



Biomasse aus Mikroalgen: Studie zur gleichzeitigen Nutzung als Nahrung und Kraftstofflieferant

IRS-Bericht-Nr.: IRS-14-IB02

Boysen-Kennzeichen: BOY11-Nr. 83

gefördert durch die
Friedrich-und-Elisabeth-Boysen-Stiftung

Abschlussbericht für den Zeitraum
01.01.2012 – 31.12.2013

Abschlussbericht von
Dipl.-LMChem. M. Buchert

April 2014

Formalien

1. Projekttitle

Biomasse aus Mikroalgen: Studie zur gleichzeitigen Nutzung als Nahrung und Kraftstofflieferant

2. Durchführendes Institut

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 29
70569 Stuttgart

3. Antragsteller

Dr.-Ing. Stefan Belz
Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
Tel.: 0711 / 685-60361
E-Mail: belz@irs.uni-stuttgart.de

4. Geförderte Doktorandin

Dipl.-LMChem. Melanie Buchert
Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
Tel.: 0711 / 685-62386
E-Mail: buchert@irs.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung..... | 3 |
| 2. Grundlagen zur Nutzung von Mikroalgen | 6 |
| 2.1 Menschliche Ernährung..... | 6 |
| 2.2 Biokraftstoff..... | 8 |
| 2.3 Eigenschaften von Mikroalgen | 10 |
| 2.4 Kultivierung von Mikroalgen | 11 |
| 3. Experimentelle Daten..... | 18 |
| 4. Interpretation der Daten im Vergleich | 23 |
| 4.1 Menschliche Ernährung..... | 23 |
| 4.2 Biokraftstoff..... | 23 |
| 4.3 Gleichzeitigkeit..... | 23 |
| 4.4 Downstream Processing | 23 |
| 5. Zusammenfassung | 25 |
| 6. Ausblick..... | 26 |
| 7. Literatur | 27 |

Abkürzungen und Formelzeichen

| | |
|---|---|
| BBM | Bold's Basal Medium |
| CH ₄ | Methan |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| C ₆ H ₁₂ O ₆ | Summenformel Biomasse (primär Glucose) |
| ΔH^0 | Standardenthalpiedifferenz |
| DSN | Verdünntes Meerwasser-Stickstoff-M. (diluted seawater nitrogen medium) |
| DSP | Downstream Processing |
| H ₂ O | Wasser |
| IPDP | Institut Pieldner |
| IRS | Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart |
| O ₂ | Sauerstoff |
| PAR | Photosynthetisch wirksame Strahlung (Photosynthetically Active Radiation) |
| PBR | Photobioreaktor |
| PUFA | Mehrfach ungesättigte Fettsäuren (poly unsaturated fatty acids) |
| OD | Optische Dichte |

1. Einleitung

Im vorliegenden Bericht werden die erreichten Ergebnisse des durch die Friedrich-und-Elisabeth-Boysen-Stiftung geförderten Projekts BOY13-Nr. 83 mit dem Titel „Biomasse aus Mikroalgen: Studie zur gleichzeitigen Nutzung als Nahrung und Kraftstofflieferant“ vorgestellt. Die erreichten Ergebnisse weichen von dem zu Projektbeginn formulierten Zeitplan ab (siehe Tabelle 1). Die Veränderungen wurden im Zwischenbericht wie folgt besprochen:

Einerseits verzögerte sich der Umzug des Labors von ursprünglich Februar 2012 auf September 2012. Durch damit einhergehende Umbaumaßnahmen traten mehrfach Ausfälle der Photobioreaktor (PBR)-Peripherie am großen (25 L) PBR auf. Deshalb konnte die Kultur nicht optimal versorgt werden, so dass sich der Zustand der Kultur immer weiter verschlechterte und sie schließlich nicht mehr für Experimente zu gebrauchen war. Andererseits ergaben sich in der Recherche neue Erkenntnisse zur Verarbeitung der Mikroalgen-Biomasse, wodurch eine Neueinschätzung der experimentellen Parameter erforderlich wurde. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die praktischen Arbeiten erst nach dem Umzug wieder aufzunehmen, als eine stabile und sichere Kultivierung von Mikroalgen im neuen Labor möglich war. Hierzu musste die gesamte Peripherie wieder errichtet, ein neuer PBR gekauft und eine Schwesterkultur aus dem kleinen (5 L) PBR herangezogen werden. [1]

Das am 01.01.2012 begonnene Projekt hatte zum Ziel, eine Studie über die Verwendung von Mikroalgen-Biomasse zur gleichzeitigen Nutzung als Nahrungsquelle und Kraftstofflieferant vorzulegen. Hierzu sollten Kultivierungsparameter und Aufarbeitungsmethoden so gewählt werden, dass für beide Verwendungszwecke ein effizientes und ökonomisches Prozess-Schema entsteht. Dies könnte den Konflikt „Teller vs. Tank“ [2], also die Nutzung von Anbaufläche und Ernte von Nahrungspflanzen als Kraftstofflieferanten, entschärfen. Hierzu sollten folgende Punkte bearbeitet werden:

- Identifizierung geeigneten Mikroalgenarten (essbar, speicherstoffreich),
- Festlegung der Kultivierungsparameter und deren evtl. Modulierung,
- Analyse der aus den Experimenten gewonnene Biomasse auf ihre Zusammensetzung hin analysiert und Bewertung ihrer dualen Verwendung,
- Evaluation von geeigneten Downstream Processing (DSP)-Methoden für die Verwertung der Biomasse,
- Akquise passender Kooperationspartner in der Energiewirtschaft.

Das auf zwei Jahre geplante Projekt wurde in teilweise parallel bearbeitbare Phasen unterteilt, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Während alle Phasen und Aufgaben bearbeitet wurden, wurde teilweise die Herangehensweise an diese geändert. Beispielsweise zeigte sich beim DSP während der Einarbeitung, dass es nicht möglich war, am Institut die nötigen Geräte und Methoden zu etablieren, um diese selbst durchzuführen und somit die Effizienz zu bewerten. Dies lag zum einen an den neu gewonnenen Erkenntnissen über die Mikroalgen, wie Verarbeitungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Zellwanddicke und neuen Verfahren hierzu, der Verwertung von Proteinen [3] in Gegensatz zur Fetten und Kohlenhydraten und zum anderen an den gegebenen Bedingungen vor Ort.

Es war eine längere Arbeitszeit mit der zweiten Mikroalgenart (geplant *Nostoc*, eingesetzt *Scenedesmus*) vorgesehen, welche auf Grund der erschwerten Auswahlbedingungen nicht machbar war. Die sehr lange favorisierte Cyanobakterienart *Nostoc sphaeroides* konnte trotz hohem Einsatz nicht beschafft werden, die alternative Mikroalge *Scenedesmus obliquus* konnte dann erst ab Mitte des zweiten Projektjahres kultiviert werden.

Kultivierung und Analyse der verwertbaren Inhaltsstoffe sollen eine Einordnung in einen größeren Energiekreislauf ermöglichen, siehe Abbildung 1.

Tabelle 1: Projektplan

| Arbeitsgegenstand | Zeitraumen | Stand |
|---|------------|---|
| Konzeption und Auslegung der Experimente o Definition der Anforderungen an die Biomasse und Kultivierungsparameter o Auswahl geeigneter Mikroalgenarten o Modellierung in einem Prozess-Schema o Festlegung der durchzuführenden Telexperimente | 3 Monate | abgeschlossen |
| Akquirierung neuer Kooperationspartner auf dem Gebiet der Biomasseverwertung (DSP/Biokraftstoffanlagen) | parallel | Identifizierte Partner nicht an Austausch interessiert (E.ON Hanse, RWE, Algomed) |
| Betrieb der PBR o Kultivierung der einzelnen Mikroalgenarten o DSP-Entwicklung für duale Verwendung der Biomasse | 18 Monate | - <i>Chlorella</i> und <i>Scenedesmus</i> werden in je 1 kleinen PBR kultiviert -DSP als Konzept verfügbar |
| Analyse und Auswertung o Analyse des Wertstoffgehalts bzw. Brennwertes der Biomasse o Korrelation zwischen Kultivierungsparameter und Wertstoffgehalt bzw. Brennwert o Bewertung der dualen Verwendung der Biomasse | 6 Monate | -Wertstoffgehalt und Brennwert ermittelt -Korrelation nicht festgestellt -bewertet |

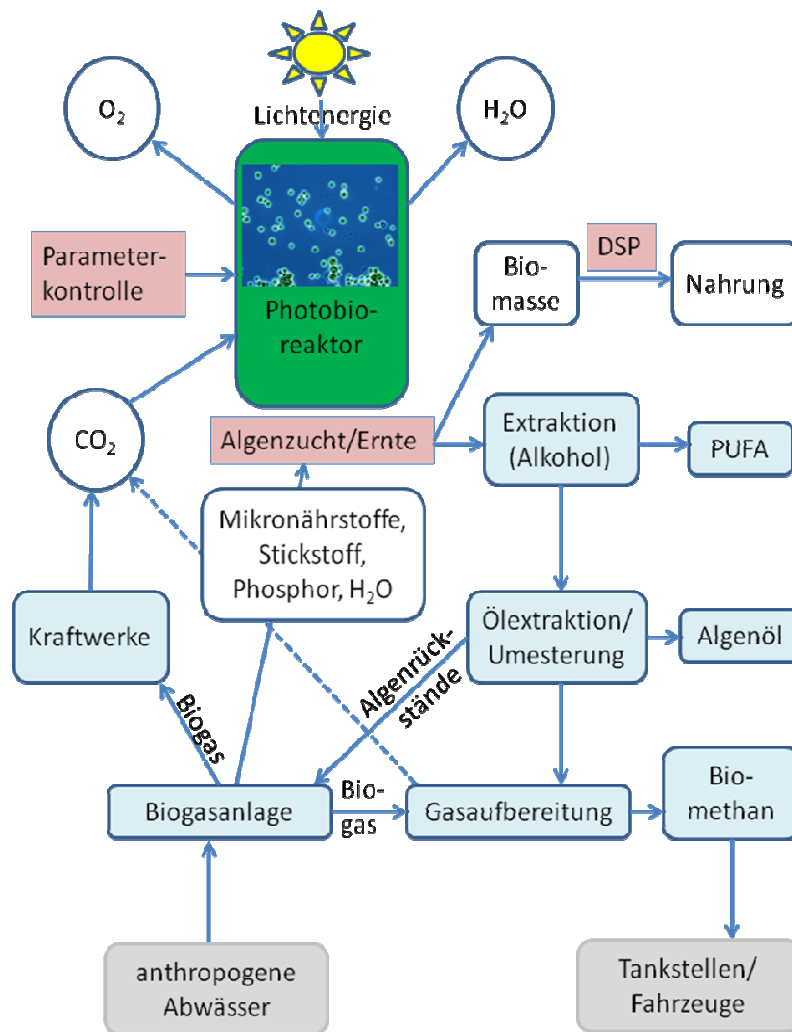


Abbildung 1: Einordnung des Projektes in einen Kreislauf zur Nutzung von Biomasse als Nahrung und Kraftstofflieferant (modifiziert) [4]

(rot - Projektaufgaben; weiß - Zu-/Abgänge PBR; blau - Kraftstoffkreislauf; grau - weitere mögliche Einbindungen)

Nach einer Aufarbeitung im DSP stehen die wertvollen Inhaltsstoffe der essbaren Mikroalgen der menschlichen Ernährung zur Verfügung. Die oben erwähnten Mikroalgen produzieren einen hohen Anteil an Proteinen, daneben Kohlenhydrate und Ballaststoffe, sowie Fette und sekundäre Pflanzenstoffe, die sich positiv auf die Gesundheit des Menschen auswirken können.

