**Vorhaben CiBELES im Rahmen Bioökonomie international**

# Kurzbericht zum Verwendungsnachweis (Teil I)

# CIBELESα

## “ Kreislaufwirtschaft zur Entwicklung einer verbesserten Strategie für nachhaltige Aquakultur”

***(Engl. “Circular Bio-Economy to Lead an Enhanced Strategy for Sustainable αquaculture”)***

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Fraunhofer IGB

| | |
|---|---|
| Förderkennzeichen: | **031B1239** |
| Laufzeit: | **01.12.2021 bis 31.01.2025** |
| Monat der Erstellung: | **05/2025** |
| Verantwortl. Autoren: | **Dr. Ulrike Schmid-Staiger, Dr.-Ing. Thomas Hahn, Dr.-Ing. Susanne Zibek** |

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1239 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

# 1 Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Aufgabenstellung des Projekts CiBELESα fokussierte sich auf die Verbesserung der Süßwasser-Aquakultur in Deutschland und Kolumbien durch die Integration von Mikroalgenkulturen. Angesichts der Tatsache, dass Salmonidenfarmen in Baden-Württemberg 56 % der deutschen Aquakultur ausmachen, wird ein dringender Handlungsbedarf bei der Abwassereinleitung und der Kostenstruktur des Futters evident. Der Einsatz von Fischmehl und Sojaproteinen, die 30-70 % der Betriebskosten ausmachen, steht im Widerspruch zu nachhaltigen Produktionspraktiken. CiBELESα befasst sich mit der Verbesserung bestehender Süßwasser-Aquakulturen in Deutschland und Kolumbien durch die Einbeziehung von Mikroalgenkulturen als technologische Option für die Rückgewinnung von Nährstoffen aus den Prozesswässern von Fischzuchtanlagen und deren Verwertung in der Mikroalgenproduktion. Die Mikroalgenbiomasse kann widerum bisherige Futtermittelbestandteile ersetzen oder Hochwertprodukte wie Omega-3-Fettsäuren oder Carotinoide daraus gewonnen werden. Insbesondere die Phosphorrückgewinnung und dessen Einsatz in der Mikroalgenproduktion sollten getestet werden. In einer ersten Studie sollten die technischen, ökonomisch-ökologischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Kreislaufführung von Nährstoffen in Süßwasser-Aquakulturen ermittelt werden. Im CiBELESα-Projekt sollten daher auch der optimale Abwasser-/Reststoffstrom einer ausgewählten Aquakulturanlage identifiziert, Phosphor daraus extrahiert und Mikroalgen damit kultiviert werden.

Ziel des Projekts war es daher, ein Konzept zu entwickeln, das eine nachhaltige Wertschöpfungskette für ländliche Produktionsanlagen fördert. Die spezifischen Ziele des Projekts beinhalteten die Bewertung bestehender Aquakultur-Systeme in Bezug auf ihre technischen Möglichkeiten Phosphor zurückzugewinnen, die Optimierung der Produktionsbedingungen für Mikroalgen sowie die Untersuchung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen durch Ökobilanzen (LCA) sowie die Identifizierung von regulatorischen Rahmenbedingungen, die den Erfolg des Ansatzes beeinflussen könnten. Insbesondere die ökonomischen Auswirkungen von Prozessen zur effektiven Rückgewinnung hochwertiger Inhaltsstoffe aus Algenbiomasse sollten betrachtet werden. Der wissenschaftliche Stand, an den angeknüpft wird, umfasst innovative Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus Aquakulturabwässern mithilfe von Mikroalgen, die Kultivierung von Mikroalgen in Photobioreaktoren und die Gewinnung von Hochwertprodukten, die in Futtermitteln eingesetzt werden können. Insbesondere die Phosphorrückgewinnung und dessen Einsatz in der Mikroalgenproduktion sollte getestet werden.

Mit diesen Maßnahmen soll ein nachhaltiges Bioökonomiemodell etabliert werden, das insbesondere für Gemeinden in empfindlichen Ökosystemen von Bedeutung ist. Die Ergebnisse werden durch gezielte Aktivitäten zur technologischen Übernahme und Ergebnisverbreitung unterstützt, auch in Richtung Projektpartner UNAB in Kolumbien, um den Wissens- und Technologietransfer zu gewährleisten.

# 2 Ablauf des Vorhabens

Der Projektbeginn von CiBELESα war der 01.12.21. Offizielles Projektende war der 30.11.24, die Laufzeit wurde jedoch noch um drei Monate verlängert. Grund dafür waren die Erstellung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Bestellverzögerungen und leichte Verzögerungen in den experimentellen Arbeiten.

In AP1 wurde zunächst eine Baseline-Studie zu Süßwasser-Aquakultursystemen in Deutschland durchgeführt. Ziel war es, technische, ökonomische und regulatorische Rahmenbedingungen zu analysieren. Dabei zeigte sich u.a., dass sich Kaltwasserdurchflussanlagen nur eingeschränkt für Mikroalgenintegration eignen, während Kreislaufanlagen dank höherer Nährstoffkonzentrationen bessere Bedingungen bieten. Für die Phosphorrückgewinnung aus Kaltwasserdurchlaufanlagen wurde deshalb eine dort anfallende Feststoffraktion ausgewählt.

In AP2 lag der Fokus auf der Entwicklung und Validierung technischer Verfahren zur Phosphorrückgewinnung und Algenkultivierung. In AP2.1 wurden Reststoffströme aus Kaltwasserdurchlaufanlagen untersucht. AP2.2 optimierte die Aufbereitung dieser Abwässer, damit Phosphor in gelöster Form vorliegt. Anschließend wurde in AP2.3 der Photobioreaktor-Betrieb für *Phaeodactylum tricornutum* etabliert, bevor AP2.4 mögliche Wertstoffe (z.B. Carotinoide, Omega-3-Fettsäuren) und geeignete Extraktionsmethoden prüfte. AP2.5 ergänzte dies mit einem Konzept zur Integration in Biogasprozesse.

Im AP3 folgten eine Lebenszyklus- (LCA) und techno-ökonomische Analyse (TEA), wobei bereits vorhandene Ergebnisse zum Kostentreiber Energie und zur Skalierungsproblematik genutzt wurden. Der hohe Strombedarf der Algenproduktion stand im Mittelpunkt.

Das AP4 diente der Einführung der Technologie. Hierbei intensivierte man den Austausch mit dem Projektpartner in Kolumbien und organisierte Workshops, um Fachwissen zur Kreislaufwirtschaft weiterzugeben.

Abschließend wurden im AP5 die Projektergebnisse in Fachkreisen sowie über verschiedene Netzwerke verbreitet, und ein gemeinsamer Workshop zur kreislauforientierten Bioökonomie durchgeführt.

# 3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse

Übergeordnetes Ziel von CIBELESα war es zu bewerten ob die Integration der Algentechnik in bestehende Süßwasser-Aquakulturen eine technologische Option für die Rückgewinnung von Nährstoffen aus den Prozesswässern von Fischzuchtanlagen ist. Zusätzlich sollte evaluiert werden ob die Lösung wirtschaftlich und ökologisch tragfähig ist.

Die Studie zeigt auf, dass sich Phosphor- und Stickstoffhaltige Abwässer/Reststofffraktionen aus Süßwasser-Aquakulturen prinzipiell für die Mikroalgenproduktion eignen, vorausgesetzt sie werden angemessen aufbereitet. In Kaltwasserdurchflussanlagen entstehen große Wasservolumina mit niedriger Nährstoffkonzentration, daher kommt vor allem der abgetrennte Feststoffanteil für eine Phosphorrückgewinnung infrage. In Kreislaufanlagen liegen höhere Nitrat- oder Ammoniumkonzentrationen vor, was eine direkte Algenkultivierung unterstützt.

Regulatorisch muss beachtet werden, dass Abfallströme aus Aquakulturen – sofern Algenbiomasse als Nahrungs- oder Futtermittel genutzt werden soll – strengen EU-Vorgaben unterliegen. Wirtschaftsdünger (etwa Gülle oder Kot) fällt jedoch nicht unter Abfallverordnungen, was den Einsatz in der Algenproduktion ermöglicht. Für hochwertige Algeninhaltsstoffe (z.B. Omega-3-Fettsäuren, Carotinoide, ß-Glucane) im Lebensmittelbereich gelten je nach eingesetztem Algenstamm zusätzlich Novel-Food-Regularien.

Technisch ist die Rückgewinnung von Phosphor aus Feststoffen durch Ansäuern möglich; Algen können präzipitiertes Phosphat nutzen, sobald gelöstes Phosphat im Wachstumsmedium verbraucht ist.

Ökonomische Kernherausforderung bleibt der hohe Energieaufwand bei der Algenkultivierung (v.a. Beleuchtung). Eine Kombination mit PV-Strom ist sinnvoller als die Stromerzeugung über Biogas, welche einen überproportional großen Flächenbedarf hätte. Für eine rentable Produktion werden ein Bioraffinerie-Ansatz sowie die Gewinnung mehrerer Wertstoffe empfohlen.

# 4 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Fraunhofer IGB arbeitete insbesondere mit der Universidad Autonomia de Bucamaranga (UNAB) aus Kolumbien als offizieller Partner im Rahmen des Projektes zusammen. Die kolumbianischen Vertreter hatten bei einem einwöchigen Aufenthalt in Deutschland die Gelegenheit verschiedenste Themen der Bioökonomie zu diskutieren. Zudem wurde gemeinsam der „Workshop Internacional de Bioeconomía Circular“ mit zahlreichen Vetretern aus dem Themengebiet organisiert. Dieser Workshop fand an der Universidad Autonomia de Bucamaranga (UNAB) statt. Eine engere Zusammenarbeit wurde auch auf höherer Ebene initiiert.

**Vorhaben CiBELESα im Rahmen von Bioökonomie International**

# Schlussbericht zum Verwendungsnachweis (Teil II)

# CIBELESα

**“ Kreislaufwirtschaft zur Entwicklung einer verbesserten Strategie für nachhaltige Aquakultur”**

***(Engl. “Circular Bio-Economy to Lead an Enhanced Strategy for Sustainable αquaculture”)***

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Fraunhofer IGB

| | |
|---|---|
| Förderkennzeichen: | **031B1239** |
| Laufzeit: | **01.12.2021 bis 31.01.2025** |
| Monat der Erstellung: | **05/2025** |
| Verantwortl. Autoren: | **Dr. Ulrike Schmid-Staiger, Dr.-Ing. Thomas Hahn, Dr.-Ing. Susanne Zibek** |

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1239 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

# Inhalt


**1 Ziele und Arbeitspakete des Projektes ..... 1**

**2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse der Arbeitspakete ..... 2**

**2.1 Baseline-Studie über Süßwasser-AquakulturSysteme in Deutschland (AP1) ..... 2**

2.1.1 Kritische Überprüfung von Normen / Verordnungen (AP1.1) ..... 2

2.1.2 Technische Ausgangssituation (AP1.2) ..... 2

2.1.3 Ökonomisch-ökologische Ausgangssituation (AP1.3) ..... 3

**2.2 Kultivierung von Mikroalgen und Gewinnung von Bioprodukten (AP2) ..... 3**

2.2.1 Bewertung von Aquakulturabwässern als Mikroalgenmedium (AP2.1) ..... 4

2.2.2 Aufbereitung von Aquakulturabwässern (AP2.2) ..... 5

2.2.3 Aufbau von Bioreaktoren (AP2.3) ..... 7

2.2.4 Gewinnung von hochwertigen Inhaltsstoffen (AP2.4) ..... 9

2.2.5 Erarbeitung eines Konzepts für unterstützende Systeme (AP2.5) ..... 10

**2.3 Nachhaltigkeitsbewertung und wirtschaftliche Analyse (AP3.1. und AP3.2) ..... 12**

**2.4 Einführung der Technologie (AP4) ..... 13**

**2.5 Verbreitungs- und Kommunikationsstrategie (AP5) ..... 16**

2.5.1 Wissenschaftliche Kommunikation (AP5.1) ..... 16

2.5.2 Netzwerke aufbauen (AP5.2) ..... 16

2.5.3 Internationaler Kurs über kreislauforientierte Bioökonomie (ICCBE) (AP5.3) ..... 16

**3 Ergänzende Informationen ..... 18**

**3.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ..... 18**

**3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ..... 18**

**3.3 Verwertbarkeit des Ergebnisses und voraussichtlicher Nutzen ..... 19**

**3.4 Erkenntnisse von Dritten ..... 19**

**3.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... 19**

**3.6 Veröffentlichungen ..... 19**

# 1 Ziele und Arbeitspakete des Projektes

Hauptziel von CIBELESα ist die Validierung eines technischen Konzepts der Süßwasseraquakultur in Verbindung mit einem System zur Kultivierung und Verarbeitung von Mikroalgen für die Herstellung von Futtermitteln und hochwertigen Inhaltsstoffen mit verbesserter Kreislaufführung von Nährstoffen und Wasser. Dies stellt ein nachhaltiges Bioökonomiemodell für Gemeinden in empfindlichen Ökosystemen dar. Folgende spezifische Ziele wurden definiert:

**Ziel 1:** Beschreibung und Bewertung des Stands der Technik von Süßwasser-Aquakultursystemen in Deutschland im Hinblick auf die technische Umsetzung und ihre wirtschaftliche, ökologische und normative Eignung zur Umsetzung (AP1).

