

Wie kann die Photosynthese helfen, unser Energieproblem zu lösen?

Abstract

Der folgende Text gibt eine Übersicht über erneuerbare Energien und Ansätze zur Entwicklung erneuerbarer Energien, die sich den biologischen Prozess der Photosynthese zu nutzen machen oder diesen zu imitieren versuchen. Es werden Probleme und Lösungsansätze der landwirtschaftliche Biomasseproduktion, sowie Vor- und Nachteile Biomasseproduktion durch Photobioreaktoren im Vergleich zur Landwirtschaft besprochen. Daneben wird ein grober Umriss des Forschungsgebietes der „künstliche Photosynthese“ gezeichnet. Unabhängig auf welche Weise Biomasse gewonnen wird, weist ihre Produktion Tücken auf, da die Kosten den Nutzen nicht übersteigen dürfen. Wo die Grenzen der weltweiten Biomasseproduktion liegen, ist nicht voraussagbar, da sowohl Schätzungen basierend auf heutigen Gegebenheiten schwierig sind, als auch da diese Grenzen durch anstehende technologische Entwicklungen verschoben werden können. Viele Ansätze zu einer „künstlichen Photosynthese“ befinden sich noch in der Forschungsphase, könnten aber dem Einsatz natürlichen Photosynthese für die menschliche Energiegewinnung überlegen sein. Bis eine Universallösung für die menschliche Energieversorgung gefunden worden ist, ist für eine Abkehr von fossilen Brennstoffen der Einsatz von Biomasse und ihren Derivaten, um Teile des Energiebedarfs zu decken, nicht zu unterschätzen.

Unsere heutige Energieversorgung hängt mehrheitlich von durch Photosynthese nutzbar gemachter Sonnenenergie ab. Der Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland wird zu ca. 82% durch fossile Brennstoffe (Mineralöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und Erdöl) gedeckt [1]. Diese entstanden über einen Zeitraum von Jahrmillionen aus den Überresten biologischer Lebewesen. Da wir mit den heutigen verfügbaren technischen Mitteln nicht in der Lage sind, sie unter sinnvollen energetischen Bedingungen innerhalb menschlicher Zeitabschnitte wiederherzustellen, gelten sie als nicht erneuerbar [2]. Weil der Kohlenstoff, der in ihnen enthalten ist, lange dem globalen Kohlenstoffkreislauf entzogen war, fügt ihre Verbrennung dem derzeitigen globalen Ökosystem extra Kohlenstoff zu. Die Folge hiervon ist steigende Kohlenstoffdioxid- Anteile in der Atmosphäre und mehr gelöster Kohlenstoffdioxid in den Ozeanen. Dies führt zu einer Veränderung des Klimas [3] und zu einem Anstieg des Säuregrades der Ozeane [4] mit drastischen Auswirkungen für aquatische und terrestrische Flora und Fauna. Eine Abkehr von der Nutzung fossiler Brennstoffe ist deswegen wünschenswert.

Es gibt verschiedene Wege für eine Veränderung in der Energiegewinnung. Eine Möglichkeit wäre die gewaltige Menge an chemischer Energie (siehe Kapitel „Photosynthese – Allgemeine Einführung und Grundlagen“), die jedes Jahr von photoautotrophen Organismen produziert wird, verstärkt für die Primärenergiegewinnung zu nutzen. Diese Energie ist in Biomasse gespeichert. Hierbei handelt es sich um totes, biologisches Material, wie z. B. Holz oder Bioabfall. Die Verbrennung von Biomasse hat im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen eine neutrale Kohlenstoffdioxid- Balance, da der in ihr enthaltene Kohlenstoffdioxid Teil des globalen Kohlenstoffdioxidkreislaufes ist [5]. Ein entscheidender Nachteil von Biomasse gegenüber fossilen Brennstoffen ist, dass die Biomasse eine deutlich niedrigere Energiedichte hat (siehe Tabelle 1) [6]. Um ihre Energiedichte zu erhöhen, ist eine Verfeinerung der Biomasse zu z.B. Biotreibstoff oder Biodiesel nötig (siehe Tabelle 1). Biotreibstoffe sind feste, flüssige oder gasförmiger Treibstoffe, die eine höhere Energiedichte als Biomasse haben

und eine effizientere Nutzung der gespeicherten Energie erlauben [7]. Bei Biodiesel handelt es sich um eine nicht auf Erdöl basierende Dieselart, die aus kurzkettigen Alkylester besteht, der durch Transesterifikation biol. Öle hergestellt wurde. Biodiesel kann in heutigen Dieselmotoren verwendet werden, ohne dass diese technisch verändert werden müssten [8].

