

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Sea & Sun Technology GmbH

**Innovationsraum: BaMS-OnAsta**  
**Online-Messsystem zur Bestimmung der**  
**Astaxanthinbildungsrate in Mikroalgenkulturen**  
**Umsetzungsphase**

**031B0915M**

**Teil I – Kurzbericht**

Isabelle Kunert, Dr. Stefan Hindersin

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B0915M gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

### Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines optischen Online-Messsystems zur Bestimmung des Astaxanthingehalts in Mikroalgenkulturen. Sea & Sun Technology GmbH (SST) kultiviert seit über 10 Jahren Mikroalgen, mit dem Fokus auf nachhaltige Astaxanthinproduktion durch die Mikroalge *Haematococcus pluvialis*. Eine Online-Echtzeitmessung des Zielproduktes (Astaxanthin-Raumzeitausbeute) kann die Produktionsüberwachung sicherstellen und bietet weiterhin ein enormes Potential für Optimierungsstrategien. Jedoch sind am Markt keine Lösungen für die Erfassung von Astaxanthin in Mikroalgenkulturen erhältlich, wodurch die Produktbildungsrate in der Vergangenheit zeit- und kostenintensiv im Labor bestimmt werden musste. Durch die Akkumulation von Astaxanthin über den Verlauf der Kultivierung färbt sich die Mikroalgenkultur von grün zu tiefrot (Abb. 1). Diesen Farbwechsel macht sich SST zu Nutze, indem ein Sensor entwickelt wurde, der daraus die Produktbildungsrate ableitet.

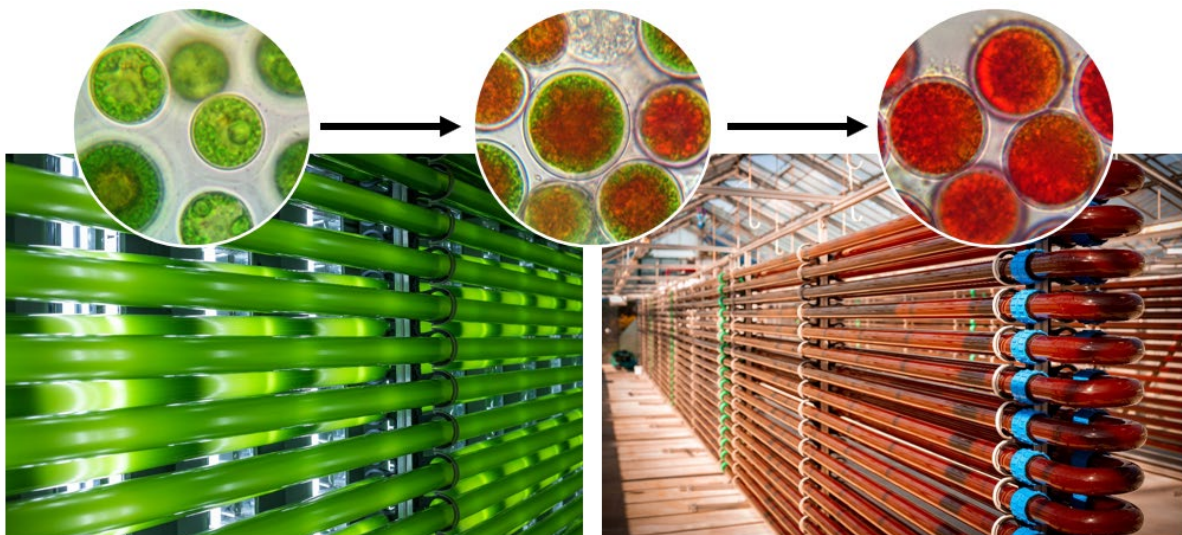


Abbildung 1: Farbumschlag der Mikroalge *Haematococcus pluvialis* im Verlauf der Kultivierung: durch die Akkumulation von Astaxanthin verändert sich die Farbe von grün zu rot.

### Stand der Technik zu Projektbeginn

Die Astaxanthinbildung in der Mikroalge *Haematococcus pluvialis* wird durch eine Vielzahl von fluktuierenden Prozessparametern beeinflusst. Diese umfassen u. a. Lichtverhältnisse, Temperatur, pH-Wert, CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Partialdruck, Salinität und Turbulenz innerhalb des Photobioreaktors. Die relevanten Prozessparameter werden durch hauseigene und kommerziell verfügbare Sensoren erfasst und verarbeitet. Die meisten dieser Sensoren messen direkt in der Kultur, womit sie den Problemen der klassischen Messtechnik wie Korrosion, Auslaugung, Druckwechsel und Biofilmbildung ausgesetzt. Seit einigen Jahren wird in der Mess- und

Regeltechnik daher Online-Sensorik beliebter. Optische Überwachungssysteme haben grundsätzliche Vorteile in Bezug auf Messkinetik und die Messsignalstabilität, da in der Regel kein direkter Kontakt zum Prozessmedium vorhanden ist. Bei der Entwicklung von Messsensoren für ozeanische und limnische Anwendungen hat SST jahrzehntelange Erfahrung, die auch zur Entwicklung von Bioproduktionssystemen und der Implementierung von Mess- und Überwachungssensorik für die Mikroalgenkombination genutzt wird.

### **Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt lief über einen Zeitraum von 2 Jahren (Februar 2022 bis Januar 2024) mit SST als alleinigem Projektpartner. Zunächst wurde der Sensor konzipiert: Ein optischer Sensor mit integrierter Lichtquelle, der in Echtzeit von außen die optischen Eigenschaften der Mikroalgenkultur erfasst und daraus den Astaxanthingehalt berechnet. Gleichzeitig soll der Sensor mit der hauseigenen Steuerungssoftware bedienbar sein, um die Integration in die Produktionsüberwachung problemlos zu ermöglichen.

Im nächsten Projektschritt erfolgte der Abgleich von Sensordaten mit Ergebnissen der physikalisch-chemischen Astaxanthinbestimmung im Labor. Dabei wurden unter anderem relevante Wellenlängen gesucht, die die Veränderung in der Pigmentzusammensetzung der Mikroalgen widerspiegeln, und Störgrößen ermittelt und quantifiziert. Diese Vergleichsdaten bildeten die Grundlage für (1) eine Kalibrierung bezogen auf die Reinsubstanzen und (2) den Matrixabgleich, der gleichzeitig die Kalibrierung sowie die verrechneten Störsignale umfasst.

Letztlich wurde der entwickelte Lichtsensor in der Anwendung am Photobioreaktor getestet. Dabei wurden zunächst generelle Funktionstests durchgeführt und auf Licht- und Temperaturempfindlichkeit in der Gewächshausumgebung geprüft. Außerdem wurde der Sensor in die hauseigene Steuerungseinheit integriert und überwacht, dass es bei automatischen Messungen nicht zu Messausfällen kommt. Außerdem wurde die Kalibrierung durch erneuten Vergleich mit der physikalisch-chemischen Astaxanthinbestimmungsmethode verifiziert.

