Verwendungsnachweis LightSaverAI - Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: RZB Rudolf Zimmermann, Bamberg GmbH	Förderkennzeichen: 2818910E20
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Entwicklung eines AI basierten energieoptimierten Belichtungssystems für die urbane Indoorkultivierung von Pflanzen. (LightSaverAI) - Teilprojekt E	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2024 - 30.06.2025	
Berichtszeitraum 01.04.2024 - 30.06.2025	

Kurze Darstellung

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung, sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde

Traditionell basierten Beleuchtungsstrategien in der Pflanzenkultivierung auf der Erfahrung der Anwender. Durch den Umstieg auf flexible LED-Technologie können nun nicht nur die Intensität, sondern auch die Lichtqualität und die spektrale Zusammensetzung präzise gesteuert und wissenschaftlich optimiert werden.

Ziel unseres Projekts war die Entwicklung innovativer LED-Beleuchtungssysteme, die speziell für die urbane Pflanzenzucht optimiert sind. Ein zentrales Merkmal sollte die Steuerung über IoT-Protokolle (z. B. MQTT) sein, was eine bidirektionale Kommunikation mit Umweltsystemen wie Heizung und Klimaanlagen ermöglicht. Dies sollte eine KI-gestützte Auswertung von Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren erlauben, um die Pflanzenkultivierung zu optimieren.

Die Umsetzung dieser Ziele mündete in die Erstellung eines Labordemonstrators für Testläufe und den kontinuierlichen Laborbetrieb.

2. Ablauf des Vorhabens

Aufgrund von Verzögerungen im Projekt wurde die ursprüngliche Zielsetzung angepasst. Der Fokus verschob sich von der spektralen Dimmbarkeit hin zur einfacheren Helligkeitsdimmung, wobei jedoch Leuchten mit beiden Spektraltypen (Sunlike und Mehrkanal) entwickelt wurden.

Ein wesentlicher Meilenstein war die Realisierung einer IoT-DALI-Schnittstelle zur Steuerung der Leuchte, die eine Integration in moderne Steuerungssysteme ermöglicht.

Für die Forschungsarbeiten wurde eine neue Leuchte mit einem nahezu identischen Lichtspektrum wie die bereits im Projekt verwendete Referenzleuchte entwickelt, um das laufende KI-Training fortsetzen zu können.

Dafür mussten passende Gehäuse mit spezialisierter Wärmeableitung gefunden werden, da Horticulture-LEDs eine deutlich höhere Leistung umsetzen als herkömmliche LEDs. Die Komponenten (LEDs, Abdeckungen, Konverter usw.) wurden sorgfältig ausgewählt und intern mittels 3D-Druck getestet. Für die Sunlike-Muster wurden LEDs mit sonnenähnlichem Spektrum verwendet, während bei den mehrkanaligen Mustern gezielt rote und blaue LEDs zum Einsatz kamen, die speziell für die Pflanzenzucht ausgelegt sind.

Zusätzlich wurde eine Integration des zu entwickelnden Beleuchtungssystems in das Pam Fluorometer geplant, um das separate Messlicht zu ersetzen und eine verbesserte Gesamtintegration zu erreichen.

3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Muster der ersten Generation, welche mit der einkanaligen Lösung zur Helligkeitsregelung produziert wurden, konnten pünktlich innerhalb des vorgegebenen Zeitraums fertiggestellt werden. Die Entwicklung und Produktion der komplexeren, mehrkanaligen Muster konnte ebenfalls innerhalb des Zeitplanes des Forschungsprojekts abgeschlossen werden.

