
BACHELORARBEIT

Herr
Erik Scholz

Algen und Biofuels

**Analyse in Bezug auf geeignete
Organismengruppe und Produktionssysteme**

2023

BACHELORARBEIT

Algen und Biofuels

Analyse in Bezug auf geeignete Organismengruppe und Produktionssysteme

Autor:

Erik Scholz

Studiengang:

Bachelor Biotechnologie

Seminargruppe:

BT19wB-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. Buschmann

Zweitprüfer:

Prof. Dr. Wünschiers

Weiterer Betreuer:

Prof. Dr. Wünschiers

Bibliografische Angaben

Scholz, Erik: Algen und Biofuels, Analyse in Bezug auf geeignete Organismengruppe und Produktionssysteme, 36 Seiten, 13 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften

Englischer Titel: *Algae and Biofuels: Analysis regarding suitable organism groups and production systems*

Bachelorarbeit, 2023

Satz: L^AT_EX

Kurzbeschreibung

Ist Biodiesel, welcher aus Algen gewonnen wird, als klimaneutraler Kraftstoff Ersatz für fossile Brennstoffe eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative? Oder ist das doch nur biotechnologisches Wunschdenken. Mit dieser Frage beschäftigt sich die nachfolgende Ausarbeitung. Dabei werden zunächst Biokraftstoffe als Ganzes beleuchtet, um danach zwei Algen vorzustellen, welche häufig im Zusammenhang mit Biofuels genannt werden. Es werden verschiedene Kultivierungs- und Produktionssysteme erläutert. Anschließend folgt eine Einschätzung der Ausbeute aus den Prozessen zusammen mit einer Einschätzung zur Nachhaltigkeit. Am Ende wird ein Blick in die Zukunft der Technologie gewagt und Kritikpunkte offengelegt.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Danksagung.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Organismen.....	4
2.1 <i>Spirulina</i> Algen.....	5
2.2 <i>Chlorella</i> Algen.....	6
3 Kultivierung von Algen.....	8
3.1 Photoautotrophe Kultivierung.....	8
3.2 Heterotrophe Kultivierung.....	10
3.3 Mixotrophe Kultivierung.....	10
3.4 Ernten und Entwässern von Mikroalgen.....	11
4 Produktionssysteme für Biomasse und Biokraftstoffe.....	15
4.1 offenes System.....	16
4.2 geschlossenes System.....	17
4.3 Umwandlung der Biomasse in Kraftstoff.....	19
5 Ausbeute der Produktionssysteme.....	23
6 wirtschaftliche Betrachtung.....	27
7 Nachhaltigkeit der Biokraftstoffproduktion.....	29
8 Zukunft des Biokraftstoffes.....	32
Originalarbeiten.....	34
Webseiten.....	35

II. Abbildungsverzeichnis

1.1 Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (BMW, 2021)	1
2.1 Kraftstofftrag von Algen im Vergleich zu anderen Biomasse Lieferanten (Rau, 2022)..	4
2.2 Varianzen biochemischer Zusammensetzungen verschiedener Algenarten (Schröter-Schlaack et al., 2019)	7
3.1 Tabelle mit Mikroalgenkultivierungssystemen(Petrick et al., 2013)	8
3.2 Die Reaktionsschritte des Calvin Zykluses (Verlag, 2001).....	9
3.3 Schematische Darstellung der verschiedenen Ernte Methoden	12
3.4 Vergleich von wichtigen Parametern bei verschiedenen Erntemethoden (Schröter-Schlaack et al., 2019)	13
4.1 Beispielbild eines offenen Teichsystems zur Mikroalgenkultivierung(Boldt, 2020).....	17
4.2 Beispielbild eines Panel Airlift-Reaktors zur Mikroalgenkultivierung(Boldt, 2020)	18
4.3 Überblick über die Konversionspfade der Biokraftstoffherstellung aus Algen (Schröter-Schlaack et al., 2019)	19
4.4 Veresterungsreaktion von Rapsöl mit Methanol (Mäntele, 2021)	20
5.1 ausgewählte Produktionssysteme mit Angabe des Standortes und deren Produktivität (Schröter-Schlaack et al., 2019)	24
6.1 Kosten der Algenlipidproduktion in geschlossenen und offenen Systemen (Schröter-Schlaack et al., 2019)	28

III. Tabellenverzeichnis

4.1 Vergleich von verschiedenen offenen Teichkultivierungssystemen (OPCS) (Srivastava et al., 2020)	16
---	----

IV. Abkürzungsverzeichnis

CO_2	Kohlenstoffdioxid
ATP	Adenosintriphosphat
FAME	Fettsäuremethylester
HVO/HEFA	Hydrobehandelte Pflanzenöle (HVO)/ Hydroverarbeitete Ester und Fettsäuren (HEFA) (engl. Hydrotreated vegetable oils (HVO)/ hydroprocessed esters and fatty acids)
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment)
Mio	Millionen
NADPH	Nicotinamidadenindinukleotidphosphat
OPCS	Offenes Teichkultivierungssystem (engl. Open Pond Cultivation System)
PBR	Photobioreaktor

V. Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Dozenten und Betreuer Professor Doktor Buschmann für die gute Betreuung Seitens der Hochschule bedanken. Er war stets offen für meine Fragen und hat mich bei der Findung meines Themas unterstützt.

Ich möchte mich bei meiner Familie bedanken die mir Mut gemacht und mir den Rücken gestärkt haben.

Des Weiteren danke ich meinen Kommilitonen für die schöne Zeit und die unvergesslichen Momente. Besonderer Dank geht an Lisa Schönherr, Jasmin Kermer und Constantin Kühn, welche stets ein offenes Ohr und gute Ratschläge parat hatten.

Ich möchte Miriam Irlesberger, Felix Pollatschek, Lukas Plosch und dem gesamten Autoliv South Germany Team für die Unterstützung und den herzlichen Umgang danken.

Khanh Nyugen möchte ich danken für die gute Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen.

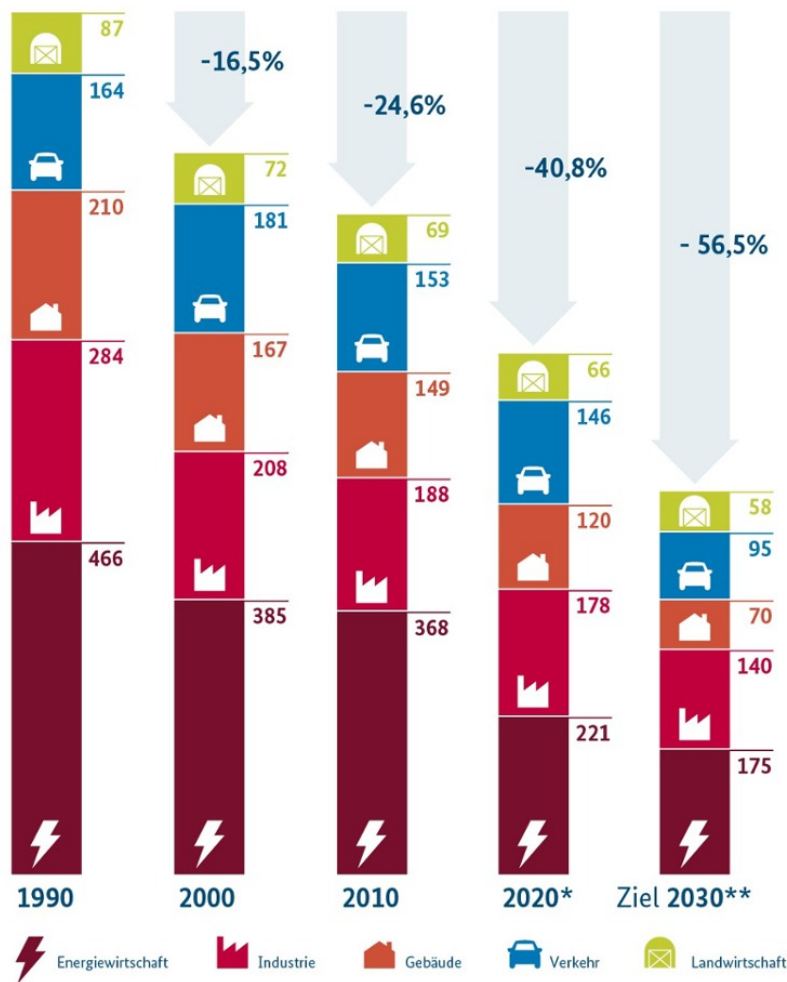
Ich möchte an dieser Stelle Professor Doktor Wünschiers bedanken für die wissenschaftliche Betreuung als Zweitprüfer und für die gute Latex Vorlage danken. Auf Grundlage dieser Vorlage habe ich die Bachelorarbeit geschrieben.

1 Einleitung

Der Klimawandel mit all seinen Auswirkungen ist ein ständiger Begleiter in unserer heutigen Zeit. Dabeistehen nicht nur große Unternehmen in der Kritik, sondern häufig auch man selbst. In der nachfolgenden Abbildung sind die Treibhausgasemissionen in Deutschland aufgeteilt nach einzelnen Sektoren gezeigt. Dort sieht man das die CO_2 Emissionen sinken aber das Klimaziel 2030 immer noch eine große Verbesserung erfordert. Einer der kritischeren Sektoren ist dabei der Verkehr. Mit ca. 146 Mio Tonnen CO_2 ist man hier noch ca. 50 Mio Tonnen vom Zielwert 2030, mit 95 Tonnen CO_2 entfernt.

2020: Mehr als 40 Prozent weniger Treibhausgasemissionen als 1990

Energiesektor halbiert seine Emissionen im Vergleich zu 1990



© BMWi; Datenbasis 1990–2020; UBA März 2021

Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (In Mio t CO_2 -Äquivalente)

* Daten für 2020 vorläufige Zahlen

** Jahresemissionsmengen aller Sektoren für 2030 laut Klimaschutzgesetz

Abbildung 1.1: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (BMWi, 2021)

Damit dieses Klimaziel erreicht werden kann muss eine klimaneutralere Alternative Methode für den Verkehr gefunden werden.

Auch der Dieselskandal im Jahr 2015 hat maßgeblich dazu beigetragen das man misstrauischer gegenüber Verbrenner Motoren ist. Es wird versucht so gut es geht auf die Auto Fahrt zu verzichten und lieber die Nahverkehrsangebote zu nutzen. Wer dennoch nicht auf ein Auto verzichten kann, sollte sich doch am besten ein Elektroauto zulegen. Bevor es zu einem eingeschränkten Gebrauch oder gar Verbot von Verbrenner Motoren kommt.

Da scheint das Elektroauto die einzige Alternative zu sein, um klimaneutral zu reisen, wenn man den Strom aus erneuerbaren Energiequellen bezieht. Die Politik unterstützt die Entwicklung der Elektrofahrzeuge stark und wirbt mit Zukunftstechnologie. Dieser Ansatz ist durchaus begründet, aber leider gehen viele alternative Lösungsansätze dabei unter. So zum Beispiel die Nutzung von Biofuels (Biokraftstoffen). Grundsätzlich kennt man biologische Zusätze schon aus Kraftstoffen wie Super E10 wo zu 10% Bioethanol beigemischt wird. Doch Biokraftstoffe werden vollständig aus Biomasse gewonnen. Dazu zählen zum Beispiel Synthetikkraftstoffe wie Biodiesel, Ethanol, Methan aus Biogas. Diese Kraftstoffe besitzen die gleichen chemischen Eigenschaften wie die herkömmlichen Diesel und Benzin Kraftstoffe (FNR, 2022).