**Ziel 2:** Feststellung der optimalen Prozessparameter für die einzusetzenden Technologien, die eine effektive und stabile Durchführung des integrierten Prozesses ermöglichen (AP2.1 bis 2.5)

Dazu wurde in AP2.1 eine Analyse und Charakterisierung von Phosphorverbindungen in Aquakulturabwässern durchgeführt, um die Bioverfügbarkeit dieser für das Wachstum von Mikroalgen zu bestimmen. Ein Konzept zur Umwandlung von unlöslichen Phosphorverbindungen in bioverfügbaren Phosphor mit dem Ziel, diesen aus den Abwässern der Aquakultur zu entfernen (> 80 %), wurde entwickelt.

In AP2.2 wurde die Mikroalgenproduktion in Pilot-Photobioreaktoren (PBR) auf Basis von zurück–gewonnem Phosphat aus Aquakulturabwässern validiert. Ein Konzept wurde erarbeitet, um den hohen Energiebedarf für die Mikroalgenproduktionssysteme durch den Einsatz von „kohelnstoffarmen“ Systemen wie Photovoltaik und Biogas zu decken.

**Ziel 3:** Entwicklung eines vom rechtlichen Rahmen her machbaren Verfahrens zur Rückgewinnung hochwertiger Inhaltsstoffe aus der Mikroalgenbiomasse durch Nachweis einer erhöhten Bioverfügbarkeit der aufgeschlossenen Mikroalgenbiomasse und Bewertung ihrer potenziellen Verwendungsmöglichkeiten (z. B. Fischfutter, andere) (AP2.4).

Untersuchung von Valorisierungsoptionen, die neuartige Methoden für den Zellaufschluss und die Ex–traktion von Farbstoffen (z. B. Carotinoiden) für Lebensmittel oder kosmetische Anwendungen vor der Gewinnung von proteinreicher Biomasse für Futtermittel umfassen.

**Ziel 4:** Bewertung des ökologischen und ökonomischen Potenzials des technologischen Konzepts von CiBELESα auf der Grundlage der vergleichenden LCA-Methode und Ermittlung möglicher regulatorischer Hindernisse oder Marktbeschränkungen (AP3).

Neben den oben genannten Zielen waren Aktivitäten geplant, die auf die technologische Übernahme (AP4) und die Verbreitung der Ergebnisse (AP5) abzielen, um den Wissens- und Technologietransfer zu gewährleisten.

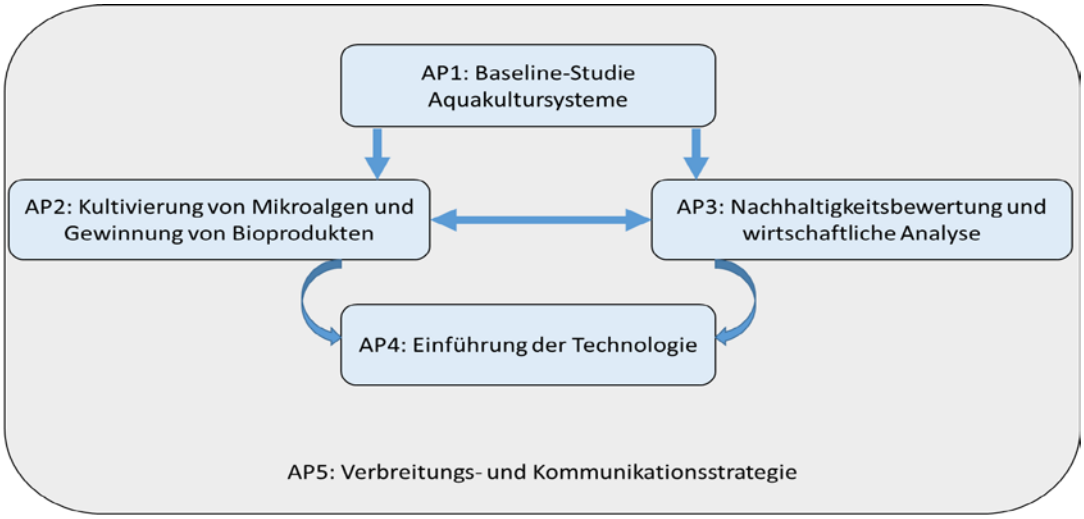


**Abbildung 1: Übersicht über die Projektstruktur und die Arbeitspakete**

# 2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse der Arbeitspakete

## 2.1 Baseline-Studie über Süßwasser-AquakulturSysteme in Deutschland (AP1)

### 2.1.1 Kritische Überprüfung von Normen / Verordnungen (AP1.1)

Bei der Nutzung von Abfallstoffströmen aus der Aquakultur für die Algenkultivierung sind entsprechend der Nutzung der Algenbiomassen für Lebens- und Futtermittel verschiedene Richtlinien zu beachten:

- In Artikel 6[1] der Verordnung (EG) Nr. 767/2009 ist die Verwendung von Abfällen und Verarbeitungsprodukten oder Gärresten aus der Vergärung von Abfällen als Beimischung zu Tierfutter untersagt.
- Wirtschaftsdünger (Gülle, Kot, Mist etc., welche als landwirtschaftlicher Dünger eingesetzt werden) gilt nicht als Abfall. Deshalb ist die Nutzung von Flüssiggärresten aus einer Biogasanlage, die Wirtschaftsdünger als Substrat einsetzt, nicht in Artikel 6 enthalten.
- Die Nutzung von Algen als Futtermittel ist geregelt in EU 68/2013 Catalogue of feed materials: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0068&rid=1
- Welche Algenbiomassen oder Bestandteile von Algen in Lebensmitteln eingesetzt werden können ist in der EU-Verordnung EU 2015/22 geregelt[2, 3]. Danach benötigen einige Algenbiomassen, die als Masse eingesetzt werden, keine Novel Food Zulassung. Sobald aber Bestandteile extrahiert wurden unterliegen diese einer Zulassung. Einige interessante Stämme wie *Phaeodactylum tricornutum*, die Hochwertprodukte enthalten, haben bisher keine Zulassung. Um eine Zulassung zu erhalten wird es als schwierig erachtet diese Biomassen mit Wirtschaftsdünger als Nährstoffquelle herzustellen.

**Fazit:** Die Nutzung und Gewinnung von Phosphor aus dem Abwasser von Aquakulturen und der Einsatz in Mikroalgenkulturen um Futtermittelbestandteile oder Lebensmittelbestandteile herzustellen ist prinzipiell möglich, da die phosphorhaltigen Feststoffe als Wirtschaftsdünger betrachtet werden können. Sollen Hochwertprodukte damit hergestellt werden ist bei Inverkehrbringen der Produkte auf die Novel Food Verordnung zu achten.

### 2.1.2 Technische Ausgangssituation (AP1.2)

Ziel dieser Studie ist die Beschreibung und Bewertung des Standes der Technik von Süßwasser-Aquakultursystemen in Deutschland im Hinblick auf die Eignung der Integration von Mikroalgen in die Kreislaufführung von Nährstoffen wie Phosphor.

- Es wurde eine intensive Literaturrecherche zu den in Deutschland genutzten Aquakultur-systemen durchgeführt mit dem Fokus auf die Nährstoffsituation, die evt. für eine Algen-kultivierung eingesetzt werden kann.
- Für die kritische Überprüfung von Normen und Verordnungen war die von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) beauftragten Studie zu den Perspektiven der Aqua-kultur in Deutschland sehr hilfreich[4]. Hier wurden die Probleme der deutschen Aquakultur-betriebe hinsichtlich der gesetzlichen Vorgaben und Genehmigungsverfahren wie z. B. Wasser-rechte ausführlich dargestellt und diskutiert.

Aus der Erarbeitung der technischen Ausgangssituation der Süßwasseraquakulturen in Deutschland wurden folgende Erkenntnisse für den Einsatz einer Algenkultivierung in Deutschland abgeleitet:

- Bei der Karpfenteichwirtschaft besteht kein Problem mit der Eintragung von Nährstoffen in Gewässer. Deshalb sehen wir hier keine Anknüpfungspunkte.
- Bei den Kaltwasserdurchflussanlagen, insbesondere zur Zucht von Forellen und Saiblingen, ist der Gehalt an gelösten Nährstoffen (N und P) gering und stark schwankend und wird in einem großen Wasservolumen stark verdünnt. Damit ist dieses Durchlaufwasser für eine Algen-kultivierung nicht geeignet. In diesen Anlagen wird die partikuläre organische Fracht in Absetzbecken separiert und wäre nach der Aufbereitung für die Algenkultivierung einsetzbar.
- Die Nährstoffsituation in Aquakulturanlagen stellt sich wie folgt dar: 50-70% des in Aqua-kulturfuttermitteln enthaltenen Stickstoffs wird wieder exkretiert, 70% davon als Ammonium

[1] ANHANG III (https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX: 32009R0767&from=DE)
[2] https://food.ec.europa.eu/safety/novel-food/novel-food-catalogue_en
[3] *Summary of applications and notifications (europa.eu) https://ec.europa.eu/food/safety/novel_food/consultation-process_en*
[4] Studie Aquakultur BLE

oder Harnstoff (wasserlöslich), 30% gebunden in Kot und Futtermittelresten. 40-60% des Phosphors in Futtermitteln wird wieder exkretiert, 30% als löslicher Phosphor, 70% ist partikulär gebunden.

- Daraus ergibt sich, dass für die Aufbereitung der Feststoffe als Algenmedium, sowohl partikulär gebundener Phosphor herausgelöst werden muss, als auch Stickstoffverbindungen in Lösung gebracht werden müssen.
- In Kreislaufanlagen wird das Haltungswasser in einer integrierten Wasseraufbereitung gereinigt. Hier wird in sogenannten Biofiltern insbesondere das Fisch-toxische Ammonium zu Nitrat oxidiert. Anschließend wird wie in Kläranlagen das Nitrat denitrifiziert und zu $N_2$ umgesetzt. Die Nitratkonzentration kann bis zu 1000 mg/l erreichen. Hier kann die Algenproduktion in den Kreislauf integriert werden, da Mikroalgen sowohl Ammonium als auch Nitrat effizient umsetzen können.
- In der Literatur ist bereits die Integration einer Algenkultivierung in die Aufbereitung von Kreislauf-Haltungswässern beschrieben[5, 6]. Der Fokus liegt aber hier auf der Verwertung von Ammonium.

**Fazit:** Aus dieser Baseline-Studie ergab sich als zukünftiges Einsatzpotential von Mikroalgen in Aquakulturbetriebe die Nutzung/Aufbereitung der partikulär gebundenen organischen Fracht in Kaltwasserdurchflussanlagen und die Nutzung von Ammonium in der Aufbereitung von Haltungswasser in sogenannten Kreislaufanlagen.

### 2.1.3 Ökonomisch-ökologische Ausgangssituation (AP1.3)

In der Studie in AP1.2 zu Süßwasser-Aquakultursystemen stellt sich die ökonomische und ökologische Ausgangssituation wie folgt dar:

- Bei den Kaltwasserdurchflussanlagen, insbesondere für Forellen und Saiblinge, ist der Gehalt an gelösten Nährstoffen (N und P) gering und stark schwankend und wird in einem großen Wasservolumina stark verdünnt. Damit ist dieses Durchlaufwasser für eine Algenkultivierung nicht geeignet.
- In diesen Anlagen wird die partikuläre organische Fracht in Absetzbecken separiert und wäre nach der Aufbereitung für die Algenkultivierung einsetzbar. Insbesondere Phosphor ist in den partikulären Bestandteilen enthalten, das in Lösung gebracht werden muss um für die Mikroalgenzucht einsetzbar zu sein. Die Menge und der Gehalt wurde in AP2 bestimmt.
- Kaltwasserdurchlaufanlagen werden zumeist von kleineren Unternehmen betrieben. Hier eine zusätzliche Algenzucht zu integrieren um Hochwertfuttermittel zu produzieren wird angesichts der Größe der Firmen als schwierig erachtet. Der technische Aufwand und der tägliche Betrieb solcher Anlagen sind für diese Kleinbetriebe oft nicht darstellbar. Hinzu kommt, dass die phosphorhaltigen Rückstände auch noch aufwändig aufbereitet werden müssen, bevor sie als Bestandteil von Algenkulturmedien eingesetzt werden können. Deshalb wurde eine aufwändige LCA-Analyse in AP3.1 und die wirtschaftliche Potenzialanalyse in AP3.2 als nicht zielführend für das Projekt angesehen.

