

Exposé zukunftsweisender Einkommensoptionen für Biogasanlagenbetreiber

Algenproduktion zur energetischen und stofflichen Nutzung in Kombination mit Biogasanlagen



© links: Ralf-Uwe Limbach, FZ Jülich | rechts: Mark Paterson, KTBL

Clara Kempkens, Mark Paterson | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der
Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Benedikt Hülsemann | Universität Hohenheim

Erstellt: Oktober 2021

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) finanziert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Sondervermögen Energie- und Klimafond (FKZ: 22405416; 22407617; 22408117).

Einleitung

Für zahlreiche Biogasanlagenbetreiber stellt sich mit Ablauf der 1. EEG-Förderperiode nach 20 Jahren die Frage, wie ihre Anlage weiterhin rentabel regenerative Energie produzieren kann. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2021) vorgesehene Verlängerung der Vergütung über die Ausschreibungen für Biomasseanlagen bietet grundsätzlich die Möglichkeit eines Weiterbetriebs, allerdings sind dafür technisch sowie ökonomisch optimierte Anlagenkonzepte notwendig.

Mit dem Projekt „Biogas Progressiv – zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) verfolgen die Projektpartner das Ziel, praxistaugliche Verfahrensoptionen für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen zu evaluieren. Alle potenziellen Nutzungsoptionen, die im Projekt nicht techno-ökonomisch detailliert dargestellt werden konnten, werden in Form einer Konzeptbeschreibung vorgestellt.

Bei den hier beschriebenen Verfahrensoptionen handelt es sich um Konzepte, die derzeit zum Beispiel nur über einen eingeschränkten Absatzmarkt verfügen, sich noch in der Entwicklung befinden, nicht die Marktreife erlangt haben oder nur unter sehr speziellen Bedingungen realisiert werden können. Sie alle eint jedoch, dass sie in Zukunft eine mögliche Einkommensquelle für landwirtschaftliche Biogasanlagen darstellen können.

Dieses Exposé soll als fundierte Entscheidungshilfe dienen, ob sich mit der Algenproduktion für die stoffliche Nutzung oder als Biogassubstrat eine Erlössituation realisieren lässt.

1. Allgemeine Beschreibung

Die stoffliche Nutzung von Algen bzw. von algenbasierten Produkten steigt kontinuierlich an und es etablieren sich immer neue Einsatzbereiche dafür. Die drei größten Einsatzbereiche entfallen auf Nahrungsmittel, Futtermittel und Kosmetika (UMSICHT 2016).

Etwa 75 % der gesamten produzierten Mikroalgenbiomasse wird im Ernährungsbereich verwendet. Hier haben sie eine große ökonomische Bedeutung, z. B. als Nahrungsmittel wie Sushi oder als Produzenten von wichtigen Stoffen wie Agar-Agar (Rosello Sastre und Posten 2010). Das liegt daran, dass die Algen einen sehr hohen Proteingehalt besitzen und sie eine hochwertige Zusammensetzung aus mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Omega-3-Fettsäuren) und verschiedenen Vitaminen aufweisen. Ein gutes Beispiel dafür ist die Mikroalge *Spirulina*. Hierbei handelt es sich um ein photosynthesefähiges mehrzelliges Cyanobakterium, das als potenzielle Proteinnahrungsquelle sehr bekannt ist. Die *Spirulina*-Biomasse enthält 60 % Protein und viele essenzielle Aminosäuren sowie hochwertige Lipide, wichtige Vitamine, wie das Provitamin A (β -Carotin), alle Vitamine des B-Komplexes (Thiamin, Riboflavin, Niacin u.a.) sowie Vitamin K (UMSICHT 2016). Deswegen wird die Alge heute als „Superfood“ bezeichnet (Jung et al. 2019).

Die Wichtigkeit der Algen aus Sicht des Klimaschutzes ist zurückzuführen auf ihre Fähigkeit, Kohlendioxid (CO_2) zu fixieren und dabei Sauerstoff (O_2) freizusetzen; dies erfolgt wesentlich schneller als bei Pflanzen. Der Biogasprozess kann hingegen eine mögliche



CO₂-Quelle darstellen. Aus diesem Grund wurde des Öfteren versucht, die Algenerzeugung mit Biogasanlagen zu koppeln, um dadurch eine Reinigung des Rohbiogases zu erreichen. Mit diesem Ansatz lassen sich bis zu 98 % CO₂ dem Rohbiogas entziehen und gleichzeitig Algenbiomasse erzeugen und somit Energie einsparen (Brauer 2008).

Ein junges Thema ist die Untersuchung von Mikroalgen als Substrat für Biogasanlagen. Sie können eine Ausbeute bis ca. 100 Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr in geschlossenen Reaktorsystemen produzieren (Schulze 2017). Wie in Abbildung 1 dargestellt (blauer Weg), entsteht ein geschlossenes System durch die energetische Nutzung der Algen. Eine andere Integration der Biogasproduktion ist die Nutzung von CO₂ und Wärme einer Biogasanlage zur Produktion von Algenbiomasse und die anschließende stoffliche Nutzung der Algen (Abb. 1, gelber Weg).

