

Microalgen-Photosynthese für Biomasse Produktion **(vorgetragen von T. Lamparter)**

Tilman Lamparter

Universität Karlsruhe, Botanisches Institut, Geb. 10.40, Kaiserstr. 2, D-76131
Karlsruhe

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich möchte zunächst den Organisatoren für die Einladung zu dieser Fachtagung danken und mich kurz vorstellen. Mein Name ist Tilman Lamparter, ich bin Biologe, genauer gesagt Pflanzenphysiologe, an der Universität Karlsruhe. Ich beschäftige mich in meiner Forschung hauptsächlich mit Photorezeptoren, die sich Phytochrome nennen, und die sowohl in Pflanzen als auch in Bakterien und in Pilzen vorkommen. Auf diesem Bild ist angedeutet, dass wir auch mit Physikern zusammen arbeiten. Trotzdem soll es aber auf dieser Tagung nicht um Phytochrom gehen, sondern um die Photosynthese, und zwar genauer gesagt um die Frage, wie man die Photosynthese von Microalgen für die Produktion von Kraftstoffen ausnutzen kann.

Ich möchte kurz erläutern, wie ich selbst auf das Thema Microalgen gekommen bin. Das hat unter anderem mit meinem Wechsel von Berlin nach Karlsruhe zu tun. Das Profil der Technischen Universität und des Forschungszentrums Karlsruhe (mittlerweile KIT) ist stark Anwendungs-orientiert.

Zu der Zeit (vor etwa eineinhalb Jahren) wurde in den Medien die Produktion von Biodiesel aus Nutzpflanzen wie zum Beispiel Raps oder Mais intensiv diskutiert. Soll diese Produktion weiter ausgebaut und gefördert werden oder nicht? Auf der einen Seite soll der Anteil regenerativer Energien erhöht werden, um sparsamer mit den Ressourcen umzugehen und um den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren. Auf der anderen Seite: wenn man Pflanzen wie Raps oder Mais einsetzt, um daraus Kraftstoffe herzustellen, ergibt sich eine Konkurrenz Situation mit der Lebensmittel-Produktion. Man kann die Fläche für die Produktion von Biodiesel nicht beliebig steigern, denn - vereinfacht gesagt - reicht dann die Fläche nicht aus, um Lebensmittel zu produzieren.

Ich habe damals überlegt, ob es nicht sinnvoll wäre, Pflanzen in Gegenden anzubauen, die nicht landwirtschaftlich nutzbar sind, wie zum Beispiel in der Wüste oder auf kargen Böden. Tatsächlich wird dies mit der Jatropha Pflanze bereits realisiert, die in Afrika und Indien angebaut wird, um daraus Biodiesel herzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich darauf aufmerksam gemacht worden, dass sich im Prinzip auch Microalgen sehr gut eignen, um die Energie des Sonnenlichts für die Erzeugung von Biokraftstoff oder von anderen Substanzen zu verwenden.

Ein Vorteil von Microalgen besteht darin, dass im Gegensatz zu Landpflanzen alle Zellen Photosynthese betreiben. Landpflanzen, und auch natürlich die Nutzpflanzen, die für die Erzeugung von Biodiesel verwendet werden, betreiben Photosynthese ausschließlich in den Blättern, die Wurzel macht natürlich keine Photosynthese und auch oberirdische Organe wie z.B. Blüten oder die Stämme von Bäumen betreiben keine Photosynthese. Das bedeutet, in diesen Pflanzen ist die Energie Umwandlung nicht optimal. Bei Microalgen handelt es sich dagegen um einzellige Systeme (die Zellen teilen sich unter günstigen

Bedingungen ungefähr einmal am Tag); als Tochterzellen entstehen wieder neue Zellen, die photosynthetisch aktiv sind und es gibt keine Zellen, die keine Photosynthese betreiben.

Im Prinzip wäre es möglich, einen großen Teil des Kraftstoffbedarfs der USA aus Microalgen zu decken. In dieser Übersicht ist zusammen gestellt, wie viel Biodiesel aus welcher Pflanze gewonnen werden kann und welche Fläche benötigt würde, um 50% des Kraftstoffbedarfs der USA zu decken. Mit Raps bräuchte man über 100 Prozent, das heißt es würde keine Fläche mehr für den Anbau von Nahrungsmitteln übrig bleiben (und es wäre immer noch nicht genug Kraftstoff). Mit Microalgen könnte man dagegen mit 1 bis 3 Prozent der Fläche der USA auskommen, um 50% Treibstoff zu produzieren.