**Fazit:** Eine wirtschaftliche Nutzung des in Süßwasser-Aquakulturanalgen enthaltenen Phosphors wird aufgrund der Betriebsgröße der Aquakulturbetriebe sehr kritisch gesehen. Der Aufwand zur Rückgewinnung des Phosphors und den Betrieb der Mikroalgenzuchtanlagen wird als zu hoch für die Betriebsgröße erachtet.

## 2.2 Kultivierung von Mikroalgen und Gewinnung von Bioprodukten (AP2)

Die Ziele dieses Arbeitspaketes sind wie folgt stichpunktartig dargestellt:

- in AP2.1 sollen Reststoffströme aus Kaltwasserdurchlaufanlagen analysiert und auf Eignung als Kulturmedium für die Algenproduktion bewertet werden.
- in AP2.2 soll ein Protokoll für den Phosphor-Rückgewinnungsprozess entwickelt werden, sowie ein Konzept für die Einbindung des rezyklierten Phosphors in den Algenproduktionsprozess in Photobioreaktoren.
- in AP2.3 soll ein Protokoll für das Photobioreaktorsystem zur Mikroalgenproduktion erstellt werden.
- in AP2.4 sollen aus der in AP2.3 erzeugten Biomasse Hochwertprodukte mit neuen technischen Methoden wie die druckbasierte Lösemittelextraktion (PLE) untersucht werden.
- In AP2.5 soll theoretisch ein Biogas-Prozessdesign mithilfe des vorhandenen Knowhows am IGB erfolgen. Dabei wird eine Algenkultivierung integriert, die auf Basis von Flüssiggärrest als

[5] Pirhonen et al. 2023 doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739242
[6] Ramli et al. 2020 doi: 10.3389/fbioe.2020.01004

Stickstoff- und Phosphorquelle betrieben werden soll. Zusätzlich wurde die Deckung des hohen Energiebedarfes für die Algenkultivierung durch Photovoltaik (Eigenstromnutzung) betrachtet

Für die Stammauswahl wurden als Kriterien sowohl die Kultivierbarkeit des Algenstammes mit zurückgewonnenem Phosphor als auch das Inhaltsstoffprofil, sowie bisherige Erfahrungen in der Aufarbeitung von Algenbiomassen, betrachtet. Der Stamm der Wahl ist *Phaeodactylum tricornutum*. Ein typisches Inhaltsstoffprofil des Stammes ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 1: Wertstoffgehalt von *Phaeodactylum tricornutum***

| Wertstoff | Gehalt in % (w/w) |
|---|---|
| Proteine | 40 – 45 |
| EPA (Omega-3-Fettsäure) | 3 – 4 |
| Fucoxanthin (Xanthophyll) | 1,2 – 1,8 |
| ß-1,3-1,6-Glucan (Chrysolaminarin) | 12 – 25 |

Das Fraunhofer IGB hat bereits viel Erfahrung mit diesem Algenstamm und dem Einsatz von Gärrest aus verschiedenen Biogasanlagen als Grundlage für Kultivierungsmedien sammeln können. Dieser Stamm wird durch weitere Inhaltsstoffe der Gärreste nicht gehemmt, so dass für die Nutzung des aufbereiteten Phosphors als mediumsbestandteile risikoarm ist.

### 2.2.1 Bewertung von Aquakulturabwässern als Mikroalgenmedium (AP2.1)

In AP2.1 wurden Reststoffströme aus Kaltwasserdurchlaufanlagen analysiert und zur Eignung als Kulturmedium für die Algenproduktion bewertet.

Ziel ist die Kultivierung von Mikroalgen auf Basis von Abwässern / Abfallströmen der Aquakultur. Zum Erhalt der Abwässer wurde der Forellenhof Rössle in Lichtenstein im Landkreis Reutlingen kontaktiert. Dieser Betrieb gehört zu den größeren Fischzuchtbetrieben in Baden-Württemberg und hat sich auf die Zucht von Süwasserfischen in einer Kaltwasserdurchlaufanlage spezialisiert. Die Proben, die vom

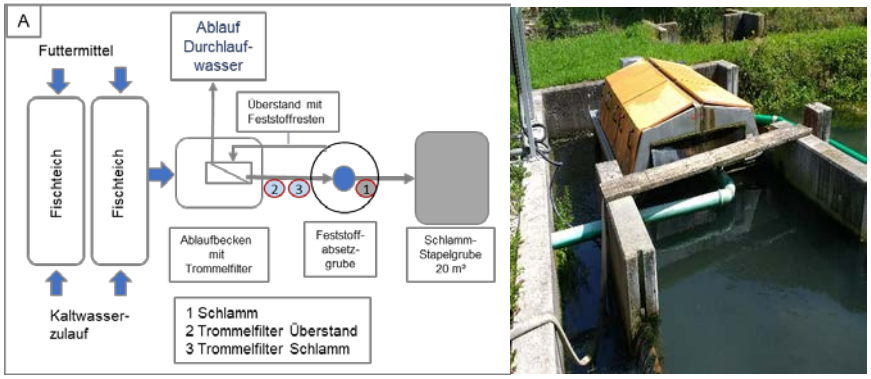


**Abbildung 2: Links: Schema der Fischzuchtanlage und Entnahmeorte der Schlammproben: [1] eingedickter Schlamm vor dem Abpumpen in den Schlammstapelbehälter, [2,3] Probe aus dem Trommelfilter, welches in Absetzbecken gepumpt wird. Rechts: Trommelfilter zur Separation der Feststoffe aus den Abläufen der Fischteiche.**

Forellenhof Rössle zur Verfügung gestellt wurden, wurden mittels Trommelfilter generiert (siehe Abbildung 2). Dieser war im gemeinsamen Ablauf der verschiedenen Fischteiche positioniert. Der Ablauf der Fischteiche strömt über den Trommelfilter in den Gesamtablauf der Anlage in den Bach Echaz. Auf der Filteroberfläche im Innern setzen sich vor allem Fischkot und Futtermittelreste ab. Dem Trommelfilter wurden Proben entnommen und diese in Behälter gefüllt.

Der Inhalt des Trommelfilters wird mit etwas zusätzlichem Wasser ein- oder zweimal pro Tag in eine Absetzgrube gepumpt. Der Überstand der Absetzgrube wurde wiederum über den Trommelfilter gepumpt und dann in den Ablauf der Fischteichanlage. Aus der Absetzgrube wird ein- bis zweimal täglich der Schlamm in einen Stapelbehälter gepumpt, welcher zweimal pro Jahr geleert wird. Aus der Absetzgrube wurde eine Probe entnommen (Schlamm, Probe 1) und analysiert (siehe Abbildung 2).

Die Proben aus dem Trommelfilter (Probe 2 und 3, siehe Abbildung 2) wurden nach der genannten Inkubationszeit sedimentiert und im weiteren Verlauf untersucht: Ablauf Trommelfilter Sediment (Sediment TF); Ablauf Trommelfilter Überstand (Überstand TF).

Zur Bewertung der Eignung dieser Ströme zur Kultivierung von Mikroalgen wurde eine Analyse der chemischen Zusammensetzung durchgeführt. Einige Messungen konnten nur mit Proben durchgeführt

werden, die einen hohen Wassergehalt aufwiesen. Bei dem Schlamm wurde daher der Überstand nach Fest-Flüssig-Trennung vermessen. Die Ergebnisse können Tabelle 2 entnommen werden:

**Tabelle 2: Analysenergebnisse der Abwasserströme vom Forellenhof Rössle. Die Messungen sind das Ergebnis von Triplikaten, die Standardabweichungen wurden der Einfachheit halber nicht angegeben. $BM_{ges}$ = Gesamte Biomasse; n.b. = keine Analyse durchgeführt; .- = nicht detektierbar; TR = Trockenrückstand nach Eintrocknen der Probe; oTR = organischer Anteil der Biofeuchtmasse; aTR = anorganischer Anteil der Biofeuchtmasse; CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf; $PO_4$-$P_{gel}$ = Orthophosphatkonzentration in wässriger Phase (gemessen mit Hach-Lange (HL); $N_{ges}$ = Gesamtstickstoff ($NH_3$, $NO_3$-) über Kjeldahl; EA = Elementaranalyse des Trockenrückstandes.**

| | **Schlamm (Probe 1)** | | **Sediment TF (Probe 2)** | **Überstand TF (Probe 3)** |
|---|---|---|---|---|
| | $BM_{ges}$ | Überstand | $BM_{ges}$ | $BM_{ges}$ |
| **pH** | n.b. | 5,1 | 5,8 | 7,7 |
| **oTR [%]** | 10,55 | - | 2,51 | - |
| **aTR [%}** | 1,84 | - | 0,97 | - |
| **CSB [mg/L]** | 166800 | 19222 | 28870 | 56 |
| **$PO_4$-P [mg/L]** | 2009* | 137 | - | - |
| **$SO_4$ [mg/L]** | - | 33 | - | 16 |
| **Cl [mg/L]** | - | - | - | 25 |
| **F [mg/L]** | - | - | - | < 0,35 |
| **$N_{ges}$ [mg/L]** | 1730 | 1244 | n.b. | 4 |

*2009 mg/L $PO_4$-P resultiert in einem theoretischen freizusetzenden $PO_4$-Gehalt von 6161 mg/L.

Weitere Daten wurden mit Proben gewonnen, die an gleicher Stelle, jedoch zu einem anderen Zeitpunkt genommen wurde. Im Bezug auf die Zusammensetzung zeigten sich nicht relevante Unterschiede aber z. T. auch signifikante Schwankungen: Die Zusammensetzung der Proben aus dem Trommelfilter zeigten deutliche Differenzen was jedoch auf die weiteren Untersuchungen keine Auswirkung haben sollte.

Die Bewertung der Daten erfolgte anhand der verschiedenen relevanten Parameter bzw. anhand der unterschiedlichen Fraktionen:

- Der pH-Wert lag für den Schlamm und die Probe aus dem abgesetzten Ablauf bei etwa 5,1-5,8. Dies deutet auf eine Ansäuerung durch Mikroorganismen und damit auch auf eine längere Lagerung bei Umgebungstemperatur hin.
- Die Trockenrückstände (TR) des Schlamms und Sediment TF sind im für Klärschlämme üblichen Bereich. Der Feststoff-Anteil im Ablauf des Trommelfilter war nicht messbar, d. h. die Feststoffe werden effizient vom Trommelfilter zurückgehalten.
- Der CSB des Schlamms liegt deutlich über den Werten die üblicherweise bei Klärschlämmen gemessen werden.
- Nur für den Schlamm konnten kleinere Mengen an Mangan (≤13,7 mg/kg) und Chrom (≤1,71 mg/kg) knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze detektiert werden. Die Werte für Blei, Cadmium, Nickel, Kupfer waren für alle Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze.
- Die Konzentrationen der relevanten Bestandteile ($PO_{4,\ ges}$, $N_{ges}$) in den Proben des Trommelfilters sind für die Mikroalgenkultivierung zu niedrig (Probe 2 und 3).

**Fazit:** Die Proben aus dem Trommelfilter sind nährstoffarm. Diese Fraktion ist nicht zum direkten Umsatz in Biomasse geeignet, könnte jedoch eventuell zur Einstellung der Nährstoffkonzentration bzw. zur Verdünnung anderer Fraktionen genutzt werden. Die Probe „Schlamm“ ist aufgrund der Bestandteile – insbesondere auf Basis des hohen Phosphorgehaltes – für eine Anwendung in der Mikroalgenkultivierung geeignet.

### 2.2.2 Aufbereitung von Aquakulturabwässern (AP2.2)

Zur Anwendung des Schlamms aus der Aquakultur für die Mikroalgenkultivierung mussten die Feststoffe zunächst separiert werden. Um eine möglichst hohe Nährstoffkonzentration im Überstand zu gewährleisten sollte jedoch zumindest der größte Teil des im Feststoff gebundenen Phosphors in die flüssige Phase transferiert werden. Es wurden daher noch einmal Maßnahmen durchgeführt um die Nährstoffsekretion aus dem Feststoff in den Überstand zu forcieren. Die angewendeten Methoden waren chemischer oder enzymatischer Natur.

