

Untersuchungen zum Wachstum von Mikroalgen in einem Photobioalgenreaktor

SchülerInnen: Felix Kähler, Fabian Kurz, Marie Odenthal, Dominik Sigrist, Jan Strohecker
Kursleiter: C. Demter^a, Dr.-Ing. J. Götz^b

^aChristian Demter, Hermann Hesse-Gymnasium, Am Schießberg 9, 75365 Calw, c.demter@t-online.de; und Hector-Seminar, Waldhoferstr. 100, 69123 Heidelberg, Standort Pforzheim

^bz.Hd. Dr.-Ing. Joachim Götz, Hilda-Gymnasium, Kiehnlestr. 22, 75172 Pforzheim, [Joachim-Goetz@gmx.net](mailto:Joachim.Goetz@gmx.net); und Hector-Seminar, Waldhoferstr. 100, 69123 Heidelberg, Standort Pforzheim

Einleitung

Im Rahmen der ForscheHilda AG und eines Moduls des Hector-Seminars werden die Grundlagen zur Produktion von Algenbiomasse untersucht. Mikroalgen erreichen Wachstumsraten, die mehr als das Zehnfache der von Weizen betragen. Die Biomasse kann stofflich (Nahrungs-, Nahrungsergänzungs- oder Futtermittel) oder energetisch (Treibstoff, Brennstoff, Biomasse zur Energieerzeugung) genutzt werden.

Der Reaktor wurde von SchülerInnen der ForscheHilda AG des Hilda-Gymnasiums gemeinsam mit Auszubildenden der STÖBER ANTRIEBSTECHNIK GmbH&Co.KG Pforzheim, unter Leitung des Ausbildungsmeisters H. Peichl, gefertigt und montiert. Bei den Untersuchungen sollen eigenständiges Arbeiten, arbeitsteilige Zusammenarbeit sowie handlungsorientiertes entdeckendes Lernen an aktuellen realen Problemstellungen vorgestellt und trainiert werden. Zur Erarbeitung der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Inhalte werden unterschiedliche Arbeitsweisen (wie Vorlesung, Seminar, Laborarbeit) eingesetzt. Praxisorientierte Themen und deren Bearbeitung in Projektarbeit sollen den Schülern hilfreiche Anregungen zur Studiums- und Berufswahl geben und Hilfestellung für einen erfolgreichen Eintritt ins Berufsleben leisten.

Diskussionen im Unterricht belegen, dass globale Probleme wie (i) Erderwärmung und Klimawandel, (ii) Versorgung der Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln und Energieträgern sowie (iii) Entwicklung der Weltwirtschaft und der Situation der privaten Haushalte immer mehr ins Bewusstsein der SchülerInnen rücken und als reale Bedrohungen wahrgenommen werden. Die SchülerInnen sehen die Notwendigkeit, Lösungen für diese Probleme zu finden und zeigen vor diesem Hintergrund verstärktes Interesse an ingenieurwissenschaftlichen Themen.

Die Bindung von CO₂ durch Photosynthese bietet neben der Verringerung von CO₂-Emissionen eine Möglichkeit zur Verringerung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und dadurch eine Verlangsamung des Temperaturanstiegs¹. Darüber hinaus könnte die Algenproduktion einen entscheidenden Beitrag zur Versorgung der Erdbevölkerung mit Nahrungsmitteln und als Energielieferant leisten. Ein Vorteil der Photobioreaktoren ist, dass keine landwirtschaftlichen Anbauflächen benötigt werden und sich Algen, bei bis zu zehnfacher Produktivi-

¹ "In 1 kg Mikroalgen sind etwa 1,8 kg CO₂ gebunden. Zudem versprechen Mikroalgen, verglichen mit konventionellen Landpflanzen, bis zu 10-fach höhere Flächenerträge." [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**]

tät, ununterbrochen kultivieren lassen. Daraus könnte sich für Landwirte in Baden-Württemberg ein neues lukratives Geschäftsfeld ergeben.

Die Planung, Inbetriebnahme und Optimierung eines Photobioreaktors umfasst die Fachbereiche Verfahrenstechnik (NwT), Physik, Biologie und Chemie. Parallel wollen wir auch Energiebilanzen² erstellen und Rentabilitätsbetrachtungen durchführen. Wir sehen die Chance durch die Einbeziehung von ökonomischen und gesellschaftspolitischen Aspekten, insbesondere die Interessen der Schülerinnen anzusprechen und für die MINT-Fächer nachhaltig zu begeistern³. Als Fernziel ist die Anwendung des Photobioreaktors als "Bio-Solar-Klimaanlage" denkbar⁴. Die folgenden Abbildungen zeigen den Algenreaktor, die Algen, die SchülerInnen bei Experimentieren sowie die erarbeiteten Ergebnisse.

Untersuchungen und Ergebnisse

Algen. Die eingesetzte Alge *Chlorella vulgaris* ist eine einzellige Süßwasser-Grünalge mit einem Durchmesser von etwa 4 bis 10 µm und hat eine kugelige Form [1]. Sie gilt als wenig empfindlich, beispielsweise gegen Pilzbefall, und damit als schultauglich. Sie wurde im Rahmen der Untersuchungen zum Mechanismus der Photosynthese weltweit intensiv untersucht. Der Ertrag von *Chlorella vulgaris* (120 t/a/ha) übertrifft bei weitem den von konventioneller Kulturpflanzen (Weizen: 7 t/a/ha) [2]. Die Alge enthält nicht nur einen hohen Anteil an Protein allgemein (etwa 50 % der Trockenbiomasse), sondern liefert auch bestimmte Verbindungen (mehrfach ungesättigte Fettsäuren oder Carotinoide) in wirtschaftlich interessanten Mengen.