Das sind nun theoretische Werte, in der Praxis werden Microalgen trotz dieser theoretischen Vorteile noch nicht in großem Stil eingesetzt. Ein Nachteil liegt in den relativ hohen Investitions- und Produktionskosten begründet. Für den Anbau von Raps braucht man einen Acker, einen Traktor und Saatgut, während man für Microalgen eine Bioreaktor Anlage benötigt. Es kommt dazu, dass Microalgen im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Pflanzen noch nicht intensiv erforscht sind. In meinem Bereich, der Botanik, untersuchen naturgemäß mehr Arbeitsgruppen die Biologie von Landpflanzen wie *Arabidopsis thaliana* oder Reis. Microalgen werden von deutlich weniger Gruppen untersucht.

Unser Ziel ist es, nach wie vor in der Natur nach Algen zu suchen, die für bestimmte Anforderungen geeignet sind. Zum Beispiel wäre es wünschenswert, eine Microalge zu finden, die unter starkem Licht gut wächst.

Wir haben von einer Helgoland Exkursion und einer anderen Exkursion in Giglio (Mittelmeer) Algenproben nach Karlsruhe gebracht. Die Algen wurden vereinzelt und werden zurzeit im Labor untersucht. Allerdings kann ich an dieser Stelle noch nicht auf eigene Ergebnisse eingehen, sondern möchte Ihnen vor allem einen Überblick geben, wo Microalgen zurzeit schon eingesetzt werden und welche Einsatzmöglichkeiten sich für die Zukunft ableiten lassen.

Zunächst möchte ich kurz auf die Biologie der Microalgen eingehen und zeigen, welche verschiedenen Gruppen es gibt.

Dann möchte ich Beispiele nennen, wie im Prinzip Microalgen für die Energie-Nutzung eingesetzt werden können, welche Richtungen beschritten werden.

Für den effektiven Einsatz von Microalgen ist die Frage, in welchem Bioreaktor diese Algen wachsen, von entscheidender Bedeutung. Auf die verschiedenen Bioreaktoren möchte ich im dritten Teil eingehen.

Zum Schluss möchte ich ein paar Beispiele für Firmen nennen, die in USA und in Deutschland mit Microalgen arbeiten.

Die Photosynthese-Aktivität auf der Erde ist unterschiedlich verteilt. An Land dominieren Samenpflanzen, also Organismen die uns allen geläufig sind. Im Gegensatz dazu wird die Photosynthese im Meer in erster Linie von Microalgen bestritten; die wichtigsten Gruppen sind dabei die Cyanobakterien, Diatomeen und Dinoflagellaten.

Dabei verteilt sich die Primärproduktion zu etwa gleichen Teilen zwischen Land und Meer, in beiden Bereichen werden jährlich etwa 50 Mrd. Tonnen Kohlenstoff fixiert. Insgesamt entspricht das einem Umsatz von etwa 10 % des atmosphärischen CO₂.

Warum bezogen auf die Fläche die Photosynthese in den Meeren nicht so effizient verläuft wie an Land liegt unter anderem daran, dass im Meer wichtige Nährstoffe wie Phosphat und Stickstoff limitierend sind. In den Küstenregionen mit besserer

Nährstoffversorgung werden deutlich höhere Photosyntheseraten erzielt wie im offenen Meer, wie sich anhand z.B. der Chlorophyll Fluoreszenz Bilder nachweisen lässt. Im Prinzip ließe sich die Photosynthese der Microalgen im Meer deutlich steigern, wenn genügend Nährstoffe zur Verfügung stünden.