Allerdings würden Biokraftstoffe eine klimaneutrale Transport Möglichkeit schaffen, bei der keine neuen Fahrzeuge produziert werden müssen. Jeder Verbrenner Motor könnte ohne Komplikationen umgerüstet werden und dann mit reinen Biokraftstoffen betrieben werden. Zwar werden beim Verbrenner von Biokraftstoffen auch noch Emissionen erzeugt diese wurden allerdings während des Pflanzen- und Algenwachstums durch die Organismen aufgenommen.

Ob die Biokraftstoffe Zukunftsmusik sind oder vielleicht eine Chance neben neuen Elektrofahrzeugen auch ältere Fahrzeuge klimaneutral zu betreiben wird in folgender Abhandlung betrachtet.

Was die potenziellen Vorteile der Verwendung von Algenbasierten Kraftstoffen ist wird nachfolgend auch erwähnt. Darüber gibt es in der Literatur viele Diskussionen. Bisher gibt es aber nur wenige praktische Umsetzungen und die meistens nicht in einem ausreichend großen Maßstab. Dennoch ist klar zu erkennen das immer mehr Fokus auf das Thema Biokraftstoff aus Algen gelegt wird. Doch es gibt auch andere Wege Biokraftstoffe zu produzieren. Einige werden davon bereits genutzt.

Nachdem nun schon einige Biokraftstoffe genannt wurden folgt nun eine Einteilung der Biokraftstoffe in vier Generationen. Sie unterscheiden sich in den Ausgangsprodukten und den entstehenden Endprodukten.

Die erste Generation wird aus Futterpflanzen wie zum Beispiel Zucker, tierische Fette

oder pflanzlichen Ölen gewonnen. Daraus entsteht Biodiesel, Bioalkohole und Biogas, welches sehr ähnlich zu Erdgas ist.

Die zweite Generation von Biokraftstoffen ist Biomethanol und Biowasserstoff. Für die Produktion wird Pflanzenmaterial genutzt, welches bei der Nahrungsmittel Produktion anfällt, aber auch Holz kann genutzt werden. Dazu kommen noch Abfälle aus der Landwirtschaft und Biomüll.

Biokraftstoffe die durch Mikroorganismen, wie zum Beispiel Algen hergestellt werden bilden die dritte Generation. Ziel dabei ist die Biomasse der Algen umzuwandeln in Biokraftstoffe. Mit der Biomasse der Algen können durch thermische Umwandlung, biochemische Umwandlung oder chemische Umwandlung alle möglichen Kraftstoffe produziert werden.

Die vierte Generation ist die neuste Methode und benutzt Algen deren Metabolismus genetisch verändert wurde so das sie Biokraftstoffe aus sauerstoffhaltigen photosynthetischen Organismen erzeugen. Durch rekombinante DNA und anderer biotechnologischer Techniken wird die Kraftstoffproduktion verbessert. Der große Vorteil liegt allerdings darin das die Algen nicht aufwendig geerntet werden müssen sondern das Produkt wird von den Zellen ausgeschieden. Das spart Kosten und Verarbeitungsschritte wie die Fermentation.

2 Organismen

Für die Biokraftstoffe der 3. und 4. Generation werden Mikroalgen genutzt. Makroalgen eignen sich eher nicht für die Biokraftstoffproduktion, da Sie nahezu keine Lipide produzieren. Dennoch wird die Anwendung für die Produktion von Bioethanol und Biogas aus den Kohlenhydraten der Algen untersucht.

Das Wichtigste bei der Biokraftstoff Produktion ist die Biomasse, der Ausgangsstoff. Nach Pflanzen und Pflanzenabfällen, die für die erste und zweite Generation genutzt werden, sind Mikroalgen die beste Wahl, wenn es um Biomasse Produktion geht. Da in der Biomasse von Algen ein hoher Anteil an Lipiden, Kohlenhydraten und Proteinen zu finden ist. In der Abbildung 2.1 ist dargestellt wie viel Liter Kraftstoff man pro Hektar Anbaufläche erzeugen kann. Man erkennt das die Algen ca. 18.000 Liter Kraftstoff pro Hektar Anbaufläche liefern können. Das entspricht ca. dem dreifachen Ertrag der üblichen Nutzpflanzen die aktuell dazu verwendet werden.

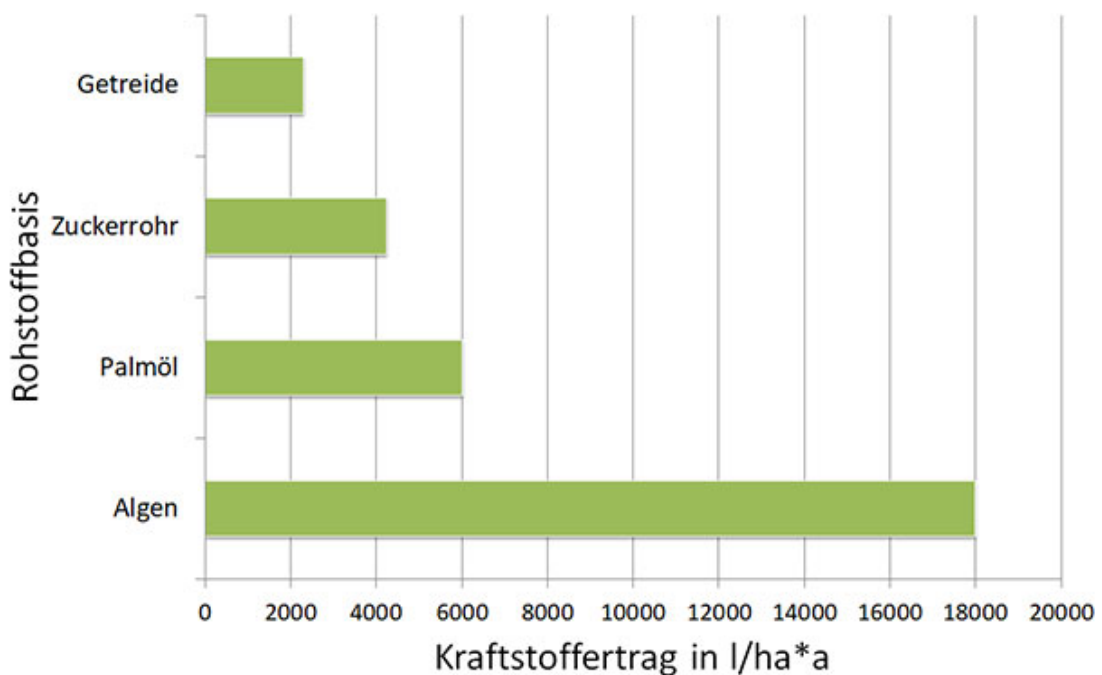


Abbildung 2.1: Kraftstoffertag von Algen im Vergleich zu anderen Biomasse Lieferanten (Rau, 2022)

Natürlich wird das Ergebnis beeinflusst von der Kultivierungsmethode, aber es spiegelt den hohen Anteil an Lipiden in Algen wider. Der Lipidgehalt bei Algen kann zwischen 30-50% liegen. Es wurden jedoch auch schon Algen genetisch modifiziert und kamen auf einen Lipidgehalt von bis zu 80%. Dieses Potential wurde auch früh entdeckt und

trotz rund 80 Jahren Forschung ist es noch nicht über die Phase einzelner Pilotprojekte hinausgegangen.

Mikroalgen sind die größte Gruppe autotropher Mikroorganismen auf der Erde. Genau wie Pflanzen nutzen sie die Energie des Sonnenlichtes, Nährstoffe und CO_2 um zu wachsen. Dabei gibt es aber unterschiedliche Formen des Stoffwechsels, auf die wird später noch genauer eingegangen.

Der Vorteil von Mikroalgen ist Ihre hohe Wachstumsrate und die Fähigkeit Treibhausgase in großen Mengen zu fixieren und umzuwandeln in Lipide. Algen haben eine hohe Lipidkapazität, welche sie auch so geeignet macht für die Biokraftstoff Produktion. Sie haben einen sehr kurzen Reproduktionszyklus, der für einen schnellen Aufbau von Biomasse sorgt.

Es gibt einige Aspekte, auf die man achten muss, wenn man Mikroalgen erfolgreich für die Gewinnung von Biokraftstoffen einsetzen will. Dazu zählt eine hohe Wachstums- und CO_2 Verwertungsrate der Alge. Eine möglichst einfache Ernte durch Absetzen oder Bioflockung und die Alge sollte eine möglichst große Wassertemperaturtoleranz besitzen. Je nach Produktionssystem werden unterschiedliche Methoden angewendet um, die Balance zwischen Lipidgehalt, Biomassewachstum und Geschwindigkeit auszugleichen (Cuellar Bermudez et al., 2014).

In den meisten Fällen lässt sich aber keine gleichförmige, gleichmäßige Biomasse produzieren, da Mikroalgen sich zu schnelle an ändernde Umweltbedingungen anpassen können und dadurch meist auch ihre gesamte Zusammensetzung sich verändert (Schröter-Schlaack et al., 2019).

2.1 *Spirulina* Algen

Die Gattung *Spirulina* kann den Cyanobakterien, oder auch Blaualgen, zugeordnet werden. Der wissenschaftlich korrekte Name lautet *Arthrospira*. Wie viele Arten es gibt ist nicht genau geklärt da das Bakterium seine Gestalt je nach pH-Wert und Nährstoffgehalt des Wassers ändert. Die zylindrischen Zellen sind etwa 1-5 μm groß im Durchmesser und 1-3 μm lang. Diese einzelnen Zellen ordnen sich hintereinander an und bilden ein wendelförmiges Filament, welches eine Länge von 0,5 mm oder mehr erreichen kann.

Spirulina enthält Chlorophyll a, welches in Membranen über die ganze Zelle hinweg verteilt ist. Dadurch kann die Blaualge Photosynthese betreiben und das oxygen.

Spirulina ist relativ weit Verbreitet und kommt natürlich in alkalischen Salzseen, Süßwasser und subtropischen Gewässern mit hohem Salzgehalt vor. In Mittelamerika und

Afrika wurde die Alge früher auch schon als Nahrungsmittel verwendet. Die hohe Salinitätsverträglichkeit ist ein großer Vorteil da somit bei der Züchtung die Konkurrenz kleiner gehalten wird. Durch den hohen Salzgehalt ist ein Wasserwechsel nicht so häufig nötig wie bei anderen Algen, dadurch kann man Kosten sparen.

Die Kultivierung kann in offenen Teichsystemen oder in Photobioreaktoren geschehen. Am besten bei einer Wassertemperatur um die 37°C . Der entscheidende Faktor ist aber die Kohlenstoffdioxid Zufuhr. Bei ausreichend CO_2 Zufuhr wächst Spirulina nicht nur schneller, sondern es wird auch mehr Sauerstoff produziert.

Die häufigste Anwendung des Bakteriums ist die Nahrungsmittelindustrie, entweder als Ergänzungsmittel oder direkt als Nahrung. Pro Jahr werden ca. 3.000 Tonnen Rohmasse an Spirulina als Nahrungsergänzungsmittel, in Form von Tabletten verkauft. Dazu findet es häufig auch Einsatz in Katzen und Fischfutter. Die Biotechnologie nutzt diese Blaualge häufig in Fermentationsprozessen als Biokatalysator und zur Energiegewinnung (Senegal, Brudersohn und M, 2023).