### Wesentliche Ergebnisse

Ergebnis des OnAsta-Projekts ist die erfolgreiche Entwicklung und Implementierung eines Lichtsensors, der zuverlässig die Astaxanthinbildungsrate in Kulturen der Mikroalge *Haematococcus pluvialis* bestimmen kann. Im Konkreten wurden folgende Ergebnisse erreicht:

- Lichtsensor spezifiziert für die Produktion von Astaxanthin
- Integration des Lichtsensors am Photobioreaktor
- Kalibrationsgleichung ist erstellt (Abb. 2)
- Störfaktoren sind ermittelt und Ausgleichskoeffizienten für den Matrixabgleich definiert
- Bestätigung der Funktion des integrierten Lichtsensor am Photobioreaktor

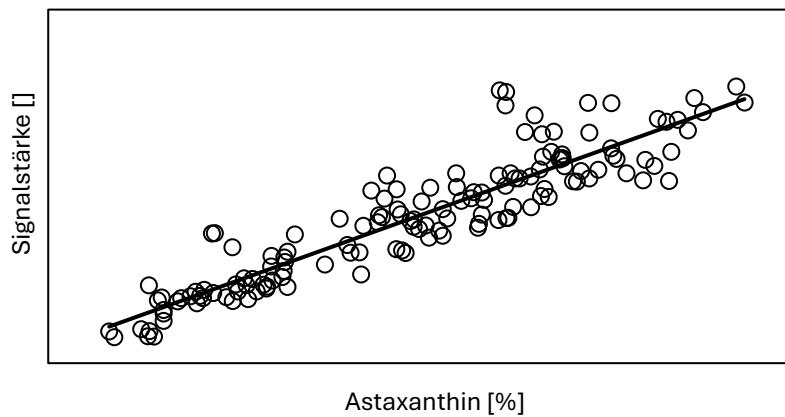


Abbildung 2: Kalibriergerade für die Astaxanthinbestimmung in Kulturen von *Haematococcus pluvialis*.



Sea & Sun Technology GmbH

**Innovationsraum: BaMS-OnAsta**  
**Online-Messsystem zur Bestimmung der**  
**Astaxanthinbildungsrate in Mikroalgenkulturen**  
**Umsetzungsphase**

**031B0915M**

**Teil II – Eingehende Darstellung**

Isabelle Kunert, Dr. Stefan Hindersin

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B0915M gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

## 1. Projektbeschreibung

### AP 1 – Entwicklung eines Lichtsensors für Photobioreaktoren der Astaxanthinherstellung

#### AP 1.1 Spezifische Anforderungsanalyse

[REDACTED]

**Spektrometer:** Die Dimension des Spektrometers sollten möglichst klein ausfallen und der Detektor möglichst gut an die Form der Glasröhren des Photobioreaktors angepasst sein. Trotzdem muss eine ausreichende spektrale Auflösung sowie detektierbarer Wellenlängenbereich gegeben sein.

**Lichtquelle:** Es muss auf ein möglichst gleichmäßiges Lichtspektrum sowie geringen Stromverbrauch geachtet werden.

#### AP 1.2 Entwicklung des Lichtsensors

[REDACTED]

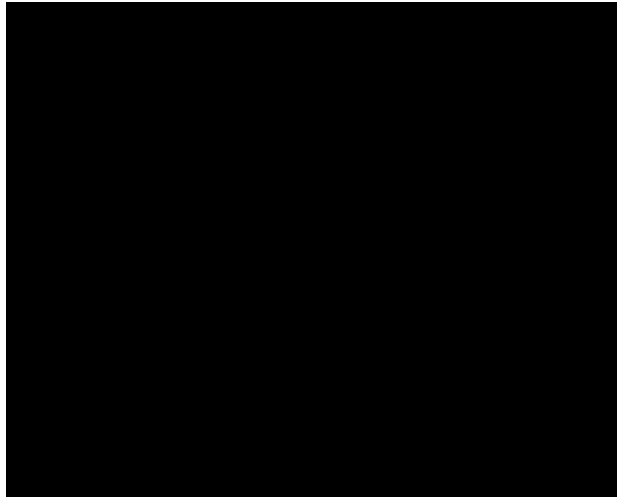
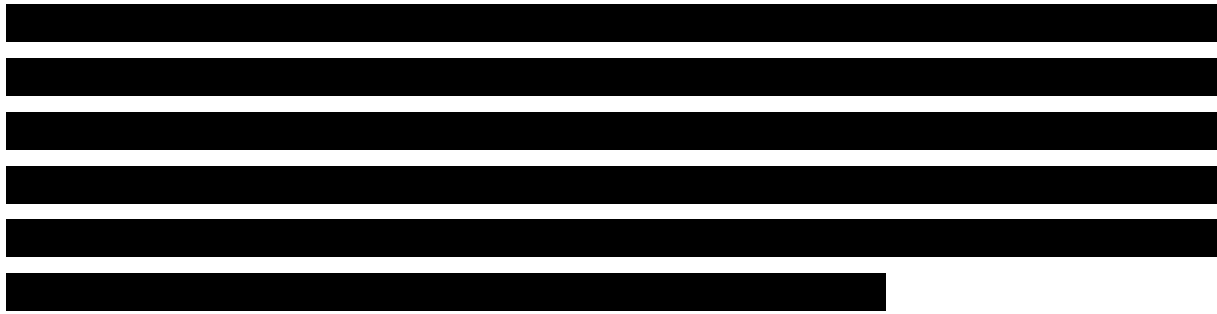


*Abbildung 1: Der erste Prototyp des OnAsta-Lichtsensors.*

Außerdem wurde ein zweiter, kostengünstigerer Prototyp basierend auf Arduino, einer Open-source Plattform für Elektronik, gebaut (Abbildung 2). In das Arduino-Modul wurde ein kommerzieller Sensor aus 6 Zellen, die einströmendes Licht einer festen Wellenlänge einfangen (450 nm, 500 nm, 550 nm, 570 nm, 600 nm, 650 nm), eingebaut und die Daten mit einer integrierten Software einlesen. Für den Arduino-Prototypen wurden dieselben Lichtquellen genutzt wie für das ursprüngliche Modell. Es wurden vergleichende Tests durchgeführt (AP 2), bei denen der Arduino-Prototyp deutliche schlechtere Ergebnisse lieferte als der ursprüngliche Prototyp, weshalb mit dem Arduino-Modell nicht weitergearbeitet wurde.

