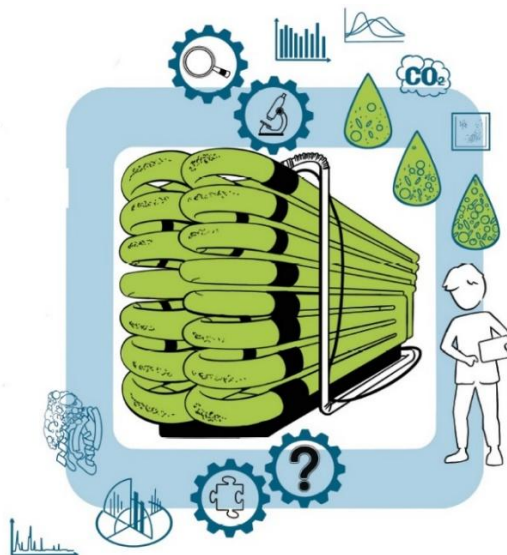




Abschlussbericht

ALGAE-MODULE 4.0

Verfahrensentwicklung zum Aufbau einer modularen Produktionsanlage
für algenbasierte Lebensmittel



Sachbericht - Teil 1 – Kurzbericht

Berichtszeitraum: 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 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 Feuchtbiomasse
- Schonende Aufarbeitungstechnologien für potenzielle Bioraffinerie-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-Leuchten, 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.

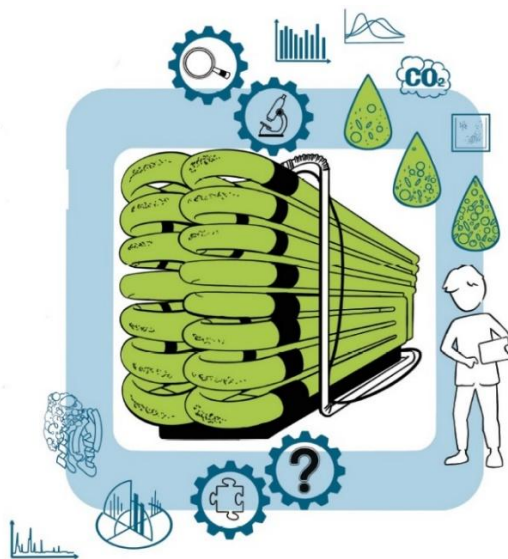
Im Bereich der Aufarbeitungstechnik (Downstream Processing) erarbeitete die TU Berlin ein Konzept für ein Mehrphasenextraktionssystem, um eine Fraktionierung der Frischbiomasse zu ermöglichen. Dabei wurden Mikro- und Makroemulsionen sowie die Cloud-Point-Extraktion mit verschiedenen Lösungsmittelsystemen 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: 031B1218G

Ausführende Stelle: TU Dresden
Institut für Naturstofftechnik
Bergstraße 120
01069 Dresden

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 – 30.06.2024

Durchgeführte Teilprojekte TP1-1, TP1-2, TP1-3, TP1-6, TP1-10

Inhaltsverzeichnis

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

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 Feuchtbiomasse
- Schonende Aufarbeitungstechnologien für potenzielle Bioraffinerie-Prozesse
- Verarbeitung frischer Mikroalgen-Biomasse in Form von Nassextrusion

II. Wesentliche wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Die TU Dresden agierte im vorliegenden Verbundvorhaben als Projektkoordinator und war selbst in die Teilprojekte TP1-1, TP1-2, TP1-3, TP1-6 sowie TP1-10 integriert. Im Folgenden werden die wesentlichen wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse der Teilprojekte vorgestellt:

TP1-1: Kultivierung unter variierendem Lichtspektrum

Der Aufbau des CellDeG Screening Setups zur Variation von Lichtqualität und -quantität wurde laut TP1-1 an der TU Dresden unter Support des Projektpartners DH Licht GmbH aufgebaut und in Betrieb genommen. Für das Setup im Maßstab von 10 mL (33-fach Kultivierung) bzw. 100 mL (9-fach Kultivierung) wurde ein Bluetooth gesteuerte 8-Kanal- Lichtquelle von der DH Licht GmbH zur Verfügung gestellt (LED-KE-308). Die Lichtquelle wurde in die Steuereinheit des Parallelkultivierungssystems eingepflegt (Abbildung 1) und erlaubt die stufenlose Variation der Photonendichte unterschiedlicher Qualität (spektrale Variation über die 8 Kanäle der Lichtquellen).



Abb. 1: Screening-Setup, bestehend aus der CellDeG Kultivierungsplattform und einer 8-Kanal-steuerbaren DH-Licht Lichtquelle.

Im ersten Schritt erfolgte mit dem Screening-Setup die Optimierung eines Kulturmediums für den Modellorganismus *Chlorella/Chromochloris zofingensis*, welches auch in industriellen Maßstäben mit Prozessvolumina > 200 L ökonomisch eingesetzt werden kann. Die Optimierung erfolgte auf Basis von Vorerfahrungen der Projektpartner mit einem kommerziellen, pulverförmigen Komponentendünger sowie der Optimierung der Stickstoffsupplementation in Form von Natriumnitrat. Der Einsatz eines industriell nutzbaren Kultivierungsmediums für die Screeningversuche ist wichtig, um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Labor- und Produktionsmaßstab zu gewährleisten. Als wichtige Grundvoraussetzung für eine effiziente Skalierung wurde mit Hilfe des Parallelkultivierungssystems für beide Modellorganismen (*C. zofingensis* und *L. maxima*) skalierfähige Kulturmedien identifiziert, die eine äquivalente Biomasseproduktion wie herkömmliche Vollmedien erlauben.

Das Screening der Medienbedingungen wurde bei einer konstanten Photonenflussdichte von $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durchgeführt – auch diese Bedingungen wurden entsprechend einer industriellen Skalierung in Absprache mit den Projektpartnern festgelegt. Die spektralen Lichtbedingungen wurden zwischen roten, blauen, grünen und weißen Photonen bei entsprechender Photonenflussdichte variiert.

Zusammenfassend konnten wir für die Biomassebildungsphase feststellen, dass weißes Licht eine bis zu 30% höhere Biomasseproduktivität aufwies, als die jeweils monochromatischen Lichtbedingungen. Neben der Produktion von Biomasse stand vor allem die gezielte Stimulation einzelner Metabolite im Vordergrund der Optimierungsarbeiten, da durch die Einstellung kontrollierter Prozessbedingungen direkt auf die Qualität der Biomasse Einfluss genommen werden kann. Die Untersuchungen ergaben, dass für eine 2. Phase der Produktakkumulation v.a. primärer Pigmente, z.B. Phycocyanin, grünes und blaues Licht (*L. maxima*) bzw. für die Akkumulation von sekundären Pigmenten, v.a. Carotenoiden, blaues Licht (*C. zothingiensis*) eingesetzt werden kann. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für 2-stufige Verfahren mit gezielter Biomasseproduktivität (Phase 1) sowie Produktakkumulation (Phase 2). Im Zuge des Screenings wurden neben den Lichtbedingungen ebenso osmotischer Stress und Nährstofflimitation als zusätzliche Trigger für eine Produktakkumulation getestet und optimiert. Die Ergebnisse aus TP1-1 werden im Laufe von 2025 als peer review Artikel veröffentlicht.