2.2 *Chlorella* Algen

Die Chlorella Algen gehören zu den Süßwasseralgen. Die kugelförmigen Zellen liegen häufig einzeln vor und haben einen 2-10 μm kleinen Durchmesser. Sie besitzen Chloroplasten in denen sowohl Chlorophyll a als auch b vorhanden ist.

Die Chlorella Algen sind ähnlich zu den Spirulina Bakterien aus der Lebensmittelindustrie und der Kosmetik bekannt (Senegal, Ernsts und Studt, 2022).

Diese Algen wurden als erste Mikroalgen Reinkultur angebaut. Für die Biokraftstoff Produktion ist diese Alge so interessant weil Sie eine große Varianz in Ihrer Zusammensetzung aufweist. Sie kann in Abhängigkeit von Nährstoffangebot und anderen Umwelteinflüssen Ihr Protein- und Lipidverhältnis anpassen von 8,7% Protein und 86% Lipiden zu 58% Protein und 4,5% Lipiden. Natürlich ist der erste Fall sehr ideal für die Kraftstoffproduktion. Chlorella ist auch recht unempfindlich was Drücke betrifft sie kann bis zu 10 MPa standhalten, was bedeutet sie kann durch die meisten Pumpsysteme fließen ohne Schaden zu nehmen. Durch ihre mixotrophe Ernährung ist Sie in ihrem Wachstum sehr dynamisch und kann dadurch nicht einfach von anderen Lebewesen verdrängt werden (Schröter-Schlaack et al., 2019).

Die Abbildung 2.2 zeigt die biochemische Zusammensetzung von Vertretern der beiden Algenarten und von *Scenedesmus obliquus*.

	Proteine Masseprozent TM	Kohlenhydrate Masseprozent TM	Lipide Masseprozent TM
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9

TM = Trockenmasse; unter natürlichen Wachstumsbedingungen

Abbildung 2.2: Varianzen biochemischer Zusammensetzungen verschiedener Algenarten (Schröter-Schlaack et al., 2019)

3 Kultivierung von Algen

In der Abbildung 3.1 ist eine Auflistung der verschiedenen Stoffwechselformen zu sehen. Dazu noch ein paar Details zu den Substraten, zum Anlagentyp wo sie kultiviert werden und welche Kosten damit verbunden sind und zuletzt noch einige Herausforderungen die man bei den Stoffwechselformen beachten muss. Diese Tabelle gibt einen guten ersten Überblick über die drei Stoffwechselformen die im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert werden.

Stoffwechsel	Energiequelle	Kohlenstoffquelle	Zelldichte	Anlagentyp	Kosten	Herausforderungen
phototroph	Licht	anorganisch, z. B. Emissionen von Kraftwerken	gering	offen oder PBR	gering	geringe Erträge; Kosten für Ernte und Entwässerung
heterotroph	organisch	organisch, z. B. Abwässer	hoch	Fermenter	mittel	Kontaminationen; Kosten für Nährstoffe
mixotroph	Licht und organisch	anorganisch und organisch	mittel	PBR	hoch	Kontaminationen; hohe Anlagenkosten; Kosten für Nährstoffe

Abbildung 3.1: Tabelle mit Mikroalgenkultivierungssystemen(Petrick et al., 2013)

3.1 Photoautotrophe Kultivierung

Wie bereits erwähnt nutzen die photoautotrophen Algen das Licht der Sonne, genauer gesagt die Energie des Sonnenlichtes und speichern diese in Form von ATP oder NADPH. Das wird dann benötigt, um mithilfe des Calvin Zyklus Glukose herzustellen. In der nachfolgenden Abbildung sind die chemischen Schritte des Calvin Zyklus dargestellt.

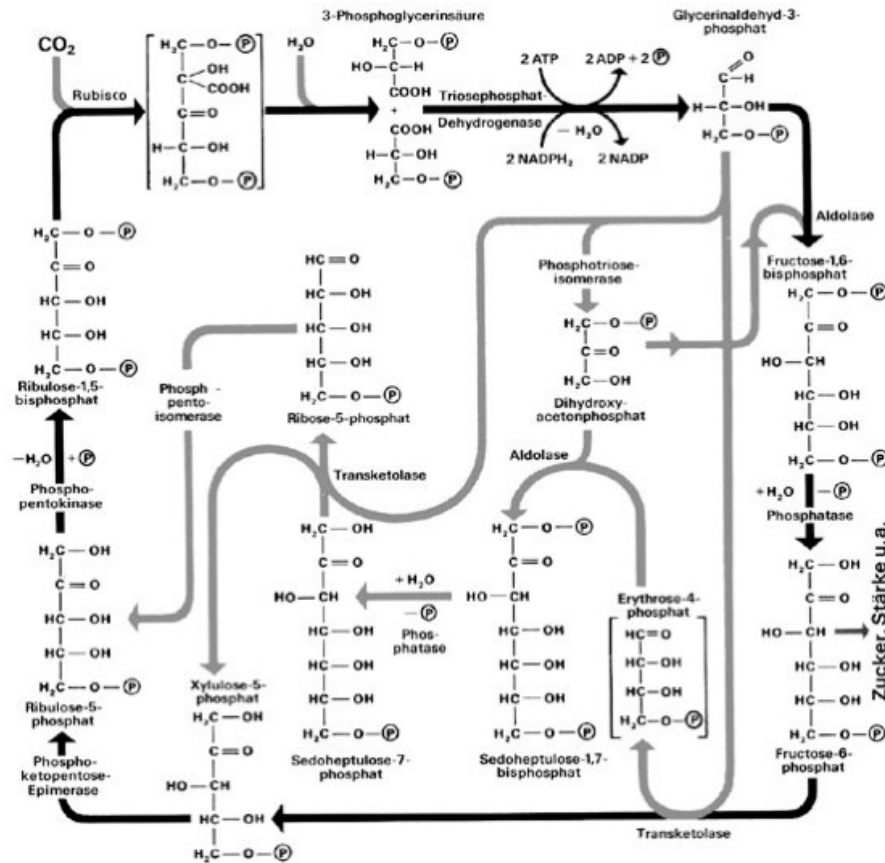


Abbildung 3.2: Die Reaktionsschritte des Calvin Zyklus (Verlag, 2001)

Die Menge, die an Glukose gebildet werden kann, ist abhängig von der Menge an Licht die auf den Organismus fällt und der Menge an Verfügbaren Kohlenstoffdioxid. Bei dieser Art des Stoffwechsels kommt es unter natürlichen Bedingungen dazu das es eine Dunkelphase gibt. Das bedeutet das dort kein Licht mehr auf die Algen fällt und keine Photosynthese stattfinden kann. Dadurch können die Algen nicht weiterwachsen. Es kommt sogar dazu das die Biomasse abbaut da Algen absterben. Das ist ein großer Negativpunkt da man nur durch künstliche Beleuchtung ein konstantes Wachstum sicherstellen kann.

Für die großtechnische Kultivierung bedeutet das, dass Reaktionsbehälter lichtdurchlässig sein müssen bzw. keine tiefen Becken eingesetzt werden können. Um eine gute Beleuchtung zu garantieren sollte das Kultivierungsmedium am besten immer in Bewegung sein. Aber Achtung es kann zu Scherkräften kommen die, die Algen beschädigen. Darauf muss man auch achten, wenn man das Medium mit Kohlenstoffdioxid begast bzw. Sauerstoff abführt (Schröter-Schlaack et al., 2019).

3.2 Heterotrophe Kultivierung

Die heterotrophe Kultivierung wird hauptsächlich dafür genutzt Metabolite und Algenbiomasse zu produzieren. Für den heterotrophen Stoffwechsel werden nur organische Energie und Kohlenstoffquellen benötigt. Das macht das Wachstum unabhängiger von Wettereinflüssen wie Sonnenlicht. Da dabei Licht keine Rolle spielt werden oft Fermenter oder Rührkesselreaktoren zur Kultivierung eingesetzt. Diese sind nicht so komplex wie Reaktoren für phototrophe Algen. Als organische Kohlenstoffsubstrate werden hierbei häufig Glukoseglycerin eingebracht. Der Typ und die Konzentration an Substrat entscheiden den Gehalt an Lipiden und den endgültigen Biomasse Ertrag. Der Lipidgehalt ist bei heterotrophen Stoffwechseln im Vergleich zum phototropen Stoffwechsel wesentlich höher. Deshalb ist die Biokraftstoffproduktion einfacher, da vor allen Dingen der Triglycerid Gehalt sehr hoch ist.

Durch das fast komplett unabhängige Algenwachstum lässt sich diese Kultivierungsmethode sehr leicht up-scalen. Dies ist beim photoautotrophen Wachstum nicht so leicht möglich. Deswegen kann leichter mehr Biomasse erzeugt werden und man verfügt über ein hohes Maß an Kontrolle über das Wachstum der Mikroalgen. Dieser Erfolg wird allerdings durch die hohen Kosten der organischen Kohlenstoffquelle gedämpft. Dadurch wird das Verfahren nicht so häufig verwendet. Eine Kostensenkung kann erreicht werden, indem man auf Industrieabfälle oder Co-Produkte von Raffinerieanlagen als Kohlenstoffquelle zurückgreift. Doch mit dem Abwasser erreicht man häufig nicht so hohe Erträge. Dazu kommt das sich die Zusammensetzung von kommunalen Abwässern häufig ändert und so kein kontrolliertes Wachstum möglich ist. Auch eine Kontamination durch die Abwässer ist möglich.

Man könnte theoretisch sogar das Glycerin, was bei der Biodiesel Produktion in den Raffinerien entsteht, nutzen und würde dadurch sogar die Produktivität der Algen steigern. Aber selbst damit würde der heterotrophe Prozess noch wesentlich mehr Energie verbrauchen als die phototrophe Methode, da die Herstellung der Synthetischen Kohlenstoffquelle Energieaufwendig ist (Srivastava et al., 2020) (Schröter-Schlaack et al., 2019).

3.3 Mixotrophe Kultivierung

Die meisten Algenarten können sowohl phototrophe als auch heterotrophe Ernährung nutzen, um zu wachsen. Das bedeutet das jeder der beiden zuvor genannten Prozesse genutzt werden kann um ein stetiges Wachstum der Alge zu sichern. Egal welche Kohlenstoffquelle bereitgestellt wird es kann alles verstoffwechselt werden. Der große Vorteil ist das Licht nicht mehr ein Wachstumsbegrenzender Faktor ist solange genug Kohlenstoffquellen vorhanden sind. Der Vorteil ist das weniger Biomasse verloren geht wenn es zu einer Dunkelphase kommt da dort dann heterotroph weiter gewachsen

wird. Das Nährmedium ist jetzt der Begrenzende Faktor. Dennoch schafft eine mixotroph wachsende Alge nicht ganz die Biomassemenge die ein heterotrophes Wachstum hervor bringt. Man kann die Wachstumsrate eher mit dem Photobioreaktor des photoautotrophen Wachstums gleichsetzen. Dennoch ist das mixotrophe Wachstumsverhalten der Mikroalgen ideal für eine nachhaltige Biokraftstoffproduktion. Der geringe Biomasseverlust während der Dunkelphase und der geringere Verbrauch an organischen Kohlenstoffquellen während der Wachstumsphase im Licht sorgen für geringere Kosten bei dennoch gutem Wachstumsverhalten.