Aufbau des Versuchsreaktors. Die Konstruktion des Algenreaktors (Abb. 1 und 2a) orientierte sich an dem Flachplattenreaktor nach [3]. Der einfache Aufbau ist durch die vergleichsweise niedrigen Investitionskosten geeignet als Versuchsreaktor für Schulen, trotz seiner professionellen Funktionsweise. Ziel ist es, in Kooperation mit Herrn Prof. Dr. A. Hetznecker, Hochschule Pforzheim, möglichst viele einfache, aber kostengünstige Sensoren selbst zu entwickeln. Damit wird sowohl der Entwicklungsprozess Teil des Unterrichts (Elektronik, Informatik) als auch die eigentliche Messung (Messtechnik von biologischen, chemischen, physikalischen Messgrößen) sowie die Auswertung der Daten und die sich anschließende Modellbildung mit Rückwirkung auf den Reaktorbau und dessen Reaktorführung (Verfahrenstechnik). CO₂ wird zugeführt, um die Wachstumsraten zu steigern. Als Alternative zum Plattenreaktor könnte ein Lochscheibenreaktor eingesetzt werden (Abb. 2b).

² Die ebz Energie- und Bauberatungszentrum Pforzheim/Enzkreis gGmbH, einer unserer Kooperationspartner (<http://www.hilda-pforzheim.net/images/documents/HildaKooperationen-NWT.pdf>), hat seine Unterstützung zugesagt.

³ Das Hilda-Gymnasium hat als ehemaliges Mädchengymnasium einen überdurchschnittlichen Frauenanteil und damit ein bisher ungenutztes Potential für Frauen in MINT-Berufen.

⁴ Diese Fragestellung ist motiviert durch den Umzug des Hilda-Gymnasiums in einen Neubau Ende April 2012. Es stellt sich die Frage, ob mit Hilfe eines Photobioreaktors eine "Bio-Solar-Klimaanlage" für größere Räume realisiert werden könnte. Dabei könnten Luftfeuchtigkeit, O₂- und CO₂-Gehalt gemessen und mit Hilfe des Bioreaktors kosten- und energieeffizient reguliert werden.

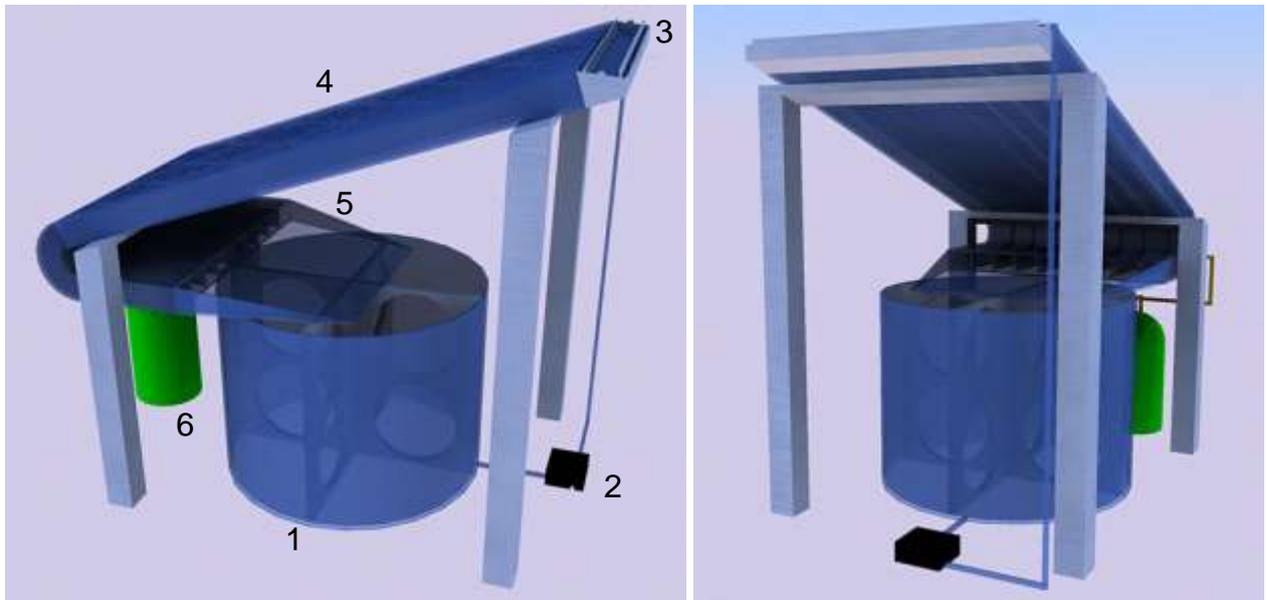


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Flachplatte/nreaktors.

- 1 Vorratsbehälter mit Rührer, hier Flügel mit Löchern zur schonenden Mischung
- 2 Pumpe
- 3 Rinne
- 4 Flachplattenreaktor
- 5 Offener Anschluss
- 6 CO₂-Flasche

