

Sense4Energy

Entwicklung und Einsatz eines flächendeckenden, kostengünstigen, robusten Sensornetzwerkes zur Energieeffizienzsteigerung und Qualitätssicherung im Gewächshaus mittels umfassenden Monitoring der Lichtintensitäten, Lichtspektren und Umweltparameter



Impressum

Projektnehmer:in: JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
MATERIALS – Institut für Sensorik, Photonik und Fertigungstechnologien

Adresse: Industriestrasse 6, 7423 Pinkafeld

Projektleiter:in: DI Dr. Andreas Weiss

Tel.: +43 316 876-3601

E-Mail: andreas.weiss@joanneum.at

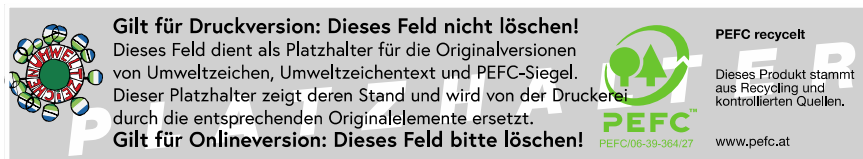
Kooperationspartner:in: FZ Development GmbH

Finanzierungsstelle(n): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und
Umweltschutz. Regionen und Wasserwirtschaft

Projektlaufzeit: 01.09.2023 – 30.11.2025

1. Auflage

Fotonachweis: Cover – JOANNEUM RESEARCH



Wien, 2025. Stand: 3. März 2026

Inhalt

Zusammenfassung	4
Summary	6
Motivation und Projektziele	7
Methodik.....	9
Evaluierung des Sensornetzwerks unter realen Bedingungen.....	10
Entwicklungsarbeiten.....	13
Anforderungen und Rahmenbedingungen	14
Konzept.....	16
Sensorkomponenten	17
Sensorknoten – erste Generation	20
Funktionstests der installierten Sensorknoten	22
Sensorknoten – zweite Generation.....	25
Datenübertragung und Basisstation	26
Evaluierung im realen Umfeld	30
Etablierung des flächendeckenden Sensornetzwerks im Gewächshaus	30
Erfassen der Lichtintensitäten im Gewächshaus	31
Datenauswertung und Ableitung von Optimierungspotentialen	33
Erkennen lokaler Abweichungen – Schattenwurf.....	35
Bewertung der Verschattungswirkung.....	37
Übertragbarkeit auf andere Anwendungen.....	38
Zusammenfassung und Ausblick	39
Dissemination.....	40
Schlussfolgerungen	42
Abbildungsverzeichnis.....	43
Literaturverzeichnis	45
Abkürzungen.....	46

Zusammenfassung

Das Projekt "Sense4Energy" hatte zum Ziel, ein kostengünstiges und robustes Sensornetzwerk für Gewächshäuser zu entwickeln. Dieses Sensornetzwerk besteht aus einzelnen, im Gewächshaus verteilten Sensorknoten und einer Basisstation, auf welcher alle Daten zusammengefasst werden, die von den Sensorknoten detektiert und übertragen werden. Durch die Implementierung dieses Netzwerks konnte eine räumlich verteilte Datenakquise ermöglicht werden. Die generierten Daten bilden die Grundlage für zukünftige Konzepte und Optimierungen und bieten wertvolle Einblicke dort, wo diese tatsächlich wirksam werden, nämlich an der Pflanze bzw. im Gewächshaus.

Zu Beginn stand die Konzeption und Planung, in der die Anforderungen an das Sensornetzwerk definiert und die technischen Spezifikationen festgelegt wurden. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den Faktoren Kosteneffizienz, die Robustheit des Gesamtsystems, sowie zu den Methoden einer drahtlosen Kommunikation zwischen den einzelnen Sensorknoten im gesamten Netzwerk. In der anschließenden Entwicklungsphase wurden die Sensorknoten konstruiert und programmiert, um Lichtintensität, Spektrum, Luftfeuchtigkeit und Temperatur präzise messen zu können. Parallel dazu wurde die Infrastruktur zur drahtlosen Datenkommunikation aufgebaut, die eine zuverlässige Übertragung der an den Sensorknoten detektierten Daten innerhalb des Gewächshauses gewährleistet. Nach Abschluss dieser Entwicklungen erfolgte die Installation der Basisstation sowie von insgesamt 21 Stück an gefertigten Sensorknoten, die strategisch in zwei Teilbereichen des Gewächshauses platziert wurden. Ein zusätzlicher Sensorknoten wurde auch außerhalb des Gewächshauses im Bereich der Wetterstation positioniert. Mit Hilfe dieser Außenstation konnten Vergleichsmessungen durchgeführt werden, um zum Beispiel die Lichtverluste zwischen innen und außen zu ermitteln. Besonderes Augenmerk lag darauf, eine möglichst einfache und flexible Installation an den definierten Positionen zu ermöglichen, die auch erfolgreich umgesetzt werden konnte. Mit der umgesetzten drahtlosen Kommunikation der Daten an eine Basisstation konnte einerseits die Nutzung bestehender Infrastruktur gewährleistet und andererseits bereits die Skalierbarkeit des Sensornetzwerks auf Gewächshäuser unterschiedlicher Größen aufgezeigt werden.

Im Rahmen der Test- und Validierungsphase wurden die Sensorknoten unter realen Bedingungen betrieben und die gesammelten Daten analysiert. Dabei konnte die Funktionalität und Zuverlässigkeit des Systems bestätigt werden. Abschließend wurden die gewonnenen

Erkenntnisse und Daten dokumentiert und für zukünftige Erweiterungen und Adaptierungen des Beleuchtungssystems aufbereitet.

Summary

The "Sense4Energy" project aimed to develop a cost-effective and robust sensor network for greenhouses. This sensor network consists of individual sensor nodes distributed throughout the greenhouse and a base station, which collects all the data detected and transmitted by the sensor nodes. By implementing this network, spatially distributed data acquisition was enabled. This data, generated at the plant level in the greenhouse, provides valuable insights and forms the basis for future concepts and optimizations.

Initially, the project involved conception and planning, where the requirements for the sensor network were defined, and technical specifications were established. Particular attention was paid to cost efficiency, robustness, and wireless communication of the sensor nodes. In the subsequent development phase, individual sensor nodes were constructed and programmed to precisely measure light intensity, spectrum, humidity, and temperature. In parallel, the wireless communication infrastructure was set up to ensure reliable data transmission within the greenhouse. After completing the development, 21 assembled sensor nodes were integrated and installed, strategically placed in two sub-areas of the greenhouse. An additional sensor node was also positioned outside the greenhouse in the weather station area. This external station allowed comparative measurements to be conducted, such as determining light losses between the inside and outside. Particular emphasis was placed on enabling a simple and flexible installation at the defined positions, which was successfully achieved. The implemented wireless communication of data to a base unit ensured the use of existing infrastructure while also demonstrating the scalability of the system for greenhouses of different sizes.

During the test and validation phase, the sensor nodes were operated under real conditions, and the collected data were analyzed. The functionality and reliability of the system were confirmed. Finally, the insights and data gained were documented and prepared for future expansions and adaptations of the lighting system.

Motivation und Projektziele

Gewächshäuser leisten einen wichtigen Beitrag für die Lebensmittelversorgung, indem sie die Einschränkungen der saisonalen Anbaumöglichkeiten überwinden und einen regionalen Anbau auch außerhalb von saisonalen Abhängigkeiten in der herkömmlichen Landwirtschaft ermöglichen. Darüber hinaus stellen sie hochwertiges Gemüse mit zur traditionellen Landwirtschaft vergleichsweise niedrigem Ressourcenverbrauch an Boden und Wasser und einem stark reduzierten Einsatz an Pestiziden zur Verfügung. Nachteilig wirkt sich in Gewächshäusern allerdings der erhöhte Energiebedarf für eine Klimatisierung und die zusätzlich notwendige künstliche Beleuchtung aus, weshalb aufgrund des extremen Preisdrucks auf Lebensmittel diese Form der Herstellung nur für ausgewählte Produkte ökonomisch darstellbar ist.

Die Erfassung von Umweltparametern im Gewächshaus zu einer weiteren Optimierung des kontrollierten Anbaus wird gegenwärtig nur in geringem Ausmaß mit Hilfe von Sensoren durchgeführt, die z.B. Temperatur und Feuchte im Gewächshaus aufzeichnen, oder auch Wetterstationen, die jedoch außerhalb des Gewächshauses platziert sind. Die Ansteuerung der künstlichen Beleuchtung bzw. der Einsatz einer Verschattung erfolgt im Allgemeinen aufgrund von Erfahrungswerten und dem Know-how der entsprechenden Betreiber. Daraus ergibt sich die Problemstellung, dass neben einer generellen automatisierten Steuerung für das gesamte Gewächshaus eine weitere gezielte Anpassung der lokalen Bedingungen für das Pflanzenwachstum aufgrund der fehlenden räumlich verteilten Daten nicht umgesetzt werden kann. Lokale Variationen innerhalb eines Gewächshauses können z.B. durch Effekte von Schattenwurf angrenzender Forstflächen oder auch andere baulichen Strukturen hervorgerufen werden, und in der Folge zu Schwankungen in der Qualität der Produktion in diesen Bereichen führen. Jedoch werden diese örtlichen Unterschiede derzeit messtechnisch nicht erfasst, da die dazu notwendige Sensorik innerhalb des Gewächshauses nicht vorhanden ist.

Ziel dieses Projekts ist es, ein kostengünstiges und robustes Sensornetzwerk zu entwickeln, das innerhalb des Gewächshauses verteilt wird und das zum einen die Lichtverhältnisse im Hinblick auf die Intensität und das Spektrum des einfallenden Lichts als zum anderen auch die Umweltbedingungen wie die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur dort aufzeichnet, wo diese tatsächlich wirksam werden, nämlich an der Pflanze. Dieses aus drahtlos kommunizierenden Sensorknoten bestehende Netzwerk soll dabei durch Erfassen der tatsächlichen

Lichtverhältnisse einen Entwurf optimierter Ansteuerungskonzepte ermöglichen. Darüber hinaus sollen durch die räumlich verteilte Datenakquise im Gewächshaus die Probleme des Schattenwurfs durch bauliche Strukturen oder angrenzende Forstflächen erstmalig quantifizierbar und Gegenmaßnahmen realisierbar gemacht werden. Für die praktische Anwendung im laufenden Betrieb des Gewächshauses ist die geplante nahtlose Integration des Sensornetzwerkes in die bestehende Strom-/Spannungsversorgung von großer Bedeutung, um den Installationsaufwand möglichst gering zu halten. Insgesamt soll mit Hilfe des geplanten Sensornetzwerkes die notwendige Datenbasis geschaffen werden, um fundierte und Daten-basierte Entscheidungen hinsichtlich zukünftiger Erweiterungen bzw. Adaptierungen sowie innovativer Steuerungsmöglichkeiten der Beleuchtungs- und Beschattungssysteme im kontrollierten Anbau treffen zu können.