Die Mixotrophe Kultivierung würde sich gut eignen um Biomasse für die Kraftstoffproduktion zu erzeugen. Da der Ertrag gleichmäßig eine hohe Qualität hat. Durch das richtige Verhältnis von Nährstoffen müsste eine optimale Produktionsrate an Biomasse mit genug Lipidgehalt erreicht werden. So ist Stickstoff besonders wichtig für ein schnelles Wachstum. Wenn der Stickstoffgehalt im Nährmedium jedoch zu gering ist, erhöht sich zwar die Lipidproduktion aber das Biomassewachstum geht zurück. Diese Aufgabe das richtig einzupegeln ist nur durch komplexe und Kosten intensive Anlagen möglich (Schröter-Schlaack et al., 2019).

3.4 Ernten und Entwässern von Mikroalgen

Durch die geringe Zelldichte der Mikroalgen ist das Ernten der aufwendigste und energetisch intensivste Schritt. Es ist die größte Herausforderung für den ökologisch und ökonomisch sinnvollen Betrieb eines Reaktors.

Das Ernten macht bei offen Teichsystemen bis zu 30% der gesamten Kosten aus. Da dieser Prozess verhältnismäßig aufwendig ist im Vergleich zum Rest des Systems. Daher ist man bemüht möglichst kostengünstige Erntemethoden zu finden, um die Kosten des offenen Teichsystems weiter niedrig zu halten.

Die maximale Dichte der Nährlösung beträgt in offenen Systemen ca. 1,6 g/l und in geschlossenen Systemen ca. 2,4 g/l. Deswegen braucht man spezielle Erntemethoden. In der Abbildung 3.3 sind die häufigsten Erntemethoden aufgelistet.

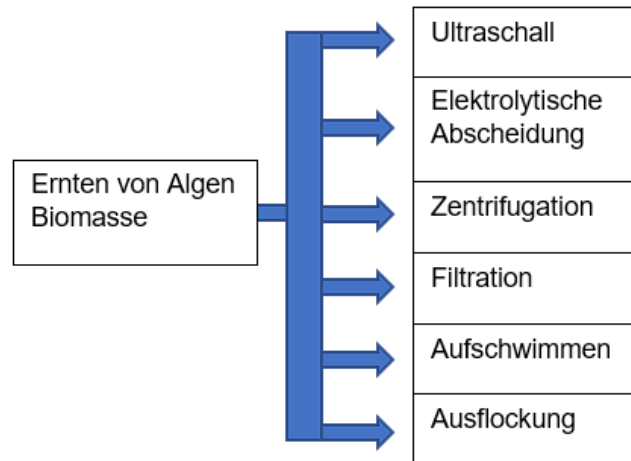


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der verschiedenen Ernte Methoden

Für die Sedimentation werden Flockungsmittel wie bestimmte Polymere oder Aluminium- und Eisensalze eingesetzt. Je höher die Ionenkonzentration im Medium, desto höher der Bedarf an Flockungsmittel. Das Medium kann danach nicht mehr wiederverwendet werden, da das Flockungsmittel das Wachstum der Algen hemmt. Dieser Prozess braucht eine große Fläche und erreicht eine Feststoffkonzentration von 5%.

Eine andere Methode ist Flockung durch Ultraschall. Dafür muss der Algenproduktionsprozess unterbrochen werden, was einen großen Nachteil darstellt.

Flotation beschreibt den Prozess, wenn man mechanisch oder elektrolytisch erzeugte Bläschen in die Suspension einleitet. Diese Bläschen haften an Algenzellen die sich in der Suspension befinden und ziehen diese mit zur Oberfläche. Dort können die Bläschen mit den Zellen abgeschöpft werden. Durch diese Methode ließ sich 95% der extrazellulären Flüssigkeit abtrennen. Allerdings ist diese Methode nur mit dem Einsatz von Flockungsmittel effektiv. Das verursacht einen hohen technischen Aufwand und Energieeinsatz.

Trommel- und Bandfilter eignen sich sehr gut für die Filtration der Suspension. Es kann jedoch passieren das kleinere Mikroalgen durch die Filter durchrutschen. Dazu kommen noch hohe Unterhaltungskosten.

Zentrifugation wird häufig als sekundäres trennverfahren eingesetzt da auch hier der Energiebedarf sehr hoch ist. Zuerst wird also die Biomassekonzentration angehoben und danach wird zentrifugiert. Dabei können Kammerzentrifugen, Plattenseparatoren oder Dekanter eingesetzt werden. Die hohen Energiekosten sind zurückzuführen auf die geringen Dichteunterschiede. Deswegen müssen mehrere Tausend g ($g = \text{Erdbeschleunigung}$) erreicht werden, um die Algen vom Medium zu trennen. Selbst da bleiben viel Zellen noch in flüssiger Lösung. Nur der geringe Platzbedarf ist ein Vorteil.

Einen ähnlichen Energieverbrauch hat die Sprühtrocknung. Dabei wird Algensuspension in einen warmen Luftstrom gesprüht und dadurch verdunstet das Wasser. Diese Methode wird nur angewendet nach vorheriger Trocknung und nur für Produkte mit hohen Qualitäts- und Reinheitsstandards, zum Beispiel zum Erhalt von Vitaminen oder Proteinen.

Die Trocknung der Algen ist besonders für die Kraftstoffherzeugung essenziell. Sie verbraucht nach Angaben von Petrick et al. (2013) ca. 5.300 kJ/kg, das sind rund 1,5 kWh pro kg Algenbiomasse. Dieser enorm hohe Energieverbrauch ist ein großes Problem für die Nachhaltigkeit des Algenkraftstoffes (Schröter-Schlaack et al., 2019).

In der nachfolgenden Abbildung 3.4 sind die Verfahren mit den wichtigsten Parametern aufgelistet

Verfahren	Eingangskonzentration in Masseprozent	max. Konzentrationsfaktor	max. Endkonzentration in %	Energieaufwand pro m ³ Medium in MJ	Energieaufwand pro kg TM in MJ
Sedimentation	0,1-2	50	5	0,1	0,1
Flotation	0,1	34	3,4	1,7	1,7
Filtration (Bandfilter)	0,05	60	3,0	1,5	2,9
Mikrofiltration	0,4	48	20	1,4	0,33
Zentrifugation	0,5	48	22	28,8	-
Zentrifugation	-	20-150	2-15	3,24	-
Sprühtrocknung	bis 30	-	100	-	13

Abbildung 3.4: Vergleich von wichtigen Parametern bei verschiedenen Erntemethoden (Schröter-Schlaack et al., 2019)

Wie effizient die Inhaltsstoffe extrahiert werden können hängt natürlich auch von den Algen und dem Produktionssystem ab. Im Vergleich zu den Nutzpflanzen der 1. und 2. Generation, wo das Öl mittels Pressen gewonnen wird, hat man mit Mikroalgen einen

sehr hohen Aufwand. Die Extraktionsmethode bestimmt auch darüber, wie hoch der gewonnene Lipidanteil ist.

Ein neuer Ansatz ist das hydrothermale Verfahren der Energieträgererzeugung. Ziel ist es die Trocknung zu umgehen und das Wasser in den Algen zu nutzen als Reaktionsmedium. Diese Verfahren würden einen hohen Kostenpunkt umgehen, befinden sich aber noch im Versuchsstadium (Schröter-Schlaack et al., [2019](#)).

4 Produktionssysteme für Biomasse und Biokraftstoffe

Für die Kultivierung von Algen gibt es verschiedene Produktionssysteme. Bevor diese vorgestellt werden wird, nochmal kurz über Batch Ansatz, kontinuierliches und semikontinuierliches System gesprochen. Dabei geht es um Funktions- und Arbeitsweisen die bei den entsprechenden Produktionssystemen je nach Anforderung eingesetzt werden können.

Der erste Ansatz ist die Batch Methode. Dabei werden Algen in ein Nährmedium inokuliert, diese Algen lässt man anschließend bis zur maximalen Populationsgröße wachsen. Wenn diese erreicht ist, werden die Algen alle auf einmal geerntet. Um danach weiter zu produzieren, muss wieder von vorne begonnen werden mit neuem Medium und einer neuen Inokulation.

Der zweite Ansatz beschreibt ein kontinuierliches System oder auch Fed-Batch Methode. Dort gibt es wie der Name schon sagt einen ständigen Zufluss von Nährmedium, welches ein stetiges Wachstum der Algen garantiert. Diese Methode kann angewendet werden, wenn eine hohe Konzentration an Nährmedium das Wachstum hemmen würde. Dazu ist diese Methode ca. 40% günstiger als der Batch Ansatz. Dennoch ist der Batch Ansatz am weitesten verbreitet.

Das semikontinuierliche System ist die dritte Methode. Genau wie beim kontinuierlichen System wird hier ständig Nährmedium hinzugegeben. Allerdings immer nur eine Teilmenge der Biomasse geerntet, dadurch erreicht man eine kontinuierliche Wachstumsrate. Dazu kommt der Vorteil das man nicht wie beim Batch Ansatz immer wieder von vorne anfangen muss. Allerdings sind auch die Erträge nicht so hoch da man nur Teilmengen erntet, dafür hat man einen konstanten Ertrag.

Aus der Biomasse der Algen kann jeder mögliche Kraftstoff hergestellt werden. Dazu müssen nur unterschiedliche thermische, bio-chemische oder chemische Prozesse, wie zum Beispiel Pyrolyse, Vergärung, enzymatische oder chemische Umesterung eingesetzt werden. Grundsätzlich ist der Ausgangsstoff bei der Gewinnung von Biokraftstoffen aus Algen die geerntete Biomasse der Algen. Der wichtigste erste Schritt ist das trocknen der Biomasse und die Extraktion der Lipide aus den Algenzellen. Die Öl- bzw. Lipidextraktion ist hier der entscheidende Faktor für die Produktion eines Biokraftstoffes. Bei diesen Verfahren sind auch der Forschungsstand und der technische Stand am weitesten fortgeschritten (Srivastava et al., 2020).

4.1 offenes System

Das natürliche System oder auch open-pond System ist das wahrscheinlich einfachste System, um große Mengen Algen zu kultivieren. Dabei handelt es sich um ca. 20-30 cm tiefe Teichanlagen in denen die Algen mit einem Nährmedium umgewälzt werden. Die geringe Wassertiefe ist notwendig um eine gute Lichtdurchlässigkeit zu garantieren. Häufig werden diese Teich Systeme auch zur Abwasserreinigung genutzt. Das bringt den großen Vorteil das die Algen mit den nötigen Nährstoffen, wie Stickstoff und Phosphor versorgt werden, ohne großen Zusatzaufwand und gleichzeitig das Abwasser von diesen befreit wird. Das vereinfacht die weitere Aufbereitung des Wassers. In der folgenden Tabelle sind vier verschiedene natürliche Systeme aufgelistet mit Eigenschaften und Produktivität.