Lichtintensität und relative Verteilung über verschiedene Wellenlängenbereiche (400-800 nm)				
	Blue (400-499 nm)	Green (500-599 nm)	Red (600-699 nm)	Far Red (700-800 nm)
PF [µmol/s]	43,2	62,9	57,8	11,8
Relative [%]>	24,6	35,8	32,9	6,7

Abb.1: Messwerte der Tageslichtleuchte

Lichtintensität und relative Verteilung über verschiedene Wellenlängenbereiche (400-800 nm)				
	Blue (400-499 nm)	Green (500-599 nm)	Red (600-699 nm)	Far Red (700-800 nm)
PF [µmol/s]	81.8	45.5	162.5	9.5
Relative [%]>	27.3	15.2	54.3	3.2

Abb.2: Messwerte der Mehrkanal Leuchte

Eingehende Darstellung

Im folgenden Abschlussbericht werden alle Arbeiten und Ergebnisse des Forschungsprojekts “Entwicklung eines AI-basierten, energeioptimierten Belichtungssystems für die urbane Indoorkultivierung von Pflanzen” mit dem Förderkennzeichen 2818910C20 dargestellt. Die Firma RZB Leuchten GmbH hat zum 01.04.2024 das Projekt von der Pacelum GmbH übernommen und setzte die Forschungsarbeit mit dem Ziel fort, innovative Beleuchtungslösungen für die Pflanzenzucht zu entwickeln.

1. Durchgeführte Arbeiten

Dem Projekt wurde leider später beigetreten, als geplant, daher musste die Entwicklungszeit drastisch reduziert werden. Dies hat zu erhöhten Kostenquoten geführt, da Komponenten eingeflogen werden mussten und mit mehr Personal an dem Projekt gearbeitet werden musste. Eines der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse war die Entwicklung und Fertigung einer Leuchte, die speziell auf die Anforderungen der Indoor-Pflanzenkultivierung in diesem Projekt zugeschnitten ist.