Methodik

Das entwickelte Konzept für ein Sensornetzwerk in Gewächshäusern und die Evaluierung der damit im Projekt gewonnenen Datenbasis für innovative Steuerungskonzepte beinhaltet folgende Überlegungen:

- Modularität der Sensorknoten: die in den Sensorknoten konkret implementierte Sensorik soll einfach an die jeweiligen Bedürfnisse und Anforderungen adaptierbar sein (Spektralbereich, Intensitäten, etc.). Dies wurde umgesetzt (siehe nächsten Abschnitt), indem die Sensorkomponenten auf jeweils eigenen Sensor- oder auch als Satelliten-Boards bezeichneten elektronischen Leiterplatten (Printed Circuit Boards – PCBs) getrennt von der Steuerplatine aufgebaut wurden. Bereits im Projekt selbst wird dieser Ansatz dafür genutzt, um die Entwicklungen für die erste Generation an Sensorknoten bestmöglich auch für die zweite Generation der Sensorknoten wiederverwerten zu können.
- Die Sensorknoten sollen in einfacher Weise an beliebigen Positionen und in der notwendigen Anzahl bezogen auf die Anbaufläche im Gewächshaus implementiert werden können. Dies wurde in der Umsetzung durch zwei Faktoren gewährleistet. Erstens sind durch die künstliche Beleuchtung im Gewächshaus überall Versorgungsleitungen vorhanden und zweitens werden die gewonnenen Daten drahtlos übermittelt. Damit wurde auch die Skalierbarkeit auf Anlagen unterschiedlichster Größe sichergestellt.
- Nicht zuletzt war es für das gegenständliche Projekt von zentraler Bedeutung, die Evaluierung der Funktionen des installierten Sensornetzwerks und den davon abgeleiteten Möglichkeiten basierend auf einer Datenbasis durchzuführen, die unter realen Bedingungen im Gewächshaus über den jahreszeitlichen Verlauf erfasst wurde. Die gewonnenen Ergebnisse sollen nicht auf abstrahierten Annahmen oder auf Daten, die durch Simulation ermittelt wurden, basieren (mittlere Sonneneinstrahlung, etc.). Dazu konnte zum einen mit dem im Projekt integrierten Gewächshausbetreiber ein perfekter Partner gefunden werden, der die Entwicklungsarbeiten und die Implementierung des Sensornetzwerks im Gewächshaus optimal unterstützt hat. Zum anderen musste eine entsprechende Umsetzung in den Entwicklungsarbeiten dafür Sorge tragen, dass das Sensornetzwerk für den Einsatz unter realen Bedingungen gerüstet ist.

Zur Positionierung der einzelnen Sensorknoten im Gewächshaus wurden folgende Überlegungen gemacht, um die eventuell lokal vorhandenen Unterschiede innerhalb einzelner Positionen eines Gewächshauses bestmöglich aufzeigen zu können. Das für die Projektdurchführung ausgewählte Gewächshaus hat eine Gesamtfläche von rund 2 ha, in welcher das Gemüse in einzelnen Reihen angebaut und kultiviert wird (siehe nachfolgendes Schema in Abbildung 1). Zwischen diesen Reihen befinden sich mit einem Abstand von 12,8 m Steher, welche zur Montage der Sensorknoten herangezogen wurden. Im Rahmen eines Workshops und einer Vor-Ort-Besichtigung wurde für die Positionierung der Sensorknoten der ersten Generation die Strategie entwickelt, mit welcher gezielt zwei Teilbereiche des Gewächshauses engmaschiger überwacht werden. Hierbei stellt ein Teilbereich aufgrund der Erfahrungen den „Best-Case“ dar und der zweite Teilbereich den „Worst-Case“. Der „Best-Case“ Teilbereich zeichnet sich dadurch aus, dass in diesem Bereich erfahrungsmäßig die für das Pflanzenwachstum optimalen Lichtverhältnisse vorliegen. Das heißt in diesem Bereich kommt es zu keinen großen erwartbaren Verschattungseffekten durch die umliegende Vegetation sowie die Konstruktion des Gewächshauses selbst (z.B. durch Seitenwände). Konträr dazu ist im „Worst-Case“ Bereich bekannt (aus den Erfahrungen des Gewächshausbetreibers), dass die angrenzenden Waldflächen, sowie die Seitenwände des Gewächshauses das einfallende Licht abschatten und dadurch weniger optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum verursachen. Durch die gezielte Gegenüberstellung dieser beiden Teilbereiche sollten mit Hilfe des Sensornetzwerks diese Unterschiede anhand der gemessenen Daten quantifiziert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt, der mit Hilfe dieses Ansatzes ermittelt wurde, betrifft die Auslegung der Wertebereiche bzw. die Auflösung der einzelnen Sensorknoten (besonders hinsichtlich der Lichtparameter), da davon ausgegangen wurde, dass zwischen „Best-Case“ und „Worst-Case“ die maximal erreichbaren Unterschiede zum jeweiligen Messzeitpunkt vorliegen.

Evaluierung des Sensornetzwerks unter realen Bedingungen

Insgesamt wurden für die Evaluierung 21 Stück Sensorknoten assembliert und installiert. Zusätzlich zur Positionierung von 20 Sensorknoten in den zwei vorgesehenen Teilbereichen wurde vorgesehen, dass ein Sensorknoten außerhalb des Gewächshauses im Bereich der bereits bestehenden Wetterstation platziert wird. Aus dem Vergleich der Messwerte dieses außenliegenden Sensorknotens mit den Messwerten innerhalb des Gewächshauses können wichtige Parameter wie zum Beispiel der Anteil des Verlustes an Lichtintensität zwischen außen und innen ermittelt werden.

Zur Sicherstellung einer durchgehenden Kommunikation mittels einer drahtlosen Kommunikation wurden zur Überbrückung der Distanz zwischen den „Best-Case“ und „Worst-Case“ Bereichen ebenfalls einige Sensorknoten zwischen diesen Bereichen platziert. Neben der Sicherstellung der Kommunikation ergab sich daraus der weitere Vorteil, dass diese Sensorknoten auch Messwerte zwischen den Bereichen ermitteln. Abbildung 1 zeigt die Positionierung der 20 Stück Sensorknoten im Gewächshaus.

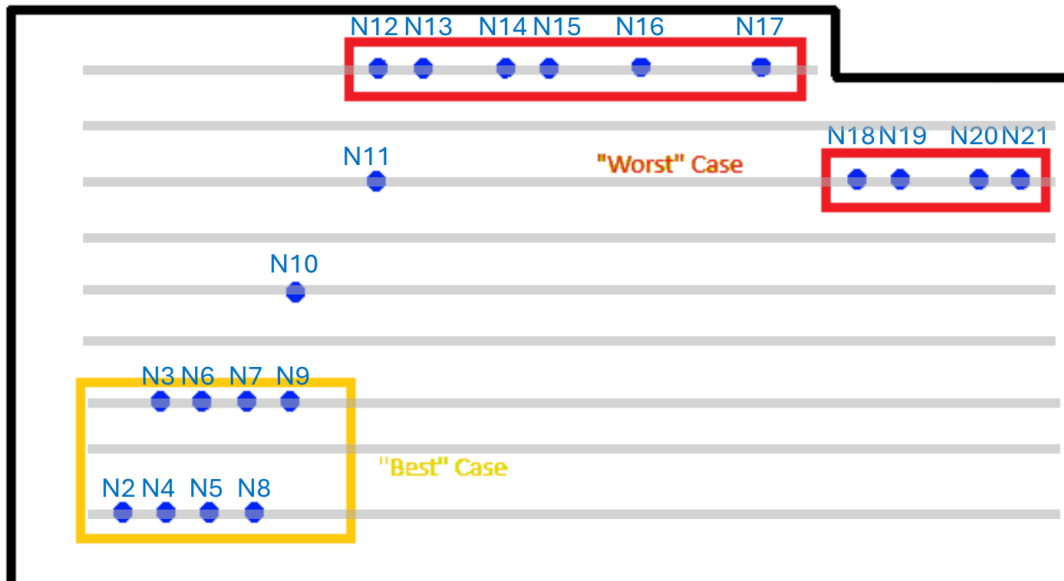


Abbildung 1: Schema zu jenem Bereich des Gewächshauses (Abteilung mit einer Fläche von ca. 1 ha), in welchem das Sensornetzwerk installiert worden ist. Die dicken schwarzen Linien symbolisieren die Wände des nach unten im Bild noch weiterlaufenden Gewächshauses. Die grauen vertikalen Linien symbolisieren die Reihen der Pflanzen im Gewächshaus. Die Positionierung der Sensorknoten ist durch die blauen Punkte mit der Bezeichnung N2, N3, ... bis N21 angedeutet. Der als „Best-Case“ bewertete Bereich ist orange umrandet und der „Worst-Case“ Bereich rot umrandet dargestellt (siehe Text).

Hinsichtlich der räumlichen Platzierung der Sensorknoten in der Höhe wurde festgelegt, dass sie sich in einem Bereich von etwa 3 m Höhe über dem Boden befinden sollen, was der maximalen Pflanzenhöhe am Ende ihrer Wachstumsperiode entspricht. Des Weiteren sollten sich die Sensorknoten betreffend ihre Höhe aber auch unterhalb der weiteren technischen Ausstattung des Gewächshauses wie eines ausfahrbaren Beschattungsschirmes bzw. eines zweiten Reflexionsschirmes, sowie unterhalb der künstlichen Beleuchtung befinden, um die Lichtverhältnisse bei künstlicher Beleuchtung ebenfalls korrekt erfassen zu können. Abbildung 2 zeigt symbolhaft die Platzierung des Sensorknotens in der Höhe.

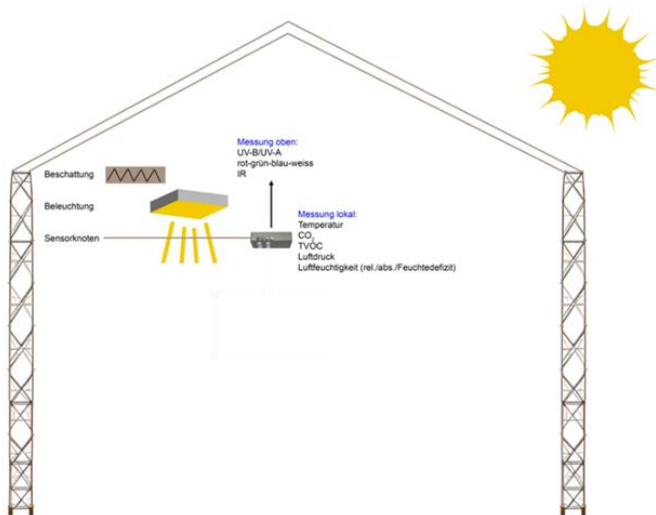


Abbildung 2: Schema zur Positionierung der Sensorknoten über dem Bereich der kultivierten Pflanzen und unterhalb von Beschattung und der künstlichen Beleuchtung.

Die Sensorknoten wurden an Halterungen montiert, die wiederum an den bestehenden Stehern des Gewächshauses angebracht wurden. Mittels L-förmiger Profile konnte genügend Abstand zu den Stehern eingehalten werden, um den Einfluss der baulichen Konstruktion z.B. durch Abschattungen möglichst gering zu halten. Abbildung 3 links zeigt exemplarisch die Halterung zur Montage der Sensorknoten an den Stehern des Gewächshauses und die Messung im rechten Bild ein typisches Spektrum an der Position der montierten Sensorknoten unter sonnigen Verhältnissen (aufgenommen mit einem Handspektrometer UPRtec MK 350 S – siehe <https://www.uprtek.com/de/product/spectrometers/mk350s-premium>).