Die Biomasse kann aber auch einem Energiekreislauf zugeführt werden, entweder nach Bestandteilen oder im Ganzen. Dabei können Algenöle zu Biodiesel umgeestert werden, Algenkohlenhydrate werden durch Fermentierung zu Bioethanol umgebaut und Algenproteine erfahren durch stoffwechselveränderte *Escherichia coli* (u.a. Bakterien) eine Umwandlung zu Alkoholen für Biokraftstoffe [3]. Diese Verfahren können auch auf die unaufgetrennte Bio-

masse oder Biomasserückstände angewendet werden. Zusätzlich sei noch die Verwertung durch hydrothermale Biomassevergasung zu CO_2 , H_2 und C_xH_y (z.B. CH_4 – Biomethan) erwähnt [4].

2. Grundlagen zur Nutzung von Mikroalgen

2.1 Menschliche Ernährung

Die menschliche Ernährung setzt sich aus Trinkwasser und Lebensmitteln zusammen, wobei letztere aus den Hauptbestandteilen Eiweiß, Fett und Kohlenhydrate bestehen. Zusätzlich enthalten sie Vitamine, Ballaststoffe und Mineralstoffe (Mengen- und Spurenelemente).

Für die tägliche Aufnahme an Energie in kcal sowie der Nährstoffe aus der Nahrung gibt es Empfehlungen und Grenzwerte, die im deutschen Raum vorwiegend von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung gestellt werden. Diese empfiehlt z.B. 50 % der Energie aus Kohlenhydraten zu beziehen, 30 % aus Fetten und die restlichen 20 % aus Proteinen. Jedoch gibt es heute zu Tage viele verschiedene wissenschaftliche Meinungen, und die Empfehlungen entsprechen nur Durchschnittswerten.

Trotz der breitgefächerten wissenschaftlichen Meinung gibt es allgemeine Bewertungskriterien, durch die Nahrungsmittel(-kombinationen) verglichen werden können, wie folgt.

Für **Eiweiß** gibt es die biologische Wertigkeit, bei der das Volleieiweiß den festgelegten Referenzwert 100 (oder 1 = 100 %) hat. Sie beschreibt, wie gut das jeweilige Eiweiß vom Körper verwertet werden kann. Dabei spielt die essentielle Aminosäurezusammensetzung eine zentrale Rolle. Je ähnlicher die Eiweißzusammensetzung dem der Körperproteine ist, desto besser wird es verwertet und desto weniger braucht der Mensch davon, um eine ausgeglichene Proteinbilanz zu erhalten. Die essentielle Aminosäure, die am wenigsten enthalten ist, limitiert die Verwertung. Dies wird gut im Liebigschen Fass, siehe Abbildung 2, dargestellt. Daraus folgt auch, dass es Eiweiße gibt, deren Wert höher als 100 liegt, z.B. hat Molke den Wert 105. Enthält eine Eiweißquelle nicht alle essentiellen Aminosäuren, wird sie als unvollständige Proteinquelle bezeichnet und hat eine biologische Wertigkeit von 0. Sie kann aber durch Kombination mit anderen Nahrungsmitteln aufgewertet werden.

Chlorella vulgaris hat je nach Aufarbeitung eine biologische Wertigkeit von 90-100 [5] und ist eine vollständige Proteinquelle. Das Protein von *Scenedesmus obliquus* enthält ebenfalls alle essentiellen Aminosäuren und hat eine biologische Wertigkeit von ca. 80 [6].

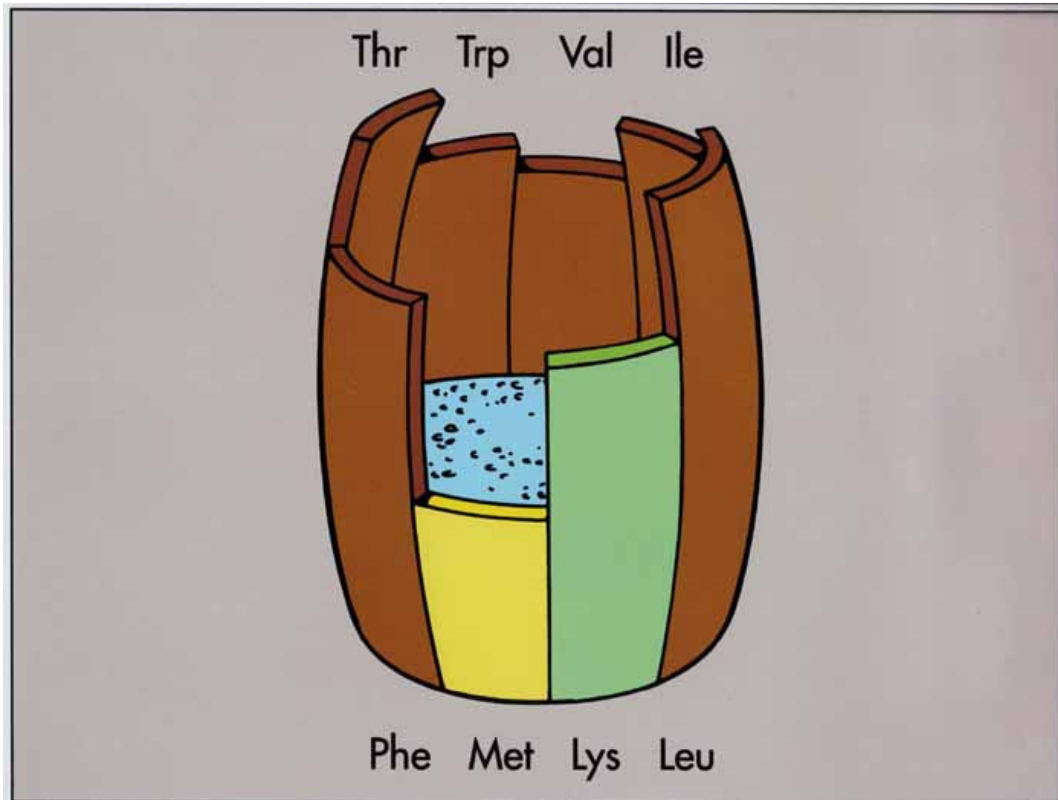


Abbildung 2: Liebigsches Fass, die am wenigsten vorhandene Aminosäure (hier Methionin) in einem Protein limitiert die Verwertung im menschlichen Körper [7] Thr – Threonin, Trp – Tryptophan, Val – Valin, Ile – Isoleucin, Phe – Phenylalanin, Met – Methionin, Lys – Lysin, Leu - Leucin

Im Zusammenhang mit Mikroalgen wird öfter darauf hingewiesen, dass diese einen hohen Nukleinsäuregehalt aufweisen. Hierbei wird auf das Bausteinmolekül Purin angespielt, das bei der Stoffwechselkrankheit Gicht je nach Veranlagung eine wichtige Rolle spielt [8]. Jedoch wird die Mikroalgenbiomasse nicht als einzige Proteinquelle in der Ernährung eingesetzt sondern als Supplement, so dass die tägliche Aufnahme sehr niedrig ist. Selbst wenn 200 g Algen konsumiert würden, entspräche dies einem Harnsäureäquivalent von nur 4 mg und läge damit bei einem Hundertstel des täglichen, unbedenklichen Wertes [9].

Hauptenergielieferanten in der Ernährung sind die **Kohlenhydrate**, wobei auf eine ausreichende Mischung zwischen kurzkettigen (schnelle Energielieferanten) und langkettigen Kohlenhydraten (Ballaststoffe) geachtet werden sollte. Eine ausgewogene Ernährung liefert genügend verdaubare Kohlenhydrate, so dass auch die sehr wichtige Versorgung des Gehirns mit Glucose gewährleistet wird, ebenso wie unverdaubare Fasern für die Darmgesundheit und Peristaltik [10].

Fett besteht aus Fettsäuren an einem Glyceringerüst. Für den Menschen sind Fettsäuren mit mehrfachen Doppelbindungen zumeist essentiell und zeichnen somit hochwertige Fette aus. Durch die hohe Energiedichte muss die tägliche Fettaufnahmemenge kontrolliert werden, vorgeschlagen ist ein Grenzwert von ca. 60 g/d/Person.

Mikroalgen weisen außerdem in signifikanter Menge die Vitamine A, B, C, E und K auf, sowie die Mineralien Kalium, Calcium, Magnesium und Eisen. Dazu kommen noch die sekundäre Pflanzenstoffe, allen voran das Chlorophyll und die Carotinoide. Diese runden das Angebot der Biomasse ab und sind wertvoll für die menschliche Ernährung. Dies wird in den Kapiteln 3 und 4.1 näher dargestellt und durch lebensmittelchemische Analysen untermauert.

2.2 Biokraftstoff

Generation und Herstellung

Ein allgemeines Herstellungsschema zeigt Abbildung 3. Auf dieses soll hier beispielhaft eingegangen werden.

Fette sind das Produkt einer Veresterung von Fettsäuren mit einem Glycerinmolekül. Durch eine Umesterung, die Alkoholreste der Ester werden durch andere ersetzt, kann Biodiesel gewonnen werden, ein Biokraftstoff der ersten Generation. Zu diesen gehört auch Bioethanol, das durch Fermentation von Kohlenhydraten und anschließender Destillation hergestellt wird. Erste Generation weist darauf hin, dass essbare Pflanzenteile verwendet werden.

Zu den Kraftstoffen der zweiten Generation gehören synthetische Biokraftstoffe, Biomethan und Cellulose-Ethanol. Bisher nimmt Biowasserstoff eine untergeordnete Rolle ein. Hier wird versucht nur nicht-essbare Pflanzenteile zu verwerten.