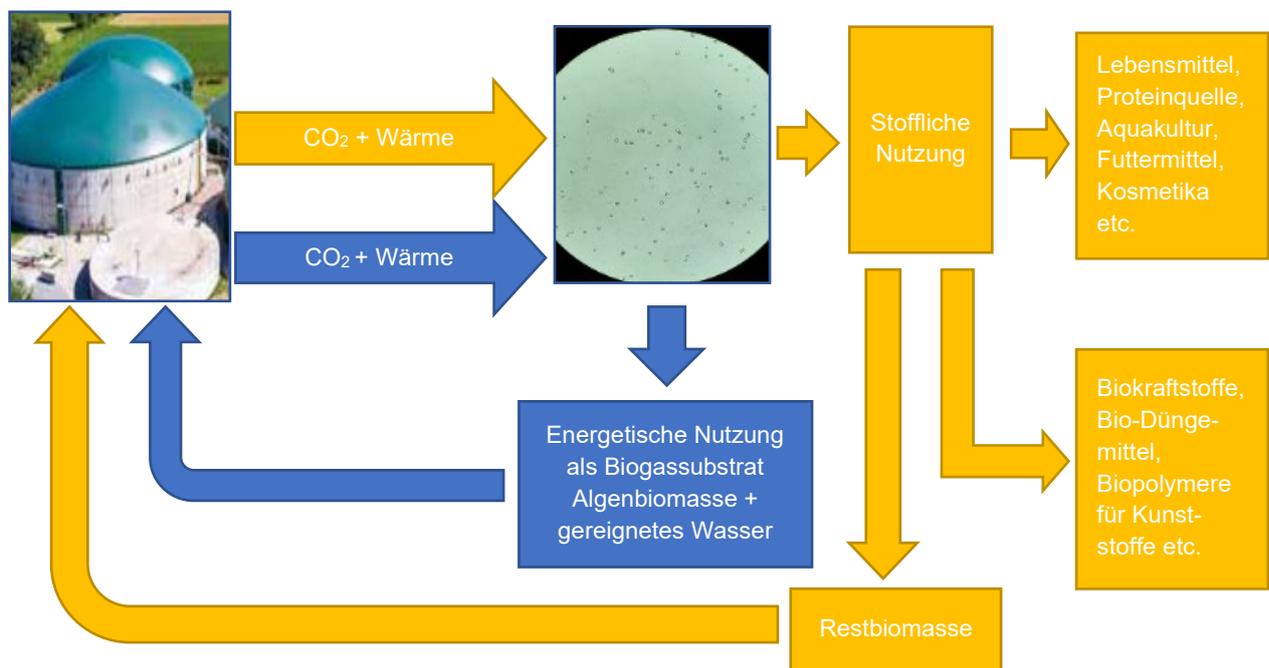


Abbildung 1: Kopplung einer Biogasanlage mit der Mikroalgenproduktion. Gelber Weg: Produktion zur stofflichen Nutzung. Blauer Weg: Produktion der Biomasse zur Verwendung als Biogassubstrat (© KTBL; Abbildung der Biogasanlage © www.fotolia.com | Countrypixel; mikroskopische Abbildung der Mikroalgen © C. Kempkens, KTBL)

Nichtdestotrotz stellen die Investitionskosten ein großes Hemmnis dar und verhindern, dass das Konzept mehr Akzeptanz erfährt. Eine Verringerung der Kosten stellt somit die große Herausforderung zur Umsetzung des Konzepts dar (Skarka 2015).

2. Verfahrenstechnische Beschreibung

Zur Herstellung von Mikroalgen werden Nährstoffe, CO₂, Licht und Wärme benötigt. Die Algen können in offenen oder geschlossenen Reaktoren produziert werden. Zu den geschlossenen Systemen gehören die sogenannten Photobioreaktoren (PBR) und zu den offenen Systemen die offenen Becken.

Algenproduktion

Tabelle 1: Beschreibung der geschlossenen und offenen Systeme zur Erzeugung von Algen (eigene Darstellung nach Dillschneider 2014, Lippky 2018, Rath 2020)

System	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Offenen Systeme: Die Algensuspension befindet sich in einem offenen Becken außerhalb eines Gebäudes			
Open Ponds (künstliche Becken), Raceway Ponds (Laufbahnbecken) (siehe Abb. 3)	offene 20 bis 30 cm tiefe Wasserbecken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ günstigste Variante ▪ geringster Energieaufwand ▪ einfache Reinigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ abhängig von Klimabedingungen ▪ große Gefahr von Kontaminationen ▪ hoher Flächenbedarf ▪ hoher Wasserverlust ▪ schlechte Prozessüberwachung
Geschlossene Systeme: Die Algensuspension befindet sich in einer transparenten Hülle			
Tubulärer Photobioreaktoren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ lange transparente Röhren mit einem Durchmesser von 2,5 bis 40 cm ▪ Besteht aus Glas- oder transparenten Kunststoffrohren, die horizontal oder vertikal angeordnet sind und in denen die Algensuspension umgepumpt oder nach dem Air-lift-Prinzip zirkuliert wird 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor Kontamination ▪ Kontrolle der Bedingungen ▪ hohe Produktivität ▪ große Oberfläche ▪ gute Beleuchtung ▪ unkomplizierte Installation ▪ Akkumulation von Sauerstoff ist hoch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hoher Energieaufwand ▪ kostenintensiv ▪ benötigt an sehr heißen Tagen eine Kühlung
Flat-Plate-Photobioreaktoren (Platten-PBR) (siehe Abb. 2)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ flache, vertikal errichtete Platten ▪ aus transparenten Kunststoffplatten ▪ das von unten zugeführte Luft/CO₂-Gemisch dient auch zum Durchmischen der Suspension. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor Kontamination ▪ Kontrolle der Bedingungen ▪ hohe Produktivität ▪ geringe Akkumulation von Sauerstoff ▪ keine starke Pumpe notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hoher Energieaufwand ▪ sehr kostenintensiv ▪ hoher Reinigungsaufwand



<p>V-Schlauchreaktoren (siehe Titelbild)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kunststoffschläuche, in der Regel in Gewächshäuser untergebracht ▪ Luft/CO₂ wird von unten zugeführt ▪ Batchbetrieb: Algenentnahme erfolgt durch Auslass im Reaktorboden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ als Anzuchtssystem gut geeignet ▪ Schutz vor Kontamination ▪ weniger kostenintensiv als andere Photobioreaktoren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Durchmischung bzw. Transport der Suspension ▪ ungeeignet für kontinuierlichen Betrieb ▪ sehr hoher Arbeitsaufwand
--	---	--	---



Abbildung 2: Flat-Panel-Reaktor der Firma Subitec GmbH als Freilandproduktionsanlage, (© Subitec GmbH)



Abbildung 3: Im Gewächshaus installiertes H-System der NOVAgreen (Open-Pond-System) mit Belüftungskamm (© R. Lüttmann)

Als Hauptregel gilt: Je besser die Lichtverfügbarkeit ist, desto höher ist die Stoffwechselaktivität und damit auch der Biomasseaufbau. Der benötigte Energieinput zur Kultivierung hängt von der Art des Reaktors und von den verwendeten Algen ab. Für die Produktion lässt sich der Energieverbrauch in folgenden Bereichen erfassen (Dillschneider 2014):

- Begasung und Durchmischung (Pumpe, Schaufelrad, Wärmemanagement),
- Ernte und Aufbereitung (z. B. Zentrifugen, Trocknungsanlagen).

Geschlossene Photobioreaktoren erzielen aufgrund der besser zu kontrollierenden Anzuchtbedingungen eine höhere Ausbeute als andere Reaktortypen. Dafür ist der Energieverbrauch im Betrieb höher, weil das Medium durch das geschlossene System gepumpt und das System gekühlt werden muss (Lippky 2018).

Ernte der Algen

Zur Ernte der Algen existieren verschiedene Verfahren, die einen oder mehrere Fest-Flüssig-Trennungsschritte umfassen. Die Auswahl des Verfahrens hat Einfluss auf die



Endkonzentration der Biomasse und die Betriebskosten (Lippky 2018). Die üblicherweise verwendeten Verfahren sind:

- Flotation,
- Sedimentation,
- Zentrifugation,
- Filtration und
- Flockulation.

Die Auswahl der Technik ist von den Eigenschaften der Mikroalgen, wie z.B. Zellgröße, abhängig. Ein Überblick über die verschiedenen Erntemethoden ist in Tabelle 2 enthalten.

