

Forschungsbericht BWPLUS

**Studie zu einer Algenbioraffinerie mit gleichzeitiger  
Schließung der Nährstoffkreisläufe - Marktpotenzial**

von

Ulrike Schmid-Staiger, Hannes Lothholz

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Förderkennzeichen: BWBÖ 17011

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre  
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziel der Studie</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Literaturrecherche zu Vorkommen, Wirkung und Einsatz von Laminarin aus Algen im Pflanzenanbau und als Präbiotika in der Tierernährung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Vorkommen von Laminarin / $\beta$ -1,3-Glucan.....	5
2.2	Gewinnung von Laminarin durch Extraktion aus Pflanzen, Hefen, Algen .....	7
2.3	Wirkung von Laminarin aus Algen auf Pflanzen .....	9
2.4	Wirkung von Laminarin auf Tiere .....	10
<b>3</b>	<b>Rechtliche Rahmenbedingungen zum Einsatz von Laminarin im Pflanzenanbau und in der Tierernährung</b> .....	<b>12</b>
3.1	Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz im Pflanzenanbau .....	12
3.1.1	Pflanzenschutzmittel.....	12
3.1.2	Pflanzenstärkungsmittel .....	12
3.1.3	Düngemittel/Pflanzenhilfsmittel .....	13
3.1.4	Schlussfolgerung .....	13
3.2	Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz in der Tierernährung .....	14
3.2.1	Futtermittelzusatzstoffe .....	14
3.2.2	Futtermittel .....	14
3.2.3	Ergänzende Richtlinien für den Ökoanbau .....	15
<b>4</b>	<b>Marktrecherche zu den Produkten Laminarin, Fucoxanthin und Proteine aus Algen</b> .....	<b>16</b>
4.1	Vorkommen und Gehalte von Laminarin, Fucoxanthin und Proteinen in verschiedenen Algen .....	16
4.2	Valorisierung von Algenbiomasse – Prinzip und Ausführung am Beispiel von Laminarin, Fucoxanthin und Proteinen .....	19
4.3	Marktrecherche .....	23
4.3.1	Marktvolumen und Preise für die Produkte Laminarin, Fucoxanthin und Algenproteine .....	23
4.3.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Marktpotenzial von Laminarin im landwirtschaftlichen Pflanzenschutz .....	26
<b>5</b>	<b>Nutzungspotential von Flüssiggärrest aus Biogasanlagen für die Produktion von Mikroalgen</b> .....	<b>29</b>
5.1	Vorkommen und Zusammensetzung von Flüssiggärresten .....	29
5.2	Flüssiggärrest aus Biogasanlagen als Nährstoffquelle für die Algenproduktion .....	30
<b>6</b>	<b>Identifizierung von potentiellen Herstellern und Nutzern von Algenanlagen und Algenprodukten in Baden-Württemberg</b> .....	<b>32</b>
6.1	Hersteller von Algenanlagen .....	32
6.2	Nutzer von Algenprodukten .....	33
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>36</b>

# 1

## Einleitung und Ziel der Studie

Bereits im Konzept für eine baden-württembergische Forschungsstrategie „Bioökonomie,, wurde festgestellt, dass im Bereich Aquatische Biomasse die Algentechnologie eine großartige Möglichkeit bietet, im Sinne der Bioökonomie durch die Gestaltung eines integrierten Prozesses, der Bioraffinerie, ressourceneffiziente Gesamtprozesse durch Nährstoffrecycling, CO<sub>2</sub>-Bindung und wenig Wasserverbrauch Produkte für das hohe bis mittlere Preissegment herzustellen [1].

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Algen-Bioraffinerie die wirtschaftliche und umfängliche Nutzung der Mikroalgen und deren Produkte in Zukunft möglich sein können. Bei der Algen-Bioraffinerie handelt es sich um ein integratives Gesamtkonzept für die sequenzielle Gewinnung verschiedener Produkte aus Algenbiomasse, die durch maßgeschneiderte Produktion entsprechende Inhaltsstoffe mit hohem Gehalt enthält. Beispielsweise können so Nahrungsergänzungsmittel (hochwertige vegetarische Proteine, spezielle Fettsäuren, funktionelle Lebensmittel mit Zusatznutzen für die Gesundheit), Fischfutter und Zusätze für die Futtermittelindustrie, Kosmetika, Ersatz von Agrochemikalien durch verschiedene, sequenzielle Umwandlungsprozesse unter möglichst vollständiger Ausnutzung der gesamten Biomasse nacheinander gewonnen werden. Damit kann die Algenbiotechnologie / Algenbioraffinerie einen wichtigen Beitrag zu den fünf Handlungsfeldern beitragen, die 2010 in der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 definiert wurden: weltweite Ernährung sichern, Agrarproduktion nachhaltig gestalten, gesunde und sichere Lebensmittel produzieren, nachwachsende Rohstoffe industriell nutzen und Energieträger auf Basis von Biomasse ausbauen.

Zu all diesen Handlungsfeldern können Mikroalgen einen Beitrag leisten mit ihrer Vielfalt an Inhaltsstoffen, den bisher entwickelten Produktions- und Aufarbeitungsprozessen, auch unter Einbeziehung der Kreislaufführung von Nährstoffen. In Flüssiggärrest aus Biogasanlagen liegen die Hauptnährstoffe Stickstoff und Phosphat in gut verfügbarer Form für Mikroalgen vor. Das Verhältnis dieser Makronährstoffe hat einen großen Einfluss auf Wachstum und Produktbildung. Offen ist aber noch, ob Mikroalgen, die auf Flüssiggärrest kultiviert wurden, in welcher Form und Verarbeitung in den verschiedenen möglichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden dürfen. Dennoch sind Algenprodukte nur in begrenzten Mengen derzeit auf dem Markt etabliert. Ein Grund sind die derzeit noch hohen Investitions- und Produktionskosten in Photobioreaktoren und Hemmnisse im Bereich Zulassung. Beides erschwert den Marktzugang. Die Produktionskosten können durch eine gezielte Valorisierung der Algenbiomasse und Schließung von Nährstoffkreisläufen gemindert werden.

Kieselalgen sind einzellige Algen, die für 20-25% der globalen CO<sub>2</sub>-Fixierung via Photosynthese verantwortlich sind, und die eine Fülle an biotechnologisch nutzbaren Inhaltsstoffen besitzen, wie omega-3-Fettsäuren, Farbpigmente wie Fucoxanthin, Proteine (bis zu 50% Gehalt), sowie Laminarin als Speicherprodukt. Laminarin oder  $\beta$ -1,3-Glucan

kommt auch in der Zellwand von Hefen und Pilzen vor, weshalb das unspezifische Immunsystem von Pflanzen auf einen Kontakt mit Laminarin/ $\beta$ -1,3-Glucan reagiert. Durch die Aktivierung der pflanzeigenen Abwehrmechanismen kann eine anschließende Pilzinfektion verhindert werden [2]. Dies kann im Pflanzenbau als Ersatz für Pestizide wie beispielsweise Kupferpräparate eingesetzt werden, und damit die Ausbringung und Anreicherung dieses Schwermetalls in den Böden, insbesondere im Ökolandbau, reduziert werden [3,4]. Neben der Wirkung als Elicitor in Pflanzen besitzt Laminarin auch eine immunmodulierende Wirkung in Tieren und Menschen und kann somit in einigen Fällen zur Antibiotika-Substitution eingesetzt werden, insbesondere in der Tierernährung als Präbiotika [5]. Es ist davon auszugehen, dass dieses Einsatzgebiet in den kommenden Jahren stark an Bedeutung gewinnen wird.

Einer der Gründe für die geringe Nutzung von Algeninhaltsstoffen, bis auf wenige hochpreisige Produkte wie Astaxanthin, sind hohe Investitions- und Betriebskosten, sowie unzureichende Stabilität und Produktivität (output Biomasse pro Zeit) der Prozesse. Auch hier hat das Fraunhofer IGB bzw. CBP sowohl die maßgeschneiderte Produktion von Inhaltsstoffen als auch Langzeitstabilität von Prozessen, auch unter Freilandbedingungen, demonstriert, die richtungsweisend sind. Einzig die durchschnittliche Produktivität ist derzeit für eine wirtschaftliche Produktion noch zu niedrig. Die Ursachen und Verbesserungsstrategien werden aber am Fraunhofer IGB im Rahmen von Promotionsvorhaben intensiv bearbeitet. Europaweit kann die derzeit zur Verfügung stehende Anlagenkapazität nicht die Menge an Algenbiomasse erzeugen, die für eine Etablierung von verschiedenen Produkten nötig wären auf Märkten wie Futtermittel oder Lebensmittel. Hohe Produktionskosten erschweren den Marktzugang zudem. Ein Schritt hierzu ist die maximale Valorisierung von Algenprodukten, d.h. die Erzeugung und vollständige Verwertung von Algenbiomassen mit Inhaltsstoffen mit hoher Wertschöpfung, als auch die Verwertung der Restbiomasse.

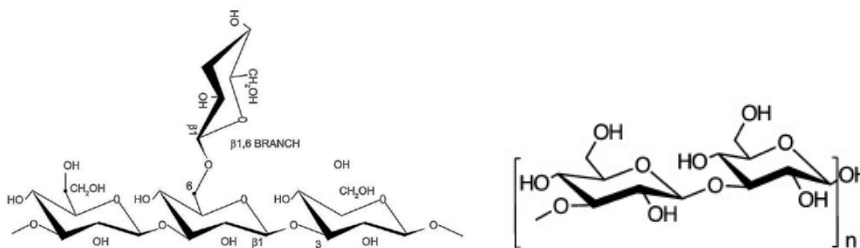
**Die Zielsetzung dieser Studie** ist, am Beispiel einer algenbasierten Bioraffinerie eine maximale Valorisierung der Algenbiomasse aufzuzeigen, bei gleichzeitiger Schließung von Nährstoffkreisläufen. In der Studie sollen die Möglichkeiten der Produktion von maßgeschneiderter Algenbiomasse unter Nutzung von Flüssiggärrest aus Biogasanlagen als Nährstoffquelle für Anwendungsgebiete zunächst im Agrarsektor evaluiert werden. Dafür sollen die rechtlichen Möglichkeiten und Voraussetzungen des Einsatzes der daraus gewonnenen Produkte in verschiedenen Marktsegmenten erarbeitet werden. Als Zielprodukt wurde Laminarin und dessen Einsatzpotential ausgewählt, ergänzt durch Nutzungswege für weitere Inhaltsstoffe für eine maximale Valorisierung der Algenbiomasse.

## 2 Literaturrecherche zu Vorkommen, Wirkung und Einsatz von Laminarin aus Algen im Pflanzenanbau und als Präbiotika in der Tierernährung

### 2.1 Vorkommen von Laminarin / $\beta$ -1,3-Glucan

Beta-Glucane kommen in einer Vielzahl von natürlichen Quellen wie Hefe- und Pilzzellwänden, Bakterien, Mikro- und Makroalgen, Gerste und Hafer vor [6].

Beta-Glucane sind Polysaccharide von D-Glucose-Monomeren, die über beta-glycosidische Bindungen verbunden sind. Die verschiedenen Arten von Beta-Glucanen sind durch unterschiedliche Molekülgerüste charakterisiert, außerdem durch verschiedene Verzweigungsgrade und unterschiedliches Molekulargewicht, wodurch ihre Löslichkeit und physiologischen Eigenschaften bewirkt werden. Dazu gehören die Laminarine die als niedermolekulare Kohlenstoff- und Energiespeicher aus (1-3)- $\beta$ -d-Glucopyranoseresten mit einigen 6-O-Verzweigungen in der Hauptkette und einigen  $\beta$ -(1-6)-Verknüpfungen bestehen (Abbildung 1a). Es gibt sowohl wasserlösliche als auch unlösliche Formen von Laminarin, die hauptsächlich vom Grad der Verzweigung abhängen.



**Abbildung 1:** Aufbau von a) Laminarin,  $\beta$ -1,3 Glucan mit 1,6-Verzweigungen enthalten in Makro- und Mikroalgen b) lineares  $\beta$ -1,3-Glucan ohne Verzweigungen wie beispielsweise aus *Euglena gracilis*.

Laminarin kommt in Makroalgen wie *Laminaria* und *Saccharina* und in geringerem Maße in *Ascophyllum*, *Fucus* und *Undaria* vor. Chrysolaminarin, wie Laminarin aus Mikroalgen auch genannt wird, kommt als verzweigtes Laminarin oder unverzweigtes  $\beta$ -1,3-Glucan als Kohlenstoff- und Energiespeicher in mehreren Algenklassen vor (Chrysophyceae, Euglenophyceae, Eustigmatophyceae, Haptophyceae (Prymnesiophyceae), Phaeophyceae und Xanthophyceae). Darunter eine Reihe von in der Aquakultur bereits eingesetzten Mikroalgen aus diesen Klassen wie *Chaetoceros gracilis*, *Isochrysis spec.* und *Skeletonema costatum*. Das Glucan entsteht schnell während der Photosynthese, wird aber während der Atmung im Dunkeln schnell auch wieder mobilisiert. In Diatomeen macht  $\beta$ -1,3-Glucan in der exponentiellen Wachstumsphase typischerweise 10-30% der organischen Trockenmasse aus, kann sich aber in der stationären Phase auf bis zu 80% anreichern [7]. Es gibt große Unterschiede im Gehalt zwischen den verschiedenen  $\beta$ -Glucan- bzw. Laminarin-Quellen (siehe Tabelle 1). Lineares  $\beta$ -1,3-Glucan aus der Algenklasse der *Euglenoide* (Abbildung 1b) wird auch Paramylon genannt und liegt als Partikel, ähnlich Stärkekörnern, als Speicherstoff in den *Euglena*-Zellen vor.

**Tabelle 1:** Vorkommen und Gehalt von  $\beta$ -1,3-Glucanen/Laminarin in verschiedenen Quellen.

Vorkommen	Gehalt (% der BTM)	Literatur
Haferschrot	3,2 - 5,3	[8]
Haferkleie	7,2	[9]
Gerste (Korn)	4,1	[10]
Hefe (Zellwand)	30	[11]
Hefe (Zellwand)	30-45	[12]
Speisepilze wie <i>Agaricus bisporus</i> , <i>Lentinus edodes</i> , <i>Pleurotus</i> <i>ostreatus</i>	8 - 26	[13]
<b>Makroalgen - Laminarin</b>		
<i>Saccharina latissima</i>	0 - 32	[14]
<i>Laminaria hyperborea</i>	0 - 33	[14]
<i>Laminaria digitata</i>	0 - 35 je nach Saison	[14]
<i>Undaria pinnatifida</i>	3	[14]
<i>Ascophyllum nodosum</i>	4,50	[14]
<b>Mikroalgen <math>\beta</math>-1,3-Glucan</b>		
<i>Euglena gracilis</i>	50-60	[15]
<i>Euglena gracilis</i> (natürliche Mutante)	90	[16]
<b>Mikroalgen - Laminarin</b>		
<i>Chaetoceros gracilis</i>	11 - 20	[17]
<i>Odontella aurita</i>	< 65	[17,18]
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 - 30	Eigene Ergebnisse Fraunhofer IGB

Beta-Glucan ist ein typischer Bestandteil von Pilzen und Hefen wie *Saccharomyces cerevisiae* und besteht aus  $\beta$ -(1 - 3) und (1 - 6) Verbindungen (Abbildung 1a). Andere Beta-Glucane, die aus Getreide gewonnen werden, sind jedoch Polysaccharide von Glucoseresten mit  $\beta$ -(1-3) und  $\beta$ -(1 -4) Verknüpfungen. Die Beta-Glucane in Gerste sind zu 27 % in den Wänden der Aleuronzellen und zu 73 % in den Zellwänden des Endosperms vorhanden [6], während sich die Beta-Glucane des Hafers in der Subaleuronschicht konzentrieren [7]. Die Brotgetreide Weizen (0,8 %) und Roggen (2,3 %) enthalten nur geringe Mengen Beta-Glucan. Eine der häufigsten Quellen von  $\beta$ -1,3-D-Glucanen für Nahrungsergänzungsmittel wird aus der Zellwand der Backhefe *Saccharomyces cerevisiae* gewonnen. Die aus *Saccharomyces cerevisiae* gewonnenen  $\beta$ -(1,3)-D-Glucane sind oft unlöslich.  $\beta$ -1,3- und  $\beta$ -1,4-Glucane werden auch aus Haferkleie sowie aus dem Korninneren von Gerste extrahiert.