TP1-2: Entwicklung Qualitätssensorik

Die TU Dresden ist im TP1-2 in Zusammenarbeit mit der Bruker Optik GmbH für die Etablierung und Kalibrierung der NIR-Messtechnik für frische Mikroalgenproben (Slurry) verantwortlich. Die Bruker Optik GmbH stellte der TU Dresden für diese Arbeiten ein NIR-Spektrometer (BRUKER TANGO) zur Datenaufnahme zur Verfügung.

Die wesentlichen Ergebnisse aus TP1-2 wurden in einer gemeinsamen *open access* Publikation veröffentlicht:

- Bleisch, R., Mühlstädt, G., Hilpmann, G., Seibel, L., Steingröwer, J., Zahn, S., Wagemans, A.M., Krujatz, F., 2025. A robust, non-invasive and fast routine for the quantification of the nutritional composition of microalgae biomass slurries based on near-infrared spectroscopy. *Algal Res.* 85, 103882. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103882>

Die wichtigsten Prozessschritte zur Probenvorbereitung sind in Abbildung 2 dargestellt:

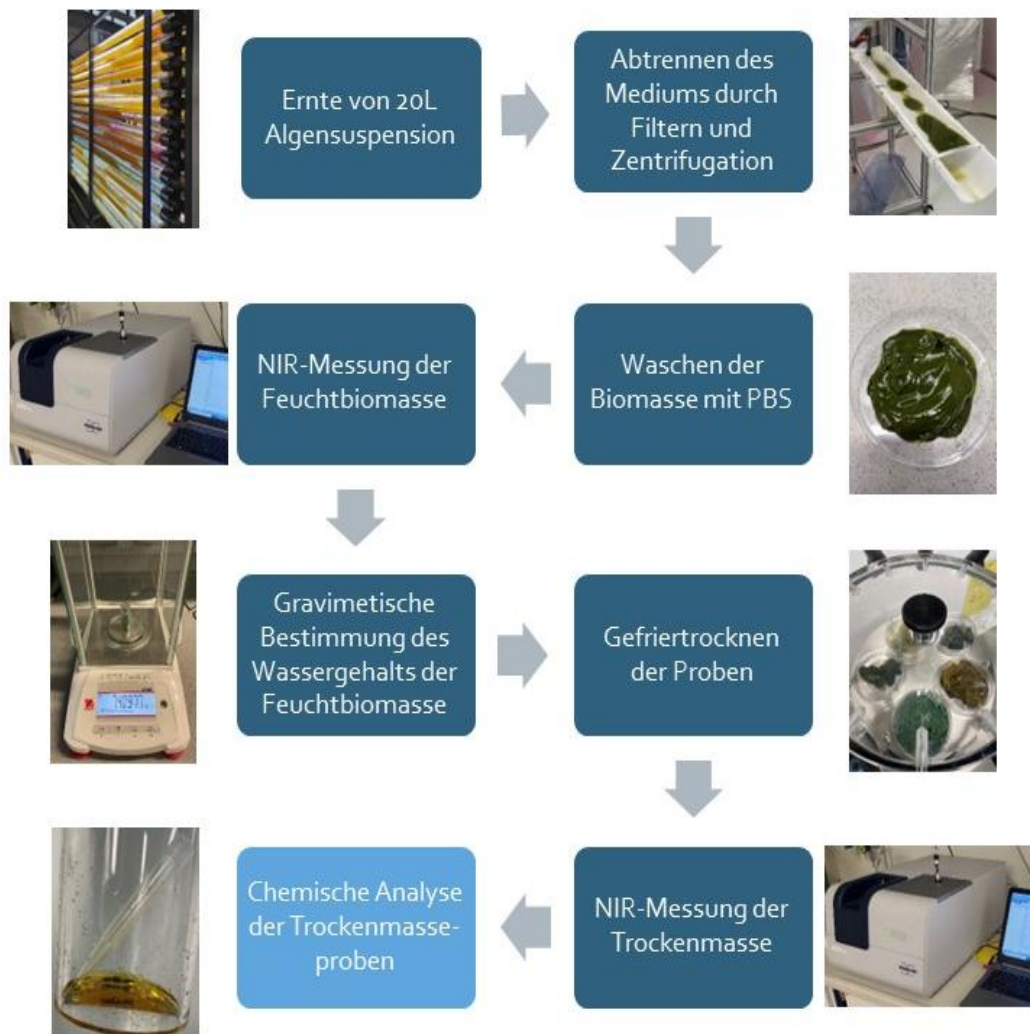


Abb. 2: Probengewinnung und Verarbeitung der Biomassen von *C. zoffingiensis* und *L. maxima*.

Neben den Routinen zur NIR-Analyse der Biomassesslurries erfolgte die Etablierung der Referenzanalytik, d.h. die Bestimmung des Proteingehaltes mittels CHNS-Elementaranalyse, die Bestimmung des Lipidgehaltes nach Soxhlet, die Kohlenhydratbestimmung über den Nachweis der Kohlenhydratäquivalente sowie die gravimetrische Bestimmung von Wasser-, Salz- und Aschegehalt für frische Biomasseproben von *C. zoffingiensis* und *L. maxima* (siehe Arbeitsablauf in Abbildung 2).

Es sei darauf hingewiesen, dass die Referenzanalytik ein enorm laboraufwendiger Prozess mit bis zu 5 Tagen Bearbeitungszeit pro Probe darstellt. Um die Referenzanalysen durchzuführen, mussten jeweils 20 L Probenvolumen verarbeitet werden. Auf Basis der etablierten Routinen (siehe Bleisch et al. 2025) wurden die spektroskopischen Daten für die Biomassesslurries aufgenommen und bildeten die Grundlage für die Aufstellung chemometrischer Modelle zur Quantifizierung der makromolekularen Zellkomponenten in Echtzeit

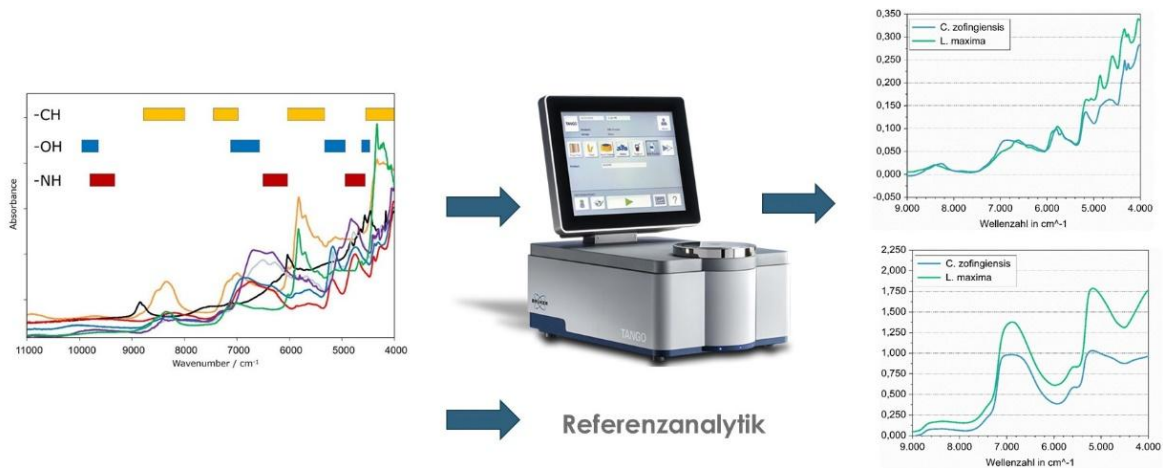


Abb. 3: Arbeitsabläufe bei der Kalibrierung und Entwicklung der chemometrischen NIR-Modelle.

