

Thema: Entwicklung | Autoren: Matthias Rögner, Thomas Happe

GRÜNER KRAFTSTOFF

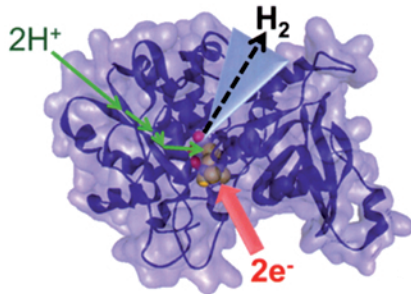
Photobiologische H₂-Produktion durch Mikroalgen

Abb. 1: Molekulares Hydrogenase-Modell mit Proteinrückgrat (blau) und katalytischem Zentrum (Kugelmodell) [Abb.1+2; Quelle: Ruhr-Universität Bochum]

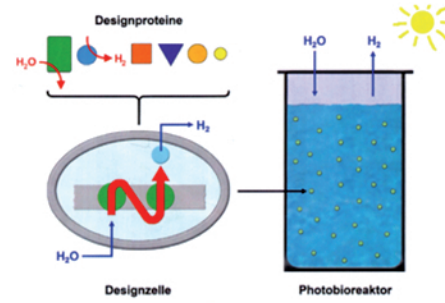


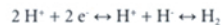
Abb. 2: Illustration der Projektstrategie: Optimierte Proteine werden in einen Design-Organismus überführt, der aus Wasser in einem optimierten Photobioreaktor Wasserstoff erzeugt

Es könnte so einfach sein: Mikroalgen liefern uns den Wasserstoff für die Zukunft. Alles, was wir dafür benötigen, ist Licht und Wasser. Der Rest läuft ganz automatisch bei dieser so genannten photobiologischen H₂-Produktion. Leider ist es aber nicht ganz so einfach. Die Ruhr-Universität Bochum hat sich in den letzten Jahren zu einem Zentrum für photosynthesebasierte Wasserstoffproduktion entwickelt, wozu insbesondere die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Biologen, Chemikern, Ingenieuren und Verfahrenstechnikern wesentlich beigetragen hat. Momentan wird noch daran gearbeitet, die Ergiebigkeit des Produktionsprozesses um den Faktor 100 zu steigern.

Eine in den letzten Jahren verstärkt diskutierte Möglichkeit zur regenerativen Erzeugung von Wasserstoff ist die Nutzung biologischer Prozesse. Eine außerordentliche Vielzahl von Mikroorganismen ist dazu in der Lage, H₂ bei Umgebungstemperaturen und -drücken zu bilden. Das Gas ist bei einigen Bakterienarten ein natürliches Produkt bei der Vergärung von organischem Substrat. Andere Mikroorganismen nutzen im Rahmen der Photosynthese Lichtenergie zur H₂-Bildung. Letzteres Verfahren wird als biologische Photolyse von Wasser bezeichnet und kommt der Vision einer umweltfreundlichen regenerativen Energieerzeugung am nächsten.

Mittelfristig ist für diese so genannte Bio-H₂-Produktion ein vergleichbares Entwicklungspotential wie von Biogasanlagen vorstellbar, auch wenn ein derartiges H₂-Herstellungsverfahren hinsichtlich seiner Anwendbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit derzeit noch in den Kinderschuhen steckt. Eine großindustrielle Kultivierung photosynthetischer Organismen ist technisch nicht ganz einfach. Ob biologisch hergestellter Wasserstoff langfristig einen entscheidenden Beitrag zur Energieversorgung leisten wird, ist somit derzeit kaum absehbar. Hierbei spielen viele Faktoren eine Rolle, angefangen bei der (genetischen) Optimierung der mikrobiellen H₂-Produzenten über die Bereitstellung von Substrat bis hin zur Entwicklung geeigneter großtechnischer Anlagen.

BIO-KATALYSATOR HYDROGENASE Die zentralen Bausteine, die für eine photobiologische H₂-Produktion notwendig sind, sind die so genannten Hydrogenasen (Abb. 1). Dies sind biologische Katalysatoren (Enzyme), die die chemische Sauerstoffreaktion überhaupert erst ermöglichen: die Übertragung von Elektronen (e⁻) auf Protonen (H⁺). Über einen einzigartigen heterolytischen Mechanismus bildet sich dabei molekularer Wasserstoff (H₂):



Die leistungsfähigsten Enzyme können dabei bis zu 9.000 Moleküle Wasserstoff pro Sekunde produzieren.

