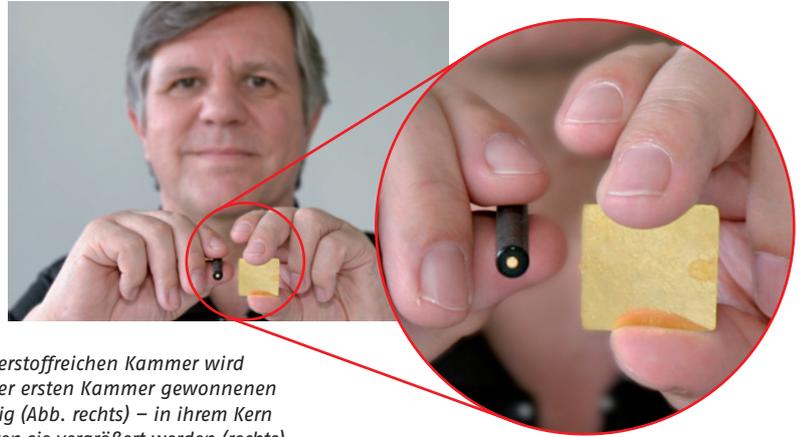
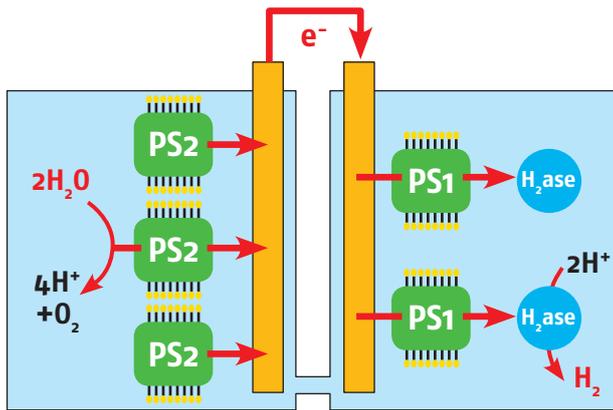


Abb. 3: Funktionsprinzip der Biobatterie (Abb. links). In der linken, sauerstoffreichen Kammer wird Wasser gespalten. In der rechten Kammer wird mit der Energie der in der ersten Kammer gewonnenen Elektronen Wasserstoff gebildet. Die Elektroden der Biobatterie sind winzig (Abb. rechts) – in ihrem Kern befindet sich eine Goldschicht (links); für eine spätere Anwendung könnten sie vergrößert werden (rechts).

System besteht aus zwei voneinander getrennten Kammern. In der ersten ist PS2 auf einer Goldelektrode fixiert und spaltet Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, wobei Elektronen frei werden – in der Bochumer Biobatterie mit nur einer Monolage PS2 auf der Elektrode, die aber ca. 1000mal so viel Wasser spaltet wie in Publikationen anderer Forscher bislang beschrieben. Während der für die Hydrogenase lebensgefährliche Sauerstoff in dieser ersten Kammer bleibt, wandern die Elektronen über einen Draht in die zweite Kammer. Dort sind PS1 und die Hydrogenase ebenfalls auf einer Goldoberfläche fixiert. Hier werden je zwei Wasserstoffionen (Protonen) aus dem gespaltenen Wasser mit zwei Elektronen zu einem Molekül reinen Wasserstoffs zusammengesetzt (s. Abb. 3).

Das System dient den Forschern vor allem als Experimentierstübchen. Hier können

sie veränderte Enzyme einbauen und die Effizienz des Gesamtsystems testen, ohne Rücksicht auf die komplizierten Abläufe in einem lebenden Organismus nehmen zu müssen. So ist es ihnen etwa schon gelungen, die Elektronenübertragung durch PS2 in der ersten Kammer zu verbessern, indem sie das Enzym nicht direkt auf die Elektrode aufgebracht, sondern zwischen Enzym und Elektrode eine Polymerschicht gesetzt haben. Diese Schicht enthält „Elektronenfänger“, die für eine noch bessere Übermittlung sorgen (Abb. 4).