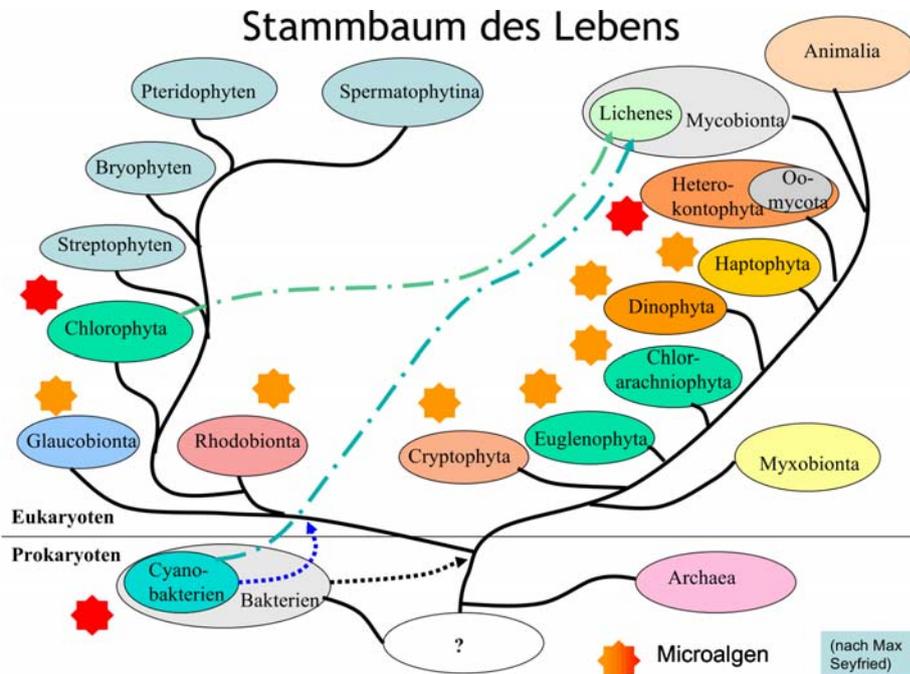


Abb. 1 Stammbaum des Lebens – Vorkommen von Microalgen (nach Max Seyfried)

Ich habe hier in diesem „Stammbaum des Lebens“ (Abb. 1) die Gruppen mit einem Stern gekennzeichnet, in denen Microalgen vorkommen. Sie können sehen, dass es sich bei den Microalgen keineswegs um eine homogene Gruppe von wenigen Arten handelt, auch wenn die Zahl der heute eingesetzten Arten noch relativ klein ist. Man kann davon ausgehen, dass es insgesamt mehrere 100000 Arten von Microalgen gibt, viele davon sind noch gar nicht entdeckt worden.

Ich möchte im Folgenden kurz auf die in meinen Augen drei wichtigsten Gruppen eingehen, nämlich die Cyanobakterien, die Diatomeen und die Grünalgen. Bei den Cyanobakterien handelt es sich streng genommen gar nicht um Algen, weil sie zu der Gruppe der Bakterien gehören, zu den Prokaryoten, und keinen Zellkern enthalten. Echte Algen enthalten einen Zellkern und sind deutlich komplexer aufgebaut.

Im Unterschied zu anderen Bakterien können Cyanobakterien oxygene Photosynthese betreiben. Cyanobakterien sind sehr alt, vermutlich vor etwa 3 Mrd. Jahren entstanden. Sie sind (in der Erdgeschichte) verantwortlich dafür, dass die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre immer weiter angestiegen und der CO₂ Gehalt abgesunken ist. Die relative Bedeutung der Cyanobakterien in diesem Kontext hat zwar nachgelassen, weil andere photosynthetisch aktive Organismen an Bedeutung zugenommen haben. Allerdings sind Cyanobakterien immer noch für etwa 40% der Primärproduktion der Meere verantwortlich.

Cyanobakterien sind auch bekannt dafür, dass sie Toxine bilden. Unter bestimmten Bedingungen kann es im Meer zu einer Massenvermehrung von Cyanobakterien kommen. In diesen Fällen werden von den Behörden Warnungen ausgesprochen und es ist nicht

ratsam, in den Gewässern zu baden. Bei den Toxinen handelt es sich einmal um Neurotoxine, einmal um Lebertoxin, die zum Teil auch biotechnisch hergestellt werden und für die Forschung verkauft werden.

Ein Beispiel, wie Cyanobakterien für die Produktion von Biomasse eingesetzt werden, ist hier zu sehen. *Spirulina* werden in großen Mengen in *open ponds* in USA, Japan und China produziert. Die Zellen werden als Nahrungsergänzungsmittel angeboten, man kann solche Tabletten kaufen, die sehr gesund sein sollen. Außerdem wird *Spirulina* in Kosmetikartikeln eingesetzt. Im Labor wird *Spirulina* als Rohmaterial für die Extraktion von Phycocyanobilin verwendet.