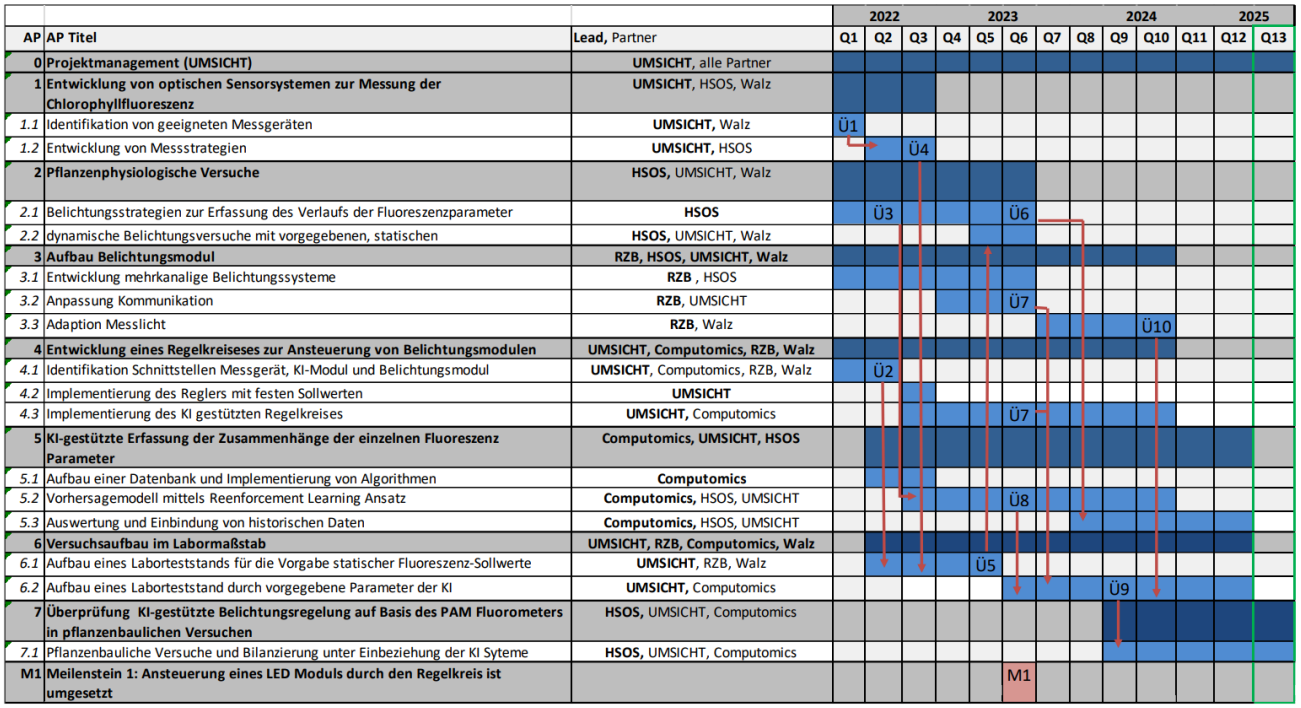

Abb.1: Gantt Chart

Lichtqualität, -intensität und -dauer sind wesentliche Umweltfaktoren für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen. Das Lichtspektrum spielt hierbei eine herausragende Rolle, da die Photosynthese, Morphologie und Physiologie von Pflanzen durch unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich beeinflusst werden. Das ideale Spektrum kann nicht pauschal festgelegt werden, da es stark von der Pflanzenart, dem Wachstumsstadium und den spezifischen Umgebungsbedingungen abhängt. Um ein optimales Wachstum und einen maximalen Ertrag zu gewährleisten, muss sich das Spektrum während des Lebenszyklus einer Pflanze dynamisch

anpassen. Pflanzen absorbieren Licht über spezielle Pigmente, insbesondere Chlorophylle und Carotinoide, um die Energie für ihr Wachstum zu gewinnen.

Pflanzen benötigen während der vegetativen Wachstumsphase ein Lichtspektrum mit einem höheren Blauanteil, um die Entwicklung von Blättern und Trieben zu fördern. Rotes Licht ist für die Photosynthese und den Aufbau von Biomasse unerlässlich. Daher ist ein Spektrum mit viel Blau in der frühen Wachstumsphase optimal, während in der Blüte- und Reifephase der Fokus auf rotem und sogar dunkelrotem Licht liegt. Zusätzlich kann grünes Licht genutzt werden, um die Farbgebung und Qualität der Früchte zu verbessern. Neben den passenden, spektralen Wellenlängen ist die Bestrahlungsleistung und Dauer für eine optimierte Pflanzenaufzucht wichtig.