Im Hinblick auf die breiten Anwendungsmöglichkeiten von Beta-Glucanen sollten neue biologische Quellen erforscht werden. Die Algenzucht ist viel einfacher, die Kosten sind niedriger und die Produktivität ist viel höher als bei der Pilzzucht. Viele Pilzarten können

nicht gezüchtet werden, sondern müssen in der Natur gesammelt werden. Unter diesem Gesichtspunkt könnten Mikroalgen interessante neue Quellen für Beta-Glucane sein. Beta-glycosidische Bindungen können nicht vom Menschen verstoffwechselt werden, da sie keine Enzyme zur Spaltung der  $\beta$ -glycosidischen Bindung besitzen. Deshalb zählen Beta-Glucane zur Kategorie der Ballaststoffe.

## 2.2 Gewinnung von Laminarin durch Extraktion aus Pflanzen, Hefen, Algen

Die am besten geeignete Extraktionsmethode hängt von der Herkunft und den Strukturen der Beta-Glucane ab. Dazu bestimmt der Anwendungsbereich den erforderlichen Aufreinigungsgrad und damit die einzusetzenden Methoden. Für die Anwendung von Beta-Glucanen in Lebensmitteln und Kosmetik ist ein hoher Aufreinigungsgrad erforderlich, für Futtermittel oder als Pflanzenstärkungsmittel genügt ein geringerer Aufkonzentrierungsgrad, der v.a. für die Stabilisierung bzw. Formulierung des Produktes erforderlich ist.

Laut Zhu et al. [6] ist die Heißwasserextraktion die gebräuchlichste Extraktionsmethode von Beta-Glucanen. Andere Extraktionsmethoden die ebenfalls in [6] beschrieben sind, umfassen die Alkaliextraktion, ultraschallunterstützte, mikrowellenunterstützte Extraktion, und die saure Extraktion. Einige der bestehenden Extraktionsmethoden haben Nachteile wie eine lange Extraktionszeit, hohe Prozesskosten und reduzierte Umweltverträglichkeit. Einige der neuen Extraktionsmethoden, wie die Hochdruckflüssigextraktion (Pressurized Liquid Extraction PLE) und die subkritische Wasserextraktion, sind nützlich bei der Bewältigung der damit verbundenen Extraktionsprobleme und der Steigerung der Ausbeuten. Die meisten der hier beschriebenen Methoden werden für den Einsatz von Beta-Glucanen in Lebensmitteln eingesetzt (Abbildung 2).

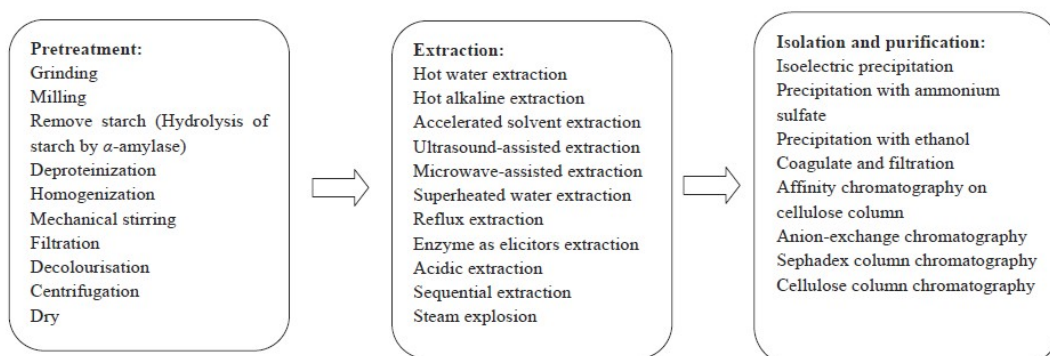
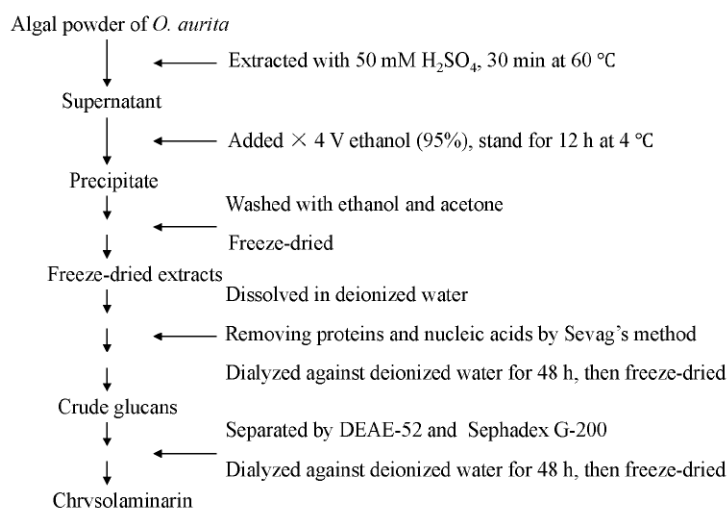


Fig. 2. Different steps that may be involved in the extraction and production of  $\beta$ -glucans in lab scale and pilot plant scale.

**Abbildung 2:** Verschiedene Schritte für die Gewinnung von  $\beta$ -Glucanen/Laminarin aus den verschiedenen Quellen im Labor- und Pilotmaßstab nach [6].

In der Regel handelt es sich dabei um Vermahlung/ Zellaufschluss, Fällung in saurem oder alkalischem Medium, Ultrafiltration und Dialyse [6]. Die meisten der untersuchten Methoden verwendeten heiße und leicht saure Bedingungen, um Beta-Glucan/Laminarin zu extrahieren, gefolgt von einer Trennung durch Fällung mit Ethanol. Häufig verwendete Säuren sind Salz- und Schwefelsäure in einer Konzentration von 0,1 M. Das Molekulargewicht von Laminarin ist niedriger als bei anderen Polysacchariden in Algen und kann durch Dialyse mit unterschiedlichen Molekulargewichts-Cutoff-Membranen abgetrennt werden [19].

Laminarin kann effizient unter Temperaturbedingungen von 50 bis 90 °C mit Wasser als Lösungsmittel extrahiert werden. Ein Beispiel dafür ist die Gewinnung von Laminarin wie sie von Xia et al. für die Mikroalge *Odontella aurita* beschrieben wurde [18], bestehend aus Zellaufschluss, saurer Extraktion, Ethanol-Fällung und anschließender Dialyse (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Extraktion von Chrysolaminarin aus *Odontella aurita* (nach [18])

Für die Gewinnung von löslichem, kurzkettigem Laminarin und dessen Einsatz als Pflanzenstärkungsmittel wird nur eine einfache Abtrennung der Wasserphase nach dem Zellaufschluss und Stabilisierung des darin enthaltenen Laminarins bis zur Verwendung benötigt. Die Restbiomasse kann dann im Rahmen einer Bioraffinerie und zur Valorisierung entsprechend ihrer weiteren Inhaltsstoffe aufbereitet werden (siehe Kapitel 4.2).

Die Extraktion von Beta-Glucan aus Getreide ist schwierig, da beta-Glucan ein nur Bestandteil definierter Zellschichten im Getreidekorn ist. Dies macht Getreide daher zu den teureren Beta-Glucanquellen.



## 2.3 Wirkung von Laminarin aus Algen auf Pflanzen

Laminarin ist ein Strukturanalogon der linearen  $\beta$ -1,3-Glucan-Oligosaccharide, die natürlich an den Zell-Zell-Erkennungsmechanismen in Landpflanzen-Pathogen-Interaktionen beteiligt sind, entweder exogen (infolge des Abbaus der Pilzzellwände) oder endogen (Callose-Fragmente) zum Wirt.

$\beta$ -(1,3)-Glucane sind ein Teil der Zellwand pathogener Pilze wie zum Beispiel *Botrytis cinerea* und *Plasmopara viticola*. Sie können von höheren Pflanzen erkannt werden, weshalb ein Kontakt mit  $\beta$ -(1,3)-Glucanen die Abwehrmechanismen in höheren Pflanzen induziert [20].

So wurde in verschiedenen höheren Pflanzen wie Weinreben und Tabakpflanzen im Anschluss an einen Laminarinkontakt eine Alkalisierung des extrazellulären Milieus beobachtet. Außerdem kommt es nach einem solchen Kontakt zu einem Calciumeinstrom in die Zelle, was häufig den Beginn eines intrazellulären Signalwegs darstellt. Im Zellinneren führt ein Laminarinkontakt neben der Freisetzung von reaktiven Sauerstoffspezies, einem sogenannten oxidativen Burst, auch zur Aktivierung zweier Mitogen-aktivierter Proteinkinasen. Darüber hinaus ist nach dem Kontakt die Chitinase- und  $\beta$ -(1,3)-Glucanase-Aktivität in der gesamten Pflanze erhöht und es werden verstärkt die Phytoalexine Resveratrol und  $\epsilon$ -Viniferin gebildet [2,21]. Einige Stunden nach dem Laminarinkontakt wurde bei Tabakpflanzen darüber hinaus eine stark erhöhte Phenylalanin-Ammoniak-Lyase (PAL), Kaffeesäure-O-methyltransferase und Lipoxygenase-Aktivität festgestellt. Außerdem wurde die Akkumulation von Salicylsäure beobachtet [21]. Diese Abwehrmechanismen beschränken sich dabei nicht auf eine einzelne Zelle oder ein einzelnes Blatt, sondern werden in der gesamten Pflanze ausgelöst. Dies resultiert im Anschluss in einer deutlich verringerten Anzahl an Pilzinfektionsereignissen bei behandelten Pflanzen. Da es sich bei den Abwehrmechanismen um unspezifische Abwehrmechanismen handelt, ist davon auszugehen, dass eine Behandlung mit Laminarin auch weiteren Pilzinfektionen vorbeugt. Bisher wurde eine solche Schutzwirkung gegenüber *Botrytis cinerea*, *Plasmopara viticola*, *Uncinula necator* und *Eutypa lata* nachgewiesen [2].

### **Wirksame Verbindungen**

Eine Vielzahl an verzweigten  $\beta$ -(1,3)-(1,6)-Glucan-Oligomeren beziehungsweise linearen  $\beta$ -(1,3)-Glucan-Oligomeren weisen die oben beschriebene Elicitorwirkung bei höheren Pflanzen auf. Die Wirksamkeit wird dabei von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel dem Verzweigungsgrad oder funktionelle Seitengruppen [22].

Einige Untersuchungen wurden durchgeführt um zu bestimmen welches das kleinste wirksamste Glucan-Oligomer ist. Dies ist Pflanzenspezies-abhängig. Beispielsweise ist bei Sojabohnen ein Laminarinmolekül mit 5 (1-6)-verknüpften Glucoseeinheiten und zwei (1-3)-verknüpften Seitenketten aktiv [20]. Dieses Molekül zeigt jedoch bei Tabakpflanzen keine Wirksamkeit. Das kleinste wirksame Molekül bei Tabak ist Laminarinpentose, ein lineares (1-3)-verknüpftes Glucose-Oligomer bestehend aus 5 Glucoseeinheiten [21]

### **Wirkung von Laminarin auf Weinreben**

Das  $\beta$ -1,3-Glucan Laminarin aus der Braunalge *Laminaria digitata* hat sich als effizienter Auslöser von Abwehrreaktionen in Weinrebenzellen und Pflanzen erwiesen und kann die Entwicklung von *Botrytis cinerea* (Grauschimmelfäule) und *Plasmopara viticola* (falscher Mehltau) bei infizierten Pflanzen kontrollieren [23]. Darüber hinaus ist Laminarin an der Induktion von Genen beteiligt, die für verschiedene pathogenesebedingte Proteine mit antimikrobiellen Eigenschaften codieren und als Biostimulator in Pflanzen wirken. Zu den Abwehrreaktionen, die Laminarin in den Weinrebenzellen hervorruft, gehören Calciumzufluss, Alkalisierung des extrazellulären Mediums, ein oxidativer Burst ( $H_2O_2$ -Produktion als Abwehr/Signal), Aktivierung von zwei mitogenaktivierten Proteinkinasen, Expression von 10 abwehrrelevanten Genen mit unterschiedlichen Kinetiken und Intensitäten, Erhöhung der Chitinase- und -1,3-Glucanase-Aktivitäten und die Produktion von zwei Phytoalexinen (Resveratrol und -Glucanase).

Die Zugabe von Laminarin führte nicht zum Zelltod. Bei der Anwendung auf Weinrebenpflanzen reduzierte Laminarin die Infektion durch *B. cinerea* und *P. viticola* um ca. 55 bzw. 75% [2].

### **Wirkung von Laminarin auf Apfel:**

Von der französischen Arbeitsgruppe Bernardon-Mery et al. wurde 2013 die Wirkung von Laminarin auf Apfelschorf untersucht [24]. Laminarin ist wirksam gegen Apfelschorf. Dabei werden ähnliche Verteidigungsmechanismen aktiviert, wie bei Weinreben.

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass Laminarin Äpfel schützt vor:

- dem Pilz *Venturia. inaequalis*, verantwortlich für den Apfelschorf, und reduzierte die Krankheit um bis zu 60% auf den Blättern und Früchten.
- dem Bakterium *Erwinia amylovora*, verantwortlich für den Feuerbrand bei Äpfeln und Birnen, und reduziert die Krankheitssymptome um 50 bis 60%

In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass Laminarin in Situationen mit niedrigem bis mittlerem Infektionsdruck den Schutz ebenso effektiv sichert wie ein Kontaktfungizid. Laminarin schützte in allen Tests auf Blättern und Früchten mit einem Niveau, das einem "all-fungicide"-Programm (Dithianon oder Captan) entspricht, indem es 8 bis 11 Anwendungen von Fungiziden ersetzte. Das gezielte Laminarin-/Fungizidprogramm schützte somit Blätter und Früchte vor Schorf im Plantagenbereich und bei der Lagerung auf einem Niveau, das einem Standard-Fungizidprogramm ähnelt.

Dabei ist es ungiftig für den Anwender, den Verbraucher und die Umwelt. Darüber hinaus wurde keine Phytotoxizität beobachtet.

## 2.4 Wirkung von Laminarin auf Tiere

Da Beta-1,3/1,6-Glucane natürlich vorkommende Polysaccharide in der Zellwand von Pilzen und Hefen sind, hat im Laufe der Evolution das Immunsystem gelernt, seine molekulare Struktur als zuverlässigen Auslöser zu erkennen. In gereinigter Form fungieren Beta-1,3/1,6-Glucane als Signal, das das Immunsystem alarmiert, es darauf vorbereitet,

schnell und adäquat auf Infektionen zu reagieren und mehr Widerstand gegen jeden infektiösen Organismus zu leisten.

