

Hendrik SCHUBERT\*, Christof SCHYGULA & Ronny MARQUARDT

Prof. Dr. Hendrik Schubert, A. Einstein Str. 3, 18059 Rostock  
hendrik.schubert@uni-rostock.de

## Energiegewinnung aus Algenbiomasse – Perspektiven einer Zukunftstechnologie

### Abstract

Algen sind in vielerlei Hinsicht, für den Menschen nutzbar. Während historisch, Algen vorwiegend als Dünge- oder Nahrungsmittel genutzt wurden ist heute eine größere Bandbreite von Nutzungsformen etabliert, oder wird angestrebt. Neben der Nutzung von Inhaltsstoffen (z: B. für Agar und Gelatine, medizinische Inhaltsstoffe) oder als Organismen zur Wasser oder Luftaufbereitung (Bioremediation) wird immer wieder die Möglichkeit zur Produktion von Biotreibstoffen mit Hilfe von Algen diskutiert, der folgende Artikel soll einen kurzen Abriss über die Möglichkeiten und Unwägbarkeiten dazu geben.

**Keywords:** bioenergy, biofuel, bioremediation, macroalage, microalgae, polysaccharids,

### Einleitung

Der Industrialisierungsprozess der menschlichen Gesellschaft ist von Beginn an mit einem stetig steigenden Energiebedarf verbunden. Die ursprüngliche Nutzung von Muskel-, Wind- und Wasserkraft konnte diesen Bedarf schon bald nicht mehr decken, so dass die Erschließung „alternativer Energiequellen“ Voraussetzung für die Intensivierung der Manufakturproduktion war. Schon sehr früh, im 17. Jahrhundert, kam es dadurch zu einer Übernutzung der Wälder deren Folgen teilweise bis heute spürbar sind. In dieser Zeit der dramatischen Holzverknappung erschienen den Zeitzeugen die Kohlenvorräte wie ein von der Vorsehung geschickter „unterirdischer Wald“ (*sylva subterranea*) – dazu bestimmt, den völlig abgeholzten sichtbaren Wald zu ersetzen (Bünting, 1693; zitiert aus Schäfer 2008). Dieser Beginn der intensiven Nutzung fossiler Energieträger wird als Eintrittsdatum in das gegenwärtige „thermo-industrielle Zeitalter“ (Gras, 2006) angesehen.

In dem bislang erschlossenen Spektrum der Primärenergieträger nimmt Erdöl eine Sonderstellung ein, da es eine hohe Energiedichte besitzt und vergleichsweise leicht und sicher transportierbar ist. Diese Eigenschaften führten zu einer zunehmenden Abhängigkeit vom Erdöl, deren Konsequenzen bereits sehr früh (Hubbert, 1956) analysiert wurden und, nicht zuletzt auch wegen der Auswirkungen der aus geostrategischen Interessen vorgenommenen Angebotsverknappungen

Anfang der siebziger Jahren, bereits früh nach Auswegen aus dieser Abhängigkeit gesucht wurde.

Auf Grund der Sonderstellung des Erdöls ist dabei jeder Meldung über neue Ansätze zum Ersatz dieses Energieträgers eine hohe Öffentlichkeitswirksamkeit sicher. Meldungen über „Kohleverflüssigung“, Bioethanolgewinnung, „gas-to-liquid“ Verfahren sind immer wiederkehrende Themen die das große öffentliche Interesse an der Suche nach Alternativen zum Erdöl bezeugen.

Im letzten Jahrzehnt ist nun zu beobachten dass neben den oben angeführten Klassikern immer häufiger Schlagzeilen über den Einsatz von Algen, vor allem Mikroalgen, als Primärenergieträger an die Öffentlichkeit dringen. Die zugrunde liegende Motivation dieser Projekte ist dabei keineswegs einheitlich. Neben dem Motiv „nachwachsender Ersatz für fossile Energieträger“, hier vor allem für den Verkehrsbereich, ist es vor allem auch das Bemühen um eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Kraftwerken, die im Vordergrund derartiger Aktivitäten steht.

Der Analyse von Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Mikroalgenkulturen zur Erreichung dieser Ziele – Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Kraftwerken sowie nachhaltige Produktion eines Primärenergieträgers sind die anschließenden Ausführungen gewidmet.