Wir haben es uns zum Ziel gesetzt, innovative LED-Beleuchtungssysteme zu entwickeln. Diese sollten speziell für die Kultivierung von Pflanzen in Innenräumen optimiert sein und über mehrere Kanäle für externe Steuerungen und Sensoren verfügen. Um Pflanzen erfolgreich in urbanen Umgebungen zu züchten, müssen nicht nur die Beleuchtung, sondern auch andere externe Faktoren wie Raumlicht, Heizung und Klimaanlagen kontrolliert werden. Da die typischen IoT-Kommunikationsprotokolle wie MQTT bisher nicht zur Steuerung von Beleuchtungssystemen (wofür DALI die Norm ist) genutzt werden, haben wir die Kommunikation zwischen den LED-Modulen und der Steuerung für IoT-Protokolle adaptiert. Um die KI in die Lage zu versetzen, Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren auszuwerten, haben wir eine bidirektionale Kommunikation über diese Protokolle zwischen dem Beleuchtungssystem und den Umweltsystemen realisiert.

Die Umsetzung dieser Ziele mündete in die Erstellung eines Labordemonstrators, in dem die entwickelten Komponenten integriert sind. Dieser Demonstrator soll für erste Testläufe und für den kontinuierlichen Laborbetrieb genutzt werden.

Aufgrund der starken Verzögerung bis zur Aufnahme in das Projektkonsortium mussten die ursprünglichen Ziele jedoch korrigiert werden. Die Entwicklung der Beleuchtung hat sich an den aktuellen Arbeitsstand des Forschungsprojekts angepasst und die dafür benötigten Produkte entwickelt. Ursprünglich lag der Fokus auf der spektralen Dimmbarkeit, und eine Leuchte mit Tageslichtspektrum war nicht vorgesehen. Nach der Änderung der Aufgabenstellung bei der Aufnahme in das Projektkonsortium haben wir jedoch beide Spektraltypen entwickelt und uns von der spektralen Dimmbarkeit hin zur einfacheren Helligkeitsdimmung orientiert.
Ein wesentliches Ereignis stellte die Realisierung der Steuerung der Leuchte über eine IoT-Dali-Schnittstelle dar, was die Integration in moderne Steuerungssysteme ermöglicht.