Versuche dazu wurden mit Nutztieren wie Schweinen und Hühnern durchgeführt, welchen Laminarin ins Futter beigemischt wurde. Dabei wurde festgestellt, dass die Fütterung mit Laminarin zu einer Verbesserung des Wachstums und zu einer besseren Futtermittelverwertung führt [25-30]. Dieser Effekt wurde bereits bei geringen Mengen (0,5%) Laminaringehalt im Futter festgestellt [25]. Außerdem konnte kein schädlicher Effekt der Laminarinfütterung auf Leber oder Niere festgestellt werden [25]. Im Gegenteil die Laminarinfütterung führte zu einer Verbesserung der Gesundheit der Verdauungsorgane der Tiere [27-29,31]. Bei der Laminarin-Fütterung von Jungtieren oder deren säugenden Muttertieren, wirkt sich Laminarin positiv auf deren Architektur des Darmes der Jungtiere aus [27,29]. Darüberhinaus wurde festgestellt, dass sich im Darm von mit Laminarin gefütterten Tiere weniger *Enterobakterien*, *Bifidobakterien*, *Lactobacillen* und *E. coli* befinden [26,28,31,32]. Dies deckt sich mit der Erkenntnis, dass oral aufgenommenes Laminarin bei Fischen die Aktivität des Abwehrsystems im Darm erhöht, insbesondere der Abwehrmechanismen gegen (pathogene) Mikroorganismen. So ist zum Beispiel nach Laminarinaufnahme die Lysozymaktivität (angreift die Zellwände grampositiver Bakterien) erhöht. Ebenso ist die Superoxid-Dismutase (SOD) und Katalase (CAT)-Aktivität erhöht, diese entschärfen ROS im Körper und erhöhen die nicht-spezifische Immunität der Fische [25].

Dieser verstärkende Effekt auf das Immunsystem kann die Ausbreitung von Krankheiten in Tierherden bremsen. So senkt eine Fütterung mit Laminarin die Anzahl der Salmonellen im Kot infizierter Schweine, was den Infektionsdruck innerhalb der Herde und somit die Anzahl von Neuinfektionen senkt [30]. Es wurden bereits erfolgreich Versuche durchgeführt, durch den Einsatz von Laminarin die Antibiotikagabe in der Massentierhaltung zu reduzieren [5].

Das bereits kommerziell erhältliche Produkt MacroGard® aus der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* wird bereits erfolgreich sowohl in der Aquakultur von Lachs und Forelle eingesetzt, als auch bei Schweinen, Hühnern und Haustieren (<https://www.orffa.com/products/macrogard/>).

Aber nicht nur in der Tierzucht kann Laminarin eingesetzt werden, auch in der Krebstherapie wurde der Einsatz von Laminarin getestet. So kann der Einsatz von Laminarin der Metastasenbildung vorbeugen [33]. Außerdem induziert Laminarin die Apoptose von LOVO Darmkrebszellen [34].

### **3 Rechtliche Rahmenbedingungen zum Einsatz von Laminarin im Pflanzenanbau und in der Tierernährung**

Um Laminarin im Pflanzenanbau und in der Tierernährung einzusetzen müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen beachtet werden. Hier besteht insbesondere unter den Wissenschaftlern im Bereich Algenforschung und Anwendern Informationsdefizite, die deshalb in dieser Studie dargestellt werden sollen.

#### **3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz im Pflanzenanbau**

Die Vorschriften für den Einsatz von Laminarin im Pflanzenanbau sind abhängig vom gewünschten Anwendungsziel und der Produktform. Grundsätzlich können vier Anwendungsfelder mit jeweils eigenen, rechtlichen Rahmenbedingungen unterschieden werden.

##### **3.1.1 Pflanzenschutzmittel:**

Pflanzenschutzmittel sind unter anderem Stoffe, deren Hauptzweck der Schutz von Pflanzen vor Schadorganismen bzw. die Vorbeugung von Schadorganismeneinwirkung darstellt. Des Weiteren werden alle Stoffe mit Ausnahme von Nährstoffen, welche die Lebensprozesse von Pflanzen beeinflussen, als Pflanzenschutzmittel eingestuft. Alle Pflanzenschutzmittel sind zulassungspflichtig. Die jeweiligen Wirkstoffe müssen in einem mehrstufigen Prozess von der EFSA (European Food Safety Authority) bewertet und vom Europäischen Parlament genehmigt werden. Dabei werden die jeweiligen Stoffe unter anderem umfassend auf deren Verträglichkeit für Mensch und Umwelt geprüft. Ein der Zulassungsverordnung entsprechendes Dossier mit allen notwendigen Studien/Beweisen muss dafür vom Antragsteller zu Beginn des Zulassungsverfahrens bereitgestellt werden. Nach der EU-Zulassung des Wirkstoffes müssen die fertigen Pflanzenschutzprodukte des Weiteren auf nationaler Ebene durch die einzelnen Mitgliedsstaaten genehmigt werden [35]. In Deutschland wird dieses Zulassungsverfahren durch das BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) geleitet.

Alle laminarinhaltigen Produkte, deren Hauptanwendungsgebiet die gezielte Abwehr von Schadorganismen (wie z.B. Pilzen) durch die Erhöhung bzw. Aktivierung der pflanzen-eigenen Resistenzen ist, zählen als Pflanzenschutzmittel und sind dementsprechend zulassungspflichtig. Aufgrund bereits existierender Pflanzenschutzprodukte besitzt Laminarin seit 2005 eine EU-Zulassung als Pflanzenschutz-Wirkstoff [36]. Eine für die Verwendung in Deutschland notwendige BVL-Zulassung besteht jedoch nicht und muss für alle eventuellen Produkte separat beantragt werden.

##### **3.1.2 Pflanzenstärkungsmittel**

Als Pflanzenstärkungsmittel werden alle Stoffe und Stoffgemische bezeichnet, welche nicht als Pflanzenschutzmittel gelten und deren Hauptzweck die allgemeine

Gesunderhaltung von Pflanzen (abseits der Nährstoffzufuhr) oder der Schutz vor nicht-parasitären Beeinträchtigungen ist. Pflanzenstärkungsmittel benötigen keine gesonderte EU-Zulassung, müssen jedoch vom BVL genehmigt werden [37].

Alle laminarinhaltigen Produkte, welche nicht direkt zur Resistenzsteigerung und Schädlingsabwehr verwendet werden, sondern lediglich der allgemeinen Verbesserung von Wachstum und Qualität der Pflanze dienen, können daher als Pflanzenstärkungsmittel bezeichnet werden.

### **3.1.3 Düngemittel/Pflanzenhilfsmittel**

Als Düngemittel gelten alle Stoffe, deren Hauptziele die Verbesserung des Pflanzenwachstums, der Bodenqualität oder des Ertrages von Pflanzen durch Nährstoffzufuhr sind. Pflanzenhilfsmittel sind Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt, deren Hauptzweck eine biologische oder chemische Wirkung auf Pflanzen ist, welche einen pflanzenbaulichen, produktionstechnischen oder anwendungstechnischen Nutzen erzielt [38]. Sowohl Düngemittel als auch Pflanzenhilfsmittel benötigen keine gesonderte Zulassung. Das Inverkehrbringen von neuen Düngemitteln und Pflanzenhilfsmitteln unterliegt jedoch den Anforderungen der Düngemittelverordnung [39].

Alle Laminarin enthaltenden Produkte, die aufgrund ihrer Zusammensetzung vorrangig der Nährstoffversorgung von Pflanzen dienen, können als Düngemittel klassifiziert und ausgebracht werden.

### **3.1.4 Schlussfolgerung**

Aus diesen rechtlichen Rahmenbedingungen zum Einsatz von laminarinhaltigen Mikroalgen als Pflanzenschutzmittel, Pflanzenstärkungsmittel oder Pflanzenhilfsmittel ergibt sich folgendes:

- (1) Laminarinhaltige Mikroalgen oder laminarinhaltige Extrakte als Pflanzenschutzmittel benötigen eine Zulassung mit Nachweis der Wirkung und insbesondere dem Nachweis der Verträglichkeit für Mensch und Umwelt. Dieses Zulassungsverfahren ist aufwändig und mit hohen Kosten verbunden.
- (2) Als Pflanzenstärkungsmittel dürfen laminarinhaltige Mikroalgenextrakte/-produkte eingesetzt werden, aber spezifische Aktivitäten gegen Schadorganismen dürfen nicht ausgelobt werden.
- (3) Laminarinhaltige Mikroalgen könnten auch als Pflanzenhilfsmittel in Verkehr gebracht werden, da die Extrakte in der eingesetzten Aufwandmenge ohne wesentlichen Nährstoffgehalt sind und einen pflanzenbaulichen, produktionstechnischen oder anwendungstechnischen Nutzen erzielen sollen. Sie unterliegen aber der Düngemittelverordnung.

## 3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz in der Tierernährung

Ähnlich wie beim Pflanzenbau, hängen die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Laminarin in der Tierernährung von der gewählten Produktklasse bzw. vom gewünschten Anwendungsfeld ab. Generell kann zwischen Futtermittelzusatzstoffen und vollwertigen Futtermitteln unterschieden werden.

### 3.2.1 Futtermittelzusatzstoffe

Futtermittelzusatzstoffe sind Wirkstoffe bzw. Wirkstoffmischungen, welche bewusst Futtermitteln oder Wasser zugesetzt werden, um bestimmte positive Effekte (wie z.B. Verbesserung der Tiergesundheit, des Wachstums, der Tierproduktqualität etc.) bei der Tierhaltung zu bewirken. Das Inverkehrbringen, der Vertrieb und die Verwendung von Futtermittelzusatzstoffen sind zulassungspflichtig und auf europäischer Ebene geregelt. Futtermittelzusatzstoffe werden dabei in verschiedene Kategorien eingeteilt und müssen erwiesenermaßen eine oder mehrere positive Wirkungen auf die Tiere oder deren Produkte besitzen. Darüber hinaus dürfen sie keine schädlichen Effekte auf Mensch, Tier und Umwelt ausüben. Eine eindeutige Kennzeichnung der Zusatzstoffe und der damit erzeugten Produkte ist ebenfalls verpflichtend, um Irreführungen zu vermeiden. Da jedwede Verwendung zulassungspflichtig ist, muss auch für Forschungszwecke eine eingeschränkte Zulassung beantragt werden. Die europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) bildet die zuständige Institution für Zulassung und Prüfung von Futtermittelzusatzstoffen [40].

Laminarin aus Makro- oder Mikroalgen wird aktuell noch nicht auf der Liste der erlaubten Futtermittelzusatzstoffe geführt. Daher müssen alle Laminarin enthaltenden Produkte, welche als Futtermittelzusatzstoffe eingesetzt werden sollen, zuvorderst das Zulassungsverfahren durchlaufen [41].

### 3.2.2 Futtermittel

Als Futtermittel gelten gemeinhin alle Produkte, welche zur oralen Tierversorgung bestimmt sind. Futtermittel sind selbst nicht zulassungspflichtig, unterliegen jedoch auf europäischer Ebene den Anforderungen der EG-Futtermittel-Hygieneverordnung (VO 183/2005) [42] und auf deutscher Ebene der Futtermittelverordnung [43] und dem Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB) [44]. Dabei stehen vor allem die futtermittelproduzierenden und –herstellenden Betriebe im Mittelpunkt. Diese sind registrierungspflichtig und übernehmen die alleinige Verantwortung für die Einhaltung der vorgeschriebenen Bedingungen für Futtermittel und deren Produktion (wie z.B. Nährstoffvorgaben, erlaubte Ressourcen, Zusatzstoffe etc.). Auf nationaler Ebene sorgt ein umfassendes Kontroll- und Prüfsystem durch verschiedene Institutionen der Bundesländer und dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) für die Einhaltung dieser Bedingungen.

Um Laminarin enthaltende Produkte als Futtermittel einsetzen zu können, muss deren Zusammensetzung gesetzeskonform auf die jeweiligen Tiergruppen abgestimmt, deren Produktion den Hygienevorschriften entsprechend erfolgen und alle beteiligten Firmen registriert werden.

### **3.2.3 Ergänzende Richtlinien für den Ökoanbau**

Die Öko-/Biozertifizierung wird in Europa staatlich von der EG-Öko-Basisverordnung (EG) Nr. 834/2007 geregelt. Alle Produkte, welche gemeinhin als Bio- oder Ökoprodukte vermarktet und vertrieben werden, unterliegen den Anforderungen dieser Verordnung. Die Einhaltung der Verordnung wird auf nationaler Ebene durch zugelassene Behörden forciert und durch jährliche Inspektionen der Produktionsbetriebe überprüft. Bei der Zertifizierung von laminarinhaltigen Produkten muss generell unterschieden werden, ob die Produkte lediglich als Hilfsmittel zur Erzeugung von bio- bzw- ökozertifizierten Endprodukten genutzt werden, oder ob die laminarinhaltigen Produkte selbst eine Ökozertifizierung tragen sollen [45].

Wenn laminarinhaltige Produkte selbst zertifiziert werden sollen, so müssen alle allgemeinen Bedingungen der Basisverordnung hinreichend erfüllt werden. Im Gegensatz zur biotechnologischen Produktion mit Hefen oder der Zucht und Verarbeitung von Makroalgen im Freiwasser, gibt es keine gesonderten Regelungen für die Kultivierung von Mikroalgen in Bioreaktoren. Generell gelten jedoch Grundsätze wie das Verbot von gentechnisch veränderten Organismen, die Beschränkung von chemischen, synthetischen oder externen Produktionsmitteln, die geeignete Handhabung von biologischen Prozessen, sowie der Miteinbezug von lokalen Gegebenheiten und Bedingungen in die Produktionskette. Die Registrierung des herstellenden Betriebes bei den lokal verantwortlichen Kontrollbehörden ist ebenfalls notwendig [45,46].

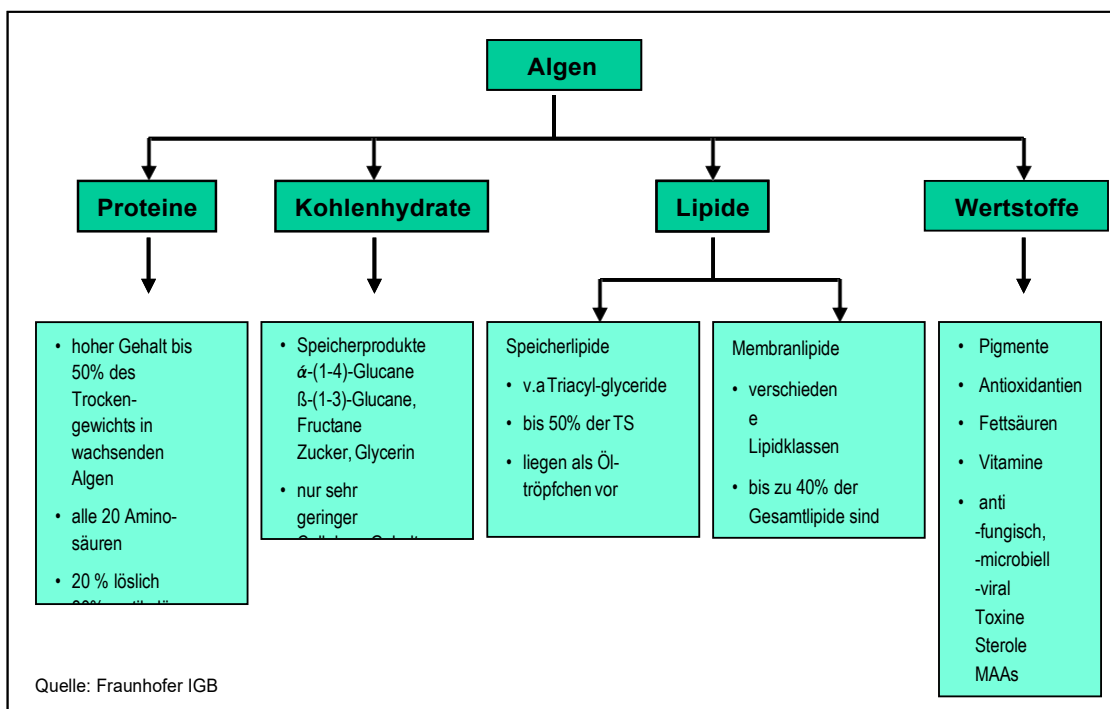
Wenn laminarinhaltige Produkte aus der Mikroalgenkultivierung als Hilfsprodukt in biozertifizierten Betrieben eingesetzt werden sollen, ist eine eigene Ökozertifizierung nicht unbedingt notwendig. So ist es für biozertifizierte Betriebe möglich, Ausnahmen von bestimmten Produktionsvorschriften (z.B. die Verpflichtung nur ökozertifizierte Rohstoffe und Hilfsmittel zu verwenden) zu beantragen, wenn keine sinnvollen biologisch/ökologischen Alternativen zur Verfügung stehen oder die Produktion anderweitig nicht möglich ist. Für die nicht biologisch/ökologisch erzeugten Produktionsmittel muss dafür eine Sondergenehmigung bei den jeweils verantwortlichen Behörden beantragt werden. So können beispielsweise laminarinhaltige Pflanzenstärkungsmittel aus konventioneller Algenkultivierung für den Pflanzenschutz in der ökologischen Landwirtschaft verwendet werden [46].