OPCS	Funktion	Eigenschaften	Produktivität	getestete Algen
Raceway Anlage	Schaufelrad sorgt für stetige Durchmischung	effizientes Mischen bei niedrigem hydrodynamischem Stress, ausreichende Licht Zufuhr aber ungenügender Gas Austausch	14-50 g/m ² /d	<i>Chlorella</i> sp. <i>Spirulina</i> sp. <i>Dunaliella</i> sp.
Kreislauf Anlage	mit Schaufelrad, oft genutzt für die Abwasserreinigung	Gas Austausch und Mischen ist ineffizient, niedriger hydrodynamischer Stress, Licht Zufuhr ungenügend	21 g/m ² /d	<i>Chlorella</i> sp. <i>Spirulina</i> sp.
schräge Anlage	Betrieb basierend auf Schwerkraft oder mithilfe einer Pumpe	Gas Austausch und Mischen ist ineffizient, niedriger hydrodynamischer Stress	31 g/m ² /d	<i>Chlorella</i> sp. <i>Spirulina</i> sp. <i>Haematococcus</i> sp.
ungemischte Anlage	Abwasserreinigung	Gas Austausch und Mischen ist ineffizient, niedriger hydrodynamischer Stress	< 1 g/m ² /d	<i>Spirulina</i> sp. <i>Dunaliella</i> sp.

Tabelle 4.1: Vergleich von verschiedenen offenen Teichkultivierungssystemen (OPCS) (Srivastava et al., 2020)

Diese offenen Systeme haben den Vorteil, dass sie weniger Wartung benötigen und einfacher zu reinigen sind. Dazu kommt ein im Verhältnis zu anderen Kultivierungssystemen geringer Energieverbrauch. Allerdings bieten sie auch einige gravierende Nachteile. Die Umweltverhältnisse ändern sich je nach Standort und Jahreszeit. Auch Verdunstung spielt hierbei ein großes Thema. Dadurch verändert sich die Konzentration der gelösten Stoffe stetig und das Kulturmedium muss immer wieder angepasst werden.

Da es keine extra CO_2 Zufuhr gibt wird die Produktivität gemindert. Die Tiefe ist auch begrenzt da die Algenschichten das Licht nicht bis in die Tiefe vordringen lassen, sodass nur in den oberen Schichten effizient Algen angebaut werden können. In den meisten Fällen ist das Mischen nicht ausreichend um eine gleichmäßige Sättigung an CO_2 und Nährstoffen zu gewährleisten. Diese schwankenden Bedingungen sind ein extremer Stress für die Algen, sodass sich überhaupt nur wenige Spezies für den Anbau in offenen Systemen eignen, zum Beispiel *Chlorella* oder *Spirulina* Algen. Diese können den extremen Änderungen widerstehen. Spirulina Algen sind auch durch ihre hohe Salztoleranz geeignet. Das ermöglicht es den pH-Wert auf 11 anzuheben und so eine Kontamination unwahrscheinlicher zu machen. Auch im offenen System kann man so eine hohe Qualität erreichen, allerdings sind dann auch die Kosten und Emissionen etwas höher, da man künstlich ins System eingreifen muss.

Circa 80% der weltweit produzierten Algenbiomasse stammt aus offenen Systemen (Schröter-Schlaack et al., 2019).



Abbildung 4.1: Beispielbild eines offenen Teichsystems zur Mikroalgenkultivierung (Boldt, 2020)

4.2 geschlossenes System

Geschlossene Systeme oder Photobioreaktorsysteme bilden das Gegenstück und können sehr gut und genau kontrolliert werden, da es sich um ein geschlossenes System handelt. Das Kulturmedium wird mit CO_2 angereichert und der Sauerstoff wird entzogen, bevor es in den Reaktor eingetragen wird. Dieser Reaktor kann aus transparenten Röhren oder vertikalen Platten bestehen. Membranen im System erlauben eine perma-

nente Ernte.

Durch die genaue Kontrolle kann ausgeschlossen werden das Fremdkörper und Stoffe ins System eintreten. Bei einem offenen System kann eine Kontamination sehr leicht erfolgen. Dazu kann eine kontinuierliche und konstante Produktion von Algen gewährleistet werden. Durch künstliches Licht und Zufuhr der wichtigen Nährstoffe ist zusätzlich eine optimale Produktivität garantiert. Aber hier ist auch wieder die Balance zwischen Sauerstoffgehalt und Kohlenstoffdioxidgehalt entscheidend.

Um ein absetzen am Rand zu vermeiden muss eine ständige Strömung durch das System fließen. Dabei muss wieder auf die Scherkräfte aber auch den Stromverbrauch geachtet werden.

Die Konzentration an Biomasse im Reaktor liegt bei ca. 1,5-2,4 g/l. Es gibt verschiedene Typen von Photobioreaktoren, zum Beispiel die Low-Cost-Reaktoren oder die Biocoil-PBRs. Eine weitere Besonderheit der Reaktoren ist die hohe Reinheit der Algen.

Im Vergleich zu den offenen Systemen wird durch die Rohrsysteme eine bessere Lichtnutzung auf der Grundfläche garantiert. Das führt dazu das PBRs eine bessere Produktivität haben in Bezug auf die Fläche die sie einnehmen. Da es sich um ein geschlossenes System handelt müssen alle Stoffe ins System eingebracht werden und Temperatur und Licht reguliert werden. Das ist sehr Energieaufwendig. Man geht davon aus das ca. 20% der am Ende entstehenden Energie bereits für den Betrieb des Reaktor verbraucht werden (Schröter-Schlaack et al., 2019). Dafür können hier empfindlichere Mikroalgen und genetisch modifizierte Mikroalgen gezüchtet werden.



Abbildung 4.2: Beispielbild eines Panel Airlift-Reaktors zur Mikroalgenkultivierung(Boldt, 2020)

4.3 Umwandlung der Biomasse in Kraftstoff

Aus der Biomasse der Algen kann jeder mögliche Kraftstoff hergestellt werden. Dazu müssen nur unterschiedliche thermische, bio-chemische oder chemische Prozesse, wie zum Beispiel Pyrolyse, Vergärung, enzymatische oder chemische Umesterung eingesetzt werden. Grundsätzlich ist der Ausgangsstoff bei der Gewinnung von Biokraftstoffen aus Algen die geerntete Biomasse der Algen. Der wichtigste erste Schritt ist das Trocknen der Biomasse und die Extraktion der Lipide aus den Algenzellen. Die Öl- bzw. Lipidextraktion ist hier der entscheidende Faktor für die Produktion eines Biokraftstoffes.

In der folgenden Abbildung 4.3 sind die wichtigsten Schritte auf dem Weg von der Alge zum Kraftstoff dargestellt.

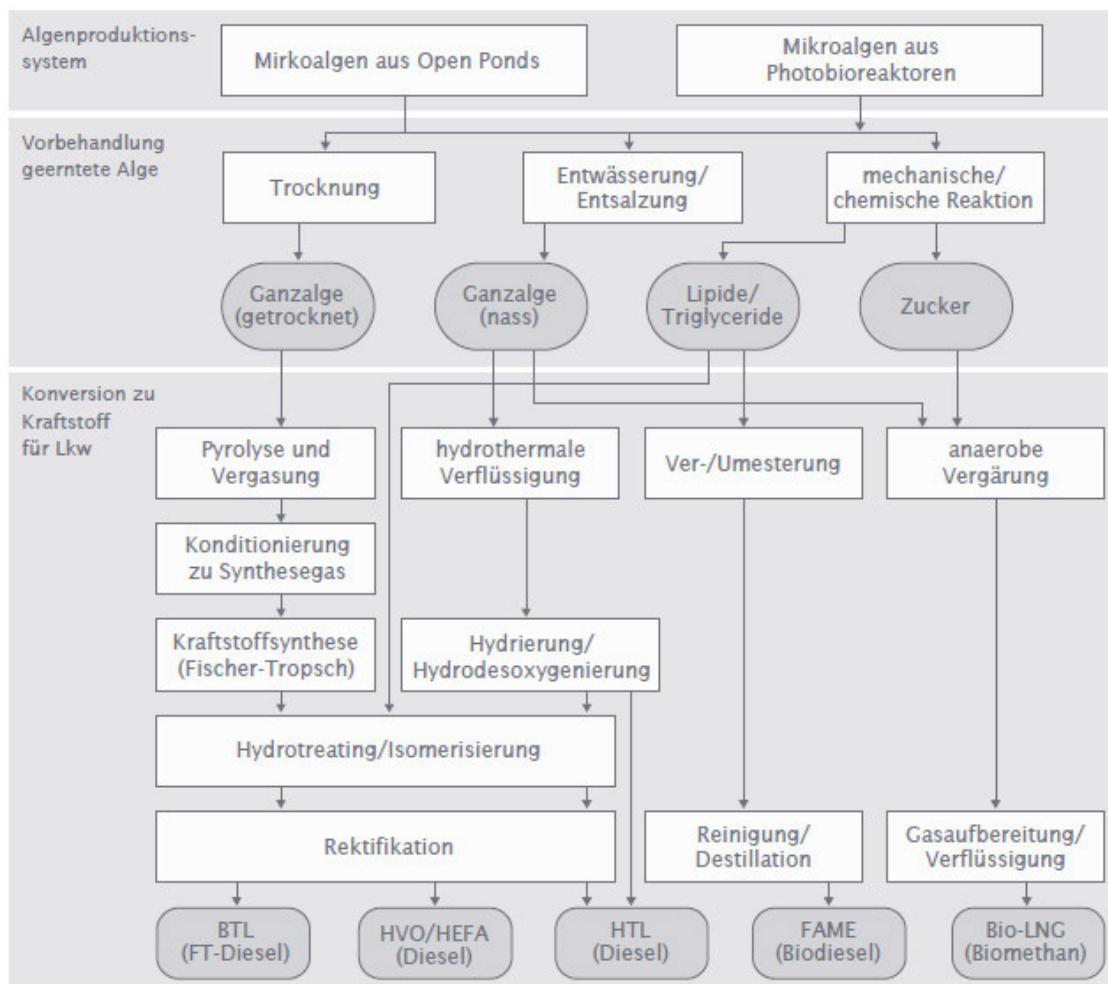


Abbildung 4.3: Überblick über die Konversionspfade der Biokraftstoffherstellung aus Algen (Schröter-Schlaack et al., 2019)

Einige der Verfahren werden bereits industriell angewendet und müssen nur noch für

die Algen angepasst werden andere Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung und sind nur theoretisch umsetzbar.

Es gibt viele unterschiedliche Verfahren der Umwandlung aber nicht jede Form eignet sich für jede Alge, da die Konversionen teilweise spezielle Ansprüche an die Alge haben.

Biodiesel kann durch die Umsetzung von Algenlipiden zu FAME hergestellt werden oder durch die Hydrierung der Lipide. Diese Methoden werden schon erfolgreich für Pflanzenöle angewendet. Zwei Methoden sind noch voll in der Entwicklungsphase. Einmal die Dieselsubstitute durch hydrothermale Verflüssigung der Algenbiomasse zu produzieren und die andere Methode ist die Biomasseverflüssigung aus der Synthetisch Biokraftstoff hergestellt wird.