Für die Forschungsarbeiten haben wir das emittierte Lichtspektrum basierend auf den bisherigen Trainingsdaten angepasst. Als Ausgangspunkt diente uns dabei das Spektrum der vorhandenen, einkanaligen Helligkeitsregelung.

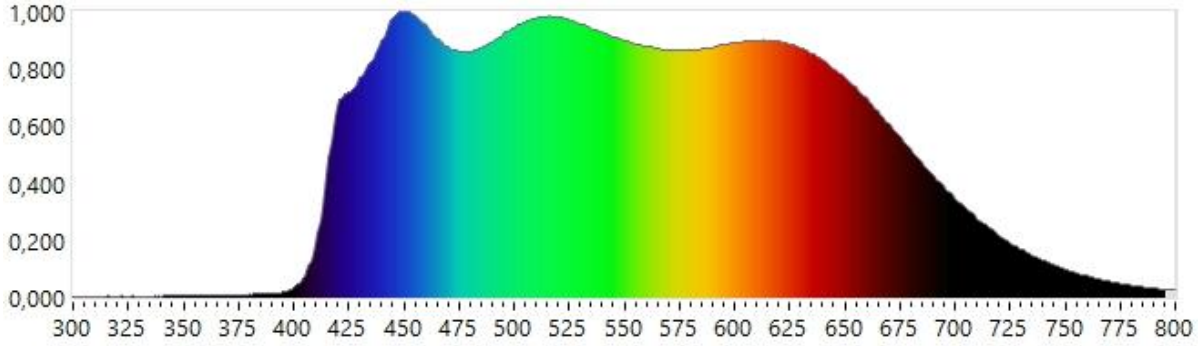

Abb.2: Spektrum der Tageslichtleuchte

PAR - Photosynthetically Active Radiation	
PPF (400 - 700 nm):	164,1 µmol/s
PPE (400 - 700 nm):	1,50 µmol/J
ePPF (400 - 800 nm):	175,63 µmol/s
ePPE (400 - 800 nm):	1,61 µmol/J
Measurement angle:	90° to 270°

PPF (Photosynthetic Photon Flux) - PPE (Photosynthetic Photon Efficacy)
ePPF (extended Photosynthetic Photon Flux) - ePPE (extended Photosynthetic Photon Efficacy)

Lichtintensität und relative Verteilung über verschiedene Wellenlängenbereiche (400-800 nm)				
	Blue (400-499 nm)	Green (500-599 nm)	Red (600-699 nm)	Far Red (700-800 nm)
PF [µmol/s]	43,2	62,9	57,8	11,8
Relative [%]>	24,6	35,8	32,9	6,7

Abb.3: Messwerte der Tageslichtleuchte

Um den Versuchsaufbau beizubehalten, entschieden wir uns für ein vergleichbares Leuchtenprofil. Angesichts der begrenzten Projektlaufzeit haben wir zuerst vorhandene Profile aus unserem Bestand getestet. Dabei ergaben die Temperaturmessungen, dass diese die notwendige Wärme nicht effektiv abführen können. Da Horticulture-LEDs deutlich höhere Leistungen als Standard-LEDs (z.B. für Büros) umsetzen und zudem in Gewächshäusern erhöhte Außentemperaturen herrschen, ist die Verwendung eines speziellen Leuchten-Gehäuse für die Wärmeableitung unerlässlich.
Um das bereits mit einer Messleuchte durchgeführte KI-Training fortsetzen zu können, entwickelten wir eine Leuchte, die ein möglichst identisches Spektrum wie die Referenzleuchte aufweist. Dies ermöglichte die nahtlose Integration unserer Arbeit in das bestehende Projekt. Da die ursprüngliche Leuchte ausschließlich aus "Sunlike" LEDs bestand – also LEDs, deren Lichtspektrum dem der Sonne möglichst ähnelt –, konzentrierten wir uns bei unserer Suche auf zwei Typen: erstens auf weitere Sunlike LEDs und zweitens auf rote und blaue LEDs, die speziell für die Anforderungen der Pflanzenzucht ausgelegt sind. Wie zu Beginn beschrieben, sind diese beiden Lichtfarben für das vegetative Wachstum und die Blütephase von besonderer Bedeutung. Sie werden daher gezielt in der Mehrkanal-Leuchte verbaut.