Tabelle 2: Auswahlkriterien und Beschreibung der Erntemethoden der Algen (Eigene Darstellung nach Lippky 2018 und Lothholz und Schmid-Staiger 2018)

Verfahren	Beschreibung	Auswahlkriterien
Flockung	künstlich induzierte Koagulation durch Zugabe von Flockungshilfsmittel oder Autoflockulation durch Einstellung von Millieu-bedingungen wie pH-Absenkung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ für die Biogasbildung ist Chitosan als Flockungsmittel zu empfehlen, da es biologisch abbaubar ist und keine toxische oder hemmende Wirkung auf die Biogasbildung hat ▪ das Flockung-Verfahren lässt sich in allen Absatzmärkten nutzen, wenn keine chemische Flockungshilfsmittel benutzt werden ▪ die oft gezüchtete <i>Chlorella vulgaris</i> eignet sich besonders für Autoflockulation
Flotation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ durch Induzierung von Luftblasen im Medium ▪ die Algenbiomasse wird durch die Luftblasen an die Oberfläche geschwemmt, sodass die Algenbiomasse an der Oberfläche herausgezogen werden kann 	Ist nicht geeignet für kleine Mikroalgen wie <i>Chlorella sp.</i>
Zentrifugation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ die Trennung erfolgt durch die unterschiedliche Masseträgheit der Algenzellen und des Kultivierungsmedium ▪ bevorzugte Technik bei Trennung und Erhalt der einzelnen Zellen ▪ sehr hoher Energieverbrauch und kostenintensiv 	Ist geeignet für alle Mikroalgen und alle Anwendungsbereiche
Sedimentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absinken der Algen in einer Flüssigkeit ▪ sehr lange Absetzdauer ▪ keine Energiezufuhr notwendig ▪ Dichte der Algenzellen muss größer sein als die Dichte des Mediums 	Ist nur für große Algenarten (Makroalgen) mit hohen Sedimentationsraten empfehlenswert



Filtration	<ul style="list-style-type: none"> passieren der Biomassesuspension durch ein Filtermedium, wobei dieses für die Nährlösung durchlässig ist und die Algenzellen zurückhält es sind zwei Techniken verfügbar: statische und dynamische 	Eignet sich nur für fadenförmige oder koloniebildende Algen, z. B. die Grünalge <i>Coelastrum proboscideum</i> und die Blaualge <i>Spirulina plantensis</i>
------------	---	---

Um Kosten zu sparen, ist auch die Nutzung von zwei Verfahren möglich. Das heißt, dass erst eine Vorkonzentrierung stattfinden kann und danach die Entwässerung. Durch eine Vorkonzentrierung können die Betriebskosten stark verringert werden, da weniger Volumen durch die Apparatur zur Trennung, z. B. der Zentrifuge, gepumpt werden muss. Für eine Vorkonzentrierung ist zwischen einer Schwerkraftsedimentation, einem elektrischen Verfahren, einer Flockulation oder einer Flotation zu entscheiden; für die Entwässerung zwischen der Filtration und der Zentrifugation. Empfehlenswert hierfür ist das Flotationsverfahren, da es sehr energiearm, hoch effizient und geeignet für eine kontinuierliche Ernte ist (Lippky 2018).

Wertstoffgewinnung der Algen

Es gibt verschiedene Algenstämme, die zur Erzeugung zahlreicher Produkte genutzt werden. Am häufigsten werden *Phaeodactylum tricornutum*, *Nannochloropsis salina*, *Chlorella vulgaris* und *Spirulina* verwendet. In der Tabelle 3 sind die wichtigsten Inhaltsstoffe und Einsatzgebiete nach Algenart aufgelistet.

Tabelle 3: Wertstoffgewinnung der am häufigsten verwendeten Mikroalgen (Eigene Darstellung nach ALPAG 2013, Boussiba et al. 1987, Pfaffinger 2017, Mobin und Alam 2016)

Algenstamm	Besondere Inhaltsstoffe	Einsatzgebiete
<i>Arthrospira (Spirulina) spp.</i> <i>Cyanobacterium</i> insb. <i>Spirulina platensis</i> , <i>Spirulina pacifica</i>	<ul style="list-style-type: none"> Algenbiomasse mit hohem Proteingehalt Phycobiliproteine Phycocyanin Vitamin B12 	<ul style="list-style-type: none"> Nahrungsergänzungsmittel Futtermittel Aquakulturen Kosmetik Pharmaka
<i>Chlorella spp. Chlorophyta</i> insb. <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	<ul style="list-style-type: none"> Algenbiomasse mit Proteingehalt von 40 bis 45 % Polysaccharide, insbesondere β-1,3-Glucan Karotinoide 	<ul style="list-style-type: none"> Nahrungsergänzungsmittel Futtermittel Aquakulturen Kosmetik Pharmaka Reformkost
<i>Nannochloropsis salina</i>	<ul style="list-style-type: none"> hoher Anteil an Eicosapentaensäure (EPA) Fucoxanthin 	<ul style="list-style-type: none"> Lebensmittelindustrie Futtermittelindustrie Kosmetikindustrie Pharmaka



<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hoher Anteil an Lipide und ungesättigten Fettsäuren ▪ Karotinoide ▪ hoher Anteil an Eicosapentaensäure (EPA) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biodieselproduktion ▪ Aquakulturen ▪ Kosmetik ▪ Ernährung
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxanthin (als Farbstoff und als Antioxidans)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aquakultur ▪ Nahrungsergänzungsmittel ▪ Kosmetik ▪ Futtermittel ▪ Reformkost
<i>Aphanizomenon flosaquae</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protein ▪ essenzielle Fettsäuren ▪ β-Carotin 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesundheitskost ▪ Nahrungsergänzungsmittel
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	Docosahexaensäure (DHA)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Säuglingsgesundheit ▪ Ernährung
<i>Isochrysis galbana</i>	Fettsäuren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tierernährung
<i>Lyngbya majuscula</i>	Immunmodulatoren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arzneimittel ▪ Ernährung
<i>Odontella aurita</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fettsäuren ▪ Eicosapentaensäure (EPA) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arzneimittel ▪ Kosmetika ▪ entzündungshemmende Wirkstoffe
<i>Porphyridium cruentum</i>	Polysaccharide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arzneimittel ▪ Ernährung
<i>Scenedesmus</i> spp.	Protein	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aquakultur ▪ Ernährung
<i>Schizochytrium</i> spp.	Docosahexaensäure (DHA) Eicosapentaensäure (EPA)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lebensmittel ▪ Getränke ▪ Nahrungsergänzungsmittel
<i>Dunaliella salina</i>	Karotinoide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reformkost ▪ Nahrungsergänzungsmittel ▪ Futtermittel

3. Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage

Die Kopplung der Algenproduktion an eine Biogasanlage bietet viele Vorteile, da die Biogasanlagen die lebensnotwendigen Bedingungen – CO₂ und Wärme – für das Algenwachstum zur Verfügung stellen können. Damit kann ein geschlossener Kreislauf entstehen (Preugschat 2014). Die erzeugten Algen können danach stofflich genutzt oder als Biomasse für die Biogasanlagen dienen.

