

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

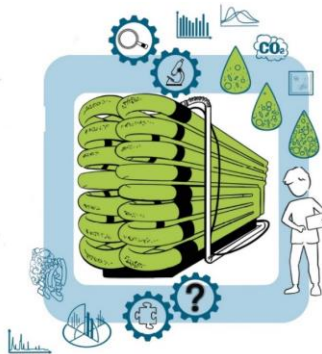


NewFoodSystems
Neue Lebensmittelsysteme

Abschlussbericht

ALGAE-MODULE 4.0

Verfahrensentwicklung zum Aufbau einer modularen Produktionsanlage für algenbasierte Lebensmittel



Kurzbericht - Teil 1

Förderkennzeichen:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1218F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor

Verantwortliche Autoren: Nicole Thorpe, Dr. James Thorpe

Zuwendungs- empfänger:

Experior MicroTech GmbH
Fürstenriederstraße 279a
81377 München

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2022 – 30.06.2024



I. Aufgabenstellung und wissenschaftlich/technischer Stand

Mikroalgen sind ein vielversprechender alternativer, gesunder und vielseitig einsetzbarer Rohstoff für die Lebensmittelindustrie. Der breite Einsatz von algenbasierten Produkten in der deutschen Lebensmittelwirtschaft wird vor allem durch die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Produkte in ausreichender Quantität limitiert. Dieser Umstand geht vor allem auf die geringen Produktionskapazitäten in Deutschland aber auch auf fehlende Qualitätskriterien in der Produktion und der Produktanalyse zurück. Derzeit werden Mikroalgen vor allem in Form von Pulvern oder Tabletten als Nahrungsergänzungsmittel am Markt angeboten. Die produzierten Biomassen haben ihren Ursprung im Wesentlichen aus dem asiatischen Raum und schwanken stark in Ihrer Qualität, sowohl hinsichtlich der Verunreinigung mit Fremdalgen als auch der Schwermetallbelastung durch unzureichende Wasserqualität. Die Trocknung von Mikroalgen-Biomasse erfolgt im Wesentlichen aus dem Bedarf für den Transport und die Lagerfähigkeit der Produkte, reduziert allerdings die ernährungsphysiologischen Eigenschaften erheblich. Zudem können die internationalen Lieferketten nicht in jedem Fall gesichert werden.

Um eine nachhaltige Integration von Mikroalgen als Rohstoff für die Lebensmittelindustrie zu etablieren, bedarf es dem Aufbau lokaler Produktionskapazität an qualitätsgesicherter Biomasse. Um regionale Wertschöpfungsketten mit hochwertigen Produkten zu versorgen und den ernährungsphysiologischen Mehrwert frischer Mikroalgen für innovative Produkte zu erschließen, bedarf es der Entwicklung von modularen Produktionseinheiten und qualitätsgesicherten Prozessen, idealerweise im Sinne einer Bio-raffinerie (Multi-Produkt-Prozesse). Das Vorhaben ALGAE-MODULE 4.0 arbeitete aus diesem Grund an den folgenden technischen und wissenschaftlichen Zielstellungen:

- Aufbau einer Best-Practice Prozesskette zur modularen Produktion und Produktaufbereitung frischer Mikroalgenbiomasse
- Prozessintensivierung durch kontinuierliche Prozesse und Prozessanalytik
- Untersuchung der spektralen Licht-Bedingungen auf die Produktqualität
- Ressourceneffiziente Produktion durch die Nutzung von Abwärme-Strömen multispektraler LED-Lichtquellen
- Etablierung von Echtzeit-Qualitätsanalysen für Mikroalgen-Feuchtbiomasse auf Basis der industrietauglichen Nahinfrarot-Spektroskopie
- Entwicklung optischer Echtzeit-Tools für eine robuste Biomasse-Bestimmung von Feuchtbio-masse
- Schonende Aufarbeitungstechnologien für potenzielle Bio-raffinerie-Prozesse
- Verarbeitung frischer Mikroalgen-Biomasse in Form von Nassextrusion

II. Ablauf des Projektes

Das NewFoodSystems Vorhaben ALGAE-MODULE 4.0 brachte die Expertise von 9 Projektpartnern entlang der Wertschöpfungskette der Mikroalgenproduktion (PUEVIT GmbH, Algenium GmbH & Co. KG), der technischen Ausstattung in Bezug auf Licht- (DH Licht GmbH) sowie Regelungs- und Kommunikationstechnik (Experior MicroTech GmbH), innovativer Aufbereitungsverfahren (ELEA Technology GmbH), der optischen Prozessanalytik (Bruker Optik GmbH), der Lebensmittelverarbeitung (endori food GmbH & Co. KG) sowie der universitären Forschung im Bereich Downstream Processing (TU Berlin) bzw. Prozessentwicklung und -optimierung (TU Dresden). Das Verbundvorhaben wurde von der TU Dresden, Institut für Naturstofftechnik, koordiniert und erfolgte im Zeitraum vom 01.07.2022 – 30.06.2024. Das Projekt ALGAE-MODULE 4.0 fokussiert dabei auf zwei Beispielprozesse – die Produktion des in Deutschland als Nahrungsmittel zugelassenen Cyanobakteriums *Limnospira platensis* (Spirulina) sowie der nicht-konventionellen Mikroalge *Chlorella zofingiensis*, die ein großes Potenzial als Rohstoff für Lebensmittelanwendungen aufweist. *L. platensis* dient dabei vor allem als nachhaltige Proteinressource sowie als Quelle des natürlichen, blauen Phycobili-Pigmentes Phycocyanin. *C. zofingiensis* ist vor allem für seinen hohen Fettgehalt sowie für die Synthese bioaktiver Carotenoide, u.a. Astaxanthin und Canthaxin, bekannt.