***Enzymatische und chemische Freisetzung des Phosphats***

Zunächst wurde untersucht inwiefern der Einsatz von Phytase die Freisetzung von gebundenem Phosphor als Phosphat unterstützt. Phytase ist ein Enzym welches Phytat in Inosit und eben Phosphat umwandelt. Aufgrund seiner breiten Selektivität können auch weitere organische Phosphorsubstrate umgewandelt werden. Um zu vermeiden, dass das potentiell durch die Phytase freigesetzte Phosphat nicht durch die im Feststoff vorhandenen Metallionen unter Bildung schwerlöslicher Salze präzipitiert, erfolgte bei einem Teil der Probe eine Ansäuerung.

Beim Ansatz **oPhyt$_{pH\ 2}$** wurde der pH-Wert der Originalprobe von 5,3 auf 2 eingestellt, bei der Probe **Phyt$_{pH\ 2}$** wurde die Probe vor pH-Einstellung auf 2 zunächst noch mit Phytase inkubiert. Bei **Phyt** wurde die Phytase bei dem Original-pH eingesetzt – ohne nachfolgende pH-Einstellung. Bei allen Ansätzen wurde nach Separation vom Rückstand die Lösung auf pH 7 eingestellt. Ein Teil des Schlamms wurde ohne Zusätze oder pH-Adaption lediglich bei gleichen Bedingungen inkubiert, separiert vom Rückstand und nachfolgend der Überstand auch auf pH 7 eingestellt (**oPhyt**).

**Tabelle 3: Vergleich der verschiedenen Ansätze zur Freisetzung von Phosphat aus dem Schlamm. $PO_4$ bezeichnet den Phosphatgehalt in der Lösung nach pH-Einstellung auf 2, und Separation des Feststoffs. $PO_{4,\ pH\ 7}$ bezeichnet den Gelöst-Phosphatgehalt nach pH-Einstellung auf pH 7. Bei der Probe OPhyt wurde die Ausgangsprobe direkt separiert und der Phosphatgehalt im Überstand mit und ohne Neutralisation gemessen.**

| | **oPhyt** | **oPhyt$_{pH\ 2}$** | **Phyt** | **Phyt$_{pH\ 2}$** |
|---|---|---|---|---|
| **$PO_4$ [mg/L]** | 462 | 5450 | 679 | 5266 |
| **$PO_{4,\ pH\ 7}$ [mg/L]** | 293 | 181 | 403 | 153 |

Die Ausgangsprobe (oPhyt) enthält einen (potentiellen) Gesamtgehalt an Phosphat von 6161 mg/L (s Tabelle 2 Anmerkung). Den Ergebnissen in Tabelle 3 nach zu urteilen konnte allein durch Ansäuern 85-88 % des im Feststoff enthaltenen Phosphats in Lösung gebracht werden. Lediglich im Vergleich zu nicht angesäuerten Ansätzen (OPhyt) zeigte sich im enzymatisch behandelten Schlamm mehr Phosphat in Lösung (11 %) als im unbehandelten Schlamm (8 %). **Der Einsatz eines Enzyms ist somit wirtschaftlich nicht sinnvoll**.

Die Einstellung eines pH-Wertes von 7 ist für eine spätere Anwendung als Substrat zur Mikroalgenkultivierung notwendig. Hier zeigte sich, dass die durch Ansäuern freigesetzten Phosphate wieder als Metallionenphosphate präzipitieren bzw. die Lösung trüben. Auf Basis der Untersuchungen zur Kultivierung kann jedoch gesagt werden, dass das Phosphat auch in dieser Form von den Mikroalgen verwertet werden kann, da präzipitiertes Phosphat wieder in Lösung ging, sobald die Gelöst-Phosphatmenge verbraucht war (siehe Kapitel 2.2.3 AP2.3).

Eine noch höhere Konzentration an Phosphat – um die Lösung in einem Fütterungsexperiment zu verwenden – könnte durch Evaporation der Flüssigkeit des Schlamms und der direkten Suspension des Feststoffs in einem geringeren Volumen an wässriger Lösung mit geringem pH-Wert erreicht werden. Diese höherkonzentrierte Lösung könnte dann mit einem geringeren Volumen zugefüttert werden.

***Herstellung größerer Volumina an höherkonzentrierten Phosphatlösungen***

Um die Mikroalgenkultivierung mit einer aus dem Schlamm freigesetzten Nährstofflösung systematisch untersuchen zu können, mussten größere Mengen bereitgestellt werden. Gleichzeitig sollte die Lösung eine höhere Konzentration an Phosphat aufweisen. Zur Durchführung der Phosphatfreisetzung im nächsthöheren Maßstab wurden größere Mengen einer neuen Schlammcharge vom Forellenhof Rössle erhalten.

Um größere Mengen an Phosphat aus dem Schlamm in einem geringeren Volumen an Wasser freizusetzen wurde zunächst der Rohschlamm im gesamten (8 L) evaporiert. Um dies möglichst schonend durchzuführen wurden die Proben lyophilisiert. Bei der Temperatur-basierten Trocknung besteht demgegenüber immer die Gefahr von unerwünschten Nebenreaktionen. Das Lyophilisat wurde nachfolgend in 0,5 M HCl suspendiert, sodass ein pH von 2,2 resultierte. Hierbei zeigte sich, dass das mindestens einzustellende Fest-Flüssig-Verhältnis bei 1:8 lag. Höhere Anteile an Feststoff führten dazu, dass sich (1) kein Überstand generieren ließ und (2) auch keine Homogenisierung möglich war.

Die Suspension (S/L-Verhältnis: 1:8) wurde 24 h bei RT inkubiert. Nach Separation des Überstands wurde dieser neutralisiert und der Mikroalgenkultivierung zur Verfügung gestellt. Zum Vergleich wurde eine Probe Rohschlamm mit konz. HCl direkt auf pH 2 titriert, inkubiert und der Überstand danach separiert.

Gegenüber der Vergleichsprobe nach Ansäuern (1990 mg/L) konnte durch Lyophilisierung und nachfolgende Aufnahme in einer wässrigen Lösung mit niedrigem pH-Wert, mit einer Konzentration von 4290 mg/L, eine Aufkonzentrierung von 2,15 erreicht werden. Auffällig ist zunächst, dass aus der Freisetzung eine gegenüber der vorherigen Charge geringere Phosphatkonzentration im Überstand erreicht

werden kann (1990 gegenüber 5450 mg/L). Dies weist auf eine große Batch-zu-Batch-Variation hin, wobei vor allem die Jahreszeiten einen relevanten Einfluss auf die Konzentration der Inhaltsstoffe haben dürfte. Der eher geringe Aufkonzentrierungsfaktor beruht höchstwahrscheinlich darauf, dass das Lyophilisat zur Generierung eines Überstands wieder in einem größeren Volumen an pH-saurem Wasser suspendiert werden musste. Trotzdem konnte der Überstand effektiv zur Mikroalgenkultivierung eingesetzt werden.

Um den Aufkonzentrierungsgrad signifikant zu erhöhen und ein geringeres Volumen des Überstandes in den Mikroalgenkultivierungen einsetzen zu müssen, sollte künftig der Überstand des Rohschlammes nach Ansäuern und Separation evaporiert und dann der resultierende Feststoff in einem geringeren Volumen suspendiert werden. Zusätzlich würde sich auch anbieten, den Stickstoff, sei es als Ammonium oder Nitrat, als zweiten Hauptparameter neben dem Phosphat zu betrachten. Unter Berücksichtigung der Batch-zu-Batch-Variation und der damit auch verbundenen geringeren Phosphatkonzentrationen ist eine stetige Anpassung der Fütterungsstrategie im nachfolgenden Prozess der Mikroalgenkultivierung notwendig.

### 2.2.3 Aufbau von Bioreaktoren (AP2.3)

Für die Wachstumsversuche zur Verwertung von solubilisiertem Phosphat aus AP2.2 wurden 6 L-Flachplatten-Airliftreaktoren eingesetzt, die bereits verfügbar waren.

#### *Beschreibung des eingesetzten Photobioreaktorsystems*

Die Versuche zum Einsatz von Phosphatlösungen aus der Aufbereitung von Fischabwässern wurden in 6 L-Flachplatten-Airlift-Reaktoren mit 3 cm Schichtdicke durchgeführt. Die Reaktoren sind mit einer speicherprogrammierbaren Steuerungseinheit (SPS, Siemens) mit Bedienpanel versehen (siehe Abbildung 3). Die Reaktoren wurden einseitig mit warmweißen LEDs (Nichia, mit Farbtemperatur 3000 K) der Fa. Lumitronix beleuchtet. Die Photonenflussdichte (µmol Photonen/m² *s) auf der Reaktoroberfläche kann über das Bedienpanel eingestellt werden (siehe Abbildung 3 [H]).

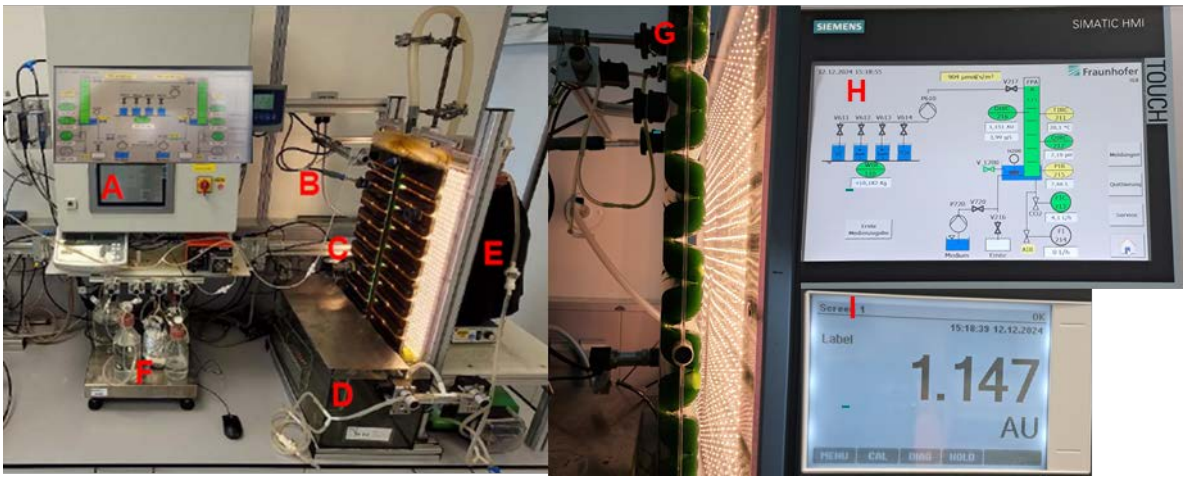


**Abbildung 3: 6 L-FPA-Reaktor mit einseitiger Beleuchtung über LEDs. Über die Steuerung kann die Lichtintensität, die auf die Reaktoroberfläche einstrahlt, auf die Biomassekonzentration im Reaktor angepasst werden (spezifische Lichtverfügbarkeit in µmol Photonen g $TS^{-1}$ $s^{-1}$); [A] Steuerung mit Touchpad Interface, [B] pH- und Temperatur-Sensor, [C] Drucksensor für die Füllstandkontrolle, [D] Wasserbad für die Temperierung der Kultur, [E] Mediumszufuhr, [F] Nährstoff-Lösungen (Ammonium/Nitrat und Phosphat) die über eine Waage mit der Steuerung zudosiert werden können. Die rechte Abbildung zeigt unter [G] die Integration eines AU-Sensors zur online-Erfassung der optischen Dichte [I], über die die Beleuchtungsintensität automatisch in der Steuerung [H] angepasst werden kann.**

#### *Ergebnis der Algenkultivierung mit aufbereiteter Phosphat-Lösung aus AP2.2*

Die Untersuchungen zur Solubilisierung in AP2.2 haben gezeigt, dass Phosphat bei saurem pH-Wert in Lösung geht, bei Alkalisierung der Phosphat-Lösung jedoch ein Teil des Phosphats wieder ausfällt. Deshalb wurde getestet, ob die Lösung bei neutralem pH-Wert auch mit präzipitiertem Phosphat anwendbar ist. Dadurch, dass dem System immer wieder gelöstes Phosphat durch die Mikroalgen entnommen wird, sollte sich das Lösungsgleichgewicht auch auf diese Seite schieben. So kann auch ungelöstes Phosphat als P-Quelle für die Algenproduktion eingesetzt werden. In drei Versuchsreihen wurde das in AP2.2 aufbereitete Phosphatlösung auf Wachstum von *Phaeodactylum* im 6 L-Photobioreaktor getestet.