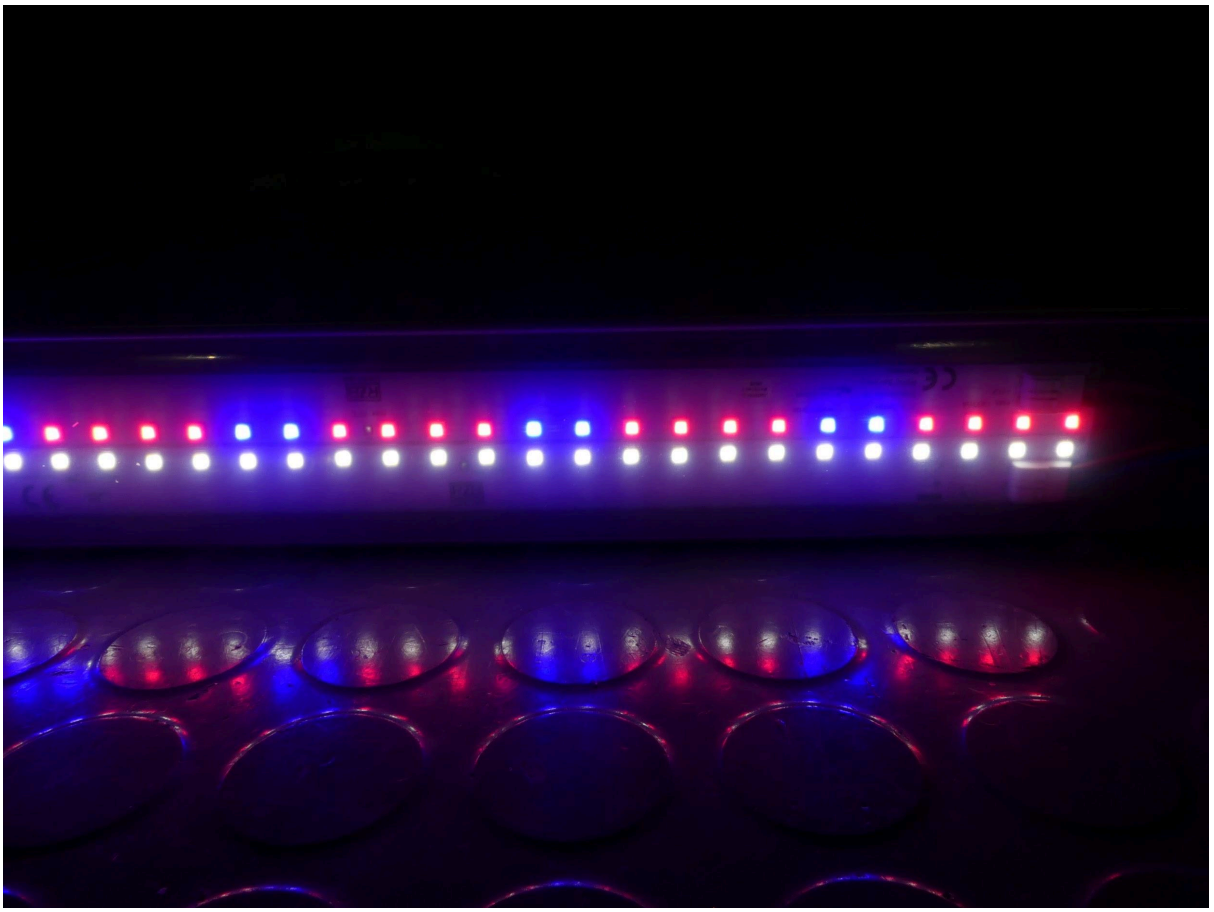

Abb.4: Die drei LED Typen in der Mehrkanal-Leuchte

Sobald die LEDs und das Profil feststanden, konnten die weiteren Komponenten ausgewählt werden. Dies umfasste die passenden Abdeckungen, Konverter, Dichtungen und Steckverbindungen. Auch der konstruktive Aufwand für Endkappen und Halterungen der Konverter wurde geleistet. Um das Zusammenspiel aller Teile zu überprüfen, haben wir die entworfenen Komponenten intern mit einem 3D-Drucker gefertigt und getestet.