## 4 Marktrecherche zu den Produkten Laminarin, Fucoxanthin und Proteine aus Algen

Für die Marktrecherche wird zunächst das Vorkommen und Gehalt der Algenprodukte Laminarin, Fucoxanthin und Proteinen betrachtet. Davon ausgehend soll am Beispiel dieser Kombination von Inhaltsstoffen wie sie beispielsweise in den Kieselalgen *Phaeodactylum tricornutum* oder aus der Klasse der Eustigmatophyceae stammende Art *Isochrysis spec* vorkommt die potentielle Valorisierung von Algenbiomasse in einem Bioraffineriekonzept dargestellt werden. Für diese Produkte wurde anschließend das derzeitige Marktvolumen und Preisrecherchiert um die Marktfähigkeit dieser Produkte aufzuzeigen.

### 4.1 Vorkommen und Gehalte von Laminarin, Fucoxanthin und Proteinen in verschiedenen Algen

Derzeit wird die Vielfalt der verschiedenen Algenarten auf mehrere 100 000 Arten geschätzt [47]. Diese große Menge an Arten induziert eine große Vielfalt an biochemischer Zusammensetzung und möglichen Produkten, die aus einem Mikroalgenrohstoff gewonnen werden können (Abbildung 4). Es gibt keinen alternativen Rohstoff, der das gleiche Produktspektrum produzieren kann, obwohl es alternative Rohstoffe für die verschiedenen Produkte gibt.



**Abbildung 4:** Hauptbestandteile von Mikroalgen [48].



Das Vorkommen und Gehalte von **Laminarin** in Mikro- und Makroalgen ist bereits in Kapitel 2.1 beschrieben worden.

Alle Mikroalgen enthalten einen hohen **Proteinanteil**, in eukaryotischen Algen bis zu 50% der Biotrockenmasse, in prokaryotischen Cyanobakterien bis zu 70% der Biotrockenmasse. In den Algenzellen kommen diese Proteine in löslicher Form (20% der Gesamtproteine) und partikulärer Form vor, letztere zumeist in den Chloroplasten als Bestandteil des Photosyntheseapparates. Dies hat Auswirkungen auf die Aufarbeitung bzw. Gewinnung dieser Proteinfractionen, als auch deren mögliche Anwendung in Lebens- und Futtermittel.

Das Aminosäureprofil verschiedener Algenspezies ist in Tabelle 2 zusammengefasst und Sojaprotein und Ei-Albumin gegenübergestellt. Die Zusammensetzung der meisten Algenproteine ist bei den essentiellen Aminosäuren besser als Sojaprotein, aber die von der FAO empfohlene Aminosäuregehalte werden nicht vollständig erreicht, insbesondere bei den Aminosäuren Methionin und Phenylalanin. Insgesamt haben Algenproteine eine hohe Futterqualität, beim Einsatz in Lebensmitteln entscheiden oft andere Proteineigenschaften wie pH-Stabilität, Löslichkeit, Emulgiereigenschaften über den Einsatz in Lebensmitteln. Aus dem möglichen Einsatzgebiet der Proteine ergibt sich auch der Preis (siehe auch Tabelle 3).

**Fucoxanthin** ist ein orangefarbenes Carotinoid, das hauptsächlich in braun gefärbten Makro- und Mikroalgen vorkommt [49]. Es trägt mehr als 10% zur Gesamtmenge der in der Natur produzierten Carotinoide bei. Fucoxanthin ist ein Carotinoid, das mehrere positive Effekte auf die menschliche Gesundheit ausübt, einschließlich Antioxidationsmittel, Anti-Krebs-, Anti-Diabetis- und Adipositasaktivität. Fucoxanthin ist das am häufigsten vorkommende Carotinoid in marinen Algenstämmen aus der Division der Chromophyta wie beispielsweise die Kieselalgen *Phaeodactylum tricornutum*, *Cylindrotheca fusiformis*, *Odontella aurita* und *Chaetoceros*-Arten, aber auch in bekannten Arten wie *Isochrysis spec.* kommt es vor [50]. Die Herstellung, Extraktion und Bioaktivität von Fucoxanthin aus Mikroalgen wurde im Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg im Verbundprojekt Mikroalgen durch die Universität Stuttgart Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie bearbeitet, gewonnene Extrakte durch die Arbeitsgruppen Bischoff (Universität Hohenheim) und Briviba (Max-Rubner-Institut, Karlsruhe) auf Bioverfügbarkeit, Toxizität, antioxidative und immunmodulatorische Wirkung hin untersucht [51].

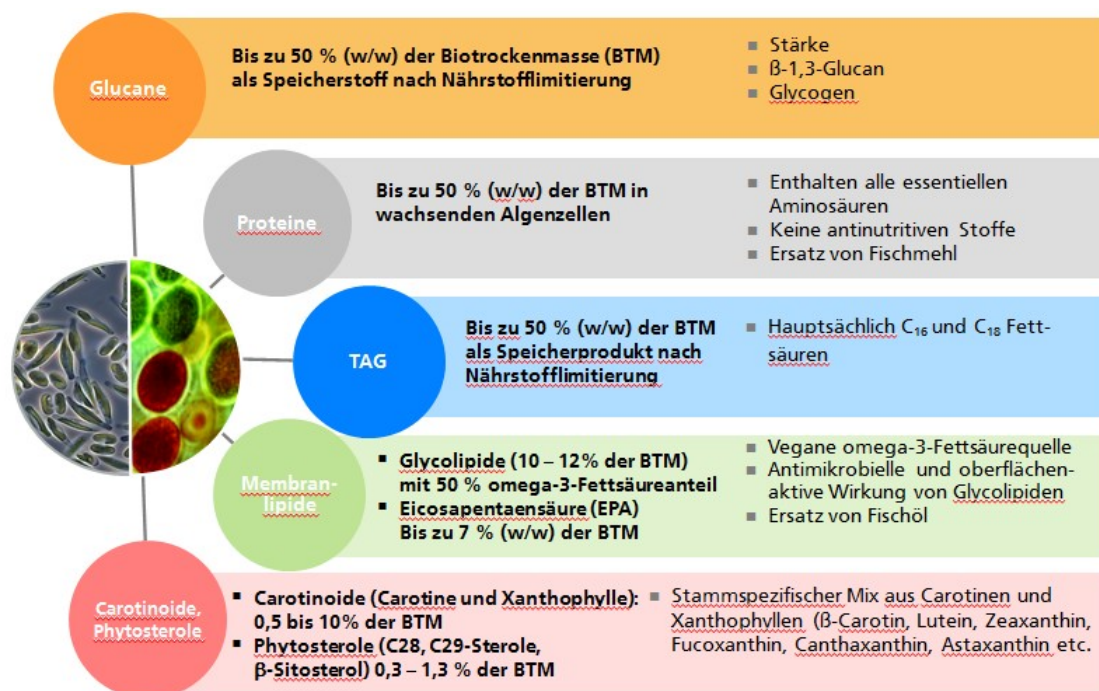
Diese Produkte sind die Basis für die im folgenden Kapitel beschriebene Valorisierung von Algenprodukten durch einen Bioraffinerieansatz.

**Tabelle 2:** Aminosäureprofil (% der Gesamtaminosäuren) verschiedener Proteinquellen.

	<i>Scenedesmus almeriensis</i> enzym. Hydrolysat [52]	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> AERTOs (Report WP2 2016)	<i>Chlorella vulgaris</i> [53]	Nannochloropsis gaditana [54]	<i>Spirulina platensis</i> % gesamt[55]	<i>Chlorella vulgaris</i> [55]	Ei-Albumin [55]	Soja-Protein [55]	WHO/FAO Empfehlung
	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt	% gesamt
Ala	1,9	7,1	10,7	6,7	9,5	7,9		5,0	
Arg	5,6	5,7	7,4	7,4	7,3	6,4	6,2	7,4	
Asn	<0,16								
Asp	1,4	11,4	8,6	10,3	11,8	9,0	11,0	1,3	
Cys		1,1	1,3	0,8	0,9	1,4	2,3	1,9	
Gln	16,9								
Glu	7,2	13,5	10,3	11,7	10,3	11,6	12,6	19,0	
Gly	10,9	5,3	7,0	5,3	5,7	5,8	4,2	4,5	
His	7,0	1,5	1,6	0,8	2,2	2,0	2,4	2,6	
Ile	4,5	5,2	3,4	5,0	6,7	3,8	6,6	5,3	4,0
Leu	2,2	8,5	8,2	9,4	9,8	8,8	8,8	7,7	7,0
Lys	5,5	5,8	5,4	7,0	4,8	8,4	5,3	6,4	5,5
Met	1,1	3,0	2,6	2,5	2,5	2,2	3,2	1,3	3,5
Phe	2,5	5,7	6,0	5,5	5,3	5,0	5,8	5,0	6,0
Pro	5,8	3,9	5,0	8,1	4,2	4,8	4,2	5,3	
Ser	16,3	7,4	4,4	4,3	5,1	4,1	6,9	5,8	
Thr	3,1		5,5	4,8	6,2	4,8	5,0	4,0	
Trp	<0,16		0,2	0,1	0,3	2,1	1,7	1,4	1,0
Tyr	3,4	3,4	4,4	4,1	5,3	3,4	4,2	3,7	
Val	4,7	6,5	6,7	6,2	7,1	5,5	7,2	5,3	5,0
SUMME	100,03	94,94	98,7	100	105	97	97,6	92,9	32

## 4.2 Valorisierung von Algenbiomasse – Prinzip und Ausführung am Beispiel von Laminarin, Fucoxanthin und Proteinen

Grundgedanke von Bioaffineriekonzepten ist die vollständige Verwertung von Biomasse durch Fraktionierung und Gewinnung verschiedener Produkte. Mikroalgen haben ein sehr vielfältiges Produktspektrum, das von Massenprodukten wie Lipiden (Triglyceride) oder Glucane (Stärke,  $\beta$ -1,3-Glucane oder Glycogen) bis hin zu Feinchemikalien wie Carotinoiden und mehrfach ungesättigte Fettsäuren reicht (Abbildung 5). Während in den letzten 10 Jahren häufig Biokraftstoffe aus Algen im Fokus der Forschung standen, wird heute ein Bioaffinerieansatz mit Kaskadennutzung angestrebt, in dem möglichst die vollständige Algenbiomasse zu Wertprodukten umgesetzt wird. Im Fokus stehen Produkte, die zu einer möglichst hohen Wertschöpfung der Gesamtbiomasse führen, wie zum Beispiel Pigmente ( $\beta$ -Carotin, Astaxanthin, Fucoxanthin, Lutein etc.) und Omega-3-Fettsäuren. Aber auch Glucane wie  $\beta$ -1,3-Glucane bzw. Laminarin. Kennzeichnend für Mikroalgenbiomasse ist ein hoher Proteingehalt mit bis zu 60% der Trockenmasse, das Fehlen von Lignin und ein geringer Cellulose- und Nukleinsäuregehalt. Deshalb eignet sich die Mikroalgenbiomasse sehr gut als neue Proteinquelle, hier aber konkurrieren Algen mit anderen pflanzlichen Proteinquellen, allen voran Sojaprotein. Anwendungsgebiete wären v.a. als Futtermittel, aber auch im Lebensmittelbereich als vegane Proteinquelle mit verbessertem Aminosäureprofil im Vergleich zu Soja.



**Abbildung 5:** Inhaltsstoffe von Mikroalgen für die Anwendung im Lebensmittel- und Futtermittelbereich.

Mikroalgenbiomasse des Stammes *Phaeodactylum tricornutum* zeichnet sich durch einen hohen Gehalt an Eicosapentaensäure (EPA) aus. Neben dieser mehrfach ungesättigten Fettsäure (PUFA) enthält *Phaeodactylum tricornutum* eine große Menge des Carotinoids oder Xanthophylls Fucoxanthin. Eine relativ geringe Menge an  $\beta$ -Carotin kann ebenfalls gewonnen werden. Zusätzlich kann dieser Stamm bis zu 30 % Beta-Glucan oder Laminarin als Speicherprodukt nach Stickstofflimitierung und gleichzeitig sehr hohen Lichtintensitäten akkumulieren.

Am Beispiel von *Phaeodactylum tricornutum* Biomasse, die je nach Kultivierungsart unterschiedliche Inhaltstoffe enthält, wurde die potentielle Wertschöpfung bei Nutzung aller Inhaltstoffe berechnet. Die der Berechnung zugrundeliegenden Preise wurden selbst erhoben, oder im AERTO's Bioökonomie-Projekt [56] von Projektpartnern in einer Marktstudie erhoben. Diese Daten sind in Tabelle 3 dargestellt.

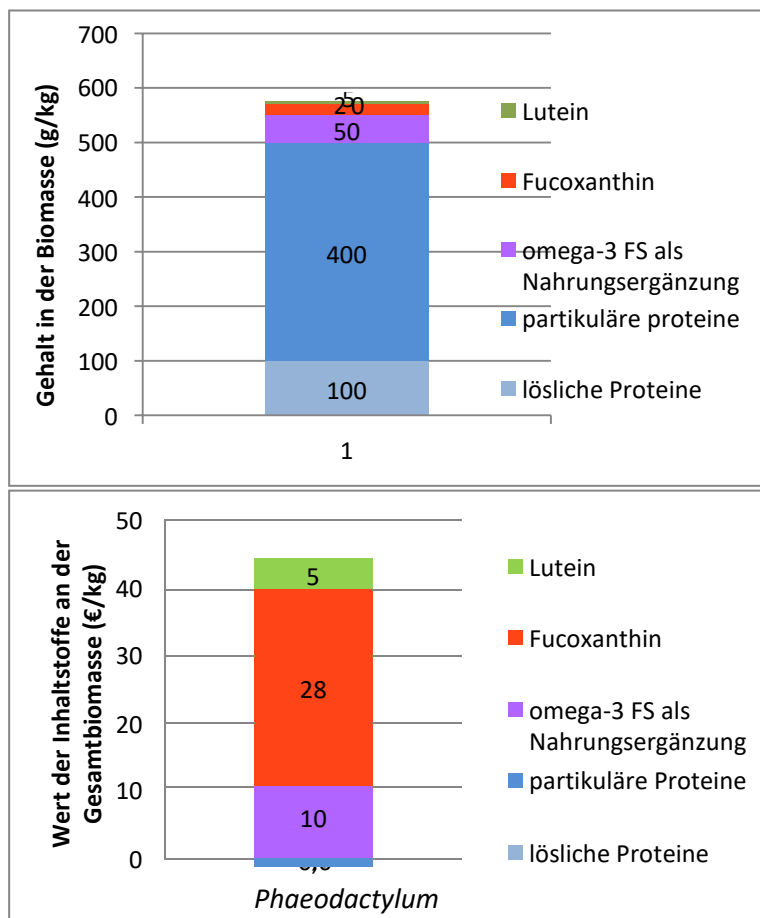
**Tabelle 3:** Spannbreite von Marktpreisen für Algenbiomassen und Inhaltstoffe, ausgewählter Preis für die Kalkulation der potentiellen Wertschöpfung und Informationsquelle.