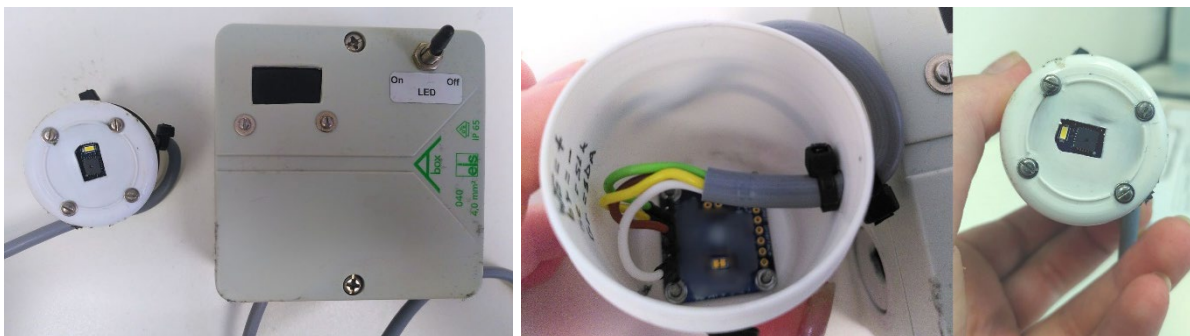


*Abbildung 2: Der zweite Prototyp des OnAsta-Lichtsensors basierend auf der Arduino-Plattform.*

### AP 1.3 Integration in die Aquakultur

Ein Prototyp des Spektrometers wurde *indoor* an einen Photobioreaktor angebracht und getestet. Verschiedene Positionen am Photobioreaktor wurden untersucht: Die geeignetste Position befindet sich hinter einem Coupling der U-Turns am Ende des Photobioreaktors, da hier einfallendes Licht nicht durch das Glas reflektiert wird und die Messung so aussagekräftigere Ergebnisse liefern kann (AP 2, Störgrößen). Außerdem wurde der U-Turn von außen abgedunkelt, um Messfehler durch einfallendes Licht zu minimieren (Abbildung 3). Als die Optimierung des Geräts abgeschlossen war, wurde die Schnittstelle zur Software programmiert (AP 3).

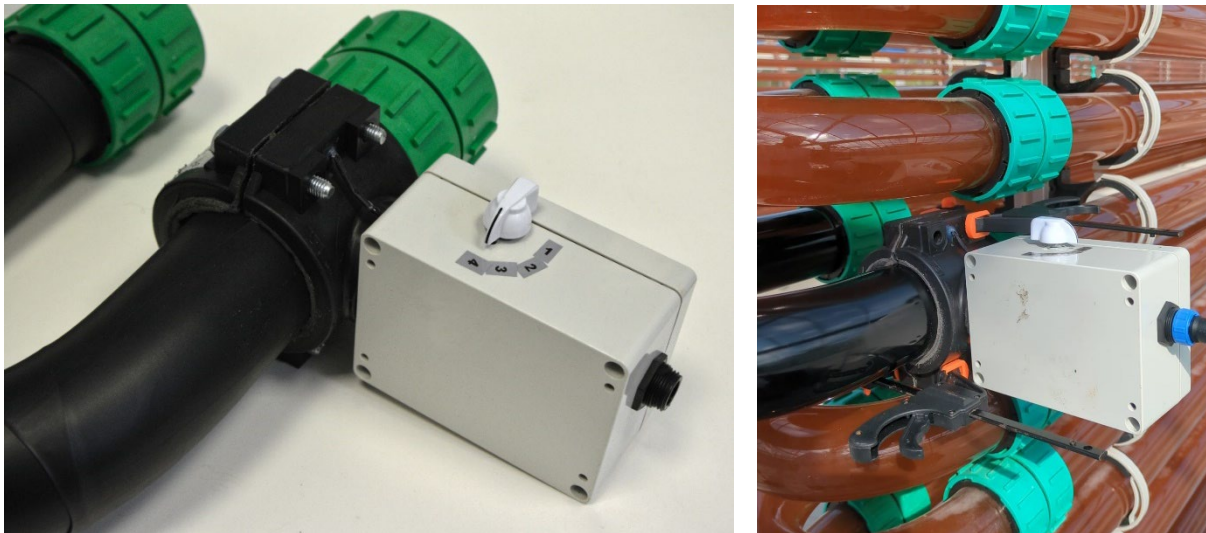


*Abbildung 3: Lichtsensor zum Ende des OnAsta-Projekts angebracht am abgedunkelten U-Turn eines Photobioreaktors.*

### Erreichte Meilensteine in AP 1

M 1.1 Pflichtenheft mit Anforderungsspezifikationen und Bauteilrecherchen (Monat 3)

M 1.2 Integrierter Lichtsensor am Photobioreaktor (Monat 16)

## AP 2 – Analytik, Messtechnik, Management und Qualitätssicherung

Die Teilarbeitspakete 2.1 (Testung und Auswahl geeigneter Spektralbereiche), 2.2 (Biologische/Physikalische Parametrisierung mittels Benchtop-Versuchen), 2.3 (Simulation von Produktionsszenarien) und 2.4 (Statistik und Auswertung) greifen thematisch ineinander und werden daher in diesem Abschnitt gesammelt diskutiert.

### Durchführung der Messungen

Zunächst erfolgten die Messungen in Glasflaschen mit Kulturen, die aus der Hauptproduktion der Firma entnommen wurden (Abbildung 4, links). Um schneller Ergebnisse zu erzielen und von der Hauptproduktion der Firma unabhängiger zu sein, wurden mehrere Blasensäulenreaktoren konzipiert, die u. a. für die Datenaufnahme für OnAsta genutzt wurden (Abbildung 4, rechts). Diese Blasensäulen sind aus demselben Glas der Firma Schott, das auch für die Photobioreaktoren der Hauptproduktion genutzt wird. So sollte sichergestellt werden, dass die Ergebnisse aus dem Labor auf die Photobioreaktoren übertragbar sind. Die gebaute Experimentieranlage besteht aus 9 Blasenröhren mit 4 L Volumen, die, anders als die Photobioreaktoren der Hauptproduktion, vertikal betrieben werden. Die Begasung erfolgt von unten mit einem CO<sub>2</sub>-Luftgemisch. Es sind drei verschiedene LEDs verbaut, jeweils in dreifacher Ausführung. Zur Messung mit dem Spektrometer wurde das Gerät am unteren Teil der Röhren befestigt und die LEDs und die Begasung kurzzeitig ausgeschaltet, um Störungen des Signals zu vermeiden.



Abbildung 4: Links – erste Benchtop-Versuche mit dem Spektrometer-Prototyp. Rechts – 9 Blasensäulen zur Erfassung von Daten für das OnAsta-Projekt.