Da Cyanobakterien zu den Bakterien gehören, haben sie relativ kleine Genome, und es ist vergleichsweise einfach, diese Genome zu sequenzieren. Zur Zeit (Mitte 2008) sind über 35 Genome sequenziert, die Mehrzahl von marinen Cyanobakterien. Für einige Arten ist *genetic engineering* etabliert, ein Vorteil gegenüber den meisten eukaryotischen Microalgen.

Die nächste große Gruppe sind die Diatomeen. Auch diese Organismen tragen wesentlich zur Primärproduktion bei, ebenfalls etwa 40% der Meeres-Primärproduktion geht auf Diatomeen zurück. Es handelt sich um eine sehr artenreiche Gruppe; es wird vermutet, dass es über 100000 Diatomeen gibt, von denen die meisten noch nicht bekannt sind. Die charakteristische

Eigenschaft der Diatomeen ist ihre Zellwand, die aus Siliziumoxid besteht. Die Poren in der Zellwand bilden regelmäßige Muster aus, so dass man sehr schöne Mikroskop-Bilder von Diatomeen erhalten kann. Es handelt sich um eine relativ junge Gruppe, die vor etwa 200 Mio Jahren entstanden ist. Diatomeen sind eng mit Braunalgen verwandt, im Gegensatz zu diesen kommen Diatomeen jedoch nur als einzellige oder fädige bzw. Kolonie-bildende Formen vor.

Von zwei Diatomeen Arten ist inzwischen das Genom sequenziert worden, *Thalassiosira pseudonana* und *Phaeodactylum tricorutum*. *Phaeodactylum tricorutum* wird in der Biotechnologie auch als Produzent einer mehrfach ungesättigten Fettsäure, Eicopentaensäure, eingesetzt.

Die Grünalgen sind eng mit den Samenpflanzen verwandt. Sie besitzen Chlorophyll a und b (typische Cyanobakterien nur Chlorophyll a, Diatomeen Chlorophyll a und c) und ihre Zellwand enthält Cellulose. Es gibt zahlreiche einzellige Formen, aber auch thallos wachsende Grünalgen, die nicht als Microalgen bezeichnet werden. Die einzellige Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ist ein wichtiger Modellorganismus für die Forschung. Unter gewissen Bedingungen bildet *Chlamydomonas* – mit Hilfe einer Sauerstoff-empfindlichen Hydrogenase – molekularen Wasserstoff. Die Möglichkeit, *Chlamydomonas* für die Produktion von Wasserstoff einzusetzen, wird von vielen Gruppen untersucht.

Dunaliella salina ist eine weitere Mikroalge, die biotechnologisch genutzt wird. Diese Zellen sind tolerant gegenüber hohen Salzkonzentrationen und produzieren unter solchen Bedingungen relativ viel β Carotin, welches extrahiert und als Nahrungsmittel-Zusatz verkauft wird. Die Grünalge *Haematotoccus pluvialis* wird für die Produktion von Carotinoiden eingesetzt. Das Pigment Astaxanthin bewirkt bei Fischen eine Ausprägung der Pigmentierung und daher wird diese Alge als Zusatz für Fischfutter eingesetzt. Die schnell wachsende Grünalge *Chlorella* wird in *open ponds* angezogen, auch daraus werden Lebensmittel-Zusätze hergestellt. *Botryococcus braunii*, eine mehrzellige Grünalge, wurde wegen ihres hohen Lipid-Gehalts für die Produktion von Biokraftstoffen vorgeschlagen. In USA kann man Starterkulturen für die eigene Algen-Zucht über das Internet beziehen.