Abbildung 4 zeigt das Wachstum von *Phaeodactylum tricornutum* auf der in AP2.2 isolierten Phosphat-Lösung. 200 mg/L Gesamt-Phosphat wurde zu Beginn der Kultivierung zugegeben und jeweils zweimal

nachgefüttert. Insgesamt wurde aus der zugegebenen Menge an Phosphat 8,6 g/L Biotrockenmasse produziert. Das entspricht 14 g Biotrockenmasse erzeugt pro g verbrauchtem Phosphat. Dieser Wert ist niedriger als von Kontrollversuchen mit diesem Stamm und der eingesetzten gelösten Phosphat-Lösung. Eine Erkläung wäre, dass Mikroalgen wie *Phaeodctylum tricornutum* Phosphat intrazellulär speichern und bei Phosphatmangel im Medium das gespeicherte Phosphat reaktivieren können. Steht wieder Phosphat im Medium zur Verfügung kommt es zu einer schnellen Phosphataufnahme um die Speicher wieder aufzufüllen. Dies ist der sogenannte „luxury uptake“.

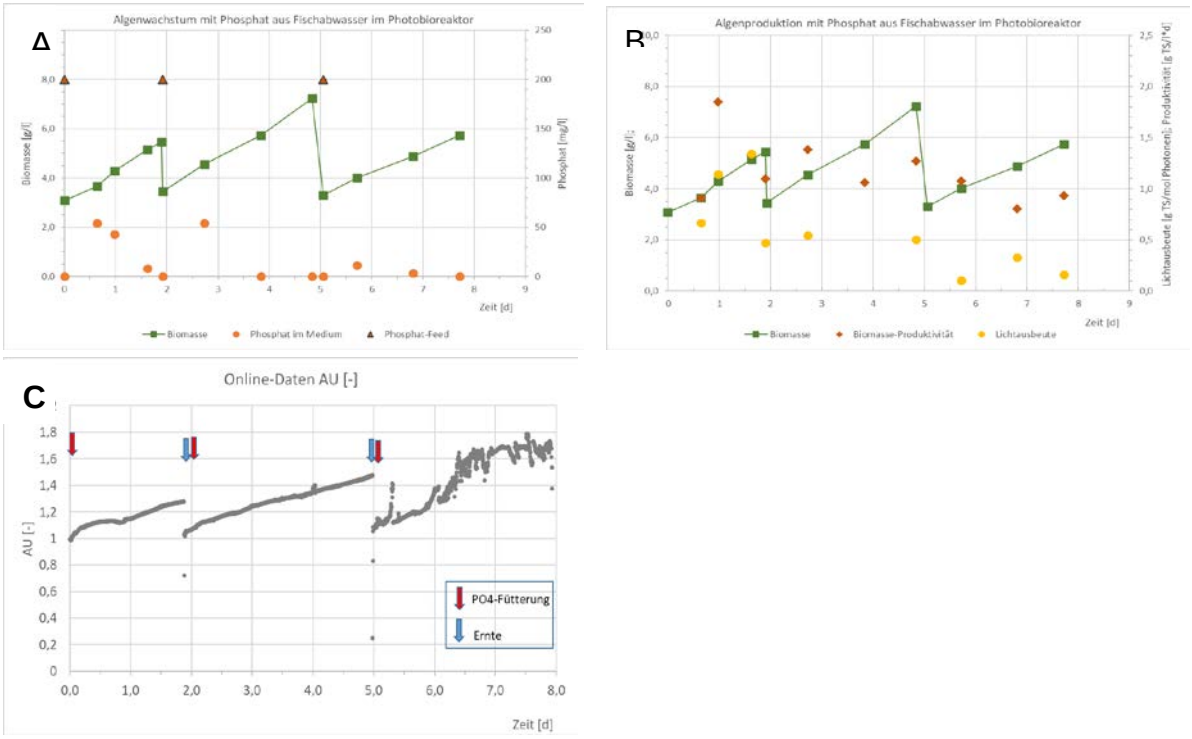


**Abbildung 4: Wachstum von *Phaeodactylum tricornutum* auf solubilisiertem Phosphat im 6 L FPA- Reaktor (einseitig beleuchtet). Die Phosphat-Lösung (200 mL $OPhyt_{pH2}$ ad 6 L Reaktorvolumen entsprechen 200 mg/L $PO_4$) wurde zum Start der Kultivierung vorgelegt, alle anderen Parameter wurden wie in AP2.3 beschrieben eingestellt. Nach 2 und 5 Tagen wurden erneut Phosphat-Lösung entsprechend 200 mg/L $OPhyt_{pH2}$ -Lösung zugegeben. [A] Wachstum und Phosphatverbrauch nach Zugabe von 3 x 200 mg/L solubilisiertes Phosphat. [B] Biomassezunahme und daraus berechnete Biomasseproduktivität (in g TS $L^{-1}d^{-1}$). Die Lichtausbeute (in g TS/mol Photonen) wurde aus der Lichtintensität auf der Reaktor-oberfläche (in µmol Photonen $m^{-2}$ $s^{-1}$) und der Biomasseproduktivität (in g TS $L^{-1}d^{-1}$) berechnet. [C] Verlauf der online-OD-Messung (in Absorption Units) aus der die Biomassekonzentration berechnet werden kann, sowie mit den Zeitpunkten für Ernte (nach 2 und 5 Tagen) und Phosphatzugabe bei 0, 2 und 5 Tagen.**

Die Biomasseproduktivität und Lichtausbeute ist zwischen 0 und 5 Tagen nahezu vergleichbar mit Kontrollversuchen. Zwischen Tag 2 und 5 war die Kultur wahrscheinlich nicht P-limitiert, da präzipitiertes Phosphat nicht gemessen wurde. In der eingesetzten Charge der aufbereiteten Phosphat-Lösung waren auch Schwebstoffe enthalten, die nach der dritten Zugabe zu einer deutlich sichtbaren Trübung der Kultur führten. Dies kann auch die Lichteindringung in die Kultur beeinträchtigen und dies wiederum führt zu einer niedrigeren Biomasseproduktivität und Lichtausbeute (siehe Abbildung 4, Tag 5-8). Die produzierte Algenbiomasse hatte die in Tabelle 4 aufgeführte Zusammensetzung.

**Tabelle 4: Wertstoffgehalt der mit solubilisiertem Phosphat erhaltenen Phaeodactylum-Biomasse.**

| Wertstoff | Gehalt in % (w/w) |
|---|---|
| Proteine | 52 - 59 |
| EPA (Omega-3-Fettsäure) | 2,5 – 3,4 |
| Fucoxanthin (Xanthophyll) | 0,5 – 0,7 |
| ß-1,3-1,6-Glucan (Chrysolaminarin) | 5 - 7 |

### 2.2.4 Gewinnung von hochwertigen Inhaltsstoffen (AP2.4)

Ursprünglich sollte in diesem AP aus der in AP2.3 produzierten Algenbiomasse Hochwertprodukte extrahiert und evt. die Reststoffe nach der Extraktion als Futtermittel eingesetzt werden.

Für die Herstellung von Hochwertprodukten aus Mikroalgen wie beispielsweise Carotinoide, Omega-3-Fettsäuren oder ß-1,3-Glucane darf keine Biomasse eingesetzt werden, die auf Basis von Abfallstoffen produziert worden ist. Die in AP2.2 gewonnene Phosphat-Lösung aus den abgetrennten Fischfutter- und Kotresten von Durchlaufanlagen als Wirtschaftsdünger definiert werden und extrahiertes Phosphat für die Herstellung von Lebens- und Futtermittel eingesetzt werden. Möglich wäre auch eine anaerobe Vergärung der Fischfutter- und Kotreste in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zusammen mit Gülle und Pflanzenmaterial wie Maissilage. Gärrest aus solchen Anlagen kann für die Lebensmittelproduktion eingesetzt werden. Der Einsatz von so hergestellter Algenbiomasse in Kosmetika wird allerdings von der Industrie als nicht erwünscht angesehen.

Das Fraunhofer IGB hat in mehreren Projekten wie derzeit das RoKKA-Projekt (Rohstoffquelle Klärschlamm und Klimaschutz auf Kläranlagen, EFRE-Förderprojekt des Landes Baden-Württemberg Vorgangsnummer 2076348) bereits gezeigt, dass Algenstämme wie *Phaeodactylum tricornutum* sehr gut auf Flüssig-Gärrest als Basis für Kulturmedien wachsen können.

Die Gewinnung von Hochwertprodukten aus *Phaeodactylum*-Biomasse sowohl mittels PCT-Technologie, als auch subkritischer Extraktion mit Lösemitteln wurde bereits untersucht (Diss. F. Derwenskus, Universität Stuttgart, 2021 und EPICES-Projekt Effiziente Primärraffination von Mikroorganismen durch die Integration von Zellaufschluss und Separation am Beispiel von Mikroalgen, FKZ: 031B0669) und im EPICES-Projekt bereits eine TEA und LCA-Untersuchung im Vergleich zwischen verschiedenen Aufarbeitungsmethoden durchgeführt. Um die Aufarbeitung mittels PCT-Technik durchzuführen sind mehrere Kilogramm Algenbiomasse nötig, deren Herstellung nur in Pilotanlagen mit entsprechender Größe und Dauer möglich ist. Für die Aufbereitung des Phosphats aus den Fischzuchtabwässern für eine Pilotproduktion in diesem Maßstab stand nicht ausreichend Material zur Verfügung. Auch stand die dafür benötigte Menge an Schlammfeststoffen mit entsprechendem Phosphorgehalt nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung.

Die subkritische Extraktion von EPA, Fucoxanthin und weiteren Carotinoiden wurde mit noch verfügbarer Phaeodactylum-Biomasse erneut durchgeführt. Da das Hochwertprodukt Fucoxanthin durch hohe Temperaturen > 100°C zerstört wird, wurde getestet ob bei niedrigeren Temperaturen (25, 50 70, 80 und 100°C) und kürzeren Verweilzeiten (5 und 10 min) die Extraktion mit den Lösemitteln Ethanol, Aceton und Ethylacetat verbessert werden kann. Eine weitere Verbesserung der Extraktionsausbeute und eine Reduktion des Energie- und Lösemittelbedarfes konnte leider nicht erzielt werden.

Aufgrund der nicht verfügbaren großen Menge an *Phaeodactylum*-Algenbiomasse wurde für die Bewertung der Gewinnung von möglichen Algenwertstoffen auf die Optimierung der PCT-Technologie verzichtet. Dafür kann auf bereits vorhandene Ergebnisse zur Gewinnung von Wertstoffen aus *Phaeodactylum*-Biomasse zurückgegriffen werden[7], die u.a. auch in die LCA und wirtschaftliche Analyse in AP3 eingeflossen sind. Für die potentielle Gewinnung von Wertstoffen wurden die Analysen aus AP2.3 herangezogen. Danach ist für einen wirtschaftlichen Prozess ein Bioraffinerieansatz unbedingt erforderlich um die Wertschöpfung aus der erzeugten Algenbiomasse zu erhöhen. In Abbildung 5 ist eine Mikroalgenbioraffinerie mit Kaskadenextraktion von Proteinen, Chrysolaminarin, Fucoxanthin und EPA dargestellt, die aufgrund der Hochwertprodukte Fucoxanthin und Chrysolaminarin zu einer hohen Wertschöpfung führt (siehe auch Tabelle 6 in AP2.5). Die Produktion von Chrysolaminarin, einem wasserlöslichen ß-1,3-Glucan wurde in der Arbeitsgruppe intensiv untersucht und publiziert [8,,9]. Der Einsatz dieses löslichen ß-Glucans in der Jungfischaufzucht wurde bereits in Zusammenarbeit mit der portugiesischen Firma SPAROS Lda untersucht[10]. Die Gewinnung dieser ß-Glucane ist technisch relativ einfach durchzuführen, sofern wie beim Einsatz in der Fischzucht keine große Aufreinigung erforderlich ist.

---

[7] Derwenskus F., Schäfer B., Müller J., Frick K., Gille A., Briviba K., Schmid-Staiger U. and Hirth T. (2020): Coproduction of EPA and Fucoxanthin with *P. tricornutum* – A Promising Approach for Up- and Downstream Processing. Chem. Ing. Tech. 2020, 92, No. 11, 1780-1789; DOI: 10.1002/cite.202000046

[8] Frick, K., Ebbing, T., Yeh, YC. et al. Beta-glucan production of *Phaeodactylum tricornutum, Monodopsis subterranea* and *Cylindrotheca fusiformis* during nitrogen depletion. J Appl Phycol (2023). https://doi.org/10.1007/s10811-023-03026-8

[9] Frick K, Ebbing T, Yeh YC, Schmid-Staiger U, Tovar GEM. Influence of light conditions on the production of chrysolaminarin using *Phaeodactylum tricornutum* in artificially illuminated photobioreactors. Microbiology open. 2023 Oct;12(5):e1378. doi: 10.1002/mbo3.1378.