Zum Vergleich mit den aufgenommenen Spektren wurde für jede Probe der Astaxanthin- und Chlorophyllgehalt sowie die Biomassekonzentration bestimmt. Diese Bestimmung erfolgte manuell im Labor nach den etablierten Methoden der Firma. Für die Biomassekonzentration werden die Mikroalgen in einem festen Volumen Kulturprobe durch Filtration vom Kulturmedium getrennt, getrocknet und eingewogen. Die Astaxanthinbestimmung, bei der gleichzeitig auch der Chlorophyllgehalt bestimmt werden kann, ist deutlich aufwendiger. Dafür müssen zunächst die Mikroalgenzellen aufgeschlossen werden, um die enthaltenen Pigmente ins Lösungsmittel abzugeben. Daraufhin erfolgt die spektrometrische Messung der Absorption bei bestimmten Wellenlängen und die Berechnung der Konzentrationen.

### **Messmethode des Lichtsensors**

Für die Entwicklung des Lichtsensors erfolgte zunächst die Auswahl der Messmethode: ob invasiv im Kulturmedium oder von außen durch das Glas des Photobioreaktors bzw. ob Reflexion oder Transmission gemessen werden soll. Zahlreiche Argumente sprachen für die non-invasive Messung von außen, beispielsweise durch saubereres Arbeiten, verringertem Risiko von Kontaminationseintrag in die Kultur, Kostenersparnis beim Bau des Geräts etc. Daher wurde zunächst diese Methode verfolgt und konnte problemlos umgesetzt werden. Außerdem wurde überprüft, ob Reflexion oder Transmission (Durchlichtmessung) geeigneter ist. Dabei werden die Mikroalgen von der Lichtquelle angestrahlt.

### **Auswahl geeigneter Spektralbereiche**

Um aus dem Reflexionssignal die Astaxanthinkonzentration zu berechnen, mussten zunächst geeignete Bereiche bzw. Wellenlängen im Spektrum identifiziert werden. Dazu wurden Gesamtspektren zwischen 350 nm und 750 nm aufgenommen und analysiert. Als erstes erfolgte der Vergleich grüner, brauner (Übergangsstadium) und roter Kulturen von *Haematococcus pluvialis* ( ).

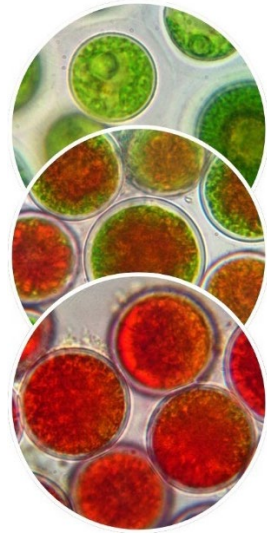
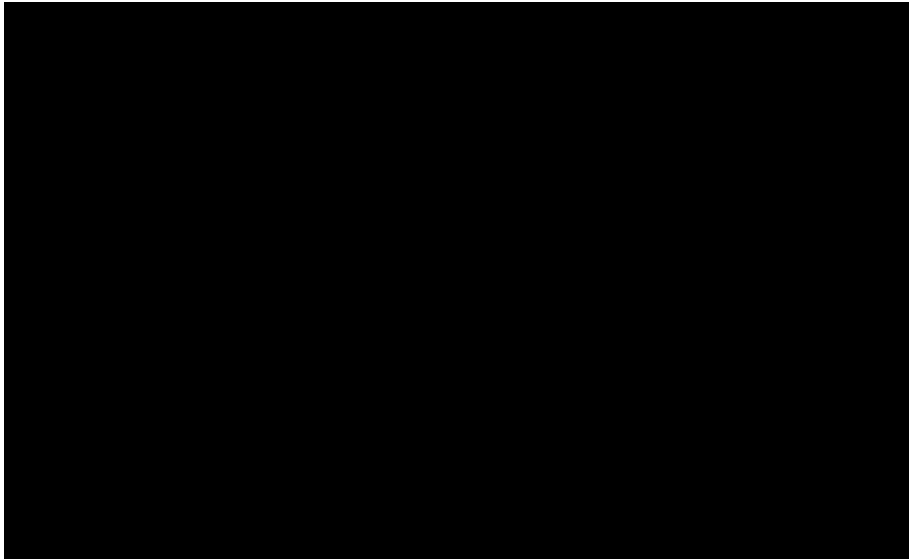


Abbildung 5: [REDACTED]  
Rechts – Mikroskopische Aufnahmen von *H. pluvialis* in der grünen, braunen und roten Phase der Kultivierung.

[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]

[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]

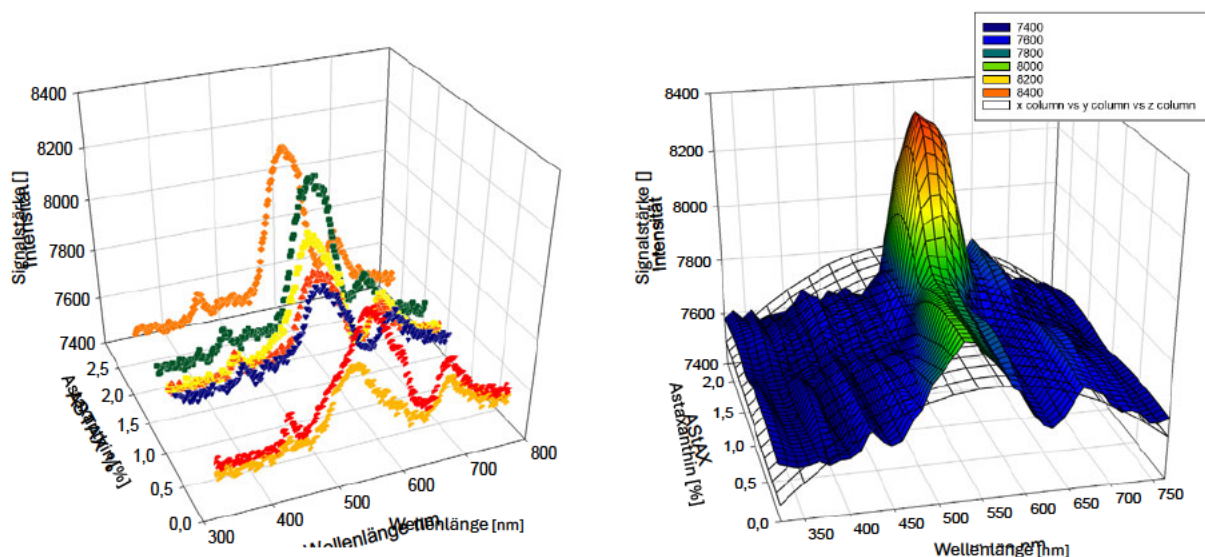
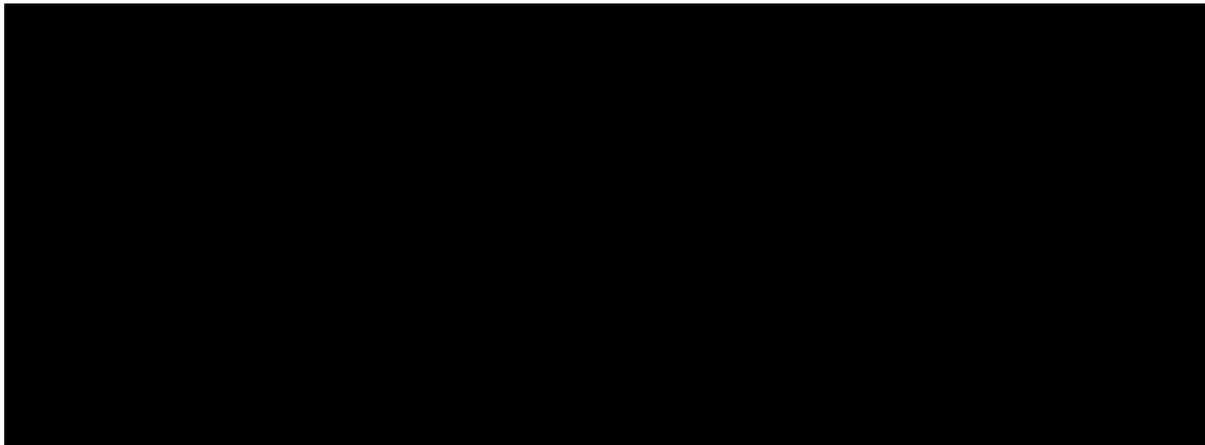