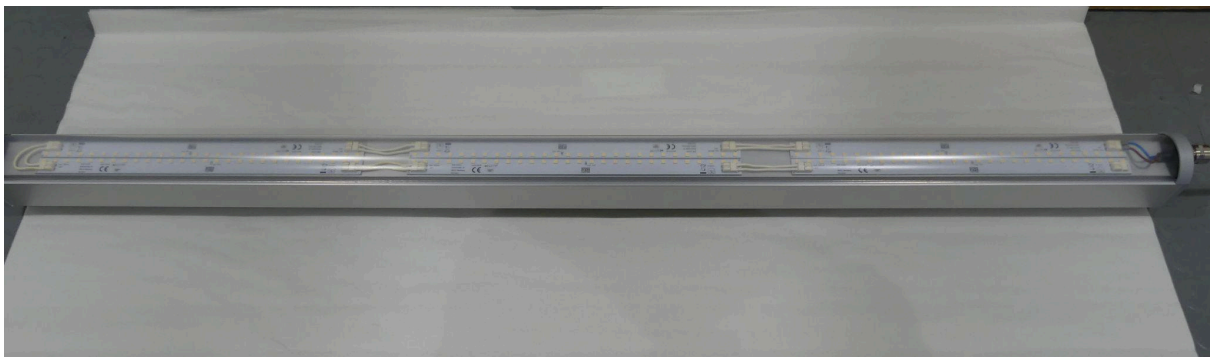

Abb.5: Fertige Leuchte für das Tageslichtspektrum

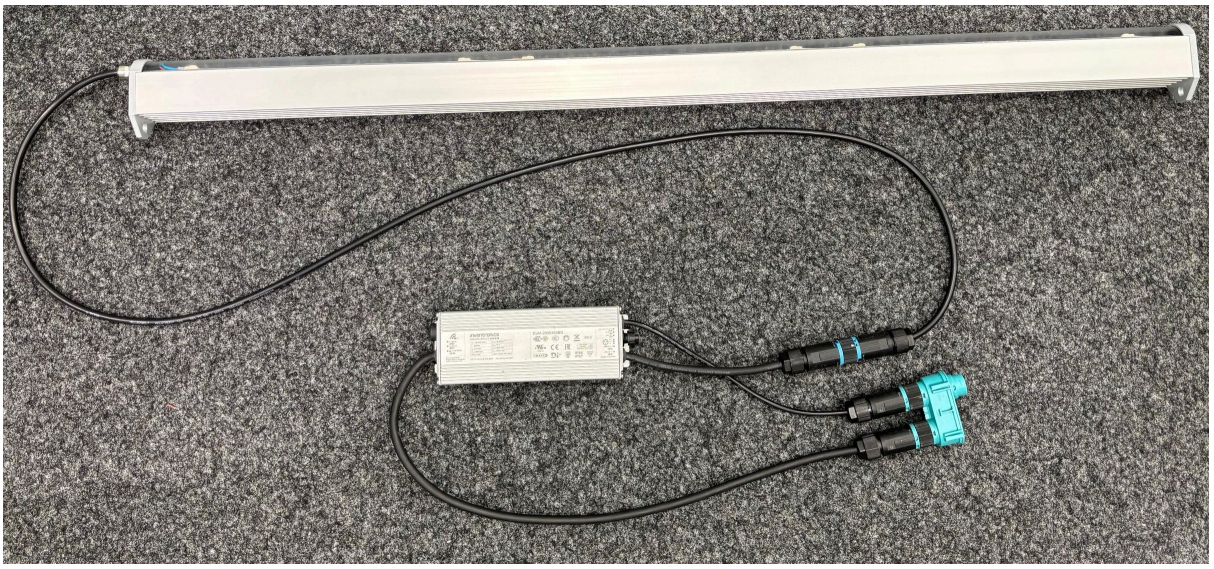

Abb.6: Fertige Leuchte für das Tageslichtspektrum mit Betriebseinheit

Die Muster der ersten Generation, welche mit der einkanaligen Lösung zur Helligkeitsregelung produziert wurden, konnten pünktlich innerhalb des vorgegebenen Zeitraums fertiggestellt werden. Die Entwicklung und Produktion der komplexeren, mehrkanaligen Muster konnte ebenfalls innerhalb des Zeitplanes des Forschungsprojekts inklusive Verlängerung abgeschlossen werden.

Abb.7: Fertige Mehrkanal-Leuchte mit Betriebseinheit

PAR - Photosynthetically Active Radiation	
PPF (400 - 700 nm):	290.0 µmol/s
PPE (400 - 700 nm):	1.89 µmol/J
ePPF (400 - 800 nm):	299.29 µmol/s
ePPE (400 - 800 nm):	1.95 µmol/J
Measurement angle:	5° to 360°

PPF (Photosynthetic Photon Flux) - PPE (Photosynthetic Photon Efficacy)
ePPF (extended Photosynthetic Photon Flux) - ePPE (extended Photosynthetic Photon Efficacy)

Lichtintensität und relative Verteilung über verschiedene Wellenlängenbereiche (400-800 nm)				
	Blue (400-499 nm)	Green (500-599 nm)	Red (600-699 nm)	Far Red (700-800 nm)
PF [µmol/s]	81.8	45.5	162.5	9.5
Relative [%]>	27.3	15.2	54.3	3.2