In TP1-2 konnte in Kooperation mit der Bruker Optik GmbH der Nachweis erbracht werden, dass eine exakte Vorhersage der zellulären Makronährstoffe (Protein-, Kohlenhydrat- Mineralstoff-, Wasser- und Lipidgehalt) mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie mit einem zeitlichen Aufwand von 5 Minuten möglich ist. Dieser Schritt gehört zu den wichtigsten Erkenntnissen des Projektes, da nun nahezu in „Echtzeit“ Messdaten über die Biomassequalität gewonnen und somit neue Möglichkeiten für die Prozesskontrolle eröffnet werden. Dies gilt für getrocknete aber vor allem auch für feuchte, frische Biomasseproben (Slurry, Wassergehalt bis 90%). In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 3) sind exemplarisch die Ergebnisse des Protein- und Lipidgehaltes für beide Modellorganismen dargestellt.

Im Zuge des Projektes wurde eine neue Methodik etabliert, um die Robustheit der chemometrischen Modelle weiter zu verbessern. Basierend auf den erhobenen Messdaten wurden Daten beider Modellorganismen miteinander vermengt, um eine breitere Datenbasis für die Modellentwicklung zu generieren. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Schritt zu einem robusteren Modell mit hoher Vorhersagekraft und signifikant erweitertem Messbereich führt, v.a. da in der Studie sowohl ein Protein- als auch ein Fettproduzent integriert wurde. Eine Zusammenfassung der Güteparameter zwischen Modell und Vorhersage ist in den folgenden Tabellen 1 – 3 dargestellt. Eine belastbare Interpretation des RPD-Werts setzt voraus, dass eine ausreichende Anzahl an Proben, in der Regel mehr als 50, vorhanden ist, um eine repräsentative Streuung und valide statistische Auswertungen zu gewährleisten. Für kleine Datenmengen erscheint der RPD künstlich höher. Diesen Effekt kann man auch an den RPD-Werten der Modelle aus den kombinierten Datensätzen erkennen. Diese sind meist niedriger als die der Modelle aus den separierten Datensätzen. Für Modelle mit weniger als 50 Datenpunkten kann der RPD zumindest als Indikator für die Qualität des Modells genutzt werden. Die Modelle für die Lipid-, Protein- und Mineralstoffkonzentrationen der Biotrockenmasse-Proben zeigten eine höhere Güte als die entsprechenden Modelle, die auf Basis von Feuchtbiosmassen erzeugt wurden. Dieser Umstand ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die zusätzliche Wasseraufnahme die Spektren zusätzlich überlagert. Trotzdem konnten viele Modelle aus den analysierten Feuchtbiosmassen mit hoher quantitativer Aussagekraft entwickelt werden. Besonders hervorzuheben sind die Modelle zum Proteingehalt. Die Vorhersagekraft der Modelle von *C. zofingiensis* als auch von *L. maxima*, ist unabhängig von der Art der analysierten Biomasse,

nahezu übereinstimmend. Die R^2 -Werte der Modelle der Feuchtbiomasse deuten mit 0,97 und 0,99 ebenso wie die R^2 -Werte der Biotrockenmasse basierten Modelle (R^2 0,99 und 0,99) auf eine hohe Aussagekraft hin. Der RPD zeigt mit Werten über 5 in allen vier Modellen an, dass es sich um "ausgezeichnete" Modelle handelt. Das kombinierte Modell für die Feuchtbiomasseproben weist mit einem RPD von 3,27 und einem R^2 von 0,91 nur leicht niedrigere Werte auf.

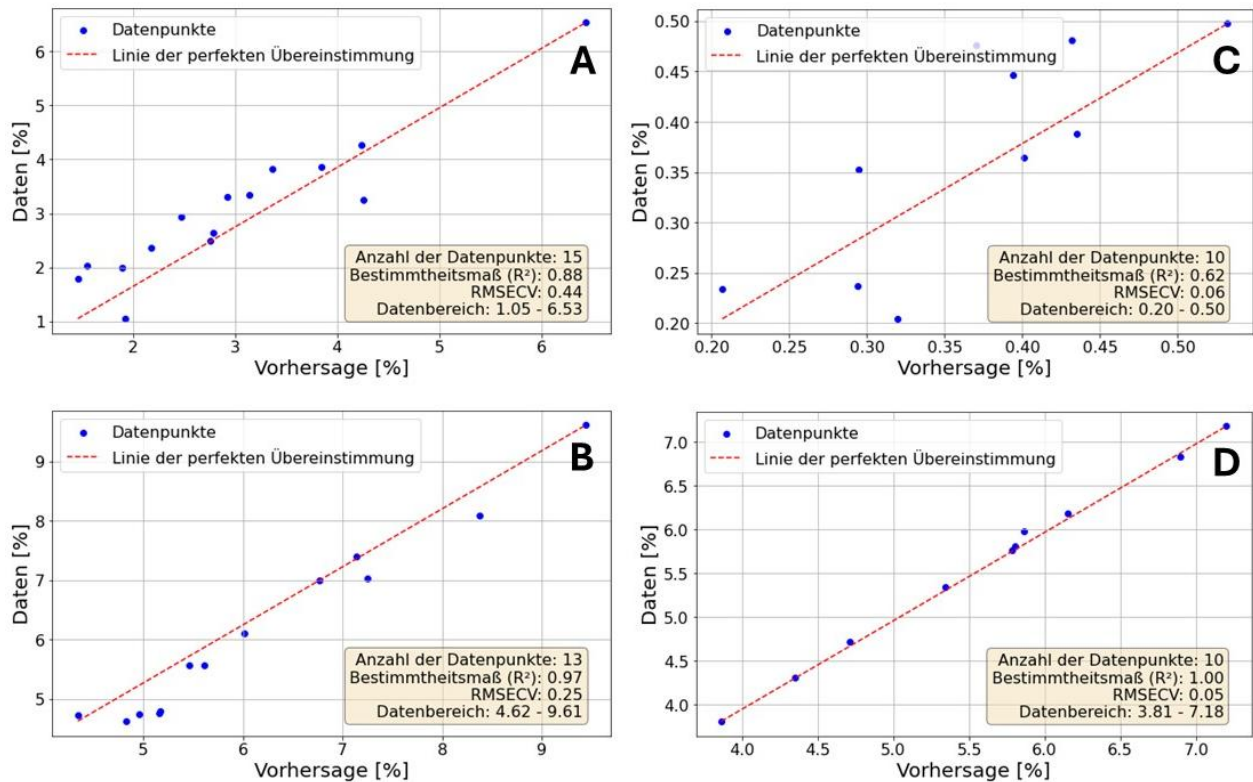


Abb. 3: Mittels OPUS Spektroskopiesoftware wurden Modelle zur Vorhersage der Lipid- und Proteingehalte in den Feuchtbiomasse von *C. zoffingiensis* und *L. maxima* erstellt. Dafür wurden separate Datensätze beider Organismen bestehend aus der Laboranalytik und den NIR-Absorptionsspektren genutzt. In den dargestellten Diagrammen werden jeweils Modelldaten (Vorhersage) und Messdaten (Daten) verglichen. A: Lipidgehalt (für alle in % w/w) der Feuchtbiomasse von *C. zoffingiensis*, B: Proteingehalt der Feuchtbiomasse von *C. zoffingiensis*, C: Lipidgehalt der Feuchtbiomasse von *L. maxima*, D: Proteingehalt der Feuchtbiomasse von *L. maxima*.