Nach einer Untersuchung von Schwede (2013) können die Algen theoretisch eine spezifische Biogasausbeute von 954 l_N/kg oTS bzw. eine spezifische Methanausbeute von



572 l_N CH₄/kg oTS erzielen. Aktuelle Studien zum anaeroben Abbau von Algenbiomasse weisen folgende spezifische Methanausbeute aus:

- 231 l_N CH₄/kg oTS für *Navicula occulta*
- 307 l_N CH₄/kg oTS für *Chlorella vulgaris*
- 276 l_N CH₄/kg oTS für *Dunaliella* sp. (Roberts et al. 2016)
- 213 l_N CH₄/kg oTS für *Scenedesmus* sp. (Adamietz et al. 2019)

Die Algenbiomasse sollte laut Schwede (2013) zuerst aus dem Nährmedium bis mindestens zu einem Trockensubstanzgehalt von 26,5 % durch Zentrifugation aufkonzentriert werden, um unnötigen Wassertransport in der Biogasanlage zu vermeiden. Danach ist eine thermische Vorbehandlung empfehlenswert, da die Algenzellen widerstandsfähig gegen hydrolytischen Abbau sind. Die thermische Vorbehandlung beruht auf einer Erhitzung für zwei Stunden bei 120 °C (Schwede 2013).

Die Umsetzung der Mikroalgenbiomasse in Biogasanlagen zur Produktion von Methan stellt den direktesten Weg der energetischen Nutzung dar. Die Mikroalgenbiomasse kann entweder über Monofermentation oder über Kofermentation z. B. mit Maissilage fermentiert werden (Carstens 2012). Durch den hohen Proteingehalt in den Algenzellen wird bei der Fermentation Ammonium freigesetzt, welches einen positiven Einfluss auf die Pufferkapazität hat. Zudem konnten für die Biogasbildung essenzielle Spurenelemente in der Algenbiomasse nachgewiesen werden (Schwede 2013).

4. Ökonomische Angaben

Die Produktionskosten für Mikroalgenbiomasse variieren je nach Photobioreaktor, Erntemethode und Ziel der Produktion. Deswegen weisen die Schätzungen der Produktionskosten große Bandbreiten auf.

Laut Skarka (2015) variieren die Investitionskosten für die Produktionssysteme zwischen 115.000 €/ha bis 460.000 €/ha. Wobei die untere Spannweite den offenen Systemen entspricht und die obere Spannweite den geschlossenen Systemen.

Laut DECHEMA (2012) liegen die Produktionskosten für Mikroalgen bei 50 bis 150 US\$/kg Biotrockenmasse und sind damit die teuersten Produkte der Aquakultur. In der Literatur werden offene Systeme mit jährlichen Betriebskosten zwischen 16.000 €/ha und 18.000 €/ha und tubuläre Photobioreaktoren zwischen 38.000 €/ha und 100.000 €/ha ausgewiesen (Slade und Bauen 2013).

In der Studie von Sousa (2013) wurden die Kosten für die Algenbiomasseproduktion in horizontalen tubulären Photobioreaktoren auf einer Fläche von 100 ha Aufstellfläche kalkuliert. Die Berechnung ergab Produktionskosten von 4,15 €/kg Biomasse. Die Hektarangaben beziehen sich auf die Aufstellfläche der Algenproduktion.

Je Hektar Algenproduktion ist ein Ertrag von 120 bis 180 t/a in Photobioreaktoren zu erwarten, dennoch ist es möglich durch die Verwendung von Bioreaktoren mit definierten Wachstumsparametern höhere Erträge zu erzeugen (Bischof 2012). Slade und Bauen



(2013) untersuchten die Produktionskosten unter Verwendung der Ressourcen Wasser und Nährstoffe aus Abwasserquellen, unter Verwendung der Ressourcen CO₂ und Wärme aus der Erdgasverbrennung und der konventionellen Produktion, d. h. ohne die Verwendung der Ressourcen aus Abwasser und Erdgas. Als Ergebnis zeigte sich, dass für eine jährliche Produktion in Photobioreaktoren mit einem Ertrag von 146 t/ha mit Kosten von ca. 9,00 €/kg Algenbiomasse zu rechnen ist, falls keine Nährstoffe aus dem Abwasser sowie CO₂ und Wärme aus der Erdgasverbrennung genutzt werden können. Im Fall der Nutzung der Nährstoffe, CO₂ und Wärme reduzieren sich laut der Studie die Produktionskosten auf ca. 3,80 €/kg. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Produktionskosten in offenen Systemen günstiger sind als in Photobioreaktoren. Ohne Anschluss an die oben genannten Ressourcen belaufen sich die Produktionskosten für offene Systeme auf 1,60 bis 1,80 €/kg und mit Anschluss auf 0,30 bis 0,40 €/kg.

5. Marktrelevanz und Absatzmärkte

Die Anwendungsfelder bzw. die Marktabsätze für Algen sind sehr umfangreich. Weltweit finden sich je nach Mikroalge viele Absatzmöglichkeiten in der kommerziellen Mikroalgenproduktion (ALPAG 2013).

Zurzeit werden Mikroalgen in Deutschland hauptsächlich in Photobioreaktoren produziert. Es gibt noch keine Etablierung der Algen als Biomasse zur Biogaserzeugung im großen Maßstab, da die Investitionskosten derzeit noch zu hoch sind. Momentan findet allerdings in ersten Pilotprojekten die Umsetzung in die Praxis statt.

Die Technologie der Algenproduktion ist sehr vielfältig, weil verschiedene Arten von Photobioreaktoren¹ am Markt verfügbar sind:

- Die Firma **Subitec GmbH** bietet einen Flat-Panel-Airlift-Photobioreaktor (Plattenreaktor) mit einer patentierte Strömungsführung über einen statischen Mischer. Weitere Information unter www.subitec.com (letzter Zugriff am 8.4.2021).
- Die **bbi-biotech GmbH** vertreibt Photobioreaktoren vom Labor- bis Produktionsmaßstab, die als Glasrohr aufgebaut sind. Das System besitzt ein Betriebsvolumen von ca. 50 m³ (aufgeteilt in 8 Submodule). Weitere Information unter www.bbi-biotech.com (letzter Zugriff am 8.4.2021).
- Die Firma **GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH** bietet Photobioreaktorsysteme an, um Mikroalgen zu kultivieren. Die Reaktoren sind im

¹ Die Informationen über die Hersteller und Anbieter von Produktionssysteme gibt keine Wertung ab und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.