Tabelle 1: Spezifische Energiedichte verschiedener Treibstoffarten[6]

Treibstoffart	Spezifische Energiedichte (MJ/kg)
Wasserstoff (H ₂)	120 – 142
Erdöl	41.868
Diesel	48.1
Kohle	29,3 – 33,5
Sonnenblumenöl (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	39.49
Biodiesel	37,8
Ethanol (CH ₃ -CH ₂ -OH)	23,4 – 26,8
Holz (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	16 – 21

Die Möglichkeit, den aus Biomasse gewonnenen Biodiesel in heutigen Motoren zu verwenden, illustriert, wie attraktiv diese Quelle regenerativer Energien ist. Dennoch ist eine sofortige Umstellung der weltweiten Energieversorgung auf Biomasse und ihre Derivate nicht möglich. Die Menge an Energie, die durch die Nutzung von Bioabfällen erzeugt werden kann, ist begrenzt. In Deutschland ist der Sektor noch ausbaufähig. Das Maximum an Energie allerdings, die hierdurch gewonnen werden kann, wird auf ca. 100 bis 130 TWh/a geschätzt [9]. Die direkte Erzeugung von Biomasse nur zu diesem Verwendungszweck ist problematisch. Dies ist auf drei Faktoren zurückzuführen: A) Die direkte Nutzung von photoautotrophen Organismen zur Biomasseerzeugung ist zwar sinnvoller als die Nutzung heterotropher Organismen (siehe Kapitel „Photosynthese – Allgemeine Einführung und Grundlagen“), nichts des so trotz ist die Biomasseproduktion dieser Organismen immer begrenzt durch die natürlichen Limitationen der Photosynthese (siehe Kapitel „Photosynthese – Allgemeine Einführung und Grundlagen“) und des Organismus (z.B. durch Platzbedarf, Nährstoffbedarf und Wachstumsraten). Steigerungen der Biomasseproduktion über diese natürlichen Limits hinaus sind nicht ohne genetische Veränderungen des Organismus möglich. B) Die Erzeugung von Biomasse unabhängig davon wo, wie und womit sie produziert wird, benötigt immer zuerst Energie, bevor durch sie Extra-Energie gewonnen wird. Der Kosten-Nutzen-Faktor variiert deutlich zwischen unterschiedlichen Kombinationen der Variablen Standort, Methode und verwendete Organismenarten[10]. C) Die Verfeinerung von Biomasse zu Biotreibstoffen und Biodiesel stellt einen Extraproduktionsschritt, der ebenfalls Energie benötigt und mit in die Energiebilanz gerechnet werden muss, dar. Diese Extrakosten variieren ebenfalls stark, je nach verwendeter Methode [10] (Siehe Kapitel „Biogas“ und „Bioethanol“). Zusammengefasst bedeutet dies, dass Zweifel an der Sinnhaftigkeit dieser erneuerbaren Energiequelle gegeben sind, so lange ihre Energieausbeute zu niedrig und zu kostspielig ist. Dieses Problem besteht sowohl, wenn Biomasse

mit Hilfe der Landwirtschaft als auch mit Hilfe der Aquakultur erzeugt wird. Die Details der Problematik und mögliche Lösungsansätze unterscheiden sich allerdings in beiden Fällen.