Abbildung 7: Spektren verschiedener Kulturen aufgefächert nach Astaxanthingehalt; links – Punktdiagramm, rechts – Mesh Plot.

Zur Berechnung der Astaxanthinkonzentration aus den gezeigten Daten wurden zwei Ansätze verfolgt. Zunächst wurde der Peak im Bereich 500 bis 620 nm durch eine polynomische Gleichung beschrieben (dargestellt durch die schwarze Linie in Abbildung 8). Für die Erstellung der Gleichung wurden die Bereiche links und rechts des Bereichs nicht betrachtet. Daraufhin sollte die Fläche unter dem Peak berechnet und mit dem Astaxanthingehalt verglichen werden. Leider führte dieser Ansatz zu keinem Ergebnis. Auch der zweite Ansatz, bei dem die Wende- und Scheitelpunkte der Kurve charakterisiert werden sollten (dargestellt durch die roten Kreise in Abbildung 8) führte zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis.

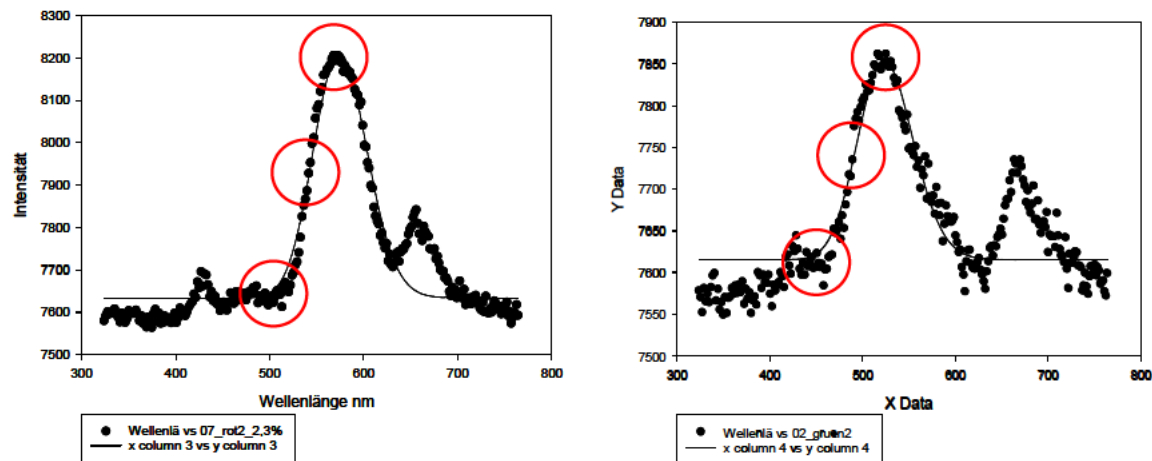
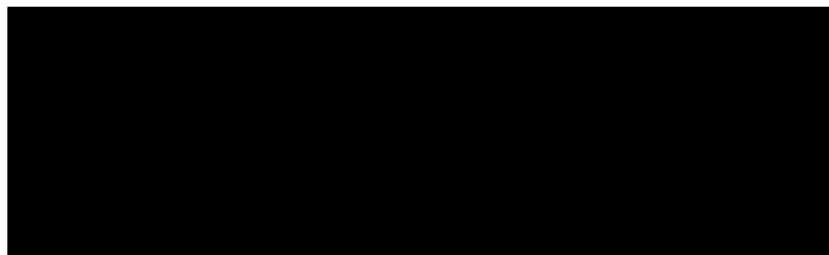


Abbildung 8: Vergleich zweier Spektren einer roten (links) und grünen Kultur (rechts). Einerseits wurde der Peak im Bereich 500 bis 620 nm durch eine polynomische Gleichung beschrieben (dargestellt durch die schwarze Linie), andererseits wurden die Wende- und Scheitelpunkte der Kurve charakterisiert (dargestellt durch die roten Kreise) und für die Korrelation mit der Astaxanthinkonzentration genutzt.

### Korrelation der Astaxanthinkonzentration

Es wurden bisher bereits relevante Spektralbereiche identifiziert, allerdings noch keine gute Korrelation zwischen der Astaxanthinkonzentration und dem Spektrum aufgedeckt. Daraufhin wurde eine Metaanalyse von mehr als 100 Datenpunkten durchgeführt, denen jeweils zusammengehöriger Biomasse-, Astaxanthin- und Chlorophyllkonzentration sowie das Vollspektrum angehören. Bei der Aufnahme dieser Datenpunkte wurde darauf geachtet, eine möglichst breite Punktwolke aufzunehmen. Die aufgenommenen Daten bewegten sich in folgenden Bereichen, die die Hauptproduktion der Firma repräsentieren (Tabelle 1). Die Auswertung der Daten erfolgte mit den Programmen Microsoft Excel und Matlab.