III. Wesentliche Ergebnisse von ALGAE-MODULE 4.0

Für die Untersuchung der Biomassezusammensetzung in Abhängigkeit der spektralen Lichtbedingungen wurde durch die Projektpartner DH Licht GmbH und die TU Dresden ein Screening-Setup (9 parallele Kulturen) etabliert, das eine Variation der Lichtbedingungen auf 8 Kanälen erlaubt. Die experimentellen Analysen zeigten, dass ein Breitbandlichtspektrum (Weißlicht) das Biomassewachstum bis 30% im Vergleich zu monochromatischen Bedingungen steigert. Die Wertstoffproduktion kann vor allem durch die Exposition von grünem Licht (primäre Pigmente) bzw. blaues Licht (sekundäre Carotenoide) stimuliert werden. Für die gezielte Akkumulation von Wertstoffen eignet sich demnach eine 2-Phasen Prozessstrategie. Die prozessbegleitende Analytik wurde auf zwei Ebenen untersucht. Die Algenium GmbH & Co. KG entwickelte ein multispektrales Sensorsystem, das neben der Anregung im UV- und Weißlichtbereich, die Streulichtsignale von 410 – 940 nm ermöglicht. Der Plug & Play Sensor liefert optische Echtzeitdaten mit deren Hilfe sowohl die Biomassekonzentration ($0,4 - 2,0 \text{ g L}^{-1}$) als auch Kontaminationen erkannt werden können. Ein weiterer optischer Multiparameter-Bypass-Sensor wurde durch die TU Dresden etabliert. Dieser kann als Bypass in verschiedene Kultivierungssysteme integriert werden und wurde für *C. zofingiensis* sowohl für quantitative als auch qualitative Messaufgaben trainiert. Eine umfangreiche Datenakquise sowie Modelltraining wurde für die Analyse von Biomass slurries der beiden Mikroalgen mittels NIR durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Analyse der makromolekularen biochemischen Zusammensetzung mit Slurry-Proben (ca. 10 g L^{-1}) möglich ist. Eine quantitative Aussage zur Biomassequalität (Fett-, Protein-, Kohlenhydrat-, Mineralstoff-, Wassergehalt) ist nach ca. 5-minütiger NIR-Analyse möglich. Dies entspricht einer Reduktion des Arbeitsaufwandes von 5 Tagen Nasschemie auf 5 Minuten optische Analyse. Die kontinuierliche Kultivierung verspricht eine Verbesserung der Prozessstabilität und -produktivität. Für beide Mikroalgen konnten durch eine kontinuierliche Prozessführung die Raum-Zeit-Ausbeute um ca. 25 – 30% im Vergleich zur Satzkultivierung gesteigert werden. Durch konstante Produktionsbedingungen im Fließgleichgewicht wird zudem eine konstante Biomassequalität sichergestellt. Am Aufbau der Demonstrator-Anlage im 200 L Maßstab waren alle Projektpartner beteiligt. Die DH Licht GmbH konzeptionierte und fertigte wassergekühlte LED-Röhren, die eine Rückgewinnung der LED-Abwärme ermöglichen. Die spektral dimmbaren Lichtquellen ermöglichten zudem eine modellbasierte Anpassung der Lichtintensität und des -spektrums für die jeweiligen Prozessphasen. Dadurch konnte u.a. die Biomasseproduktivität von *C. zofingiensis* im Vergleich zum Stand der Technik um den Faktor 5 gesteigert werden. Das Automatisierungs- und Monitoringkonzept (Datenerfassung und Cloud-basierte Darstellung) wurde durch die Experior MicroTech GmbH umgesetzt. Dies umfasst die Entwicklung einer Präzisionssensoreinheit, v.a. Temperatursensoren, zur Optimierung der Energieflüsse innerhalb des Systems, sowie die Konzeptionierung und Fertigung einer integrierten Steuereinheit zur prozessgesteuerten Lichtbereitstellung mittels DALI-Schnittstelle.

Im Bereich der Aufarbeitungstechnik (Downstream Processing) erarbeitete die TU Berlin ein Konzept für ein Mehrphasenextraktionssystem, um eine Fraktionierung der Frischbiomasse zu ermöglichen. Dabei wurden Mikro- und Makroemulsionen sowie die Cloud-Point-Extraktion mit verschiedenen Lösungsmittelsystemen für hydrophile und hydrophobe Fraktionen betrachtet. Aus den Untersuchungen ging hervor, dass der Mengeneinsatz von Tensiden und Salzen im großtechnischen Einsatz nicht rentabel ist. Für potentielle Skalierungsschritte bietet sich vor allem eine Downstream-Strategie aus konventionellen Lösungsmitteln und Makroemulsionen an. Die Fraktionierung der Frischbiomasse kann dabei durch einen nicht-disruptiven Zellaufschluss unterstützt werden. Dafür untersuchten die TU Berlin und die ELEA Technology GmbH die Wirksamkeit von gepulsten elektrischen Feldern (PEF) zur Polarisierung der Zellmembranen und der Extraktion von Wertstoffkomponenten aus der Frischbiomasse. Vergleichende Untersuchungen zum standardisiertem Ultraschall-Zellaufschluss zeigten, dass die PEF-Behandlung bei vergleichbarem Leistungseintrag (kJ/L) eine höhere Reinheit der Biomasseextrakte aufweist. Ein abschließende Nassextrusion von Frischbiomasse wurde von der endori food GmbH & Co. KG erfolgreich getestet. Im Zuge des Projektes wurden zahlreiche öffentlichkeitswirksame Aktivitäten durchgeführt, u.a. die Teilnahme an beiden NewFoodSystems Days, die Präsentation des Projekts auf der Bundesgartenschau 2023, regionalen Wissenstransferveranstaltungen sowie die Teilnahme an

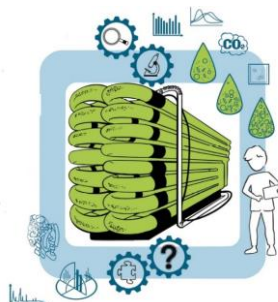
nationalen und internationalen Konferenzen. Aus dem Projekt ALGAE-MODULE 4.0 gingen bis zum Berichtstermin 3 peer-review Publikationen sowie eine Patentanmeldung hervor.