Der Hauptteil der Biodieselproduktion nutzt die Ver- bzw. Umesterung. Dabei handelt es sich um ein physikalisch-chemisches Verfahren. Etwa 25 Mio. Tonnen FAME-Diesel wird weltweit produziert. Bei dem Prozess werden Pflanzenöle bei 60°C und unter Zuhilfenahme eines Katalysators und Methanols umgewandelt. Die Reaktion ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

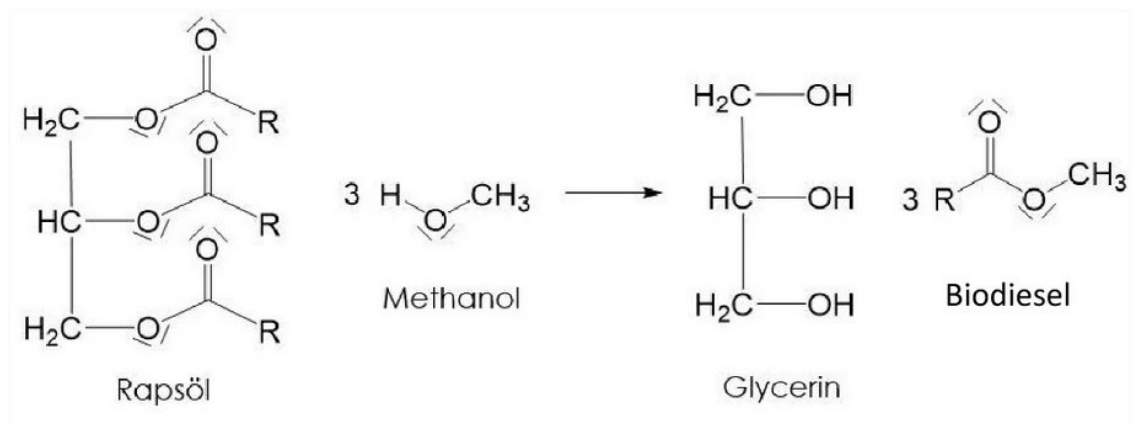


Abbildung 4.4: Veresterungsreaktion von Rapsöl mit Methanol (Mäntele, 2021)

Die Reaktion funktioniert am besten wenn die Öle einen möglichst hohen Triglycerinanteil haben. Das bedeutet ein Glycerin an dem drei Fettsäuremoleküle hängen. Diese Verbindung zwischen Glycerin und Fettsäure wird aufgebrochen und mit Methanol dann zu einem Fettsäuremethylester. Als Nebenprodukt bleibt reines Glycerin zurück.

Wenn man sich jetzt Mikroalgen anschaut, ist dort nur ein hoher Anteil an Triglyceriden erreichbar, wenn man die Nährstoffzufuhr gezielt einstellen kann. Das bedeutet einen sehr großen Aufwand und große Kosten. In einem offenen Teichsystem ist das kaum erreichbar und die Algen haben nur einen geringen Triglycerinanteil. In Photobioreaktoren

können hohe Triglycerinanteile nur mit strengsten Qualitätsauflagen erreicht werden. Für diese Methode sind Mikroalgen nicht besonders gut geeignet.

Biokraftstoff kann aber auch noch durch Hydrierung hergestellt werden. Dazu werden Öle unter Zusatz von Wasserstoff hydriert. Dabei können Diesel aber auch Kerosin oder andere qualitativ hochwertige Kraftstoffe entstehen. Der Prozess ist auch als HEFA oder HVO-Prozess bekannt. Die Algenlipide werden erstmal gereinigt und entwässert, je nach Alge können die Lipide auch verestert werden. Die Doppelbindungen der Lipide werden mit Wasserstoff gesättigt und überflüssige Sauerstoffatome entfernt. Danach folgt das Hydrocracking, dabei werden Kohlenwasserstoffe mithilfe von Wasserstoffverbindungen in kleine Ketten gespalten. Dabei entstehen Methan, Propan und Wasser als Nebenprodukt. Diese Produkte werden dann mit thermischer Fraktionierung voneinander getrennt.

Auch dafür ist ein hoher Lipidgehalt notwendig, allerdings muss die Qualität der Algenlipide nicht so hoch sein wie beim FAME-Prozess. Es reichen auch freie Fettsäuren oder andere Arten von Lipiden. Bei Lipiden niedriger Qualität ist der Hydrocracking Prozess allerdings aufwendiger als bei höherer Qualität. Für Pflanzenöle wird diese Technologie bereits eingesetzt, für Algenlipide ist der Prozess noch nicht kommerziell nutzbar. Aber es wird stetig daran geforscht, da sich hier Algenlipide anbieten würden. Das es möglich ist wurde bereits 2010 bewiesen als auf der Internationalen Luftfahrt Ausstellung ein Flugzeug mit HEFA-Kerosin aus Algenbiomasse einen Rundflug machte (Schröter-Schlaack et al., 2019).

Die hydrothermalen Verfahren unterscheiden sich je nach Zusammensetzung ihrer Einsatzstoffe. Es handelt sich dabei um ein thermochemisches Verfahren bei dem feuchte Biomasse eingesetzt werden kann. Das ist vor allen Dingen bei Algen ein großer Vorteil, da sich somit der aufwendige Trockenprozess gespart werden kann. Es wird unterschieden in drei Prozessvarianten die hydrothermale Karbonisierung für die Herstellung von organischen Feststoffen, die hydrothermale Vergasung für die Herstellung von Gasen und für die Herstellung von Kraftstoffen bietet sich die hydrothermale Verflüssigung an.

Als Ausgangsstoff können ganze Algen aber auch Reststoffe von bereits anderweitig benutzten Algen verwendet werden. Das Wasser in den Algen bildet hier ein Reaktionsmedium. Voraussetzung ist allerdings das die Algendichte auf Massenanteile von 15-30% konzentriert ist. Das wird durch eine Entwässerung in zum Beispiel einem Dekanter erreicht. Diese Methode verbraucht wesentlich weniger Energie als die übliche Trocknung. Danach wird die Zellwand der Alge zerstört und das Medium mit den Algen bei 120-180 bar auf 300-350°C erwärmt. Es entsteht dabei ein Gemisch aus hydrophilen und hydrophoben organischen Flüssigkeiten. Der organische Anteil heißt Biocrude und ein höherer Lipidanteil bedeutet auch einen höheren Biocrudeanteil. Der wässrige Anteil im Biocrude wird reduziert und kann dann in Raffinerien zu den verschiedenen

Kraftstoffqualitäten weiterverarbeitet werden.

Je nach Algenart werden verschiedene Erträge erzielt. Grundsätzlich gilt je mehr Lipidanteil desto mehr Biocrude. Im Gegensatz zur Biodiesel Produktion kann hier die ganze Alge verwendet werden. Dadurch kann man auch nicht genau spezifizierte Algen, zum Beispiel aus dem Abwasser, verwenden. Die thermochemischen Prozesse machen eine biologische Kontamination auch unproblematisch. Es gab schon mehrere Konzepte und Pilotanlagen aber bisher fehlen die Erfahrungen um eine großtechnische Umsetzung zu realisieren. Dennoch ist diese Methode die wohl vielversprechendste Methoden der Biokraftstoffproduktion aus Algenlipiden (Schröter-Schlaack et al., [2019](#)).

5 Ausbeute der Produktionssysteme

Eine genaue Ausbeute bzw. Produktionsmenge an Mikroalgen lässt sich nur schwer festlegen. Die Mikroalgen sind so dynamisch, dass nicht nur Unterschiede zwischen Reaktortypen und Algenart auftreten sondern auch Unterschiede in den Standorten. Dazu stellt man große Unterschiede in den Angaben über die Produktionsmengen fest, da viele Zahlen auf Hochrechnungen aus kleinen Laborversuchen stammen. Hier ist klar, dass up-scaling ein Problem.

Auf der nächsten Abbildung 5.1 ist eine Auswahl an Produktionssystemen zu sehen. Dazu die Angabe des Standortes und der Algenspezies. Die Produktivität wird in $\text{g/m}^2/\text{d}$ angegeben oder in $\text{g/m}^3/\text{d}$. Die zwei Angaben für die Produktivität kommen daher das bei offenen Systemen die Biomasse in $\text{g/m}^2/\text{d}$ angegeben wird und bei geschlossenen Systemen die Biomasse in $\text{g/m}^3/\text{d}$ angegeben wird. Es wurde sich leider noch nicht auf ein einheitliches System geeinigt. Es ist auch noch nicht genau festgelegt was als zugrundeliegenden Einheit der Produktionsanlage zählt ob nur Beckenfläche oder auch Ernte und Trocknung. Ein Vergleich von Produktionsmengen zwischen Produktionssystemen oder Algenspezies ist mit diesen Angaben nicht sinnvoll durchführbar.

Produktivität		Algenspezies	Bemerkungen
g/m ² /d	g/m ³ /d		
<i>Produktionssystem offen</i>			
2,9–10,5		k. A.	Standorte in den USA
20		k. A.	
13,6		Chlorella vulgaris	Durchschnitt 22 verschiedener Standorte in den USA
15,3		k. A.	Standort in New Mexico
5,4	18	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima, Scenedesmus bijuga	Mischkultur mit 30 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer
7,5	92	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima, Scenedesmus bijuga	Mischkultur mit 20 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer
9,2	51	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima	Mischkultur mit 18 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer
24,75		Chlorella vulgaris	30 cm Tiefe, Standort südliche EU, hohe Stickstoffversorgung
19,25		Chlorella vulgaris	30 cm Tiefe, Standort südliche EU, reduzierte Stickstoffversorgung
<i>Produktionssystem geschlossen PBR</i>			
11,4		Nannochloropsis	Durschnitt von 10 Standorten in den USA
40		k.A.	Hochrechnung experimenteller Ergebnisse
65–86		Botryococcus braunii	Standorte in Japan, Nutzung von Abwässern
	360	Nannochloropsis	Versuchsdauer 1 Woche im Sommer
4,4–14,8		Nannochloropsis	Durschnitt von 864 Standorten in den USA

Abbildung 5.1: ausgewählte Produktionssysteme mit Angabe des Standortes und deren Produktivität (Schröter-Schlaack et al., 2019)

Die meisten dargestellten Ergebnisse basieren auf Hochrechnungen von klein skalierten Projekten. Dadurch können Angaben zur Produktivität der Algen stark schwanken. Es gibt kaum konsolidiertes Wissen oder publizierte Belege über die Ausbeute einer ganzen Produktionskette, von Algen bis zum fertigen Kraftstoff. Die folgenden Werte sind dementsprechend mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten (Schröter-Schlaack et al., 2019).

In Deutschland kann man im Mittel mit 10-15 g/m²/d und dadurch ca. 30 bis 50 Tonnen Biomasse pro Hektar rechnen, wenn man ein offenes Teichkultivierungssystem verwendet. Bei geschlossenen Systemen geht man von 10-30 g/m²/d aus und landet damit bei ca. 30 bis 100 Tonnen Biomasse pro Hektar aus. Bei offenen Systemen ist hier die im Vergleich schlechte Effizienz der Kultivierung und die wechselnde Sonneneinstrahlung ein großer Faktor. Dadurch kann man im geschlossenen System je nach Alge das doppelte an Biomasse produzieren.

Da der Lipidgehalt der Algen auch stark variiert geht man hier für die Vergleichsrechnung von 25 bis 30% Lipidgehalt aus. Das bedeutet das in Deutschland 7,5 Tonnen und maximal 30 Tonnen biokraftstoffrelevante Lipide, pro Hektar in Deutschland produziert werden können. Im Vergleich dazu mal die Hochrechnung der Rapsölgewinnung. Der mittlere Jahresertrag von Raps, der in Deutschland am meisten genutzten Pflanze für die Öl Produktion, liegt bei nur 3,5 Tonnen pro Hektar. Bei einem Standardölgehalt von 40% erhält man dann einen Rapsölertrag, der bei ca. 1,2 Tonnen pro Hektar liegt. Dazu sei angemerkt das es Algen gibt die diese 30% Marke an Lipidgehalt weit überschreiten können. Diese Zahlen spiegeln das Potential der Mikroalgen auch für die Bioöl Produktion wider (Schröter-Schlaack et al., 2019).