Tannenbaum-Design aufgebaut und können ab einem Volumen von 25 m³ installiert werden. Weitere Information unter www.gicon.de (Zugriff am 8.4.2021).

- Die **NOVAgreen GmbH** bietet patentierte Schlauchreaktoren basierend auf einem Mehrschicht-Foliensystem und Open-Pond-Systeme an. Weitere Information unter www.novagreen-microalgae.de (letzter Zugriff am 8.4.2021).

Der erzielbare Erlös aus Algenbiomasse und ihren Produkten wird maßgeblich durch ihren Einsatzzweck bestimmt. Hochwertige Produkte, die im Kosmetik-, Pharma- oder Lebensmittelbereich eingesetzt werden, generieren höhere Preise als der Einsatz von Algenbiomasse als Futtermittelzusatz, Dünger oder zur Anwendung in der Energiegewinnung. Eine Kombination aus der Produktion von Hochwert- und Algenbiomasseprodukt ist die sinnvolle Verwendung in Bezug auf ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit (ALPAG 2013). Zum Beispiel können aus der Algenbiomasse hochwertige ungesättigte Fettsäuren gewonnen und als Nahrungsergänzungsmitteln vermarktet werden. Zusätzlich ließen sich daraus auch Farbstoffe (z. B. Karotinoide) für den Kosmetikbereich extrahieren. Abschließend kann die Restbiomasse als Zusatzstoff zur Biogaserzeugung energetisch verwendet werden.

Algenbiomasse die im Ernährungsbereich eingesetzt wird, erzielt einen Marktpreis von etwa 36 €/kg. Hochwertige Algenprodukte erzielen Preise bis zu 7.150 €/kg (z. B. Astaxanthin). Die Gewinnung ist allerdings deutlich aufwendiger und kostspieliger (Dillschneider 2014).

Die mehrfach ungesättigten Fettsäuren (auch als Omega-3-Fettsäuren oder PUFA bezeichnet) sind sehr wertvoll für die Ernährung. Dementsprechend groß ist auch die Nachfrage nach daraus hergestellten Produkten wie Pillen, Kapseln, Extrakte oder Pulver. Zudem werden sie als Zusätze für Getränke und Speisen verwendet. Zurzeit werden die Omega-3-Fettsäuren vor allem aus Kaltwasserfischen oder Krill gewonnen. Bei Vegetariern und Veganern besitzen diese Präparate allerdings keine hohe Akzeptanz, weshalb die PUFA-Produktion aus Algen eine wichtige Alternative ist (Lothholz und Schmid-Staiger 2018).

Ein sehr interessanter Bereich ist die Aquakultur. Aktuell stellt aber die Überfischung ein großes Problem dar, da für die Kultivierung von gesunden Fischen und Meeresfrüchten häufig Fischöl und Fischmehl als Futtermittel verwendet wird, was die Überfischung verstärkt. Um die Akzeptanz der Konsumenten zu gewinnen, haben sich viele Aquakulturbetriebe für eine nachhaltige Zufütterung entschieden, indem sie Algen als Futtermittel benutzen, sodass die Aquakultur inzwischen zu einem Treiber der Mikroalgenbiotechnologie geworden ist (Schröder 2013).

Auch in Richtung Massenprodukte mit mittlerem und niedrigem Preisniveau existieren Einsatzoptionen. Mögliche Zielprodukte sind Fein- und Plattformchemikalien für die chemische Industrie. Mehr als fünf Prozent des nach Deutschland importierten Erdöls wird für Kunststoffe eingesetzt, ein Markt, der sich mit mikroalgenbasierten Rohstoffen nachhaltiger bedienen ließe (Bippes et al. 2016).



6. Rechtliche Belange und Förderungen

Die Erzeugung von Mikroalgen ist rechtlich der Landwirtschaft bzw. dem Gartenbau zugehörig und somit nach Baugesetzbuch privilegiert und damit grundsätzlich auch im Außenbereich zulässig. Dementsprechend ist ein Erschließungsverfahren im Rahmen einer Bauleitplanung nicht nötig (Rath 2020). Das verfahrensfreie Bauen ist je nach Bundesland unterschiedlich geregelt. Maßgebend sind hier die Bauordnungen der Länder. Es gibt vor allem Begrenzungen in der Firsthöhe und in der zulässigen Grundfläche des Gewächshauses (Rath 2020).

Zur Erzeugung von Algen im ökologischen Landbau als Nahrungsmittel ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) fordert für getrocknete Algenprodukte eine Höchstgrenze von 20 Milligramm Jod pro Kilogramm. Eine verpflichtende Kennzeichnung des Jodgehalts in Algenprodukten gibt es in Deutschland derzeit nicht. Verschiedene Hersteller aus Deutschland weisen aber auf ihren Verpackungen die durchschnittlichen Jodgehalte aus und informieren auch über die empfohlene Begrenzung der Zufuhr auf 0,2 Milligramm Jod pro Tag durch die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (BfR 2004). Getrocknete Algen- und Seetangprodukte besitzen ein Jodgehalt zwischen 5 und 11.000 Mikrogramm pro Gramm Trockengewicht (Verbraucherzentrale 2020).
- Genau wie Biogetreide und Biogemüse dürfen auch Bioalgen nur mit organischem Dünger gedüngt werden. Mineralstoffe und Spurenelemente müssen aus natürlichen Quellen stammen. Erlaubt sind zum Beispiel Gesteinsmehle. Außerdem dürfen bei allen Biobetrieben möglichst keine Nährstoffe aus der Algenfarm in die Umwelt gelangen. Deshalb darf in geschlossenen Beckenanlagen, das Ablaufwasser maximal den gleichen Nährstoffgehalt wie das einströmende Wasser aufweisen. Antibiotika und synthetische Düngemittel sind in der Bioalgenzucht grundsätzlich verboten (EU 889/2008).

Algenprodukte finden auch als Futterzusatzstoffe (als Emulgatoren, Stabilisatoren, Verdickungs- und Geliermittel) in der Tierernährung Verwendung und sind über die EU-Richtlinie 70/524/EWG geregelt (Lothholz und Schmid-Staiger 2018). In Deutschland existiert eine Lebensmittelzulassung für die einzellige Grünalge *Chlorella* sp. und für das fädige Cyanobakterium *Spirulina* sp. (Lothholz und Schmid-Staiger 2018). Dennoch muss die futtermittelrechtlich erlaubte Höchstmenge an Cadmium-, Quecksilber- und Microcystin beachtet werden (Lothholz und Schmid-Staiger 2018).

Als Pflanzenstärkungsmittel und Pflanzenhilfsmittel dürfen Algen problemlos eingesetzt werden. Sie unterliegen dabei der Düngemittelverordnung (Lothholz und Schmid-Staiger 2018). Pflanzenschutzmittel aus Algen benötigen eine Zulassung mit Nachweis der Wirkung und die Verträglichkeit für Mensch und Umwelt (Lothholz und Schmid-Staiger 2018).