Im nächsten Schritt werden die Forscher eine andere Hydrogenase testen. Prof. Dr. Bärbel Friedrich von der Humboldt-Universität Berlin hat eine sauerstoffunempfindliche Hydrogenase entdeckt. Der Pferdefuß: Sie stellt nur ein Hundertstel der Wasserstoffmenge her, die die sauerstoffempfindliche „Turbo-Hydrogenase“ der Grünalge in derselben Zeit produziert.

Aber zu Testzwecken wird sie in die Biobatterie eingebaut. Eine Variante der Hydrogenase ist sogar direkt an das PS1 angeschlossen, so dass Elektronen zwischen den beiden Enzymen direkt weitergegeben werden können. Auch davon erhoffen sich die Forscher eine Steigerung der Effizienz. „Die Biobatterie erlaubt uns, verschiedene Komponenten auszuprobieren, bevor wir sie in natürliche Systeme wie Cyano-

bakterien (Blaualgen) zurückverlagern“, fasst Prof. Rögner zusammen. Die entscheidenden Vorteile lebender Zellen – die Fähigkeit zur selbstständigen Vermehrung, die sie langlebiger und kostengünstiger macht als das semi-artifizielle System – kann die Biobatterie nicht schlagen. Sie könnte allerdings als Sensor interessant werden. Die Hydrogenase funktioniert nämlich auch umgekehrt und kann Wasserstoffmoleküle in zwei Protonen zerlegen, wobei zwei Elektronen frei wer-

Genetisch veränderte Algen sind heller grün und lassen mehr Licht durch

den. Im Brennstoffzellen-Auto zum Beispiel könnte man auf diese Weise Lecks im Tank detektieren, die wegen der Explosionsgefahr von Wasserstoff gefährlich sind.

Der andere Weg, den die Forscher verfolgen, ist die Verbesserung des natürlichen Systems, wozu die Forscher an allen nur möglichen Stellschrauben drehen. Die Hydrogenase der Grünalge lässt sich zum Beispiel auch in Blaualgen einbauen, die als Einzeller noch einfachere Organismen sind als die kernhaltigen (eukaryotischen) Grünalgen. Verändert man die Blaualgen genetisch so, dass ihre lichteinfangenden Antennen kleiner sind, haben sie eine hellere Farbe (Abb. 1). Das hat den Vorteil, dass sie mehr Licht zu den tiefer im Fermenter liegenden Artgenossen durchlassen. Zwar ist der Lichtfang der einzelnen Zelle dadurch weniger effizient, aber „das Lichtangebot durch die Sonne ist in der Regel sowieso eher zu groß als zu klein“, erklärt Prof. Rögner. Zu viel Licht zerstört

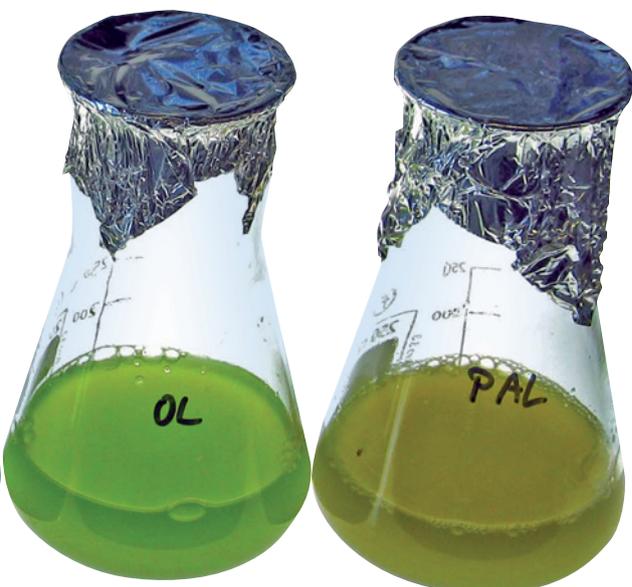


Abb. 1: Flaschen mit Algenkulturen. Mutanten haben eine hellere Farbe und lassen dadurch mehr Licht in tiefere Algenschichten durch.