Algenprodukte	Marktpreis [EUR/kg]	Preis verwendet für Kalkulation der Wertschöpfung [EUR/kg]	Informationsquelle
<i>Chlorella vulgaris</i> proteinreiches Mehl (60% Protein, heterotroph)	9,80 - 15,00		von Roquette /F; Info DIL/D und Universität Hohenheim
Lösliche Proteine (aus Algen)	6	6	Wijffels et al. 2010 [57]
Partikuläre Proteine	1,5	1,50	Wijffels et al. 2010 [57]
Proteine für Lebensmittel	5 - 10	5	Recherche AERTO's Team [56]
Proteine für Futtermittel	0,50 - 2,00	1,50	Recherche AERTO's Team [56]
Fischöl (3,5% EPA + 5,5% DHA)	2,5 - 3,0		<a href="https://www.undercurrentnews.com/2014/10/16/fish-oil-availability-not-price-will-be-the-problem/">https://www.undercurrentnews.com/2014/10/16/fish-oil-availability-not-price-will-be-the-problem/</a>
EPA-Glycolipide	100	100	AERTO's Workshop; Benemann (USA) Präsentation ALGAE EUROPE 2015
Triacylglyceride TAG	0,30	0,30	
Beta-Glucan	100-200		aus Hefezellwänden isoliert
Laminarin aus Makroalgen	2.5-800	300	Stähler/CH bzw. Goemar/Fr; CEVA SeAgriculture 2015 presentation
Fucoxanthin rein	300-3000	1400	AERTO's Workshop; CEVA SeAgriculture 2015 Präsentation
Fucoxanthin 1% Gehalt	160		S. Boussiba Präsentation AlgaEurope Lissabon 2015

Die Marktpreisspanne für die verschiedenen Inhaltsstoffe war zum Teil sehr unterschiedlich und schwer zu ermitteln. Im Bereich der Marktpreise wird der Preis für die Berechnung des Biomassewertes angegeben (Tabelle 3).

Proteinangereichertes *Chlorella*-Mehl der französischen Firma Roquette, das in einem klassischen Fermentationsverfahren heterotroph hergestellt wird, ist bereits auf dem Markt. Der tatsächliche Preis für diese lebensmitteltaugliche Proteinquelle ist drei- bis fünfmal höher als bei Weizengluten und verdoppelt den Preis für hochreine Proteine mit definierten Eigenschaften, wie von Wijffels et al. 2010 beschrieben [57]. Die derzeitigen Großhandelspreise für Fischmehl mit 65% Proteingehalt liegen bei ca. 1,45 €/kg. Deshalb wurde für die Berechnung des Biomassewertes ein Preis unterhalb dieser *Chlorella*-Marktpreise und des Preises für die hochreinen löslichen Proteine verwendet.

Für einen möglichen Business Case wurden Produkte mit hoher Wertschöpfung bevorzugt. Der Produktinhalt sollte hoch genug sein, um einen wesentlichen Beitrag zur Wertschöpfung zu leisten. Stämme, die untersucht wurden, weisen einen höheren EPA-Gehalt auf, der zu einem gewissen Wert der Biomasse beiträgt, aber die Produktions- und Verarbeitungskosten im Vergleich zum Wert sind für das Produkt Omega-3-Fettsäure EPA von entscheidender Bedeutung. 5% EPA-Gehalt in *Phaeodactylum* ergeben einen Wert der Biomasse von nur 6 bis 10 € pro kg (siehe Abbildung 6).

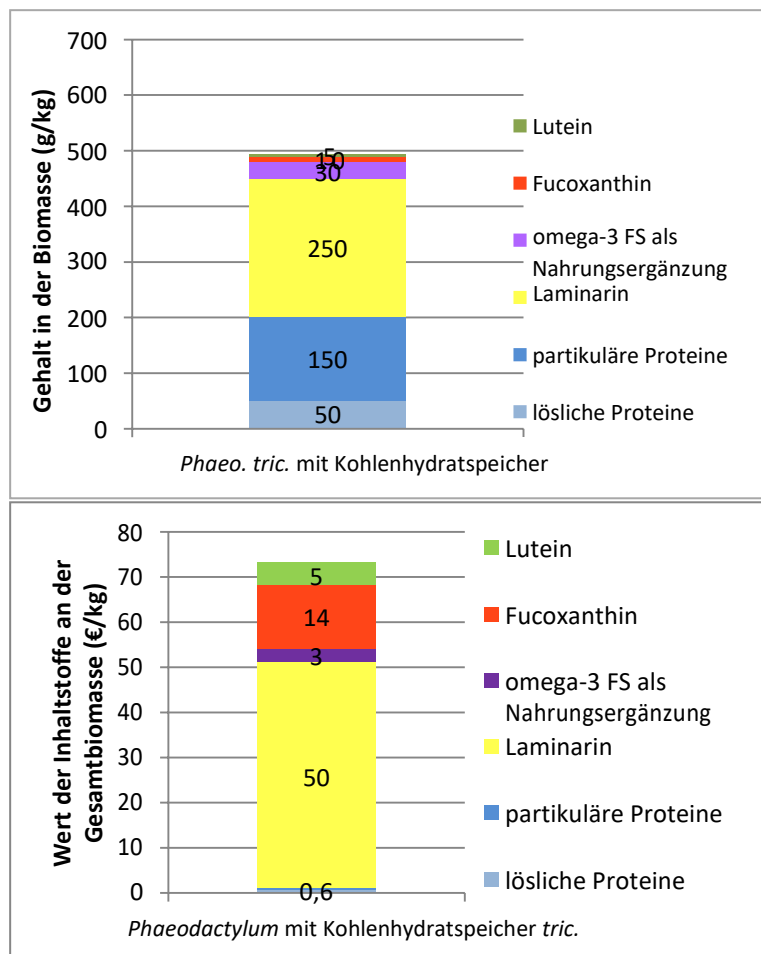


**Abbildung 6:** Zusammensetzung von *Phaeodactylum*-Biomasse und daraus berechnete potentielle Wertschöpfung anhand der Marktpreise aus Tabelle 3.

Ein vielversprechendes Algenprodukt ist Fucoxanthin, das mit überkritischem CO<sub>2</sub> + Ethanol oder mit Ethanol aus feuchter Biomasse durch Druckflüssigkeitsextraktion (PLE) leicht extrahiert werden kann.

Das Fraunhofer IGB hat im Rahmen des Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg im Verbundprojekt Mikroalgen kürzlich gezeigt, dass in geschlossenen Photobioreaktoren *Phaeodactylum*-Biomasse mit einem Fucoxanthingehalt von bis zu 2,5 Gew.-% produziert werden kann. Dies erhöht den Wert der Biomasse nur für Fucoxanthin auf über 30 €/kg Algen-Trockengewicht. Dieser Wert plus 5% EPA liegt in einem Bereich, in der Mikroalgenbiomasse derzeit wirtschaftlich produziert werden kann.

Zusätzlich kann dieser Stamm bis zu 30 % Laminarin als Speicherprodukt nach Stickstofflimitierung und bei sehr hohen Lichtintensitäten akkumulieren. Daher wurde dieser Bestandteil in einem separaten Szenario dargestellt, da sich die Zusammensetzung der Biomasse auf weniger EPA und Fucoxanthin und mehr Beta-Glucan ändert. Allein durch einen Laminaringehalt von 25% erhöht sich die Wertschöpfung um 50€ pro kg Biotrockenmasse. Insgesamt steigt die potentielle Wertschöpfung, auch bei vermindertem EPA- und Fucoxanthin-Gehalt, auf ca. 70 € pro kg Biotrockenmasse an (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7** :Zusammensetzung von *Phaeodactylum* Biomasse inklusive Laminarin und daraus berechnete potentielle Wertschöpfung anhand der Marktpreise aus Tabelle 3

Ergebnis der Betrachtung zur Valorisierung von Algenbiomasse:

- Proteine machen einen hohen Anteil an der Biomasse aus, aber der Wert dieses Biomasseanteils ist relativ gering. Daher ist die Aussicht, Mikroalgenbiomasse nur zum Schließen der Proteinlücke zu nutzen, wirtschaftlich nicht tragfähig.
- EPA-haltige Glycolipide aus *Phaeodactylum* allein sind bei tatsächlichen Produktionskosten von Mikroalgen im technischen Maßstab nicht wirtschaftlich darstellbar. Die zukünftige Entwicklung von Algen-basierten Omega-3-Fettsäuren für den menschlichen Gebrauch führt gleichzeitig zu einer erheblichen Produktion von Fucoxanthin, wenn entsprechende Algenstämme dafür eingesetzt werden. Beide Inhaltsstoffe ergeben einen Biomassewert, der höhere Produktions- und Verarbeitungskosten ermöglichen.
- Der Business Case zeigte, dass Verbesserungen im Anbau sowohl für EPA-haltige Glykolipide als auch für Fucoxanthin zu einem Anstieg des Biomassewertes führen, der höhere Produktionskosten aufgrund der Produktion in hochkontrollierten Photobioreaktoren ermöglicht.
- Der höchste Biomassewert wird mit Laminarin-haltiger Biomasse erreicht. Dieser Inhaltsstoff reichert sich zu einem hohen Anteil in Biomasse an, was die höchste Wertschöpfung für *Phaeodactylum*-Biomasse ergibt.

## 4.3 Marktrecherche

### 4.3.1 Marktvolumen und Preise für die Produkte Laminarin, Fucoxanthin und Algenproteine

Für das Produkt Laminarin respektive  $\beta$ -1,3-Glucan im Lebensmittelbereich gibt es bereits eine Marktstudie der Firma UBIC, die im Rahmen dieser Studie gekauft wurde [58]. Beta-Glucane sind als Lebensmittel- und Futtermittelzutaten seit einigen Jahren auf dem Markt. Die steigende Nachfrage nach verarbeiteten und verzehrfertigen Lebensmitteln sowie das steigende Bewusstsein für den Nährwert von Functional Food dürften den globalen Beta-Glucan-Markt antreiben. Führende Unternehmen im Nahrungsmittel- und Getränkegeschäft erhöhen ihren Marktanteil strategisch durch verschiedene Initiativen wie M&A, Joint Ventures und langfristige Verträge, wie z.B. die Partnerschaft von Fluxome mit GlycaNova zum Eintritt in den Beta-Glucan-Markt.

Der gesamte globale Beta-Glucan-Markt soll bis 2019 ein Volumen von 600 Millionen US-Dollar erreichen und mit einer jährlichen Wachstumsrate von 12 % wachsen. Begründet wird dies durch veränderte Kaufgewohnheiten der Verbraucher, die zunehmende Zahl von funktionellen Lebensmitteln, die Dynamik des Hautpflegemarktes und der technologische Fortschritt in den Bereichen. Beta-Glucan-Extraktionsverfahren sind die Haupttreiber des Beta-Glucan-Marktes. Beta-Glucan aus Hafer stellt den größten Markt dar und soll bis 2019 355,7 Millionen Dollar bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 15% erreichen [58].

**Tabelle 4:** Marktvolumen von Beta-Glucan für die Anwendungsbereiche Lebens- und Futtermittel aus [58].

	Type of beta-glucan	World/tons	Price/kg \$	Market value in \$ million
Insoluble fibers	1,3-1,6 Beta-glucan ingredient (Yeast) for food and supplement market	350	\$ 150 (average price)	\$ 52.5 mio
	1,3-1,6 Beta-glucan ingredient (Yeast) for Feed (aquaculture)	700 -1,000	\$ 35 (average price)	\$ 24,5 – 35 mio
	Mushroom	Neglectable		
Soluble fibers	1,3-1,4 beta-glucan ingredient (Oat-Barley)	4,400	\$ 65 (average price)	\$ 286 mio
	Over 20% concentration			
	Under 20% concentration	13,000	\$ 10	\$ 130 mio
	Enriched products			
<b>Total beta-glucan ingredient</b>				<b>\$ 493- 503 mio</b>

Source: Interviews/ Ubic estimations

Beta-Glucane als Immunstimulanzen finden insbesondere Verwendung im marinen Futtermittelbereich und hier insbesondere in Larvenfuttermittel und/oder andere zusammengesetzte Aquafuttermittel. Über den effektiven Einsatz von Beta-Glucanen in kommerziellen Larvenfuttermitteln liegen nur wenige Informationen vor. Die verfügbaren kommerziellen Produkte stammen jedoch aus Hefezellwänden, werden zu einem Preis von 40-65€/kg verkauft und die empfohlene Verwendungsrate liegt bei 0,2 bis 0,5% des Futters.

Für die Anwendung von Beta-Glucanen im Lebensmittel- und Kosmetikbereich gibt es eine große Anzahl an Herstellern und Anwendern weltweit [58]. Der Preis wird bestimmt vom Anwendungsbereich und dem Produktgehalt (siehe Tabelle 4).

Für Laminarin aus Makroalgen für die Anwendung als Pflanzenschutzmittel gegen Pilzkrankungen ist derzeit nur ein Produkt der Firma Stähler, Schweiz, bereits auf dem Markt [4]. Pro kg anwendbares Produkt mit 4,5 % Laminaringehalt beträgt der Preis 36,90€ oder umgerechnet auf einen Preis pro kg Laminarin beträgt der Preis 1218€. Dieser Preis liegt deutlich über dem Preis für lösliches Beta-Glucan in Tabelle 4.

**Proteine** für die Bereiche Lebensmittel und Futtermittel sind ein hart umkämpfter Markt. Bei Proteinen sind verlässliche Preise ein schwieriges Thema angesichts des sich rasant entwickelnden Marktes. Die Preise für Standardproteinisolate (70-80% Reinheit) für z.B. Getränkeanwendungen liegen zwischen 3 und 7-8 €/kg. Proteinspezialitäten (z.B. pflanzliche Proteine für Sportlernahrung) können Handelspreise bis zu 40 €/kg erreicht werden (Tabelle 5). Darüber hinaus können im Ergänzungsbereich oder bei eindeutig nachgewiesenem funktionellem Nutzen, z.B. bei klinischen Studien, deutlich höhere Preise erzielt werden.

**Mikroalgenproteine** konkurrieren auf dem Markt mit anderen pflanzlichen Proteinen sowie mit Proteinen leicht verfügbarer und reichlich vorhandener Milchproteine für die Anwendung in Lebensmitteln. In Bezug auf die Zusammensetzung der Aminosäuren ist der Nährwert von Algenproteinen etwas niedriger als bei Proteinen aus dem Molkereibereich und etwas höher als bei herkömmlichen Pflanzenproteinen, da sie keine anti-nutritiven Verbindungen enthalten und einen erhöhten Gehalt an essentiellen



Aminosäuren wie Methionin und Cystein aufweisen, was insbesondere den Bedarf an Proteinen in Futtermitteln reduzieren kann. Der Futtermittelsektor benötigt weltweit große Mengen an pflanzlichen und fischbasierten Proteinquellen, die teilweise durch Algenproteine ersetzt werden könnten. Der Proteingehalt der Mikroalgenbiomasse ist vergleichsweise hoch, aber die aktuellen Preise für Futterproteine liegen im Bereich von 0,5 - 2,00 €/kg. Das macht die Algenproteine nur als zusätzliches Produkt in einem Bioraffinerieprozess interessant, der auf die Gesamtnutzung der Ressource Algenbiomasse abzielt.