Auf der Positivliste für Einzelfuttermittel sind Seealgenmehl, *Spirulina*-Algen, *Chlorella*-Algen, *Schizochytrium limacinum*-Algen, *Tetraselmis*-Algen zu finden. Dennoch für jede gibt



es besondere Herausforderungen in der Produktion zu beachten (DLG 2019). Nachfolgend sind einige rechtliche Belange aufgelistet, die ebenfalls bei der Produktion von Algen zu berücksichtigen sind:

- Umweltverträglichkeitsprüfung: Die potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt werden vor der Genehmigung der Zucht bewertet → Richtlinie über die Umweltverträglichkeitsprüfung (Richtlinie 2011/19/EU).
- Verwendung nicht heimischer Arten / Regelung der Verbringung nicht heimischer Arten: Invasive gebietsfremde Arten, die als beachtliche Bedrohung für das Ökosystem aufgeführt sind, dürfen nicht verbracht werden → Verordnung (EG) Nr. 708/2007 über die Verwendung nicht heimischer und gebietsfremder Arten in der Aquakultur, Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 über invasive gebietsfremde Arten.
- Ökologische Produktion: Über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen → Ökologische und Biologische Produktion (Verordnung (EU) 2018/848), Durchführungsvorschriften für die Produktion von Tieren und Meeresalgen in ökologischer/ biologischer Aquakultur (Verordnung (EG) Nr. 710/2009).
- Lebensmittelsicherheit, Gesundheit und Hygiene: Die Gesundheit der Verbraucher wird geschützt durch Regelungen für Fischfutter und Rückstände bestimmter Stoffe → Lebensmittelrecht (Verordnung (EG) Nr. 178/2002), Verordnung (EG) Nr. 2017/625 über amtliche Kontrollen.
- Ableitungen ins Wasser: Die Verwendung von Resten, die im Wasser dispergieren könnten, bedarf es einer Genehmigung → Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG).
- Wassernutzung: Für die Entnahme von Wasser aus Gewässern → Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG).

7. Chancen und Hürden

Algen als Biomassesubstrat bieten sehr viele Vorteile. Die Mikroalgen enthalten kein Lignin, weshalb sie im anaeroben Prozess leicht aufzuschließen und vollständig abbaubar sind. Die Kopplung der Algenproduktion mit einer Biogasanlage bringt den Vorteil, dass die Verknüpfung ein nachhaltiges System darstellt. Zudem ist eine Einsparung der Herstellungskosten bei der Produktion von Algen durch den Synergieeffekt möglich. Die im BHKW anfallende Wärme dient zum Temperieren der Algen, wodurch sich eine nahezu vollständige Nutzung der Abwärme im optimalen Fall erreichen lässt. Das im Motorabgas enthaltene CO₂ dient den Algen zum Stoffwechsel, sodass sich der Kohlenstoff weiter nutzen lässt und nicht in die Umgebung abgegeben werden muss (Sebök 2019).

Mikroalgen können pro Fläche bis zu fünfmal mehr Biomasse als klassische Energiepflanzen bilden. Als realistisch werden Werte von 100 t Biotrockenmasse pro Hektar und Jahr angesehen (Bippes et al. 2016). In Bezug auf die Kultivierung ist der große Vorteil, dass Algen grundsätzlich keine Ackerfläche benötigen und der Anbau auf jeder Fläche möglich ist. Algen können in Süß-, Brack- oder Meerwasser kultiviert werden.



Ein anderer Vorteil ist, dass die Algen vielseitig sind, sodass eine kombinierte Verwertungskette stattfinden kann. Bei deren Herstellung lassen sich gleichzeitig hochpreisige Produkte, z. B. Kosmetika, Produkte im Mittelpreissektor, wie Nahrungsmittel, und Niedrigpreisprodukte aus Restbiomasse, wie Treibstoffe, erzeugen. Dabei könnten auch noch andere Ansätze zur Nutzung von Mikroalgen, wie die Abwasserklärung, mit integriert werden, um die Wirtschaftlichkeit weiter zu erhöhen (Schulze 2017).

Ein sehr großer Vorteil ist auch die Akzeptanz der Produkte aus Algen in der Gesellschaft, da sie umweltfreundlich und für Veganer und Vegetarier geeignet sind. Neben ihrer Nachhaltigkeit werden sie in der Regel vollkommen zu Recht als unbedenkliche Quelle für interessante Produkte wahrgenommen, mit denen Umweltschutz, Energieeinsparung und eine Unabhängigkeit von Rohstoffländern erreicht werden kann (Bippes et al. 2016).

Trotz ihrer zahlreichen Vorteile ist die Algenkultivierung als Einkommensoption sehr schwer umsetzbar, da sie aufgrund der hohen Kosten für Bau und Betrieb der Kultivierungsanlagen in den meisten Fällen unwirtschaftlich ist. Im Vergleich zu den Kosten der Maisproduktion sind die Produktionskosten der Algen 100-mal höher.

Außerdem gibt es bisher nicht genug Daten aus der Forschung und Erfahrung mit dem Thema „Algen als Biogassubstrat“. Erfahrungen mit der Produktion von Algen und der entsprechenden Technologie sind bisher vor allem in der Pharmaindustrie und Kosmetikindustrie gemacht worden. Der Bedarf an Hilfsenergie und der Aufwand für die Aufarbeitung gelten ebenfalls als Hürden, um die Algen als wirtschaftliches Substrat zur Biogaserzeugung zu nutzen. In vielen Fällen ist auch die Kultivierungstechnik sehr komplex und energetisch aufwendig.

Zurzeit existiert immer noch viel Forschungsbedarf im Bereich „Algen“, insbesondere zu einer vollständigen Nutzung der Algenbiomasse.

8. Weiterführende Informationen

Im Rahmen einer einjährigen Fördermaßnahme der Behörde für Wissenschaft, Forschung und Gleichstellung der freien Hansestadt Hamburg in Projekträgerchaft mit der Technischen Universität Hamburg entwickelte Stefan Sebök Verfahren und Methoden zur landgestützten Kultivierung von Meeresgroßalgen (Sebök 2019). Nach diesem Projekt gründete Sebök das Start-Up-Unternehmen „**Algenprojekt**“. Hierfür bietet er und sein Team Beratung, Schulungen und Unterstützung im Bereich Projektmanagement, Forschung und Entwicklung zur Algenkultivierung an Land, im Meer und in Photobioreaktoren an. Mehr Informationen unter www.algenprojekt.de (letzter Zugriff am 26.4.2021).