Bei Kraftstoff aus Algen spricht man oft auch von der dritten Generation, da diese durch ihre hohe Biomasseproduktionsrate den Landpflanzen überlegen sind und nicht zu den konventionellen Lebensmitteln zählen. Kraftstoffe der zweiten und dritten Generation weisen einen erhöhten technischen und finanziellen Aufwand für Kultivierung und Gewinnung auf.

Brennwerte

Biogas besteht zu ca. 62 % aus dem brennbaren Gas Methan und zu über 30 % aus CO₂. Zum Vergleich: Erdgas besteht zu 80 - 90 % aus Methan. Der Brennwert liegt bei 21,5 - 23,5 MJ/m³ oder umgerechnet 5,5 - 6,0 kWh/m³; im Durchschnitt kann von ca. 5,8 kWh/m³ ausgegangen werden. [12]

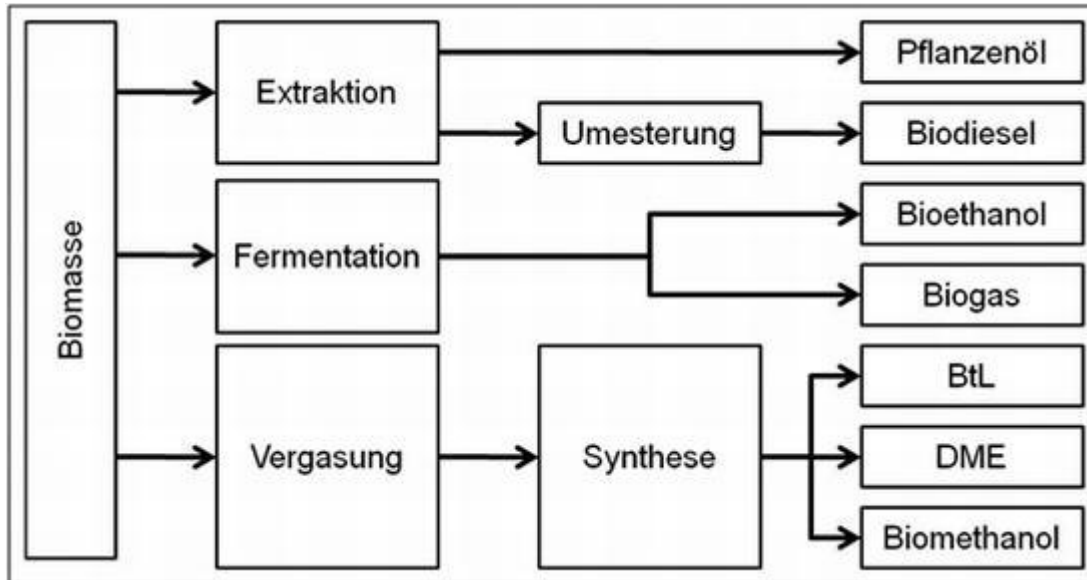


Abbildung 3: Allgemeines Schema zur Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse [11]

Ökobilanz

Bei der Verbrennung von Biomasse wird nur das CO₂ frei, welches die Pflanzen über die Photosynthese gebunden haben und ist somit CO₂-neutral. Durch Massenkultivierung mit Düngereinsatz und aufwendigen Aufarbeitungsmethoden wird jedoch mehr CO₂ in den Kreislauf eingetragen und die neutrale Bilanz verschlechtert.

Daneben wird für Biokraftstoff auch ein „Wasserfußabdruck“ ähnlich dem CO₂-Fußabdruck erstellt. Bioethanol aus Zuckerrüben hat zum Beispiel einen Wasserfußabdruck von 30 m³/GJ wohingegen der gleiche Kraftstoff aus Hirse einen Wert von 157 m³/GJ aufweist [13]. Ähnliches gilt für Biodiesel aus Sojabohnen (94 m³/GJ) im Vergleich zu Raps (335 m³/GJ). Für die am IRS kultivierten Algen kann ein rudimentärer Wasserfußabdruck erstellt werden.

Außerdem wird häufig die Biodiversität als Beurteilungskriterium hinzugezogen, sowie die Ausnutzung von Koppel- oder Nebenprodukten [14]. Diese Betrachtungen sind sehr weitgreifend und werden in dieser Studie nicht durchgeführt, da es in einer Laborumgebung keine schützenswerte Biodiversität gibt und es keinen Zugang zu einem Markt für Koppel- und Nebenprodukte gibt.

Teller-Tank-Konflikt

Während Landpflanzen Bodenfläche von potentielltem Acker benötigen, können Mikroalgen als aquatische Organismen in PBR auch auf Brachland kultiviert werden. Dadurch treten sie nicht in Konkurrenz mit Nahrungspflanzen, machen Steppe und Wüstengebieten nutzbar und

nutzen dabei den vorhandenen Platz optimal, da Anlagen auch in die Höhe gebaut werden können. Z.Z. wird der „Teller vs. Trog“-Konflikt als vorherrschend betrachtet und die strukturelle Armut spielt eine wesentlich größere Rolle im Zusammenhang mit der hohen Anzahl hungernder Menschen als die Nutzung alternativer Kraftstofflieferanten [15].

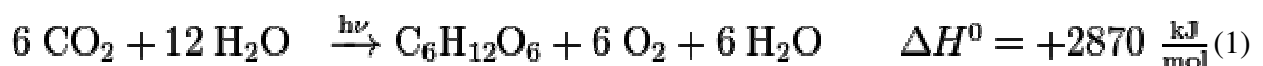
2.3 Eigenschaften von Mikroalgen

Einteilung

Mikroalgen sind eine Sammelgruppe von Photosynthese betreibenden Einzel- bis Wenigzellern, die in keinem echten Verwandtschaftsverhältnis zueinander stehen. Z.Z. sind ca. 80 000 Arten bekannt, von denen aber nur 0,2 % industriell u.a. als Lebensmittel genutzt werden. [16] Am IRS werden Grünalgen kultiviert, die als Frisch- oder auch Süßwasseralgen bezeichnet werden. Sowohl *Scenedesmus* als auch *Chlorella* gehören zu den für den menschlichen Verzehr geeigneten Algen.

Photosynthese

Mikroalgen sind einzellige Organismen, die durch Photosynthese, siehe Gleichung (1), Biomasse ($C_6H_{12}O_6$, primär Glucose) aufbauen und Sauerstoff (O_2) bereit stellen. Hierbei wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) mit Wasser (H_2O) durch Lichtenergie zu Biomasse und Sauerstoff umgesetzt.



ΔH^0 ist die Standardenthalpiedifferenz und bilanziert hier die Reaktion. Der positive Wert zeigt an, dass die Reaktion endotherm, d.h. energieverbrauchend, erfolgt. Diese Energie kommt aus den Lichtphotonen, die im Freiland durch die Sonne zur Verfügung stehen und im Labor mit unterschiedlichen Strahlern, siehe auch Kapitel 2.4, bereitgestellt werden.

Nähr- und Brennwert

Die ausgesuchten Mikroalgen sind reich an Protein und weisen zudem wertvolle Fette und gesunde Ballaststoffe auf. Diese Ballaststoffe finden sich hauptsächlich in der Zellwand, so dass diese vor dem Verzehr aufgebrochen werden muss. Bisher konnte nur für *Chlorella* eine lebensmittelchemische Analyse durchgeführt werden, da in den Wachstumszyklen von *Scenedesmus* nicht genug Biomasse im kleinen PBR erzeugt werden konnte. Die Ergebnisse für *Chlorella* finden sich in Kapitel 3. Die nasse Biomasse von *Chlorella* ergibt einen kalori-

schen Nährwert von knapp 100 kcal/100 g. Durch Umrechnung der Makronährstoffe in ihre kcal-Äquivalente kann gezeigt werden, dass die trockene Biomasse ca. 370 kcal/100 g bereit stellt. Eine kommerzielle Analyse gibt einen Nährwert von knapp 300 kcal/100 g an [17], was durch eine anders gelagerte Verteilung der Makronährstoffe zu erklären ist, aber die Größenordnung bestätigt. Damit liefern Mikroalgen kalorienseitig genauso viel Energie pro 100 g wie andere Grundnahrungsmittel. Zusätzlich enthalten sie wichtige Vitamine, sekundäre Pflanzenstoffe und je nach Gruppe noch andere vorteilhafte Inhaltsstoffe. Dies findet sich ebenfalls in den Analyseergebnissen in Kapitel 3.

Ihr Brennwert liegt zwischen dem von Braun- und Steinkohle [18], also bei rund 4 – 6 kWh/kg [19] oder 24 MJ/m³ [20], und somit gleichauf mit Erdgas, siehe Kapitel 2.2.

2.4 Kultivierung von Mikroalgen

Die Kultivierungsparameter hängen davon ab, welche Makrokomponenten die Mikroalgen bevorzugt produzieren sollen. Da die Umesterung von Ölen und die Fermentierung von Kohlenhydraten etablierte Verfahren sind, ist nur die Umwandlung von Proteinen in Alkohole durch stoffwechseleränderte Bakterien neu und noch nicht großtechnisch einsetzbar. Wann dies erreicht wird, ist heute noch nicht abzusehen. Dennoch sollte dieses Verfahren nicht außer Acht gelassen werden, da es eine Umstellung der Experimente unnötig macht. Dies bedeutet, dass die Mikroalgen immer unter optimalen Bedingungen kultiviert werden können und nicht einem Stressstoffwechsel ausgesetzt werden müssen, um die Biomassezusammensetzung zu verändern. Außerdem kann so ein größeres Augenmerk auf die Nährstoffzusammensetzung der Mikroalgen in Bezug auf die menschliche Ernährung gelegt werden.

Am IRS werden mittlerweile zwei Algenarten in drei PBR kultiviert. *Chlorella* wird in 6,4 L, siehe Abbildung 4, und 23 L, siehe Abbildung 5, wässrigen Mediums gezüchtet. Für *Scenedesmus* steht z.Z. ein Volumen von 6 L zur Verfügung, siehe Abbildung 6, welches jedoch auf ebenfalls 23 L umgebaut werden kann.

Der kleine *Chlorella*-PBR hat wie erwähnt ein computergestütztes Setup, das einer Außenanlage wohl am nächsten kommt. Genauere Daten konnten hierzu nicht ermittelt werden, da selbst dem Kooperationspartner Subitec[®] keine Zahlen von der eigenen Freilandanlage vorliegen. Zum jetzigen Zeitpunkt seien die Gerätschaften vermutlich noch überdimensioniert, hieß es. Da die IRS eigenen Setups alle eine Verbindung mit der Umwelt haben, muss verdunstetes oder ausgetragenes Wasser ersetzt werden.