Trotz der potentiellen Vorteile von Microalgen für die Biomasse-Produktion und der Möglichkeit, Photosynthese effizient für die Energie-Nutzung einzusetzen, hat sich ihr Einsatz noch nicht im kommerziellen Stil etabliert. Allerdings wird im Bereich der Forschung an verschiedenen Punkten gearbeitet, und es ist zu vermuten, dass die Bedeutung von Microalgen für kommerzielle Anwendung weiter zunehmen wird. Im Zusammenhang mit der Nutzung der Photosynthese-Energie werden vor allem vier Anwendungs-Bereiche vorgeschlagen: der Einsatz von Microalgen zur Produktion von Wasserstoff, Ethanol, und Lipiden sowie für das *recycling* von CO₂ aus Erdgas- bzw. Kohlekraftwerken. Die vier Bereiche sollen im Folgenden kurz angesprochen werden:

Für die Produktion von Wasserstoff durch Mikroorganismen ist ein Enzym, die Hydrogenase, zuständig, die aus Protonen und Elektronen Wasserstoff bildet bzw. aus Wasserstoff Protonen und Elektronen produzieren kann. Hydrogenasen kommen in verschiedenen Mikroorganismen vor, und man kann je nach zentralem Metall-Ion zwei Gruppen unterscheiden, Nickel-Eisen-Hydrogenasen und Eisen-Hydrogenasen. Die meisten Hydrogenasen reagieren sehr empfindlich auf Sauerstoff, d.h. sie werden durch Sauerstoff irreversibel gehemmt. Auch wenn Sauerstoff-unabhängige Hydrogenasen in nicht-photosynthetischen Bakterien gefunden wurden, können diese doch nicht so ohne weiteres funktional in photosynthetischen Organismen exprimiert werden, weil für die Einlagerung der Cofaktoren zahlreiche weitere Enzyme benötigt werden, die zusätzlich exprimiert werden müssten. Die Grünalge *Chlamydomonas* (aber auch andere Grünalgen sowie zahlreiche Cyanobakterien) enthält ebenfalls eine Sauerstoff-sensitive Hydrogenase, die unter Sauerstoff-armen Bedingungen Wasserstoff bildet. Da in der (oxygenen) Photosynthese Sauerstoff aus der Wasserspaltung frei wird, kann die Hydrogenase nicht unter normalen Bedingungen arbeiten. Bei *Chlamydomonas* hat man herausgefunden, dass Schwefel-Mangel die Wasserstoff-Bildung induziert¹.

Unter Schwefelmangel können keine neuen Proteine synthetisiert werden. Am ehesten sind davon die zentralen Proteine des Photosystem 2 betroffen, die einer hohen *turnover*-Rate unterliegen. Daher fällt unter Schwefel-Mangel zunächst das Photosystem 2 aus, Wasserspaltung kann nicht stattfinden, es wird kein Sauerstoff mehr gebildet und der vorhandene Sauerstoff wird veratmet. Unter solchen Bedingungen ist jedoch immer noch die licht-getriebene Elektronentransportkette des Photosystem 1 aktiv. Die Elektronen können nun nicht mehr für die Reduktion von NADP zu NADPH verwendet werden, sie werden stattdessen über die Hydrogenase für die Produktion von Wasserstoff „verbraucht“. Letztendlich entstammen diese Elektronen aus der Stärke, ein Speicher-Molekül, welches unter „normalen“ Bedingungen akkumuliert. Unter Schwefelmangel ist es so unter Verbrauch von Stärke möglich, den Elektronenfluss aufrecht zu erhalten und die damit verbundene Protonen-Translokation kann noch zur Synthese von ATP eingesetzt werden. Diese Erkenntnisse können für die Licht-getriebene Produktion von Wasserstoff ausgenutzt werden. Man muss dazu die Zellen für eine gewisse Dauer in Schwefel-haltigem Medium wachsen lassen, damit genügend Photosynthese-Produkte akkumulieren können. Verschiedene Möglichkeiten sind denkbar, die bisher niedrige Produktion von Wasserstoff weiter zu verbessern. Es gibt bereits *Chlamydomonas* Mutanten, die mehr Wasserstoff bilden. Einige Gruppen versuchen, Hydrogenasen durch Mutagenese zu modifizieren und somit z.B. Sauerstoff unempfindlicher zu machen.

Es ist ebenfalls denkbar, Microalgen für die Synthese von Ethanol einzusetzen. Zwei Enzyme, Pyruvat Decarboxylase und Alkohol Dehydrogenase, katalysieren die

¹ Die Zusammenhänge sind auf Folie 30 des Vortrags dargestellt. Siehe Archiv des AKE http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2009-AKE_Hamburg/Vortraege/DPG2009_AKE3.1_Lamparter_Biomasse-Microalgen_korr.pdf

Umwandlung von Pyruvat in Alkohol, ein Vorgang, der bei der alkoholischen Gärung zur Herstellung von Bier und Wein genutzt wird. Wenn diese Enzyme in Cyanobakterien exprimiert werden, produzieren diese Ethanol. Die produzierten Mengen sind ebenfalls noch gering, durch *genetic engineering* hofft man, diese Produktion weiter steigern zu können.