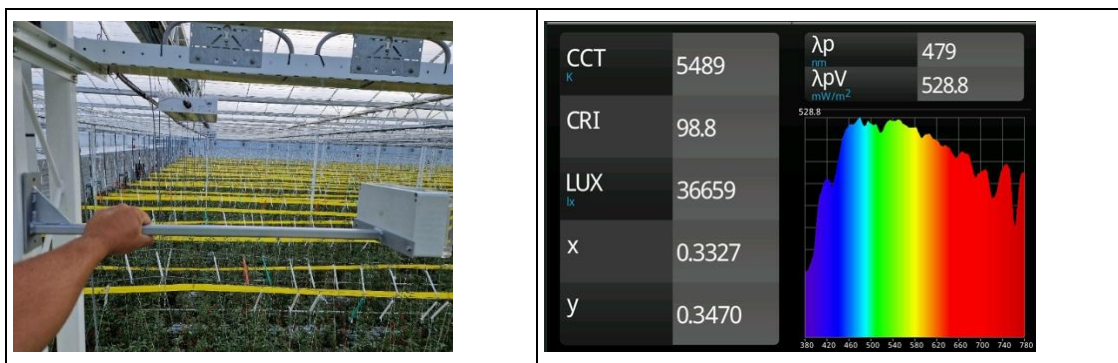


Abbildung 3: Montage der Sensorknoten an den Stehern des Gewächshauses (linkes Bild). Beispielhaftes Spektrum unter sonnigen Verhältnissen (rechtes Bild).

Entwicklungsarbeiten

Ziel war, mit einem Sensornetzwerk bestehend aus 21 Stück Sensorknoten die Lichtverhältnisse in einem Gewächshaus aufzuzeichnen und daraus abgeleitet Konzepte und Potentiale für eine optimierte Steuerung der künstlichen Beleuchtung bzw. Verschattung zu ermöglichen. Die künstliche Beleuchtung als auch Vorrichtungen zur Verschattung bei zu viel Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten gehören zu den zentralen technischen Komponenten, um ein effizientes Pflanzenwachstum in einem Gewächshaus zu gewährleisten, indem bei den Pflanzen auch die gewünschte Lichtmenge über den Tagesverlauf bzw. die „Hell-Periode“ von ca. 16 Stunden (im Gegensatz zu 8 Stunden Dunkel-Periode) auftritt. Diese für das Wachstum optimale Lichtmenge wird durch das Tageslichtintegral (DLI) spezifiziert. In der sonnigen Jahreszeit, besonders in den Übergangszeiten, kann es aber auch dazu kommen, dass die spezifizierte Tageslichtmenge durch die Kombination mit der künstlichen Beleuchtung überschritten wird. Dies bringt keinen Benefit für die Produktion, weshalb vor allem in diesen Situationen Energie und somit Kosten gespart werden können.

Das Ziel zur Erfassung der Lichtverhältnisse im Gewächshaus ergab sich im Wesentlichen aus der Problemstellung, dass vor Projektumsetzung die Lichtverhältnisse im Hinblick auf ihre Intensität oder die spektrale Verteilung nur an einem Punkt außerhalb des Gewächshauses gemessen wurden und somit die tatsächlichen Lichtverhältnisse im Gewächshaus selbst nur indirekt abgeleitet bzw. approximiert werden konnten. Bedenkt man die großen Flächen von Gewächshäusern wie sie heutzutage gebaut werden, wird verständlich, dass es bei diesen Ausmaßen zu signifikanten Variationen dieser Lichtverhältnisse innerhalb des Gewächshauses und somit auch zu großen Unschärfen in dieser Approximation kommen kann. Dies kann in Folge dazu führen, dass manche Bereiche nicht optimal, d.h. entweder zu viel oder auch zu wenig künstlich beleuchtet oder verschattet werden.

Aus der dargestellten Situation ergab sich für die Entwicklung des Sensornetzwerks die zentrale Aufgabe, die aktuelle bzw. zeitlich variierende Spektralverteilung lokal aufgelöst möglichst gut zu erfassen und damit eine brauchbare Approximation für die Beleuchtungsstärke (W/m^2) bzw. die für die Pflanzen relevante photosynthetische Photonenflussdichte PPF¹

¹ Die PPF – photosynthetische Photonenflussdichte gibt an, wie viele Photonen im Bereich von 400 nm bis 700 nm auf einem Quadratmeter pro Sekunde auftreten. Dabei kann die PPF nur in Bezug auf das konkrete Umfeld ermittelt werden – der konkrete Abstand zu den Pflanzen, die Lichtlenkung (z.B.

($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) durch das Sensornetzwerk zu erhalten. Dazu wurde im Projektverlauf im ersten Schritt eine erste Version von Sensorknoten entwickelt, installiert und getestet und darauf folgend, basierend auf den Erkenntnissen der ersten Phase, in einem zweiten Schritt eine optimierte Version eines Netzwerks installiert und für die Datenerfassung eingesetzt.

Anforderungen und Rahmenbedingungen

Aus den zuvor dargestellten Zielen wurden die nachfolgend zusammengefassten Anforderungen an die Entwicklungsarbeiten betreffend das Sensornetzwerk bestehend aus einzelnen Sensorknoten und einer Basis-Station abgeleitet. Darüber hinaus wurden in gemeinsamen Workshops mit dem Glashausbetreiber die Rahmenbedingungen für die Entwicklung und den Einsatz des Sensornetzwerks diskutiert und festgelegt.

- Grundsätzlich werden an einzelnen Sensorknoten, die im Gewächshaus an definierten Positionen installiert werden (siehe dazu den vorangegangenen Abschnitt), lokal Daten erfasst und über das Netzwerk drahtlos an eine Basisstation weitergeleitet.
- Die Erfassung lokaler Daten an jedem Sensorknoten bzw. deren zeitliche Variation fokussiert sich auf die einfallende natürliche Lichtintensität durch das Dach des Gewächshauses im IR/VIS/UV Bereich, wobei zusätzlich – je nach Position der Sensorknoten – auch die künstliche Beleuchtung miterfasst wird (Na-Dampflampen und LED-Beleuchtung).
- Die Umsetzung zur Detektion der Lichtintensitäten wird mit spektral aufgelösten Sensorelementen realisiert, welche in den Sensorknoten implementiert werden und mit ihrer sensitiven Fläche nach oben, d.h. zum Dach des Gewächshauses bzw. in Richtung der Lampen ausgerichtet sind.
- Insbesondere bei der Sensorik für die Sensorknoten der ersten Generation ist eine gewisse Redundanz sowie Variation der eingesetzten Sensorelemente angestrebt, um auf Basis des realen Einsatzes die optimale Konfiguration für die Sensorknoten der zweiten Generation herausarbeiten zu können.
- Zum Vergleich der lokalen, orts aufgelösten und zeitlichen Variation der einfallenden Lichtintensitäten auf den Sensorknoten innerhalb des Gewächshauses mit einer Referenzstation außerhalb des Gewächshauses wurden die gleichen Sensorelemente in einem Sensorknoten im Freien implementiert. Dadurch konnten z.B. Vergleiche und

Reflektoren oder Optiken), die Reflexionen an Wänden und des Bodens, usw. spielen eine signifikante Rolle zur Ermittlung eines PPFD-Werts.

Verluste der natürlichen Lichtintensität zwischen Außen- und Innenbereich ermittelt und Intensitäten in μmol - und W-Einheiten bereitgestellt werden.

- Neben den Parametern zur Lichtintensität wurden in den Sensorknoten auch Standard-Sensorkomponenten zur Erfassung von Temperatur, relativer Feuchte (r.F.), und Druck implementiert.
- Darüber hinaus wurden Funktionen implementiert, um die Funktionalität der Sensorknoten und Sensoren verifizieren zu können.
- Datenrate: für das Sensornetzwerk der ersten Generation wurde eine Übermittlung der Sensordaten im Abstand von einer Minute festgelegt.
- An die Baugröße und den Stromverbrauch der Sensorknoten liegen keine besonderen Anforderungen vor, es besteht genügend Platz und es kann auch ausreichend elektrische Leistung an den einzelnen Positionen im Glashaus zur Verfügung gestellt werden.
- Für die Entwicklung des Sensorknotens im Außenbereich war zu beachten, dass dieser den jahreszeitlichen Bedingungen standhalten muss.

Neben diesen Anforderungen für die Sensorknoten wurden als wesentliche Anforderungen an eine Basisstation die drahtlose Kommunikation mit den Sensorknoten, sowie eine dauerhafte Aufzeichnung der Daten aus den Sensorknoten auf der Basisstation zusammengefasst. Darüber hinaus sollte die Basisstation Schnittstellen oder Möglichkeiten zur Übertragung oder Visualisierung von Datenverläufen bieten.

Die wesentlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb des Sensornetzwerks in seiner realen Einsatzumgebung waren:

- Als künstliche Beleuchtung im Gewächshaus werden sowohl Na-Dampflampen als auch LED basierte Beleuchtungssysteme eingesetzt. Es war daher von einer Hybridbeleuchtung auszugehen, in der beide Systeme aktiv sein können. Dabei kann die LED-Intensität auch gesteuert werden (Dimmen), die Intensität der Na-Dampflampen hingegen nicht.
- Verschattung: die künstliche Verschattung erfolgt automatisiert für das gesamte Glashaus. Zusätzlich wird in den Sommermonaten das Glasdach mit Farbe beschichtet, um die starke Sonneneinstrahlung in diesen Monaten generell zu reduzieren.
- Stromversorgung im Gewächshaus: 220 V
- Temperaturbedingungen im Gewächshaus: 10°C bis 40°C

- Die Feuchtebedingungen im Gewächshaus können bis zu 99% relative Feuchte erreichen! Daraus folgt, dass insbesondere auf Kondensat-Bildung geachtet werden muss bzw. diese im Sensorknoten und den Sensorelementen vermieden wird.
- Staub und Schmutz sind zu berücksichtigen und negative Einflüsse auf die Sensorknoten durch geeignete Schutzmaßnahmen zu vermeiden.
- Flüssigkeiten werden versprüht und es müssen geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden.
- Die Daten einer Metrostation im Freien können zu Zwecken der Auswertung zur Verfügung gestellt werden.

Konzept

Nach Festlegung der Anforderungen und Rahmenbedingungen wurde ein Lösungsansatz basierend auf modularen Sensorknoten entwickelt, welche autonom an ihrer Position Messdaten erfassen, verarbeiten und drahtlos an eine zentrale Einheit, die Basisstation weiterleiten. Modularität bedeutet hier, dass einerseits einzelne Sensorknoten mit unterschiedlichsten Sensorelementen ausgestattet werden können, die dem Bedarf der lokalen, unter Umständen unterschiedlichen Lichtverhältnisse im Gewächshaus entsprechen, sowie andererseits, dass auch die Anzahl und Platzierung der Sensorknoten selbst flexibel an die Gegebenheiten und Geometrien des Einsatzortes angepasst werden können. Eine zentrale Rolle, neben den anderen eingesetzten Sensoren, wurde jedenfalls einem speziellen Multi-Spektralsensor zur Charakterisierung der lokalen Spektralverteilungen zugedacht, welcher die Möglichkeit bietet, das Spektrum vom UV-A Bereich bis hin zum nahen Infrarot Bereich möglichst detailliert zu erfassen.

Darüber hinaus sollte der Lösungsansatz zum Sensornetzwerk garantieren, dass die einzelnen Komponenten in einfacher Weise und – wie für die Sensorknoten bereits erwähnt – an beliebig vielen Positionen, implementiert werden können. Dies wurde im Wesentlichen dadurch sichergestellt, dass die gewonnenen Daten drahtlos an die Basiseinheit übermittelt werden. Damit wird auch eine Skalierbarkeit des Konzepts auf Anlagen unterschiedlichster Größe sichergestellt. Nicht zuletzt sollte die Auswahl handelsüblicher Komponenten für eine einfache und robuste drahtlose Datenübertragung zur Kosteneffizienz für die Installation und den Betrieb des Sensornetzwerks beitragen.