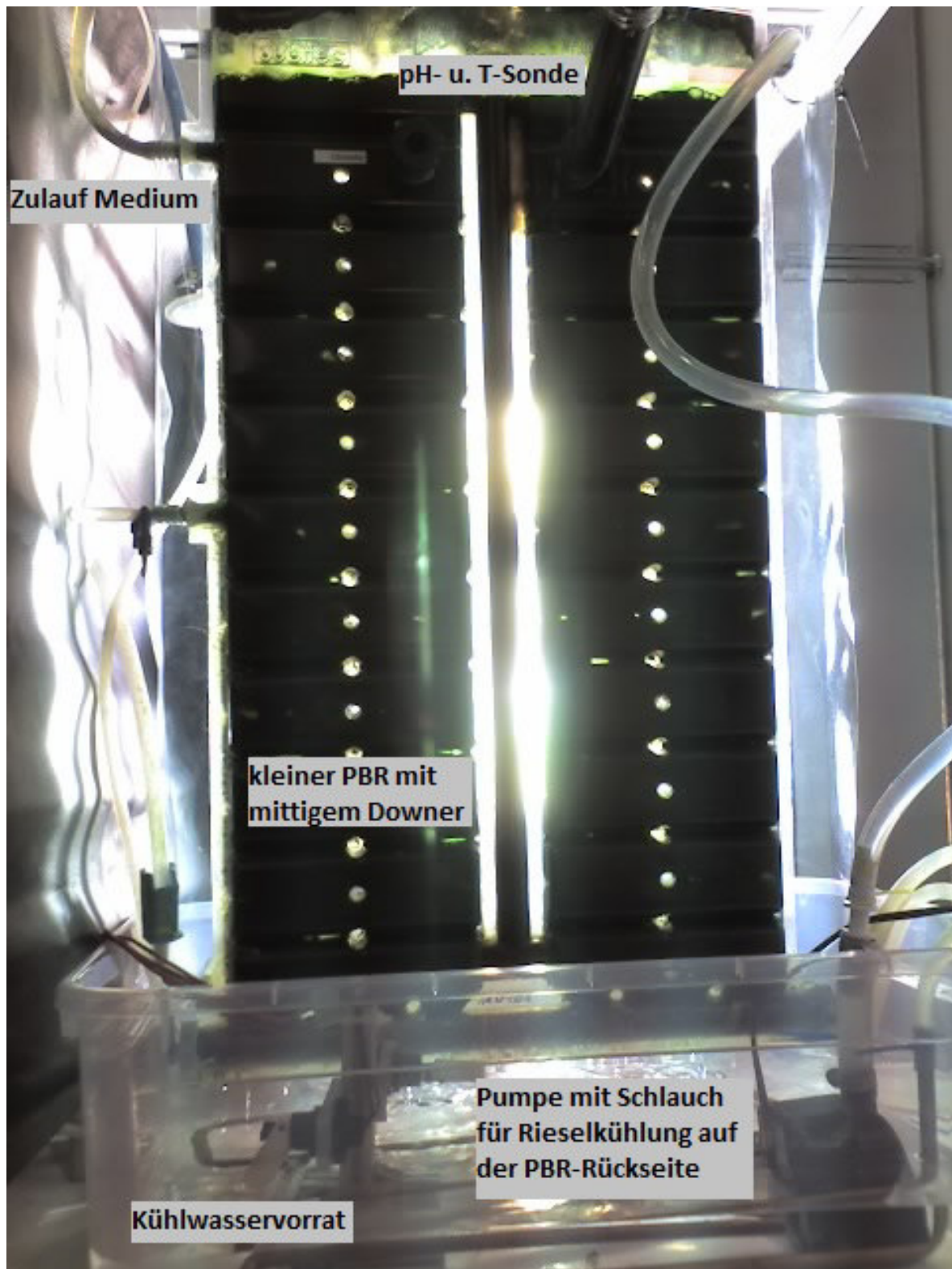


Abbildung 4: kleiner *Chlorella*-PBR links neben dem kleinen PBR steht das Vorratsgefäß für Medium und der Steuerungs-PC, der auch die Werte der pH- und T(emperatur)-Sonde ausliest; im Downer strömt das aufgewirbelte Medium vom Kopf des PBR zurück nach unten



Abbildung 5: großer *Chlorella*-PBR dieser Aufbau kommt ohne PC aus, d.h. das Medium wird manuell zugegeben und die Daten der pH- und T(emperatur)-Sonde werden nicht gespeichert; in den Downern strömt das Medium von oben nach unten zurück

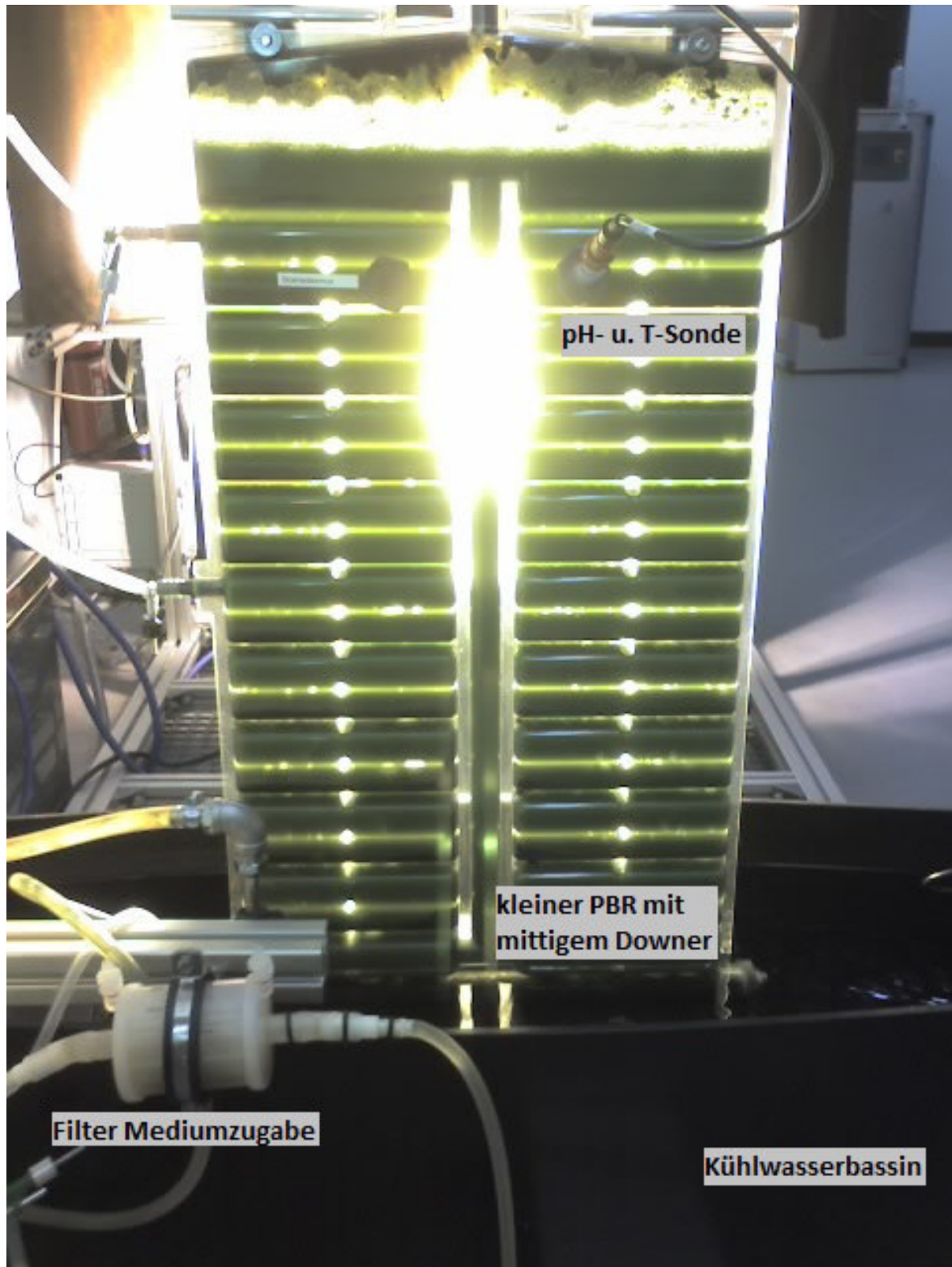


Abbildung 6: kleiner *Scenedesmus*-PBR dieser Aufbau kommt ohne PC aus, d.h. das Medium wird manuell zugegeben und die Daten der pH- und T(emperatur)-Sonde werden nicht gespeichert; im Downer strömt das Medium von oben nach unten zurück

Für den als Vergleich benutzten kleinen *Chlorella*-PBR ist dies ca. ein Liter pro Woche. Damit hält sich der Trinkwasseraufwand in überschaubaren Grenzen. Interessant ist, dass der knapp 3,5 Mal so große 23 L *Chlorella*-PBR auch knapp die 3,5 fache Menge an nachgeführtem Medium benötigt. Da der Kühlkreislauf aber aus technischen Gründen offen und automatisiert ist, ist nicht abzuschätzen, wie viel Brauchwasser hier verwendet wird. Neben Wasser sind chemische Substanzen im Medium enthalten, die den Mikroalgen als Nährsalze dienen. Die Kultivierungsparameter, siehe Tabelle 2, werden mit pH/Temperatursonden, Gasdurchflussreglern und Wasserkühlungen geregelt. Dies ist besonders im Sommer erforderlich, da auch die enzyymbildenden Proteine von Mikroalgen durch zu große Hitze denaturieren können (vergleiche Fieber beim Menschen).