Das europäische Projekt „**Coastal Biogas**“ will der Eutrophierung der Ostsee entgegenwirken. Dafür werden an Stränden angespültes Seegras entfernt und als Ko-Substrat für die Biogasproduktion genutzt (COASTAL Biogas 2021). Ein gezielter Technologietransfer und eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit in Verbindung mit Machbarkeitsstudien und Pilotversuchen werden zur Markteinführung und zum ersten Schritt einer breiteren Umsetzung dieser neuen und innovativen Technologie im südlichen



Ostseeraum beitragen. Das übergeordnete Ziel ist es, einen Leitfaden für die Verwendung von Seegrass als Ko-Substrat, z. B. für Kommunen und/oder Biogasbetreiber in Küstengebieten zu erarbeiten (FNR 2021). Mehr Informationen (auf Englisch) unter www.coastal-biogas.eu (letzter Zugriff am 26.4.2021).

Da Plastik ein großes Problem für den Umweltschutz darstellt, testen viele Forscher und Firmen abbaubare Alternativen. Mit diesem Ziel gibt es aktuell verschiedene Firmen, die sich zu einer Verpackungsalternative auf Basis von Algen entschieden haben. Zum Beispiel hat das indonesische Unternehmen „**Evovare**“ ein essbares und biologisch abbaubares Verpackungsmaterial entwickelt, das für Take-away-Verpackungen eingesetzt werden kann. Das Material löst sich in heißem Wasser auf. So lassen sich zum Beispiel Instant-Nudeln verpacken. Evovare nutzt Algen aus Indonesien, die es dort im Überfluss gibt. Mehr Informationen (auf Englisch) unter www.rethink-plastic.com/brand/evovare (letzter Zugriff am 15.10.2021).

„**Jesus of Algae**“ ist eine Firma aus den USA, welche Plastikprodukte aus Algenöl produziert. Das erste Produkt, ein biologisch abbaubares Surfbrett aus Algen, wurde gemeinsam mit einer Firma für Sportartikel hergestellt. Als nächstes Produkt werden „Flip-Flops“ aus Algen hergestellt. Auf dem gleichen Prinzip basiert die Idee des Remy Lucas aus Frankreich. Der Ingenieur benutzt Algengranulat aus Braunalgenarten für die Herstellung von Plastik in industriellem Maßstab, vor allem für Kinderspielzeug und Verpackungen. Die Produkte sind vollständig biologisch abbaubar, sodass die Reste als Dünger verwendet werden können. Die Firma „Algopack“ stellt Produkte wie Bioverpackungsmaterial, Biobecher, Biokorken und auch das besondere „Bio-Bäckerei-Einwickelpapier“ her (Blage 2017). Mehr Informationen unter www.algopack.com (letzter Zugriff am 26.4.2021).

Materialforscher vom Fraunhofer-Institut UMSICHT haben im Rahmen des europäischen Verbundprojekts „**Eclipse**“ eine alternative Biomassequelle entdeckt: algenbasierte Biomasse, die bei der Biodieselproduktion anfällt. Aus den darin enthaltenen Algen haben die beteiligten Forscher zunächst PLA (Polylactid) extrahiert. Durch den Einsatz von nanoskaligen Fasern und Füllstoffen aus Bananen- und Mandelschalen oder Fischereiabfällen, wie Chitin aus Krustentieren, wurden dann die Eigenschaften des Materials noch einmal verbessert und daraus zwei biobasierte und zugleich bioabbaubare Kunststofffolien hergestellt. Dabei handelte es sich um Agrarfolien und um Standbeutel-Verpackungen für Feuchttücher. Die Vorteile der entwickelten Biofolien aus Algen sind, dass das Material aufgrund der nanoskaligen Chitinschalen eine hohe Festigkeit sowie Flexibilität besitzen und daher sehr widerstandsfähig gegen Materialschädigungen sind. Aufgrund der antifungiziden Eigenschaften können daraus auch biologisch abbaubare Agrarfolien im industriellen Maßstab hergestellt werden (Bio Ökonomie 2015). Mehr Informationen unter www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht/internationales.html (Zugriff am 26.4.2021).

Das Kompetenzzentrum 3N organisiert regelmäßig den Niedersächsischen **Algenstammtisch** zur Netzwerkbildung. Während dieser Veranstaltung haben Interessierte



(Züchter, Vertriebler, Anlagenbauer, Forscher) die Möglichkeit, sich auszutauschen und das eigene Netzwerk mit interessanten Kontakten zu erweitern. Weitere Informationen unter <https://www.3-n.info/themenfelder/biooekonomie/algen.html> (letzter Zugriff am 26.4.2021).

Literatur

Adamietz, T.; Jurkowski, W.; Adolph, J.; Brück, T.B. (2019): Biogas yields and composition from oil-extracted halophilic algae residues in conventional biogas plants operated at high salinities. *Bioprocess and biosystems engineering* 42(12), pp. 1915–1922, <https://www.doi.org/10.1007/s00449-019-02185-8>

ALPAG (2013): Mikroalgenproduktion. Marktanalyse, Berlin, http://www.heckberatung.de/files/Mikroalgenproduktion_Marktanalyse.pdf, Zugriff am 17.12.2020

BfR (2004): Gesundheitliche Risiken durch zu hohen Jodgehalt in getrockneten Algen. Aktualisierte Stellungnahme Nr. 026/2007 des BfR vom 12. Juni 2007, Bundesinstitut für Risikobewertung, www.bfr.bund.de/cm/343/gesundheitsliche_risiken_durch_zu_hohen_jodgehalt_in_getrockneten_algen.pdf, Zugriff am 14.01.2021

Bio Ökonomie (2015): Alternative Biomasse: Biofolien aus Algen. Viele Biokunststoffe werden aus Biomasse gewonnen, die auch für Lebensmittelzwecke in Frage käme. Fraunhofer-Forscher haben nun ein Verfahren mit Algen als Ausgangsstoff für Biofolien entwickelt, <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/alternative-biomasse-biofolien-aus-algen>, Zugriff am 20.01.2021

Bippes, M.; Brauer, T.; Brück, T.; Buchholz, R.; Cotta, F.; Friedl, T.; Griehl, C.; Griesbeck, C.; Heckenberger, U.; Kistenmacher, H. (2016): Mikroalgen-Biotechnologie. Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele. Frankfurt am Main, https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Algenbio_2016_ezl.pdf, Zugriff am 05.01.2021

Bischof, F. (2012): Biogas aus Algenbiomasse. Rationelle Energiewandlung und erneuerbare Energien. Programm zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften, Amberg, https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Professoren/Bischof/Biogas_aus_Algen_Bischof.pdf, Zugriff am 17.12.2020

Blage, J. (2017): Alleskönner. Sie sind glibberig, grün, riechen streng und zugleich der Rohstoff der Zukunft: Aus Algen lässt sich Biosprit gewinnen, Öko-Plastik erzeugen und eines Tages vielleicht Medikamente. Sogar essen kann man sie. *Süddeutsche Zeitung* Nr. 237, S. 38–39, <https://judithblage.de/perch/resources/alleskoenneralgen.pdf> (Zugriff am 20.01.2021)