## **Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Kraftwerken**

Der Grundgedanke besteht darin durch Nutzung des Photosyntheseprozesses CO<sub>2</sub> in Form von Biomasse zu binden. Unabhängig davon, ob diese Biomasse im Folgenden unterirdisch deponiert oder direkt als Primärenergieträger wieder verwendet werden soll, ergibt sich damit das Schema eines von der Sonnenenergie getriebenen Kreislaufprozesses – ein Solarkraftwerk.

Die Primärenergie für die Photosynthese wird durch die Solarstrahlung bereitgestellt. Von der Solarkonstante ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ) (Johnson 1954), die die Menge an Energie darstellt, welche in Form von elektromagnetischer Solarstrahlung auf einen "extraterrestrischen Quadratmeter Erde auftrifft, sind die Verluste durch Absorption und Rückstrahlung während der atmosphärischen Passage abzuziehen. Häufig wird hier mit einem Pauschalwert von 50% operiert mit der Folge, dass eine dramatische Überschätzung des Energieangebotes erfolgt. Allein die Erdrotation führt dazu, dass diese Energie im Jahresdurchschnitt nur 12 h zur Verfügung steht, entsprechend Breitengrad und Jahreszeit ist dann der Einfallswinkel zu berücksichtigen, um den Energieeintrag je Erdoberfläche zu ermitteln. Die damit maximal zur Verfügung stehende Energiemenge von  $11974 \text{ kWh/m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (extraterrestrisch) vermindert sich damit auf  $5987 \text{ kWh/m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  bei Berücksichtigung der Erdrotation. Wird nun noch eine Einfallwinkelkorrektur vorgenommen, erhält man einen äquatorialen Maximalwert von  $3813 \text{ kWh/m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , von dem jetzt die atmosphärischen Verluste abzuziehen sind. Da diese atmosphärischen Verluste vor allem von den Wetterbedingungen abhängig sind, ist die Verwendung von Pauschalwerten unzulässig und auch unnötig, besteht doch ein ausreichend dichtes Netz von terrestrischen Messwarten, deren Ergebnisse zu globalen Übersichten kompiliert wurden. Die hier an der Erdoberfläche gemessenen Werte betragen maximal  $2500 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (z.B. im Bereich der Wüsten der subtropischen Hoch-

druckgürtel wie der Sahara); für Deutschland wird ein Wert von  $1000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  angegeben (Abuissou et al. 2006).

Diese zur Verfügung stehende elektromagnetische Energie kann nun im Prozess der Photosynthese in chemische Energie umgewandelt werden. Dafür werden, als theoretischer Minimalbedarf mindestens 8 mol Photonen für die Bindung eines Mols  $\text{CO}_2$  bzw. die Bildung eines Mols „ $\text{CH}_2\text{O}$ “ benötigt. Der bei der Verbrennung freiwerdende Energiegehalt eines Mols „ $\text{CH}_2\text{O}$ “ beträgt 468 kJ; der durchschnittliche Energiegehalt eines Mols Photonen des PAR-Bereiches beträgt ca. 200 kJ, so dass sich eine Maximaleffizienz von  $468 \text{ kJ} / 8 * 200 \text{ kJ} = 0,29$  ergibt. Hier ist bereits einschränkend anzumerken, dass der Quantenbedarf *in realitas* weitaus höher liegt, eine Messung an einer Vielzahl von C3-Pflanzen ergab einen Wert von 9,4 (Björkman & Demmig 1987). Damit muss die Effizienz auf  $486 \text{ kJ} / 9,4 * 200 \text{ kJ} = 0,25$  korrigiert werden. Bei diesen Messungen handelt es sich um Kurzzeitversuche, bei denen eine Reaktion der Pflanze auf ein Überangebot an Licht, also eine Lichtsättigung bzw. Lichthemmung der Photosynthese aufgrund der Kürze des Versuches nicht auftritt. Weiter ist zu berücksichtigen, dass nur ein Teil der Solarstrahlung für die Photosynthese nutzbar ist. Diese „photosynthetisch aktive Strahlung“ beträgt lediglich ca. 45% der Gesamtstrahlungsenergie. Eine ganze Reihe von Arbeiten ist zu diesem Problem erschienen und kommt übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die tatsächliche Maximaleffizienz bei 4,5 % für C3-Pflanzen bzw. 6% für C4-Pflanzen liegt (Barber & Archer 2004, Zhu et al. 2008). Dieses Problem der Lichtsättigung lässt sich, wie zahlreiche Arbeiten an Pflanzen (z.B. Long et al. 2006) und auch Algen (Vonshak et al. 1989) gezeigt haben, nicht durch Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Umgebung lösen – auch unter „sättigenden  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen“ tritt Lichtsättigung auf. Weiter ist zu berücksichtigen, dass bei diesen Versuchen die Sauerstofffreisetzung, die der Wasserspaltung entspringt, als Proximatmaß für die  $\text{CO}_2$ -Fixierung verwendet wurde. Soll nun eine Biomassebildung erfolgen, muss neben der  $\text{CO}_2$ -Fixierung auch Energie für Prozesse wie Nährstoffaufnahme, Nitratreduktion u.v.m. investiert werden. Unter natürlichen Bedingungen sind dazu noch Schwankungen des Lichtangebotes zu berücksichtigen die, da die Photosynthese eine nichtlineare Abhängigkeit von der Lichtintensität aufweist eine weitere drastische Verringerung der Effizienz zur Folge haben. Reflexion sowie Absorption von Licht durch Zellbestandteile, die nicht photosynthetisch aktiv sind, führen zu einem zusätzlichen Verlust von ca. 10% der eintreffenden Strahlung (Gates 1965). Dazu kommt, dass in den Nachtstunden Energie investiert werden muss um die Integrität der Zellen aufrecht zu erhalten. Die hier auftretenden Verluste durch Respiration werden mit 20-25% der Tagesproduktion angegeben (Marra & Barber 2004). Es überrascht daher nicht, dass selbst ausgeklügelte Photobioreaktoren bei optimiertem  $\text{CO}_2$ - und Nährstoffregime eine Maximaleffizienz von 1% nicht überschreiten konnten (Sheehan et al. 1998).