Tabelle 2: Kultivierungsparameter der Mikroalgen

| Mikroalge | Temperatur [°C] | pH | Begasung (NL – Normliter) |
|--------------------------|-----------------|-----------|---|
| <i>Chlorella</i> klein | 27 - 31 | 6,5 - 8,5 | 3,75 L/min Luft, 3,75 Vol.% CO ₂ |
| <i>Chlorella</i> groß | 27 - 31 | 6,5 - 8,5 | 6,5 L/min Luft, 10 NL/H CO ₂ |
| <i>Scenedesmus</i> klein | 25 - 27 | 7 - 8 | 180 NL/h Luft, 30 NL/h CO ₂ |

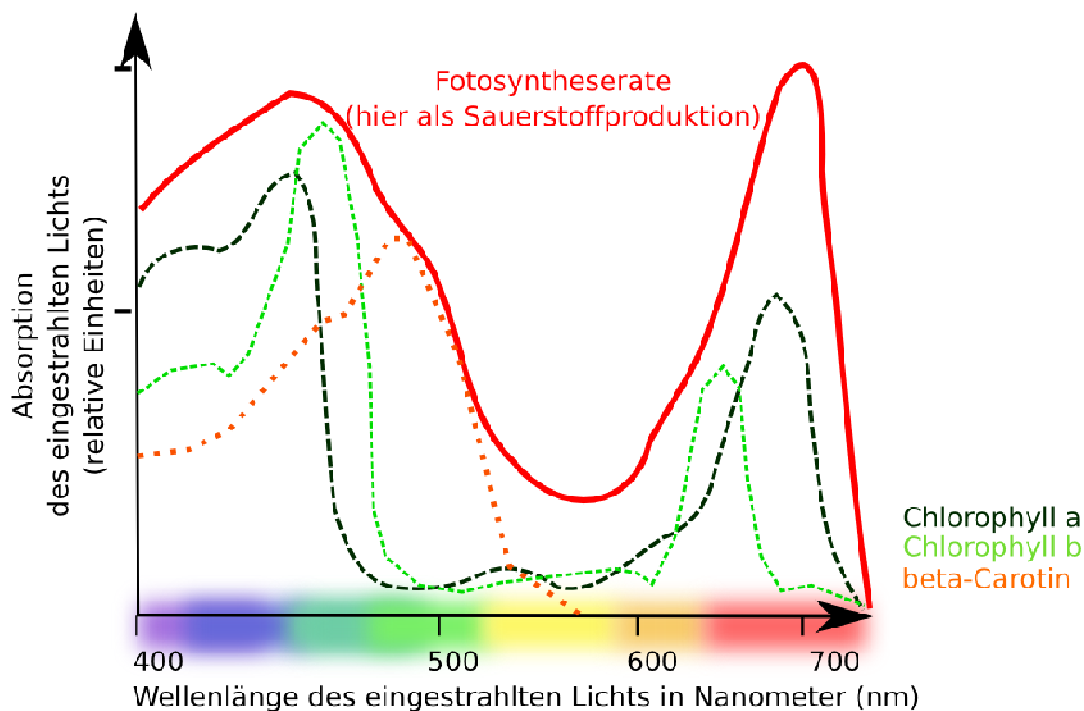


Abbildung 7: Photosynthese ist abhängig von der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts [21]

Für den Menschen sind Angaben wie „Lumen“ oder „Lux“ für eine Lichtquelle aussagekräftig. Sie geben den Lichtfluss respektive den Lichtfluss pro Fläche an. Das menschliche Auge ist im grünen Bereich besonders sensitiv, daher wird dieser auch stärker gewichtet. Für Pflanzen ist hingegen die spektrale Verteilung des Lichts entscheidend, da für die Photosynthese hauptsächlich blaues und rotes Licht genutzt wird, siehe Abbildung 7. Diese wird photosynthetisch wirksame Strahlung (im Englischen *Photosynthetically Active Radiation* PAR) genannt. Während den Mikroalgen in Freilandanlagen das komplette Spektrum des Sonnenlichts zur Verfügung steht, werden die Mikroalgen am IRS durch verschiedenen Strahler mit Licht versorgt. Am kleinen *Chlorella*-PBR, der bereits als Berechnungsgrundlage diente, werden zwei 400 W Halogen-Metall dampflampen eingesetzt, siehe Abbildung 8. Die Beleuchtung befindet sich hinter dem PBR, auf der von den Septen abgewandten Seite. Die Rieselkühlung befindet sich zwischen den Strahlern und dem PBR. Für eine PAR-Messung wird ein Styroporstück, etwas größer als die Fläche des PBR mit in Spalten und Zeilen angeordneten Löchern für den PAR-Sensor (ParLite, Kipp & Zonen BV, Delft NL) an die Stelle der Rieselkühlung gebracht, so dass in definierten Abständen die Strahlung gemessen werden kann. Wie in der Abbildung 8 zu sehen ist, überlappt sich die Strahlung des unteren und des oberen Strahlers in der Mitte des PBR, vergleiche mit Abbildung 9.

Zu den Seiten hin nimmt die PAR ab, da jeweils nur ein Strahler den Bereich versorgt. Ähnliche Schwankungen dürften auch Freilandanlagen aufweisen, da die gekippt stehenden PBR sich gegenseitig abschatten und die Einstrahlung der Sonne durch Wolken vermindert wird.

In einem Nebenversuch konnte gezeigt werden, dass bei kleinen Systemen der energetische Vorteil, der durch die Nutzung von blauen und roten LEDs potentiell entstehend kann, zu klein ist, um nachgewiesen zu werden. In einem 2 L Setup wurde *Chlorella* je Aufbau einmal von weißen LEDs und einmal von einem Gemisch aus blauen und roten LEDs beleuchtet. Das Wachstum der beiden Kulturen wich nur in den Grenzen der Messfehler voneinander ab, ein signifikanter Vorteil durch die blauen und roten LEDs ergab sich nicht, da auch das weiße LED-Panel energieeffizient arbeitet.

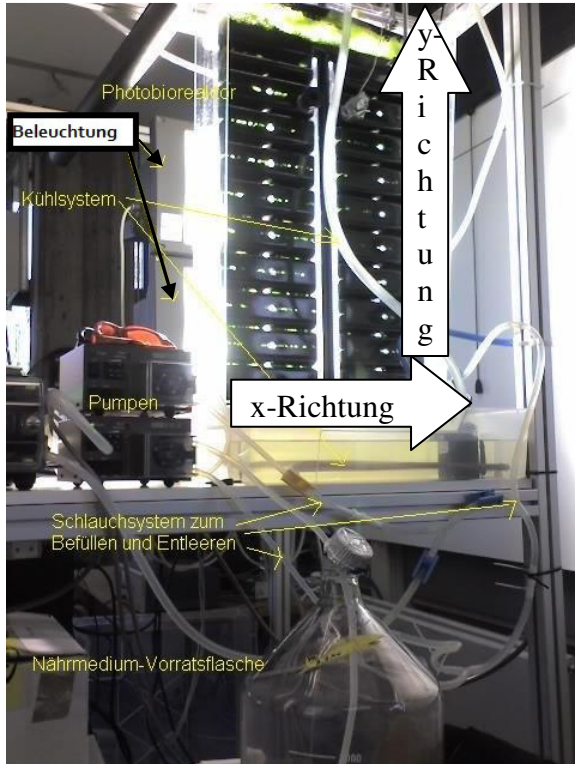


Abbildung 8: Aufbau kleiner *Chlorella*-PBR, Augenmerk liegt auf der Lage der Beleuchtung durch zwei 400 W-Strahler

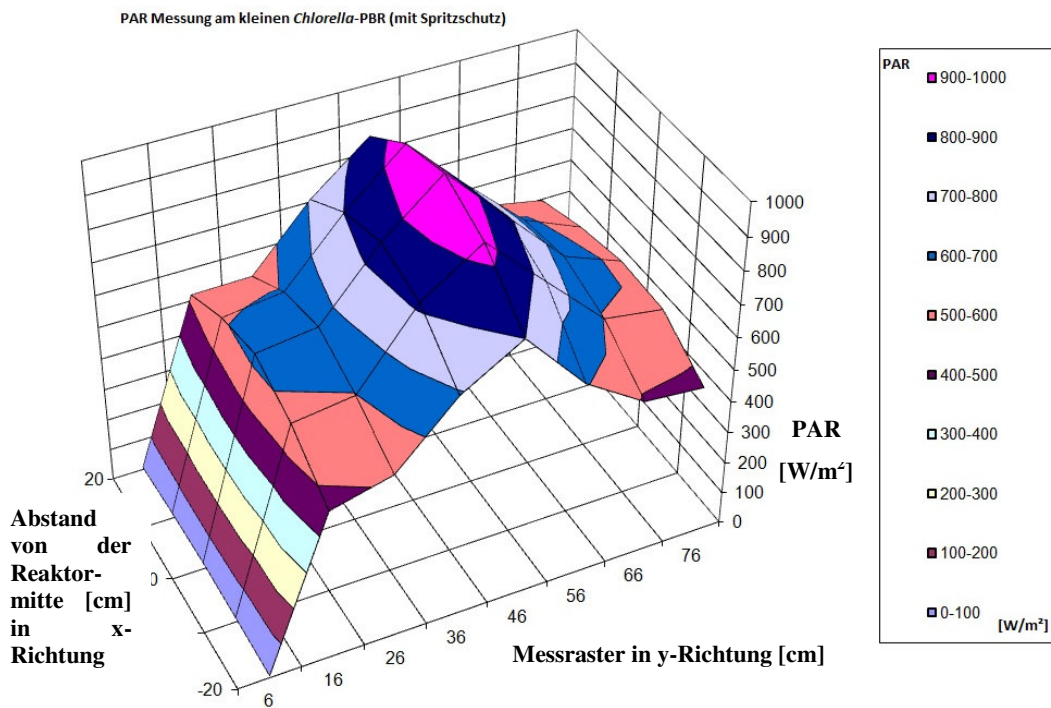


Abbildung 9: 3D-Darstellung einer PAR-Messung am kleinen *Chlorella*-PBR, x ist die Reaktorbreite, y die Reaktorhöhe – vergleiche mit Abbildung 8

3. Experimentelle Daten

Während der Projektlaufzeit wurden kontinuierlich alle 2 – 3 Tage Messdaten von *Chlorella* (Abbildung 10, Abbildung 11) und später von *Scenedesmus* (Abbildung 12) erfasst. Die im Jahr 2010 angeschaffte Mutterkultur im kleinen *Chlorella*-PBR ist bis dato in Betrieb. Aus dieser Mutterkultur wurde auch der Ableger im großen *Chlorella*-PBR erzeugt. Die neue Mikroalge *Scenedesmus* wurde nach der Projektlaufzeit in die 3. Kultur übernommen. Die Art der Kultivierung ist einem Batch-Betrieb ähnlich, wobei jedoch nicht jedes Mal die komplette Kultur abgeerntet und von Null begonnen wird, sondern ein Teil der Mikroalgensuspension im PBR verbleibt und mit neuem Medium versorgt wird. Somit startet der nächste Kultivierungszyklus bei einer geringen Zelldichte. Die Messung des Wachstums erfolgt mittels eines Spektrometers bei einer Wellenlänge von 750 nm üblicherweise in starker Verdünnung. Hierbei wird die Optische Dichte (OD) der Kultur bestimmt, die über einen empirisch bestimmten Faktor in Gramm Trockenmasse pro Liter Medium umgerechnet werden kann. Im Fall von *Chlorella* wurde der Faktor gravimetrisch zu 0,24 bestimmt, d.h. ein Wert von OD 10 entspricht einer Trockenmasse von 2,4 g/L.

