

Künstliche Fotosynthese – ein Meilenstein für die zukünftige Energieversorgung auf der Erde?

„Ihr ganzes dynamisches Industriepotential wird eines Tages zusammenbrechen. Sobald die Kohlenlager erschöpft sind““Womit geht es dann weiter?“, fragte Pencroff. „Mit Wasser“, sagte Cyrus Smith, „mit Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern....Das Wasser ist die Kohle der Zukunft“. (Jules Verne, die geheimnisvolle Insel; 1874)

Jules Verne war es wohl bereits vor über 100 Jahren bewusst dass die Ressourcen der Erde endlich sind und er war ein genialer Science-Fiction Autor. Der Gedanke, Energie mit Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen, ist also nicht neu.

Weshalb aber wurde dieser Gedanke lange Zeit nicht weiter verfolgt?

In erster Linie gaben die leichte Verfügbarkeit und die scheinbar unendlichen Vorräte an fossilen Brennstoffen keinen Anlass, um sich mit der Wasserspaltung ernsthaft zu befassen, die einen hohem energetischen Aufwand bedeutet. Unsere aktuelle Energieerzeugung beruht zum größten Teil auf dem Verbrennen gespeicherter Sonnenenergie, nämlich dem Verbrennen von Erdgas, Erdöl und Kohle. Das unbedachte und zeitweise gedankenlose Verschwenden dieser während Jahrtausende entstandener Rohstoffe innerhalb kurzer Zeit fordert jetzt seinen Tribut: durch Ansteigen der Treibhausgase in unserer Atmosphäre bedroht der Klimawandel das Leben auf der Erde. Verantwortlich ist in erster Linie Kohlendioxid CO₂, welches beim Verbrennen der Energielieferanten entsteht. Die Welt sieht nicht untätig zu: In Klimakonferenzen wird beraten, alternative Energiequellen wie Wind und Wasser werden wieder und verstärkt genutzt, Solarzellen liefern Strom, Bauten werden isoliert und vieles mehr wird erprobt. Das alles ist gut, aber bei weitem nicht genug Welche Wege aus dieser Sackgasse gibt es, lässt sich ausreichend Energie auch ohne CO₂-Entstehung gewinnen? Als Ausweg bietet sich die bereits von Jules Verne prognostizierte Wasserstoffwirtschaft an.

Wasserstoff

Wasserstoff ist ein hervorragender Energielieferant und bei der Verbrennung entsteht ganz einfach Wasser. Wasserstoff ist das häufigste Element im Weltall. Auf der Erde liegt sein Anteil in der Erdkruste bei etwa 2,9 % und liegt zum größten Teil in Form von H₂O vor, steht also unbegrenzt zur Verfügung.

Heute wird Wasserstoff hauptsächlich in der Chemischen Industrie benötigt. Als direkter Energielieferant wird er zum Betreiben von Brennstoffzellen benutzt. Er lässt sich in speziellen Verbrennungsmotoren direkt verbrennen, zur Stromgewinnung, für Kraftfahrzeuge (BMW) oder um Wärme zu erzeugen. Direkteinspeisung in das Erdgasnetz ist möglich, aber nur bis zu maximal 5%.²⁴

Ein großer Teil des derzeit benötigten Wasserstoffs

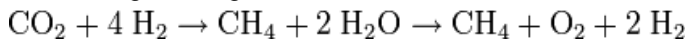
- entsteht bei diversen chemischen Verfahren als Neben- oder Koppelprodukt (PVC-Herstellung, Rohölraffinerie) und
- wird durch Reformierung von Erdgas oder
- seit etwa 80 Jahren durch Elektrolyse von Wasser gewonnen; in letzter Zeit verstärkt, wenn bei Wasser-, Wind- und Solaranlagen überschüssiger Strom anfällt.
- Daneben gibt es noch weitere, seltener genutzte Verfahren zur Wasserstoffgewinnung, die ebenfalls alle mit sehr hohem Energieaufwand verbunden sind und häufig CO₂ erzeugen.