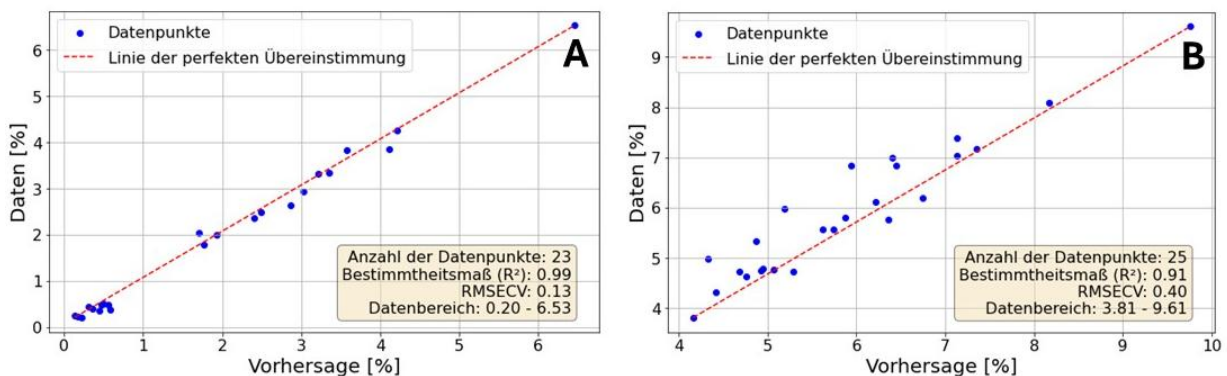


Abb. 4: Mittels OPUS Spektroskopiesoftware wurden Modelle zur Vorhersage der Lipid- und Proteingehalte in den Feuchtbiomasse von *C. zoffingiensis* und *L. maxima* erstellt. Dafür wurden die Datensätze beider Organismen, bestehend aus der Laboranalytik und den NIR-Absorptionsspektren, vereint. In den dargestellten Diagrammen werden jeweils Modelldaten (Vorhersage) und Messdaten (Daten) verglichen. A: Lipidgehalt (für alle in % w/w) der Feuchtbiomasse, B: Proteingehalt der Feuchtbiomasse.

Tab. 1: Vergleich der Validierung der Modelle zur Bestimmung des Lipidgehalts von *C. zoffingensis* (C. z.) und *L. maxima* (L. m.) und der Kombination beider Datensätze (Com) für Feuchtbiomasse und Biotrockenmasse. Kennwerte: Bestimmtheitsmaß (R^2), RMSECV (Root Mean Square Error of Cross Validation), Stichprobenanzahl, durch die Stichproben abgedeckte Datenbereich und RPD (Ratio of Performance to Deviation).

	Feuchtbiomasse					Biotrockenmasse				
Probe	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD
C.z.	0,88	0,439	15	1,0 - 6,5	2,87	0,97	0,899	30	4,2 - 25,1	5,45
L. m.	0,62	0,065	10	0,2 - 0,5	1,63	0,80	0,210	20	1,3 - 2,8	2,23
Com	0,99	0,135	23	0,2 - 6,5	12,5	0,99	0,724	48	1,3 - 25,1	9,92

Tab. 2: Vergleich der Validierung der Modelle zur Bestimmung des Mineralstoffgehalts von *C. zoffingensis* (C. z.) und *L. maxima* (L. m.) und der Kombination beider Datensätze (Com) für Feuchtbiomasse und Biotrockenmasse. Kennwerte: Bestimmtheitsmaß (R^2), RMSECV (Root Mean Square Error of Cross Validation), Stichprobenanzahl, durch die Stichproben abgedeckte Datenbereich und RPD (Ratio of Performance to Deviation).

	Feuchtbiomasse					Biotrockenmasse				
Probe	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD
C.z.	0,84	0,230	15	0,6 - 2,6	2,48	0,93	0,657	30	3,7 - 11,8	3,81
L. m.	0,84	0,074	10	0,3 - 0,9	2,53	0,99	0,184	18	2,0 - 8,7	10,2
Com	0,87	0,245	25	0,3 - 2,6	2,86	0,98	0,433	50	2,0 - 11,8	6,8

Tab. 3: Vergleich der Validierung der Modelle zur Bestimmung des Wassergehalts von *C. zoffingensis* (C. z.) und *L. maxima* (L. m.) und der Kombination beider Datensätze (Com) für Feuchtbiomasse und Biotrockenmasse. Kennwerte: Bestimmtheitsmaß (R^2), RMSECV (Root Mean Square Error of Cross Validation), Stichprobenanzahl, durch die Stichproben abgedeckte Datenbereich und RPD (Ratio of Performance to Deviation).

	Feuchtbiomasse					Biotrockenmasse				
Probe	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD	R^2	RMSECV	Anzahl Proben	Datenbereich [%]	RPD
C.z.	0,96	0,445	15	74,1 - 84,3	5,09	0,42	0,501	28	3,2 - 5,8	1,32
L. m.	0,99	0,455	11	74,1 - 89,9	13,0	0,84	0,235	20	2,7 - 4,9	2,53
Com	0,98	0,578	25	74,1 - 89,9	7,76	0,78	0,405	50	2,7 - 5,8	2,15

TP1-3: Automatisierung und Energierückgewinnungskonzept

Die Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes (v.a. für die Rückgewinnung der LED-Prozesswärme) erfolgte in Abstimmung der Partner DH Licht GmbH, Cultinova und TU Dresden. Die Zuständigkeiten der Projektpartner wurden anhand der Schnittstellen definiert (Abbildung 5). Die DH Licht GmbH zeichnete sich für die Auslegung, Fertigung und Integration der wasserkühlbaren LED-Leuchten verantwortlich (Abbildung 6). Dazu gehörte ebenfalls der

Wasserkreislauf sowie der Schutz vor Überhitzung der Leuchten bei hohen Photonenflussdichten (bis $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Cultinova übernahm den Entwurf der messtechnischen Schnittstellen für die Bilanzierung (v.a. Temperatursensoren), die Datenakquise und –verarbeitung (Graphical User Interface) sowie das Zusammenspiel der technischen Komponenten. Die TU Dresden war in TP1-3 vor allem für die Schnittstellendefinition sowie die Auslegung des Wärmetauschers und die Ankopplung von Komponenten zum kontinuierlichen Betrieb verantwortlich. Die konzeptionellen Arbeiten zum TP1-3 wurden laut Arbeitsplan abgeschlossen und anschließend im Projektverlauf (TP1-6) an der Demoanlage implementiert.