Sensorkomponenten

Die konkrete Auswahl der zur Aufzeichnung der geforderten Daten notwendigen Sensorelemente erfolgte im Rahmen des Designprozesses zu den Sensorknoten. Nachfolgend sind die wesentlichen Komponenten dargestellt, welche sich einzeln oder auch in funktionellen Gruppen auf Satelliten- bzw. Sensor-Boards (Einzelplatinen) befinden und damit in den Sensorknoten modular eingesetzt werden können.

Der VEML 3328 Sensor von Vishay (<https://www.vishay.com/en/product/84968/>) bietet eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, um Lichtverhältnisse betreffend Intensität und auch einer Charakterisierung des Spektrums in 4 groben Wellenlängenbereichen (blau, grün, rot und nahes Infrarot) zu erfassen. Er verfügt neben einem Kanal zur gesamten Intensität im sichtbaren Bereich, sowie einem davon scharf abgetrennten Kanal im nahen Infrarot auch 3 weitere Kanäle zur besseren Abschätzung der PPFD (siehe Abbildung 4).

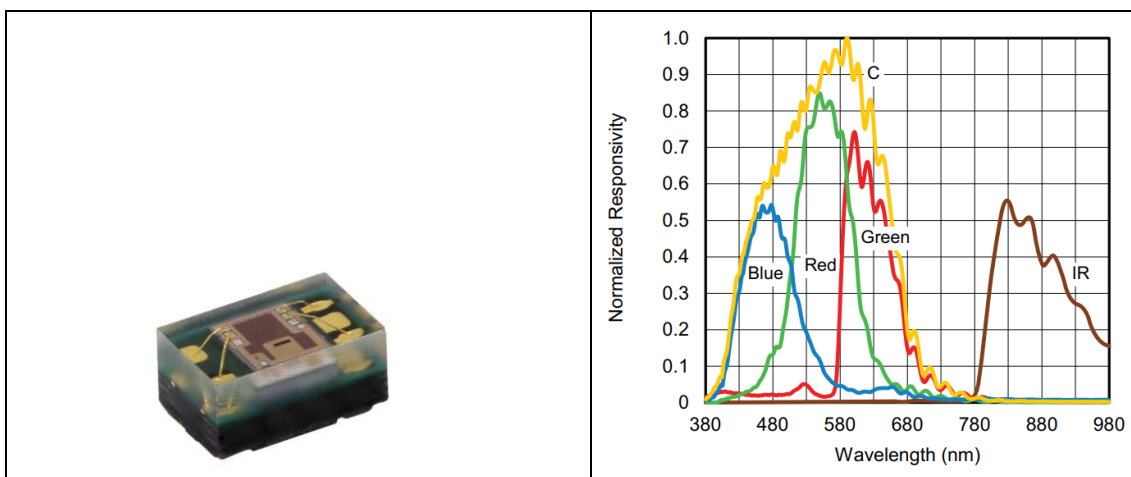


Abbildung 4: Der Vishay RGB/C/IR Sensor VEML3328 (links) mit der spektralen Empfindlichkeit seiner einzelnen Kanäle in der rechten Grafik – siehe <https://www.vishay.com/docs/84968/veml3328.pdf>.

Die leistungsstärkste Komponente zur Erfassung der lokalen Lichtverhältnisse in einem Sensorknoten ist jedoch der Multi-Spektralsensor AS 7343 L von AMS-OSRAM (<https://ams-osram.com/de/products/sensor-solutions/ambient-light-color-spectral-proximity-sensors/ams-as7343l-spectral-sensor>). Seine Kanäle reichen von etwa 380 nm bis 900 nm, im Detail sind die spektralen Empfindlichkeiten in Abbildung 5 wiedergegeben. Im Vergleich zum zuvor besprochenen VEML-Sensor ist festzustellen, dass die Halbwertbreite der Kanäle beim AS-Sensor in etwa nur halb so groß ist, womit Lichtintensitäten im Hinblick auf ihre

Wellenlängenverteilung deutlich besser aufgelöst bzw. auch Kanäle ausgewählt werden können, die zueinander gar keine Überlappung aufweisen.

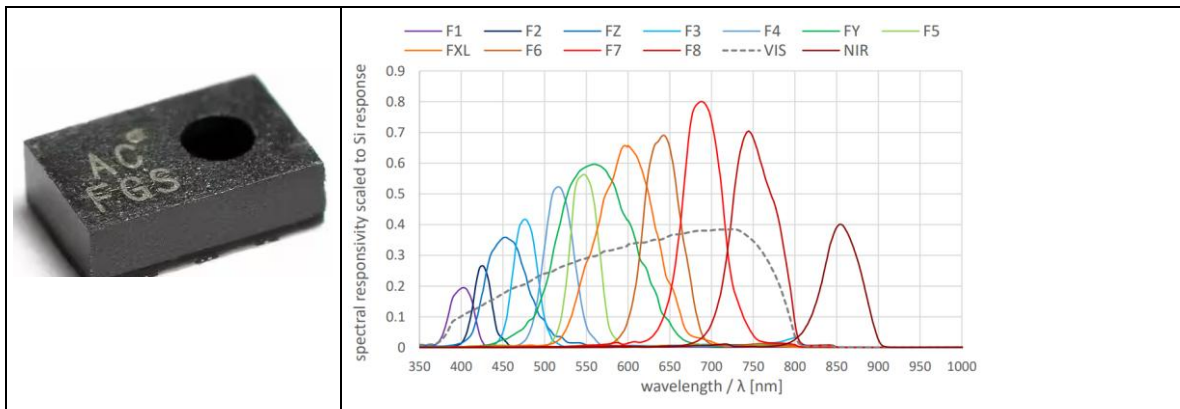


Abbildung 5: Der Multi-Spektralsensor AS 7343 von AMS-Osram mit der spektralen Empfindlichkeit seiner insgesamt 14 Kanäle – siehe <https://look.ams-osram.com/m/5f2d27fff9a874d2/original/AS7343-14-Channel-Multi-Spectral-Sensor.pdf>.

Erwähnt werden soll auch noch ein weiterer Sensor, der ganz speziell dafür geeignet ist, um im UV-Bereich (Ultraviolett) des Sonnenspektrums die Lichtintensitäten zu messen. Dieser Sensor, der LTR-390 von Liteon, hat neben einem Mess-Kanal im sichtbaren Bereich des Lichts (ALS – Ambient Light Sensor) auch einen zweiten im UV-Bereich empfindlichen Sensorkanal – Details siehe Abbildung 6 .

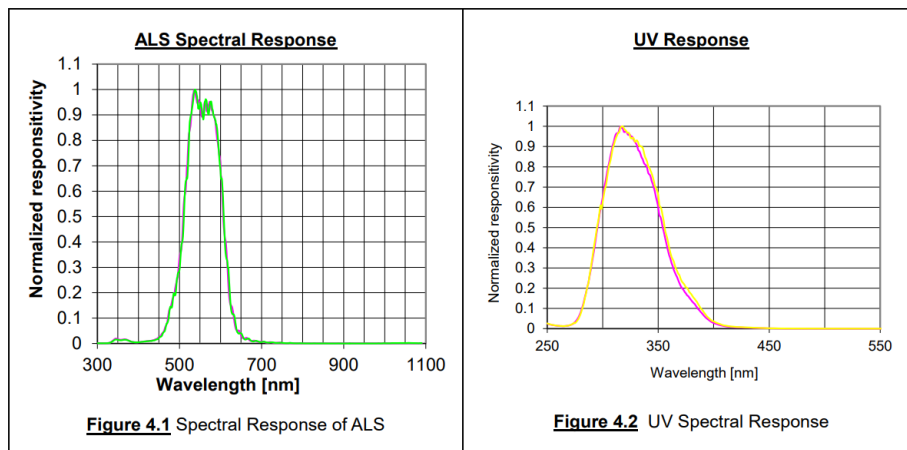


Abbildung 6: Normalisierte spektrale Sensitivitäten (ambient light – Grafik links, UV-Bereich – Grafik rechts) für den LITEON LTR-390 UV – siehe

https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf

Um eine erste Abschätzung zu bekommen, mit welchen Signalen bei typischen Lichtverhältnissen im Gewächshaus gerechnet werden muss, wurden mit den ausgewählten Sensor-komponenten erste Testmessungen gemeinsam mit einem Spektrometer (UPRtec MK 350 S) bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. In der Versuchsplanung zu diesen Testreihen wurden drei Höhen über dem Bodenniveau festgelegt, in welchen die Lichtverhältnisse bestimmt werden sollten: 2 m, 3 m und 4 m Höhe (Hinweis. Es ist zu erwarten, dass die Pflanzen über den Verlauf ihrer Wachstumsperiode eine Höhe bis zu 3 m erreichen). Anhand dieser Testreihen können den Sensordaten auch Bestrahlungsstärken in W/m^2 sowie die Photonenflussdichten PPFD in $\mu mol/m^2s$ für die jeweiligen Bedingungen und Positionen zugeordnet werden.

In Abbildung 7 sind beispielhaft Ergebnisse für durchwegs bewölkte Bedingungen bei künstlicher Beleuchtung ohne Sonne zusammengefasst.

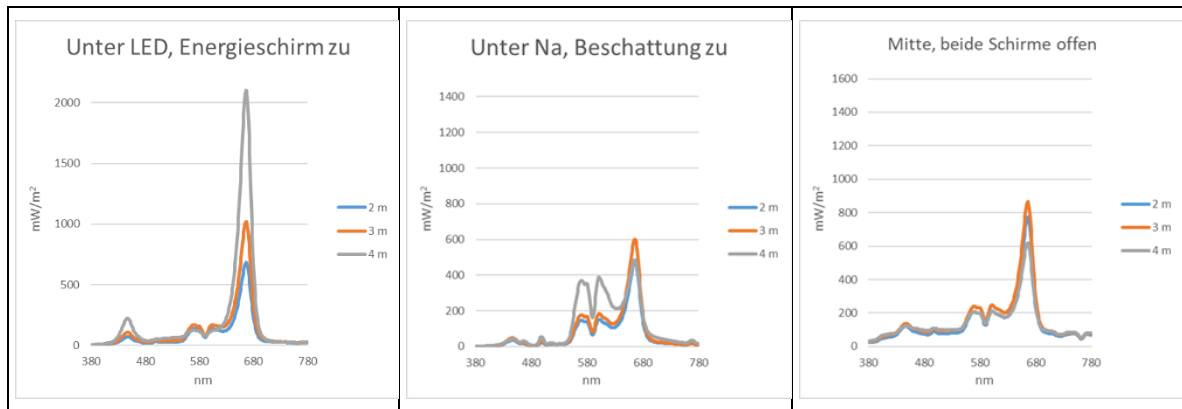


Abbildung 7: Spektralverteilungen in ca. 2 m (blaue Kurven), 3 m (orange Kurven), und 4 m Höhe (graue Kurven) über dem Boden. Bild links: Position unter einer LED-Lampe bei geschlossenem Energieschirm. Bild Mitte: Position unter einer Na-Dampflampe mit

geschlossener Beschattung. Bild rechts: Position in etwa in der Mitte von 4 Lampen bei geöffneten Schirmen (Beschattung & Energieschirm).