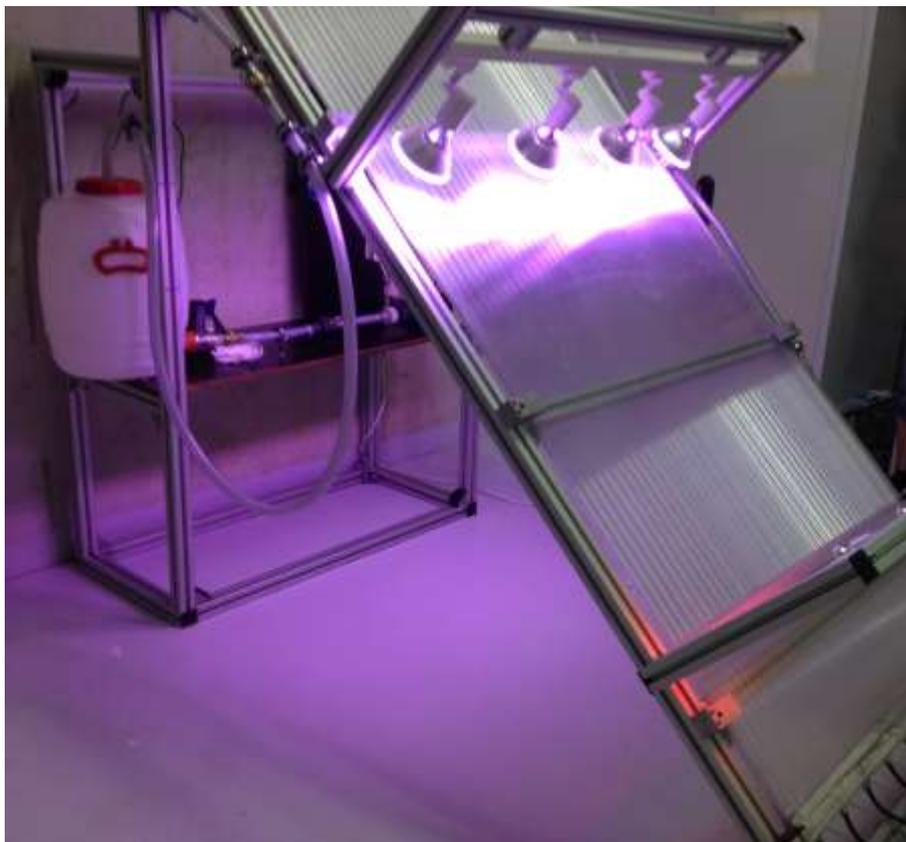


Abb. 2a: Algenreaktor mit eingeschalteten Pflanzenlampen.

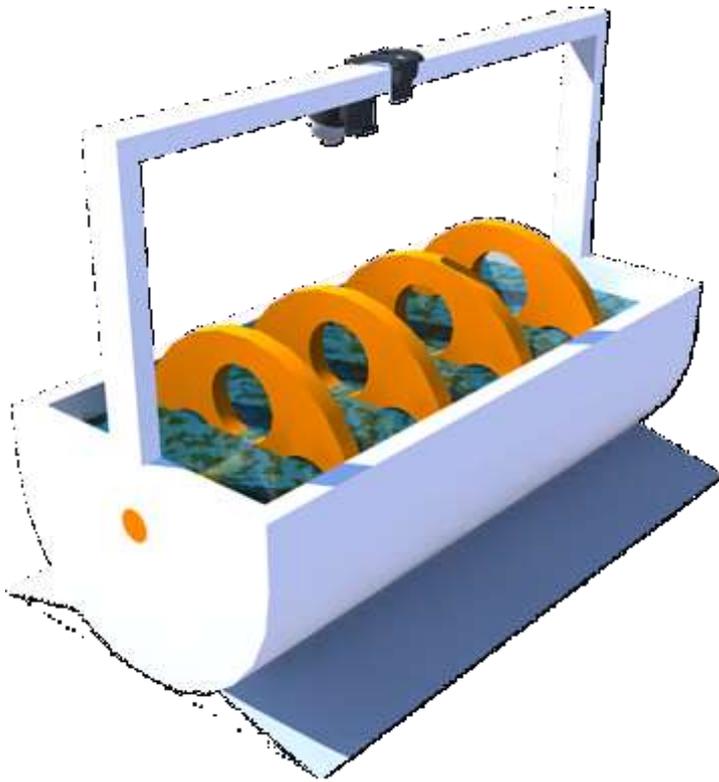


Abb. 2b: Schematische Darstellung eines Lochscheibenreaktors nach [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. Anbauten an den Lochscheiben (evtl. auch nur Scheiben) sollen die Verweilzeit der herunterrinnenden/-fallenden Suspension über der Flüssigkeitsoberfläche und damit die Photosynthese erhöhen.

Zweck und Nutzen des Vorhabens. Das Vorhaben soll dazu beitragen,

- (a) einen Photobioreaktor (inklusive Konstruktion, Mess- und Regeltechnik⁵: Volumenstrom; Art der Förderung; Temperatur; pH-Wert⁶, Beleuchtung) aufzubauen, in Betrieb zu nehmen und zu testen (Götz),
- (b) Weitere Optimierung der Verfahrensbedingungen hinsichtlich der maximal erreichbaren Gesamtmasse der Mikroalgen (Algenarten, Konzentrationen von CO₂, O₂ und Nährstoffen) (Nelles),
- (c) "Ernte" und Verarbeitung der Algenbiomasse, insb. Gewinnen der betreffenden Wertstoffe (energetische Stoffe, Nahrungsergänzungsmittel); Aufarbeitung der Algenbiomasse mit Hilfe der Extraktion (Hexan, evtl. überkritisches CO₂), Verfahren zur Trennung und Reinigen der Biomasse (Binz),
- (d) Reinigung des Reaktors,
- (e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Übergeordnetes Ziel des beantragten Vorhabens ist die Entwicklung, Aufbau und Optimierung eines *Photobioreaktors zur wirtschaftlichen Produktion von Mikroalgen*, der in der Landwirtschaft Baden-Württembergs zur stofflichen (Nahrungsergänzungs- oder Futtermittel) oder energetischen Nutzung (Treibstoff, Brennstoff, Biomasse zur Energieerzeugung) sowie als

⁵ Die Hochschule Pforzheim wird uns bei der Mess- und Regeltechnik unterstützen.

⁶ Der pH-Wert soll über den zudosierten CO₂-Strom geregelt werden zwischen pH 7,2 und pH 7,5 [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.].

sicherer Versuchsreaktor⁷ in Schulen mit Bedienung durch Schüler und möglicherweise als "Bio-Solar-Klimaanlage" in großen Räumen eingesetzt werden kann.