**Tabelle 5:** Preisvergleich mit bereits am Markt vorhandenen Proteinen (Quelle: C. Rösch, ITAS KIT, Forschungsprogramm Bioökonomie BW).

Proteinquelle	Handelspreis brutto [€/kg]	Handelspreis netto [€/kg]	Vermarktung	Proteingehalt	Marke	Quelle
Molke	31,00	26,05	Sportlernahrung	95 %	Molkenprotein 4Sport vanille	<a href="https://www.dm.de">https://www.dm.de</a>
Soja	39,99	33,61	Sportlernahrung	96 %	Multipower Sojaprotein vanille	<a href="https://www.nu3.de">https://www.nu3.de</a>
Erbse	46,33	38,93	Nahrungsergänzungsmittel	80 %	Raab Vitalfood Erbsenprotein, Bio-Pulver	<a href="https://www.nu3.de">https://www.nu3.de</a>
Lupine	18,70	15,71	Nahrungsergänzungsmittel	43 %	Raab Vitalfood bio Lupinenprotein, Pulver	<a href="https://www.nu3.de">https://www.nu3.de</a>

**Fucoxanthin** wird zumeist aus Makroalgen hergestellt, weil die Biomasse zumeist aus Wildernte stammt. Allerdings kann die Konzentration von Fucoxanthin in Mikroalgen um bis zu Faktor 10 höher sein. *Phaeodactylum* ist die reichste Quelle für Fucoxanthin, die in der Literatur und auch nach eigenen Ergebnissen des Fraunhofer IGB mit bis zu 2,7 %w/w gegenüber < 0,5 Gew.% in Makroalgen beschrieben wird.

Die Preise für große Mengen Fucoxanthin aus Makroalgen, basierend auf Webseiten, die Massenmengen verkaufen (hauptsächlich chinesisch), liegen je nach Reinheit im Bereich von 10-500 USD/kg (<http://www.medgadget.com/2016/01/fucoxanthin-sales-global-market-research-report-2016.html>). Für gereinigtes Fucoxanthin wurden Preise bis zu 3000 €/kg publiziert. Nach persönliche Informationen von Herstellern von Fucoxanthin aus Mikroalgen für den Kosmetikmarkt beträgt der Preis pro kg gereinigtes Fucoxanthin 10 000 €/kg. Die weltweite Produktion von Fucoxanthin betrug im Jahr 2015 500 Tonnen, mit einer erwarteten CAGR von 5,3% von 2016 bis 2021.

Die im Wettbewerbsbericht 2014 der Europäischen Kommission veröffentlichten Daten bestätigen die kontinuierliche Dynamik von Carotinoiden auf Mikroalgenbasis mit acht Produkten im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium für Astaxanthin, während zwei

Produkte derzeit für Fucoxanthin entwickelt werden. Damit ist Platz für andere Wettbewerber.

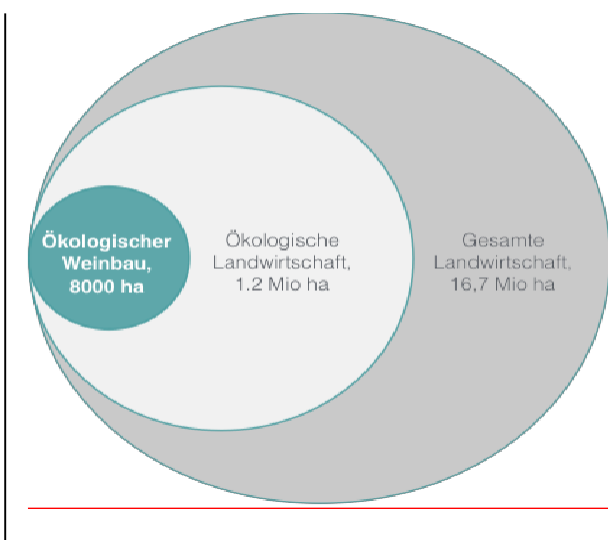
Die wichtigsten Hersteller von Fucoxanthin, die im Marktforschungsbericht 2015 über die globale Fucoxanthin-Industrie von Deep Research Reports identifiziert wurden, sind Oryza (Japan), PoliNat (Spanien), AGROCHEMI (Japan), Amicogen (Südkorea), Herim Fucoidan (Südkorea), Changsha Vigorous-Tech (China), Ci Yuan (China), Beijing Ginko Group (China), Xian Rongsheng (China), Xian Sinuote (China), Shaanxi Sciphar (China), Beijing Leili (China), Naturalin (China) und Nutra Green (China).

#### **4.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Marktpotenzial von Laminarin im landwirtschaftlichen Pflanzenschutz**

In dieser Studie liegt der Fokus auf Laminarin mit Anwendung im landwirtschaftlichen Anbau als Pflanzenstärkungsmittel mit dem Ziel die Aufwandmenge für Fungizide wie Kupferpräparate und synthetische Fungizide zu reduzieren. Dies ist insbesondere für den Öko-Anbau wichtig, da derzeit nur Kupferpräparate in begrenzter Menge eingesetzt werden dürfen.

Der europäische Markt ist ein interessanter primärer Zielmarkt für Laminarin. Zum einen ist Europa ein führender Produzent und Exporteur von landwirtschaftlichen Gütern, so dass bereits weltweite Distributionswegen bestehen. Zum anderen ist der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Europa mit mehr als 300 Millionen Hektar im Verhältnis zur Gesamtfläche sehr hoch, so dass der Kontinent über etwa 20 % der weltweit bepflanzten Fläche verfügt. Darüber hinaus hat der Westeuropäische Markt weltweit die höchsten Ausgaben pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche. So macht Westeuropa zwar nur 5 % der weltweiten Anbaufläche aus, ist aber für mehr als 17 % der weltweiten Ausgaben für Pflanzenschutz verantwortlich [59].

Die gesamte landwirtschaftliche Fläche Deutschlands betrug im Jahr 2016 ca. 16,7 Millionen Hektar. Davon wurden 1,2 Millionen Hektar von ökologischer Landwirtschaft betrieben. Das bedeutet, dass circa 7,1 % der gesamten Landwirtschaftsfläche ökologisch bewirtschaftet wird [60]. Vor allem der ökologische Weinbau ist prädestiniert für die Verwendung von Laminarin, da strenge Richtlinien den Einsatz von chemischen Pestiziden regulieren. Der ökologische Weinbau in Deutschland wird auf 8000 Hektar Anbaufläche betrieben und ist daher ein wichtiger Zielmarkt. Der Zusammenhang zwischen der gesamten landwirtschaftlichen Fläche, der ökologischen Landwirtschaft sowie den ökologischen Weinbau ist in Abbildung 8 veranschaulicht.



**Abbildung 8:** Anteil ökologischer Weinbau bzw. ökologische Landwirtschaft an der Gesamtlandwirtschaft in absoluten Flächenangaben in Deutschland.

Laminarin kann zum einen als Substitut für chemische Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden. Zum anderen kann es das Intervall zwischen den Spritzungen von chemischen Mitteln wie beispielsweise Kupfersalze verlängern, so dass Kosten und Aufwandmenge für diese Spritzmittel verringert werden können. Allein in Deutschland hat sich der Inlandsabsatz von Pflanzenschutzmitteln von 1994 bis 2015 auf über 48611 Tonnen um 63 % erhöht. Neben Herbiziden und Insektiziden nehmen Fungizide einen wesentlichen Anteil an den eingesetzten Pflanzenschutzmitteln in Deutschland ein. Auch ihr Anteil hat sich von 1994 bis 2015 mit über 12539 Tonnen um mehr als 63 % gesteigert [61].

Die Grundsätze des ökologischen Landbaus verbieten den Einsatz mineralischer Düngemittel und chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel. Allerdings ist festzustellen, dass bisher nur wenige biologische Pflanzenschutzmittel und andere alternative Verfahren existieren und deshalb vorbeugende Maßnahmen innerhalb des Pflanzenschutzes einen besonderen Stellenwert zur Ertragssteigerung und Qualitätssicherung einnehmen. Derzeit wird Kupfer als noch wichtiges und chemisches Pflanzenschutzmittel auch im ökologischen Landbau eingesetzt. Der Ersatz und die Reduktion dieses schädlichen Mittels hat für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft oberste Priorität [62]. Das Marktvolumen für Pflanzenschutz und Saatgutbehandlung nimmt weltweit zu. Global betrachtet beläuft sich das Marktvolumen auf über 45,1 Milliarden €. In den Jahren 2007 – 2016 hat es sich um knapp 55 % mehr als verdoppelt [63]. Für Fungizide allein belief sich der weltweite Umsatz im Jahr 2015 auf 711 Millionen US-Dollar.

### **Auswirkungen auf die Umwelt**

Im Pflanzenbau gibt es große Bestrebungen die Aufwandmenge an Spritzmitteln zur Bekämpfung von Pilzinfektionen im Wein- und Obstbau zu reduzieren, insbesondere die Verwendung von Kupferpräparaten im Ökoweinbau. Da hier Kupfer das einzige noch zugelassene Mittel gegen Pilzinfektionen wie *Perenospora* oder *Botrytis* ist. Deshalb

besteht ein besonderes Interesse die Substanzklasse der  $\beta$ -1,3-Glucane und hier Laminarin aus Mikroalgen und ihre Wirkung auf die pflanzlichen Abwehrmechanismen zu untersuchen, welche Aufwandmengen benötigt werden, und um wieviel die Fungizidaufwandmenge reduziert werden kann.

### **Benchmarking national / international, wissenschaftlich / wirtschaftlich**

Aktuell gibt es im deutschen Raum keinen Produzenten für Pflanzenstärkungsmittel auf Basis von Laminarin. Die Firma Stähler aus der Schweiz vertreibt Laminarin der französischen Firma Goëmar aus Makroalgen als Pflanzenstärkungsmittel. Der einzige andere Mikroalgenproduzent im Bereich Pflanzenschutzmittel ist Microperi Blue Growth, ein kleines italienisches Unternehmen [<http://www.micoperibg.eu/>], das sich bisher auf den italienischen Markt konzentriert, und versucht ein europäisches Patent zu beantragen, bisher aber erfolglos.

Der **wissenschaftliche Benchmark** ist derzeit die Laminarinproduktion publiziert von Xia et al. mit einer Laminarinproduktivität von  $300 \text{ mg l}^{-1}\text{d}^{-1}$  in Photobioreaktoren mit dem Stamm *Odontella aurita* [18]. Mit dem Stamm *Phaeodactylum tricornutum* konnten bereits im Fraunhofer IGB in Flachplatten-Airliftreaktoren eine durchschnittliche Produktivität für Laminarin von ca.  $500 \text{ mg l}^{-1}\text{d}^{-1}$  erreicht werden. Hier gibt es noch Optimierungspotential, das derzeit untersucht wird.

Der **wirtschaftliche Benchmark** ist einerseits das Produkt von Stähler [4], andererseits Kupferpräparate beispielsweise von Spiess & Urania, die im Weinbau eingesetzt werden. Mit dem Produkt Vacciplant von der Firma Stähler kostet eine Anwendung 73€/ha, gegenüber dem Kupferpräparat mit nur ca. 10€/ha und Anwendung (siehe Tabelle 6). Bereits bei einem Laminaringehalt von 25% in der Biotrockenmasse benötigt man nur 360g Algenbiomasse pro ha, das entspricht einer Wertschöpfung von 185 €/kg Algenbiomasse, bei 40% Laminaringehalt von 300 €/kg im Vergleich zur gleichen Aufwandmenge von Vacciplant. Im Vergleich zu Kupferpräparaten liegt die potentielle Wertschöpfung deutlich niedriger. Insgesamt zeigt Tabelle 6, dass das Ziel der Prozessoptimierung eine Erhöhung des Laminaringehaltes zu einer deutlichen Steigerung der Wertschöpfung führt. Da die Anwendung von Kupferpräparaten im Weinbau begrenzt ist auf 3 kg/ha und Jahr ist bei den derzeitigen Algenproduktionskosten von ca. 50 € pro kg Algenbiomasse und einem Aufschlag für die unbegrenzte Anwendbarkeit, ist eine Anwendung zum jetzigen Zeitpunkt bereits wirtschaftlich darstellbar. Im Ökoanbau eine echte Alternative, im konventionellen Anbau eine gute Ergänzung, da auch hier die maximalen Aufwandmengen für Kupfer gelten.

**Tabelle 6:** Vergleich der Kosten für die Aufwandmenge pro ha Reben für das Kupferpräparat, Vacciplant (Laminarin aus Makroalgen) und potentielle Mikroalgenpräparate und die daraus berechnete potentielle Wertschöpfung daraus.

	Produkte bereits auf dem Markt		Mikroalgenbiomasse	
	Kupfersalze*	Vacciplant von Stähler**	mit 25% Laminaringehalt	mit 40% Laminarin-gehalt
Aufwandmenge aktive Substanz [g/ ha]	270 g Kupferoxychlorid	90 g Laminarin	100 g Laminarin	100 g Laminarin
Kosten pro Anwendung/ha [€]	10	74		
Wertschöpfung pro kg Algen bei Kosten von <b>10€ pro Anwendung/ha</b>			25 €/kg Algenbiomasse	40 €/kg Algenbiomasse
Wertschöpfung pro kg Algen bei Kosten von <b>74€ pro Anwendung/ha</b>			185 €/kg Algenbiomasse	300 €/kg Algenbiomasse

\* z.B. Funguran Progress von Spiess & Urania, maximal 4 Anwendungen möglich

\*\* mit 45 g Laminarin/L, unbegrenzt anwendbar

## 5 Nutzungspotential von Flüssiggärrest aus Biogasanlagen für die Produktion von Mikroalgen

### 5.1 Vorkommen und Zusammensetzung von Flüssiggärresten

Die anaerobe Vergärung, wie sie in der Abfallbehandlung und Biogasproduktion üblich ist, stellt ein hochwirksames und umweltfreundliches Verfahren dar, das nicht nur im industriellen Maßstab, sondern auch von kleinen Anlagen weltweit genutzt wird [64].

Neben der Biogaserzeugung entstehen im Biogas-Prozess auch Gärreste mit hohen Nährstoffkonzentrationen, darunter Stickstoff in Form von Ammonium sowie Kalium, Phosphor, Schwefel und anaerob nicht-abbaubare organische Stoffe. Darüber hinaus zeichnen sich Gärreste durch eine hohe Trübung aufgrund von Schwebstoffen aus und können auch Infektionserreger mit potenziell schädlichen Auswirkungen auf Mensch, Tier und Pflanze enthalten. Die Zusammensetzung der Gärreste variiert stark je nach Ausgangsbiomasse, Inokulumquelle und Betriebsbedingungen (z.B. Temperatur, pH-Wert, hydraulische Verweilzeit) wie in Tabelle 7 aufgeführt. Es bestehen große Unterschiede, insbesondere in den Ammonium- und Phosphatgehalten zwischen den untersuchten Flüssiggärresten. Vergärungssubstrat und Betriebsweise haben einen großen Einfluss auf die Nährstoffkonzentration. So wurden die im Fraunhofer IGB untersuchten Flüssiggärreste sowohl von Kläranlagen, als auch die Vergärung von Obst- und Gemüseabfällen in Hochlastfaulungen mit integriertem Rotationsscheibenfilter durchgeführt, um Feststoffe in die Vergärung rückzuführen und nebenbei wurde ein partikelfreier Flüssiggärrest

erzeugt. Diese betriebsweise führte zu einem verbesserten Abbau, und damit zu höheren Nährstoffkonzentrationen im Flüssiggärrest.