Sensorknoten – erste Generation

Basierend auf dem modularen Konzept für die Entwicklung der Sensorknoten bestehen die zentralen Einheiten aus einem Raspberry-PI sowie einer speziell designten und gefertigten Leiterplatte (PCB), die mit dem Raspberry-PI im Piggy-Back Konzept verbunden ist. Das PCB beinhaltet neben einem μ -Controller auch umfangreiche und verschiedenste Schnittstellen zur Anbindung der Sensorik. Damit übernimmt diese Basiseinheit die zentralen Aufgaben der Steuerung, Datenerfassung, On-the-Edge Datenverarbeitung bis hin zur drahtlosen Übermittlung der vorprozessierten Daten an die Basisstation. Über das PCB können unterschiedlichste Sensorkomponenten modular angebunden werden, welche die Umgebungsparameter wie Temperatur oder relative Feuchte erfassen und andererseits über die Spektral-Sensorik ein Monitoring des aktuellen Zustands zum lokal über den Pflanzen vorhandenen Lichtspektrums ermöglichen.

Ein wesentlicher Punkt in der Entwicklung und Auslegung der Funktionsmuster war außerdem sicherzustellen, dass die Sensorknoten unter den vorherrschenden Bedingungen im Gewächshaus (Temperaturen mit teilweise $> 40^{\circ}\text{C}$, hohe bis sehr hohe Luftfeuchtigkeit, Spritzwasser durch Reinigungszyklen, etc.) stabil und ausfallssicher betrieben werden können.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Entwicklungsschritte, einzelne Komponenten und die Assemblierung der Sensorknoten. Über den Sensor-(Satelliten-)Boards für die spektralen Sensorkomponenten wurden jeweils Diffusor-Plättchen montiert, siehe Abbildung 9 rechts. Diese verbessern einerseits das Field-of-View der Sensorkomponenten und schützen andererseits die elektronischen Komponenten vor Feuchte, Schmutz und Staub.

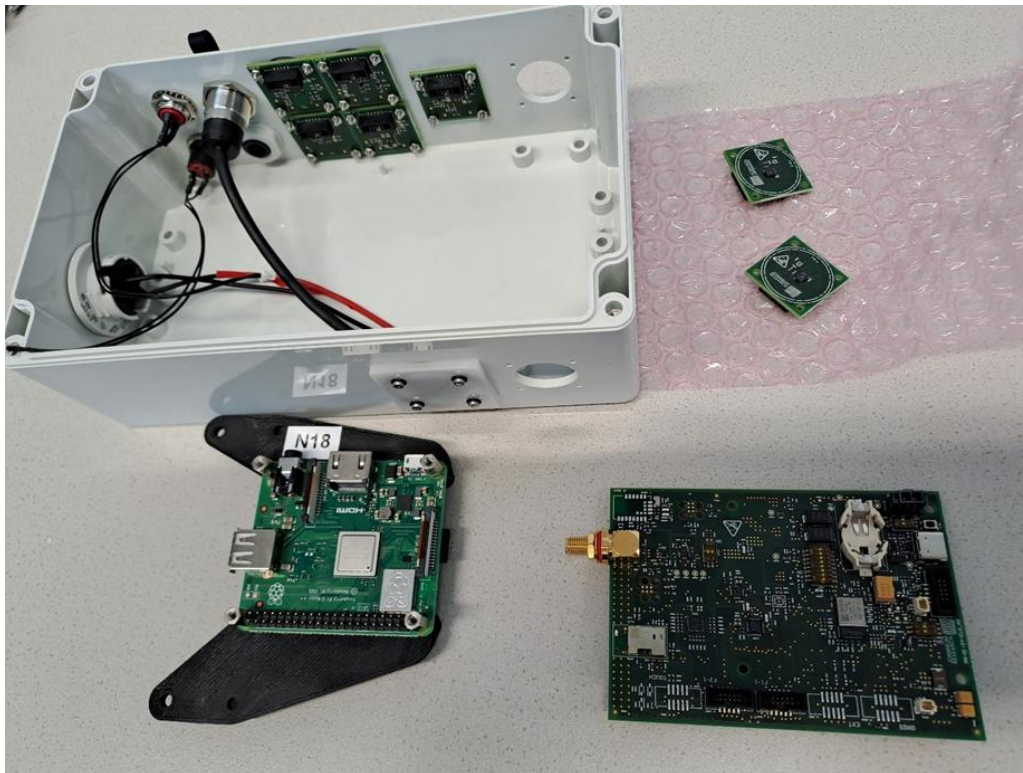


Abbildung 8: Assemblierung der Sensorknoten. Steuerungsplatine mit Mikrokontroller und Schnittstellen zu den Sensorkomponenten (rechts unten), Raspberry-PI (links unten), Gehäuse mit montierten Interfaces, Tastern und Sensor-Boards (links oben), sowie zwei weitere Sensor-Boards (rechts oben).

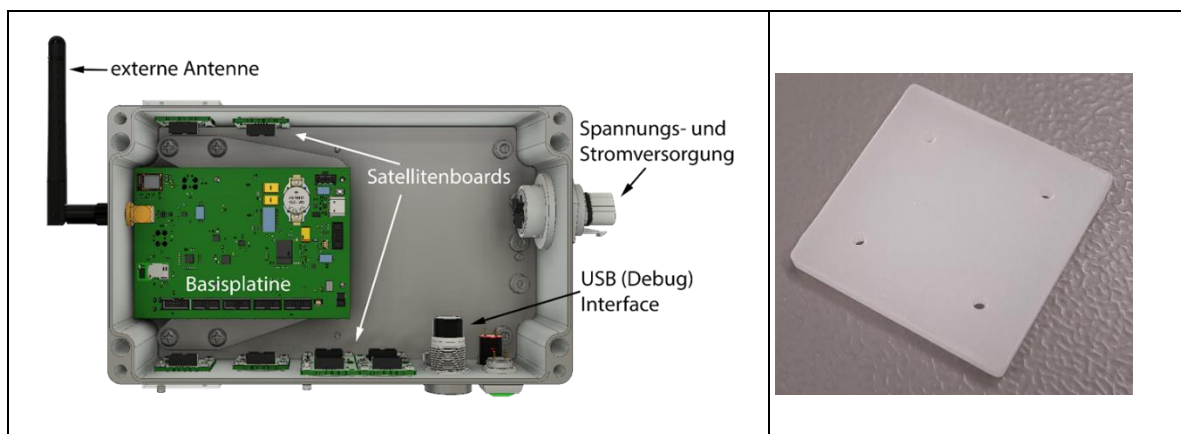


Abbildung 9: Sensorknoten mit einzelnen Komponenten. Rechtes Bild: Laser-geschnittenes Diffusor-Plättchen für die lichtsensitiven Sensoren.



Abbildung 10: Final assembliertes Funktionsmuster (ohne Deckel) zum Sensorknoten der ersten Generation.

Funktionstests der installierten Sensorknoten

Die assemblierten Sensorknoten wurden im Labor auf ihre Funktionen getestet und im Anschluss an den festgelegten Positionen im Gewächshaus installiert und in Betrieb genommen. Die in den Sensorknoten implementierten Sensorkomponenten führen dabei laufend Messungen durch und die erhaltenen Daten werden drahtlos an die Basiseinheit übermittelt. Im Folgenden werden beispielhaft Daten vom Multi-Spektralsensor zur Erfassung der lokalen Lichtintensitäten gezeigt, anhand derer die Funktionalität der Sensorknoten im realen Umfeld evaluiert wurde.

Das erste Beispiel zeigt den Kanal zum gesamten sichtbaren Bereich (Visible – VIS, ~380 nm bis 800 nm), gemessen mit drei Sensorknoten in drei unterschiedlichen Bereichen des 2 Hektar großen Gewächshauses (Abbildung 11). Bereich 1 bezeichnet den Sensorknoten, der sich außerhalb des Gewächshauses befindet und somit Vergleichsdaten wie von einer Wetterstation liefert. Man sieht an den Daten, dass am ausgewählten Tag die Sonneneinstrahlung um etwa 07:30 begonnen und um ca. 16:30 geendet hat (x-Achse in Stunden mit Beginn um 0 Uhr Mitternacht). Davor bzw. danach erreichen den Sensor keine relevanten Strahlungsintensitäten. Die dargestellten Daten sind Mittelwerte mit Standardabweichung aus Einzelmessungen über 5-Minuten Zeitintervalle. Große Fehlerbalken zeigen daher Intervalle, in denen sich die Strahlungsintensität innerhalb von 5 Minuten stark geändert hat.

Die auf der y-Achse dargestellten Counts des Sensorkanals vom jeweiligen Sensorknoten können über eine entsprechende Kalibrierung auch in die Bestrahlungsstärke in W/m^2 umgerechnet werden. Bereich 2 und Bereich 3 bezeichnen Sensorknoten an zwei verschiedenen Positionen innerhalb des Gewächshauses. Anhand dieser beider Sensorknoten kann man z.B. erkennen, dass um Mitternacht (0 Uhr) die LED-Beleuchtung eingeschalten wurde. Beide Sensoren zeigen Intensitäten, die aufgrund des Aufwärmens der LED-Lampen zu Beginn noch langsam abnehmen. Dabei befindet sich der Sensor im Bereich 2 näher zu einer LED-Lampe als der Sensor im Bereich 3, da die Intensität insgesamt höher ist. Ca. um 01:00 Uhr zeigen beide Sensorknoten einen weiteren signifikanten Sprung nach oben, da hier zusätzlich zu den LED-Lampen auch noch die Natrium-Dampflampen der künstlichen Beleuchtung des Gewächshauses aktiviert werden. Diese Natrium-Dampflampen werden knapp vor 16:00 wieder ausgeschalten und ca. 15 Minuten später auch die LED-Lampen, was sich in zwei aufeinanderfolgenden Signalsprüngen nach unten deutlich in den Daten manifestiert.

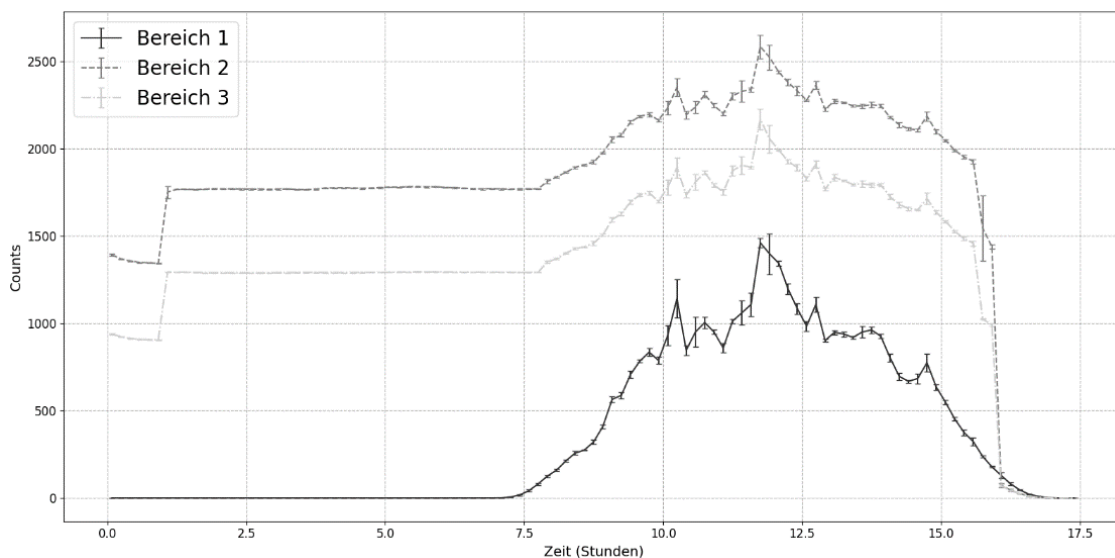


Abbildung 11: Sensordaten in 3 unterschiedlichen Bereichen über den Zeitverlauf von 0 Uhr Mitternacht bis 17:30 Uhr. Die y-Achse zeigt die Counts zum VIS-Kanal.