Abschlussbericht

ALGAE-MODULE 4.0

Verfahrensentwicklung zum Aufbau einer modularen Produktionsanlage für
algenbasierte Lebensmittel



Sachbericht - Teil 2

Förderkennzeichen: Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1218F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor
Verantwortliche Autoren: Nicole Thorpe, Dr. James Thorpe

Ausführende Stelle: Experior MicroTech GmbH
Fürstenriederstraße 279a
81377 München

Laufzeit des 01.07.2022 – 30.06.2024
Vorhabens:

Durchgeführte TP 1-2, 1-3,1-6
Teilprojekte

Inhaltsverzeichnis

I. Aufgabenstellung und Ausgangssituation	2
II. Wesentliche wissenschaftliche und technische Ergebnisse.....	2
III. Zahlenmäßiger Nachweis	12
IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten.....	12
V. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	13
VI. Fortschritt auf dem Gebiet.....	14
VII. Veröffentlichungen & Öffentlichkeitsarbeit.....	15
VIII. Anhang.....	15

I. Aufgabenstellung und Ausgangssituation

Mikroalgen sind ein vielversprechender alternativer, gesunder und vielseitig einsetzbarer Rohstoff für die Lebensmittelindustrie. Der breite Einsatz von algenbasierten Produkten in der deutschen Lebensmittelwirtschaft wird vor allem durch die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Produkte in ausreichender Quantität limitiert. Dieser Umstand geht vor allem auf die geringen Produktionskapazitäten in Deutschland aber auch auf fehlende Qualitätskriterien in der Produktion und der Produktanalyse zurück. Derzeit werden Mikroalgen vor allem in Form von Pulvern oder Tabletten als Nahrungsergänzungsmittel am Markt angeboten. Die produzierten Biomassen haben ihren Ursprung im Wesentlichen aus dem asiatischen Raum und schwanken stark in Ihrer Qualität, sowohl hinsichtlich der Verunreinigung mit Fremdalgen als auch der Schwermetallbelastung durch unzureichende Wasserqualität. Die Trocknung von Mikroalgen-Biomasse erfolgt im Wesentlichen aus dem Bedarf für den Transport und die Lagerfähigkeit der Produkte, reduziert allerdings die ernährungsphysiologischen Eigenschaften erheblich. Zudem können die internationalen Lieferketten nicht in jedem Fall gesichert werden.

Um eine nachhaltige Integration von Mikroalgen als Rohstoff für die Lebensmittelindustrie zu etablieren, bedarf es dem Aufbau lokaler Produktionskapazität an qualitätsgesicherter Biomasse. Um regionale Wertschöpfungsketten mit hochwertigen Produkten zu versorgen und den ernährungsphysiologischen Mehrwert frischer Mikroalgen für innovative Produkte zu erschließen, bedarf es der Entwicklung von modularen Produktionseinheiten und qualitätsgesicherten Prozessen, idealerweise im Sinne einer Bioraffinerie (Multi-Produkt-Prozesse). Das Vorhaben ALGAE-MODULE 4.0 arbeitete aus diesem Grund an den folgenden technischen und wissenschaftlichen Zielstellungen:

- Aufbau einer Best-Practice Prozesskette zur modularen Produktion und Produktaufbereitung frischer Mikroalgenbiomasse
- Prozessintensivierung durch kontinuierliche Prozesse und Prozessanalytik
- Untersuchung der spektralen Licht-Bedingungen auf die Produktqualität
- Ressourceneffiziente Produktion durch die Nutzung von Abwärme-Strömen multispektraler LED-Lichtquellen
- Etablierung von Echtzeit-Qualitätsanalysen für Mikroalgen-Feuchtbiomasse auf Basis der industrietauglichen Nahinfrarot-Spektroskopie
- Entwicklung optischer Echtzeit-Tools für eine robuste Biomasse-Bestimmung von Feuchtbio-masse
- Schonende Aufarbeitungstechnologien für potenzielle Bioraffinerie-Prozesse
- Verarbeitung frischer Mikroalgen-Biomasse in Form von Nassextrusion

II. Wesentliche wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Experior MicroTech (im Folgenden Cultinova (CUL) genannt) verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich Sensor-, Steuerungs- und Datenmanagement für den Anbau von Pflanzen in kontrollierter Umgebung (Controlled Environment Agriculture, CEA). Dabei handelt es sich hauptsächlich um

Umweltsensorik, Nährstoffmanagement und Lichtsteuerung in Gewächshäusern, Zuchtträumen und vertikalen Farmen.

Im Rahmen dieses Projekts hatte Cultinova die Möglichkeit, das Wissen bzw. Know-how in CEA für eine neue Anwendung und einen neuen Markt zu nutzen. Dies erforderte die Entwicklung neuer Hardware sowie die Weiterentwicklung bestehender Softwareplattformen, um die Anforderungen eines industriellen Algenproduktionssystems erfüllen zu können.

Die Arbeit wurde in drei Hauptaktivitäten unterteilt:

(1) Die Weiterentwicklung einer bestehenden webbasierten Lösung für das Qualitäts- und Prozessmanagement in CEA (Cultinova365), um sie für die Algenproduktion anwendbar zu machen.

(2) Die Entwicklung eines neuen Sensor- und Steuerungssystems zur Verbesserung der Energieeffizienz einer Algenproduktionsanlage durch die Erfassung und Wiederverwendung von Wärmeenergie.

(3) Die Entwicklung eines LED-Beleuchtungssteuerungssystems zur Steuerung von LED-basierter Zusatzbeleuchtung, die in der Algenproduktion eingesetzt wird.

Darüber hinaus unterstützte CUL die Projektpartner während des Projekts bei der Installation, dem Betrieb oder der weiteren Optimierung der Geräte und der Software.

Teilprojekt 1-2: Entwicklung Qualitätssensorik

1-2 Entwicklung cloudbasierte Qualitätsüberwachung

Zur Umsetzung eines innovativen, cloudbasierten Qualitätsüberwachungssystems wurde eine bestehende Version der Cultinova365 CEA (Controlled Environment-Agriculture) Management-Software weiterentwickelt, um sie für das Qualitätsmanagement in der Algenproduktion anwendbar zu machen.

Die Software wurde bewusst als konfigurierbares System entwickelt, um eine flexible Anpassung an die spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Produktionsumgebungen zu ermöglichen. Dies ist entscheidend, da es in der Algenproduktion aktuell keine universellen Standardlösungen gibt. Die Produktionsparameter können je nach Reaktorgröße, Algenspezies, Zielprodukt und Standort erheblich variieren. Im Laufe der Entwicklungsarbeiten wurde zudem deutlich, wie wichtig Flexibilität und Interoperabilität mit verschiedenen, beim potenziellen Kunden möglicherweise bereits vorhandenen (Teil-) Systemlösungen sind. Das konfigurierbare System sollte in der Lage sein, folgende Hauptmerkmale zu erfüllen:

- Anpassung an individuelle Produktionsprozesse
- Kontinuierliche Messdatenerfassung und effektives Datenmanagement durch Integration von Sensordaten, Systemparameter sowie manueller Eingabemethoden.
- Berichtsfunktion, um z.B. Trends und Abweichungen in den Produktionsparametern zu identifizieren und Arbeitsabläufe zu optimieren
- Nutzung in verschiedenen Produktionsskalen, von Labor- bis zu industriellen Maßstäben.