Im Folgenden werden die oben aufgeführten Ziele detailliert erläutert:

zu (a): Zu Beginn des Vorhabens soll ein vergleichsweise kostengünstiger Reaktor [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] aufgebaut werden, an dem erste Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Parameter durchgeführt werden können. Die Algensuspension wird aus einem Rührkessel (als Vorratsbehälter) in eine Rinne gepumpt, strömt dann durch eine transparente Platte zurück in den Rührkessel. Der Aufbau dient dazu, den Schülern möglichst schnell einen funktionsfähigen Reaktor zur Verfügung zu stellen, der sie von der Funktionstüchtigkeit des Reaktors überzeugt und ihnen die Möglichkeit bietet, die Bedienung des Reaktors sowie der Messgeräte⁸ zu erlernen und zu verbessern (hinsichtlich Masse- und Energieausbeute, evtl. auch Reinheit der Biomasse). Schwierigkeiten bereitet die Empfindlichkeit der Algen durch Scherbelastungen beim Pumpen und evtl. auch beim Strömen durch den Reaktor [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**].

Problematisch sind (1) abgestorbene Algen, die als Lebensgrundlage für Bakterien dienen, welche den Bestand der Algen gefährden können. Darüber hinaus müssen abgestorbene Algen und Bakterien bei der Aufreinigung entfernt werden. Um die betreffenden Kosten zu senken bzw. zu vermeiden, sollen unterschiedliche Möglichkeiten der Förderung (Kreiselpumpe, Kreiselpumpe mit Spalt, Schlauchquetschpumpe, Kettenförderer, archimedische Schraube⁹) untersucht werden. (2) Die Algensuspension muss zur Photosynthese genügend Licht aufnehmen können. (3) Das entstehende O₂ muss aus dem System entweichen können, ebenso muss CO₂ dem Reaktor zugeführt werden. (4) Viele Algenarten haben einen optimalen Temperaturbereich [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**], der durch energetisch sinnvolles¹⁰ Kühlen oder Heizen verwirklicht werden muss. (5) Die Algen dürfen die Apparatur nicht verstopfen.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zum Aufbau von Photobioreaktoren beschrieben [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.-Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**]. Der in [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**] verwendete Flachplattenreaktor (transparente Doppelplatte mit Pumpe und Vorratsbehälter) zeichnet sich durch seinen kostengünstigen Aufbau aus, die einen großflächigen Einsatz als sehr wahrscheinlich erscheinen lässt¹¹. Häufig wird ein Aufbau aus transparenten Rohren verwendet, durch die die Algensuspension gepumpt wird [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.,Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**]. In [**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.-Fehler! Verweisquelle konnte**

⁷ Unser Ziel ist, einen Reaktor komplett mit Sensorik in Form eines Bausatzes, einschließlich einer Sammlung von Arbeitsblättern, anzubieten. Biotechnologie spielt eine zunehmende wirtschaftliche Rolle. Funktionierende Unterrichtseinheiten aus dem Bereich der Verfahrenstechnik sind deshalb sehr begehrt in Schulen.

⁸ Diese umfassen die Temperatur, den pH-Wert, den Volumenstrom, die aktuelle Algenkonzentration, den Anteil an abgetöteten Algen. Zur Dichtebestimmung der Algensuspension und damit der Konzentration der Mikroalgen wird ein Ultraschallsystem verwendet, das uns das Fraunhofer-Institut für chemische Technologien (ICT), Pfingstal, kostenlos zu Verfügung stellt. Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB), Stuttgart, wird die Algenkonzentration mit einer Lichtabsorptionsmessung bestimmt. Zur Bestimmung des Anteils der abgetöteten Algen soll eine Webcam eingesetzt werden. Die Änderung der Farbe soll mit dem Anteil der abgetöteten Algen korreliert werden. Eventuell könnte die Flächenkonzentration (bestimmt mit einer Webcam) mit der Algenkonzentration korreliert werden, wodurch ein Sensor eingespart werden kann.

⁹ kostengünstige, technisch wenig anfällige Lösung mit historischem Hintergrund

¹⁰ Zum Heizen könnten Abgase von Verbrennungsmotoren (Blockheizkraftwerke), zum Kühlen könnte Luft oder Grundwasser verwendet werden.

¹¹ Aus diesen Gründen wurde dieser als Reaktortyp als Ausgangspunkt gewählt.

nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.] wird ein sog. Airlift-Reaktor beschrieben. Durch statische Mischer und die zusätzliche Begasung mit einem CO₂-Luft-Gemisch werden Mischvorgänge in der Suspension induziert, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in Wandnähe erhöhen und dadurch die Photosynthese steigern. Ein weiteres Verfahren bietet das Verdüsen der Algensuspension [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. Die Tropfen fallen durch einen mit CO₂ angereicherten Raum, in dem Netze gespannt sind. Durch die Tropfenform ist verbesserter Gasaustausch und maximale Photosynthese gewährleistet. Eine letzte Möglichkeit stellt ein sog. Ring-Scheiben-Reaktor oder Lochscheibenreaktor¹² dar, bei dem sich Scheiben in einem fluiden Medium drehen [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. Die Scheiben sind zentrisch auf einer Welle angeordnet, die auf der Rotationsachse eines zylinderförmigen Behälters installiert ist. Als Photobioreaktor hat er den großen Vorteil, dass das Medium scherarm gerührt und nach oben gefördert wird und dadurch die Algen wenig mechanisch belastet werden. Gleichzeitig werden große Oberflächen zum Gasaustausch und zur Photosynthese geschaffen. Anbauten an den Scheiben können den Transport der Suspension nach oben vergrößern. Durchlöcherete Anbauten verstärken, aufgrund der erhöhten Oberfläche, diesen Effekt und begünstigen die Tropfenbildung. Die Bedeutung der Anbauten und deren Aufbau auf die Ausbeute soll in dem beantragten Vorhaben untersucht werden. Ebenso soll der Einfluss des zusätzlichen Lichteintrags durch geeignet angebrachte Spiegel oder Lichtleiter ins Innere der Suspension quantifiziert werden.

zu (b): Ziel der Optimierung ist die Steigerung der Ausbeute. Hierzu sollen in einem ersten Schritt viel versprechende Algenarten (*Chlorella vulgaris*, *Phaeodactylum tricornutum*) [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.] getestet werden. Entscheidungskriterien sind neben der Ausbeute die Anfälligkeit der Algen gegen Bakterien, der wirtschaftliche Gewinn ebenso wie die Energiebilanz. Variationsparameter sind die Konzentrationen von CO₂, O₂ und Nährstoffen sowie die optimale Lichtintensität und der Frequenzbereich der Beleuchtung für die Algen¹³.

zu (c): Aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen sollte die Kultivierung der Algen abgebrochen und geerntet werden, sobald die Wachstumsrate unter einen vorgegebenen, vermutlich algenspezifischen kritischen Wert fällt. Die Beladung des Reaktors wird grob gefiltert und danach in einer Zentrifuge weiter entwässert.