Wie zu sehen, addiert sich die natürliche Sonneneinstrahlung nicht in einfacher Weise zur künstlichen Beleuchtung. Dies ist nicht auf Nichtlinearitäten oder Sättigungseffekte der Sensoren zurückzuführen, sondern auf Verluste durch das Glasdach und weitere Komponenten des Gewächshauses. Damit ist auch ersichtlich, dass es für eine genaue Kenntnis der Tageslichtleistung auf den Pflanzen im Gewächshaus unerlässlich ist, auch an Ort und Stelle zu messen, da Rückschlüsse basierend auf Daten im Außenbereich nur schwer möglich sind.

Ein zweites Beispiel zeigt eine Auswertung desselben Tages für den blauen Bereich des Spektrums im Bereich um 450 nm (Abbildung 12 links). Vergleicht man die Counts auf der y-Achse mit jenen in Abbildung 11 ist klar, dass diese nun deutlich geringer ausfallen, da der ausgewählte Sensorkanal ja nur ein Teil des gesamten sichtbaren Spektrums enthält. Insgesamt ist auch festzustellen, dass sich die Intensitäten des blauen Bereichs nicht wesentlich vom Tagesverlauf des Gesamtspektrums im sichtbaren Bereich unterscheiden und diesen bereits gut widerspiegeln. Im Vergleich zu Abbildung 11 kann jedoch festgehalten werden, dass die Intensitäten an den Sensorknoten innerhalb des Gewächshauses zur Tagesspitze um ca. 12:00 Uhr nicht über die Werte im Außenbereich hinausgehen.

Als drittes Beispiel ist ein Kanal des Sensors im IR-Bereich bei 745 nm dargestellt, der die umfangreichen Möglichkeiten des Multi-Spektralsensors noch deutlicher demonstriert (Abbildung 12 rechts). Qualitativ ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie zum Intensitätsverlauf im sichtbaren Bereich. Allerdings ist festzuhalten, dass es in diesem Preissegment und in dieser Baugröße kaum vergleichbare Sensorkomponenten gibt, die wie der AS 7343 L bei 745 nm und 855 nm zwei getrennte Kanäle im IR-Bereich zur Verfügung stellen.

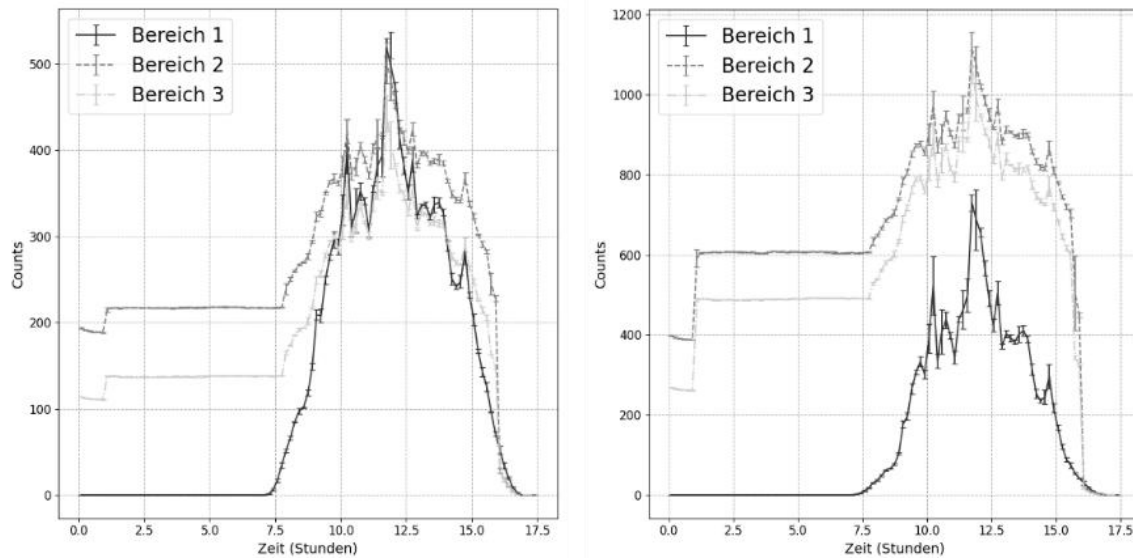


Abbildung 12: Sensordaten in 3 unterschiedlichen Bereichen über den Zeitverlauf. Die y-Achse zeigt die Counts zum blauen Kanal (linkes Bild), sowie zum IR-Kanal im Bild (rechtes Bild).

Sensorknoten – zweite Generation

Nach dem Betrieb der Sensorknoten in der ersten Phase der Datenerfassung im Gewächshaus wurden alle Komponenten abgebaut und ins Labor gebracht. Dort wurden sie visuell begutachtet, gereinigt, auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft, defekte Teile ausgetauscht, Sensorkomponenten angepasst und ein Software-Update durchgeführt, das alle Optimierungen implementiert, welche anhand der Erkenntnisse aus der ersten Phase gewonnen wurden.

Ein aufgetretener Mangel war, dass viele der Dichtungen den Bedingungen im realen Betrieb über einen Zeitraum von Monaten nur bedingt standhielten bzw. auch schon beim Assemblieren vermutlich nicht optimal gehandhabt wurden (zu stark verpresst). Bei einigen Sensorknoten wurde auch eine bräunlich verfärbte Flüssigkeit außerhalb der Haupt-Gehäusedichtung beobachtet, siehe Abbildung 13. Insgesamt waren aber abgesehen von Kratzern am Gehäuse oder losen Muttern keine nennenswerten Beeinträchtigungen der Sensoren und der elektronischen Komponenten in den Sensorknoten feststellbar. Dies wurde indirekt auch dadurch bestätigt, dass die Datenerfassung über die gesamte erste Phase hinweg problemlos funktioniert hat.



Abbildung 13: Beispielbild zu „brauner Verfärbung“ außerhalb der Haupt-Gehäusedichtung.

Alle defekten Dichtungen wurden entfernt und durch neue ersetzt. Darüber hinaus wurden alle Sensorknoten gründlich gereinigt. Die Sensorknoten wurden nachfolgend umfangreich geprüft. Zur Überprüfung der Stromaufnahme nach dem Booten des Raspberry PI's, wurden diese im Labor mit 24 V versorgt, um etwaige Auffälligkeiten in der Stromaufnahme zu erkennen und Gegenmaßnahmen durchführen zu können. Auf die Knoten wurde die neue Softwareversion aufgespielt und zusätzlich wurde überprüft, ob die Dipswitch-Position mit der jeweiligen Nummer der Sensorknoten übereinstimmt. Es wurde softwareseitig überprüft, ob alle Satellitenboards funktionieren, das Betriebssystem startete und Daten übertragen wurden. Im Speziellen wurde auch die Funktionsweise der Temperatur- und UV-Sensoren geprüft. Wenn notwendig, wurden einzelne Satellitenboards auch komplett getauscht.

Nach Abschluss der beschriebenen Arbeiten standen optimierte und funktionsgetestete Sensorknoten für die zweite Phase der Datenerfassung im Gewächshaus zur Verfügung.

Datenübertragung und Basisstation

Zur einfachen und kostengünstigen Vernetzung der räumlich getrennten Sensorknoten (siehe Abbildung 1) wurde von Beginn an ein WiFi Netzwerk im Gewächshaus mittels handelsüblicher Komponenten etabliert. Dieses drahtlose Netzwerk wurde durch eine kabelgebundene Anbindung (Standard Ethernet Kabel) zur Außenstation erweitert. Zentraler Datensammelpunkt bzw. Steuerungspunkt war die sogenannte Basisstation. Auch hier konnte auf einen handelsüblichen Mini-PC mit Windows Betriebssystem zurückgegriffen werden.

Die Fernwartung und Überwachung sowie die Bereitstellung der Daten mittels eines selbst programmierten Graphical User Interfaces (GUI) wurde mittels LTE-Modem realisiert. Abbildung 14 zeigt die schematische Darstellung des realisierten Netzwerks, dass über die gesamte Projektlaufzeit ohne nennenswerte Probleme zuverlässig betrieben wurde.

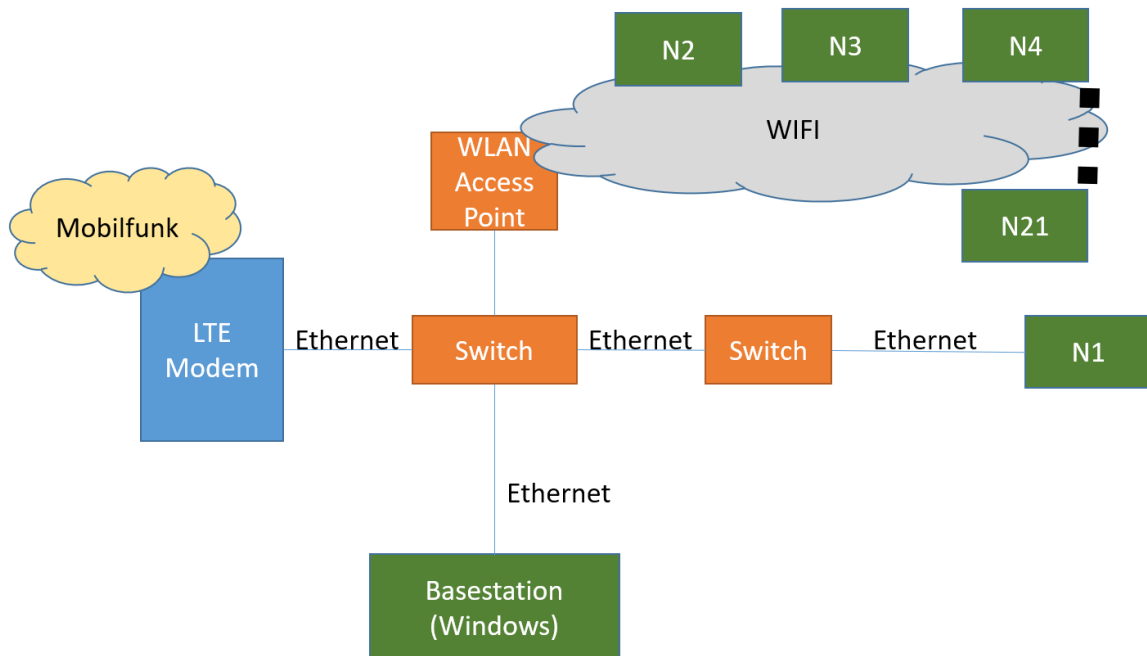


Abbildung 14: Schematische Darstellung des realisierten Netzwerks.

Die Absicherung des gezeigten Netzwerks gegenüber unerlaubten Zugriffen erfolgt mittels des Einsatzes eines Open-Source VPN Servers auf der Basisstation. Hinsichtlich der Datenkommunikation zwischen den Sensorknoten und der Basisstation als zentraler Datensammlungspunkt wurde eine Python basierte Socket-Kommunikation implementiert, die sich ebenfalls als robust während der Projektlaufzeit erwies. Komplettiert wurde die für das Projekt implementierte Software auf den Sensorknoten und der Basisstation durch eigens implementierte, sogenannte Watchdog-Skripts, die automatisiert das Netzwerk und die Kommunikation überwachten und gegebenenfalls selbständig reagierten. Zusammenfassend konnte sowohl durch den Einsatz handelsüblicher Komponenten im Bereich des Netzwerks die Kommunikation kostengünstig etabliert, als auch die Datenübertragung und Datensammlung mittels der eigenständigen Implementierungen effektiv und robust realisiert werden. Ein wesentlicher Punkt ist, dass mit Hilfe dieses Ansatzes auch die Skalierbarkeit und Anwendbarkeit an anderen Standorten oder in unterschiedlichen Szenarien ohne große zu erwartende Infrastrukturmaßnahmen gewährleistet ist.