Im Folgenden werden die Entwicklungsschritte beschrieben:

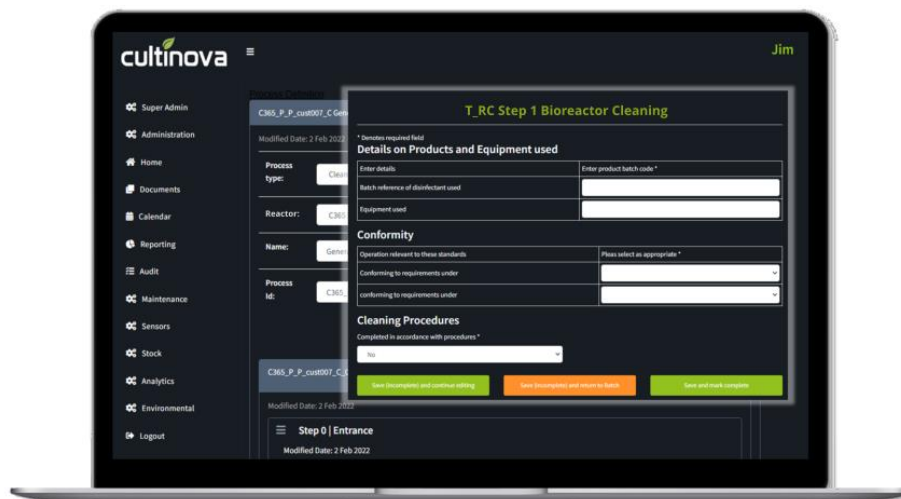
1-2-1 Konfiguration von Cultinova365

Hier wurde eine bestehende Version von Cultinova365 modifiziert, um typische Arbeitsabläufe in der Algenproduktion zu erfassen. In Zusammenarbeit mit PUEVIT wurde eine Auswahl typischer Arbeitsabläufe identifiziert, die für die Digitalisierung und anschließende Steuerung über ein webbasiertes Workflow-Management-System relevant sind. Die identifizierten Schlüsselbereiche waren:

- a) Konditionierung des Reaktors vor der Algenproduktion
- b) Erzeugung von Biomasse
- c) Biomassernte und Reaktorreinigung

Für (a), (b) und (c) wurden Beispiel-Arbeitsabläufe beschrieben und Cultinova365 entsprechend konfiguriert, um sowohl die manuelle Dateneingabe als auch die automatische Datenübertragung aus den Bioreaktorsystemen zu ermöglichen. Die Datenerhebung wurde ausgewählt, um Schlüsselaspekte der Algenqualität in Bezug auf Biomasse, Wachstumsrate und Qualitäts-Metriken nach der Ernte zu erfassen, insbesondere solche, die mit der TP1-7-Extraktcharakterisierung innerhalb des Projektes verbunden waren.

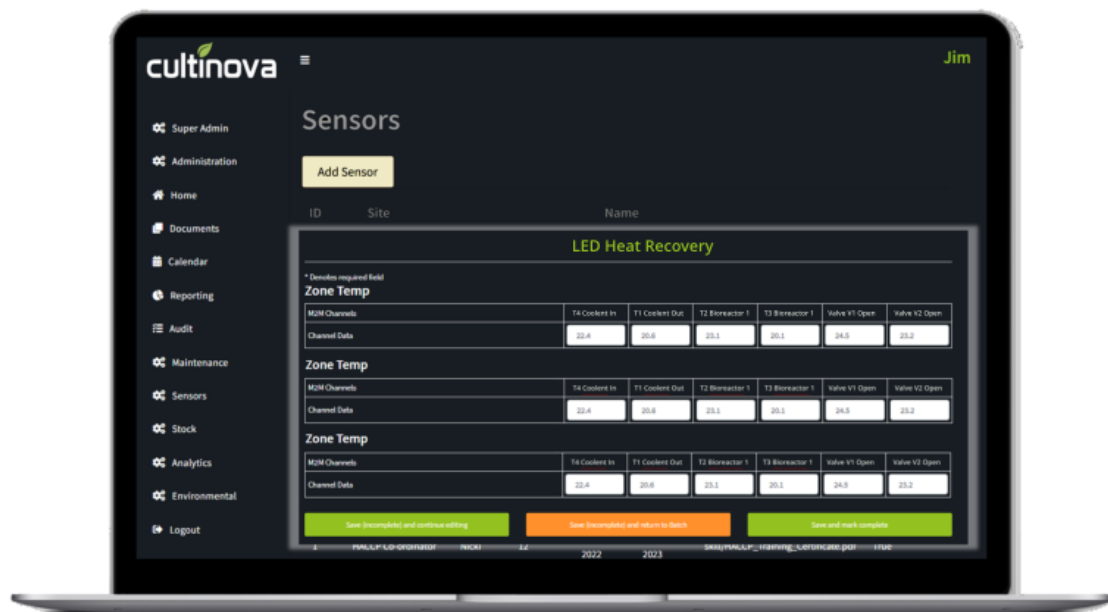
Beispiel der neu konfigurierte Cultinova365 Anwendungsoberfläche - Abbildungen 1-2-1a, 1-2-1b und 1-2-1c.



Abbildungen 1-2-1a: Cultinova365 konfiguriert für das Workflow-Management (Reinigung) von Bioreaktoren



Abbildungen 1-2-1b: Cultinova365 konfiguriert für das Workflow-Management bzw. Biomasseinspektion



Abbildungen 1-2-1c: Cultinova365 konfiguriert für die automatische Maschinendatenübertragung vom Bioreaktor

1-2-2 Entwicklung einer anwendungsspezifischen API zur Annahme von Maschinendaten aus Bioreaktoren zur Algenproduktion

Ein wichtiger Aspekt der Weiterentwicklung von Cultinova365 für die Qualitätskontrolle in der Algenproduktion ist die Möglichkeit, automatisch generierte Maschinendaten zu erfassen und zum Zwecke des Qualitätsmanagements zu verwenden. Da Bioreaktoren hochautomatisiert sind, generieren sie in der Regel Mess- und Maschinenzustandsdaten, die die Möglichkeit bieten, im Rahmen des cloudbasierten Qualitätsmanagementsystems in 1-2-1 Prozessaufzeichnungen zu erstellen.

Die Funktionalität der Cultinova365-Software wurde erweitert, um Maschinendaten über eine HTTP / REST-API zu akzeptieren. Die HTTP / REST-API ist ein standardisiertes Modell für die Datenübertragung zwischen einem Client (der Bioreaktor) und einem Server (Cultinova365) in einer internetbasierten Maschine-zu-Maschine-Kommunikationsanwendung. Eine schematische Darstellung des implementierten Datenflusses ist in Abbildung 1-2-2-1 dargestellt.