Extraktion. Um die in den Algen gespeicherten Lipide zu extrahieren, werden verschiedene Verfahren angewandt [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. In dem beantragten Vorhaben soll Ultraschall zum Aufschluss der Zellstrukturen eingesetzt werden. Gleichzeitig fördert Ultraschall die Diffusion des Lösungsmittels durch Kavitation in die Zellstrukturen. Ist der Lösevorgang der Lipide im Lösungsmittel abgeschlossen, werden feste Bestandteile abgefiltert. Die Lipide und das Lösungsmittel werden durch Destillation getrennt.

Herstellung von Biodiesel aus Algenöl. Nach der Extraktion müssen die Lipide umgeestert werden¹⁴. Das entstandene Glycerin-Biodiesel-Gemisch wird in einer Zentrifuge getrennt. Der Biodiesel muss anschließend noch gewaschen und getrocknet werden vor dem Einsatz in einem Verbrennungsmotor.

Erholung. Bei dem Erntevorgang wird ein Teil der Algen vor dem Aufschlussverfahren aus der Ernte herausgenommen wird. In Vorversuchen muss überprüft werden, ob den Algen ähn-

¹² Diese Reaktorentypen werden hauptsächlich in der Kunststoffherstellung eingesetzt, beispielsweise zur Entfernung von Monomeren aus Polymeren.

¹³ Zur Klärung der photosynthetisch aktiven Region einer Algenart (häufig im Bereich 400-700 nm) soll die Wirkung von Filtern getestet werden. Dabei stellt sich die Frage, ob Filter in der Landwirtschaft eingesetzt werden können.

¹⁴ Als Katalysator wird konzentrierte Schwefelsäure verwendet. Alerdings dürfen Schüler nicht allein mit konzentrierter Schwefelsäure arbeiten.

lich der Bierhefe nach der Gärung eine Ruhezeit durch Lagerung in einem geeigneten Substrat zur "Erholung" eingeräumt wird, bevor sie wieder im Photobioreaktor eingesetzt werden [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.].

zu (d): Der Reaktor muss so konstruiert werden, dass eine schnelle und gründliche Reinigung möglich ist. Erfahrungen aus der Praxis mit *Chlorella vulgaris* zeigen, dass eine Reinigung mit klarem Wasser ausreichend ist [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. Es muss überprüft werden, ob das auch für andere Algensorten gültig ist, oder ob, aus Gründen eines bakteriellen Befalls, außer Kärchern mit kaltem Wasser heißes Wasser und/oder Zusatzmittel (z. B. H_2O_2) verwendet werden müssen.

zu (e): Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden in Zusammenarbeit mit der WirtschaftsAG und insb. mit Unterstützung von Herrn Greschik¹⁵ erfolgen. Dabei sollen sowohl die Energie, aber auch die gesamten Stoffströme (CO_2) und die Kosten bilanziert werden, um die energetischen, ökologischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile eines Verfahrens zu erfassen, Investitions- und Betriebskosten abzuschätzen und Optionen zur Kostensenkung zu entwickeln [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]. Den Schülern soll das Bewusstsein dafür geschärft werden, dass Verfahren, die allein durch Subventionen wirtschaftlich werden, nachhaltig keine Lösungen darstellen [Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.].

Einsatzbereiche. Die Einsatzgebiete des Photobioreaktors ergeben sich aus der Art der Algen:

- (i) Produktion von Algenbiomasse zur stofflichen (Nahrungsergänzungs- oder Futtermittel) oder energetischen (Treibstoff, Brennstoff, Biomasse zur Energieerzeugung) Nutzung in industriellem Maßstab,
- (ii) Versuchsreaktor für Schüler: sicherheitstechnisch unbedenkliche Produktion von Biomasse in Schulen, Reaktor zum Kennenlernen von Mess- und Regeltechnik, komplett ausgearbeitete Unterrichtseinheit,
- (iii) Verwendung des Photobioreaktors als "Bio-Solar-Klimaanlage" in großen Räumen, um die CO_2 -Konzentration bei minimalem Energieeinsatz zu verringern.

Lösungsansatz. Den Schülern soll die Möglichkeit geboten werden, unterschiedliche Facetten der Entwicklungsarbeit kennenzulernen: Grundlagenforschung (mathematisch-naturwissenschaftliches Arbeiten¹⁶), ingenieurwissenschaftliche Techniken (wie Konstruktion, Verfahrenstechnik) sowie wirtschaftliche und organisatorische Aspekte technischer Entwicklungsarbeit (Marktanalyse, Dokumentation, Zeitplan, Kostenabschätzung, Preisbildung, Kostenkontrolle, Abschlussbericht). Hierbei sollen eigenständiges Arbeiten, arbeitsteilige Zusammenarbeit sowie handlungsorientiertes, entdeckendes Lernen an aktuellen realen Problemstellungen vorgestellt und trainiert werden. Praxisorientierte Themen und deren Bearbeitung in Projektarbeit sollen den Schülern hilfreiche Anregungen zur Studiums- und Berufswahl geben und Hilfestellung für einen erfolgreichen Eintritt ins Berufsleben leisten.