Landwirtschaftlicher Anbau von Pflanzen, um Biotreibstoffe zu gewinnen, existiert bereits weltweit. In der Bundesrepublik werden ca. 3.8% des Primärenergiebedarfs durch Holz, Stroh und andere feste Biomasse sowie Biodiesel und anderen flüssigen Biotreibstoffen gewonnen (mehr als aus Wind- und Wasserkraft zusammen) [1], welche größtenteils durch Land- und Holzwirtschaft produziert wurden. 2008 war dies der Anstoß mehrerer Negativ-Schlagzeilen, da der subventionierte Anbau von sogenannten Energiepflanzen mit Schuld sei an einem globalen Anstieg der Lebensmittelpreise [11]. Es wurde spekuliert, dass ein erhöhter Anbau von Energiepflanzen die Fläche, die dem Anbau von Nahrungsmittelpflanzen zur Verfügung steht, verkleinert, was zu einer Verknappung der Lebensmittel führt. Diese Aussage ist nur vordergründig logisch, denn sie lässt außer Acht eine Vielzahl von anderen Faktoren, wie kurzfristige Ernteausfälle durch Dürre, Börsenspekulationen, steigender Ölpreis, die veränderte Nahrungsgewohnheiten in Entwicklungsländern, ungleiche Verteilung von Nahrungsmitteln und missgünstige lokale Agrarpolitik zurückzuführen [12]. Für Europa allein betrachtet ist es deswegen sogar möglich, die derzeitig genutzten landwirtschaftlichen Anbaufläche für Energiepflanzen zu erweitern, ohne die Nahrungsmittelversorgung zu gefährden oder zu einer Lebensmittelpreissteigerung zu führen [13]. Ein schwerwiegenderer Kritikpunkt am landwirtschaftlichen Anbau von Energiepflanzen, der ebenfalls weltweit Beachtung fand, ist, dass der Anbau einiger zur Biotreibstoffgewinnung genutzten Pflanzen mehr fossilen Treibstoff verbraucht als Biotreibstoff gewinnt [14]. Mit Schuld an dieser negativen Energiebilanz ist die Verwendung von derzeitigen gebräuchlichen Agraranbaumethoden, die auf Erntemaximierung, nicht aber auf Energieeffizienz ausgelegt sind, in Kombination mit einer energieintensiven Verarbeitung zu Biodiesel [10]. Ein Lösungsansatz gegen diese Missstände wird von der EU Energiekommission verfolgt mit der Förderung von „Biotreibstoffe der zweiten Generation“ [15]. Die Grundlage dieser Treibstoffe bilden agrarwirtschaftliche Nebenprodukte, die ebenfalls zur Energiegewinnung genutzt werden können (siehe Kapitel „Bioethanol“ und „Biogas“), also eine effizientere Nutzung bereits vorhandener Ressourcen anstatt den Anbau von sogenannten Energiepflanzen. Schätzungen, wie hoch die dadurch jährlich gewonnene Menge an Energie sein kann, liegen noch nicht vor. Ein alternativer Lösungsansatz wäre, den Anbau von Energiepflanzen nicht aufzugeben, aber die Pflanzen für ihre neue Aufgabe zu optimieren. Dies kann einerseits durch Einsatz landwirtschaftlich unüblicher Pflanzen geschehen, die für die Rolle als Energiepflanzen gut geeignet sind, oder durch eine genetische Veränderung von Pflanzen, um Ertragssteigerungen zu erzielen. Allerdings ist bei dem Einsatz genetisch veränderter Pflanzen zu bedenken, dass auf offenem Feld angebaute Pflanzen permanent im genetischen Austausch mit ihrer Umgebung stehen. Eingefügte oder veränderte Gene können somit von wilden Artgenossen übernommen werden [16, 17, 18]. In Gewächshäusern ist eine Eindämmung zwar möglich technisch aber äußerst aufwendig. Bis besser die Konsequenzen von solchen Genaustauschen verstanden werden, sollte Vorsicht beim Anbau von Pflanzen mit Modifikationen eines so grundlegenden Mechanismus wie der Photosynthese geboten sein (siehe Kapitel „Photosynthese – Allgemeine Einführung und Grundlagen“). Unabhängig von der Form der Optimierung ist festzuhalten, dass es bereits heute Beispiele für eine sinnvolle landwirtschaftliche Biomasseproduktion gibt, die positive Energiebilanzen aufweisen [10].

Im Gegensatz zur Landwirtschaft steckt die Nutzung der Aquakultur zur Gewinnung von Biomasse noch in ihrer Babyphase. Als Aquakultur wird der Anbau aquatischer Organismen - unter anderem auch photoautotrophen Algen und Bakterien - bezeichnet [19]. Dieser verspricht der landwirtschaftlichen Erzeugung von Biomasse und ihrer Derivate deutlich überlegen zu sein, da viele

der aquatischen Algen- und Bakterienarten größere Wachstumsraten erzielen. Die derzeit optimalste Methode photoautotrophe Algen und Bakterien zu kultivieren sind Photobioreaktoren. Hierbei handelt es sich um Anlagen, die zwar durchlässig für Sonnenlicht sind, ansonsten aber eine von der Außenwelt abgeschlossene Umwelt für die Organismen schaffen, was eine Kontaminierung mit unerwünschten Organismen und Verdunstung von Wasser verhindert. Diese Bioreaktortypen generieren weitaus größere Mengen an Biomasse als Pflanzen auf der selben Anbaufläche[20] – nach Schätzungen des US Departments of Energy ist die Biomasseproduktion 30mal so hoch wie bei terrestrischen [21] – und gleichzeitig niedrigerem Wasserverbrauch. Abhängig von der Organismenart ist außerdem möglich auch Meerwasser und Schmutzwasser in Photobioreaktoren zu verwenden[20].