Viele Microalgen produzieren natürlicherweise große Mengen von Lipiden als Speicher. Die Lipide können wie das Öl der Rapspflanzen zur Herstellung von Biodiesel eingesetzt werden, unter Verwendung der gleichen Produktionsanlagen. Über einen Transesterifizierungs-Prozess werden die Fettsäuren der Triacylglycerine (die meisten Speicher-Lipide gehören zu dieser Gruppe) in Methyl ester umgewandelt.

Oil content of some microalgae

Microalga	Oil content (% dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i>	25–75
<i>Chlorella</i> sp.	28–32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16–37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25–33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20–35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31–68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35–54
<i>Nitzschia</i> sp.	45–47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20–30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50–77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15–23

Tabelle 1: Ölgehalt einiger Microalgen (nach Y. Chisti (2007))

In dieser Tabelle 1 sind Beispiele für Microalgen zusammengestellt, die hohe Lipid Mengen produzieren². Man findet vor allem Vertreter der Grünalgen und Diatomeen, während Cyanobakterien eher Glycogen als Speicher verwenden.

Prinzipiell ist es denkbar, mit Hilfe von Microalgen CO₂ aus Kraftwerks-Abgasen zu fixieren. Auf diese Art würde das CO₂ nicht in die Atmosphäre abgegeben und gleichzeitig würde CO₂ die Microalgen „düngen“. In einigen Pilot-Projekten wird diese Art von CO₂ recycling getestet. Um diese Möglichkeit für Kohlekraftwerke im großen Stil nutzen zu können, würden große Flächen benötigt. Für alle Kohlekraftwerke zusammen käme man bei einfachen Schätzungen auf 7% der Fläche der BRD. Die Gesamt CO₂ – Bilanz wäre allerdings selbst in diesem Fall nicht Null: wenn die Microalgen für die Biokraftstoff Produktion eingesetzt werden, wird bei der Verbrennung natürlich wieder CO₂ freigesetzt. Trotzdem kann durch eine solche Filtrierung die CO₂-Abgabe deutlich reduziert werden.

Für die Massenproduktion von Microalgen müssen diese in Bioreaktoren kultiviert werden. Am Design dieser Bioreaktoren entscheidet sich die Frage, ob die Umwandlung von Sonnenenergie in chemisch fixierte Energie effizient genug verläuft. Für die sinnvolle

² Siehe auch Folie 35 des Vortrags

Produktion von Biokraftstoffen muss mehr Energie heraus kommen als hineingesteckt wird. Dieser triviale Aspekt wird jedoch oft nicht erfüllt.

Im Rahmen des „*Aquatic Species Program*“ wurde auf offene Systeme gesetzt. In sog. *raceway ponds* werden die Microalgen in flachen Becken kultiviert, für die unumgängliche Durchmischung wird das Nährmediums durch ein Paddelrad umgewälzt. Auf dem Foto ist eine *Spirulina*-Farm zu sehen, die in Kalifornien betrieben wird.

Raceway ponds haben den Vorteil, dass die Anlagen relativ einfach und kostengünstig gebaut werden können. Allerdings sind die Erträge pro Flächeneinheit vergleichsweise gering, und es können wegen der Kontamination durch Bakterien, Pilze oder andere Algen nur extremophile Organismen kultiviert werden. *Spirulina* zum Beispiel wächst unter alkalischen Bedingungen, unter denen sich andere Organismen nicht durchsetzen können.

In geschlossenen Systemen können Microalgen auch unter sterilen Bedingungen kultiviert werden. Bei der Entwicklung und Optimierung von geschlossenen Bioreaktoren stehen technische Parameter im Vordergrund. Ein optimaler Bioreaktor sorgt für die richtige Licht-Einstrahlung, wobei die Verteilung der Zellen im Licht eine wichtige Rolle spielt, und bewirkt eine optimale Durchmischung unter möglichst geringem Energie Aufwand.