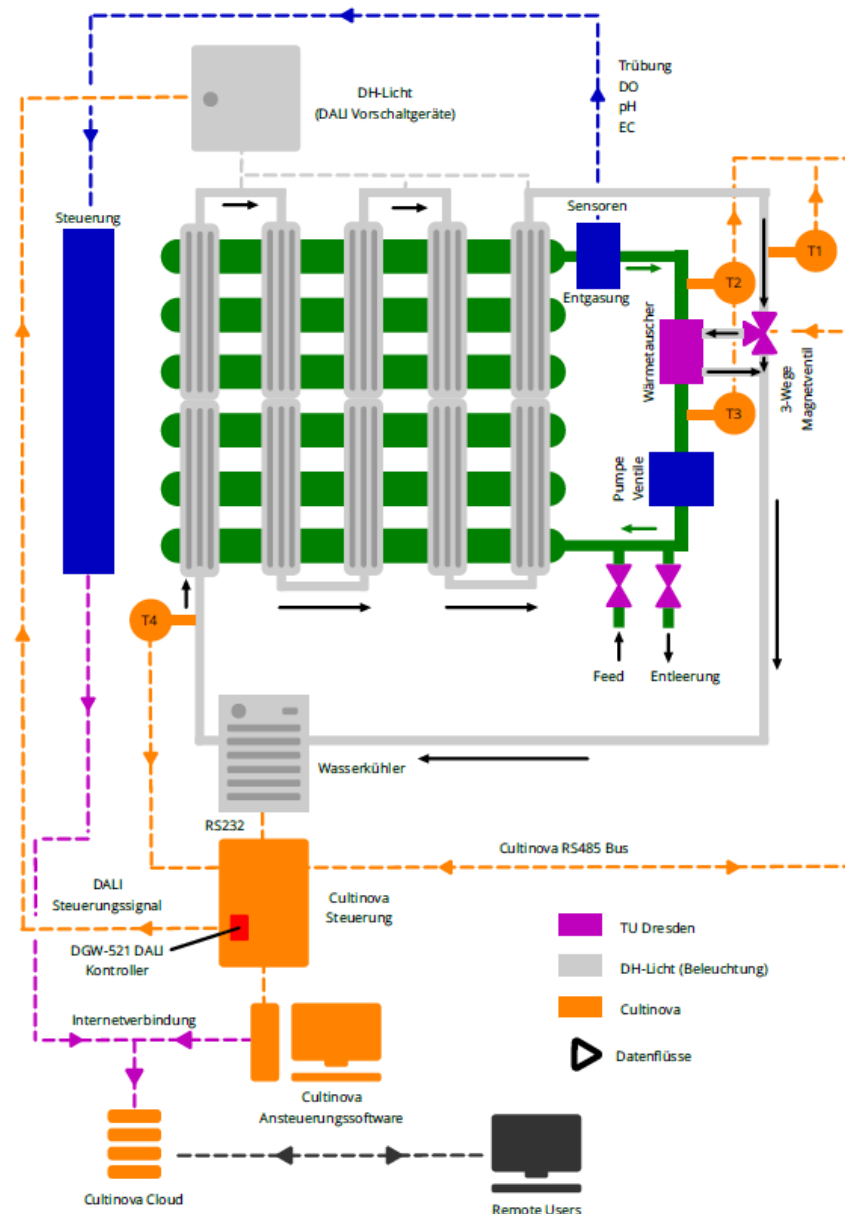


Abb. 5: Automatisierungskonzept und Zuständigkeit der einzelnen Partner für die Implementierung der Komponenten in der Demoanlage.

Zentrales Element der Demoanlage stellt die Cultinova Steuerungssoftware dar. Für das Projekt ALGAE-Module 4.0 wurden über die Software sowohl die Ansteuerung der LED-Leuchten vorgenommen als auch die Schnittstellen für die Ventilsteuerung realisiert. Implementiert wurden diese Funktionalitäten sowie die Sensordatenerfassung über eine DALI-Schnittstelle.



Abb. 6: Zentrales Element des Energierückgewinnungskonzeptes sind die wassergekühlten LED-Leuchten der DH Licht GmbH.

TP1-6: Aufbau und Betrieb der Pilotanlage

Nach der Konzeptionierungsphase gingen die jeweiligen Partner in die Fertigung und Testung der einzelnen Komponenten. Nach intensivem Testbetrieb der DH-Licht Leuchtensysteme konnten diese im September 2023 an der Anlage installiert werden. Für die Implementierung wurden 2 zusätzliche Schaltschränke geplant, gefertigt und installiert (Abbildung 6). Das Zusammenspiel der Einzelkomponenten wurde durch eine DALI-Schnittstelle (Cultinova) realisiert. Im 4. Quartal 2023/1. Quartal 2024 wurden die Sensorelemente durch Cultinova installiert. Die Auslegung des Wärmetauschers erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Partner PUE-VIT GmbH. Anschließend konnten beide Modellorganismen in der Pilotanlage kultiviert werden (Abbildung 7).



Abb. 7: Impressionen zu Einzelmodulen der 200 L Pilotanlage.

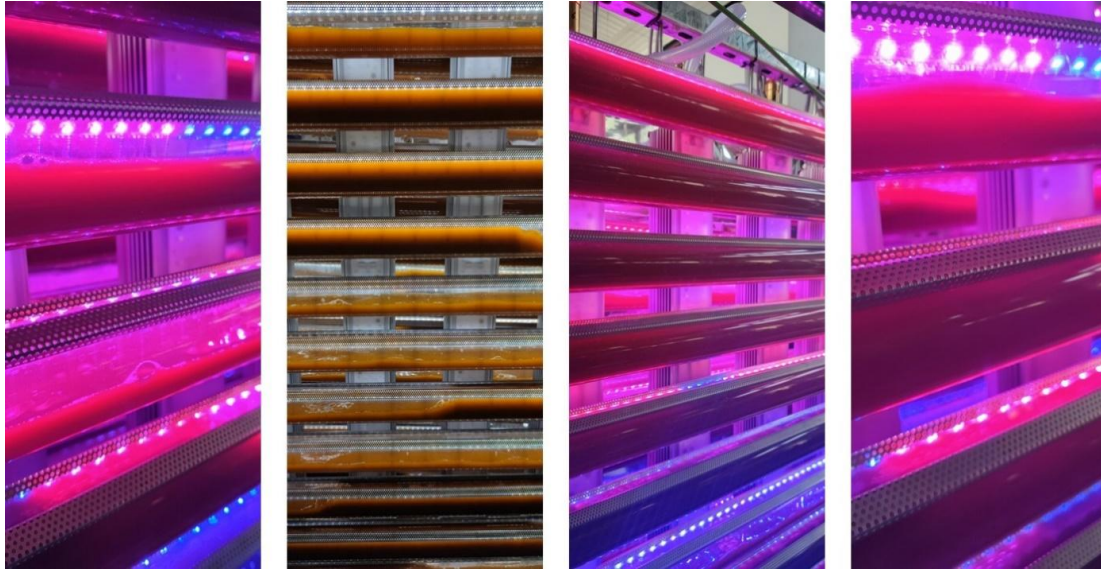


Abb. 8: Kultivierung von *C. zoefingiensis* in der 200 L Pilotanlage.