Kurz gesagt: die heutige Wasserstoffproduktion ist für Energiegewinnung nicht ausreichend und vor allem zu teuer!

Die Lösung wird die zwar komplizierte, aber Erfolg versprechende Möglichkeit „Künstliche Fotosynthese“ sein. Denn: In 1 Stunde trifft mit dem Sonnenlicht mehr Energie auf die Oberfläche der Erde als wir Menschen in 1 Jahr verbrauchen. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie ist in Zukunft der einzig gangbare Weg, um den Energiebedarf der Menschheit zu decken und ist schon jetzt ein wesentliches Element bei der Umsetzung der Energiewende sein..

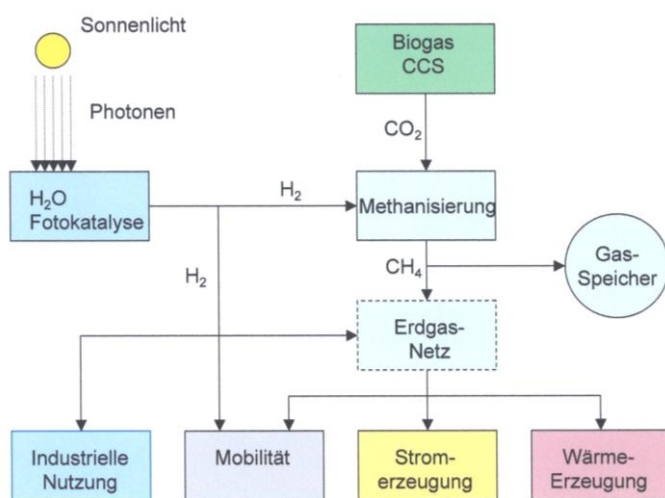
Allerdings ist die Handhabung von Wasserstoff aufwendig und schwierig und damit sehr teuer. Speicherung ist nur möglich unter hohem Druck, bei sehr tiefen Temperaturen (unter -252°C) als Flüssigkeit oder in Form von Metallhydriden. Zum anderen durchdringen die kleinen H_2 -Moleküle herkömmliche Dichtungen und Leitungen und wirken korrosiv.

Doch es gibt eine elegante Möglichkeit der Speicherung: die **Methanisierung von Wasserstoff**. Der seit dem 19. Jahrhundert bekannte Sabatier-Prozess findet nach folgender Netto-Reaktionsgleichung statt:



Dieses Verfahren wurde in den letzten Jahren verbessert und technisch umgesetzt in Zusammenarbeit der Firma SolarFuel, des Forschungsinstituts Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). Seit März 2011 arbeitet die erste Anlage dieser Art mit einer Leistung von 25 kW in der Energielandschaft Morbach.

In diesem Jahr wurde die erste größere Methanisierungs-Anlage der Firma SolarFuel^{16,17} im brandenburgischen Hybridkraftwerk Enertrag¹⁸ in Dauerthal, Uckermark in Betrieb genommen. Mit überschüssigem Windstrom erzeugtes Wasserstoffgas wird hier zu Methangas umgesetzt. Dabei handelt es sich um ein „dynamisches“ Verfahren, das sich sozusagen der jeweils anfallenden Wasserstoffmenge anpasst, so dass kein Zwischenspeicher für Wasserstoff erforderlich ist. Bereits begonnen wurde mit dem Bau einer Großanlage im niedersächsischen Werlte zur Erzeugung von „e-gas“ für die Firma Audi.¹⁹ Die Anlage wird ebenfalls von SolarFuel gebaut und soll pro Jahr ca. 1.000 t e-gas produzieren, wobei 2.800 t CO_2 gebunden werden. Das dazu erforderliche Kohlendioxid CO_2 kann aus Biogasanlagen stammen, durch Auswaschen aus der Atmosphäre gewonnen werden oder aus CCS-Anlagen (Carbon Capture and Storage)²⁰. Vor allem sollte das im CCS-Verfahren gewonnene CO_2 besser zur Methanisierung verwendet werden als dass man es – wie geplant – in Gaskavernen unterirdisch aufbewahrt.