Die ForscheHilda AG möchte insbesondere auch interessierten Schülerinnen am Hilda-Gymnasium als ehemaligem Mädchen-Gymnasium ermöglichen, Begeisterung für Technik zu entwickeln. Darüber hinaus sollen die erzielten Ergebnisse der beteiligten Schüler und Lehrer patentrechtlich und wirtschaftlich, sofern möglich, verwertet werden.

Wachstumsbedingungen und -modelle. Die Konzentrationen von Phosphat, Nitrat, Eisen, CO_2 sowie O_2 , der pH-Wert, die Temperatur und die Beleuchtung bestimmen das Wachstum der Algen. Um den Reaktor zu steuern, beispielsweise durch die Zugabe von Nitrat und Phosphat, wären online-Messverfahren und, damit verbunden, kontinuierliche Zugabestationen für die

¹⁵ Alexander Greschik, ebz Energie- und Bauberatungszentrum Pforzheim/Enzkreis gGmbH, Kooperationspartner des Hilda-Gymnasiums (<http://www.hilda-pforzheim.net/images/documents/HildaKooperationen-NWT.pdf>)

¹⁶ Mathematische Modellbildung von Bioprozessen, beispielsweise mit Maple.

jeweiligen wässrigen Lösungen nützlich. Könnten die Rahmenbedingungen konstant gehalten werden, wäre eine Korrelation zwischen Einflussparametern und Wachstumsrate einfacher und zielgerichteter.

Die modellhafte Beschreibung des Wachstums von Algen (Zahl der Algen: B , Zahl der Tage: n ; Biomasse) ist erforderlich, um die Größe des Reaktors festzulegen, die zeitliche Zugabe von Dünger und CO_2 zu regeln oder die Erntezyklen festzulegen. Wir möchten das Wachstum mit einer indirekten Messung (Trübung der Algensuspension) bestimmen.

Folgende vier Wachstumsmodelle wurden im Modul vorgestellt: (i) lineares Wachstum: $B(n) = B(n-1) + a$; (ii) exponentielles Wachstum: $B(n) = B(n-1) \cdot \exp(k)$; beschränktes Wachstum: $B(n) = B(n-1) + k(S - B(n-1))$ und logistisches Wachstum: $B(n) = B(n-1) + qB(n-1)(S - B(n-1))$. Die SchülerInnen lernten mit Hilfe von *Excel* Daten einzugeben, zu berechnen und darzustellen. Sie konnten den Einfluss einzelner Parameter auf die Algenzahl selbständig untersuchen (Abb. 3).

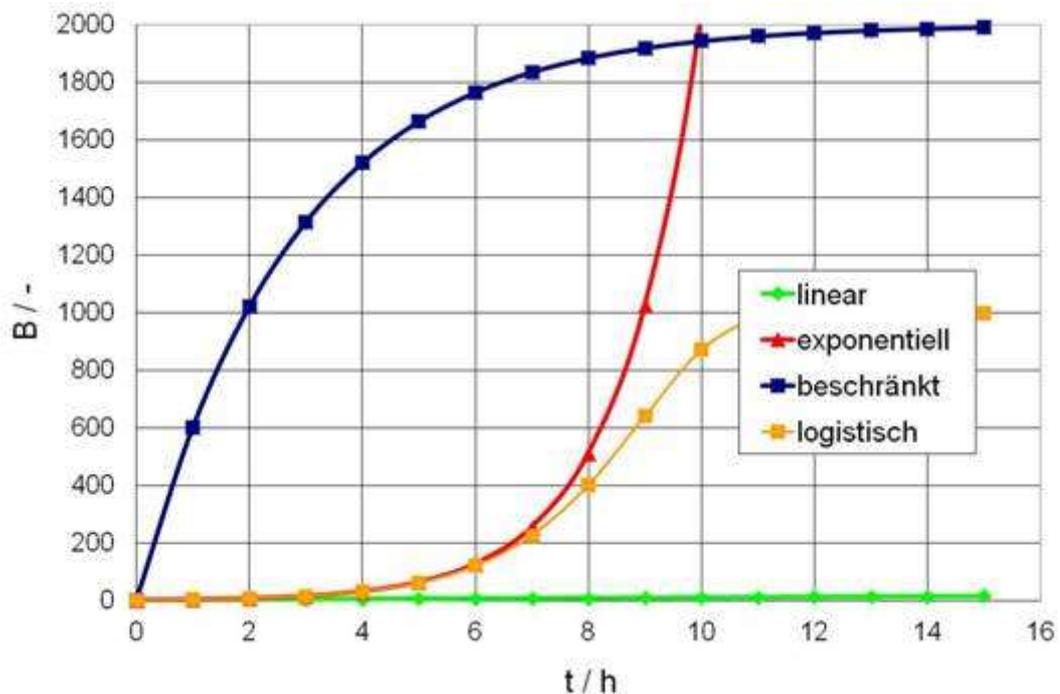


Abb. 3: Die Algenzahl $B(n)$ (Zahl der Tage: n) für unterschiedliche Wachstumsmodelle.

Mikroskopie und Nachweisreaktionen. Algenproben konnten freundlicherweise bei der Firma G.RAU GmbH & Co. KG, Pforzheim, in einem Licht- und Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht werden. Die Lichtmikroskopie-Aufnahme zeigt Strukturen von etwa $5 \mu\text{m}$, bei denen es sich um die einzelnen Zellen handeln muss [1]. *Chlorella vulgaris* ist darüber hinaus für die Bildung lockerer, leicht auflösbarer Aggregate [4] bekannt, die offenbar zu sehen sind. Die Größe der einzelligen Algen ist auch in der REM-Aufnahme (Abb. 5) zu erkennen. Leider sind keine Aussagen, weder mit Licht- noch mit Rasterelektronenmikroskopie, über das Zellinnere möglich.



Abb. 4: Aufnahme einer Algensuspension in einem Auflichtmikroskop (G.RAU GmbH & Co. KG, Pforzheim), Vergrößerung: 1000.