**Tabelle 7:** Nährstoffkonzentration in Flüssiggärresten aus verschiedenen Biogasanlagen, die mit unterschiedlichen Substraten und Betriebsweisen gefahren wurden sowie Literaturwerten.

Herkunft Flüssiggärrest	Ammonium [mg/l]	Phosphat [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	Sulfat [mg/l]	pH-Wert
Klärschlamm KA Tauberbischofsheim*	1228	200	7	52	22	7,5
Klärschlamm KA Ilfeld*	792	53	82	79	4	7,3
Klärschlamm KA Wutöschingen*	1375	137	30	63	-	7,8
ETAMAX :Vergärung von Obst- und Gemüseabfall Fraunhofer IGB*	1222	53	93	79	-	8,0
Vergärung von Schweinegülle u. Algen [65]	308-887	97-130				
Klärschlammvergärung [66]	2845	425	3,2	35		
Anaerobe Vergärung von Papierindustriemüll [67]	488	49				

\* Flüssiggärreste die im Fraunhofer IGB untersucht wurden. Die Gärreste wurden kontinuierlich über einen Rotationsscheibenfilter partikelfrei mikrofiltriert.

## 5.2 Flüssiggärrest aus Biogasanlagen als Nährstoffquelle für die Algenproduktion

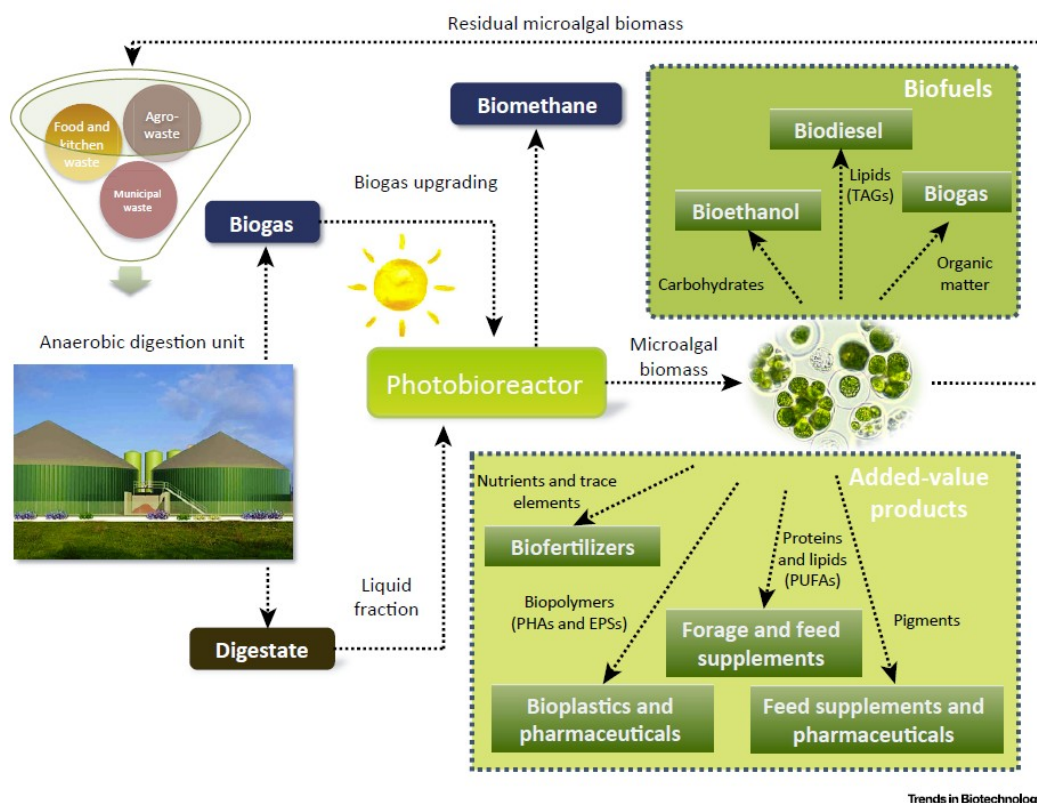
Das Fraunhofer IGB hat im BMBF-geförderten Projekt ETAMAX [68] sowohl Flüssiggärrest aus kommunalen Klärschlammvergärungsanlagen als auch aus der Vergärung von Obst- und Gemüseabfällen auf das Wachstum verschiedener Algen untersucht. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Nutzung des im Gärrest gelösten Ammoniums und Phosphats. Weitere Bestandteile konnten teilweise ebenfalls durch die Mikroalgen aufgenommen werden, können aber auch das Wachstum hemmen oder die Kultur schädigen. Wurde zu Flüssiggärrest zusätzlich Phosphat gefüttert, um ein festes N:P-Verhältnis einzustellen, war sowohl mit Flüssiggärrest aus Klärschlamm als auch aus der Vergärung von Obst- und Gemüseabfällen besseres Biomassewachstum erzielt worden als mit synthetischen Medien. Dies kann auf das Vorhandensein und Verfügbarkeit von speziellen Mikronährstoffen im Flüssiggärrest zurückzuführen sein.

Ergänzend muss festgehalten werden, dass sich der Flüssiggärrest zwar für die Generierung von Algenbiomasse eignet, jedoch die Produktion von Speicherstoffen, wie Lipide oder Polysaccharide, die unter Stickstofflimitierung akkumuliert werden, nur bedingt möglich ist. Auch bei Auswahl eines zur Speicherstoffproduktion geeigneten Mikroalgenstamms, der auf dem eingesetzten Abwasser kultiviert werden kann, bleibt zu beachten, dass die Speicherstoffproduktion erst nach Verbrauch des gesamten Ammoniums initiiert wird. Ein Verdünnen der Kultur in der zweiten Prozessphase wäre mit bereits genutztem Flüssiggärrest möglich, beispielweise mit dem flüssigen Überlauf der Biomasseernte im Anschluss an die Kultivierung.

Erstmals konnte in diesem Projekt im Langzeitbetrieb die Nutzung von Flüssiggärrest mit hohen Ammoniumgehalten aufgezeigt werden. Sowohl Ammonium als auch Phosphor wurde vollständig aufgebraucht. Damit gehen erhebliche Kosteneinsparungen für die Nährstoffversorgung in technischen Anlagen einher, was insbesondere bei einer Nutzung der Biomasse als Rohstoff für Bulkprodukte entscheidend sein kann. Hinzu kommt noch eine Kostenersparnis für Reinigung der Flüssiggärreste in Abwasserreinigungsanlagen.

Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass Flüssiggärreste aus anaeroben Vergärungsanlagen, für die Herstellung von Algenbiomassen mit einer Fülle an interessanten Inhaltsstoffen genutzt werden können. Die Bandbreite an möglichen Produkten ist in Abbildung 9 dargestellt. Jedoch gibt es strenge Anforderungen an die Nutzung dieser so produzierten Inhaltsstoffe für die Bereiche Lebensmittel, Kosmetik und Futtermittel, wie bereits in Kapitel 3.2 für das Produkt Laminarin als Futtermittelkomponente aufgezeigt wurde. Der Einsatz so produzierter Algenbiomassen oder Inhaltsstoffe in Lebensmitteln, aber auch Kosmetik ist unter den gegebenen Zulassungsbedingungen sehr schwer. Im Futtermittelbereich sind auf die hygienischen Anforderungen (Bakterien, Pilze, Viren) und mögliche Schwermetallgehalte oder toxische Verbindungen zu achten. Um Laminarin enthaltende Produkte als Futtermittel einsetzen zu können, muss deren Zusammensetzung gesetzeskonform auf die jeweiligen Tiergruppen abgestimmt, deren Produktion den Hygienevorschriften entsprechend erfolgen und alle beteiligten Firmen registriert werden.

Übrig bleiben als mögliche Produkte für eine Bioraffinerie auf Basis von Mikroalgenbiomasse, die mit Nährstoffen aus Flüssiggärresten erzeugt wurde, die Biokraftstoffe, Bio-Düngemittel, Biopolymere für Kunststoffe, Plattformchemikalien für die Herstellung von Kunststoffen und Schmiermitteln, wie Fettsäuren und Alkohole, aber auch Pflanzenstärkungsmittel wie das Polysaccharid Laminarin.



**Abbildung 9:** Flüssiggärreste aus Biogasanlagen können für die Kultivierung von Mikroalgen unter Lichtzufuhr und CO<sub>2</sub> aus dem erzeugten Biogas genutzt werden. Die produzierte Mikroalgenbiomasse kann anschließend als Rohstoff für die Herstellung von Biokraftstoffen oder verschiedenen Bioproducten (grüne Boxen) verwendet werden. Abkürzungen: EPSs, extrazelluläre polymere Substanzen; PHAs, Polyhydroxyalkanoate; PUFAs, mehrfach ungesättigte Fettsäuren; TAGs, Triacylglycerine. Quelle: [69]

## 6 Identifizierung von potentiellen Herstellern und Nutzern von Algenanlagen und Algenprodukten in Baden-Württemberg.

### 6.1 Hersteller von Algenanlagen

Bis zum Jahre 2011 gab es in Baden-Württemberg drei Hersteller von Photobioreaktoren: die Hezinger GmbH in Kornwestheim, die breen biotec aus Stuttgart und die Subitec GmbH, Stuttgart (Quelle: <https://www.biooekonomie-bw.de/de/suche?pagesearch=1&q%5B%5D=Photobioreaktoren&origin=header&size=25&from=0&filter%5Bportal%5D%5Bportal%5D=bioeconomy>).

2018 ist nur noch die Subitec GmbH aktiv. Diese Firma entwickelt Photobioreaktoren im Labor- und technischen Maßstab, Prozesse für die Produktion von Algenbiomasse, sowie den Bau von Anlagen im technischen Maßstab für die Herstellung von Wertstoffen mit



Mikroalgen ([www.subitec.com](http://www.subitec.com)). Im Unterauftrag ist die Firma M+W Central Europe GmbH, Stuttgart als Planer und Anlagenbauer bei der Errichtung von technischen Algenanlagen beteiligt.

Es gibt ein Verkaufsbüro der Firma Infors AG in Stuttgart. Die Infors AG mit Stammsitz in der Schweiz bietet Labor-Photobioreaktoren an.

## 6.2 Nutzer von Algenprodukten

Es gibt eine Reihe von Firmen, die über Internethandel Algenprodukte von *Chlorella*-Tabletten bis Astaxanthin als Softgel-Kapseln anbieten ([www.feine-algen.de/Algen/kaufen](http://www.feine-algen.de/Algen/kaufen)). Die Produkte werden zumeist in Asien hergestellt und importiert. Andere sind Großhändler für Algenprodukte wie die Firma mabitec, die Algenbiomassepräparate als Nahrungsergänzung, als auch Algenextrakte für Kosmetik anbietet ([www.mabitec.de](http://www.mabitec.de))

Im Bereich Lebensmittel beschränken sich Mikroalgenprodukte in Lebensmitteln auf wenige Nahrungsergänzungsstoffe wie Astaxanthin, Phycobiline oder  $\beta$ -Carotin. Bereits zugelassene Algen wie *Chlorella* oder *Spirulina* werden in Tablettenform oder Pulver angeboten.

Einzig die Firma ADM WILD Europe GmbH & Co. KG aus Heidelberg stellt Mikroalgenextrakte her, blaue Farbstoffe aus *Spirulina* die sogenannten Phycobilin, u.a. für Haribo als natürliche Farbstoffe.

Der Einsatz von Algen in Kosmetika beschränkt sich in Baden-Württemberg auf die Nutzung von Makroalgen für kosmetische Anwendung und die Firma lavera naturkosmetik, vertreibt ein Makroalgenprodukt.

Im Bereich Futtermittel konnte ebenfalls keine baden-württembergische Firma gefunden werden, die Mikroalgen in Futtermitteln einsetzt.

## 7

### Zusammenfassung, Ausblick und Handlungsempfehlungen

Ziel dieser Studie war am Beispiel einer algenbasierten Bioraffinerie für Anwendungsgebiete der Algeninhaltsstoffe im Agrarbereich eine maximale Valorisierung von Algenbiomasse aufzuzeigen. Für das Beispiel Laminarin aus Mikroalgen und andere gleichzeitig in diesen Algenbiomassen enthaltenen Inhaltsstoffe, Proteine und Fucoxanthin, wurde das Marktpotential ermittelt.

Dazu wurde zunächst die Wirkung von Laminarin auf Pflanzen und in der Tierernährung recherchiert, gefolgt von den rechtlichen Rahmenbedingungen für diese Algeninhaltsstoffe, die bei Inverkehrbringen beachtet werden müssen. Das Ziel dieser Recherche war, wie ein Marktzugang für Laminarin als vielseitig einsetzbares Produkt in den verschiedenen Anwendungsbereichen, mit besonderem Fokus als Ersatz für bereits auf dem Markt befindliche Pflanzenschutzmittel, erfolgen kann. Um das Marktpotential abzuschätzen wurden Preise für die verschiedenen Produkte und Qualitäten recherchiert, die dann in eine Berechnung der potentiellen Wertschöpfung von Algenbiomassen einfließen. Eine wirtschaftliche Erzeugung und Nutzung von Algenbiomassen ist danach erst bei Einbeziehung hochwertiger Produkte wie Fucoxanthin und Laminarin möglich. Für die alleinige Nutzung von Proteinen und Omega-3-Fettsäuren sind die derzeitigen Produktionskosten zu hoch. Als ein Kostenreduktionsfaktor wurde die Nutzung von Nährstoffen aus Flüssiggärrest von Biogasanlagen betrachtet. Die Nutzung von Flüssiggärresten zur Erzeugung von Mikroalgenbiomassen ist prinzipiell möglich, erschwert aber die mögliche Nutzung der Inhaltsstoffe durch die rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich Lebens- und Futtermittel.

**Fazit dieser Studie** ist, dass es möglich ist Laminarin als Pflanzenstärkungsmittel insbesondere im Ökolandbau einzusetzen. Zur Schließung von Stoffkreisläufen zwischen Biogasanlage und Algenproduktion kann Flüssiggärrest als Nährstoffquelle genutzt werden, auch für die Anwendung im Ökoanbau. Durch die Anwendung von Laminarin können Fungizide zum Schutz vor Pilzinfektionen voraussichtlich ersetzt werden. Die Wirkung von Laminarin aus Mikroalgen wird aktuell im Weinbau direkt bei einem Winzer überprüft.

#### **Ausblick:**

Die Ergebnisverwertung dieser Studie erfolgt im Rahmen des Forschungsprogramms Bioökonomie Baden-Württemberg, in dem die Wirkung laminarinreicher Mikroalgenbiomasse auf Pilzinfektionen im Weinbau durch die Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO) untersucht wird (Förderkennzeichen 7533-10-5-185A). Hierzu soll die immunstimulierende Wirkung an gezielt infizierten Einzelpflanzen im Gewächshaus, als auch in Freilandkulturen überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichen erst einen Marktzugang für laminarinreiche Algenbiomasse als Pflanzenstimulans und dadurch Reduktion des Einsatzes von fungiziden Pflanzenschutzmitteln.

**Handlungsempfehlungen:**

Zur Weiterentwicklung von Laminarin als Pflanzenstärkungsmittel sollten noch weitere Untersuchungen sowohl im Bereich der wirtschaftlichen Herstellung laminarinreicher Mikroalgenbiomasse, als auch Aufarbeitung und Formulierung/Stabilisierung erfolgen.