Vergleicht man nun diesen Idealwert, der sich nur auf die Produktionsfläche bezieht mit den Daten von tatsächlich bereits produzierenden Photovoltaikanlagen, stellt sich rasch Ernüchterung ein. Der Solarpark Spremlingen produziert auf einer Gesamtfläche von 2 ha über  $350000 \text{ kWh a}^{-1}$  (Schmitz 2009). Das entspricht, bezogen auf die in Deutschland zur Verfügung stehenden  $1000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  einer Effizienz von 1,75%.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei um eine Gesamteffizienz handelt, direkt vergleichbar einem Kraftwerksoutput. Im Fall der Algenbiomasse muss erst noch eine Konversion in Energie erfolgen, was mit Prozesskosten für Ernte, Trocknung und Transport (siehe unten) sowie

Umwandlungsverlusten bei der Verbrennung und Generation elektrischer Energie verbunden ist. Moderne Gaskraftwerksanlagen erreichen hier z. Zt. 58% Wirkungsgrad, das Fernziel liegt bei 62% (Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke. Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppen. BMWA Dokumentation Nr. 527, Dezember 2003). Dabei sind die Möglichkeiten der Photovoltaikanlagen bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Für die mit Dünnschichtmodulen ausgerüstete Anlage in Lieberose wird eine Gesamteffizienz von über 3% angegeben; was einer auf die Modulfläche bezogenen Effizienz von 10% entspräche (Heidenreich 2009). Das ist eine eher moderate Effizienz, die Spitzenwerte von Produktionsmustern liegen z. Zt. bei 18%, in der Entwicklung konnten bereits 40% überschritten werden (University of Delaware 2007; Ham et al. 2010).

Das Fazit, das sich daraus ergibt ist, dass eine Verringerung der Kraftwerkskapazität zugunsten von Solarenergieflächen ganz klar eine effizientere CO<sub>2</sub>-Reduktion darstellt als die Installation von Mikroalgenkulturen.

## **Biotreibstoffe aus Mikroalgen**

Betrachtet man die zweite Stossrichtung der Entwicklung, den Ersatz von Öl-basierten Treibstoffen durch „Biotreibstoffe“ aus nachwachsenden Rohstoffen, ist der Aspekt der hohen Energiedichte vorrangig zu betrachten. Hier ist trotz immenser Fortschritte zumindest beim Flugverkehr gegenwärtig noch keine Ablösung der Verbrennungskraftmaschinen durch elektrische Antriebe absehbar.