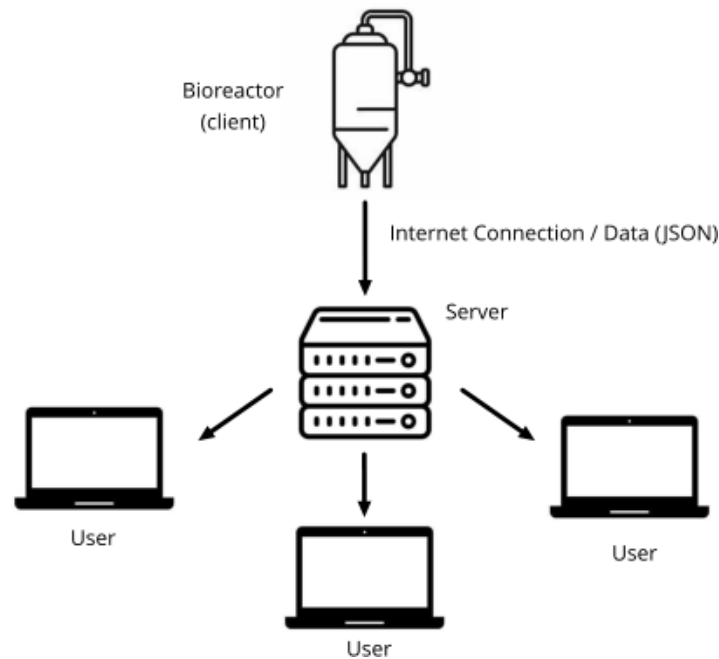


Abbildung 1-2-2-1: Client-Server-User Model for Cultinova365 and Algae Bioreactor

Anwenderfreundlichkeit, Skalierbarkeit und Interoperabilität bzw. Datenkompatibilität zur nahtlosen Integration in bestehende Systeme standen im Vordergrund der Entwicklungsmaßnahmen. Eine entsprechende Anpassung von API (Application Programming Interface) ermöglichte Kompatibilität mit dem Cultinova Photobioreaktortemperaturungssystem sowie mit den Daten der bestehenden speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) des Bioreaktors. Auf diese Weise kann Cultinova365 Maschinendaten aus Bioreaktoren übernehmen und im Rahmen eines Qualitätsmanagementsystems direkt in Arbeitsabläufe integrieren. Ein Beispiel für die entwickelte API (JSON-Zeichenfolge), die von der Bioreaktor-Hardware verwendet werden kann ist in Abbildung 1-2-2-2 dargestellt.

```
{
  "ReactorData": {
    "ReactorID": "12345679",
    "SensorID": "AA01",
    "Sensor": {
      "Readablename": "Coolent Outlet T1",
      "Value": "26.7",
      "Units": "DegC",
      "Date": "12/04/2023",
      "Time": "13:34:16"
    }
  }
}
```

Abbildung 1-2-2-2: Die JSON-Zeichenfolge, die vom Bioreaktor / der Cultinova365-API verwendet wird

Folgenden Parameter wurden definiert verwendet:

ReactorID:	Bezeichner den Reaktor
SensorID:	Bezeichner den Sensor
Readablename:	Beschreibung des Sensorkanals
Value:	Messdaten
Units:	Maßeinheiten
Date:	Datum der Messung
Time:	Zeitpunkt der Messung

Teilprojekt 1-3 Automatisierung und Energierückgewinnungskonzept

1-3-1 Konzeptionierung Photobioreaktortemperierung

TP1-3 wurde in enger Zusammenarbeit mit DH-Licht umgesetzt und umfasste Seitens CUL die Entwicklung und Implementierung einer anwendungsspezifischen Sensorlösung für die präzise Überwachung und Steuerung des Kühlmittels des Beleuchtungssystems und die Wärmeübertragung vom Beleuchtungskühlsystem zum Photobioreaktor. Eine schematische Darstellung des Systems ist in Abbildung 1-3-1 zu sehen. Die von CUL entwickelten und gelieferten Komponenten sind in der Abbildung orange dargestellt.