Je nach Bauweise unterscheidet man zwischen Röhren-Reaktoren, Flachbett-Reaktoren und Folien Reaktoren. Die Algen-Suspension wird durch ein System von lichtdurchlässigen Röhren gepumpt. In Folien Reaktoren werden die Microalgen in Plastik-Schläuchen kultiviert. Diese Systeme zeichnen sich durch niedrige Herstellungs-Kosten aus. In Flachbett-Reaktoren werden die Kulturen durch die „flächigere“ Verteilung der Suspension im Vergleich zu den anderen Systemen gleichmäßiger bestrahlt. In einem patentierten und optimierten Verfahren werden spezielle Flachbett-Reaktoren von der Firma Subitec bereits in größeren Stückzahlen hergestellt.

	Energie- verbrauch W/m ³	Algenproduktion g Trockensubstanz pro Tag pro m ³	(g TS)/kJ	kJ/(g TS)
<i>Raceway pond</i>	10	100	0.12	8.64
Röhren-Reaktor	2000	1000	0.01	172.8
Flachbett- Reaktor	50	1000	0.23	4.32

Tabelle 2: Effektivität von Bioreaktoren

In dieser Tabelle 2 sind Literatur-Werte zur Effektivität der verschiedenen Systeme zusammengestellt³. Obwohl die Zahlen vermutlich unter optimierten Bedingungen erzielt wurden, kann man dennoch erkennen, dass in geschlossenen Reaktoren deutlich höhere Ausbeuten erzielt werden als in *raceway ponds*. Für die Umwälzung der Suspension muss in Röhren-Reaktoren relativ viel Energie aufgebracht werden – mehr als im günstigsten Fall über die Algen wieder entnommen werden kann. Die Flachbett-Reaktoren schneiden bei diesem Vergleich am besten ab; mit diesen Reaktoren wird die höchste Produktion pro investiertem kJ erzielt.

³ Siehe auch Folie 44 des Vortrags

Nun noch einige Beispiele für Firmen, die Microalgen untersuchen oder anwenden – einige Beispiele für die Produktion von Nahrungszusatzstoffen wurden bereits gezeigt. Die Information ist zum großen Teil dem Internet entnommen (siehe auch URL Adressen). Zunächst zwei Beispiele für amerikanische Firmen, Greenfuel und Solix, die CO₂ aus Kraftwerken für die Düngung von Microalgen benutzen. Eine Berliner Firma, Cyano Biofuels, untersucht die Möglichkeit, Cyanobakterien für die Produktion von Ethanol einzusetzen. Die Firma Subitec wurde bereits erwähnt. Bei dieser Firma werden unter anderem Flachbett Bioreaktoren in größeren Stückzahlen hergestellt. Subitec ist ein *spin off* des Fraunhofer Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik in Stuttgart. Die Firma Novagreen setzt Microalgen unter anderem für die Produktion von Antikörpern ein.

Zum Abschluss noch eine kurze Abwägung der Vor- und Nachteile von Microalgen-Kulturen gegenüber der Verwendung von Nutzpflanzen. Im Prinzip sind mit Microalgen höhere Produktivitäten möglich, d.h. das Sonnenlicht kann effizienter ausgenutzt werden. Es ist die Verwendung von Meerwasser denkbar, da es viele Microalgen gibt, die aus Meerwasser isoliert wurden. Microalgen können auf Flächen kultiviert werden, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden, bis hin zu Wüsten-Flächen. Man kann in der Zukunft Microalgen einsetzen, um Wasserstoff und Ethanol zu produzieren.

Die Nachteile liegen unter anderem in den hohen Investitions-Kosten begründet. Man muss große Bioreaktoren entwickeln und bauen, und Nährstoffe müssen kontinuierlich zugeführt werden. Die Kultivierung und Aufarbeitung der Microalgen muss weiter optimiert werden. Die Optimierung betrifft nicht nur die technische Seite der Bioreaktor-Anlagen, sondern auch die biologische Seite: *screening* nach geeigneten Organismen, genetische Modifikationen zur weiteren Optimierung, z.B. im Hinblick auf die Ethanol oder Wasserstoff Produktion. Neben der Produktion von Kraftstoffen, die zur Zeit noch nicht realisiert werden kann, ist der Einsatz von Microalgen für die Produktion „wertvoller“ Stoffe in verschiedenen Bereichen denkbar und kann schneller Erfolge erzielen.