[10] Reis B et al. (2021): Immune Status and Hepatic Antioxidant Capacity of Gilthead Seabream Sparus aurata Juveniles Fed Yeast and Microalga Derived β-glucans. Mar Drugs. 2021 Nov 23;19(12):653. doi: 10.3390/md19120653

[11] https://www.igb.fraunhofer.de/%20content/dam/igb/documents/publications/berichte/2019/Holaflor_Schlussbericht_BMEL_FKZ22011613.pdf

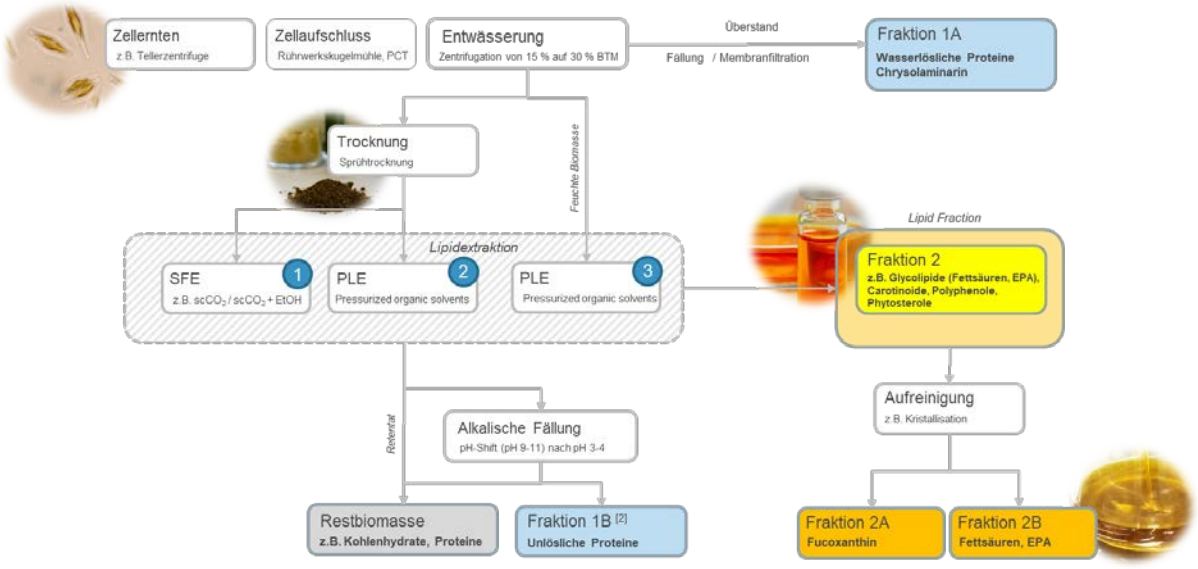


**Abbildung 5: Beispiel für eine Mikroalgenbioraffinerie mit Kaskadenextraktion von Proteinen, Chrysolaminarin, Fucoxanthin und EPA.**

### 2.2.5 Erarbeitung eines Konzepts für unterstützende Systeme (AP2.5)

Ein wesentlicher ökologischer Nachteil der verfügbaren Technologien zur Gewinnung von Inhaltsstoffen aus Mikroalgen ist das Fehlen eines akzeptablen energetischen Autonomiegrades. Hierzu sollte ein Konzept für ein unterstützendes System erarbeitet werden, das auf der Annahme basiert, dass die Energie aus einer Biogasanlage stammt, die beliebige Prozessnebenströme und vor Ort verfügbare landwirtschaftliche Biomasse aufnimmt. Diese theoretische Studie basiert auf Daten aus bestehenden Pilotanlagen am Fraunhofer IGB.

Die Mikroalgenproduktion bietet große Chancen:

- Mikroalgen verfügen über eine Fülle von Inhaltsstoffen in hohen Konzentrationen für die Verwendung in der Ernährung oder der Futtermittelproduktion,
- können effizient in Photobioreaktoren kultiviert werden, was den Landbedarf und den Wasserverbrauch minimiert im Vergleich zur landwirtschaftlichen Produktion,
- können in der Kreislaufwirtschaft zur $CO_2$-Nutzung und Nährstoffrückgewinnung eingesetzt werden,
- können zur Reduzierung von $CO_2$-Emissionen eingesetzt werden.

Daraus ergeben sich aber auch Anforderungen an die Algenproduktion:

- skalierbare Anlagentechnik für die Massenproduktion,
- hohe Qualität der Biomasse ermöglicht erst eine hohe Wertschöpfung,
- Bioraffinerie-Ansatz für die Nutzung der gesamten Biomasse zur Erhöhung der Wertschöpfung,
- Kostensenkung auf Produktionsebene durch Reduzierung der Anlagenkosten CAPEX,
- Kostensenkung der Betriebskosten OPEX durch Prozessintensivierung (hohe Biomasseproduktivität bei gleichzeitig hoher Lichtausbeute, Automatisierungsgrad, energieeffiziente Prozesse durch Einsatz von LEDs) und
- effiziente Verarbeitungsmethoden (Ernte, Zellaufschluss, Extraktion). Auch hier hat die Wahl der Methode Einfluss auf den Energiebedarf.

Dem Energiebedarf sowohl für die Algenproduktion als auch die Aufarbeitung der Algeninhaltsstoffe kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Somit hat die Herkunft des Stromes einen sehr großen Einfluss auf die Kosten für die Algenproduktion und Gewinnung der Inhaltsstoffe. Der deutsche Strommix und die Stromkosten bei Bezug aus dem Netz sind die Kostentreiber, aber sie tragen auch erheblich zur Erhöhung des Carbon Footprint bei.

Deshalb wurde ein Konzept erstellt, den Strombedarf über die Kopplung an eine Biogasanlage oder die Stromherstellung über PV zu decken, d. h. die Eigenstromnutzung bei der Algenproduktion und Gewinnung von Hochwertprodukten soll überprüft werden, und ob die Eigenstromnutzung wirtschaftlich

tragfähig ist. Die Daten für eine landwirtschaftliche Biogasanlage und deren Biogas- bzw. Stromausbeute stammen aus dem Projekt Holaflor des Fraunhofer IGB[11]. Die Daten für die Stromerzeugung aus PV wurden der Fraunhofer ISE-Studie von 2024[12] entnommen.

Der Energiebedarf für die Algenproduktion in künstlich beleuchteten Flachplatten-Airlift-Reaktoren wurde in abgeschlossenen und laufenden Projekten bereits ermittelt. Der Energiebedarf für die Aufarbeitung zur Gewinnung von Algeninhaltsstoffen entstammt der TEA aus dem BMBF-Projekt EPI-CES (FKZ 031B0669, Laufzeit bis 06-2023), das bereits in AP2.4 beschrieben wurde.

Als Berechnungsbasis wurde die Produktion von 10 t Algenbiomasse in LED-beleuchteten Flachplatten-Airlift-Reaktoren zu Grunde gelegt. Im Jahr 2024 wurden die Daten für die Produktion von 10 t Algenbiomasse und insbesondere den dafür erforderlichen Strombedarf ermittelt, wobei im Labor noch keine effiziente neue LED-Technologie zum Einsatz kam, die den Strombedarf reduzieren würde. Im optimalen Prozessfenster für die Produktion von *Phaeodactylum tricornutum* werden 100 – 150 kWh/kg Biomasse benötigt. Dieser Wert kann durch neue effiziente LED-Technik auf 80 – 100 kWh/kg Biomasse gesenkt werden (eigene Abschätzung). Für die Aufarbeitung wurde lt. EPI-CES-Projekt ein Strombedarf von 50 – 70 kWh/kg Biomasse ermittelt. Dies ergibt dann zusammen einen Strombedarf von 150 – 220 kWh/kg Biomasse.

Für die beiden Szenarien Biogas- und PV-Stromeigennutzung wurde über den Strombedarf für 10 t Algenbiomasse und einer spezifischen Stromproduktion in der Biogasanlage von 1481 $kWh_{el}$ /t oTR der Gesamtbedarf an Biomasse für die Stromgenerierung berechnet (siehe Tabelle 5). Dieser Biomassebedarf war die Grundlage für die Berechnung des Flächenbedarfes (16 t Trockengewicht/ha für Maissilage) und 100 kWh/m²*Jahr für PV-Strom. In Tabelle 6 ist die potentielle Wertschöpfung aus 10 t Algenbiomasse berechnet worden.

**Tabelle 5: Vergleich der Stromerzeugung über Biogas und PV zur Herstellung von 10 t Algenbiomasse. Zugrunde liegt ein Strombedarf von 150 – 220 kWh/kg Algenbiomasse (inkl. Aufarbeitung). Für die Stromerzeugung über PV wurde ein Stromertrag von 1000 kWh/m² *Jahr zugrundegelegt[13].**

| **Vergleich Stromerzeugung** | **Biogas** | **PV** |
|---|---|---|
| Strombedarf um 10 t Algenbiomasse herzustellen [$MWh_{el}$ Strom /a] | 1500 – 2200 | 1500 – 2200 |
| Biomassebedarf um für 10t Algenbiomasse Strom herzustellen [ t] | 1013 – 1485 | 0 |
| Flächenbedarf für Biogasanlage bzw. PV für Strombedarf um 10 t Algen zu produzieren [ha] | 46 – 69 | 0,15 – 0,2 |

Aus den obigen Berechnungen ist ersichtlich, dass die Erzeugung von Strom über Biogas aus Biomasse nicht zielführend ist, da über 1000 t Biomasse wie Maissilage benötigt wird, das entspricht 46 – 69 ha Agrarfläche die benötigt würden um 10 t Algenbiomasse zu produzieren. Die Wärmeproduktion über Biogas ist hier nicht berücksichtigt.

Die Stromproduktion über PV ist demgegenüber auch in Deutschland sehr effizient und benötigt eine sehr viel kleinere Fläche als die Biogastechnik. Auch sind die Stromgestehungskosten laut der Fraunhofer ISE-Studie[12] sehr viel geringer mit 5-7 €Cent/kWh.

[11] https://www.igb.fraunhofer.de/%20content/dam/igb/documents/publications/berichte/2019/Holaflor_Schlussbericht_BMEL_FKZ22011613.pdf

[12] https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html

[13] https://www.wiwo.de/technologie/wirtschaft-von-oben/wirtschaft-von-oben-200-billige-sonnenenergie-aus-diesen-kraftwerken-wird-strom-nur-1-cent-pro-kilowattstunde-kosten/29016634.html

**Tabelle 6: Potentielle Wertschöpfung aus 10 t Algenbiomasse mit spezifischem Inhaltsstoffprofil.**

| Potentielle Wertschöpfung pro Jahr aus 10 t Algenbiomasse | |
|---|---|
| 1,0% Fucoxanthin zu 10000€/kg | 1.000.000 € |
| 3,5% EPA zu 200 €/kg | 70.000 € |
| 50% Protein zu 10 €/kg Food | 50.000 € |
| 50% Protein zu 2 €/kg Feed | 10.000 € |
| 20 % Chrysolaminarin für Feed zu 200 €/kg | 400.000 € |

**Fazit:** Der Strombedarf für die Algenproduktion und Aufarbeitung ist derzeit noch so hoch, dass eine Algenproduktion nur über PV-Eigenstromnutzung und der Produktion von Hochwertprodukten, die in einem Bioraffinerieansatz genutzt werden, wirtschaftlich darstellbar ist.

## 2.3 Nachhaltigkeitsbewertung und wirtschaftliche Analyse (AP3.1. und AP3.2)

Ziel der LCA- bzw. TEA-Analyse sind die Identifíkation der Kostentreiber und Optimierungspotentiale hinsichtlich der Kopplung von Algenproduktion und Aufarbeitung/Gewinnung von Hochwertprodukten aus Algenbiomasse. Dies wurde bereits im BMBF-Projekt EPI-CES[14] mit Laufzeit bis 09-2022 durch einen Unterauftragnehmer durchgeführt. Bei der Antragstellung und auch zu Beginn des CiBELESα Projektes lagen die Ergebnisse noch nicht vor. Nach Vorliegen der Ergebnisse wurde die Erstellung einer weiteren LCA und TEA durch einen externen Dienstleister nicht beauftragt, da nach unserer Einschätzung keine weiteren Erkenntnisse mit Mehrwert für das Projekt daraus entstehen würden. Die Kreislaufführung von Phosphor über die Algenproduktion trägt kaum zur Kostenreduktion bei und würde sich nur marginal in der Lebenszyklusanalyse auswirken.