Ein zentrales Element des Vorhabens ist die kontinuierliche Produktion frischer Algenbiomasse und deren Produkte unter kontrollierten Prozessparametern. Die Durchführung der experimentellen Studien erfolgte zunächst im Labormaßstab, um die Potenziale für eine Überführung in den technischen Maßstab abschätzen zu können. *Limnospira maxima* wurde dafür unter variierenden Durchflussraten im Chemostat-Modus kultiviert und sowohl die Biomasseproduktivität als auch die Pigmentzusammensetzung zu analysieren. Ein optimaler Produktionsbereich ergibt sich bei einer Durchflussrate von $0,2 - 0,3 \text{ d}^{-1}$. Unter diesen Bedingungen erzielt sowohl die Biomasseproduktivität als auch die Pigmentkonzentration einen Maximalwert. In einer Skalierungsstudie konnte zudem gezeigt werden, dass die Anlagenproduktivität um ca. 25 – 30 % bei kontinuierlichem Betrieb im Vergleich zum Satzbetrieb gesteigert werden kann. Für *C. zoefingiensis* ergaben sich durch die neue Leuchteninstallation zusätzliche Möglichkeiten, um auf die Physiologie der Mikroalge eingehen zu können. Mit Hilfe einer angepassten und dynamischen Lichtbereitstellung konnte die Biomasseproduktivität um den Faktor 5 gesteigert werden. Im kontinuierlichen Betrieb ist eine weitere Steigerung der Biomasseproduktivität um ca. 20 % erzielt worden.

TP1-10: Systembilanzierung

Ein wesentlicher Fokus der von TP1-10 lag auf der Bilanzierung der Energieströme im Aufbau des Pilotsystems bzw. der Validierung des Energierückgewinnungskonzeptes aus der Abwärme der wassergekühlten DH Licht – Leuchten. Zu diesem Zweck wurden über den Betrieb der Pilotanlage Temperaturdaten an den zentralen Wärmequellen- und -senken aufgezeichnet und ausgewertet (siehe Abbildung 8).

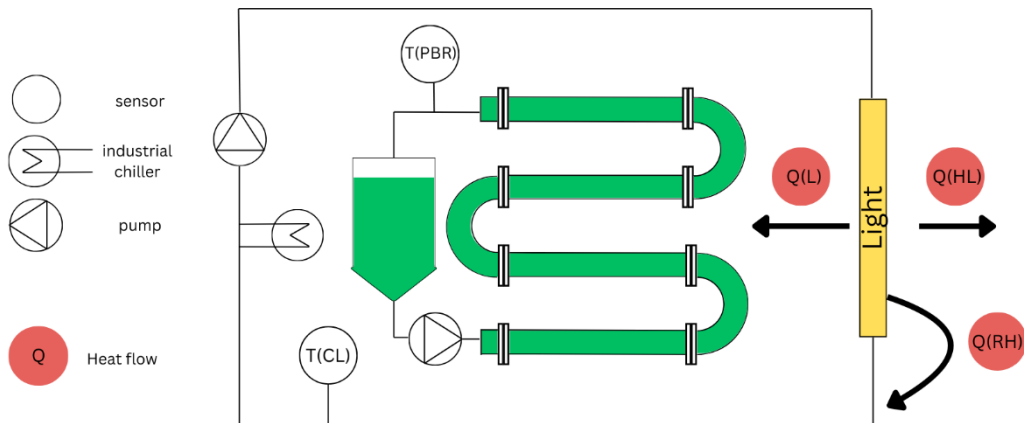


Abb. 8: Messsetup für Aufnahme der Wärmeenergieströme. $Q(L)$ Wärmestrom in den PBR durch das eintreffende Licht. $Q(RH)$ *Recovered heat* mittels des Kühlwassersystems. $Q(HL)$ Lost heat durch passive Kühlung an die umgebende Luft

III. Zahlenmäßiger Nachweis

Der Vergleich der kalkulierten und benötigten Fördermittel ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Projektlaufzeit wurde kostenneutral um 2 Monate verlängert. Die aktualisierte Projektlaufzeit (01.06.2022 – 31.08.2024) ist in der Abrechnung der Kosten berücksichtigt. Zusammenfassend konnte das Projekt mit den kalkulierten und zur Verfügung stehenden Mitteln gut durchgeführt werden. Eine kurze Begründung zu den jeweiligen Kostenpunkten ergibt sich wie folgt:

-
- 0812** Es wurde planmäßig ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (E13/2 0,65 VZÄ) auf dem Projekt beschäftigt (Dipl.-Ing. Richard Bleisch). Herr Bleisch ist aktuell auf ein Folgevorhaben im Innovationsraum beschäftigt und wird seine Promotion bis Ende 2025 abschließen.
-
- 0831** Um einen reibungslosen Labor- und einen effizienten Projektablauf zu gewährleisten, ergab sich in der Projektlaufzeit ein Mehrbedarf an Laborequipment, v.a. zur Vorbereitung von kulturen für das Pilotsystem. Aus diesem Grund wurden ein zusätzlicher Rotationsschüttler sowie doppelwandige Blasensäulensysteme erworben, um die verschiedenen Skalierungsstufen bis zum Pilotmaßstab abdecken zu können.
-
- 0835** In der Kostenposition „Fremdleistungen“ ergaben sich nur geringfügige Mehrkosten. Die wesentlichen Ausgaben betrafen die Fertigung und Installation des Wärmetauschers an der Pilotanlage.
-
- 0843** In der Kostenposition „Allgemeine Verwaltungsausgabe“ (inkl. der Verbrauchsmaterialien) ergab sich ein Mehrbedarf an Laborutensilien (Chemikalien, Gefäße, Filter, Kultivatoren) im Vergleich zum kalkulierten Budget von ca. 14,9 %. Der Mehrbedarf geht vor allem auf die Preissteigerungen innerhalb der Projektlaufzeit und auf die laborintensive Arbeit der TU Dresden zurück.
-
- 0846** In der Kostenposition „Dienstreisen“ wurden geringfügige Änderungen in Bezug auf die Projektbeantragung vorgenommen, v.a. durch die Möglichkeit das Vorhaben
-

auf der Bundesgartenschau einem breiten Publikum zu präsentieren. Ansonsten wurden die Mittel wie eingeplant verausgabt.

0850 In der Kostenposition „Geräte“ wurden geringfügige Mehrkosten im Vergleich zur Projektbeantragung generiert (ca. 2,4 %). Die Mittel wurden wie geplant für die Prozesskette zur Herstellung von frischer Algenbiomasse verwendet, sowohl im upstream Bereich als auch zur Umsetzung der technischen Demoanlage.

Tab. 4: Vergleich der bewilligten und zahlenmäßig erbrachten Leistungen der TU Dresden.