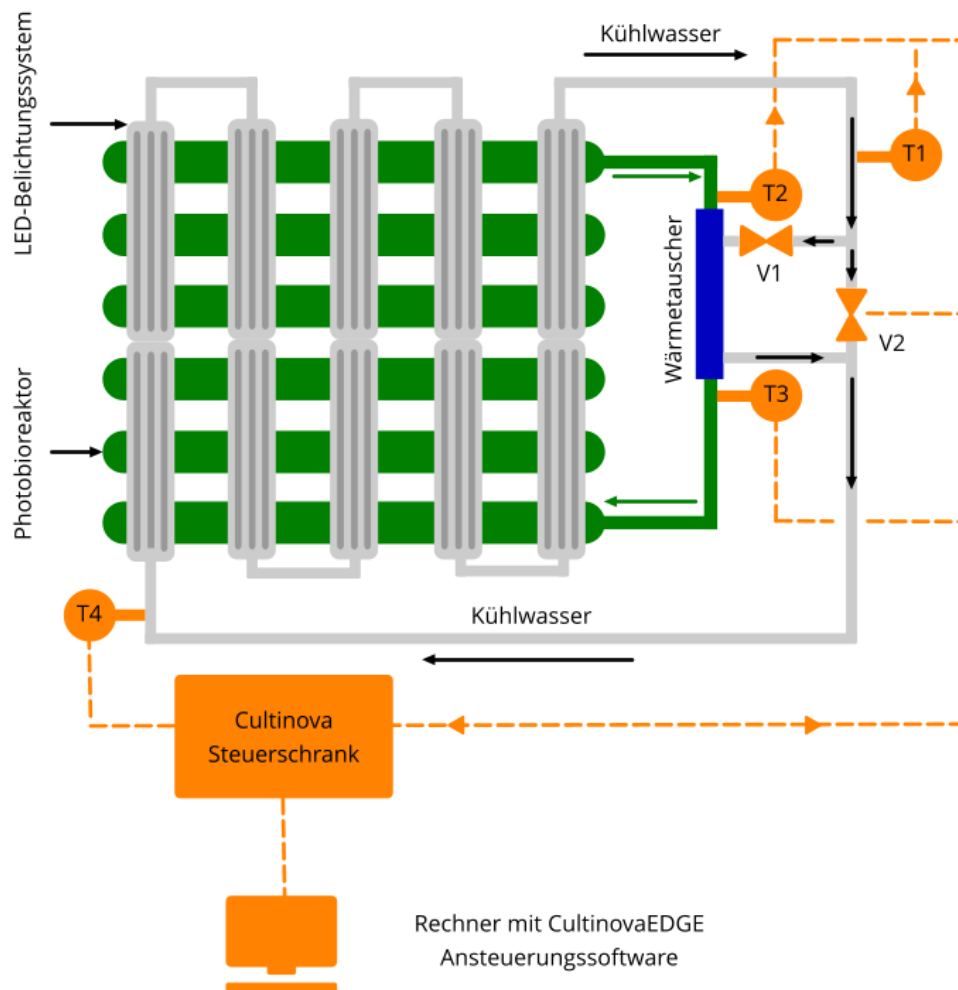


Figure 1-3-1: Photobioreaktortemperierungssystem

Das Cultinova-System besteht aus vier anwendungsspezifischen Präzisionstemperatursensoren die für das Projekt entwickelt wurde, zwei Ventilsteuerungen und einem PC, auf dem eine modifizierte Version der Mess- und Regelsoftware CultinovaEDGE ausgeführt wurde.

Das Photobioreaktortemperierungssystem ermöglicht die Messung der Kühlmitteltemperatur vor dem Eingang (T4) und Ausgang (T1) aus dem LED-Beleuchtungssystem, sowie vor (T2) und nach (T3) des Wärmetauschers des Bioreaktorsystems. Basierend auf diesen vier Temperaturmessungen ist eine Bewertung der Effizienz des Wärmeübergangs zwischen dem LED-

Beleuchtungssystem und dem Bioreaktorsystem möglich. Hier wurde der Anstieg der Kühlmitteltemperatur aufgrund der Verlustleistung innerhalb des LED-Beleuchtungssystems überwacht und bei einer ausreichenden Erhöhung wird das Kühlmittel in den Wärmetauscher geleitet. Der Wärmetauscher überträgt die Wärmeenergie aus dem Kühlmittel aufgrund der LED-Verlustleistung in den Bioreaktor, um die Temperatur über der Umgebungstemperatur auf einen optimalen Wert für das Algenwachstum anzuheben. Die Steuerung des Kühlmittelflusses in den Wärmetauscher erfolgt über zwei Ventile, die über das Cultinova-Steuerungssystem gesteuert werden.

1-3-1-1 Anwendungsspezifische Präzisions-Temperatursensoren

Um den hohen Systemanforderungen an das Photobioreaktortemperierungssystem gerecht zu werden, war eine Entwicklung eines Präzisionstemperatursensors notwendig. Es konnte auf dem Markt kein kostengünstiger, zuverlässiger und robuster Sensor identifiziert werden, welcher den Systemanforderungen entspricht. Um das Photobioreaktortemperierungssystem zu realisieren, entwickelte Cultinova daher einen anwendungsspezifischen Temperatursensor zur Messung der LED-Kühlmittel- (T1, T4) und Bioreaktortemperaturen (T2, T3). Somit konnten die Anforderungen an eine Messauflösung von besser als 0,1 °C sowie die Verwendung eines wasserdichten Gehäuses erfüllt werden, um die Montage von Sensoren in den vorhandenen Durchflusslinien des Bioreaktors zu ermöglichen. Darüber hinaus ermöglichte dies eine einfache Integration in die bestehende Steuerungshardware und Software.

Der entwickelte Temperatursensor liefert eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ °C und eine Auflösung von 0,04 °C und erfüllt die Messanforderungen in Bezug auf die Leistung für diese Anwendung. Des Weiteren verfügt der Temperatursensor über einen Mikrocontroller zur Mess-, Datenverarbeitungs- und Datenübertragungsfunktionen sowie eine RS485-Schnittstelle, um die Kommunikation mit anderer Cultinova-Hardware und -Software zu ermöglichen.

1-3-1-2 Anwendungsspezifischer Steuerschrank

Die Steuerung der Ventile zur Leitung des Durchflusses zum Wärmetauscher erfolgte über einen speziell für dieses Projekt entwickelten Schaltschrank. Der Cultinova Steuerschrank verfügt über vier Ventilsteuerausgänge, von denen zwei im Photobioreaktortemperierungssystem verwendet werden. Der Steuerschrank wird von einem PC gesteuert, auf dem eine modifizierte Version der CultinovaEDGE-Software läuft. Die Software misst die Temperaturmessung der vier Präzisions-Temperatursensoren (Abschnitt 1-3-1-1) im fünf Minuten Takt. Die Messungen werden mit benutzerdefinierten Temperatursollwerten verglichen und bei Erreichen von Schwellenwerten werden die Ventile geöffnet, die den Durchfluss zum Wärmetauscher steuern.

Das von Cultinova gelieferte Photobioreaktortemperierungssystem wurde anschließend im Teilprojekt 1-6 eingesetzt.

1-3-2 Entwicklung eines intelligenten dynamischen LED- Belichtungssteuerungssystems für die Algenproduktion im Photobio- reaktor

Die Optimierung der Energieeffizienz in der Algenproduktion stellt eine der größten Herausforderungen dar. In diesem Zusammenhang bietet der Einsatz von künstlicher Beleuchtung und der damit verbundene Energieaufwand hohes Optimierungs- und Innovationspotenzial. Aufbauend auf Cultinova Erfahrung im Bereich Belichtungssteuerung und DH Lichts Erfahrung in LED-Technologie wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein dynamisches Belichtungssystem entwickelt, welches die Algenproduktion gezielt mit geeigneten Lichtspektren und – Intensitäten versorgt und gleichzeitig den Energieverbrauch optimiert.

Die von DH-Licht im Rahmen dieses Projektes verwendete multi-kanal und multispektrale Belichtungssysteme, bestehend aus 20 Leuchten mit jeweils vier unabhängig voneinander steuerbarem Blau-, Rot-, Weiß- und Nahinfrarot-Lichtkanälen ermöglichten die selektive und gezielte Steuerung von insgesamt 80 Lichtkanälen innerhalb des Systems. Zu Beginn des Projekts entschieden sich Cultinova und DH-Licht für den Einsatz des Lichtstandards DALI zur Steuerung der Lichtkanäle. Dabei wurde für jeden der 80 Kanäle ein individuell adressierbares DALI-Vorschaltgerät verwendet, welches über DALI-Funktionen wie „Light-Off, Light-On und Light-Intensity“ verfügt.