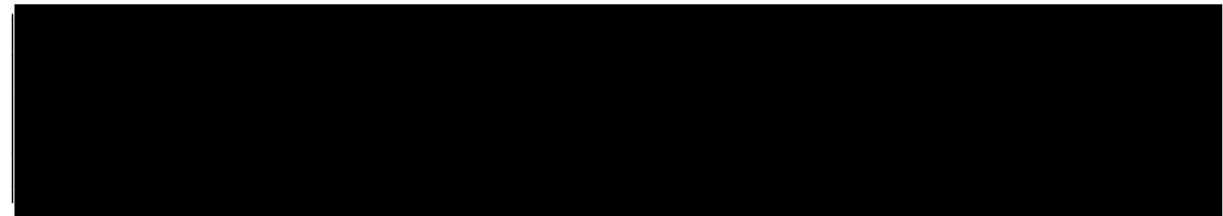
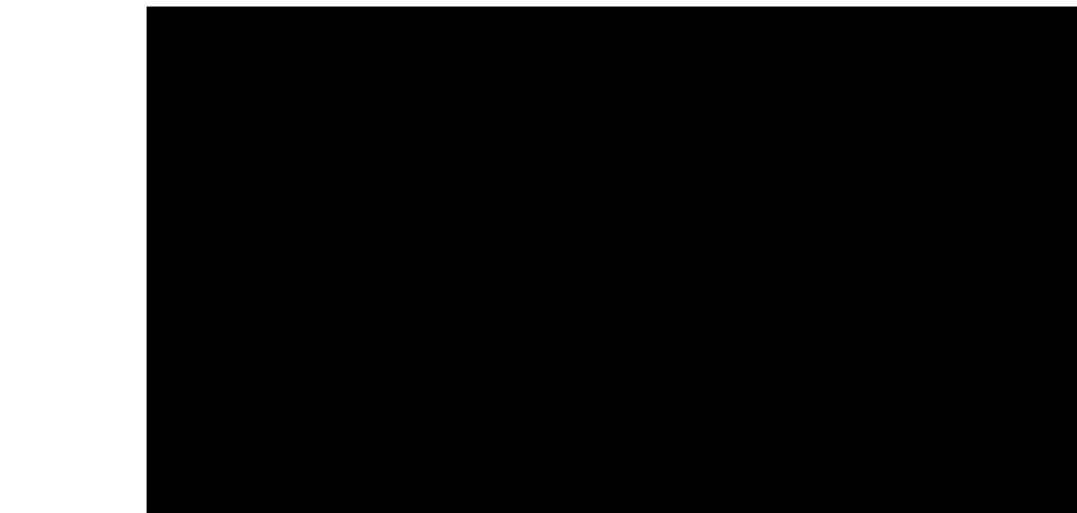
Tabelle 1: Spanne der für die Metaanalyse genutzten Daten.



Diese Metaanalyse basierte zunächst auf linearer Korrelation auf Basis des Bestimmtheitsmaßes. Das Bestimmtheitsmaß ist das Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ( $R^2$ ), das als der Anteil der Varianz von Y, der durch die Varianz von X erklärt wird, interpretiert werden kann.  $R^2$  liegt immer zwischen 0 und 1, wobei 1 die höchstmögliche statistische Signifikanz anzeigt.

- X     Signalstärke bei einer Wellenlänge
- Y     Astaxanthinkonzentration [%] oder Chlorophyllkonzentration [%] oder Bio-  
trockenmasse [g/L]

In Abbildung 9 ist beispielhaft die Tabelle dargestellt, mit der das  $R^2$  für jede Wellenlänge zwischen 324 und 760 nm berechnet wurde (links).

A table with 4 columns and 1 row, completely redacted with black boxes.A table with 4 columns and 1 row, completely redacted with black boxes.A table with 4 columns and 1 row, completely redacted with black boxes.A table with 4 columns and 1 row, completely redacted with black boxes.A table with 4 columns and 1 row, completely redacted with black boxes.

### **Bestimmung des Stresslevels**

Abgesehen von der Astaxanthinkonzentration der Kultur, ist auch das Stresslevel der Kultur von Relevanz. Das Stresslevel kann aussagen, ob eine Kultur bereits erntefähig ist sowie Artefakte in anderen Produktionsdaten zu erklären. Beispielsweise werden die Sensordaten zur Trübung einer Kultur (aufgenommen mit einem kommerziellen Sensor in der Kultur) durch andere Faktoren abgesehen von der Biomassekonzentration beeinflusst, z. B. Zellstadium, Zellgröße, etc. Das Stresslevel kann diese Faktoren annäherungsweise quantifizieren und so die Auswertbarkeit von Online-Daten erhöhen.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

## Störgrößen

Im Verlauf des Projekts wurden zahlreiche Störgrößen identifiziert. Diese sind einerseits prozessbedingt, andererseits biologisch bedingt, und störten entweder die Entwicklung des Sensors oder die Messung und die darauffolgende Berechnung.

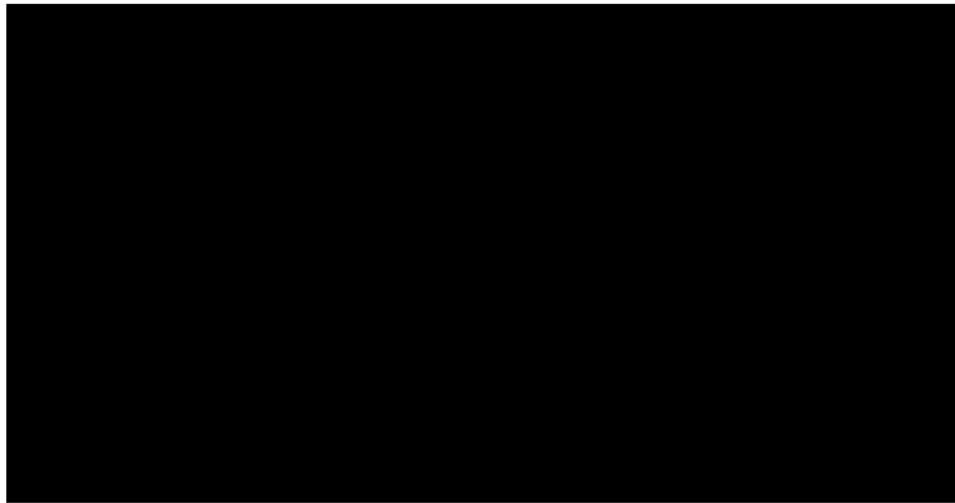
### Störgrößen im Entwicklungsprozess

Für die Entwicklung des Sensors stellte sich die wechselnde Pigmentzusammensetzung von *H. pluvialis* sowie die sich ändernde Biomassekonzentration im Verlauf der Kultivierung als Hindernis heraus. Vor allem die Überlagerung von Chlorophyll und Astaxanthin im Bereich 500 bis 600 nm war zunächst ein Problem, da es die Berechnung deutlich erschwerte. Die anfängliche Berechnung erzielte gute Ergebnisse bei sehr grünen und sehr roten Kulturen, aber nicht bei Kulturen im braunen Übergangsstadium.