Aus biotechnologischer Sicht sind Hydrogenasen sowohl für die H₂-Erzeugung in einem (semi-)artificialen System als auch für die H₂-Oxidation in (Bio-) Brennstoffzellen interessant, beispielsweise als Ersatz für das teure und seltene Platin. Die Enzyme sind auf Graphit- oder Goldelektroden aktiv und können Elektronen mit ihnen austauschen. Außerdem sind Hydrogenasen sehr stabil und können über mehrere Wochen verlässlich als Katalysator arbeiten. Das vorrangigste Problem bei der Nutzung dieser natürlichen Katalysatoren ist allerdings ihre Sensitivität gegenüber molekularem Sauerstoff (O₂) und Kohlenmonoxid (CO). Für den Einsatz der Enzyme zur (groß-)industriellen H₂-Erzeugung muss diese O₂-Empfindlichkeit demnach besonders berücksichtigt werden, da sie die kostengünstige Herstellung großer Mengen Hydrogenase einschränkt.

Erfreulicherweise gelang hier vor kurzem der AG Photobiotechnologie in Bochum ein Durchbruch: Die Wissenschaftler kamen dem Mechanismus der Inaktivierung von Hydrogenasen auf atomarer Ebene auf die Spur. Offensichtlich bindet das Sauerstoffmolekül genau wie das eigentliche Substrat, der Wasserstoff, an das aktive Zentrum der Hydrogenase. Auf diese Weise entstehen anscheinend aggressive „reaktive“ Sauerstoffvarianten (reactive oxygen species: ROS), indem eine Übertragung von Elektronen auf den gebundenen Sauerstoff

stattfindet. Dies hat zur Folge, dass diese ROS in einer zweiten Reaktion Teile des katalytischen Zentrums der Hydrogenase attackieren. Mit diesem neuen Wissen kann nun eine gezielte Modifikation der Hydrogenase hinsichtlich einer höheren Toleranz gegenüber Luftsauerstoff angegangen werden.

ANAEROBE H₂-PRODUKTION Einige Arten von einzelligen Grünalgen (z. B. *Chlamydomonas reinhardtii*) sind schon jetzt in der Lage, H₂ mit Hilfe der photobiologischen Wasserspaltung zu bilden. In ihnen ist die zunächst paradox anmutende Kopplung einer extrem O₂-empfindlichen Hydrogenase an die O₂-produzierende photosynthetische Elektronentransportkette möglich, weil die H₂-Produktion durch Schwefelmangel ausgelöst wird und unter Luftabschluss erfolgt. Durch das Fehlen des Nährstoffes Schwefel ändert sich der Zellstoffwechsel drastisch. Die Photosyntheserate sinkt auf unter 10 % der ursprünglichen Aktivität, während die Zellatmung, bei der Sauerstoff verbraucht wird, gleich bleibt. Dadurch stellen sich anaerobe zelluläre Bedingungen ein, und der Katalysator Hydrogenase wird gebildet. Dieser Zustand kann für eine gewisse Zeit (10 bis 14 Tage) aufrechterhalten werden. Trotz dieser Einschränkungen handelt es sich bei diesem System um das bisher leistungsfähigste zur biologischen H₂-Erzeugung. Man kann hiermit bis zu 5 ml H₂ pro Liter Algensuspension und Stunde erreichen.

Berechnungen innerhalb des BMBF-Vorhabenprojektes H₂-Designzellen haben jedoch ergeben, dass mindestens die hundertfache Menge H₂ pro Stunde erzeugt werden müsste, um Biowasserstoff in Anbetracht des gegenwärtigen H₂-Weltmarktpreises konkurrenzfähig zu machen (AG Wagner, RUB). Um einen solch hohen Wert erreichen zu können, müssten zahlreiche Verfahrensschritte optimiert werden, die sowohl biologische (Design einer neuen Zelle, die auf H₂-Produktion optimiert ist) als auch technische Parameter (Optimierung der Effizienz unter gleichzeitiger drastischer Senkung der Produktionskosten von Photobioreaktoren) umfassen.