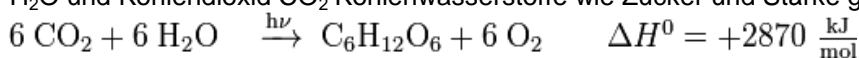


Die Umwandlung von überschüssigem Wind- und Solarstrom über Elektrolyse in Wasserstoff und anschließende Weiterverarbeitung in Methangas läuft unter dem Stichwort „Strategieplattform Power to Gas“.²¹ Die Vorteile liegen auf der Hand: Strom wird in Form von Methangas z.B. in Erdgasspeichern speicherbar und durch die bereits vorhandene Erdgasinfrastruktur kann diese Energie für Monate vorrätig gehalten werden. „Die rechnerische Speicherreichweite des Erdgasnetzes liegt bei 2000 Stunden, die des Stromnetzes bei 0,6 Stunden“ (Stefan Rieke, SolaFuel GmbH)

Bild 1: Schema für direkte Gewinnung von Sonnengas

Fotosynthese - Die natürliche Fotosynthese

Bei der natürlichen Fotosynthese der Pflanze wird Sonnenenergie in chemische Energie umgewandelt: mit Sonnenlicht als Energielieferant werden in einem mehrstufigen Prozess aus Wasser H_2O und Kohlendioxid CO_2 Kohlenwasserstoffe wie Zucker und Stärke gebildet:



Die Vorgänge sind kompliziert und der Wirkungsgrad liegt bei etwa 1%. Denn: Die Pflanze hat es einfach nicht eilig – die Menschheit schon!

Die Künstliche Fotosynthese - Wasserstoffgewinnung mit Sonnenlicht als Energielieferant

Der Begriff „Künstliche Fotosynthese“ wird für teils völlig unterschiedliche Forschungsansätze benutzt, weshalb hier die Begriffe unterteilt werden in „Nachahmung der natürlichen Fotosynthese“, „Optimierung der natürlichen Fotosynthese“ und in „Fotokatalytische Wasserspaltung“, welche wiederum in „Licht zu Wasserstoff“ und „Licht zu Benzin“ unterteilt werden kann.

Nachahmung der natürlichen Fotosynthese

In der Vergangenheit versuchten einige Forscher, die Fotosynthese im Labor nachzustellen um den Wirkungsgrad zu verbessern, indem sie organische Lichtantennen ähnlich Chlorophyll entwickelten. Doch bei diesen Versuchen war die Quantenausbeute - das Verhältnis der absorbierten Photonen zu den dadurch freigesetzten Elektronen - sehr gering. Zudem sind organische Farbstoffe instabil, sie werden von Licht und Sauerstoff mit der Zeit zerstört.

Optimierung der natürlichen Fotosynthese

Ziel dieser Forschungsprojekte ist die Verbesserung der natürlichen Fotosynthese, um mit gentechnisch veränderten Pflanzen beschleunigte Fotosynthese zu erreichen.

So kann z.B. aus CO_2 und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht Glucose (Zucker) in mehreren Stufen hergestellt werden, indem man die Reaktion in Proteinschaum Ranasputin-2 statt in Pflanzen ablaufen lässt.¹

In Algenreaktoren kann Wasserstoff gewonnen werden, indem ein lichtaktiviertes Protein und ein wasserstoffproduzierendes Enzym so verändert wurden, dass die Elektronenwanderung beschleunigt wird.²

Das erst kürzlich entdeckte Schlüsselprotein der Fotosynthese, das Enzym Rubisco, will man gentechnisch so verändern, dass das CO_2 aus der Luft effektiver, nämlich wie die Rotalge, verarbeitet wird.³

Diese zukünftigen Bioreaktoren befinden sich noch im Entwicklungsstadium, könnten jedoch eines Tages einen wertvollen Beitrag zur alternativen Energiegewinnung und zur Reduzierung des CO_2 -Ausstoßes leisten.