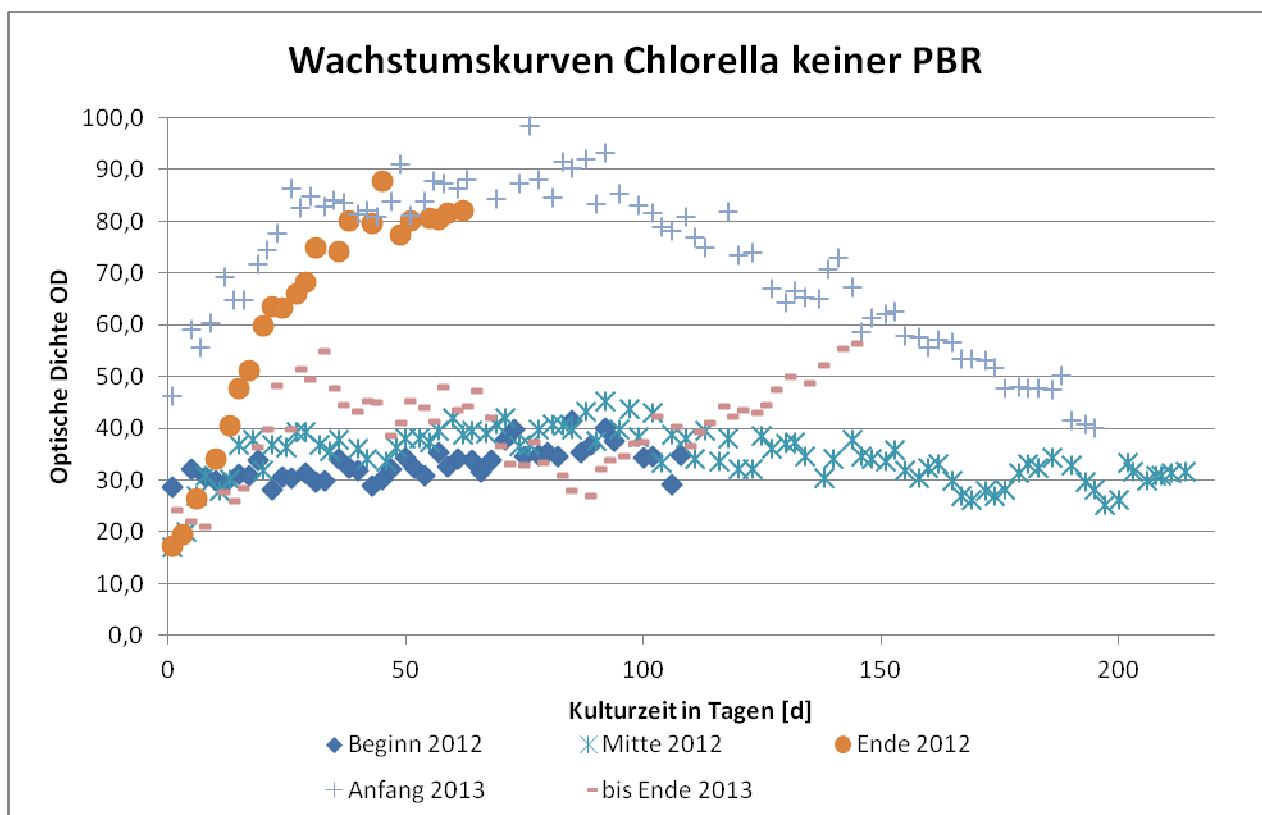


Abbildung 10: Wachstumskurven aller *Chlorella*-Kulturen im kleinen PBR während der Projektlaufzeit

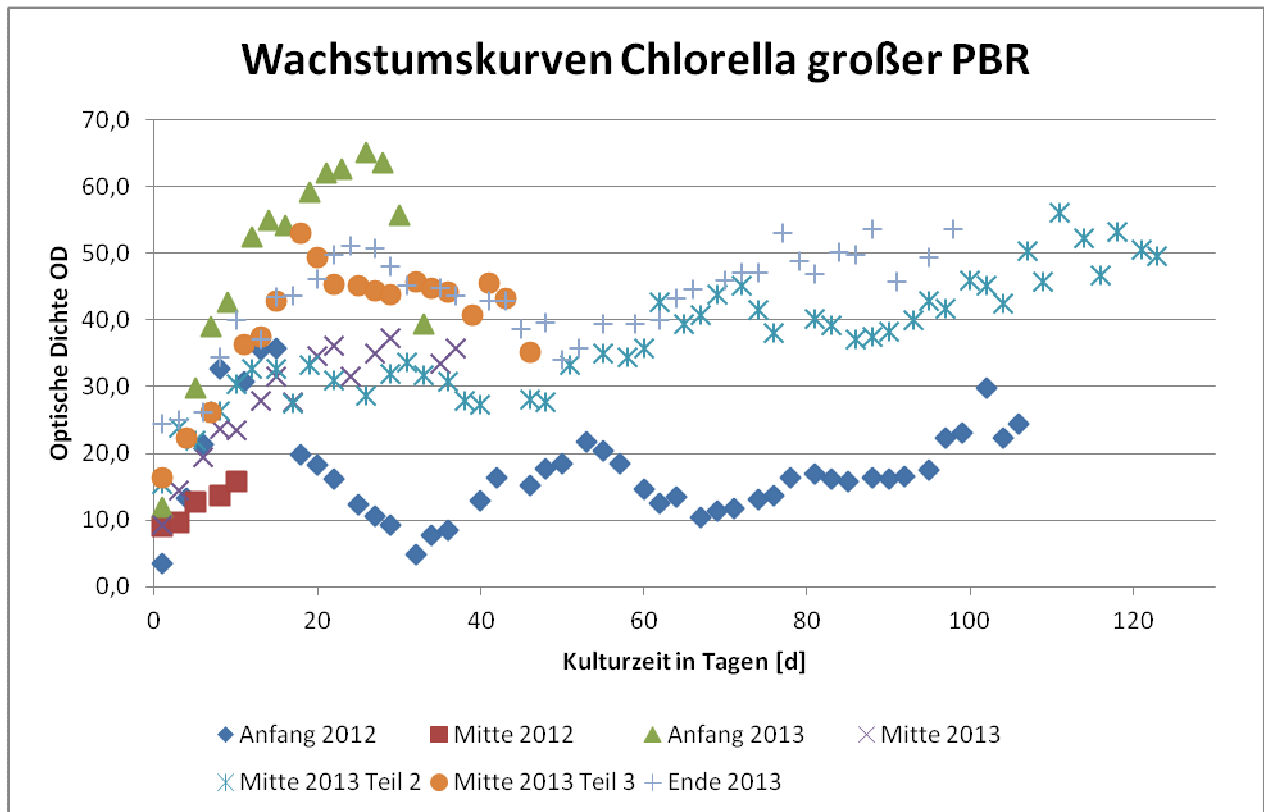


Abbildung 11: Wachstumskurven aller *Chlorella*-Kulturen im großen PBR während der Projektlaufzeit

Obwohl die Kultur des kleinen PBR die Quelle für die im großen PBR darstellt, ist ihr Wachstumsverhalten nicht deckungsgleich. Daran erkennt man deutlich, dass die Systemgröße einen Einfluss auf die Kultur hat. Trotzdem liefert die *Chlorella*-Kultur im großen PBR 70 % der maximalen Biomassekonzentration der *Chlorella*-Kultur im kleinen PBR. Dafür ist die Wachstumskurve im großen PBR steiler, d.h. die Kultur erreicht nach kürzerer Zeit eine höhere Zelldichte.

Beide Kulturen wachsen in einem „Demineralised Water-Seawater-Nitrate“- (DSN)-Medium, zu dem gesondert Ammonium- und Phosphatlösung zugegeben werden, um die wichtigsten Nährstoffe für die Mikroalgen gezielt kontrollieren und vermessen zu können. Diese geben Aufschluss über den Zustand der Kultur.

Dass es bei der Kultivierung der *Chlorella*-Kultur im großen PBR keine Daten für das Jahresende 2012 gibt, spiegelt die Schwierigkeiten beim Umzug des Labors wider, die am Anfang dieses Berichts kurz erläutert wurden.

Scenedesmus wird in einem abgewandelten Bold's Basal (BBM) Medium kultiviert, und erhält Nitratlösung als Stickstoffquelle.

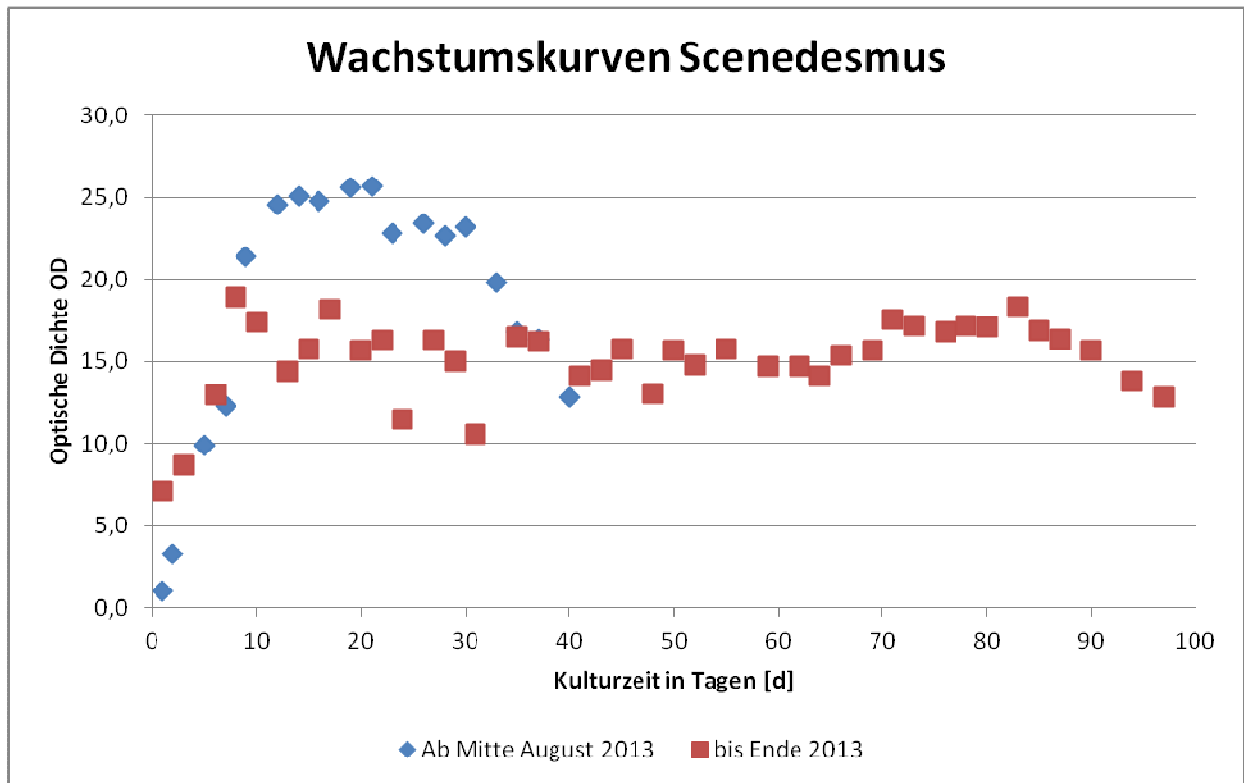


Abbildung 12: Wachstumskurven aller *Scenedesmus*-Kulturen während der Projektlaufzeit

Für *Scenedesmus* zeigt die Wachstumskurve, dass diese Mikroalge nicht so dicht wächst wie *Chlorella*. Daher liegen für sie auch keine lebensmittelchemischen Daten vor, da eine Nährwertanalyse mit einem hohen Einsatz von Biomasse (über 300 g) einher geht, die selbst im Volumen eines großen PBR schwer zu erzeugen ist.