Außerdem kam es zu Artefakten in der Datenlage bezüglich der Pigmentzusammensetzung und Biomassekonzentration. Normalerweise verläuft die Kultivierung folgendermaßen: Begonnen wird mit einer gering konzentrierten Kultur grüner Zellen, die sich im Laufe der Zeit teilen und grün Biomasse akkumulieren. Sobald die Nährstoffe im Kulturmedium aufgebraucht sind und/oder die Lichtintensität erhöht wird (z. B. durch Transfer ins Gewächshaus für mehr Sonnenlicht), beginnen die Zellen mit der Astaxanthinakkumulation und bauen Chlorophyll ab. Dadurch färben sich die Zellen erst braun, dann rot. Währenddessen erfolgt weiterhin eine Erhöhung der Biomassekonzentration, aber nun nicht mehr durch Erhöhung der Zellzahl durch Zellteilung, sondern durch Größenwachstum bestehender Zellen.

Als Resultat sammelten wir zunächst – unbeabsichtigt - nur Daten von Kulturen mit geringer Biomassekonzentration, hohem Chlorophyllgehalt und geringem Astaxanthingehalt sowie von Kulturen mit hoher Biomassekonzentration, geringem Chlorophyllgehalt und hohem Astaxanthingehalt. Die Berechnungen ergaben daraufhin eine starke Korrelation zwischen Biomasse und Astaxanthingehalt, die so nicht logisch erklärbar war. Daraufhin wurde der Datenpool vergrößert, so dass dieser auch Kulturen mit geringer Biomassekonzentration und hohem Astaxanthingehalt bzw. hoher Biomassekonzentration und geringem Astaxanthingehalt umfasst.





Die Biomassekonzentration stellte außerdem ein anderes Problem dar. In den Prototypen des Lichtsensors war nur eine LED mit fester Lichtintensität als Lichtquelle verbaut. Diese reichte, um erste Ergebnisse zu erzielen, und das Modul konnte bereits in der Produktionsumgebung getestet werden. Allerdings war das entwickelte Gerät dort kaum nutzbar, da bei geringer Biomassekonzentration das Signal der Lichtquelle den Detektor erreichte und so die Messung verfälschte, während bei zu hoher Biomassekonzentration kein Signal reflektiert wurde. Daraufhin wurde eine weitere LED eingebaut und beide Lichtquellen wurden dimmbar geschaltet. Die Lichtquellen sollten in Abhängigkeit von der Biomassekonzentration automatisch gedimmt werden. Leider kann mit dem entwickelten Sensor die Biomassekonzentration nicht zuverlässig bestimmt werden, wodurch die Verrechnung mit den Daten eines externen, kommerziellen Sensors gearbeitet werden muss.

#### Störgrößen während der Messung

Für die Messung selbst kommt es zu prozessbedingten Störungen. Vor allem einfallendes Außenlicht stört die Messung (Abbildung 13). Dieses konnte durch die Positionierung des Lichtsensors im U-Turn des Photobioreaktors, kurz hinter dem Coupling, sowie der Abdunklung des U-Turns (AP 1.3) weitgehend reduziert werden.

Auch die Bildung von Bläschen und kleinen Mikroalgenagglomerationen während der Kultivierung verursachte wiederkehrend Messungenauigkeiten. Eine angepasste Positionierung des

Lichtsensors sowie das Mitteln von mehreren Datenpunkten für eine berechnete Astaxanthinkonzentration konnte die Messfehler weitgehend beseitigen.

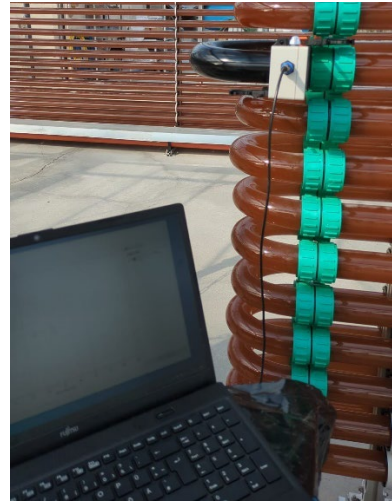
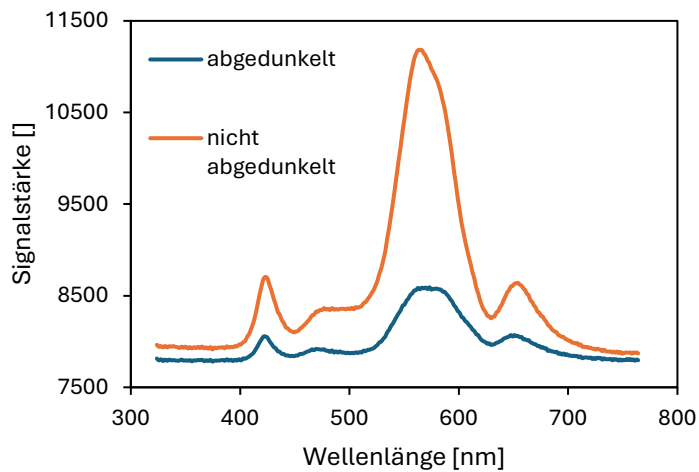


Abbildung 13: Links – Gesamtspektren einer Kultur, die während der Messung abgedunkelt wurde (blau) und einer nicht-abgedunkelten Messung (orange). Rechts – Abgedunkelter U-Turn am Photobioreaktor, um einfallendes Sonnenlicht abzuschirmen.

### Erreichte Meilensteine in AP 2

M 2.1 Berechnungsformel zur optischen Astaxanthin-Gehaltsbestimmung *in vitro* (Monat 12)

M 2.2 Korrelationsgleichung zur Astaxanthin-Gehaltsbestimmung *in vivo* (Monat 16)

### AP 3 – Funktionstests und Evaluierung des Lichtsensors

Die Teilarbeitspakete 3.1 (Funktionstests des Lichtsensors am Photobioreaktor) und 3.2 (Evaluierung, Korrektur und Optimierung des Lichtsensors) haben sich zeitlich abgewechselt und basierten aufeinander, daher werden in diesem Abschnitt beide Teilarbeitspakete diskutiert.

Als die Optimierung des Geräts abgeschlossen war (AP 1), wurde die Schnittstelle zur bereits bestehenden Steuerungssoftware programmiert (Abbildung 14). Diese basiert auf derselben Technologie, die auch für die hauseigenen Sensorentwicklungen der Meeresmesstechnik verwendet werden. Nach der Implementierung in die hauseigene Anlagensteuerung wurden automatische Messungen durchgeführt. Anfangs kam es zu Messausfällen, die schnell durch Anpassungen in der Software behoben werden konnten.