Institution	Ansprechpartner	Thema	Details
University of Cincinnati	D.Wendell, J.Todd, C.Motemago	Nachahmung der natürlichen Fotosynthese mit Hilfe von "Froschschaum"	Proteinschaum Ranasputin-2, Glucosegewinnung aus Wasser und CO_2 mit Licht als Energielieferant
Photobiotechnologie Ruhr-Uni Bochum	Dr. Thomas Happe	Biologische Wasserstoffgewinnung aus Algenreaktoren	Beschleunigung des Elektronentransfers auf Hydrogenase, Gentechnik
Max-Planck-Institut für Biochemie, Martinsried	Dr. Manajit Hayer-Hartl	Beschleunigte natürliche Fotosynthese	Gentechnische Optimierung des Enzyms Rubisco =>effektivere Nutzung von CO_2
Max-Planck-Institut für Bioanorganische Chemie, Mühlheim adR	Dr. Alfred Holzwarth	Künstliche Fotosynthese, Sonnenlicht direkt in brennbare Flüssigkeiten.	selbststrukturierende Pigment-Pigment-Komplexe; photoaktive Nanostrukturen

Tabelle 1: Optimierung der natürlichen Fotosynthese

Wasserstoffgewinnung mit anorganischen Katalysatoren : Fotokatalytische Wasserspaltung „Licht zu Gas“

Ein völlig neues Kapitel ist der Weg der „Künstlichen Fotosynthese“, bzw. der „Fotokatalytischen Wasserspaltung“ mit anorganischen Materialien, welche gegenüber den organischen Katalysatoren stabiler und weniger empfindlich gegen Zerstörung durch Sauerstoff und Licht sind.

Hier hat vor allem die Nanotechnologie eine völlig neue Ära für die Herstellung von Halbleitern und Katalysatoren eingeleitet. Mit neuen fotolithografischen Methoden können die Epitaxieschichten mit Halbleiteratomen defektfrei platziert werden.⁴ Es ist möglich, kristalline, nanostrukturierte Schichten herzustellen, die sich selbst organisieren.²³ Neue, immer genauere physikalische Untersuchungsmethoden ermöglichen ein immer besseres Verständnis der Reaktionsmechanismen.

So gibt es inzwischen eine Flut neuer Verbindungen, die sich als Lichtantennen und Katalysatoren für die „Solarelektrolyse“ eignen, also die 1. Stufe der Fotosynthese, nämlich die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff möglich machen. Im Labormaßstab gibt es bereits verschiedene Verfahren mit preiswerten Lichtantennen, Katalysatoren und Elektroden, wobei Sonnenlicht der Energielieferant ist, manche mit erstaunlich hoher Ausbeute. Derzeit wird in verschiedenen Teilen der Welt mit Hochdruck an der Verbesserung bereits erfolgversprechender Verfahren gearbeitet und nach weiteren Möglichkeiten gesucht.

Die Lichtantenne fungiert hierbei als Kathode (negativer Pol) zur Reduzierung von Wasser zu Wasserstoff oder als Anode (positiver Pol) zur Oxidation von Wasser zu Sauerstoff. Optimal ist eine Kombination von beidem. Kathode und Anode werden dann durch eine Membran getrennt, die elektronendurchlässig ist, aber den entstehenden Wasserstoff und Sauerstoff trennt. Fehlt die Oxidation des Wassers, dann wird für die elektronische Bilanz eine Elektronenquelle benötigt. Oft wird dazu eine (Platin-)Elektrode eingesetzt oder eine chemische „Opfersubstanz“ wie Methanol oder Amine werden zugegeben, da ihr Redoxpotential geringer ist als das von Wasser. Für eine wirtschaftliche Nutzung muss jedoch die Anode zur Bildung von Sauerstoff ebenfalls aus einem passenden Katalysator bestehen.