Ein weiterer Grund für die Attraktivität von Photobioreaktoren ist, dass photoautotrophe Algen und Bakterien in der Lage sind, eine Reihe unterschiedlichster Produkte, die sich als Biotreibstoff verwenden lassen, zu synthetisieren[20]. Hierbei wird besonders viel Augenmerk auf die Möglichkeit gelegt, Grünalgen zur Wasserstoffproduktion zu nutzen (sogenannter „Biowasserstoff“), da sie eine ernst zu nehmende Konkurrenz für nicht biologische Methoden darstellt. Im Winter 2007 gelang es erstmals einem Forscherteam um Professor Anastasios Melis, eine Algenart so zu optimieren, dass ihre Wasserstoffproduktion eine Energieeffizienz von 15% erreicht (die Wirtschaftlichkeitsgrenze liegt bei einer Energieeffizienz von 7-10%)[22]. Ein Entweichen des Organismus in die Umwelt wird effizient durch Photobioreaktoren verhindert, so dass auch genetisch veränderte Organismen verwendet werden können.

Der Nachteil von Photobioreaktoren ist, dass es sich um eine neuartige und noch nicht ausgereifte Technologie handelt. Die Extraktion von gewünschten Produkten, wie z.B. Ölen zur Biodiesलगewinnung, ist sehr kostspielig. Die Betriebskosten eines Photobioreaktors sind sehr hoch. Da der Kohlenstoffdioxidanteil in der Atmosphäre sehr gering ist, ist meist eine Zufuhr von konzentrierterem Kohlenstoffdioxid notwendig, um eine angebrachte Biomasseproduktion zu gewährleisten[20]. Der letzte Punkt kann durch eine Kopplung des Reaktors an ein anderes Kraftwerk, z.B. ein Kohlekraftwerk, gelöst werden. Dies erlaubt, einen erheblichen Anteil des ausgestoßenen Kohlenstoffes, aber auch Stickstoffdioxiden, zu sequestrieren, wenn die Kohlekraftwerkabgase direkt in den Photobioreaktor eingespeist werden[23]. An effizienten Alternativen zu der Kopplung an andere Kraftwerke - wie auch für Lösungen der zwei anderen Problempunkte - wird derzeit gearbeitet und das Erreichen dieser verspricht greifbar zu sein. Die Schätzungen, wie teuer Biomasse aus bereits vorhandenen Systemen ist, gehen auseinander [20] und der Preis, den Biomasse aus Photobioreaktoren einmal haben wird, bleibt abzuwarten.

Unabhängig davon, auf welchem Weg Biomasse produziert wurde, sie entstand innerhalb der biologischen Limitationen von Organismen. Der hierfür grundlegende biologische Prozess – die Photosynthese - muss aber nicht unbedingt als perfekt angesehen werden. Sie entwickelte sich im biologischen Kontext des Organismus und seiner Umwelt, so dass auch Aspekte, die einer Maximierung des Wirkungsgrades der Photosynthese entgegenwirkten, ausschlaggebend waren. Bereits einige heutige Solarzellen haben einen höheren Wirkungsgrad als die Photosynthese (siehe Kapitel „Photosynthese – Grundlagen und Einführung“). Es erscheint daher naheliegend, dass eine Nutzung der Photosynthese zur Lösung unseres Energieproblems nicht unkritisch sein kann; es gilt vorteilhafte Aspekte zu kopieren und unvorteilhafte zu minimieren oder zu beseitigen[24].