Die aktuellen sowie die zurückliegenden Daten des Sensornetzwerkes wurden mittels GUI, aufrufbar über einen Webbrowser, übersichtlich und konfigurierbar zugänglich gemacht. Abbildung 15 zeigt das entwickelte Dashboard.



Abbildung 15: Darstellung des entwickelten Sensor-Dashboards zur Visualisierung der Daten.

Im oberen Teil des Dashboards wird in tabellarischer Form (siehe Abbildung 15 – Sensor Averages (Table 1) und Sensor Averages (Table 2)) ein schneller Überblick über die über den jeweiligen Tag erreichten Mittelwerte wie zum Beispiel Temperatur etc. ermöglicht. Das Datum der anzuzeigenden Werte ist dabei frei auswählbar. Damit können schnell und einfach unterschiedliche Tage verglichen werden. Darunter werden in graphischer Form der Tagesverlauf der aufgezeichneten bzw. errechneten $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte, gemittelt über die jeweiligen Bereiche, „Best-Case“ - Knoten N2-N9 und der „Worst-Case“ Bereiche - Knoten N12-N17 und N18-N21 dargestellt. Zusätzlich enthält diese Grafik auch die $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte der Außenstation (N1). Über die Datumsauswahl können sowohl die aktuellen Daten als auch die Daten vergangener Tage abgerufen werden. Darunter, in der zweiten grafischen Darstellung, kann wiederum für einzelne oder mehrere Knoten der Tagesverlauf der Tem-

peratur, relativen Luftfeuchtigkeit und der Rohwerte des einfallenden sichtbaren Lichts abgerufen werden. Zusätzlich bietet das Dashboard auch noch die Möglichkeit, alle aufzeichneten Rohwerte jedes Sensorknotens beliebiger Tage in grafischer Form darzustellen (nicht in Abbildung 15 dargestellt). Wie bereits erwähnt, wurde der Zugriff auf das Dashboard mittel VPN abgesichert.

Evaluierung im realen Umfeld

Mit der Umsetzung des Projektziels, ein kostengünstiges und robustes Sensornetzwerk zu entwickeln und innerhalb des Gewächshauses zu verteilen, konnte die räumlich verteilte Datenakquise im Gewächshaus erfolgreich realisiert werden. Anhand der generierten Datenbasis kann nachfolgend gezeigt werden, wie die zu Beginn des Projekts definierten Szenarien quantifiziert werden konnten und welche Schlussfolgerungen bzw. zukünftige Konzepte sich daraus ergeben. Die Erläuterung der Auswertungen erfolgt dabei nachfolgend anhand exemplarischer Daten.

Etablierung des flächendeckenden Sensornetzwerks im Gewächshaus

Wie in Abbildung 1 gezeigt, wurden die Sensorknoten in unterschiedlichen Bereichen verteilt, um gezielt eine Gegenüberstellung der „Best-Case“ (zentral im Gewächshaus gelegen) und „Worst-Case“ Bereiche (in den Randbereichen) zu ermöglichen. Exemplarisch zeigt Abbildung 16 den Verlauf der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Rohwerte des sichtbaren Lichts an zwei Knoten vom 11.04.2025. Der Sensorknoten N2 ist dabei zentral in der Mitte des Gewächshauses und N19 im „hinteren“ Randbereich platziert.

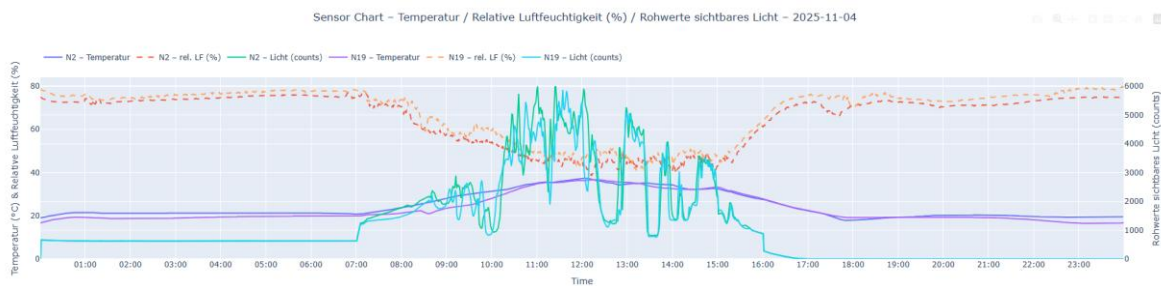


Abbildung 16: Tagesverlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der Temperatur (N2 – blauer und N19 – violetter Liniengraph), der relativen Luftfeuchtigkeit (N2 – rot und N19 – orange

strichlierte Graphen) und der Rohwerte des Lichtsensors an den Sensorknoten N2 (grüne Linie) und N19 (türkise Linie) am 11.04.2025.

In Abbildung 16 ist gut zu sehen, dass die gemessene Temperatur an N19 (violette Linie), im hinteren Bereich, morgens und abends nahezu durchgängig um ca. 2 bis 3°C weniger beträgt als im „zentralen“ Bereich beim Sensorknoten N2 (blaue Linie). Der Umstand, dass am Rand des Gewächshauses geringere Temperaturen vorherrschen, ist wenig überraschend, jedoch mit dem etablierten Sensornetzwerk auch tatsächlich quantifizierbar. Ein wesentlicher Punkt, der aus dieser durch das Projekt ermöglichten Quantifizierung abgeleitet werden kann, ist, dass durch diese räumlich verteilte Datenakquise auch die schnelle Erfassung kritischer Abweichungen, wie zum Beispiel unterschreiten gewisser Temperaturen ermöglicht wird. Zwar gibt es wie bekannt Sensorik, die die klimatischen Bedingungen aufzeichnen, jedoch sind diese nur an einzelnen Punkten im Gewächshaus positioniert. Somit wären kritische Ausfälle einzelner Heizstränge erst spät erkennbar, während mit dem dezentralen und verteilten Sensornetzwerk Abweichungen sehr zeitnah detektiert und Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Weiters zeigt die Abbildung gut den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur (strichlierte Linien). Die gezeigten Rohwerte des Lichtsensors (grüne/türkise Linien) bilden die Basis für die weiterführenden Auswertungen hinsichtlich des einfallenden Lichts, insbesondere auch in Bezug auf den Schattenwurf, Verschattung und möglicher Optimierungspotentiale, die in den nachfolgenden Subkapitel einzeln erläutert werden.

Erfassen der Lichtintensitäten im Gewächshaus

Wie bereits ausgeführt, bilden die Rohwerte der Spektralsensoren die Basis zu weiteren Auswertungen der Lichtverhältnisse. Die Umrechnung dieser Rohwerte auf den für Pflanzen gebräuchlichen PPFD-Wert in $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ erfolgte über die Anwendungshinweise (Application-Notes) der Sensorhersteller (ams OSRAM) mit Sonnenlicht als zugrundeliegender Referenz. Die Umrechnung wurde zusätzlich auf Basis von Referenzmessungen mit dem Handspektrometer UPRtec MK 350 S an verschiedenen Positionen der Sensorknoten adaptiert und feinjustiert. Diese Umrechnung ermöglicht die Darstellung der Lichtverhältnisse in einer für die Anwender relevanten Form.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen exemplarisch zwei sehr aussagekräftige Tagesverläufe, wobei in Abbildung 17 ein sehr bedeckter Herbsttag dargestellt ist (17.11.2025) und in Abbildung 18 ein sehr sonniger Herbsttag (04.11.2025). Beide Abbildungen zeigen auf der

x-Achse die Zeit in Stunden unterteilt, während die y-Achse die vom Sensorknoten aufgezeichneten bzw. errechneten $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt sind. Wichtig ist hierbei festzuhalten, dass die $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte jeweils gemittelt über die beschriebenen drei Bereiche im Gewächshaus, sowie zum Vergleich die $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte der Außenstation (N1) dargestellt sind.

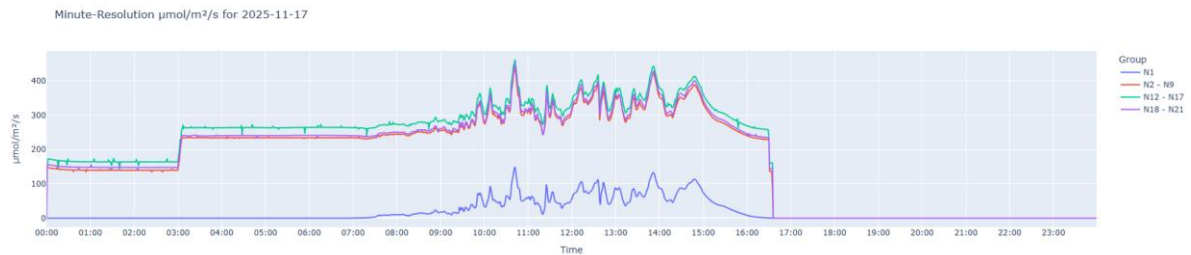


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote Linie, Sensorknoten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknoten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 17.11.2025.

Abbildung 17 zeigt deutlich, dass an diesem Tag keine nennenswerte Sonneneinstrahlung stattfand, ablesbar an den $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werten der Außenstation (blaue Linie). Auch eine in wenigen Kilometern entfernt positionierte öffentliche Wetterstation (Daten über den Data Hub der GeoSphere Austria abrufbar <https://data.hub.geosphere.at/>) zeigt 0h Sonnenschein an diesem Tag.

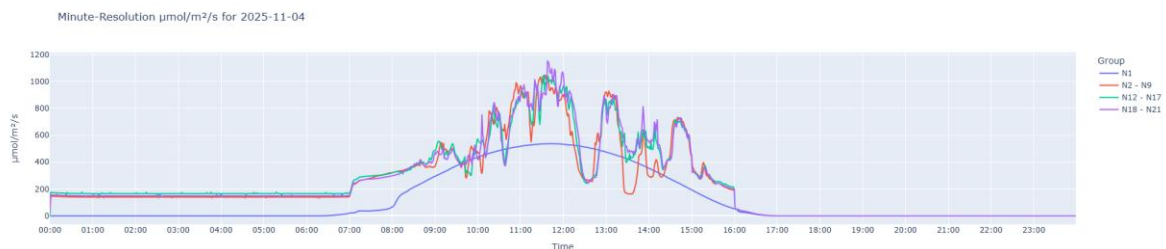


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote

Linie, Sensorknotten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknotten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 04.11.2025.

Im Kontrast zu Abbildung 17 ist in Abbildung 18 anhand der aufgezeichneten Daten die Sonneneinstrahlung sehr gut erkennbar. Weiters ist in beiden Abbildungen gut erkennbar, dass im Gewächshaus die künstliche Beleuchtung in zwei Stufen von Mitternacht bis ca. 16 Uhr aktiviert war. Damit zeigt sich, dass die Etablierung des flächendeckenden Sensornetzwerks im Gewächshaus erfolgreich umgesetzt werden konnte und in einer für die Anwender relevanten Form Daten zur Verfügung stellt.