Der Cultinova Steuerschrank (1-3-1-2) wurde mit zwei DALI-Schnittstellen geliefert, die jeweils in der Lage waren, 40 DALI-Steuergeräte anzusteuern, um mittels Cultinova Software die Beleuchtungsintensität, die spektrale Zusammensetzung sowie die Ein-Aus-Intervalle für den Demonstrationsbioreaktor über die CultinovaEDGE-Software steuern zu können.

Um dies zu erreichen, wurde eine Beleuchtungskarte (Abbildung 1-3-2-1) erstellt, die die Intensitätseinstellung jeder Farbe innerhalb jeder Leuchte über die Benutzereinstellungen in der Software ermöglicht.

Farbe	Channel	Luminaire	Luminaire	Channel	Farbe	Farbe	Channel	Luminaire	Luminaire	Channel	Farbe
B	6	1	20	14	B	B	38	6	15	4	B
W	37	1	20	18	W	W	0	6	15	32	W
R	17	1	20	26	R	R	14	6	15	21	R
NR	3	1	20	34	NR	NR	35	6	15	21	NR
B	10	2	19	33	B	B	11	7	14	1	B
W	29	2	19	2	W	W	24	7	14	2	W
R	25	2	19	4	R	R	13	7	14	17	R
NR	23	2	19	3	NR	NR	18	7	14	6	NR
B	35	3	18	30	B	B	22	8	13	30	B
W	31	3	18	32	W	W	23	8	13	36	W
R	16	3	18	0	R	R	15	8	13	10	R
NR	11	3	18	24	NR	NR	28	8	13	5	NR
B	1	4	17	9	B	B	19	9	12	27	B
W	21	4	17	12	W	W	9	9	12	16	W
R	15	4	17	8	R	R	20	9	12	26	R
NR	27	4	17	20	NR	NR	29	9	12	37	NR
B	36	5	16	19	B	B	12	10	11	3	B
W	13	5	16	7	W	W	31	10	11	33	W
R	22	5	16	39	R	R	34	10	11	9	R
NR	5	5	16	28	NR	NR	7	10	11	25	NR

Abbildung 1-3-2-1: DALI-Steuerungskarte

Basierend auf mehreren Gesprächen mit der TU-Dresden wurden eine Reihe von lichtsteuerungstechnischen Verfahren entwickelt und programmiert, die für die Algenproduktion von Interesse sind. Dazu gehörte eine variable Beleuchtungsperiodizität innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden sowie eine variable Intensität und ein variables Spektrum.

Wie beim Photobioreaktortemperierungssystem können alle Einstellungen über die modifizierte Version der CultinovaEDGE Steuerungssoftware vom Benutzer geändert werden – ein Beispiel der CultinovaEDGE Steuerungssoftware ist in Abbildung 1-3-2-2 dargestellt.



Abbildung 1-3-2-2: Modifizierte CultinovaEDGE-Software auf einem Windows PC zur Steuerung des Photobioreaktortemperierungssystem und des LED-Beleuchtungssteuerungssystem

Teilprojekt 1-6 Aufbau und Betrieb Pilotanlage

Während des Projekts unterstützte Cultinova den Aufbau bzw. Installation der Pilotanlage und stellte technischen Support für den reibungslosen Betrieb der von CUL entwickelten Hard- und Software sicher. Dies erforderte mehrfache Besuche am Standort des Test-Photobioreaktor an der TUD sowie durch Unterstützung durch Telefon- und Webkonferenzen.

Systemoptimierung und -validierung

Während des Projekts unterstützte Cultinova TUD bei der Entwicklung von Rezepten für die Lichtsteuerung für den Einsatz im Test-Photobioreaktor sowie bei der Modifikation des Steuerungsprogramms zur Messung der Temperatur des Kühlsystems der Reaktorbeleuchtung und der Wärmeübertragung auf das Reaktorwachstumssystem. Die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern verlief gut und effizient. Die sich ergänzenden Kernkompetenzen der Projektpartner ermöglichten die Umsetzung komplexer Zusammenhänge und Systeme in kürzester Zeit. CUL übernahm hierbei die technische Umsetzung und Programmierung der von den Verbundpartnern definierten Systemeigenschaften. Software-Updates wurden über eine Fernanmeldung am PC des Photobioreaktor durchgeführt, so dass Cultinova in diesem Fall nicht mehr vor Ort sein musste. Dies reduzierte Reaktionszeiten bei Supportbedarf sowie Aufwendungen für Reisen nach Dresden.

III. Zahlenmäßiger Nachweis

Der Gesamtkostenrahmen gemäß Vorkalkulation wurde geringfügig unterschritten. Personalkosten stellten den Hauptteil der Kosten dar, was den Projektanforderungen entsprach. Es wurden keine Fremdleistungen in Anspruch genommen und kein Aufstockungsantrag gestellt. Einsparungen durch remote support und Videokonferenzen resultierten in geringeren Reisekosten als geplant.

Nach Rücksprache mit dem Projektträger wurde ein erhöhter Personalaufwand in 2024, zurückzuführen auf erhöhten Aufwand im Rahmen der Installations- und Supportmaßnahmen, durch Umwidmung der Gelder von nicht verausgabten Reisekosten auf Personalkosten komplett abgedeckt.

IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Die durchgeführten Projektarbeiten waren essenziell, um bestehende Herausforderungen in der Algenproduktion zu adressieren:

Produktion hochwertiger Algenprodukte: Die Produktion hochwertiger Algenprodukte erfordert eine präzise und kontinuierliche Überwachung der biologischen und physikalischen Parameter. Ohne ein geeignetes Überwachungssystem ist die Qualität stark von manuellen Eingriffen abhängig, was sowohl zeitaufwendig als auch fehleranfällig ist.

Effizienz und Nachhaltigkeit: Die durchgeführten Projektarbeiten zielten darauf ab, die Effizienz in der Algenproduktion zu erhöhen und Energieeinsparungsmöglichkeiten zu identifizieren und umzusetzen. Im Hinblick auf die Temperierung bzw. das Wärmerückgewinnungskonzepts war die Entwicklung eines Präzisionstemperatursensors notwendig, da derzeit kein geeigneter Sensor auf dem Markt verfügbar ist.