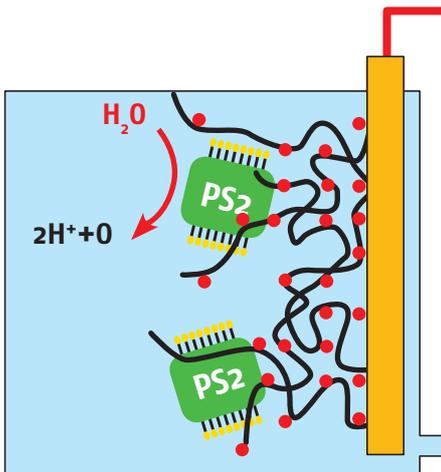


Abb. 4: Der Flachbettfermenter fasst fünf Liter Algenkultur. Im Gegensatz zu säulenförmigen Fermentern bietet er mehr Oberfläche und somit eine gleichmäßigere Verteilung des Lichts.

sogar das PS2, das sich bei Überforderung erwärmt und zugrunde geht. Wichtig ist also die gleichmäßige Verteilung des wohldosierten Lichts. Um sie zu bewerkstelligen, haben die Biologen einen neuartigen Fermenter entwickelt, der flach statt wie bisher rund ist und nur einen Durchmesser von fünf Zentimetern hat. Mit einer Hattinger Firma hat Rögner's Team den Fermenter entwickelt (Abb. 5), der aus industriell gefertigten Bauteilen besteht und daher weitaus kostengünstiger zu haben ist als die bislang genutzte Laborvariante, eine übermannshohe runde Säule mit zahllosen Mess- und Kalibrierapparaturen. „So viel Technik brauchen wir gar nicht mehr, wenn wir einmal wissen, wie wir es machen müssen“, so Rögner. Da die Reinigung des neuen Fermenters chemisch statt im Autoklaven mittels heißem Wasserdampf funktioniert, muss das Material auch nicht so extrem

hitzebeständig sein. Es genügt Plexiglas. Derzeit kostet der neue Fermenter weniger als zehn Prozent des Preises eines Labor-Fermenters und wird weiter optimiert. „Wenn erstmal ein paar Hundert solcher Geräte verkauft sind, wird der Preis auch weiter sinken“, ist Rögner zuversichtlich. Um es den Blaualgen noch leichter zu machen, haben die Forscher sich auf die Suche nach ihrer liebsten Lichtwelle gemacht und wurden im Roten fündig. Optimal nutzen die Blaualgen das Licht roter Leuchtdioden – leider nicht derer, die es massenhaft billig zu kaufen gibt, sondern solcher, deren Wellenlänge weiter im roten Bereich liegt (Abb. 5). „Es lohnt sich trotzdem, diese Leuchtdioden zum zurzeit zehnfachen Preis einzusetzen, denn selbst wenn die Effizienzsteigerung bei der Wasserstoffproduktion dadurch nur zwei- oder dreimal höher ist, macht das einen erheblichen Unterschied“, so Rögner. Seine Mitarbeiter beschäftigen sich außerdem intensiv mit dem Innenleben der Mikroalgen, um mögliche Ansatzpunkte für

Verbesserungsmöglichkeiten im Innenleben der Mikroalgen

weitere Verbesserungen zu finden. Mittels Proteomanalyse – der Untersuchung aller in der Zelle vorhandenen Proteine zu einem bestimmten Zeitpunkt unter vorgegebenen Bedingungen – hat sich schon herausgestellt, dass es verschiedenen zusammengesetzte PS2-Kopien gibt, die mehr oder weniger lichtresistent sind und unterschiedlich effizient Elektronen übertragen. Auch andere Reaktionen der