Eine Reihe interessanter Forschungsergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung	Dr. Xinchun Wang Dr. Markus Antonietti	H ₂ -Gewinnung Katalysator Kohlenstoffnitrid	Fotokatalysator, Kohlenstoffnitrid C ₃ N ₄ ; Co ₃ O ₄ /C ₃ N ₄ Hybride
Friedrich-Schiller-Universität Jena	Dr. Sarah Saborowski	H ₂ -Gewinnung Optimierung TiO ₂ -Katalysatoren	TiO ₂ -Pd-SOLECTRO Katalysator: 1//20 Solarstrom-Wasserstoff
École Polytechnique Fédérale de Lausanne	Dr. Ilkay Cesar	Wasserspaltung mit Tandem-Zelle; Fotoanode Hämatit + Kathode mit farbstoffsensibilisierten Solarzellen	Fotoanode: Si-dotiertes α-Fe ₂ O ₃ auf Fluor-dotiertem SnO ₂ +monoatomarer Co-Katalysator
Kyoto University, Japan	Dr. Hiroshi Imahori	Creation of Nanostructured Artificial Photosynthetic Systems	Gold- und Indium-Zinn-Oxid-Elektroden + Porphyrin-Fulleren-Moleküle, interne Quantenausbeute bis 50%
Ian Wark Research Institute, University of South Australia	Dr. Thomas Nann	Solarelektrolyse mit anorganischen Halbleiter-Quantenpunkten	Nanokristalle von InP als Lichtantenne auf Goldkathode mit Fe ₂ S ₂ (CO) ₆ als Katalysator, Pt-Elektrode als Elektronenquelle; ca. 30% Ausbeute
Massachusetts Institute of Technology (MIT) Cambridge/Boston,	Dr. Daniel Nocera,	Künstliche Fotosynthese: 4 l Wasser reicht für 1 Haushalt	Speicherbare Energie, Kobalt-Phosphat-Mix, billig, robust.
Sun Catalytix	Dr. Daniel Nocera,	Technische Umsetzung künstlicher Fotosynthese	Silizium Solarzelle eine Seite Indium-Zinn-Oxid + Cobalt-Oxid-Cluster; andere Seite Ni, Mb, Zn-Legierung auf Si-Zellen

Tabelle 2: Fotokatalytische Wasserspaltung mit anorganischen Katalysatoren

Wasserspaltung mit Kohlenstoffnitrid

Im Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam-Golm wurde 2009 die organisch-anorganische Verbindung Kohlenstoffnitrid als preiswerter Fotokatalysator für Wasserstoff- und Sauerstoff-Erzeugung vorgestellt. Zwar ist die Quantenausbeute des inzwischen weiterentwickelten Katalysators mit 1,1% noch gering, aber dafür sind die Rohstoffe preiswert und gut verfügbar.^{5,6}

Fotokatalytische Wasserstoffgewinnung an TiO₂ wurde 2006 von Chris Sorell und Janusz Novotny, UNSW Australien erstmals beschrieben⁷ und war im Jahr 2010 Thema der Dissertationsarbeit⁸ von Sarah Saborowski an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Die Wirksamkeit ist auch hier gering, sie beträgt bei der mit Pd dotierten TiO₂-Elektrode nur ca. 1/20 im Vergleich zu mit Solarstrom gewonnenem Wasserstoff. Auch hier ist das Ziel, den Wirkungsgrad von TiO₂ durch gezielte Dotierung mit Metallen zu erhöhen.

Wasserspaltung in H₂ und O₂ mit Hämatit (Fe₂O₃) als Fotoanode⁹ wird in der Dissertation von Dr. Ilkay Cesar, 2007, beschrieben. Eine Optimierung des Wirkungsgrads der Wasser-Oxidation zu O₂ auf 42% wurde erreicht durch

- Silizium-dotierte, nanokristalline α -Fe₂O₃ - Schichten (Hämatit)
- Kristallines Abscheidung aus Gasphase auf Fluor-dotiertes Zinnoxid

Die entstandenen Elektronen wandern durch den äußeren Stromkreis zur Gegenelektrode (Kathode) und reduzieren Wasser zu Wasserstoff. Das Verfahren wird derzeit mit Hilfe von Computersimulationen optimiert.