Für *Chlorella* liegen zwei Datensätze vor, siehe Abbildung 13, die beide vom Institut Pieldner (IPDP) erzeugt wurden. Der eine Datensatz wurde kurz nach Beginn der Arbeiten am IRS generiert, der andere entstand während der Projektlaufzeit. Es ist deutlich zu sehen, dass die für die menschliche Ernährung wichtige Proteinfraction der Biomasse nahezu konstant bleibt. Der Kohlenhydratanteil nahm über die Alterung der Kultur hinweg zu Gunsten des Fettanteils ab. Sollte sich eine solche Makronährstoff-Verschiebung auch in weiteren Versuchen zeigen, müsste die Kraftstoffgewinnung auf diesen Umstand reagieren und verstärkt die Umesterung von Fetten durchführen, da der Anteil an fermentierbaren Kohlenhydraten sinkt.

Im Biogaslabor der Universität Hohenheim wurde der Methangehalt einer *Chlorella*-Probe nach DIN 38 414 Teil 8 zu 60 % bestimmt, siehe Abbildung 14. Dort wird der spezifische Methanertrag in m^3/kg oTS dargestellt, wobei oTS für organische Trockensubstanz steht. Der spezifische Methanertrag geteilt durch den spezifischen Gasertrag ergibt den Methangehalt. Der Laboraufbau hierzu wird in Abbildung 15 gezeigt.

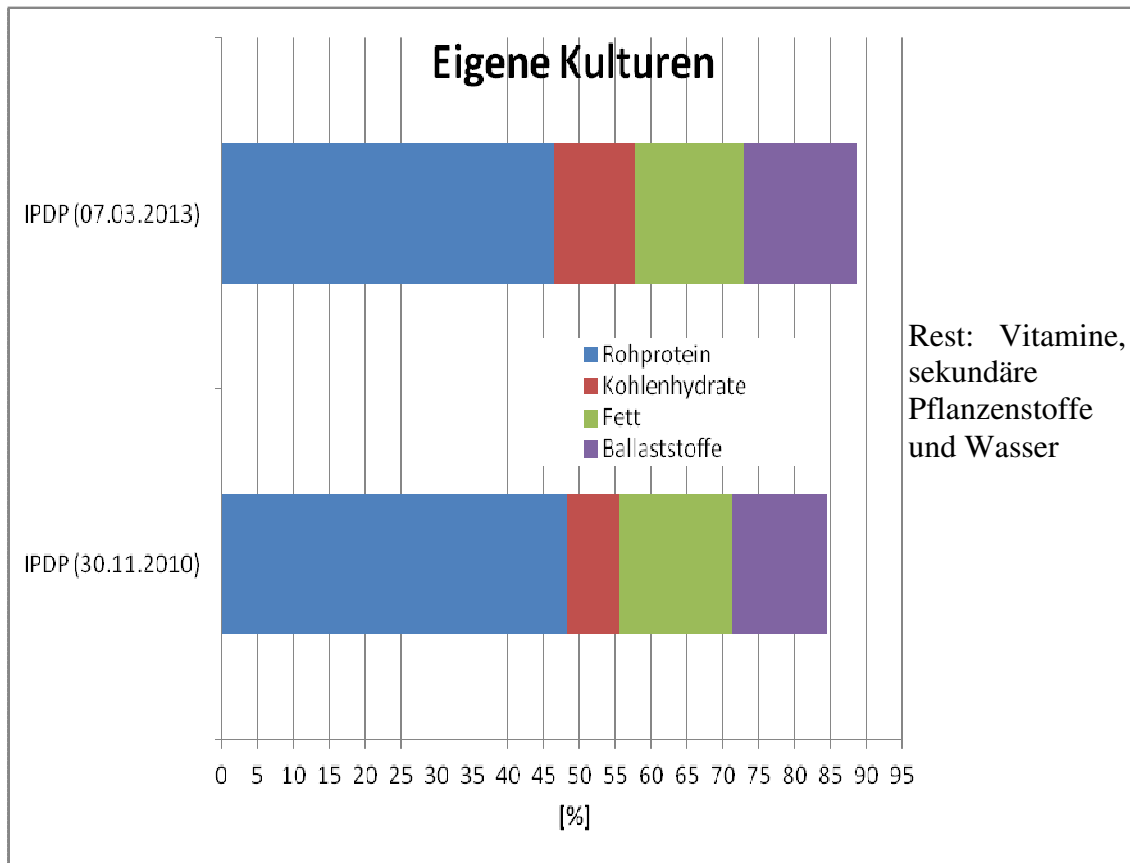


Abbildung 13: Vergleich der Lebensmittelchemischen Analysen des IPDP für *Chlorella*

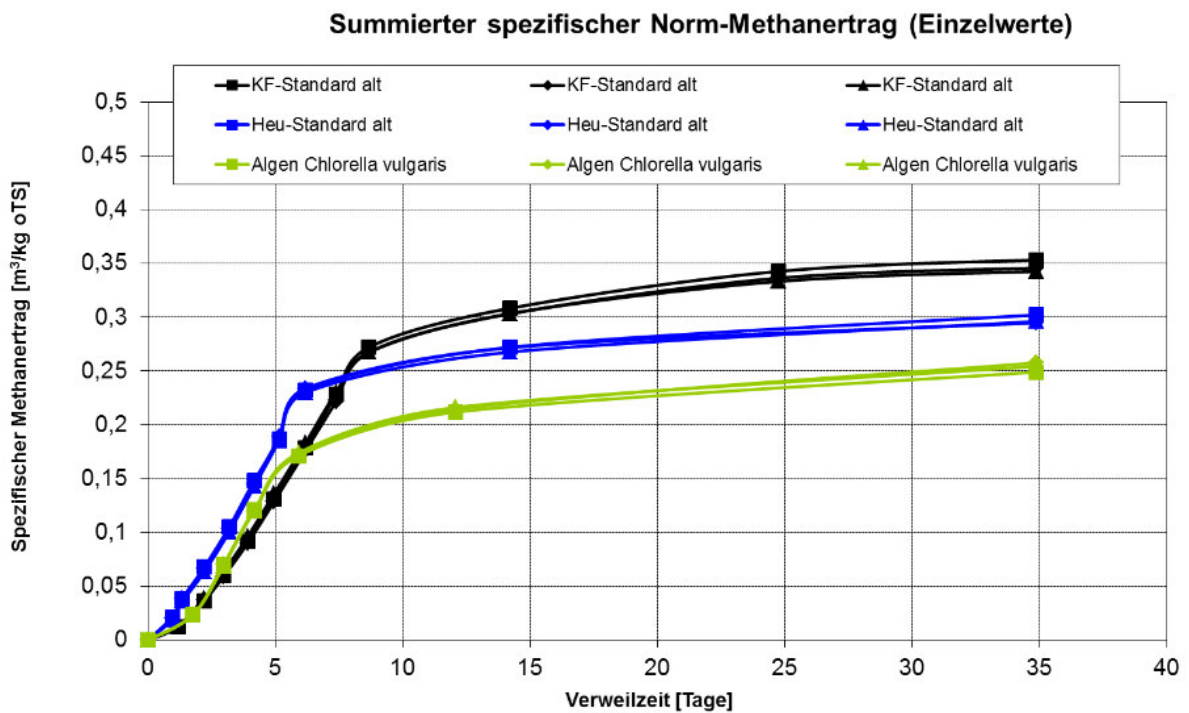


Abbildung 14: Biogasgehaltsbestimmung im Biogaslabor der Universität Hohenheim



Abbildung 15: Glaskolben auf Rotator im temperierten Biogaslabor der Universität Hohenheim

In die Glaskolben werden die Proben und Vergleichsstandards sowie Reaktionsstarter gegeben und dann luftdicht verschlossen. Während der Fermentation entsteht ein Gasmisch, das den Verschlusskolben aus dem Glasrohr drückt. Daran kann die produzierte Gasmenge abgelesen werden. Das Gasmisch wird zur Analyse der enthaltenen Komponenten entnommen und so kann schließlich der volumenkorrigierte Wert für den interessierenden Methangehalt errechnet werden.

4. Interpretation der Daten im Vergleich

4.1 Menschliche Ernährung

Die oben gezeigten Nährwertanalysen bestätigen die Eignung von *Chlorella*-Biomasse für die menschliche Ernährung. Das enthaltene Protein ist eine vollständige Aminosäurenquelle und somit sehr wertvoll, siehe Kapitel 2.1. Durch die große Menge Protein enthält *Chlorella* nur einen Anteil des täglichen Bedarfs an Kohlenhydraten und Fett.

4.2 Biokraftstoff

In einem Gärversuch im Biogaslabor der Universität Hohenheim nach DIN 38 414 Teil 8 konnte aus der vom IRS generierten *Chlorella vulgaris*-Biomasse ein durchschnittlicher Methangehalt von 60 % erzielt werden. Damit liefert die Mikroalgenbiomasse genau den nach [12] zu erwartenden Wert.

4.3 Gleichzeitigkeit

Wie bereits in Kapitel 2.4 angesprochen, gibt es die Möglichkeit bei einem optimalen Satz von Kultivierungsparametern Biomasse wachsen zu lassen, die sowohl für die menschliche Ernährung als auch zur Verwendung als Kraftstoff zur Verfügung steht. Der Mensch kann Mikroalgenbiomasse im Ganzen verdauen und wertvolle Nährstoffe daraus gewinnen, wenn vorher die Zellwände aufgeschlossen wurden. Die Verwertung zum Kraftstoff kann auch aus der Gesamtheit der Biomasse erfolgen, da für alle Makrokomponenten Veredelungsverfahren zur Verfügung stehen.

Obwohl die Verwendung von Proteinen noch am Anfang steht, sollte dieses Verfahren nicht außer Acht gelassen werden, da es eine Umstellung der Kultivierung unnötig macht. Dies bedeutet, dass die Mikroalgen immer unter optimalen Bedingungen kultiviert werden können und nicht einen Stressstoffwechsel ausgesetzt werden müssen, um die Biomassezusammensetzung zu verändern.