Folgende Ergebnisse wurden bereits als Kostentreiber und daraus Optimierungspotentiale sowohl für die Kultivierung von Algen als auch die Aufarbeitung von Algenbiomasse und die Gewinnung von Wertstoffen ermittelt:

- Kostentreiber sind vor allem die Energiekosten und die Investmentkosten für die einzelnen Prozessschritte.
- Bei der Algenproduktion in LED-beleuchteten Photobioreaktoren machen die Stromkosten ca. 60 – 65 % der Gesamtkosten aus.
- Bei der Auswahl an Aufarbeitungsschritten sollte aus energetischer Sicht die Sprühtrocknung nach dem Zellaufschluss mit der Druckwechseltechnik (PCT) durch andere Verfahren wie das PGSS-Verfahren ersetzt bzw. ergänzt werden, und die Extraktion mit $scCO_2$ sollte durch eine subkritische Extraktion mit „grünen“ Lösemitteln ersetzt werden. Aber durch die hohen Investkosten für die PCT-Technologie kommt es zu keiner Kostenersparnis bei Integration des Trocknungsschrittes mit dem Zellaufschluss in einem Gerät, im Vergleich zu den Einzelschritten Zellaufschluss und Trocknung mit etablierten Methoden.
- Bei der $scCO_2$-Extraktion muss die zu extrahierende Biomasse getrocknet sein, die subkritische Extraktion (pressurized liquid extraction, PLE) kann auch mit feuchter Biomasse (max. 70 % Wassergehalt) durchgeführt werden, d. h. nach Zellaufschluss und der Fest-Flüssig-Trennung (Separation) kann die partikuläre nasse Biomasse mit PLE extrahiert werden. Letztendlich entscheidet aber die Anwendung der Extrakte oder Feststoffe welche Prozessschritte kombiniert werden, da sich auch die Zusammensetzung der Extrakte je nach eingesetzter Extraktionsmethode ändern, wie Ergebnisse aus dem EU-Projekt MAGNIFICENT gezeigt haben.
- Bei der Extraktion ist es wichtig, dass die Wiedergewinnungsrate der eingesetzten Lösemittel überkritisches $CO_2$ und Ethanol hoch angesetzt wird, da diese sonst einen hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, dies gilt vor allem für den Einsatz von $CO_2$. Die Rückgewinnung der Lösemittel über eine Vakuumdestillation macht nur ca. 1 % der Gesamtkosten aus. Bei beiden Extraktionsmethoden wurde der Einsatz der Lösemittel optimiert.
- Man darf nicht nur die Kosten betrachten, sondern die Qualität der aufbereiteten Biomassen spielt im Lebensmittelbereich eine große Rolle. Hier hat insbesondere die PCT-Technik mit produktschonenden Betriebsparametern Vorteile.

[14] TI-Bioraffinerien: EPI-CES - Effiziente Primärraffination von Mikroorganismen durch die Integration von Zellaufschluss, Extraktion und Separation am Beispiel von Mikroalgen. Förderkennzeichen: 031B0669; Laufzeit: 20-2018 bis 09-2022.

- Bei der Anwendung von Algeninhaltsstoffen in Futtermitteln sind die Kosten für die Algenproduktion und die Aufarbeitung noch wichtiger, da hier mit kostengünstigen herkömmlichen Inhaltsstoffen wie Fischmehl und Fischöl bzw. pflanzenbasierten Inhaltsstoffen konkurriert wird.

Diese Ergebnisse fließen auch in die Konzepterstellung in AP2.5 ein.

## 2.4 Einführung der Technologie (AP4)

Die Zusammenarbeit mit dem Partner aus Kolumbien, der Universität von Bucamaranga, wurde etabliert. Hierzu erfolgte ein Besuch von Wissenschaftlern der Universidad Autonomia de Bucamaranga UNAB, Professor Alexander Meneses-Jácome, PhD and Mrs Tatiana Guarín-Corredor, PhD. Der Hauptzweck des Besuchs bestand darin, sich kennenzulernen und sich intensiv über das gemeinsame Projekt CiBELESα auszutauschen. Des Weiteren wurde über Konzepte der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft in beiden Ländern, Kolumbien und Deutschland, insbesondere im Bereich der Ernte von Mikroalgen und der Verwertung von Algenbiomasse als Rohstoff für Lebensmittel und Futtermittel, diskutiert.

Aber auch Themen aus anderen Innovationsfeldern des Fraunhofer IGB wie Wasserbehandlung, Ressourcenrückgewinnung (N, P), Aquaponik, Biogastechnik, neue Proteinquellen und Industrielle Biotechnologie wurden vorgestellt. Für den einwöchigen Besuch im Fraunhofer IGB wurde die in Tabelle 7 aufgeführte Agenda erstellt.

Die Projektpartner waren insbesondere an den Bioökonomie-Aktivitäten des Fraunhofer IGBs interessiert, die durch das Land Baden-Württemberg und das BMBF gefördert werden.

Während des Besuchs der Projektpartner aus Kolumbien wurde die Forellenzucht der Firma Forellenhof Rössle in Honau-Lichtenstein besucht. Es fand ein intensiver Austausch zu Produktionsbedingungen von Süßwasserfischen in Deutschland statt.

**Tabelle 7: Agenda der kolumbianischen Delegation in Deutschland während des einwöchigen Besuchs.**

| Time / day | | Researcher host or speaker | Position | Topic / Activity |
|---|---|---|---|---|
| Monday (Aug. 14th) | Morning 10:00 am | Ulrike Schmid-Staiger | Algae Biotechnology \| Group Manager Algae Biotechnology Development – Fraunhofer IGB | Welcome and general introduction of Fraunhofer IGB organization and vision, as well, main research topics and projects of the Algae Biotechnology Group |
| | | Alexander Meneses-Jácome<br>Tatiana C. Guarín Corredor | Director of Center "ε-BiO" at UNAB<br>Technical and Scientific leader of the "CiBELESα" project at UNAB | Presentation of the UNAB Circular Bioeconomy Center to Fraunhofer Institute staff |
| | Afternoon 02:30 pm | Grzegorz Kubik | Head of the Industrial Biotechnology Innovation Field – Fraunhofer IGB | Introduction of IF Industrial Biotechnology process development, waste streams, up-scaling |
| | 03:30 pm | Konstantin Frick | Researcher at Algae Biotechnology Group – Fraunhofer IGB | Lab visit: Algae Biotechnology Group |
| Tuesday (Aug. 15th) | morning 10:00 am | Ursula Schließmann | Deputy Head of the Institute – Fraunhofer IGB | Circular Bioeconomy at Fraunhofer IGB |
| | afternoon 01:30 pm | Lukas Kriem | Water technologies, resource recovery and scale-up \| Group Manager Bioprocess Engineering and Microbiology – Fraunhofer IGB | Presentation and discussion with the colleagues from the Innovation Field Water Technologies and Resource Recovery. |
| | | | | Bioeconomy Project "Future Proteins": Material flow analysis and material flow coupling |
| | | | | Lab visit: Nexus-hub and aquaponics project. |
| | 02:30 pm | Philipp Zeitner | Researcher leading the "urban BioEconomyLab" project, for the Baden-Württemberg Region – Fraunhofer IGB | Urban Bioeconomy Lab |
| | 03:30 pm | Diego Eufracio Lucio | Researcher at Water technologies, resource recovery and scale-up & Bioprocess Engineering and Microbiology Groups– Fraunhofer IGB | Biogas technology, nutrient recovery (phosphate, ammonium) in wastewater processes |
| Wed. (Aug. 16th) | morning 09:00am | Thomas Hahn | Senior Researcher at Industrial Biotechnology and Bioprocess Engineering Group – Fraunhofer IGB | Presentation and discussion with the colleagues from the Innovation Field Industrial Biotechnology . |
| | | | | IM1 introduction: from insects to tensids, bioeconomy projects |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | Phospate recovery from biomass |
| | | Fredy Baron Nunez | Researcher at the Biotechnology and Bioprocess Engineering Group – Fraunhofer IGB | lab visit: Industrial Biotechnology Group |
| | afternoon | Ulrike Schmid-Staiger<br>Konstantin Frick | Algae Biotechnology \| Group Manager Algae Biotechnology Development – Fraunhofer IGB<br>Researcher at Algae Biotechnology Group – Fraunhofer IGB | Meeting for Workshop preparation on circular bioeconomy at UNAB (Colombia) in 2024 |
| Thursday (Aug. 17th) | Full day 10.00 am to 6.00 pm | Ulrike Schmid-Staiger<br>Konstantin Frick | *Idem.* | Visit of a fish farm in Honau,<br>Forellenhof Rössle |
| Friday (Aug. 18th) | Morning 9 am. | Ulrike Schmid-Staiger<br>Konstantin Frick | *Idem.* | Follow-up of the exchange between UNAB and Fraunhofer IGB |
| Saturday (Aug. 19th) | morning | | | Farewell and trip back to Colombia |

## 2.5 Verbreitungs- und Kommunikationsstrategie (AP5)

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es

- in AP5.1 die Idee und Ergebnisse des Projektes im wissenschaftlichen Bereich zu kommunizieren;
- in AP5.2 das Projekt in Netzwerken zu teilen;
- in AP5.3 ein Workshop zur kreislauforientierten Bioökonomie beim Projektpartner UNAB zu organisieren.

### 2.5.1 Wissenschaftliche Kommunikation (AP5.1)

Das Thema Circular Bioeconomy und Sustainability war Thema im Fortbildungskurs von EIT Food: Algae Biotechnology – Techniques and Opportunities for the Sustainable Bioeconomy. Der Kurs wurde zusammen mit drei europäischen Partner-Institutionen organisiert und hat im November 2023 und 2024 online stattgefunden. Der Präsenzkurs dazu fand im April 2024 in Cambridge, UK und im April 2025 am Fraunhofer IGB statt. Hier wurde die Algenbiotechnologie des Fraunhofer IGB vorgestellt u. a. die Nutzung von Gärresten für die Algenproduktion.

Die Vorträge beim Workshop des kolumbianischen Projektpartners an der UNAB in Bucaramanga werden in SpringerNature im Juni 2025 veröffentlicht: https://link.springer.com/book/9783031843587.

**Editors: Alexander Meneses-Jácome, Ulrike Schmid-Staiger , Tatiana C. Guarín**

- Introduces circular economy and bioeconomy concepts as applied to industry practices
- Looks at finance and governance for the circular economy and the bioeconomy
- Examines scientific implementation in research and biotechnology

In diesem Buch sind u.a. die Vorträge enthalten von

- Ulrike Schmid-Staiger & Konstantin Frick: Biorefineries based on Coupling of Wastewater and Microalgae: Developments of algal Biotechnology. Proceedings of Workshop Internacional de Bioeconomía Circular UNAB Colombia 9th - 10th of April 2024. ISBN 978-3-031-84358-7,
- Thomas Hahn & Susanne Zibek: Recent Developments in Biorefinery with Special Focus on Industrial Biotechnology. Proceedings of Workshop Internacional de Bioeconomía Circular UNAB Colombia 9th - 10th of April 2024. ISBN 978-3-031-84358-7

### 2.5.2 Netzwerke aufbauen (AP5.2)

- Im Kontext Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft ist das Fraunhofer IGB in mehreren Netzwerken aktiv. Algeninhaltsstoffe für die Aquakultur und deren Aufarbeitung sind Themen in der Allianz Ernährungswirtschaft der Fraunhofer Gesellschaft. Hier ist die Algengruppe vertreten und bringt so v. a. das Thema Kreislaufwirtschaft ein.
- Das Fraunhofer IGB ist maßgeblich an der Entwicklung einer Landesstrategie für eine „Nachhaltige Bioökonomie für Baden-Württemberg“ beteiligt. Hier ist u.a. die Phosphorrückgewinnung aus Rest- und Abfallstoffen ein Thema. Der Beitrag der Algenbiotechnologie ist Bestandteil der Strategie.
- Mit mehreren der Teilnehmer am Internationalen Workshop der Zirkulären Bioökonomie sind Kontakte geknüpft worden. Weitere Aktivitäten wie eine gemeinsame Antragstellung bei MinCiencias in Kolumbien sind geplant und inzwischen eingereicht worden.

### 2.5.3 Internationaler Kurs über kreislauforientierte Bioökonomie (ICCBE) (AP5.3)

Ein Workshop mit Beteiligung des Fraunhofer IGBs an der Universität Bucamaranga wurde im April 2024 durchgeführt, unter Federführung der Arbeitsgruppe von Prof. Alexander Meneses-Jácome. Am 10. April, dem Fraunhofer’s Day haben fünf Mitarbeiter des Fraunhofer IGB in Präsenz oder per Video ihre Themen auf dem *Workshop Internacional de Bioeconomia Circula*r (https://unab.edu.co/workshop-internacional-de-bioeconomia-circular/) präsentiert.