Künstliche Fotosynthese mit Porphyrin-Fullerenen, also organischen Molekülen, auf Gold- und Indium-Zinn-Elektroden haben Hiroshi Imahori und seine Kollegen als sehr stabile Katalysatoren mit einer Ausbeute von bis zu 50% 2007 beschrieben.¹⁰

Indiumphosphid-Nanokristalle auf einer Goldkathode als Lichtantenne mit Fe₂S₂(CO)₆ als Katalysator (Dr. Thomas Nann, Dr. Christopher Pickett und Saad Ibrahim, 2010)¹¹ hat sich als sehr gute Möglichkeit zur Wasserstoffgewinnung herausgestellt. Es wurde eine Ausbeute von 30% erreicht. Der Eisenkomplex Fe₂S₂(CO)₆ lagert sich aus Lösung auf den Nanokristallen ab. Das patentierte Verfahren wird derzeit unter der Leitung von Dr. Thomas Nann an der University of South Australia in Adelaide optimiert.

Kobaltoxid-Cluster mit Indium-Zinn-Oxid- oder Fluor-Zinn-Oxid-Zwischenschicht auf Silizium-Solarzelle als Anode, auf der Rückseite **Nickel-Molybdän-Zink**-Legierung als Kathode zur H₂-Erzeugung, von Dr. Daniel Nocera, Massachusetts Institute of Technology MIT im September 2011 in Science und Nature veröffentlicht.¹² Der Wirkungsgrad beträgt ca. 2,5%, aber die Lösung ist einfach und preiswert. „The elemental components of just 3 gallons (11,36 Liter) of water have enough energy, when recombined, to satisfy the daily energy needs of a large American home.“

Stand der Technik

Gemeinsam den meisten vorgestellten Verfahren, dass dass sie lediglich im Labormaßstab entwickelt wurden. Lediglich die von Dr. Daniel Nocera gegründete Firma Catalyx (Cambridge, USA) arbeitet an einer technischen Umsetzung. Angestrebt ist die Entwicklung kleiner Anlagen, die dezentral Häuser mit Wasserstoff versorgen können. Unterstützt wird das Vorhaben von dem indischen Milliardär Ratan Tata.¹³

Verfügbarkeit der Rohstoffe

Einfach ist das Ganze jedenfalls nicht. Hinzu kommt, dass ein Großteil der wirklich effektiven Lichtantennen und Katalysatoren chemische Elemente benötigt, die bereits knapp sind oder in naher Zukunft knapp werden. Die verschiedenen Erhebungen über die Verfügbarkeit von Rohstoffen kommen zwar zu unterschiedlichen Ergebnissen, doch gehören die seltenen Erden, aber auch Elemente wie Silber, Kobalt, Indium, Gallium, Tellur und Lithium zu den längerfristig knappen Elementen. Nicht nur die Herstellung von Solarzellen und Katalysatoren wird daher immer kritischer werden, auch hochwirksame Dauermagneten für Motoren und Generatoren benötigen die selten gewordenen Elemente.¹⁴

Aktuelle Forschung

Inzwischen haben sich verschiedene Hochschulen und Institute zu größeren Netzwerken für Forschungsvorhaben für die Erzeugung von Solar-Wasserstoff, -Gas oder – Benzin zusammen geschlossen, die von den jeweiligen Regierungen finanziell unterstützt werden:

- In den USA wurde 2010 das JCAP (Joint Center for Artificial Photosynthesis) in Berkeley, Californien gegründet. Über 120 Weltklasse-Wissenschaftler von 6 californischen Universitäten arbeiten und forschen unter der Leitung von Dr. Nathan Lewis, California

Institute of Technology (Caltech) zusammen. Unterstützt wird das Projekt mit 122 Mio. \$ über einen Zeitraum von 5 Jahren. „JCAP aims to find a cost-effective method to produce fuels using only sunlight, water and carbon-dioxide as inputs“¹⁵