In der Diskussion stehen gegenwärtig hier vor allem ethische Fragen im Vordergrund da jetzt schon eine Konkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Energiepflanzenanbau auftritt (z.B. Schäfer 2008). Daneben stellt sich aber auch die Frage der Machbarkeit, also inwieweit der gegenwärtige Energiebedarf überhaupt über nachwachsende Rohstoffe abzudecken ist. Die oben angeführte Maximaleffizienz der Photosynthese von 1% ist sozusagen die „obere Grenze“ der Biomasseproduktion – um diese Biomasse aber zu erzeugen ist ein gewisser Energieinput notwendig. Ernte, Transport und Umwandlung zu Biokraftstoff sind weitere Kostenfaktoren in der Energiebilanz. Da hier bereits Zahlen aus der Produktion vorliegen, konnten Pimentel & Patzek (2007) eine Energiebilanz des gesamten Produktionsprozesses für die Zuckerrohr-basierte Bioethanolherstellung in den USA sowie Brasilien errechnen. Die Bilanz war ernüchternd, ergab sich doch, dass für die US-Produktion ein Energieeinsatz in Form fossiler Energieträger von 3,72 kJ je 1 kJ Bioethanol notwendig ist, mit 3,01 kJ liegt dieser Wert für Brasilien nicht wesentlich niedriger (Pimentel & Patzek 2007). Die Produktivität von Algen liegt eher unter der von terrestrischen Nahrungsmittelpflanzen, von C4 Pflanzen wie Zuckerrohr ganz abgesehen (Radmer & Kok, 1977). Der Energieeinsatz ist, bedingt durch die Notwendigkeit der Bereitstellung vergleichsweise komplizierter Kultivierungsanlagen, Nährstoffmedien und Durchmischungsvorrichtungen sogar höher anzusetzen. Diese Probleme haben dazu geführt, dass 1995 das „Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae“ aus dem „Biofuel“ Program des US Department of Energy ausschied – es wurde keine weitere Entwicklungsperspektive gesehen.

Im Abschlussbericht heißt es dazu: *A major conclusion from these analyses is that there is little prospect for any alternatives to open pond designs, given the low cost requirements associated with fuel production. The factors that most influence cost are biological, and not engineering-related. These analyses point to the need for highly productive organisms capable of near theoretical levels of conversion of sunlight to biomass. Even with aggressive assumptions about biological productivity, we project costs for biodiesel which are two times higher than current petroleum diesel fuel costs.* (c.f. Sheehan et al. 1998).

Zunächst ist man geneigt zu denken, dass eine Verdopplung der Dieselpreise diese Relation ja umschlagen lassen würde, wie aber die oben angeführten Zahlen zum Energieeinsatz bei der Biomasseproduktion zeigen, würden sich mit einer Verteuerung der Erdölprodukte auch die Produktionskosten für Bioethanol erhöhen – und zwar zumindest um die 89% bzw. 72% des Energieanteil fossiler Brennstoffe, die zur Erzeugung von einem kJ Bioethanol notwendig sind.

Auch die Hoffnung auf die hochproduktiven Organismen, die nahe an der Grenzeffizienz arbeiten, verliert sich, heißt es doch im gleichen Report:

*An important lesson from the outdoor testing of algae production systems is the inability to maintain laboratory organisms in the field. Algal species that looked very promising when tested in the laboratory were not robust under conditions encountered in the field. In fact, the best approach for successful cultivation of a consistent species of algae was to allow a contaminant native to the area to take over the ponds.* (c.f. Sheehan et al. 1998).