"ALGAE-MODULE"				Laufzeit: 01.07.2022 31.08.2024		
Position	GFP	IST VWN	Nachgewiesene Ausgaben lt. SAP	Korrektur nach Prüfung IR	IST Gesamt nach Prüfung IR	Erfüllung nach Prüfung IR
	22.05.2024	15.11.2024	13.01.2025	5	6	7
1	2	3	4			
0812	91.100,00 €	89.201,81 €	89.201,81 €	- €	89.201,81 €	97,92%
0817	- €	- €	- €	- €	- €	0,00%
0822	- €	- €	- €	- €	- €	0,00%
0831	2.000,00 €	3.312,61 €	3.312,61 €	- 580,23 €	2.732,38 €	136,62%
0834	- €	- €	- €	- €	- €	0,00%
0835	3.000,00 €	3.303,01 €	3.303,01 €	- €	3.303,01 €	110,10%
0843	9.450,00 €	10.854,73 €	10.854,73 €	- €	10.854,73 €	114,86%
0846	2.600,00 €	2.558,31 €	2.558,31 €	- €	2.558,31 €	98,40%
0850	15.600,00 €	15.972,70 €	15.972,70 €	- €	15.972,70 €	102,39%
Zwischensumme	123.750,00 €	125.203,17 €	125.203,17 €	- 580,23 €	124.622,94 €	100,71%
0865	24.750,00 €	24.750,00 €	24.750,00 €		24.750,00 €	100,00%
Summe	148.500,00 €	149.953,17 €	149.953,17 €		149.372,94 €	100,59%
	gez. Bundesmittel	- 148.500,00 €	- 148.500,00 €		- 148.500,00 €	
	Kassenstand	- 1.453,17 €	- 1.453,17 €		- 872,94 €	

IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Das Forschungsvorhaben hätte ohne die Förderung des BMBF nicht in diesem Maße durchgeführt werden können, da die Eigenmittel für die Demonstration neuer Technologien durch keinen der Projektpartner zur Verfügung stehen. Die Projektziele konnten in der ambitionierten Projektlaufzeit von 26 Monaten mit sehr gutem Erfolg und zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Meilensteinen absolviert werden.

Der Einsatz der Fördermittel entspricht nahezu der Projektplanung und wird demnach als vollkommen angemessen eingestuft. Die Projektergebnisse bilden die Grundlage für eine Weiterführung der technologischen Entwicklung und Implementierung in Produktionsanlagen. Das TRL der entwickelten Technologien wird nach Projektende auf TRL 5 eingestuft, da diese in entsprechender Einsatzumgebung demonstriert werden konnten.

V. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt ALGAE-Module 4.0 bot im Berichtszeitraum die Grundlage für wissenschaftliche Abschlussarbeiten von Studenten*innen (Masterarbeit, Projektarbeiten) aus verschiedensten Disziplinen, u.a. Biotechnologie (Masterarbeit), Bioverfahrenstechnik (Projektarbeit) sowie Embedded Systems (Projektarbeit). Das Projekt hat dazu beigetragen, das Themengebiet „Alge“ als nachhaltige und gesunde Nahrungsquelle weiter einem breiten (Fach-)Publikum zu

vermitteln. Die Demonstrationsanlage wurde aktiv in die Wissensvermittlung eingebunden und sowohl für Fachpublikum als auch für studentisch Arbeiten präsentiert und genutzt.

Aus dem Vorhaben erzielte Ergebnisse bilden die Grundlage für zahlreiche populärwissenschaftliche und wissenschaftliche Publikationen eine Patentanmeldung (siehe Kapitel VIII). Die Projektergebnisse bilden zudem die Grundlage für weitere Forschungsprojekte, u.a. das Verbundvorhaben ENABLE, welche im Zuge des Innovationsraumes NewFoodSystems zur Lebensmittelzulassung der Mikroalge *Chlorella zofingiensis* führen soll.

VI. Fortschritt auf dem Gebiet

Den Projektbeteiligten sind liegen keine Informationen zu marktrelevanten Entwicklungen vor, die das vorliegende Projektthema signifikant tangieren oder beeinflussen. Die autonome Produktion von Mikroalgenbiomasse in modularen Anlagen ist aktuell alleiniges USP und IP der Projektbeteiligten. Dies wird durch die Akzeptanz der technologischen Patentschrift untermauert. Die wesentlichen wissenschaftlichen Fortschritte wurden in Form von *peer review* - also auch durch externe Fachgutachten abgesichert – der wissenschaftlichen Community zur Verfügung gestellt.

Einen wesentlichen Fortschritt in dem Fachgebiet stellen die Tools zum Prozessmonitoring frischer Algenbiomasse dar. Diese Fortschritte konnten nur durch den Einsatz innovativer Datenprozessierung (KI-Methoden) etabliert werden und ermöglichen in Zukunft eine prozessbegleitende Qualitätsanalyse in nahezu Echtzeit. Diese Ansätze müssen unbedingt weiterverfolgt und entsprechend auf höhere TRL Level gehoben werden (z.B. durch die Entwicklung von inline Sensoren).

Die Projektergebnisse liefern wichtige Grundlagen für die Umsetzung von modularen Prozesseinheiten für industrielle Anwendung und bieten Potenzial für weitere Entwicklungsschritte hin zu intelligenten, z.B. netzdienlichen Verbrauchern in einem smart kontrollierten regenerativen Energiemanagement.

VII. Veröffentlichungen & Öffentlichkeitsarbeit

In Zusammenarbeit mit dem Koordinationsteam des Innovationsraums NewFoodSystems wurde ein Projektflyer sowie Projektposter für die Außendarstellung und Öffentlichkeitsarbeit des Vorhabens ALGAE-MODULE 4.0 entworfen (Abbildung 9).

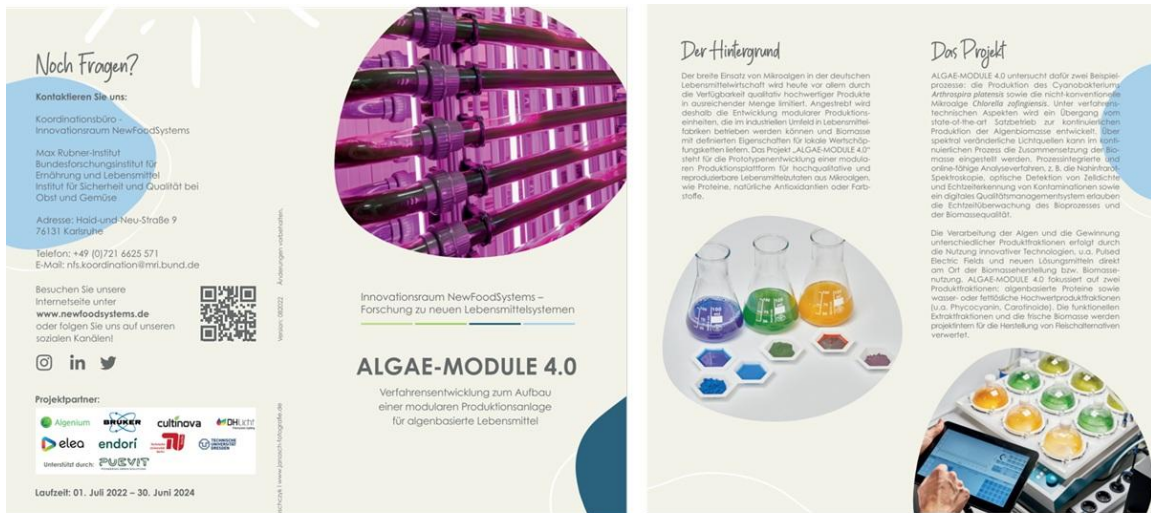


Abb. 9: Projektflyer für das Verbundvorhaben ALGAE-MODULE 4.0.