- In Deutschland wurde am 1.11.2009 das Projekt Light2Hydrogen „Energie für die Zukunft – Photokatalytische Spaltung von Wasser zu Wasserstoff“ gestartet. Unterstützt wird das Vorhaben vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 10 Mio € und läuft bis 31.10.2014. Das interdisziplinäre, international kooperierende L2H-Netzwerk besteht aus 16 Forschergruppen aus 7 Partner-Einrichtungen, Koordinator ist Dr. Matthias Beller vom Leibniz-Institut für Katalyse e.V. (LIKAT), Rostock.⁵

Die direkte solare Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie z.B. Methanol ist auch Gegenstand der Forschung, doch dieses Thema ist von noch sehr weit weg von der Realisierung und soll hier nicht näher betrachtet werden.

Fazit

Bisher ist mir jedoch bei allen Recherchen ein Gesamtkonzept zur Gewinnung von „Sonnengas“ (siehe Bild 1) nicht begegnet. Dabei sollte die Kombination: direkte Umwandlung von Wasser in Wasserstoff mit Hilfe von Sonnenenergie und die Weiterverarbeitung zu speicherbarem Methangas technisch bald realisierbar sein. Damit hätte man eine zu 100% CO₂-neutrale Energieerzeugung. Optimale Standorte für die Gewinnung von solarem Wasserstoff sind dem kürzlich veröffentlichten weltweiten Atlas für Sonnen- und Windenergie²² zu entnehmen, doch auch in gemäßigten Breiten wäre unterschiedlich lange und intensive Sonneneinstrahlung kein wirkliches Hindernis für die Umsetzung eines solchen Konzepts mit den bereits bekannten, hier aufgeführten Technologien.

Mittel- bis langfristig wird möglich werden, mit „Künstlicher Fotosynthese“ den Energiebedarf der Erde vollständig zu decken, ohne dass weiter CO₂ erzeugt wird. In Deutschland aber ist es höchste Zeit, dass weitere Kompetenz-Cluster gebildet werden, die finanziell von der Bundesregierung unterstützt werden, damit dieses Ziel bald in greifbare Nähe rückt.

Referenzen:

1. <http://www.scilogs.de/wblogs/blog/fischblog/biochemie-und-molekularbiologie/2010-03-17/kunstliche-photosynthese-mit-frosch-schaum>
2. <http://aktuell.ruhr-uni-bochum.de/pm2012/pm00031.html.de>
3. http://www.biochem.mpg.de/news/pressroom/Archiv/2011/050_manajit_rubact.html
4. Photonik 3/2012
5. http://www.light2hydrogen.de/fileadmin/user_upload/brochure/L2H_Brosch%FCre_web.pdf
6. <http://www.solarserver.de/news/news-10212.html>
7. http://www.energieportal24.de/artikel_520.htm
8. <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-20537/Saborowski/Dissertation.pdf>
9. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15136797>
10. http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/~moleng_05/imahori_research_e.html
11. <http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=WO002011010152A3>
12. <http://www.nature.com/news/2011/110929/full/news.2011.564.html>;
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1209816> (2011)
13. <http://www.suncatalytix.com/about.html>
14. Resnick Institute Report September 2011: “Critical Materials For Sustainable Energy Applications”
15. <http://solarfuelshub.org/about-jcap>
16. http://www.solar-fuel.net/fileadmin/user_upload/Publikationen/1204PowerToGas_Broschuere_WEB.pdf
17. http://www.powertogas.info/fileadmin/user_upload/downloads/Broschuere/Fachbroschuere_Power_to_Gas.pdf
18. <https://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html>
19. http://www.audi-reports.de/ar2011/de/data/pdf/de_BalancedMobility.pdf
20. http://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Abscheidung_und_-Speicherung
21. <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>
22. http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10202/334_read-3379/
23. <http://tp.ina-kassel.de/index.php/forschung.html>
24. <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>