Das Ergebniskapitel zeigt, dass *Chlorella* während einer normalen Kultivierung im optimalen Bereich gleichzeitig gesunde, essbare Biomasse liefert sowie den zu erwartenden Methangehalt freisetzt.

4.4 Downstream Processing

Sowohl für die Ernährung als auch zur Kraftstoffgewinnung muss die Zellwand der Mikroalge aufgebrochen werden, z.B. durch Schockfrostten, Erhitzen oder mechanische Krafteinwir-

kung. Die Biomasse kann im Ganzen der Ernährung zugeführt werden oder im gleichen Zustand in den Energiegewinnungsprozess eingeleitet werden. Auch eine Auftrennung nach Makrokomponenten ist möglich, so dass gezielt bestimmte Kraftstoffe hergestellt werden können. In Tabelle 3 sind einige Aufschlussverfahren mit deren Energieverbrauch dargestellt.

Tabelle 3: Aufschlussverfahren und ihr Energieverbrauch [22]

| Verfahren | | Energieverbrauch [kWh/m ³] | Effizienz |
|-------------|----------------------------|--|------------|
| mechanisch | Kugelmühlen | 100 | 84% - 96%* |
| | Hochdruck-homogenisierung | 92 | 68% - 99%* |
| | Hydrodynamische Kavitation | N/A** | 82% - 99%* |
| | Ultraschall | 4 | 68% - 97%* |
| phys.-chem. | Osmotischer Schock | N/A** | 35% |
| | Gefriertrocknung | 240 | 96% |
| | Thermolyse | > 6 | 47% - 88%* |
| | Mikrowellen | 21 | 77% - 95%* |
| biochem. | Lytische Enzyme | N/A** | 80% |
| chemisch | Säure-/Laugeaufschluss | N/A** | > 90% |
| | Detergentien | N/A** | 30-50% |
| elektrisch | Elektroporation | 44,4 | 20% - 99%* |

4.5 Energie- und Ökobilanz

Das IRS-eigene Setup für einen 6 L-*Chlorella*-PBR mit PC-Steuerung verbraucht am Tag ca. 17,4 kWh und somit ca. 6350 kWh im Jahr, wobei der PC im Dauerbetrieb und die 24h-Beleuchtung den Hauptteil des Stromes verbrauchen. Kleine Verbraucher, die nur ab und zu eingeschaltet werden, wurden nicht berücksichtigt.

Selbst bei einem kontinuierlichen Zuwachs von 1 g Biomasse alle 3 Tage, könnte man im kleinen PBR nur 778 g Biomasse/Jahr erzeugen. Daraus würden dann bei einer optimalen

Verwertung gerade einmal 4,67 kWh/Jahr [19]. Der Energieeintrag ist somit über 1350-fach höher als der -ertrag. Daher ist die Kultivierung mit künstlicher Beleuchtung nicht lohnend.

In Freilandanlagen fällt die Beleuchtung weg, es könnte aber durchaus möglich sein, dass in den Wintermonaten geheizt werden muss oder es zu Biomasseeinbußen kommt. In der Umgebung Stuttgart scheint pro Tag im Durchschnitt für 4,6 h die Sonne, d.h. 1679 Sonnenstunden pro Jahr. Dies sind knapp 19 % der Beleuchtungszeit des im Labor stehenden PBR. Damit würde dann auch weniger Biomasse erzeugt, nämlich 148 g/Jahr bei gleicher PBR-Größe. Dieser Wert lässt sich in 0,89 kWh/Jahr umrechnen. Zum Vergleich: ein durchschnittlicher deutscher Haushalt verbraucht 10 kW/h am Tag [23]. Die getroffenen Annahmen können nur dann überprüft werden, wenn von großen Außenanlagen wie von E.ON Hanse, Subitec oder anderen Daten zur Verfügung gestellt werden.

Die hypothetisch im Labor erzeugten 4,3 kWh lassen sich in 0,015 GJ umrechnen, welche als Vergleichsgröße für den Wasserfußabdruck gebraucht wird, siehe Kapitel 2.2. Wird nun der pro Woche verdunstete Liter Wasser auf das Jahr hochgerechnet, so kommt man auf 52 L/Wasser für 0,015 GJ und somit auf 3,47 m³/GJ. Dabei wurden aber weder das Brauchwasser in der externen Hauskühlung noch Wasch- oder Produktionswasser berücksichtigt, da hierfür keine Werte vorliegen. Auch fällt eine Einschätzung im Vergleich zu anderen Bio-kraftstoffpflanzen schwer, da sich die Quellen (vergleiche [13] ‚Biodiesel aus Sojabohnen 94 m³/GJ‘ mit [14] ‚Biodiesel aus Sojabohnen 400 m³/GJ‘) nicht einig sind.

5. Zusammenfassung

Kultivierungsbilanz

Chlorella ist eine ertragreiche, robuste Mikroalge, die im Labor des IRS sowohl wertvolle, essbare Biomasse mit knapp 50 % Proteinanteil als auch den Grundstoff für Biomethan mit einem Volumenanteil von 60 % liefert.

Scenedesmus konnte noch nicht so intensiv studiert werden wie *Chlorella*. Obwohl diese Mikroalge nicht so schnell und dicht wächst, hat sie kultivierungstechnische Vorteile. Sie sekretiert weniger Disaccharide ins Medium, so dass sie kaum Schaum bildet, der ansonsten zu erhöhtem Biomasseaustrag über die Luft und Verstopfung der Abgasschläuche führt. Es sind noch Anpassungen bei den Kultivierungsparametern möglich, wie z.B. die Gabe des anfallenden Nährkonzentrates aus Combined regenerative organic-food production-(C.R.O.P.)-Säulen [24], die die Effizienz steigern könnten.

Kooperationen

Als mögliche Kooperationspartner sind Energiekonzerne ins Auge gefasst worden, die bereits Mikroalgenprojekte betreiben. Hauptsächlich werden diese Mikroalgen zur Rauchgasreinigung eingesetzt. Zu nennen sind hier E.ON Hanse und Vattenfall. Besonders bei E.ON Hanse wären neue Erkenntnisse zu dieser Thematik zu erwarten gewesen, da im letzten Frühjahr die fünfjährige Projektzeit ihrer Pilotanlage zu Ende ging. Leider war auch nach mehrmaliger Kontaktaufnahme nur die Standardinfobroschüre zu bekommen, da aus den Daten Dissertationen angefertigt werden sollten und diese somit nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden. Mittlerweile sind nicht einmal mehr die Daten zum Projekt auf der Webseite von E.ON Hanse abrufbar. RWE und Algomed haben auf Anfragen nicht reagiert.

6. Ausblick

Die Kultivierung von Mikroalgen muss weiter automatisiert werden und sollte vermehrt auf brachliegenden Flächen mit hoher Sonneneinstrahlung vorangetrieben werden. Ein Fortschritt bei Ernte- und Aufarbeitungsverfahren ist notwendig, da diese heutzutage die Energie- und Kostenbilanz verschlechtern. Die besten Aussichten für ein kosteneffizientes System bestehen dann, wenn dieser Fortschritt mit gesteigerten Biomasserträgen kombiniert wird.

Für die Zukunft der gleichzeitigen Nutzung von Biomasse aus Mikroalge sowohl als Nahrung als auch als Kraftstofflieferant besteht nach dieser Studie ein großes Potential.

7. Literatur

- [1] M. Buchert, S. Belz: Biomasse aus Mikroalgen: Studie zur gleichzeitigen Nutzung als Nahrung und Kraftstofflieferant, IRS-Bericht-Nr.: IRS-12-IB03; Boysen-Kennzeichen: BOY11-Nr. 83, Zwischenbericht für den Zeitraum 01.01.2012 – 16.09.2012, September 2012, Stuttgart
- [2] acatech (Hrsg.): Biotechnologische Energieumwandlung in Deutschland. Stand, Kontext, Perspektiven (acatech POSITION), Heidelberg u.a.: Springer Verlag, 2012
- [3] Y.-X. Huo *et al*: Conversion of proteins into biofuels by engineering nitrogen flux, nature biotechnology, volume 29, number 4, Nature America Inc., April 2011
- [4] http://www.fona.de/CO2-seminar/co2_bmbf.pdf
- [5] P. Janczyk: Evaluation of nutritional value and activity of green microalgae *Chlorella vulgaris* in rats and mice, FU Berlin, 2005
- [6] E. Kofranyi, F. Jekat: Zur Bestimmung der biologischen Wertigkeit von Nahrungsmittelproteinen XII, 1967
- [7] <http://www.biofachforum.ch/BIOPIC/humloes/pichumbio260b.html>, nach PURVES, 2006
- [8] Klinikum für Ernährungsmedizin, Klinikum rechts der Isar, TU München, http://www.mri.tum.de/system/files/medizinische_einrichtungen/Hyperucicaemie_Maerz%202011.pdf
- [9] <http://www.ysat.de/purinrechner.html>
- [10] <http://www.dge.de/modules.php?name=News&file=article&sid=296>
- [11] <http://www.greengear.de/biokraftstoffe-vom-feld-in-den-tank/>
- [12] http://www.biogas-zentrum.de/ibbk/basiswissen_biogas.php
- [13] Pfister, Hellweg: 2009, E93
- [14] http://www.fair-fuels.de/data/user/Download/Ver%C3%B6ffentlichungen/Fair-Fuels-Working_Paper_1.pdf
- [15] <http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/197>.
RenewsKompakt_Kritik_an_Biokraftstoffen_im_Faktencheck_okt13.pdf
- [16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Phykologie>
- [17] http://www.vitabiosa-em.de/downloads/analyse_chlorella.pdf
- [18] <http://www.ruhr-uni-bochum.de/rubin/rubin-herbst-07/pdf/facetten2.pdf>
- [19] <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=160181>

- [20] <http://www.cleaner-production.de/projekte-publikationen/projekte/klaerschlammbehandlung/algenbasierte-methananreicherung-in-biogas-en-halbtechnische-versuche.html>
- [21] <https://www.abiweb.de/biologie-stoffwechsel/fotosynthese/primaerreaktion-der-fotosynthese/fruehe-experimente-zur-fotosynthese.html>
- [22] M. Grebing: Abschätzung verschiedener Aufarbeitungsmethoden von Mikroalgen für den Weltraum, IRS-14-S-036, Mai 2014, Stuttgart, Bachelorarbeit, modifiziert
- [23] <http://brandschutz-budde.de/index.php?id=22>
- [24] http://www.dlr.de/me/desktopdefault.aspx/tabid-1752/2384_read-31702/