Abb.8: Messwerte der Mehrkanal Leuchte

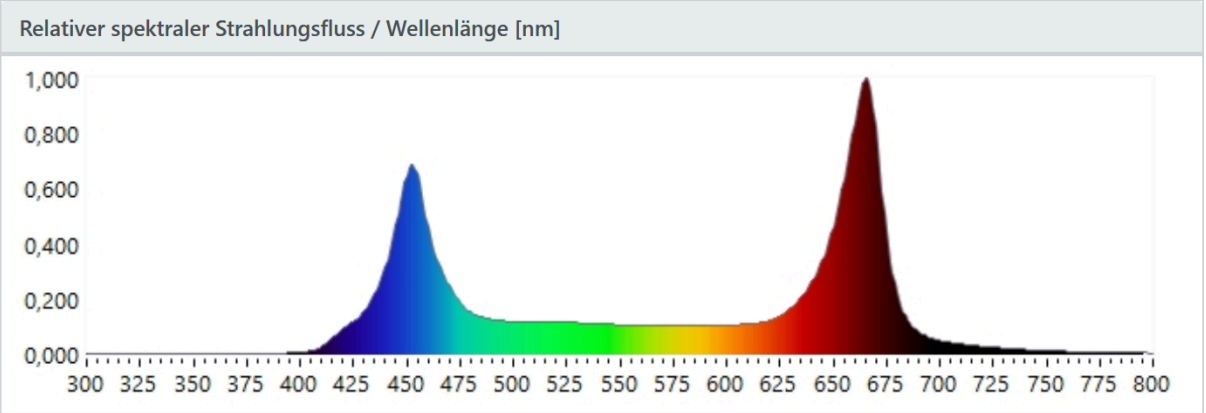

Abb.8: Spektrum der Mehrkanal Leuchte

Das Pam Fluorometer benötigt ein eigenes Messlicht unabhängig von der sogenannten aktinischen Beleuchtung. Zur besseren Integration ersetzt RZB das Messlicht daher durch das zu entwickelnde Belichtungssystem. Gegebenenfalls notwendige Änderungen am Steuer- und Regelsystem werden aus einer Bedarfsanalyse abgeleitet und implementiert.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Material- und Personalkosten stellten den Hauptteil der Gesamtausgaben dar und repräsentieren die direkten Aufwendungen, die für die effektive Entwicklung der innovativen Beleuchtungssysteme notwendig waren.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleistet Projektarbeit

In Kombination mit Verfahren wie der Hydroponik ermöglicht Indoor Farming eine ressourceneffiziente und platzsparende Pflanzenkultivierung. Dies führt zu höheren Erträgen, geringerem Flächenbedarf und weniger Emissionen bei gleichbleibend hoher Qualität der Produkte.

Ein großer Nachteil ist jedoch der hohe Energieverbrauch, der hauptsächlich durch künstliche Beleuchtungssysteme verursacht wird – diese können bis zu 40 % des Gesamtverbrauchs ausmachen. Die intensive Beleuchtung erzeugt zudem Wärme, die gekühlt werden muss, was den Energiebedarf weiter steigert. Das Hauptproblem liegt darin, dass die Beleuchtung in den meisten Indoor Farms nicht dynamisch an den tatsächlichen Bedarf der Pflanzen angepasst wird. Die Lichter folgen oft starren Zeitplänen, unabhängig vom Entwicklungsstand oder dem Photosynthesebedarf. Dies führt zu einem erheblichen Energieverlust, da mehr Licht eingesetzt wird, als die Pflanzen tatsächlich nutzen können. Ein intelligentes, dynamisches Beleuchtungssystem ist daher unerlässlich, um die Vorteile des Indoor Farming voll auszuschöpfen.

4. Voraussichtliche Nutzung und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Parallel zur Übernahme des Forschungsprojekts hat RZB im gleichen Zeitraum begonnen, eigene Leuchte für Horticulture-Anwendungen zu entwickeln. Der wechselseitige Austausch von Erkenntnissen und Erfahrung zwischen diesem Forschungsprojekt und unseren internen Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Pflanzenbeleuchtung ist für uns von zentraler Bedeutung. Die Ergebnisse des Projekts fließen direkt in unsere Produktentwicklung ein, während umgekehrt auch die im Rahmen unserer internen Arbeit gewonnenen Erfahrungen wertvolle Impulse für die Forschungsarbeit liefern. Wir sind davon überzeugt, dass dieser Ansatz von Forschung und Entwicklung zu Fortschritten und Innovationen in diesem zukunftsträchtigen Feld führen wird.

5. Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Die Marktanalyse hat gezeigt, dass Leuchten im Horticulturebereich verstärkt auf intelligente Steuerungssysteme setzen. So sind Produkte von Signify (ehem. Philips) auch in spektralen steuerbaren Varianten erhältlich. Allerdings sind Systeme, die einen Gesamtheitlichen Ansatz über maschinelles Lernen verfolgen, noch nicht auf dem Markt präsent. Daher können die Ergebnisse des Forschungsprojekts weiterhin als aktuell angesehen werden.

Der Markt für Vertical Farming ist momentan stark unter Druck und kann sich aus eigener Kraft noch nicht behaupten. In den Jahren 2023-2024 wurden mehrere Insolvenzen in diesem Bereich bekannt gegeben. Die Gründe hierfür werden oft auf Kostendruck und Komplexität zurückgeführt. An dieser Stelle kann das Projekt LightSaverAI zukünftig einen großen Beitrag leisten und die Energiekosten signifikant reduzieren.

6. erfolgte oder geplante Veröffentlich des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF 2017

Es sind keine weiteren Veröffentlichungen der Ergebnisse geplant.