Der Einsatz von Pflanzenbiostimulantien als Ersatz für fungizide Pflanzenschutzmittel kann auf andere Anbaukulturen wie Erdbeeren und Äpfel übertragen werden, und hier insbesondere gegen Schorf und einer Teilreduktion gegen Feuerbrand, verursacht durch *Erwinia amylovora*. Diese Wirkung ist zu überprüfen. Eine weitere Übertragungsmöglichkeit wäre der Test von Laminarin im Gemüse- und Kräuteraanbau wie Spinat und Petersilie.

Ist der Einsatz von Laminarin erfolgreich als Biostimulans getestet worden, muss für den daraus resultierenden Bedarf die Herstellung hochskaliert werden. Dazu kann über eine technoökonomische Bewertung evaluiert werden ob eine wirtschaftliche Produktion im Freiland oder über LED-beleuchtete Photobioreaktoren möglich ist. Letzteres Szenario würde zu einer stabilen und höheren Produktivität führen.

Diese Maßnahmen zielen sowohl auf eine Erweiterung des Marktes, als auch die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Algenprodukten.

## 8 References

- 1 (2013) Bioökonomie im System aufstellen. Konzept für eine baden-württembergische Forschungsstrategie „Bioöko-nomie“2013. Editor Prof. Dr. Thomas Hirth; gefördert vom Ministerium für Wissenschaft und Kunst Baden-Württemberg.
- 2 Aziz, A., Poinssot, B., Daire, X., Adrian, M., Bézier, A., Lambert, B., Joubert, J.-M. and Pugin, A. (2003) Laminarin elicits defense responses in grapevine and induces protection against *Botrytis cinerea* and *Plasmopara viticola*. *Molecular plant-microbe interactions* : MPMI **16**, 1118–1128
- 3 Jänsch S. and Römbke J. Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel- Wirkstoff: Ökologische Auswirkungen der Akkumulation von Kupfer im Boden. Umweltbundesamt
- 4 „Vacciplant® - Stähler Suisse SA“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.staehler.ch/de/produkte/info/vacciplant.html>.
- 5 Gahan D.A., Lynch M.B., Callan J. J., O'Sullivan, J. T. and O'Doherty J. V. (2009) Performance of weanling piglets offered low-, medium- or high-lactose diets supplemented with a seaweed extract from *Laminaria* spp. *Animal* **3**, 24–31
- 6 Zhu, F., Du, B. and Xu, B. (2016) A critical review on production and industrial applications of beta-glucans. *Food Hydrocolloids* **52**, 275–288
- 7 Granum Espen. & Myklestad Sverre M. (2002) A simple combined method for determination of  $\beta$ -1,3-glucan and cell wall polysaccharides in diatoms. *Hydrobiologia* **477**, 155–161
- 8 Autio K., O.Myllymaki, T.Suortti, M.Saastamoinen and K.Poutanen (1992) Physical properties of (1~3),(1~4)-13-D-glucan preparates isolated from Finnish oat varieties. *Food Hydrocolloids* **5**, 513–522
- 9 Anderson JW, Bridges SR (1988) Dietary fiber content of selected foods. *Am J Clin Nutr* **47**, 440–447
- 10 Knudsen K.E.B. (2014) Fiber and nonstarch polysaccharide content and variation in common crops used in broiler diets. *Poultry Science*, Volume 93, Issue 9, 1 September **93**, 2380–2393
- 11 Stier H., Ebbeskotte V., Gruenwald J. (2014) Immune-modulatory effects of dietary Yeast Beta-1,3/1,6-D-glucan. *Nutrition Journal* **13**, 38
- 12 Klis F. M., Boorsma A. and De Groot P. W. J. Cell wall construction in *Saccharomyces cerevisiae*. *Yeast* **23**, 185–202
- 13 Sari M., Prange A., Lelley J.I., Hambitzer R. (2017) Screening of beta-glucan contents in commercially cultivated and wild growing mushrooms. *Food Chemistry* **216**, 45–51
- 14 Kadam S. U., Tiwari B. K. and O'Donnell C. P. (2015) Extraction, structure and biofunctional activities of laminarin from brown algae. *Int J Food Sci Technol* **50**, 24–31
- 15 Šantek B., Felski M., Friehs K., Lotz M. and Flaschel E. (2009) Production of paramylon, a  $\beta$ -1,3-glucan, by heterotrophic cultivation of *Euglena gracilis* on a synthetic medium. *Eng. Life Sci.* **9**, 23–28
- 16 Barsanti L., Vismara R., Passarelli V. and Gualtieri P. (2001) Paramylon (Beta-1,3-glucan) content in wild type and WZSL mutant of *Euglena gracilis*. Effects of growth conditions. *Journal of Applied Phycology* **13**, 59–65
- 17 Ju Z., Ding, Zheng L., Wu Z. and Zheng, F. (2011) Diatoms as a Model System in Studying Lipid Biosynthesis Regulation. *IJESD*, 493–495
- 18 Xia S., Gao B., Li A., Xiong J., Ao Z. and Zhang C. (2014) Preliminary characterization, antioxidant properties and production of chrysolaminarin from marine diatom *Odontella aurita*. *Marine drugs* **12**, 4883–4897
- 19 Kadam S.U., Tiwari B.K., und O'Donnell C.P. (2015) Extraction, structure and biofunctional activities of laminarin from brown algae. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 24–31
- 20 Cheong J.-J., Birberg W., Fügedi P., Pilotti A., Garegg P. J., Hong N. H., Ogawa T., and Hahn M. G. (1991): Structure-activity relationships of oligo- $\beta$ -glucoside elicitors of phytoalexin accumulation in soybean. *The Plant Cell* **3**, 127–136
- 21 Klarzynski O., Plesse B., Joubert J.-M., Yvin J.-C., Kopp M., Kloareg B. and Fritig B. (2000) Linear  $\beta$ -1,3 Glucans Are Elicitors of Defense Responses in Tobacco. *Plant Physiology* **124**, 1027–1038

- 22 Inui H., Yamaguchi Y., Hirano S. (1997) Elicitor actions of N-acetylchitooligosaccharides and laminarioligosaccharides for chitinase and L-phenylalanine ammonia-lyase induction in rice suspension culture. *Biosci Biotechnol Biochem.* **61**, 975–978
- 23 Garde-Cerdán T., Mancini V., Carrasco-Quiroz M., Servili A., Gutiérrez-Gamboa G., Foglia R. (2017) Chitosan and Laminarin as Alternatives to Copper for *Plasmopara viticola* Control: Effect on Grape Amino Acid. *J. Agric. Food Chem.* **65**, 7379–7386
- 24 Bernardon-Méry A., Joubert J.-M., Hoareau A. (2013) Laminarin used against apple scab. *Phytoma*
- 25 Yin G., Li W., Lin Q., Lin X., Lin J., Zhu Q., Jiang H. and Huang Z. (2014) Dietary administration of laminarin improves the growth performance and immune responses in *Epinephelus coioides*. *Fish & shellfish immunology* **41**, 402–406
- 26 O'Doherty J.V., Dillon S., Figat S., Callan J.J., Sweeney T. (2010) The effects of lactose inclusion and seaweed extract derived from *Laminaria* spp. on performance, digestibility of diet components and microbial populations in newly weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology* **157**, 173–180
- 27 Heim G., T. Sweeney, C.J. O'Shea, D.N. Doyle, J.V. O'Doherty (2015) Effect of maternal dietary supplementation of laminarin and fucoidan, independently or in combination, on pig growth performance and aspects of intestinal health. *Animal Feed Science and Technology* **204**, 28–41
- 28 Leonard S. G., Sweeney T., Bahar B., Lynch B. P. and O'Doherty J. V. (2011) Effects of dietary seaweed extract supplementation in sows and post-weaned pigs on performance, intestinal morphology, intestinal microflora and immune status. *The British journal of nutrition* **106**, 688–699
- 29 Sweeney T., Meredith H., Vigors S., McDonnell M. J., Ryan M., Thornton K. and O'Doherty J. V. (2017) Extracts of laminarin and laminarin/fucoidan from the marine macroalgal species *Laminaria digitata* improved growth rate and intestinal structure in young chicks, but does not influence *Campylobacter jejuni* colonisation. *Animal Feed Science and Technology* **232**, 71–79
- 30 Bouwhuis M.A., Sweeney T., Mukhopadhyaya A., McDonnell M.J., O'Doherty J.V. (2017) Maternal laminarin supplementation decreases *Salmonella typhimurium* shedding and improves intestinal health in piglets following an experimental challenge with *S. typhimurium* post-weaning. *Animal Feed Science and Technology* **223**, 156–168
- 31 Lynch M.B., Sweeney T., Callan J.J., O'Sullivan J.T., O'Doherty J.V. (2010) The effect of dietary *Laminaria* derived laminarin and fucoidan on intestinal microflora and volatile fatty acid concentration in pigs. *Livestock Science* **133**, 157–160
- 32 Reilly P., O'Doherty J.V., Pierce K.M., Callan J.J., O'Sullivan J.T., Sweeney T. (2008) The effects of seaweed extract inclusion on gut morphology, selected intestinal microbiota, nutrient digestibility, volatile fatty acid concentrations and the immune status of the weaned pig. *Animal* **2**, 1465–1473
- 33 Miao H.Q., Elkin M., Aingorn E., Ishai-Michaeli R., Stein C.A., Vlodaysky I. (1999) Inhibition of heparanase activity and tumor metastasis by laminarin sulfate and synthetic phosphorothioate oligodeoxynucleotides. *Int J Cancer.* **83**, 424–431
- 34 Ji, C.-F. and Ji, Y.-B. (2014) Laminarin-induced apoptosis in human colon cancer LoVo cells. *Oncology letters* **7**, 1728–1732
- 35 Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates
- 36 Arena M., Auteri D., Barmaz S., Bellisai G., Brancato A., Brocca D., Bura L., Byers H., Chiusolo A. and Court Marques D. et al. (2017) Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance laminarin. *EFSA* **15**, 622
- 37 Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz - PflSchG)
- 38 Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV). DüMV
- 39 Düngegesetz \*)
- 40 VERORDNUNG (EG) Nr. 1831/2003 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. September 2003 über Zusatzstoffe zur Verwendung in der Tierernährung
- 41 Register of feed additives, pursuant to Regulation (EC) No 1831/2003

- 42 VERORDNUNG (EG) Nr. 183/2005 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Januar 2005 mit Vorschriften für die Futtermittelhygiene
- 43 Futtermittelverordnung [http://www.gesetze-im-internet.de/futtmv\\_1981/FuttMV\\_1981.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/futtmv_1981/FuttMV_1981.pdf)
- 44 Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB) <http://www.gesetze-im-internet.de/lfgb/LFGB.pdf>
- 45 Peschke C (2007) EG-ÖKO-BASISVERORDNUNG VERORDNUNG (EG) Nr. 834/2007 DES RATES vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91, ABl. Nr. L 189 vom 20.07.2007, S. 1
- 46 Peschke C DURCHFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN VERORDNUNG (EG) Nr. 889/2008 DER KOMMISSION vom 5. September 2008 mit 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, ABl. Nr. L 250 vom 18.09.2008,
- 47 Metting F. B. (1996) Biodiversity and application of microalgae. *Journal of Industrial Microbiology* **17**, 477–489
- 48 Schmid-Stiager U., Trösch W., Hirth T., Beyer L., Ripplinger P. (2011) Öko-effiziente Bereitstellung von Stoffen und Energie in einer Algen-Bioraffinerie – der 10-1 Ansatz Schlussbericht zur Studie für: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU. für: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU, TIB Hannover
- 49 Peng J., Yuan J.-P., Wu C.-F. and Wang J.-H. (2011) Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms. Metabolism and bioactivities relevant to human health. *Marine drugs* **9**, 1806–1828
- 50 Raposo M. F. d. J., Morais A. M. M. B. de and Morais R. M. S. C. de (2015) Carotenoids from Marine Microalgae. A Valuable Natural Source for the Prevention of Chronic Diseases. *Marine drugs* **13**, 5128–5155
- 51 Neumann U., Louis S., Gille A., Derwenskus F., Schmid-Staiger U., Briviba K., Bischoff S.C. (2018) Anti-inflammatory effects of *Phaeodactylum tricornutum* extracts on human blood mononuclear cells and murine macrophages. *Journal of Applied Phycology*, 1–10
- 52 Romero García J. M., Ación Fernández F. G. and Fernández Sevilla J. M. (2012) Development of a process for the production of L-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology* **112**, 164–170
- 53 Ursu A.-V., Marcati A., Sayd T., Sante-Lhoutellier V., Djelveh G. and Michaud P. (2014) Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology* **157**, 134–139
- 54 Tibbetts S. M., Bjornsson W. J. and McGinn P. J. (2015) Biochemical composition and amino acid profiles of *Nannochloropsis granulata* algal biomass before and after supercritical fluid CO<sub>2</sub> extraction at two processing temperatures. *Animal Feed Science and Technology* **204**, 62–71
- 55 Becker E. W. (2007) Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology advances* **25**, 207–210
- 56 AERTOs Team: Zusammenschluss europäischer Großforschungseinrichtungen (SINTEF, SP, VTT, TNO, VITO, Tecnalia, FHG) (2016) Bioökonomie-Projekt - gemeinsame Marktstudie
- 57 Wijffels R. H., Barbosa M. J. and Eppink M. H. M. (2010) Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* **4**, 287–295
- 58 UBIC Consulting (2018) The World Beta-Glucan Ingredient Market. Science, Market, Application, Manufacturers, Regulation
- 59 Syngenta <https://www.syngenta.com/~media/Files/S/Syngenta/our-industry-syngenta.pdf>. S. 36
- 60 BMEL & BÖLW. (n.d.). Anteil der Anbaufläche im ökologischen Landbau an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland in den Jahren 1996 bis 2016. In Statista - Das Statistik-Portal. Zugriff am 9. Dezember 2017, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3233/umfrage/anteil-der-anbauflaeche-fuer-oekologischen-anbau-seit-1994/>.
- 61 Umweltbundesamt <https://www.umweltbundesamt.de/daten/landforstwirtschaft/pflanzenschutzmittelverwendung-in-der#textpart-4>.

- 62 BMEL BMEL. [https://www.nap-pflanzenschutz.de/fileadmin/user\\_upload/\\_imported/fileadmin/SITE\\_MASTER/content/Dokumente/Startseite/NAP\\_2013-2\\_002\\_.pdf](https://www.nap-pflanzenschutz.de/fileadmin/user_upload/_imported/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Startseite/NAP_2013-2_002_.pdf)
- 63 Statista Weltpflanzenschutzmarkt. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/183085/umfrage/umsatz-auf-dem-weltpflanzenschutzmarkt-seit-2007/>
- 64 Weiland P. (2010) Biogas production. Current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology* **85**, 849–860
- 65 Ayre J. M., Moheimani N. R. and Borowitzka M. A. (2017) Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations. *Algal Research* **24**, 218–226
- 66 Sheets J. P., Ge X., Park S. Y. and Li Y. (2014) Effect of outdoor conditions on *Nannochloropsis salina* cultivation in artificial seawater using nutrients from anaerobic digestion effluent. *Bioresource Technology* **152**, 154–161
- 67 Tao R., Lakaniemi A.-M. and Rintala J. A. (2017) Cultivation of *Scenedesmus acuminatus* in different liquid digestates from anaerobic digestion of pulp and paper industry biosludge. *Bioresource Technology* **245**, 706–713
- 68 ETAMAX – Teilprojekt Algen: Nutzung von Flüssiggärrest für die Erzeugung von lipidreicher Algenbiomasse für die energetische Nutzung (BMBF Bioenergie 2021, FKZ 03SF0350A)
- 69 Koutra E., Economou C. N., Tsafrakidou P. and Kornaros M. (2018) Bio-Based Products from Microalgae Cultivated in Digestates. *Trends in Biotechnology* doi:10.1016/j.tibtech.2018.02.015