Boussiba, S.; Vonshak, A.; Cohen, Z.; Avissar, Y.; Richmond, A. (1987): Lipid and bio-mass production by the halotolerant microalga *Nannochloropsis salina*. *Biomass* 12(1), pp. 37–47; [https://www.doi.org/10.1016/0144-4565\(87\)90006-0](https://www.doi.org/10.1016/0144-4565(87)90006-0)



Brauer, T. (2008): Wir züchten Mikroalgen, weil sie CO₂ "fressen" und jede Menge Energie haben. Hg. E.ON Hanse AG

Carstens, P. (2012): Biogas aus der Algenfabrik. Erneuerbare Energien. <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/3806-rtkl-erneuerbare-energien-biogas-aus-der-algenfabrik>, Zugriff am 06.10.2021

Cielejewski, H. (2013): Verfahren zur Aufbereitung von Gülle und Gärresten. www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2013/2013-04-25-biogastagung-04.pdf, Zugriff am 05.05.2021

DECHEMA e.V. (2012): Zahlen und Fakten zur Nutzung von Algen. Presse-Information. Frankfurt am Main, https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Presse/Hintergrundinformationen_Algen_Zahlen+und+Fakten+2012.doc, Zugriff am 13.10.2021

Dillschneider, R. (2014): Die Effizienz der Kultivierung von Mikroalgen zur Biodieselgewinnung - Prozessentwicklung auf der Grundlage von Energiebilanzierung, Simulation und Integration modellprädiktiver Regelungskonzepte. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000042024>, Zugriff am 13.10.2021

DLG (2019): Positivliste für Einzelfuttermittel. Berlin, 13. Auflage, <http://www.landwirtschaftskammern.de/pdf/futtermittel-positivliste.pdf>, Zugriff am 13.10.2021

EU 889 (2008): Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle. Verordnung (EG) Nr. 889/2008, Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.09.2008

FNR (2021): COASTAL Biogas. Projektseite der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. <https://www.fnr.de/internationales/europaeische-projekte/coastal-biogas>, Zugriff am 08.02.2021

Jung, F.; Krüger-Genge, A.; Waldeck, P.; Küpper, J.-H. (2019): Spirulina platensis, a super food? Journal of Cellular Biotechnology 5(1), pp. 43–54, <https://www.doi.org/10.3233/JCB-189012>

Lippky (2018): Evaluation von Herstellprozessen alternativer Kraftstoffe durch mikrobielle Photosynthese. Eine techno-ökonomische Betrachtung. Bielefeld, Universität Bielefeld, <https://pub.uni-bielefeld.de/record/2917375>, Zugriff am 13.10.2021

Lothholz, H.; Schmid-Staiger, U. (2018): Studie zu einer Algenbioraffinerie mit gleichzeitiger Schließung der Nährstoffkreisläufe-Marktpotenzial. Hg. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Baden-Württemberg, <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/72697>, Zugriff am 13.10.2021



- Mobin, S.; Alam, S. (2016): Some promising microalgal species for commercial applications: A review. 1st International Conference on Energy and Power, ICEP2016, 14-16 December 2016, RMIT University, Melbourne, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.177>
- Pfaffinger, C. (2017): Reaktionstechnische Untersuchungen zur Lipidherstellung mit *Nannochloropsis* sp. in verschiedenen Photobioreaktoren. Dissertation, Technische Universität München, <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1353699>, Zugriff am 17.12.2020
- Preugschat, W. (2014): Bald Algenzucht an Biogasanlagen? Beitrag von Werner Preugschat, In: Land & Forst-Online, Hg. Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, <https://www.landundforst.de/landwirtschaft/pflanze/bald-algenzucht-biogasanlagen-450887>, Zugriff am 06.01.2021
- Rath, T. (2020): Verfahrenstechnik und rechtliche Einordnung der Mikroalgenproduktion im gärtnerischen Betrieb. Hg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, <https://www.ktbl.de/shop/produktkatalog/26741>, Zugriff am 13.10.2021
- Roberts, K.P.; Heaven, S.; Banks, C.J. (2016): Comparative testing of energy yields from micro-algal biomass cultures processed via anaerobic digestion. *Renewable Energy* 87, pp. 744–753, <https://www.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.009>
- Rosello Sastre, R.; Posten, C. (2010): Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. *Chemie Ingenieur Technik* 82(11), S. 1925–1939; <https://www.doi.org/10.1002/cite.201000124>
- Schröder, T. (2013): Die Zukunft der Fische - die Fischerei in der Zukunft. *World ocean Review*, Hg. maribus g GmbH, Hamburg, https://oceanrep.geomar.de/22084/1/WOR2_gesamt.pdf, Zugriff am 12.10.2021
- Schulze, C. (2017): Mikroalgen als Quelle innovativer Wirk- und Wertstoffe. Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:9-opus-21291>, Zugriff am 13.10.2021
- Schwede, S. (2013): Mikroalgen als Substrat für Biogasanlagen - Potenzial in der Zukunft?. In: 22. Fachtagung des Biogasverbands, Hg. Fachverband Biogas e.V.
- Seböck, S. (2019): Meeresalgen aus der Biogasanlage. Die Produktion von Algen könnte ein neues Standbein für Biogasanlagen werden, die keine EEGFörderung mehr erhalten. Ein Forschungsprojekt soll das Verfahren näher beleuchten. *Top Agrar* 04/2019, www.topagrar.com/energie/aus-dem-heft/meeresalgen-aus-der-biogasanlage-11502618.html, Zugriff am 20.01.2021
- Skarka, J. (2015): Potenziale zur Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen in Europa unter besonderer Berücksichtigung der Flächen- und CO₂-Verfügbarkeit. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000046930>, Zugriff am 13.10.2021



Slade, R.; Bauen, A. (2013): Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. pp. 29–38, <https://www.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.019>

Sousa, C. (2013): Imaging genetics of seed performance. Dissertation, Wageningen University, <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/439061>, Zugriff am 06.01.2021

UMSICHT (2016): Verbundvorhaben: AUFWIND - Algenproduktion und Umwandlung in Flugzeugtreibstoffe: Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Demonstration. Teilvorhaben 10, Downstream-Processing (Analytik), Schlussbericht zum Vorhaben, Oberhausen, <https://doi.org/10.2314/GBV:870496352>

Verbraucherzentrale (2020): Oft zu viel Jod in Meeresalgen-Produkten. Hg. Verbraucherzentrale.de, Düsseldorf; <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/nahrungsergaenzungsmittel/oft-zu-viel-jod-in-meeresalgenprodukten-8540>, Zugriff am 06.04.2021