Forschung, die sich das zur Aufgabe gemacht hat, wird als „künstliche Photosynthese“ bezeichnet [25]. Da es in den letzten Jahren einen erheblichen Zuwachs an Wissen über die Struktur und Funktionsweise der einzelnen Bestandteile des photosynthetischen Apparates gegeben hat, hat dieses Forschungsfeld erheblich an Auftrieb gewonnen [26]. Sein Ziel ist eine Optimierung der Energiegewinnung und allgemeine technische Diversifikation der Energiegewinnungsmöglichkeiten. Hierfür lassen sich eine Reihe von Ansätzen verfolgen, zur Treibstoffgewinnung und direkten Erzeugung von elektrischem Strom. Gewonnene Erkenntnisse über die Photosynthese finden Anwendung in der Gentechnik, Projekten zur Kohlenstoffsequestration, der nicht biologischen Wasserstoffproduktion, der Photovoltaik und vielen anderen Gebieten. Ein prominentes Beispiel, wie Wissen über Photosynthese Anwendung findet, sind die Grätzel-Zellen, deren Funktionsweise dem Prinzip der Photosynthese entlehnt ist[27]. So breit das Feld der Forschung ist, die sich unter dem Deckmantel „künstliche Photosynthese“ zusammenfassen lässt, so weit gefächert sind auch die Überschneidungen mit anderen Forschungsfeldern. Zum Beispiel ermöglichen moderne Methoden der Molekularbiologie Enzyme zu verändern, damit sie geeigneter für menschliche Anwendungen werden. Dies hat die Begehrlichkeit geweckt, eine verbesserte Version des Enzyms RuBisCo zu schaffen, um eine billige und schnellere Methode zu entwickeln, der Atmosphäre wieder Kohlenstoffdioxid zu entziehen[28]. Die zwei genannten Beispiele zeigen die Vielseitigkeit, welche die Forschung auf dem Bereich der künstlichen Photosynthese hat und welches Potenzial in ihr steckt.

Der Gedanke, die Photosynthese - den Prozess, der sowohl die Grundlage für unsere biologische Umwelt als auch unsere moderne Energieversorgung erschuf - sich so zu Nutze zu machen, dass eine regenerative Energieversorgung gewährleistet ist, übt eine große Faszination aus. Für die realistische Umstellung auf regenerative Energie lässt sich hierbei eine Staffelung erkennen: A) Was ist bereits möglich? B) Was wird bald möglich sein? C) Was könnte noch möglich gemacht werden?

Schon heute wird Biomasse, gewonnen durch Landwirtschaft oder der Verwertung von Bioabfällen, als regenerative Energiequelle genutzt. Ein Ausbau dieses Sektors ist möglich und hierfür können bestehende Infrastrukturen einbezogen werden. Der Hauptnachteil dieser Energiequelle liegt darin, dass darauf geachtet werden muss, eine ausreichend große positive Energiebilanz zu erzielen. Wie dies zu tun ist, hängt von lokalen Bedingungen ab, benötigt detailliertes Fachwissen und geeignete politische Rahmenbedingungen. Auf Grund von begrenzten Nutzflächen, hat die landwirtschaftliche Biomasseproduktion jedoch ein begrenztes Potenzial. Photobioreaktoren dagegen könnten eine erhebliche Steigerung der Biomasseproduktion ermöglichen. Es scheint jedoch, dass diese Technologie noch nicht vollends ausgereift ist. Ihre Optimierung, um eine ökonomische sinnvolle Umsetzung zu gewährleisten, verspricht in wenigen Jahren erreicht zu sein. Es könnte passieren, dass eines Tages die Nutzung der Biomasse zur Energieerzeugung obsolet ist, da effizientere Wege der regenerativen Energiegewinnung entwickelt worden sind. Diese könnten teilweise durch Nachahmungen und Anregungen, die die Wissenschaft von der Photosynthese gewonnen hat, entstanden sein. Bis solche Techniken zu genüge entwickelt sind, wird die Nutzung photoautotropher Organismen eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Denn, auch wenn sie nur einen Teil des Energieverbrauchs decken kann, würde dies mit dazu beitragen von fossilen Brennstoffen unabhängig zu werden. Die Grenzen des Beitrags, die die Photosynthese zur weltweiten Energieversorgung beitragen kann und wird, sind noch nicht festgelegt, da sowohl mittelfristig als auch langfristig wissenschaftliche Neuerungen auf diesem Gebiet anstehen.