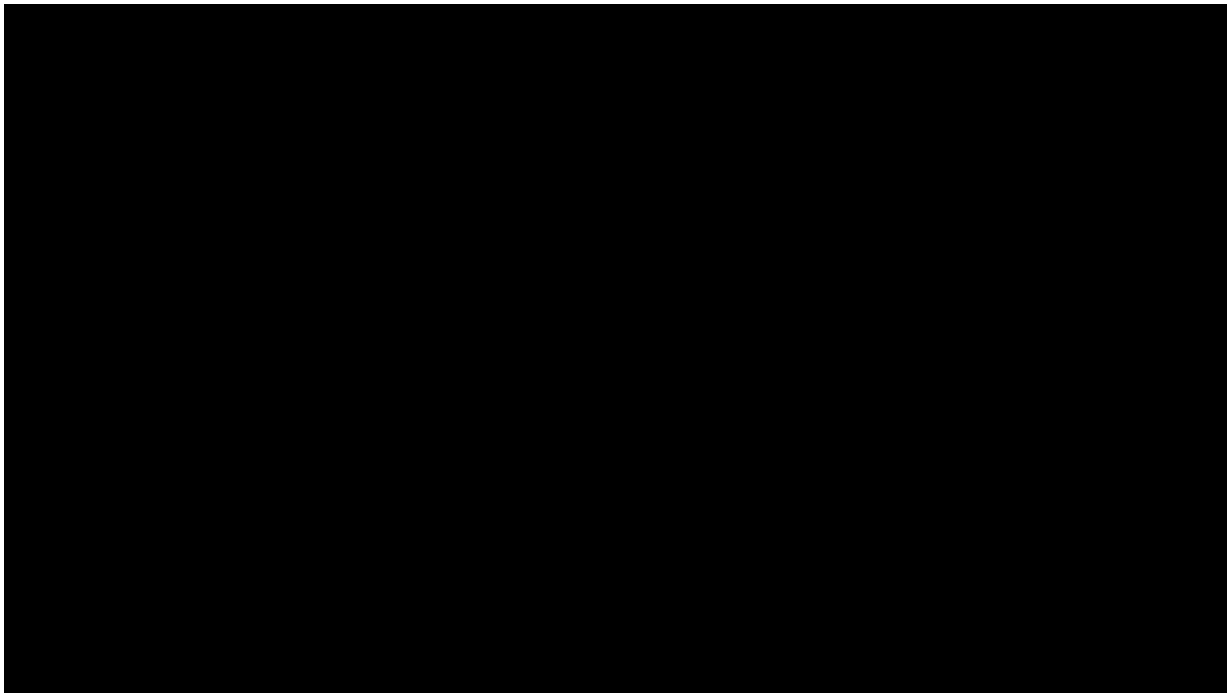


*Abbildung 14: Schnittstelle zur bereits bestehenden Steuerungssoftware für die Mikroalgenproduktion von SST.*

Daraufhin wurde durch den Abgleich von Sensordaten mit Ergebnissen der physikalisch-chemischen Astaxanthinbestimmung im Labor die entwickelte Kalibriergerade in echter Produktionsumgebung verifiziert. Außerdem wurde die Funktionsweise des Spektrometers *out-door* (Gewächshaus) untersucht. Auch hier ist eine Abdunklung des U-Turns notwendig, damit einfallendes Licht die Messung nicht verfälscht (Abbildung 3). Der gebaute Prototyp ist erwie-senermaßen über mindestens 6 Monate licht- und temperaturstabil ohne Beeinträchtigung der Funktion. Bisher konnte über die Nutzungsdauer kein Datendrift beobachtet werden. Nach der

diesjährigen Produktionssaison (Winter 2024/25) wird das Gerät erneut auf Funktionalität getestet und ggf. neu kalibriert.

### **Erreichte Meilensteine in AP 3**

M 3.1 Bericht der Korrektur- und Optimierungsmaßnahmen (Monat 24)

## 2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende gesamten Projektaufwendungen waren mit 246.366,169 € Personalkosten, die etwas höher lagen als ursprünglich in der Projektplanung vorgesehen. Die Materialkosten hingegen lagen 5.186,64 € unter den ursprünglichen Antragssummen. Bedingt durch die Coronapandemie und die entsprechenden Maßnahmen wurden die Reiseaktivitäten auf ein Minimum beschränkt, sodass lediglich eine Projekt-Reise mit Kosten von 385,21 € zum BaMS-Symposium unternommen wurde.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Entwicklung des Projektes mit den verbundenen Risiken wäre ohne Förderung nicht möglich gewesen. Die geleisteten Projektarbeiten waren für dessen Umsetzung notwendig. Arbeitsintensiver und umfangreicher als geplant haben sich die verschiedenen Abgleichs-Messungen und Laborversuche herausgestellt, die notwendig waren, um die Messspektren zu qualifizieren. Die investierte Arbeit war lohnend, da SST nun eine Möglichkeit zur Onlineerfassung der Astaxanthinwerte auf Feldebene einsetzen kann.

## 4. Fortschreibung des Verwertungsplans

Die Entwicklung des Lichtsensors wird als erfolgreich angesehen. Durch den entwickelten Lichtsensor kann nun weitgehend auf aufwendige, zeitintensive Laboranalysen der Astaxanthinbildungsrate verzichtet werden. Außerdem trägt die Online-Aufnahme der Produktbildungsrate zur Steigerung der Prozessstabilität bei und erleichtert die Auswertung prozessrelevanter Parameter und Daten. Die vom Sensor gelieferten Online-Daten werden bereits in anderen Forschungsprojekten weiterverwendet und liefern einen wertvollen Beitrag zum Fortschreiten dieser Projekte (z. B. Pro-ASTAX Projekt).

Aktuell kultiviert SST nur *Haematococcus* spp. zur Produktion von Astaxanthin im Pilot-Maßstab. Zur Erweiterung der Produktionskapazität sind hohe Investitionen notwendig, aber auch die Neanschaffung von Personal und Sensortechnik. Durch das neue Spektrometer vereinfacht sich die

Betreuung der Produktionsanlagen, wodurch in derselben Arbeitszeit mehr Anlagen betreut werden könnten. Außerdem ist das entwickelte Spektrometer in der Herstellung deutlich günstiger [REDACTED] als die Anschaffung von Konkurrenzlösungen. Weiterhin kann das entwickelte Spektrometer mit nur wenig Kalibrieraufwand auch auf andere Mikroalgenarten angewendet werden, falls SST das Produktspektrum zukünftig breiter fächern will.

Außerdem wird über die firmeninterne Weiterentwicklung des Spektrometers auch für andere Anwendungen, z. B. zur Messung von Lichtverhältnissen in Seen/Flüssen/Meeren, für den Verkauf als Messtechnik diskutiert.

## **5. Veröffentlichungen**

Nach unserem aktuellen Wissensstand wurden keine Ergebnisse veröffentlicht, die für die Projektdurchführung relevant waren.

Seitens SST wurden keine Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts getätigt. Weiterhin sind keine Veröffentlichungen geplant.