Die gewählten Projektarbeiten und Methoden waren sowohl in ihrem Umfang als auch in ihrer Ausrichtung angemessen, um die gesteckten Ziele zu erreichen:

Entwicklungsansatz: Der iterative Entwicklungsansatz, kombiniert mit praxisnahen Tests und enger Zusammenarbeit mit Partnern, hat sich als effektiv erwiesen, um technische und wirtschaftliche Ziele zu verbinden.

Ressourcennutzung: Die eingesetzten finanziellen Mittel wurden zielgerichtet verwendet; Projektarbeiten wurden gemäß Meilensteinplanung ausgeführt und die Gesamtkostenkalkulation nur geringfügig unterschritten.

V. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt hat sowohl einen wissenschaftlichen Beitrag geleistet sowie auch anwendungsorientierte Lösungen hervorgebracht. Dadurch konnte ein Mehrwert geschaffen werden, der über die reine Forschung hinausgeht und eine wirtschaftliche Verwertung ermöglicht.

Anwendungspotenzial: Die erarbeiteten Technologien bieten praxisnahe Lösungen für Photobioreaktoren und haben das Potenzial, sowohl bei kleinen als auch bei großen Produzenten breite Anwendung zu finden.

1. Entwicklung eines Photobioreaktortemperierungssystems

Nutzen: Das entwickelte System gewährleistet eine präzise Steuerung der Temperatur in Photobioreaktoren, was entscheidend für das optimale Wachstum von Algen ist. Schwankungen der Temperatur, die häufig zu Ertragsverlusten führen, werden minimiert, wodurch die Stabilität und Effizienz der Produktion gesteigert werden.

Verwertbarkeit: Dieses System eignet sich für eine breite Anwendung in der Algenproduktion, sowohl in kleinen Anlagen als auch in großen industriellen Produktionssystemen. Es kann in bestehende Reaktoren integriert oder in neuen Anlagen als Standardlösung eingesetzt werden. Der von CUL eigens entwickelte Präzisionstemperatursensor eröffnet weitere Anwendungsfelder für Präzisionsmessungen in Flüssigsystemen, Substraten und hydroponischen Wachstumssystemen.

2. Optimierung der Belichtungssteuerung

Nutzen: Die optimierte Steuerung erlaubt eine dynamische Anpassung der Beleuchtung an die spezifischen Anforderungen der Algenkulturen und die Umgebungsbedingungen. Dies führt zu einer Optimierung des Energieverbrauchs und verbessert gleichzeitig die Wachstumsbedingungen.

Verwertbarkeit: Diese Technologie bietet nicht nur ökologische Vorteile durch Energieeinsparungen, sondern auch wirtschaftliche Anreize für Produzenten. Sie ist besonders attraktiv für Unternehmen, die Photobioreaktoren in großem Maßstab betreiben und auf Kostenreduktionen angewiesen sind.

3. Entwicklung eines digitalen Qualitätsmanagementsystems

Nutzen: Das digitale System ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Algenproduktion in Echtzeit, um die Produktionsqualität zu steigern und Ertragseinbußen zu vermeiden. Es ist in der Lage, Sensor, Maschinendaten sowie manuelle Daten kontinuierlich zu erfassen, Arbeitsabläufe zu erfassen und zu überwachen. Zudem ist das System konfigurierbar, um auf individuelle Bedürfnisse in der Algenproduktion eingehen zu können.

Verwertbarkeit: Das System ist konfigurierbar und somit flexibel einsetzbar und kann an spezifische Produktionsanforderungen angepasst werden. Es bietet eine moderne Lösung für Produzenten, die Prozesse digitalisieren und die Produktionsqualität langfristig sichern möchten.

VI. Fortschritt auf dem Gebiet

Die Ergebnisse des Projekts haben eine hohe praktische Relevanz und adressieren zentrale Herausforderungen der Algenproduktion:

Höhere Effizienz und geringere Kosten: Durch die Optimierung der Temperatur- und Belichtungssteuerung können Produktionskosten reduziert und die Ressourceneffizienz gesteigert werden. Die Möglichkeit, zirkuläre Anreize zu schaffen und technologisch umzusetzen wurde im Rahmen dieses Projektes demonstriert. Dies gilt v.a. im Hinblick auf die Reaktortemperatur und Wiederverwendung von Energieströmen (Abwärme LED).

Verbesserte Produktqualität: Das Qualitätsmanagementsystem stellt sicher, dass Algenprodukte gleichbleibend hohe Standards erfüllen, was insbesondere für die Lebensmittel- und Pharmaindustrie entscheidend ist.

Nachhaltigkeit und Marktpotenzial: Die Technologien fördern eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Algenproduktion, was den Anforderungen eines wachsenden Marktes entspricht.

Die Ergebnisse bieten sowohl kurzfristige als auch langfristige Verwertungsmöglichkeiten:

Kurzfristig: Integration der Lösungen in Pilotprojekte.

Mittelfristig: Markteinführung und Skalierung durch strategische Partnerschaften.

Langfristig: Internationale Vermarktung und Erweiterung auf andere Anwendungen

VII. Veröffentlichungen & Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeitsarbeit war ein integraler Bestandteil des Projekts und wurde in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern durchgeführt.

New Food Systems Day in Nürnberg: Im Rahmen des New Food Systems Days wurde das Projekt gemeinsam mit den Verbundpartnern einem breiten Publikum vorgestellt. Diese Plattform ermöglichte es, die Projektergebnisse im Kontext innovativer Ernährungssysteme darzustellen und potenzielle Kooperationen anzubahnen.

Deutsches Museum: Das Projekt wurde im Rahmen der o.g. Veranstaltung im Deutschen Zukunftsmuseum, einer prominenten Einrichtung in Nürnberg, die sich auf zukunftsweisende Technologien präsentiert fokussiert, präsentiert.

Posterpräsentationen: Posterpräsentationen im Konsortium Im Rahmen der New Food Systems (NFS) Konsortialtreffen wurden die Projektergebnisse durch Posterpräsentationen visualisiert und diskutiert. Diese interne Öffentlichkeitsarbeit förderte den fachlichen Austausch innerhalb der Partner und unterstützte Gespräche hinsichtlich weiterer Kooperationsmöglichkeiten.

Social Media (LinkedIn): Das Projekt wurde mehrfach Seitens CUL über LinkedIn kommuniziert. Diese Beiträge erreichten Fachleute und Unternehmen aus den relevanten Branchen und trugen zur Steigerung der Sichtbarkeit bei. Die Richtlinien und Hinweise zu Veröffentlichungen im Rahmen dieser Förderungen wurden eingehalten.

VIII. Anhang