Um das gesamte Potential der Photosynthese für die biologische H₂-Produktion tatsächlich auszunutzen zu können, müssen folgende Maßnahmen verfolgt werden:

- 1) Die Hydrogenase muss so modifiziert werden, dass sie auch unter atmosphärischen Bedingungen (21 % Sauerstoff) optimal funktioniert.
- 2) Die Kopplung der Hydrogenase an die Photosynthese muss so optimiert werden, dass ein Großteil der Elektronen aus der photosynthetischen Wasserspaltung direkt auf die Hydrogenase übertragen wird, anstatt für die Produktion von Biomasse (CO₂-Fixierung zum Aufbau von Zellbestandteilen und zur Vermehrung) verwendet zu werden.
- 3) Man muss die zentralen biologischen Komponenten der photosynthetischen Wasserstoffherzeugung in einer möglichst einfach aufgabenden und leicht zu modifizierenden „Designzelle“ vereinen, die sowohl robust und anpassungsfähig gegenüber äußeren Faktoren ist, als auch leicht in (späterer) Massenkultivierung zu halten ist.
- 4) Es müssen sehr kostengünstige Photobioreaktoren aus Standardmaterialien entwickelt werden, welche niedrig im Preis, modular aufgebaut und für den Lichteintrag optimiert sind, um möglichst hohe Zelldichten (direkt korreliert mit hoher H₂-Produktion pro Volumen) zu erreichen.

H₂-DESIGNZELLE IN PHOTOBIOREAKTOR Am Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen wird im Rahmen des H₂-Designzellen-Projekts intensiv an der Optimierung einer derartigen Design-

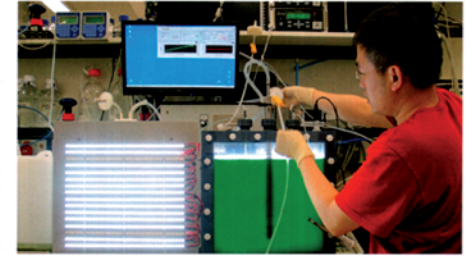


Abb. 3: Entwickler Flachbett-Photobioreaktor (m.) [Quelle: Ruhr-Universität Bochum]

zelle gearbeitet, da allein durch sie der Faktor 100 ermöglicht werden kann. Wir verwenden hierfür die cyanobakterielle Modellzelle *Synechocystis 6803*, da sie sehr gut charakterisiert ist, leicht genetisch verändert werden kann und hinreichend robust ist. Allerdings besitzt sie keine leistungsfähige Hydrogenase, so dass diese – nach Erreichen der O₂-Toleranz – von Grünalgen importiert werden muss. Die Existenz O₂-toleranter Hydrogenasen in anderen Bakterien – allerdings mit deutlich geringerer Aktivität – zeigt, dass dieses Ziel realistisch ist.

Eine deutliche (ca. 10-fache) Erhöhung der zellulären Wasserspaltungsaktivität konnte bereits durch Eingriffe in den photosynthetischen Elektronentransport erreicht werden. Dies geht insbesondere auf die Erzeugung und Verwendung von Mutanten mit deutlich reduzierten lichtabsorbierenden Antennen zurück. Die AG Rögner konnte zeigen, dass diese Reduktion zusätzlich eine wesentlich höhere Wachstumsdichte der Zellen im Photobioreaktor ermöglicht, da der Effekt der gegenseitigen Beschattung der Zellen minimiert wird. Im folgenden Schritt müssen nun die Elektronen auf die importierte Hydrogenase „umgeleitet“ werden, so dass die neue Designzelle hauptsächlich als lebender „Biokatalysator“ und weniger als Biomasserzeuger fungiert.

Auf Seite des Photobioreaktors konnte bereits durch die Entwicklung eines modularen Flachbettreaktors aus Standardmaterialien gemeinsam mit der Firma KSD (s. Abb. 3) ein wesentliches Ziel erreicht werden: Die Reduktion der Herstellungskosten auf unter 10 % herkömmlicher Reaktoren. Gegenwärtig wird der optimierte Lichteintrag mit der Etablierung kontinuierlicher Kulturbedingungen kombiniert. Hierbei können die Kulturen über Monate bei konstanten Bedingungen gehalten werden, was wiederum eine konstante zukünftige H₂-Produktion der Zellen gewährleisten soll. ||



Autoren

Prof. Dr. Matthias Rögner
Lehrstuhl für Biochemie der
Pflanzen, Ruhr-Universität Bochum
→ matthias.roegner@rub.de



Prof. Dr. Thomas Happe
Lehrstuhl für Biochemie der
Pflanzen, Ruhr-Universität Bochum
→ thomas.happe@rub.de