## **Wozu dann überhaupt noch in diese Richtung forschen?**

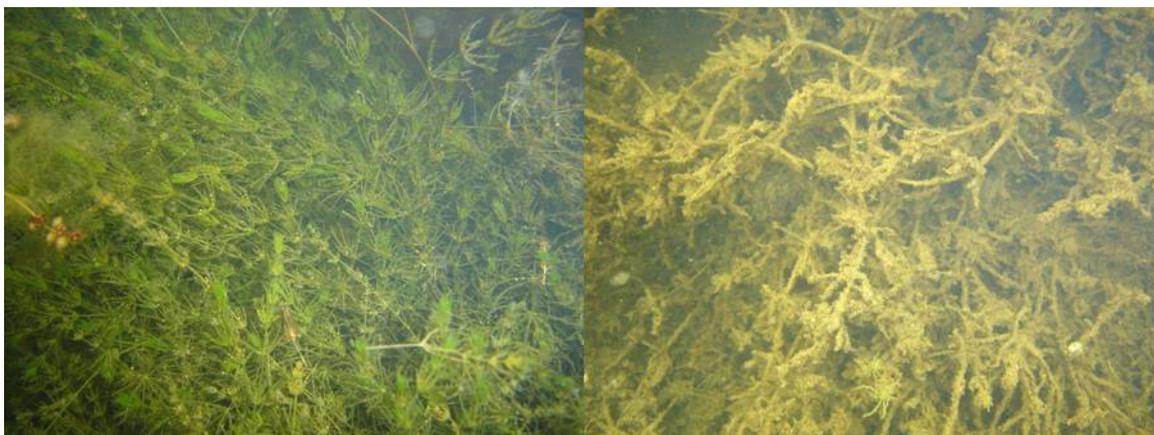
Vor diesem Hintergrund erscheint es nahezu müßig, sich mit (Mikro-) Algen-Kultursystemen zu befassen, zumindest wenn es um eine reine Biomasseproduktion bzw. Biotreibstoffproduktion geht. Neben diesen öffentlichkeitswirksamen Einsatzgebieten gibt es aber noch eine ganze Reihe von weniger spektakulären Arbeitsfeldern, bei denen Algen mit Erfolg und Wirtschaftlichkeit zum Einsatz kommen. Die Wirtschaftlichkeit ist immer dann gegeben, wenn ein hochwertiges Endprodukt, das in dieser Form von terrestrischen Pflanzen nicht erzeugt werden kann, aus den Algen gewonnen wird. Zunächst trifft das natürlich auf spezielle Nahrungsmittel wie z.B. Nori, gewonnen aus *Porphyra*-Arten sowie Wakame (aus *Undaria*-Arten) und andere, vor allem in der asiatischen Küche verbreiteten „Spezialitäten“ zu. Aber auch pharmazeutisch wirksame Inhaltsstoffe wie z.B. Astaxanthin oder Feinchemikalien wie die als Immunfarbstoff eingesetzten Phycobiline werden aus Algen gewonnen und erzielen Preise, die den Einsatz von kostenintensiven geschlossenen Photobioreaktorenanlagen mit künstlicher Beleuchtung ermöglichen. Zu pharmazeutisch wirksamen Inhaltsstoffen gehören ebenfalls sulfatierte Polysaccharide (komplexe Zuckermoleküle mit Sulfatresten), die gegenwärtig am Modellorganismus *Delesseria sanguinea* (Abb. 1) an den Universitäten Rostock und Kiel untersucht werden. Sulfatierte Polysaccharide sind weit verbreitet in marinen Organismen zu finden. In Rot- und Braunalgen stellen sie typische Bausteine der Zellwände dar. Entscheidend für das Interesse an diesen Algeninhaltsstoffen ist die Tatsache, dass sulfatierte Polysaccharide auch im menschlichen Körper vorkommen und dort außerordentlich wichtige Funktionen besitzen. Daher geht man davon aus, dass man mit sulfatierten Polysacchariden, wie

solchen aus Algen, körpereigene Prozesse beeinflussen und so die Gesundheit fördern, Krankheiten vorbeugen bzw. deren Heilung unterstützen kann. Den Resultaten der ersten Tests zufolge verfügen die sulfatierten Polysaccharide von *Delesseria sanguinea* in der Tat über ein günstiges Wirkprofil: Sie hemmen einige Mechanismen der komplexen Entzündungsreaktion deutlich stärker als handelsübliche Arzneimittel (z.B. Heparin) und zeigen sogar darüber hinaus eine leicht gerinnungshemmende Wirkung (Alban & Schygula, 2006). Ferner werden Algen als Rohstoffquelle für die Gewinnung außerordentlich wichtiger technologischer Hilfsstoffe wie Carrageenane, Alginsäure und Agar verwendet. Bemerkenswert ist auch die wachsende Beliebtheit von Produkten auf Algenbasis im Bereich der Nahrungsergänzungsmittel und Kosmetik („Wellnessindustrie“).



**Abb. 1.** *Delesseria sanguinea* in der Mecklenburger Bucht (Ostsee). Foto: C. Schygula.

Ein weiteres Einsatzfeld sind Bioremediationsanlagen zur Behandlung von Schwermetallbelasteten Bergbauabwässern. Hier leisten Algen „Schwerstarbeit“, sind sie doch bereits nach kurzer Zeit von einer dicken Kruste aus giftigen Ablagerungen überzogen, die sie dazu noch vom Licht abschirmen (Abb. 2.).



**Abb. 2.** Links: dichte *Chara vulgaris* Bestände bevor sie die Schwermetalle im Bioremediationsprozeß abscheiden, rechts: die *C. vulgaris* stark verkrustet nach längerer Zeit in der Bioremediationsanlage. (Foto R. Marquardt)

Diese Kruste soll nun deponiert werden, andererseits aus Kostengründen die Menge an zu deponierendem Abfall möglichst gering gehalten werden.