Was genau bekommt man nun nach all diesen Prozess Schritten? Je nachdem wie man die Biomasse weiterverarbeitet, kann man eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten finden. Dazu zählen Kosmetikartikel, Pharmazie aber auch die Nahrungsmittelbranche nutzt die Biomasse der Algen. In folgenden wird sich aber hauptsächlich auf die Anwendung als Kraftstoff konzentriert.

Als erste Anwendung gibt es den Biodiesel. Dabei handelt es sich um einen ungiftigen klimaneutralen Kraftstoff. Er besitzt einen höheren Flammpunkt als der herkömmliche Diesel. Durch einen Sauerstoffgehalt von ca. 10% wird eine vollständige Verbrennung ermöglicht bei der keine Schwefeloxide oder unverbrannte Kohlenwasserstoffe, weniger Kohlenstoffmonoxid und andere Schadstoffe ausgestoßen werden. Am häufigsten werden hier Grünalgen wie *Chlorella* sp. Oder *Haematococcus* sp. Eingesetzt. Bei *Chlorella* konnte sogar eine Lipidproduktivität von bis zu 100 mg/l/d festgestellt werden. Das ist im Vergleich zu Cyanobakterienstämmen ein sehr hoher Wert.

Biomethanol, wie er im Super E10 Kraftstoff als Zusatzstoff genutzt wird, kann durch die Algen gewonnen werden. Dabei handelt es sich aber nicht unbedingt um einen eigen-

ständigen Kraftstoff sondern eher um ein Ausgangsstoff für weitere umweltfreundliche Kraftstoffe. Wichtig ist das bei der Verbrennung von Methan weniger Kohlenstoffdioxid pro Wärmeeinheit freigesetzt wird als bei den herkömmlichen Kraftstoffen und Verfahren überhaupt möglich ist.

Die Grünabfälle aus der Algenölgewinnung können auch noch weiter genutzt werden. Daraus kann man Biobutanol machen. Dieses Biobutanol hat eine vergleichbare Energiedichte mit Benzin und eine höhere als Ethanol oder Methanol. Deswegen kann es als Ersatz für Benzin eingesetzt und das sogar das man die Motoren modifizieren müsste.

Aber nicht nur Energieträger in Rahmen von Kraftstoffen können gewonnen werden auch Wasserstoff kann durch die Algen erzeugt werden. Der große Vorteil von Wasserstoff ist die Verbrennung ohne Kohlenstoffdioxid Ausstoß. Dazu ist die Energiedichte sehr gut und durch Brennstoffzellen kann aus dem Gas Elektrizität gewonnen werden. Das Problem ist die jetzige Methode der Herstellung von Wasserstoff. Die basiert auf der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, welche großen Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre pusten. Dies ist notwendig da der Hydrolyse Prozess zur Wasserstoffgewinnung sehr Energie intensiv ist. Für die Herstellung von Wasserstoff aus Algen können verschiedene Methoden, wie zum Beispiel Vergasung oder Dampfreformierung benutzt werden (Srivastava et al., 2020).

6 wirtschaftliche Betrachtung

Einer der Hauptgründe wieso nicht schon längst mehr Biokraftstoffe genutzt werden und fossile Kraftstoffe der Vergangenheit angehören ist der wirtschaftliche Aspekt. Leider gibt hier ähnlich zur Ausbeute nur wenige belegte Zahlen und Quellen. Durch das frühe technologische Stadium und das fehlen von großtechnischen Anlagen sind auch hier nur Hochrechnungen möglich. Alle Angaben beziehen sich auf die Tonne als Trockenmasse.

Man kann aber davon ausgehen, dass die Produktionskosten für 1 Tonne Algenbiomasse im offenen Teichkultivierungssystem bei 500 bis 20.000 Euro liegen. Für geschlossene Systeme wird der Preis auf bis zu 100.000 Euro geschätzt.

Wenn man nun wieder den Vergleich zu den Methoden der 1. Und 2. Generation der Biokraftstoffe zieht zeigt sich der Grund für den ausbleibenden Erfolg der Algen. Der Anbau der Nutzpflanzen kommt nur auf ca. ein Viertel der Kosten, welche man für die Algenbiomasse aufbringen muss. Für Raps liegt der Preis bei 330 Euro pro Tonne und für Weizen sogar nur bei rund 170 Euro pro Tonne.

Ein wichtiger Punkt ist hier aber noch, dass dieser Kostenunterschied nur durch die aufwendigere Produktion und Kultivierung der Algen verursacht wird. Die Verarbeitung der Biomasse ist egal welches Ausgangsprodukt nahezu identisch was die Kosten je nach Verfahren betrifft. Die Energieaufwendige Kultivierung und da ernten der Algen sind die Hauptbaustellen der Algenkraftstoffe. Wenn sich diese Methoden günstiger realisieren lassen können die Algen wettbewerbsfähiger werden (Schröter-Schlaack et al., 2019).

Die Abbildung 6.1 zeigt die Studienergebnis von Richardson et al. (2014).

Kostenfaktor	offenes Produktionssystem in Euro/l	geschlossenes Produktionssystem in Euro/l
Investitionsausgaben	4,90	5,20
davon:		
Bau der Anlage	4,10	5,00
Equipment Ernte	0,80	0,20
Equipment Ölextraktion	> 0,01	> 0,01
Betriebsausgaben für die Erzeugung der Algenlipide	8,00	5,10
davon:		
Algenkultivierung	4,90	3,80
Ernte	1,62	0,65
Lipidextraktion	1,48	0,65
übrige Betriebsausgaben (Zinsen, Versicherungen und Steuern)	7,30	6,40

Abbildung 6.1: Kosten der Algenlipidproduktion in geschlossenen und offenen Systemen (Schröter-Schlaack et al., 2019)

Er kam auf einen Literpreis für die Erzeugung von Algenlipiden, von 15 Euro/l in offenen Systemen und ca. 10 Euro/l in geschlossenen Systemen. Der Kauf der Kultivierungsanlage trägt da den größten Anteil. Wenn man die Finanzierungskosten nicht mitbeachten kommt man dennoch auf rund 8 Euro/l im offenen und etwa 5,10 Euro/l bei geschlossenen Systemen. Eine andere Studie von Amy et al. (2011) ermittelte einen Preis im Bereich von 2,10 Euro/l und 2,60 Euro/l. Das zeigt wieder, wie weit die Bandbreite bei den Aussagen ist. Es gibt keine bestätigten Zahlen.

Im Vergleich war fossiles Rohöl in den letzten 10 Jahren nie teurer als 0,80 Euro/l. Rapsöl schwankt von 0,55 Euro/l bis 1 Euro/l und ist damit auch wesentlich günstiger als es die Algenlipide aktuell sein könnten. Das ökonomische Problem was sich ergibt ist das sich nur das offene Kultivierungssystem durchsetzen kann da dort die Anlagen und Betriebskosten relativ gering sind. Bei einem geschlossenen System übersteigen die Betriebskosten den Wert, den die Algenlipide am Ende des Prozesses besitzen. Aktuell ist also mit keinem technologischen Prozess eine Biokraftstoffproduktion aus Algenlipiden wirtschaftlich sinnvoll. Es müssen günstigere Methoden für die Ernte und das Trocknen entwickelt werden damit sich die Kultivierung in offenen Systemen überhaupt als wettbewerbsfähig bezeichnen kann (Schröter-Schlaack et al., 2019).

7 Nachhaltigkeit der Biokraftstoffproduktion

Neben der wirtschaftlichen Betrachtung steht vor allen Dingen auch die Nachhaltigkeit im Vordergrund der Forschungen. Denn das Ziel des Biokraftstoffes ist es nicht nur herkömmliche fossile Kraftstoffe zu ersetzen, sondern dabei auch noch klimaneutral und nachhaltig zu sein.

Wie bereits in Abbildung 2.1 dargestellt war haben Algen eine wesentlich höhere Flächenproduktivität. Aber sie sind nicht nur effizienter im Verhältnis zur Fläche, sondern sie können flexible in fast jedem Gebiet kultiviert werden. Besonders die Eigenschaft in Meeren und anderen Gewässern gezüchtet zu werden gibt den Algen einen großen Vorteil gegenüber den typischen Nutzpflanzen. Damit umgehen Algen das Problem der ersten Generation der Biokraftstoffe, die im Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion stehen.

Ein Vorteil ist der geringere Wasserverbrauch der Algen im Vergleich zu anderen Biomasselieferanten. Das Problem ist jedoch das der optimale Standort für das Algenwachstum Orte mit hohen Sonneneinstrahlungen sind. Dort herrscht allerdings meistens eine Wasserknappheit was den Anbau von Algen dort auch unattraktiv macht. Hier muss man also besonders gut abwägen welcher Standort Sinn macht für eine Algenkultivierung. Trotz der scheinbaren Unabhängigkeit des Standortes ist es in der Realität nicht so einfach.

Studien die sich mit dem aktuellen technischen Stand beschäftigten zeigen das der Energieaufwand zur Erzeugung der Lipide und die Extraktion dieser eine negative Nettoenergiebilanz aufweist. Das bedeutet für die Prozesse der Umwandlung von der Alge zum Kraftstoff wird mehr Energie investiert als der Kraftstoff am Ende liefern kann. Das würde bedeuten das mindestens der überschüssige Energieverbrauch durch erneuerbare, also klimaneutrale, Energie abgedeckt werden muss. Dies erfordert wieder mehr Aufwand und ist im Verhältnis zu den Alternativen durch andere Biokraftstoffe nicht sinnvoll.

Dennoch gibt es viel Potential welches noch lange nicht erforscht ist, aktuelle Studien forschen an der Verwertung der gesamten Algenbiomasse, der hydrothermischen Verflüssigung. Dadurch würde die Trocknung und Extrahierung der Algenlipide wegfallen. Ob das allerdings schon reicht um eine positive Energiebilanz zu erreichen ist unklar.

Wenn man die Treibhausgasemission betrachtet ist es unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland unwahrscheinlich das der Biokraftstoff der Algen andere Methoden der Biokraftstoffgewinnung verdrängen wird. Da die Nutzpflanzen während ihres Wachstumsprozesses wesentlich weniger Stickstoffbedarf haben als die Algen (Schröter-Schlaack et al., 2019).

Aber klar ist das Biodiesel als ein Vertreter dieser Biokraftstoffe dem normalen Diesel in Sachen Umwelt Verträglichkeit definitiv überlegen ist. Grundsätzlich ist er technisch wettbewerbsfähig. Er ist vollständig biologisch abbaubar und ungiftig für die Umwelt. Wenn er verbrannt wird, zeigt er ein besseres Emissionsprofil als herkömmliche fossile Kraftstoffe. Doch wirtschaftlich ist er noch nicht nachhaltig produzierbar.

Wenn man das Augenmerk der Nachhaltigkeit nochmal auf die einzelnen Generationen des Biokraftstoffes legt, kommt man zu folgender Erkenntnis.