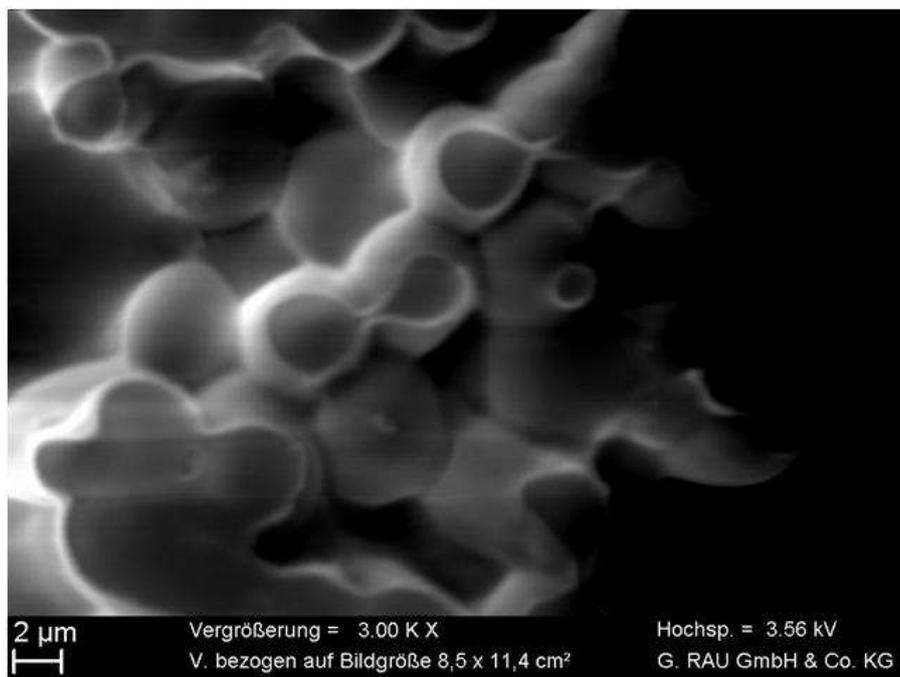


Abb. 5: REM-Aufnahme einer getrockneten Algenprobe (G.RAU GmbH & Co. KG, Pforzheim), Vergrößerung: 3000.

Um zu überprüfen, ob die Wasserverhältnisse optimal sind, wurden verschiedene Analysen (Eisen, Sauerstoff, Nitrat und Phosphat) benutzt. Es handelte sich dabei um kommerziell erhältliche Tests für ein Aquarium oder einen Teich. Je nach Gehalt des getesteten Stoffes tritt eine unterschiedliche Verfärbung auf. Die Algensuspension der grünen *Chlorella vulgaris* verdunkelte die Farbe und verfälschte somit den Test. Deshalb wurden später Teststreifen benutzt. Diese konnten trotz der Algen gut interpretiert und abgelesen werden.

Elektrische Messverfahren ermöglichen es häufig, einen Reaktor kontinuierlich und ohne hohen Personalaufwand zu regeln. Abb. 6 zeigt die elektrische Leitfähigkeit einer wässrigen

Lösung in Abhängigkeit der Konzentration eines kommerziellen Pflanzendüngers. Der Zusammenhang ist annähernd linear und damit geeignet für die Bestimmung der Konzentration des Düngers über die elektrische Leitfähigkeit. In nachfolgenden Untersuchungen muss geklärt werden, ob die Algen die vorhandenen Ionen (NO_3^- , PO_4^{3-} , Fe^{2+}) gleichmäßig verbrauchen. Falls ja, wäre die Leitfähigkeit eine geeignete Messgröße zur Regelung. Falls nein, müsste eine ionenspezifische Messmethode auf der Basis der Elektrophorese entwickelt werden. Als Kontrollmethode ist geplant, die Ionenchromatographie zu verwenden (CIP Chemisches Institut Pforzheim GmbH, Pforzheim).

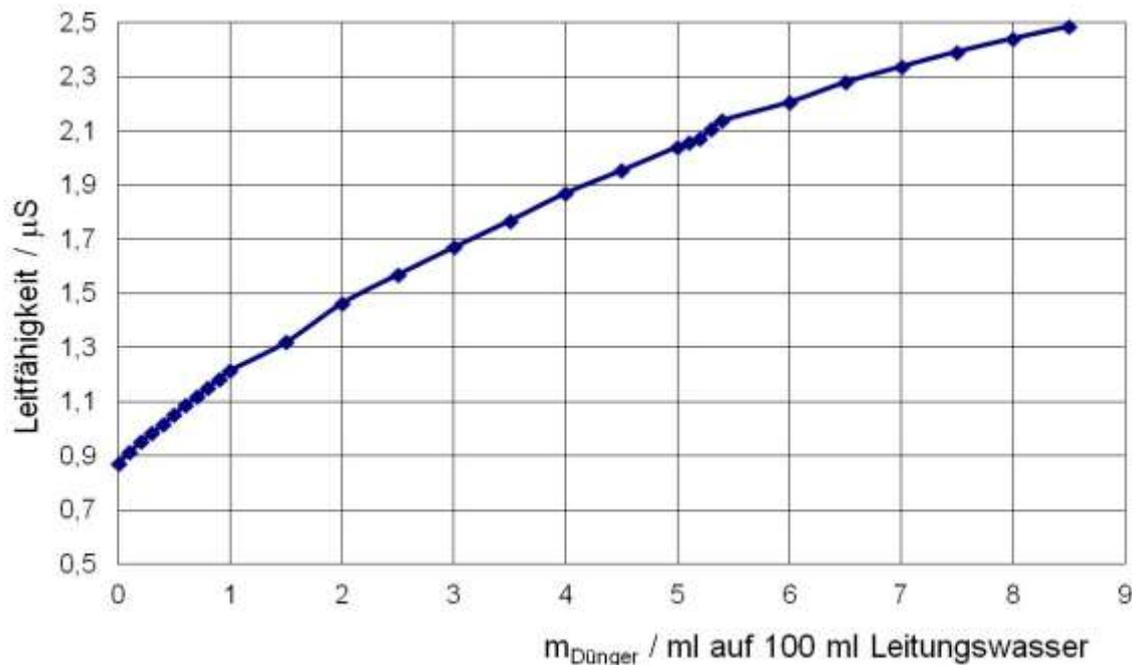


Abb. 6: Leitfähigkeit einer wässrigen Lösung in Abhängigkeit der Konzentration eines kommerziellen Pflanzendüngers