## Día 1 (9 de abril) - "Bioeconomy 2020" day

**11:15 a.m. a 12:15 a.m.**
Estrategias regionales de bioeconomía para áreas urbanas – Evento virtual
**Orador:** Ph.D. Philip Zeitner (Alemania)
**Participante:** Urban Bioeconomy Lab – Fraunhofer Insititute IGB

## Día 2 (10 de abril) - Fraunhofer's day

**7:30 a.m. a 8:25 a.m.**
Registro

**8:30 a.m. a 9:15 a.m.**
Investigación aplicada para biotecnología y bioeconomía: La visión del Instituto Fraunhofer
**Orador:** Ursula Schließmann (Alemania)
**Participante:** Deputy Head of Institute Fraunhofer Insititute IGB (Sttutgart)

**9:20 a.m. a 10:15 a.m.**
Bioeconomía para la seguridad alimentaria: insectos y otras nuevas fuentes de proteína
**Orador:** Ph.D. Lukas Kriem (Alemania)
**Participante:** Group Manager Bioprocess Engineering and Microbiology – Fraunhofer Institute for Interfacial Engineering and Biotechnology IGB Fraunhofer Insititute IGB

**11:15 a.m. a 12:15 a.m.**
Innovaciones y nuevos desarrollos en biotecnología industrial
**Orador:** Dr.-Ing. Thomas Hahn (Alemania)
**Participante:** Industrial Biotechnology & Bioprocess Engineering Group – Fraunhofer Institute IGB

**4:25 p.m. a 5:25 p.m.**
Biorefinerías Basadas en Acoplamiento de Aguas Residuales y Microalgas: Desarrollo de Biotecnlogía Algal
**Moderador:** Dr. Ulrike Schmid-Staiger (Alemania)
**Participante:** Group Leader Algae Biotechnology Development Innovation, Field Industrial Biotechnology, Fraunhofer Institute IGB

Drei der Vorträge erscheinen im Juni 2025 bei SpringerNature in der Buchserie „Waste as a Resource“ als Proceedings dieses Workshops:

1. Ulrike Schmid-Staiger & Konstantin Frick: Biorefineries based on Coupling of Wastewater and Microalgae: Developments of algal Biotechnology.
2. Thomas Hahn & Susanne Zibek: Recent Developments in Biorefinery with Special Focus on Industrial Biotechnology.
3. Lukas Kriem & Adna Saletovic: Perspective on coupled agricultural systems for a profitable and sustainable production of high-quality food proteins.

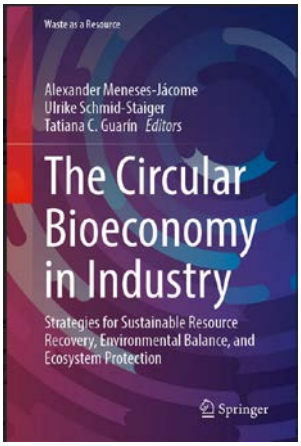


**Abbildung 6: Das gemeinsam mit UNAB veröffentlichte Buch**

# 3 Ergänzende Informationen

## 3.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Aufwendungen für Personal sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises. Die Kapazitäten wurden vorwiegend für die nachfolgenden Arbeiten aufgewendet:

- Zunächst wurden begrenzt Kapazitäten für die Baseline-Studie über Süßwasser-Aquakultursysteme in Deutschland eingesetzt. Die regulatorische als auch technologische Ausgangssituation wurde ermittelt. Dazu gehört auch die ökonomische und ökologische Ausgangssituation.
- Die Hauptaufwendungen wurden für die Entwicklung von Methoden zur Phosphorrückgewinnung aus Kaltwasserdurchlaufanlagen und den Einsatz der solubilisierten Phosphatfraktion für Wachstumstest in Photobioreaktoren eingesetzt. Für die Gewinnung von Hochwertprodukten aus der produzierten Algenbiomasse wurden bisher eingesetzte Extraktionsmethoden überprüft. Ein Konzept zur Deckung des hohen Energiebedarfes für die Algenkultivierung und Aufarbeitung wurde mit Daten aus dem Fraunhofer-Projekt HOLAFLOR entwickelt.
- Für die Nachhaltigkeitsbewertung und wirtschaftlichen Analyse wurde kein Unterauftrag erteilt, da auf die bereits durchgeführte LCA- bzw. TEA-Analyse die Kostentreiber und Optimierungspotentiale identifiziert wurden. Die dafür geplanten Ausgaben von 75.000 € wurden nicht dafür verwendet und werden deshalb auch nicht abgerufen.
- Vor Projektbeginn waren Investmittel zur Anschaffung eines 150-L-Behälters für die PCT (Pressure-Change-Technologie) geplant. Da der Mikroalgenaufschluss damit im kleinen Maßstab nicht wie gewünscht funktionierte, setzt man auf alternative Methoden wie Hochdruckhomogenisator und Rührwerkskugelmühle. Stattdessen wurden die Mittel alternativ – nach Rücksprache mit dem Projektträger – für einen Gefriertrockner und ein UV/Vis-Spektrophotometer verwendet. Der Gefriertrockner wurde genutzt, um bei niedrigen Temperaturen die Schlämme zu evaporieren und so die resultierende Phosphatlösung aufzukonzentrieren. Das UV/Vis-Spektrophotometer wurde zur Analytik von Stickstoff, Phosphor und CSB, also allgemein zur Bewertung der Mikroalgenkultivierung verwendet.
- Die geplanten Reisemittel wurden für die Reise nach Kolumbien und Teilnahme am Workshop der Universidad Autonomia de Bucamaranga UNAB eingesetzt. Die Teilnahme von Dr. Ulrike Schmid-Staiger und Dr. Thomas Hahn wurde über dieses Projekt finanziert. Die Reise des dritten Teilnehmers, Dr. Lukas Kriem, aus dem Fraunhofer IGB wurde durch die UNAB finanziert.

## 3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Frauhofer IGB war in CiBELESα alleiniger deutscher Projektbeteiligter. Dementsprechend wurden auch alle administrativen, organisatorischen, regulatorischen und praktischen Aufgaben vom IGB selbst erledigt: Die Aufnahme des Stands der Technik und der regulatorischen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen waren notwendig um das Potential und die Eignung der in CiBELESα umzusetzenden Arbeiten bewerten zu können. Die geleisteten Arbeiten zur Nährstoffbestimmung und -rückgewinnung aus Aquakulturabwässern waren notwendig um die Eignung zum Einsatz in der Mikroalgenkultivierung und der daraus folgenden Gewinnung von hochwertigen Inhaltsstoffen durchführen und einschätzen zu können. Die Bewertung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse im Kontext des derzeitigen Status – sei es regulatorischer, ökonomischer oder infrastruktureller Natur – der Aquakultur in Deutschland und Kolumbien erforderte zudem einiges an Kapazitäten war jedoch für eine realistische Einordnung notwendig. Insbesondere für weitere geplante Forschungsarbeiten im Bereich der Aquakultursysteme konnte hier notwendige Basisarbeit geleistet werden.

Gegenüber anderen nationalen aber auch internationalen Projekten war zusätzlich zu den genannten Aufgaben noch ein Workshop und ein längerfristiger Aufenthalt von Partnern aus Kolumbien in Deutsch–land zu organisieren. Umgekehrt war das Fraunhofer IGB an der Organisation des gemeinsamen *Workshop Internacional de Bioeconomia Circula*r (ICCBE) an der UNAB in Kolumbien beteiligt. Die für die Teilnahme benötigten Reisemittel wurden über das CiBELES*a*-Projekt bereitgestellt.

In AP3.1 und AP3.2 der Lebenszyklus- und wirtschaftlichen Potentialanalyse wurde auf Ergebnisse des Projektes EPICES mit Laufzeit bis 09-2022 zurückgegriffen, die von einem Unterauftragnehmer durchgeführt worden waren. Bei der Antragstellung und auch zu Beginn des CiBELESα Projektes lagen die Ergebnisse noch nicht vor. Nach Vorliegen der Ergebnisse wurde die Erstellung einer weiteren LCA und TEA durch einen externen Dienstleister nicht beauftragt, da nach unserer Einschätzung keine weiteren Erkenntnisse mit Mehrwert für das Projekt daraus entstehen würden. Die für den Dienstleister geplanten Forschungsmittel wurden nicht ausgegeben.

Abgesehen von den Publikationstätigkeiten und einigen wenigen abschließenden Arbeiten konnten jedoch alle APs im Rahmen der Projektlaufzeit beendet werden.

### 3.3 Verwertbarkeit des Ergebnisses und voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Rückgewinnung von Nährstoffen aus Kaltwasserdurchlaufanlagen zur Mikroalgenkultivierung von begrenztem Nutzen ist. Daher ist in diesem Sinne auch keine direkte Verwertung durch das IGB geplant. Von Nutzen (auch gesamtwirtschaftlich) ist daher die Erkenntnis, dass eine Rückgewinnung von Nährstoffen eher bei kreislaufgeführten Anlagen Sinn ergibt, da hier auch die akkumulierenden Nährstoffe für die Aquakultur selbst ein Problem darstellen. Nichtsdestotrotz können die hier erzielten Resultate darauf angewendet werden. Allgemein kann die Methodik der Nährstoffrückgewinnung auch auf weitere Abwässer / Abfallströme übertragen werden, da die Kombination aus Phosphor-haltigen Feststoffen nicht allein auf die Aquakultur beschränkt wird.

In der näheren Zukunft sind jedoch weitere Kollaborationen bezüglich der Integration der Algenkultivierung für die Nährstoffnutzung über die Biogastechnik und Erhöhung der Wertschöpfung durch Bioraffineriekonzepte mit UNAB geplant und bereits initiiert. Weitere Informationen im Detail hinsichtlich der Verwertung sind dem Erfolgskontrollbericht zu entnehmen.

## 3.4 Erkenntnisse von Dritten

In AP1.2 wurde in der Baseline-Studie Publikationen recherchiert, die die Integration von Mikroalgen in die Wasseraufbereitung von Aquakultur-Kreislaufanlagen (Meerwasser) beschrieben haben um insbesondere die Stickstoffbelastung zu reduzieren [15, 16]. In Kreislaufanlagen ist die Nährstoffkonzentration so hoch, dass diese nicht über die Integration einer Algenproduktion in sogenannten Open Ponds ausreichend reduziert wird. Hier bietet sich die im Fraunhofer IGB entwickelte Algenkultivierungssysteme in geschlossenen, kompakten, künstlich beleuchteten Photobioreaktoren an. Hiermit können ganzjährig unter kontrollierten Bedingungen Wasser aus Kreislaufanlagen gereinigt bzw. die Nährstoffe eliminiert werden. Zur Nutzung von Nährstoffen aus Abwässern von Kaltwasserdurchlaufanlagen sind keine neuen FE-Ergebnisse publiziert worden.

## 3.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Den Autoren sind keine nennenswerten Fortschritte von anderen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt.

## 3.6 Veröffentlichungen

Das Projekt wurde zusammen mit dem Projektpartner UNAB Bucaramanga, Kolumbien, in den Proceedings zum Workshop im April 2024 veröffentlicht. Nachfolgend sind die einzelnen Buchkapitel mit Fraunhofer IGB-Beteiligung dargestellt:

- Ulrike Schmid-Staiger & Konstantin Frick: Biorefineries based on Coupling of Wastewater and Microalgae: Developments of algal Biotechnology. Proceedings of Workshop Internacional de Bioeconomía Circular UNAB Colombia 9th – 10th of April 2024. ISBN 978-3-031-84358-7, Guarin, Tatiana C. - The Circular Bioeconomy in Industry.
- Thomas Hahn & Susanne Zibek: Recent Developments in Biorefinery with Special Focus on Industrial Biotechnology. Proceedings of Workshop Internacional de Bioeconomía Circular UNAB Colombia 9th – 10th of April 2024. ISBN 978-3-031-84358-7, Guarin, Tatiana C. - The Circular Bioeconomy in Industry.
- Tatiana C. Guarín-C, Lorena Durán-Ortiz, Sebastián Muñoz-Chinome, Astrid Hernandéz-Rincón, Yohana Castro-Hernández, and Alexander Meneses-Jácome: Circular Bioeconomy to Lead an Enhanced Strategy for Sustainable Aquaculture: CiBELESα

Derzeit sind keine weiteren Veröffentlichungen geplant.

[15] Ramli, N. M., J. A. J. Verreth, F. M. Yusoff, K. Nurulhuda, N. Nagao and M. C. J. Verdegem (2020). "Integration of Algae to Improve Nitrogenous Waste Management in Recirculating Aquaculture Systems: A Review." Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Volume 8 - 2020.

[16] Pirhonen, J., S. Koukka and K. Pulkkinen (2023). "Supplementing air with CO2 stripped from recirculating aquaculture improves growth of two green microalgae in aquaculture wastewater." Aquaculture 567: 739242.