Für die Herstellung der ersten Generation an Biokraftstoffen werden hauptsächlich Futterpflanzen und Pflanzen für die Nahrungsmittelproduktion verwendet. Dafür wird viel fruchtbare Landfläche verwendet, welche dann in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie steht. Dies würde bedeuten das weniger Pflanzen für Nahrung angebaut werden und mehr für die Produktion für Biokraftstoffen. Dabei sind die Kosten für das Anpflanzen und Pflegen des Feldes gleich.

Die zweite Generation ist durch die Verwendung von Abfallprodukten nachhaltiger als die erste Generation. Es bleiben zwar die gleichen Umweltbelastungen da es sich um die gleichen Ausgangsmaterialien wie in der ersten Generation handelt, abgesehen vom Abwasser und Industriemüll. Das Problem bei der zweiten Generation ist das sie nicht ohne Nutzpflanzen betrieben werden kann und angewiesen ist auf eine Wirtschaft die organische Abfälle produziert.

Für die Nachhaltigkeit der dritten und vierten Generation ist es entscheidend, wo die Algen gezüchtet werden. Dies kann in einem offenen System, wie einem Teich passieren oder in einem geschlossenen System, wie einem Photobioreaktor. Beide Systeme haben Ihre Vorteile und Nachteile. In einem Teich sind die Algen Kontaminationen ausgesetzt. Es können sich Bakterien oder Zooplankton im Teich bilden welche das Wachstum der Algen hemmen oder sie gar Abbauen. Das muss zwingend verhindert werden und erfordert den Einsatz von Basen um den pH anzupassen damit keine Kontamination mehr stattfindet. Dabei dürfen die Algen aber auch keinen Schaden nehmen. Beispielsweise könnte man *Dunaliella* oder *Spirulina* Algen verwenden. Diese sind so angepasst das sie gut bei Alkalinität und Nährstoffbeschränkungen wachsen können.

Im Gegensatz dazu kann im Photobioreaktor, dem geschlossenen System, die Kontamination auf ein Minimum reduziert werden. Dazu können Kultivierungsbedingungen besser kontrolliert und angepasst werden. Durch die spezifischeren Bedingungen ist es möglich leistungsstärkere Algen zu verwenden und so mehr Biomasse zu produzieren. Durch künstliche Zufuhr von Licht und eine gute Durchmischung von Nährstoffen und CO_2 im Reaktor kann nicht nur die Produktivität erhöht werden, sondern auch die Fläche kann verringert werden da man den Reaktor vertikal ausdehnen kann. Bei einem Teich ist dies nicht möglich, da immer weniger Licht durch das Wasser dringt je tiefer der Teich ist. Der Wirkungsgrad der CO_2 Aufnahme ist bei Photobioreaktoren auch hö-

her als bei einem offenen System. Dafür benötigt man für einen Photobioreaktor mehr Technologiekomponenten, um zum Beispiel den Heiz und Kühlkreislauf zu steuern und eine ideale Kultivierungstemperatur zu erreichen. Das heißt der Energieverbrauch ist bei einem Photobioreaktor auch wesentlich höher im Vergleich zu einem Teich System.

Einen genaueren Einblick in die Nachhaltigkeit der Kultivierungsmöglichkeiten ermöglicht ein LCA. Die Lebenszyklusanalyse betrachtet Inputs, Outputs und Umweltauswirkungen die während des gesamten Prozesses. Dabei ist anzumerken das diese Betrachtung an einem nicht vollständig technologisch einwandfreien Prozess durchgeführt wurde. Da diese Methode der Kraftstoffgewinnung noch neu ist werden sich die Angaben von anderen Evaluierungsmethoden und Angaben unterscheiden. Wichtig ist das bei diesem LCA das Hauptaugenmerk auf die großtechnische Produktion gelegt wurde. Besonders die Auswirkungen auf den Energieverbrauch, Wasserhaushalt aber auch der Verbrauch von Salzen, Phosphor- und Stickstoffdünger steht im Mittelpunkt. Weitere Punkte sind die Methanol Verwendung für die Umesterung und die Glycerinproduktion.

Der erste negativ Punkt ähnlich wie bei den Kulturpflanzen aus den Biokraftstoffe auch hergestellt werden können ist der Stickstoffbedarf der Algen. Auch Algen benötigen einen hohen Düngemiteleinsatz da sie den Stickstoff als Nährstoff benötigen. Eine umweltschonende Alternative wäre Stickstoffhaltige Drainagegewässer zu nutzen oder Düngerreste aus der Landwirtschaft, welche dort nicht mehr eingesetzt werden können. Gülle stellt durchaus auch eine alternative natürliche Nährstoffquelle da. Dabei muss man nur darauf achten das sie verdünnt werden muss, um die Lichtdurchlässigkeit zu gewährleisten. Eine Vorbehandlung der Gülle ist zusätzlich zu empfehlen.

Ein weiteres Problem ist die Ernte der Mikroalgen. Dies kann theoretisch durch Schwerkräftsedimentation erfolgen. Das Problem ist dabei jedoch die geringe Effizienz und der hohe Zeitaufwand. Eine effiziente Zentrifugation ist dabei eigentlich zu bevorzugen, benötigt allerdings einen hohen Energieaufwand. Andere Extraktionsmethoden, wie Cross-Flow-Membranfiltration oder elektrolytische Aggregation sind Energie und Kosten sparer als die Zentrifugation. Dafür aufwendiger in Ihrer Durchführung. Wie bereits oben angemerkt ist der Prozess des Erntens noch zu wenig ausgereift und zu aufwendig um eine nachhaltige Produktion zu gewährleisten (Cuellar Bermudez et al., 2014).

8 Zukunft des Biokraftstoffes

Mit dem aktuellen technischen Stand ist eine Biofuel Produktion aus Algen nicht denkbar. Die Kosten für die Algen Produktion sind viel zu hoch im Vergleich zu Rohöl und Pflanzenölen.

Das theoretische Potential der Mikroalgen ist unumstößlich und in Zukunft wird durch ein voranschreiten der Forschung die Anwendung von Algen immer wahrscheinlicher werden. Jedoch wird es erstmal darum gehen den Biokraftstoffanteil im fossilen Diesel zu erhöhen bevor man die Kapazität hat auf reinen Biodiesel umzustellen. Biomasseerzeugungen mithilfe der 1. Und 2. Generation werden vor allen dingen in Deutschland noch einen großen Teil der Biomasse liefern. Die Algen Biokraftstoffe haben klare Vorteile, die hoffentlich durch die genetische Modifikation dieser Mikroorganismen weiter verbessert werden können. Auch wenn das alles noch theoretische Mutmaßungen sind gibt es doch erste Hinweise das das möglich ist. Schröter-Schlaack et al. (2019) kommt zu dem Schluss, dass bis zum Jahr 2050 kein signifikanter Beitrag zur Verbesserung der Treibhausgasemissionen, des Straßenverkehrs, durch algenbasierte Kraftstoffe entsteht. Um das zu erreichen wären Prozessinnovationen und technische Durchbrüche vonnöten, die nicht absehbar sind. Diese Einschätzung ist nachvollziehbar wenn man sich anschaut was in dieser Arbeit alles thematisiert wurde. Die Erforschung eines so komplexen Themenbereiches braucht viel Zeit und geduld.

Dennoch gibt es vielversprechende Ansätze, die die Forschung beschleunigen könnten. Algen sind nicht nur für die Kraftstoffproduktion interessant, sondern wie bereits erwähnt kann man auch hochwertige Produkte für die Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie produzieren. Diese haben eine wesentlich höhere Vergütung und sind damit lohnender als der Kraftstoff. Die Forschung die dadurch vorangetrieben wird kann auch nützlich für die Kraftstoffentwicklung sein. Die Nutzung von Abwässern zum Senken der Kosten für den Nährstoffbedarf in der Wachstumsphase der Algen ist eine weitere Möglichkeit. Diese Lösung sorgt nicht nur für eine Kostensenkung, sondern hat auch einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Prozesses.(Schröter-Schlaack et al., 2019)

Die Anwendung von Mikroalgen für die Produktion von Biokraftstoffen ist auf jeden Fall ein wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Lebensweise und einer sauberen Umwelt. Auch wenn die Methode noch nicht reif für eine Großflächige Serienproduktion sind gibt es genug kleine Beispiele die bereits zeigen was mit den kleinen Algen alles möglich ist. Mit der Erforschung und Verbesserung der Technologien kann der Wirkungsgrad und die Ausbeute noch steigen und die Kosten gesenkt werden. Es ist klar zu sehen wie viel Potential in diesen Biokraftstofflieferanten steckt. Die vierte Generation der Biokraftstoffe wird das klimaneutrale Auto fahren ein Stück näher an die Realität heranrücken. Aktuell ist der Biokraftstoff noch keine wirtschaftliche Alternative zu den

fossilen Kraftstoffen. Wenn sich die hydrothermale Verflüssigung weiterentwickelt und kommerziell nutzbar gemacht wird, dann kann es sein, dass wir in Zukunft nicht mehr auf die Kraft der Algen verzichten wollen.

Originalarbeiten

- Amy, S, D Ryan, S Meghan, BA Ami, P Ron und P Philip T. (2011) Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. *Energy* 36(8):5169–5179.
- Cuellar Bermudez, SP, M Romero Ogawa, B Rittmannb und R Parra (2014) Algae Biofuels Production Processes, Carbon Dioxide Fixation and Biorefinery Concept. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology* 5:2157–7463.
- Mäntele, W (2021) *Alles Bio: Sinnvoll oder Unsinn?* Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-63483-7.
- Petrick, I, L Dombrowski, M Kröger, T Beckert T.and Kuchling und S Kureti (2013) *Algae biorefinery - material and energy use of algae*.
- Richardson, JW, MD Johnson, X Zhang, P Zemke, W Chen und Q Hu (2014) A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability. *Algal Research* 4:96–104.
- Schröter-Schlaack, C, C Aicher, R Grünwald, C Revermann und J Schiller (2019) *Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den Lkw-Verkehr. Sachstandsbericht zum Monitoring »Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie – Biokraftstoffe der 3. Generation«*.
- Srivastava, N, M Srivastava, PK Mishra und VK Gupta (2020) *Biofuel Production Technologies: Critical Analysis for Sustainability*. Springer Singapore. ISBN: 978-981-13-8637-4.

Webseiten

- BMWI, BfWuK. (2021) *Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren*. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html> (aufgerufen am 03.01.2022).
- Boldt, B. (2020) *Auf dem WEg zur aquatischen Bioraffinerie*. URL: <https://biooekonomie.de/foerderung/foerderbeispiele/auf-dem-weg-zur-aquatischen-bioraffinerie> (aufgerufen am 25.11.2023).
- FNR, FNReV. (2022) *Einführung: Biokraftstoff: Was ist das eigentlich?* URL: <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/einfuehrung> (aufgerufen am 24.11.2022).
- Rau, M. (2022) *Biokraftstoffe der nächsten Generation*. URL: <https://www.greengear.de/biokraftstoffe-naechste-generation/> (aufgerufen am 06.01.2022).
- Senegal, J, Brudersohn und M M. (2023) *Spirulina*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spirulina> (aufgerufen am 05.01.2023).
- Senegal, J, Ernsts und O Studt. (2022) *Chlorella*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Chlorella> (aufgerufen am 05.01.2023).
- Verlag, SA. (2001) *Calvin-Zyklus*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/calvin-zyklus/2049> (aufgerufen am 16.12.2022).

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.



Taucha, den 15.01.2023