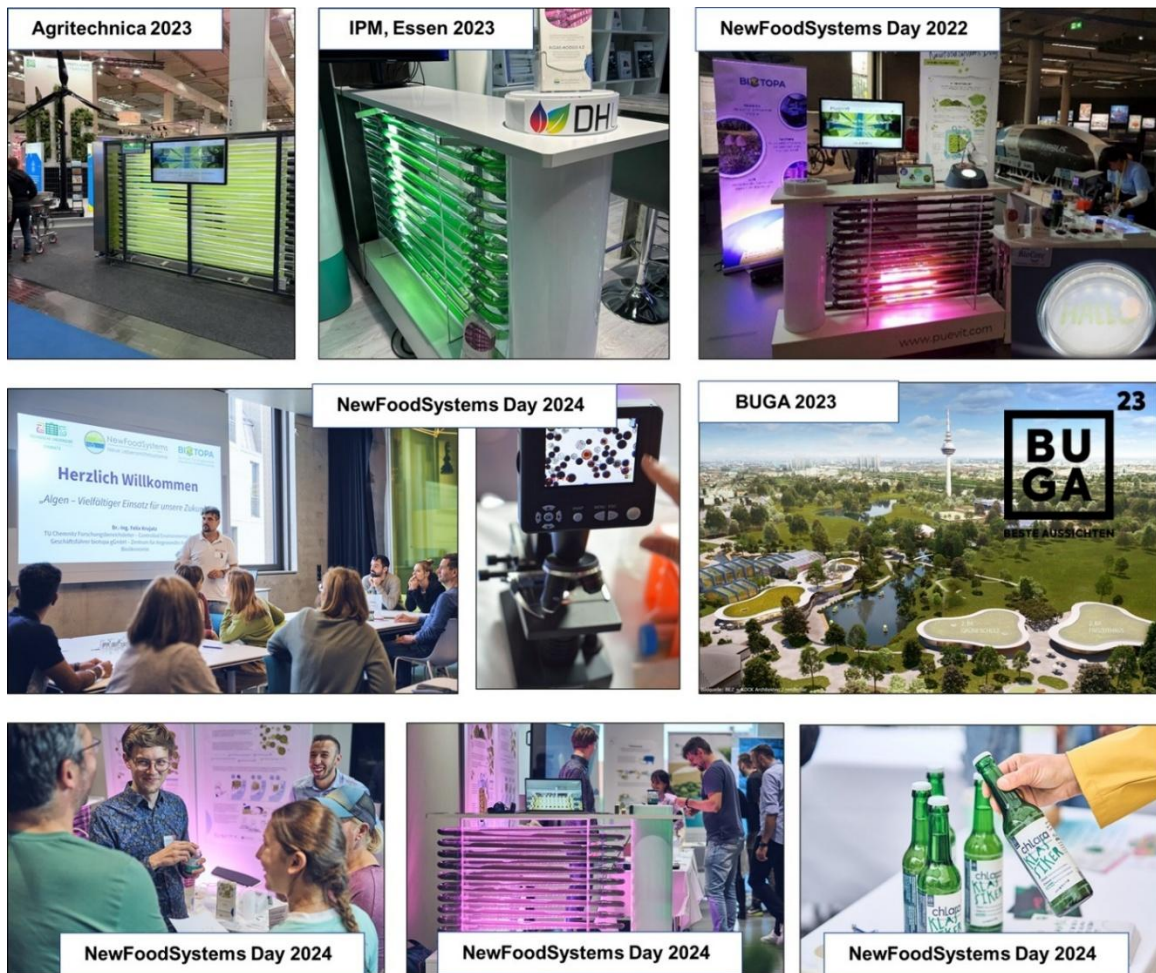


Abb. 10: Öffentlichkeitsarbeit des Verbundvorhabens ALGAE-MODULE 4.0

Der Innovationsraum und das Verbundvorhaben ALGAE-MODULE 4.0 waren geprägt von publikumswirksamen Veranstaltungen und Maßnahmen zum Wissenstransfer und -kommunikation (Abbildung 9). Die TU Dresden war in zahlreichen Formaten als Projektkoordinator aktiv:

- Veröffentlichung der Projektinhalte auf Institutshomepages (v.a. TUD, ELEA, DH Licht GmbH)
- 09/2022 Projektvorstellung auf dem NewFoodSystemsDay 2022 (Nürnberg)
- 10/2022 Erstellung Projektflyer ALGAE-Module 4.0

- 05/2023 Vorstellung des Innovationsraumes NewFoodSystems auf dem Business Abend des Bioeconomy Clusters e.V. (Dresden)
- 05/2023 COSMO Wissenschaftsausstellung im Kulturpalast (Dresden)
- 06/2023 Lange Nacht der Wissenschaften in Dresden: Gläserne Algenmanufaktur (Dresden)
- 06/2023 Seniorenakademie in Zusammenarbeit mit der VHS Dresden (Dresden)
- 10/2023 Vorstellung des Projektes auf den ELEA Adventure Days (Quakenbrück)
- 10/2023 „Ein Abend in der Algenproduktion“ - Angebot über die VHS Dresden, Zukunftgestalten e.V., der TU Dresden und PUEVIT GmbH (Dresden)
- 05/2024 Workshopreihe Zukunft i(s)st jetzt (Münster)

Umfangreichere Projektvorstellungen erfolgten im Rahmen der NewFoodSystems Days im Deutschen Museum Nürnberg (Abbildung 10) sowie im Projektschaufenster auf der Bundesgartenschau 2023 in Mannheim.

Im Zuge des Verbundvorhabens ALGAE-MODULE 4.0 wurden folgende Veröffentlichungen in *peer review* Journalen sowie in Form von Konferenzbeiträgen erarbeitet bzw. befinden sich noch in Vorbereitung:

-
- [1] Bleisch, R., Mühlstädt, G., Hilpmann, G., Seibel, L., Steingröwer, J., Zahn, S., Wagemans, A.M., Krujatz, F., 2025. A robust, non-invasive and fast routine for the quantification of the nutritional composition of microalgae biomass slurries based on near-infrared spectroscopy. *Algal Res.* 85, 103882. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103882> (open access)
-
- [2] Bleisch, R. et al., Physiological adaptation of *Chromochloris zofingiensis* in three-phased cultivation performed in a pilot scale photobioreactor. eingereicht bei LIFE (open access)
-
- [3] Bleisch et al. Multiparametric optical sensor platform for the real-time monitoring of microalgae, Manuskript in Vorbereitung (Journal noch offen)
-
- [4] Bleisch et al. Development of a rapid near-infrared spectroscopy method to analyze the biomass composition of algae slurries, Poster, ECCE/ECAB 2023, Berlin. (Poster)
-
- [5] Establishment of a rapid and reliable near-infrared spectroscopy methodology to analyze the nutritional composition of microalgae, DACH Algen Summit, Bern. (Poster)
-
- [6] Posterpräsentationen auf den Konsortialtreffen des Innovationsraumes (Karlsruhe)
-
- [7] Projektvorstellung auf den Konsortialtreffen des Innovationsraumes (Karlsruhe)
-
- [8] Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Algenproduktion, EP24173843A1, DE102023111197 (Patent)
-