1. BMWi. Primärenergieverbrauch nach Energieträgern.
<http://bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html>
2. Fossile Brennstoffe. Brockhaus - 20. Auflage. Leipzig-Mannheim F.A. Brockhaus GmBh, , 1998.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. 2007. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
4. The Royal Society. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Jun 2005.
<http://royalsociety.org/document.asp?tip=0&id=3249>
5. Biomass. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>
6. Energy content of biofuel. Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel
7. Biokraftstoff. Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/Biokraftstoff>
8. Biodiesel. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
9. Scheuermann, Anne, Dr. Daniela Thrän, Frank Scholwin, Martin Dilger, Doris Falkenberg, Moritz Nill und Janet Witt. Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Leipzig, Institut für Energetik und Umwelt, Dez 2003. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2438.pdf>
10. Zah, Rainer, Heinz Böni, Marcel Gauch, Roland Hischer, Martin Lehmann und Patrick Wäger. ÖKOBILANZ VON ENERGIEPRODUKTEN: ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG VON BIOTREIBSTOFFEN. Empa - Abteilung Technologie und Gesellschaft. <http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/8514.pdf>
11. UN-Ernährungsgipfel - Ban fordert 50 Prozent mehr Nahrungsmittelproduktion. Focus online, Jun 2008.
http://www.focus.de/politik/diverses/un-ernaehrungsgipfel-ban-fordert-50-prozent-mehr-nahrungsmittelproduktion_aid_305961.html
12. Jacobsen, Lenz. Die Rückkehr des Hungers. Stern online, Apr 2008.
<http://www.stern.de/politik/ausland/:Weltweite-Armut-Die-R%FCckkehr-Hungers/617343.html?s=0&eid=617625>
13. www.refuel.eu/fileadmin/refuel/user/docs/REFUEL_D16_stakeholder_consultation_Warsaw_Oct_2007.pdf
14. Jordi, Andres. Biotreibstoffe - eine Option mit beschränktem Potenzial. Neue Zürcher Zeitung online, Sep 2005.
<http://www.nzz.ch/2005/09/21/ft/articleD5NBC.html>
15. Biofuels: The Next Generation. EurActiv, Jul 2007. <http://www.euractiv.com/en/energy/biofuels-generation/article-165951>
16. Out-crossing and Gene Flow. GMO Compass online, jan 2009. http://www.gmo-compass.org/eng/safety/environmental_safety/170.genetically_modified_plants_out_crossing_gene_flow.html
17. Van de Wiel, CCM und Lap Lotz. Outcrossing and coexistence of genetically modified with (genetically) unmodified crops : a case study of the situation in the Netherlands. Wageningen, NJAS Wageningen journal of life sciences, 2006. Vol. 54, n°1, pp. 17-35
18. Eastham, Katie und Jeremy Sweet. Genetically modified organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer. European Environment Agency, 2002.
http://reports.eea.europa.eu/environmental_issue_report_2002_28/en/GMOs%20for%20www.pdf
19. Aquakultur. Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/Aquakultur>
20. Schenk, Peer, Skye R. Thomas-Hall, Evan Stephens, Ute C. Marx, Jan H. Mussnug, Clemens Posten, Olaf Kruse und Ben Hankamer. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. New York, BioEnergy Research, Mär 2008. Volume 1, Number 1, S. 20-43.
21. Hartman, Eviana. A Promising Oil Alternative: Algae Energy. Washingtonpost online, Jan 2008.
<http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/01/03/AR2008010303907.html>
22. Melasis, Anastasios. Maximizing Light Utilization Efficiency and Hydrogen Production in Microalgal Cultures.
http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress08/ii_f_2_melis.pdf
23. Pulz, O., "Evaluation of GreenFuel's 3D Matrix Algal Growth Engineering Scale Unit: APS Red Hawk Unit AZ," IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH, Jul 2007.
24. Rutherford, A. William und Thomas A. Moore. Mimicking photosynthesis, but just the best bits. Nature, Mai 2008. Vol 453, S. 449. <http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7194/full/453449b.html>
25. Collings, Anthony and Christa Critchley (ed.). "Foreword". Artificial Photosynthesis – from basic biology to industrial application. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
26. Noy, Dror. Natural photosystems from an engineer's perspective: length, time, and energy scales of charge and energy transfer. Photosynthesis Research, Okt 2007. Vol 95, Num 1, S. 23-35.
<http://www.springerlink.com/content/x07x425887845037/>
27. Collings, Anthony and Christa Critchley (ed.). "The Photoelectrochemical Grätzel Cell". Artificial Photosynthesis – from basic biology to industrial application. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
28. Spreitzer, R. J and M. E. Salvucci. *Rubisco: structure, regulatory interactions, and possibilities for a better enzyme Annual Review of Plant Biology*, 2003. Vol53, S. 449-75.