Nutzung und Zukunftsausblick. Die Algen benötigen CO_2 , um Photosynthese betreiben zu können. Dieser kann als Endprodukt aus Kohlekraftwerken oder Raffinerien stammen. Vielversprechende Ansätze sind:

- Nahrungs-, Nahrungsergänzungs- und Futtermittel [5],
- Biodiesel aus Algenbiomasse,
- Vergären von Biomasse zu Ethanol,
- Erzeugen von Biogas, z. B. zur Stromerzeugung,
- Nutzung von „Abfall- CO_2 “ für die Algenproduktion oder für ein "Bio-Solar-Klimaanlage" in einem Raum.

Um die Reaktorführung zu untersuchen, werden Algen in Bechergläsern kultiviert (Abb. 7). Die vergleichsweise kleinen Ansätze erlauben es, Parameter leicht zu variieren. Um die Herstellung von Biodiesel zu verdeutlichen, wurde in einem Modellversuch aus Rapsöl ein als Biodiesel verwendbares Fluid hergestellt (Abb. 8). Abb. 9 zeigt den Kolben nach der Reaktion

mit zwei nicht mischbaren Phasen. In der oberen Phase befindet sich der Biodiesel. Die untere wässrige Phase muss abgezogen werden.



Abb. 7: Algen in Bechergläsern auf Magnetrührern. Bei dem vorderen wird Luft, bei dem hinteren CO₂ eingedüst.



Abb. 8: Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl.



Abb. 9: Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl: obere Phase: als Biodiesel verwendbare Ester, untere Phase: nicht brennbares Glycerin.

Förderung. Gefördert wird das zweijährige Vorhaben *Photobioalgenreaktor* durch die Landesstiftung Baden-Württemberg im Rahmen des Programms MikroMakro, die Hochschule Pforzheim, die Fa. der STÖBER ANTRIEBSTECHNIK GmbH&Co.KG, Pforzheim, die Fa. G.RAU GmbH & Co. KG, Pforzheim, sowie die Hector-Stiftung, Heidelberg.

Literatur

1. Seibert, A.; Schmid-Staiger, U.; Trösch, W.; Hirth, T.: CO₂-Kilometer und Rohstofflieferant – Kultivierung und Nutzung von Mikroalgen. Chemie-Anlagen und Verfahren: CAV (2009), 2, 36-37
2. Schmid-Staiger, U.; Preisner, R.; Marek, P.; Trösch, W.: Kultivierung von Mikroalgen im Photobioreaktor zur stofflichen und energetischen Nutzung. Chemie-Ingenieur-Technik 81 (2009), Nr.11, 1783-1789

3. Troesch, W.; Schmid-Staiger, U.; Zastrow, A.; Retze, A.; Brucker, F.: Photobioreaktor mit verbessertem Lichteintrag durch Oberflächenvergrößerung, Wellenlängenschieber oder Lichttransport. DE 1999-19916597, WO 2000-EP3089
4. Meiser, A.; Schmid-Staiger, U.; Trösch, W.: Optimization of eicosapentaenoic acid production by *Phaeodactylum tricornutum* in the flat panel airlift (FPA) reactor. *Journal of applied phycology* 16 (2004), Nr.3, 215-225
5. Degen, J.; Uebele, A.; Retze, A.; Schmid-Staiger, U.; Trösch, W.: A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of biotechnology* 92 (2001), Nr.2, 89 - 94
8. Peciar, M.; Fekete, R.; Peciar, P.; Kušník, P.: Photo-bioreactor for biomass production, In: *Proceedings of the 39th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering* (Editor: Markoš, J.), Tatranské Matliare, Slovakia, 116-121, 2012
9. http://global.subitec.com/pdf/PM_EnBW_Subitec.pdf, 19.09.2012, "Preis für Forschung zur CO₂-Bindung mit Algen"
10. <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/1873011/>, 24.09.2012, "Treibstoff aus Mikroalgen"
11. Kauling, J.; Brod, H.; Schmidt, S.; Poggel, M., Frahm, B.; Rose, R. (Bayer Technology Services GmbH, 51373 Leverkusen): Einweg-Bioreaktor, DE102006018824A1, 2007
12. <http://www.igb.fraunhofer.de/content/dam/igb/de/documents/broschueren/Algen-Nachhaltige-Rohstoffquelle-fuer-Wertstoffe-und-Energie.pdf>, 1.10.2012, "Algen - Nachhaltige Rohstoffquelle für Wertstoffe und Energie",
14. <http://www.algaeobserver.com/algenzucht-damit-muessen-sie-rechnen>, 4.10.2012, "Algenzucht - damit müssen Sie rechnen", Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die Algenproduktion betreffend
17. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/algenzucht-vom-wasserbett-zum-biosprit-11110023.html>, 4.10.2012, "Gescheiterte Algenzucht, ...", hoher Energieaufwand bei der Ab-scheidung von CO₂ aus Verbrennungsgasen
18. <http://www.aquakulturtechnik.de/algenzucht.htm>, 4.10.2012, "Algenzucht", Übersicht über Algen
22. Bast, E.: *Mikrobiologische Methoden*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1999

25. http://www.hielscher.com/ultraschall/algae_extraction_01.htm, 13.10.2012, Extraktion und Ultraschall, Warthestrasse 21, 14513 Teltow