Genauso fallen bei der Feinchemikalienproduktion große Mengen Algenbiomasse an und auch das sogenannte „Strandmanagement“, die manchmal schon überpenible Reinigung der Spülsäume der Badestrände von Algenanwurf, lässt jedes Jahr große Mengen an Biomasse als zu entsorgenden Sondermüll anfallen.

Diese Biomassen einer energetischen Verwertung, sei es über Biogasanlagen, Bioethanolherstellung oder Verfeuerung zuzuführen beruht auf einem völlig anderen Kosten/Nutzen Verhältnis. Natürlich können mit den hier anfallenden Mengen die Energieprobleme der heutigen Zeit nicht gelöst werden – einen Beitrag zum vielzitierten „Energemix“ können sie aber in jedem Fall leisten.

## Literatur

- Abuissou, M., Lefevre, M. & L. Wald, 2006. [www.soda-is.com/eng/map/index.html]
- Alban, S. & C. Schygula, 2006 *Delesseria sanguinea* Lamouroux – eine viel versprechende Alge aus der Ostsee mit wirtschaftlichem Potential? *Fischerei & Fischmarkt* in M.-V. 1/2006:25-28.
- Barber, J. & M. D. Archer, 2004. Photosynthesis and Photoconversion. In: Series on photoconversion of solar energy vol. 2 molecular to global photosynthesis Archer MD & Barber J eds Imperial College UK, pp1-41
- Björkman, O. & B. Demmig, 1987. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170 4 : 489-504
- Bünting, J. P., 1693. zitiert in Schäfer 2008 *Energieethik-Unterwegs in ein neues Energiezeitalter*. Bern, 179 pp.
- Gates, D. M., 1965, Energy plants and ecology. *Ecology* 46: 1-14
- Gras, A., 2006. la société thermo-industrielle et l'impasse énergétique. *Foi et Vie* 5:48-59
- Ham, M. H., Choi, J. H., Boghossian, A. A., Jeng, E. S., Graff, R. A., Heller, D. A., Chang, A. C., Mattis, A., Bayburt, T. H., Grinkova, Y. V., Zeiger, A. S., van Vliet, K. J., Hobbie, E. K., Sligar, S. G., Wraight, C. A. and M. S. Strano, 2010. Photoelectrochemical complexes for solar energy conversion that chemically and autonomously regenerate. *Nature Chemistry* 2: 929-936
- Heidenreich, S. 2009. <http://www.solarserver.de/solarmagazin/anlageoktober2009.html>
- Hubbert, M. K., 1956. Nuclear energy and fossil fuels: API Conference, San Antonio, TX, March 7–9, 1956. Later published as Publ. no. 95, Shell Development Co. June 1956.
- Johnson, F. S., 1954. The Solar Constant. *Journal of Atmospheric Sciences* 11(6): 431-439
- Long, S. P., Zhu, X., Naidu, S. L. & D. R. Ort, 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant Cell Environ* 29: 315-330
- Marra, J. & R. T. Barber 2004. Phytoplankton and heterotrophic respiration in the surface layer of the ocean, *Geophysical Research Let*, vol. 31, 9, pp.L09314.1-L09314.4
- Pimentel, D. & T. W. Patzek, 2007. Ethanol production: energy and economic issues related to US and Brazilian sugarcane natural resources research. In: *Biofuels, Solar and wind as renewable systems*. Pimentel, D ed Springer, Berlin 357-371
- Radmer, R. & B. Kok, 1977. Photosynthesis limited yields, unlimited dreams. *BioScience* 27:599-605
- Schmitz, H. J., 2009. Höhere Energieausbeute. *Wasser, Luft und Boden* 7/8 2009: 26-27
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. & P. Roessler, 1998. A Look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from algae – Close-out report. National Renewable Energy Laboratory, Golden, 294 pp.
- University of Delaware, 2007. University Of Delaware-led Team Sets Solar Cell Record. *ScienceDaily*. <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/07/070726210931.htm>
- Vonshak, A., Sivak, M. N. & D. A. Walker, 1989. Use of a solid support in the study of photosynthetic activity of *Spirulina platensis*. *J Appl. Phycol* 1: 131-136
- Zhu, X., Long, S. P. & D. R. Ort, 2008. Converting solar energy into crop production. *Curr. Opin. Biotechnol* 19: 153-159