Zellen auf verschiedene Arten von Stress können interessant sein. Wichtigstes Ziel ist es jedoch, die Hydrogenase der Grünalge sauerstoffunempfindlich zu machen. Das würde den Betrieb der grünen Was-

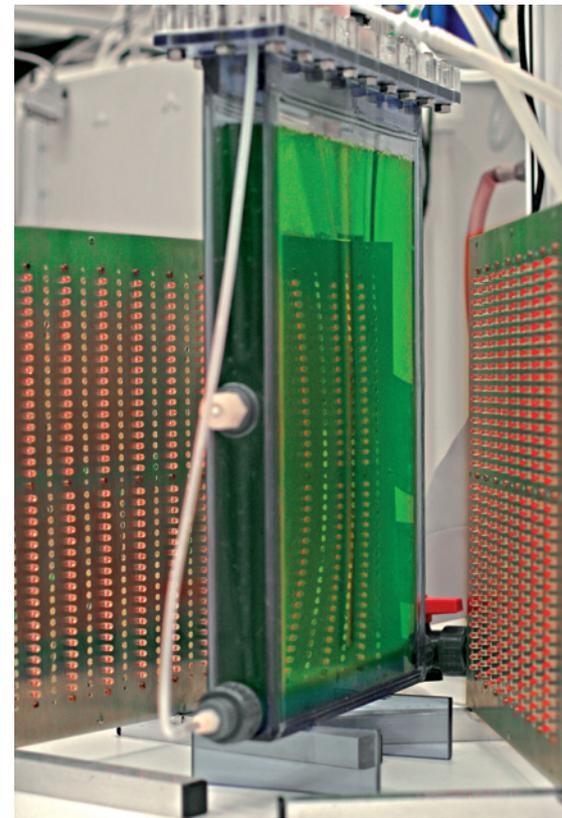


Abb. 5: Rote Leuchtdioden mit einer Wellenlänge von 720 Nanometer sind ganz nach dem Geschmack der Cyanobakterien. Ihre Lichtenergie lässt sich optimal verwerten.

serstofffabrik nicht nur bei Normaldruck und -temperatur, sondern auch an der Luft ermöglichen.

Fest steht allerdings: Sogar unabhängig von ihrer Rolle als Wasserstoffproduzenten sind Mikroalgen gute Energielieferanten. Ihr Brennwert liegt zwischen dem von Braun- und Steinkohle, ihr Wachstum ist zehnfach schneller als das von Schilfgras, alle zehn bis zwölf Stunden verdoppelt sich ihre Masse. Aber die Alge wäre nicht die Alge wenn sie nicht auch hier einen Haken hätte: Die Biomasse vom Wasser zu befreien ist zurzeit noch zu kostenintensiv.

Kontakt: Prof. Dr. Matthias Rögner, Prof. Dr. Thomas Happe, Biochemie der Pflanzen, Fakultät für Biologie und Biotechnologie, matthias.roegner@rub.de, thomas.happe@rub.de

## info<sup>1</sup>

### Solar-H verbindet molekulare Genetik und biomimetische Chemie

Das Projekt mit dem offiziellen Titel „Linking molecular genetics and bio-mimetic chemistry – a multidisciplinary approach to achieve renewable hydrogen production“ wird von der Universität Uppsala (Prof. Dr. Stenbjörn Styring, Schweden) koordiniert. Neben der Ruhr-Universität Bochum und dem Max-Planck Institut für bioorganische Chemie (Mülheim) in Deutschland sind Partner aus Frankreich (Centre d'Etudes Atomique, Université Paris-Sud), Ungarn (Biological Research Centre Szeged), der Schweiz (Universität Genf) und den Niederlanden (Wageningen University) beteiligt. Das Projekt wird für zunächst drei Jahre mit 1,8 Mio. Euro gefördert. An der Ruhr-Universität Bochum ist es eingebettet in mehrere andere, vom Bundesforschungsministerium (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekte. Informationen in Internet: <http://www.cordis.lu/nest>, <http://www.rub.de/bioh2/>