Datenauswertung und Ableitung von Optimierungspotentialen

Aufbauend auf den zuvor exemplarisch gezeigten $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werten können nun anhand der über Monate hinweg gesammelten Daten die Optimierungspotentiale abgeleitet werden. Dabei werden drei grundlegende Parameter als Basis herangezogen. Erstens der zu erreichende $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Wert für die im Gewächshaus wachsenden Tomaten. Hierfür wurde der Zielwert von rund $300 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ aus der Literatur² herangezogen. Zweitens muss die Absorption des Sonnenlichts durch das Dach des Gewächshauses miteinbezogen werden. Dieser Parameter liegt auf Basis der vom Sensornetzwerk selbst ermittelten Werte, im Einklang mit Literaturangaben, wenn keine künstliche Verschattung durchgeführt wird, zwischen 10% und 30%. Der dritte Parameter ist die an der Außenstation gemessene Sonneneinstrahlung ebenfalls in $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Darauf aufbauend wurde nachfolgend ausgewertet, welches Potential hinsichtlich der Einsparung von künstlicher Beleuchtung in den Monaten Oktober und November 2025 gegeben war. Das heißt es wurde ermittelt, wie viele Stunden in diesen beiden Monaten die Sonneneinstrahlung groß genug gewesen wäre, unter Berücksichtigung der Verluste durch das Dach, um den Zielwert von $300 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ im Gewächshaus zu erreichen.

Exemplarisch zeigt Abbildung 19 den Tagesverlauf von 06.10.2025, an dem die künstliche Beleuchtung aktiviert war, während der Mittagsstunden aber auch das Sonnenlicht einen nicht unerheblichen Eintrag leistete.

² Ke, X., Yoshida, H., Hikosaka, S., & Goto, E. (2023). Photosynthetic photon flux density affects fruit biomass radiation-use efficiency of dwarf tomatoes under LED light at the reproductive growth stage. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076423>.



Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote Linie, Sensorknoten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknoten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 06.10.2025.

Quantitativ ausgewertet, ergibt sich für den Oktober ein Einsparungspotential von 84,1 Stunden künstlicher Beleuchtung und für den November von 30,65 Stunden. In Kombination mit dem in der Literatur beschriebenen Strombedarf pro Hektar im Bereich von 500-4000 kW für LED basierte Systeme bzw. 1000-6000 kW für ältere Systeme³, ergibt sich ein Einsparungspotential zwischen 42.050 kWh und 504.600 kWh pro Hektar für den Oktober und 15.325 kWh und 183.900 kWh pro Hektar für den November.

Diese Zahlen zeigen eindrücklich, welches Optimierungspotential durch das Sensornetzwerk erreichbar wird. Wichtig für zukünftige Erweiterungen und Adaptierungen ist jedoch die „Art“ der Beleuchtung zu beachten. Sollten in zukünftigen Erweiterungen nur noch LED-basierte Beleuchtungskörper eingesetzt werden, ergibt sich die Möglichkeit, die Einsparungspotentiale weiter zu steigern. LED-Beleuchtung mit ihrer Möglichkeit nahezu stufenlos gedimmt zu werden, erlaubt es nicht wie in der Auswertung gezeigt „nur“ die künstliche Beleuchtung zu aktivieren oder zu deaktivieren, sondern einen lokal betriebenen Regelkreis zu entwerfen. Dabei wird ein zu erreichender Zielwert hinsichtlich der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ definiert. In Abgleich mit den aktuell durch den oder die jeweiligen Sensorknoten erfassten Werte, werden die zu diesem Bereich zugehörigen LED-Leuchten entsprechend angesteuert, um kontinuierlich den definierten Zielwert zu erreichen. Daraus ergibt sich, dass auch geringere solare Einstrahlungen in der Ansteuerung erfasst und genutzt werden können.

³ Serale, G., Gnoli, L., Giraudo, E., & Fabrizio, E. (2021). A Supervisory Control Strategy for Improving Energy Efficiency of Artificial Lighting Systems in Greenhouses. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14010202>.

Sollten im Gewächshaus auch andere Beleuchtungssysteme (z.B. Natriumdampf-Leuchten) eingesetzt werden, muss in der Auslegung des Systems darauf Rücksicht genommen werden, da diese Leuchten nicht gedimmt werden können und, um die Langlebigkeit nicht zu riskieren, auch nicht in zu kurzen Abständen ein- und ausgeschaltet werden können. Hier empfiehlt es sich, den Optimierungsalgorithmus auf Tageswerte auszulegen, d.h., sollte durch solare Einstrahlung bereits vor Ende der geplanten Beleuchtungszeit das Tagesziel erreicht sein, können folglich die Beleuchtungszeit früher als geplant beendet und damit Energiekosten eingespart werden. Dies bedeutet, dass nicht das Gesamtpotential ausgeschöpft werden kann. Aber aufgrund der Tatsache, dass insbesondere Natriumdampflampen einen wesentlich höheren Stromverbrauch im Vergleich zu LED-Beleuchtungen aufweisen, kann trotzdem eine wesentliche Einsparung lukriert werden.

Zusammenfassend zeigen diese Resultate, dass durch das verteilte Sensornetzwerk wie geplant eine Quantifizierung der Optimierungspotentiale realisiert werden konnte.

Erkennen lokaler Abweichungen – Schattenwurf

Entsprechend den Projektzielen sollten durch das flächendeckende Monitoring lokale Abweichungen zwischen den einzelnen Bereichen im Gewächshaus, wie zum Beispiel Schattenwurf durch die baulichen Strukturen des Gewächshauses oder der angrenzenden Forstflächen erkannt werden. Insbesondere saisonale Abweichungen durch niedrigere Sonnenstände werden dadurch quantifizierbar und können auch zeitlich aufgelöst werden. Abbildung 20 und Abbildung 21 stellen dies exemplarisch dar, wobei in Abbildung 20 die frühen Morgenstunden am 16.09.2024 dargestellt sind, während Abbildung 21 die frühen Morgenstunden des 22.09.2024 zeigt. Die Gegenüberstellung der Sensordaten der Außenstation mit jeweils einem Knoten im „Best-Case“ Bereich und einem Knoten im „Worst-Case“ Bereich zeigt die zeitliche Verschiebung verursacht durch den niedrigeren Sonnenstand und der damit einhergehenden Verschattung.

16.09.2024

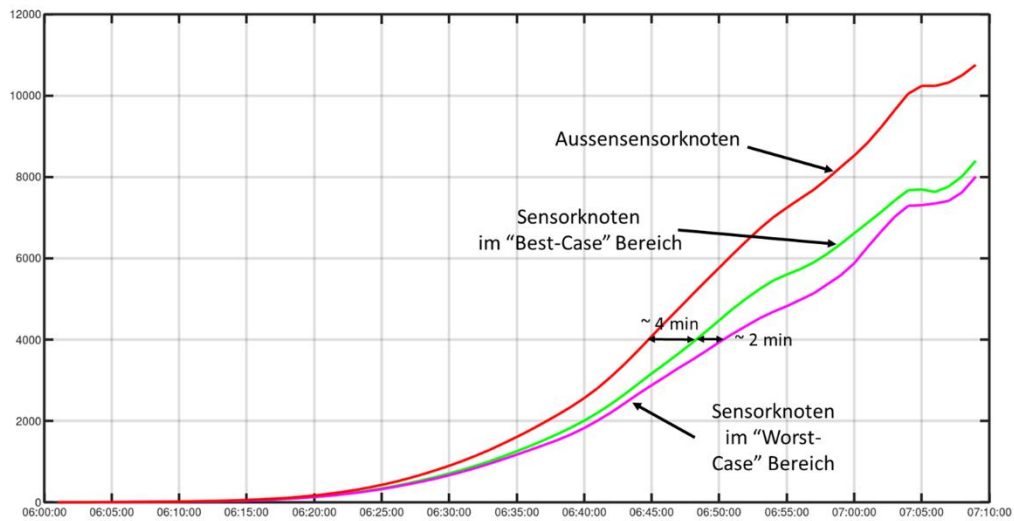


Abbildung 20: Vergleich der Sensordaten am 16.09.2024 aus 3 unterschiedlichen Bereichen – Außenstation (rote Kurve), Sensorknoten im „Best-Case“-Bereich (grüne Kurve) und Sensorknoten im „Worst-Case“-Bereich (magenta Kurve).

22.09.2024

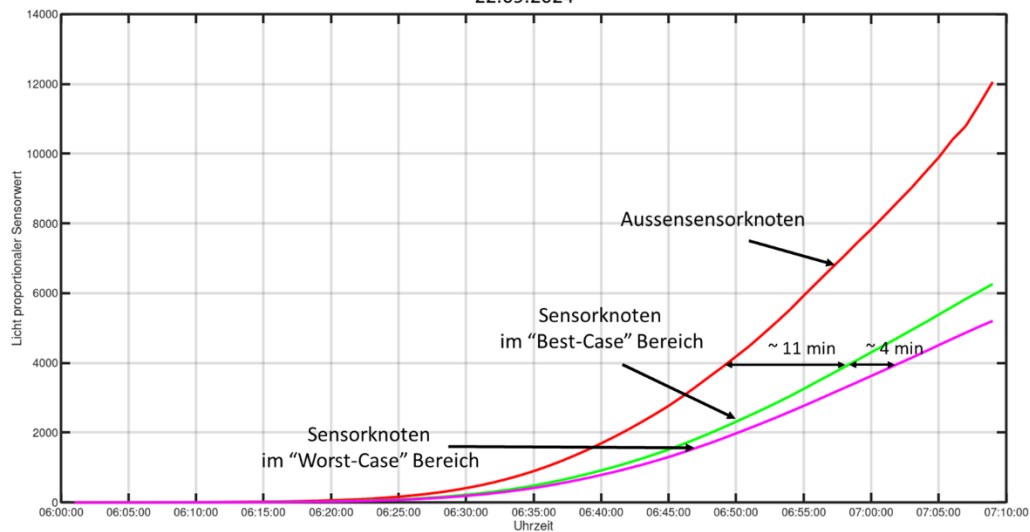


Abbildung 21: Vergleich der Sensordaten am 22.09.2024 aus 3 unterschiedlichen Bereichen – Außenstation (rote Kurve), Sensorknoten im „Best-Case“-Bereich (grüne Kurve) und Sensorknoten im „Worst-Case“-Bereich (magenta Kurve).

Diese Auswertung zeigt, dass durch das Sensornetzwerk auch dieses Szenario quantifizierbar gemacht wurde und dass in zukünftigen Optimierungen auch diese Daten in Form von

adaptiven Regelungen genutzt werden können, wie zum Beispiel durch ein früheres Dimmen oder Deaktivieren der Beleuchtung im Best-Case Bereich.

Bewertung der Verschattungswirkung

Ziel war es, in den Monaten, wenn keine künstliche Beleuchtung notwendig ist, sondern im Gegenteil, das einfallende Sonnenlicht mittels einer auf den Flächen des Glasdaches aufgetragenen Farbe reduziert werden muss („Schattierfarbe“), Abweichungen in der Verschattung räumlich aufgelöst zu erkennen. Dadurch werden lokale Abweichungen frühzeitig erkannt und es werden zielgerichtete Gegenmaßnahmen ermöglicht.

Abbildung 22 zeigt beispielhaft für Sensorknoten 18, wie räumlich aufgelöst das Verhältnis zwischen der gemessenen Sonneneinstrahlung der Außenstation mit den Sensorknoten im Inneren des Gewächshauses überwacht werden kann. Die in der Grafik (rot strichliert) dargestellte Linie ist die Bezugsgröße von 100 % der Außenstation. Die blaue Linie gibt an wieviel Prozent der Sonneneinstrahlung am jeweiligen Sensorknoten über den Monat Juni 2025 gemessen wurde.

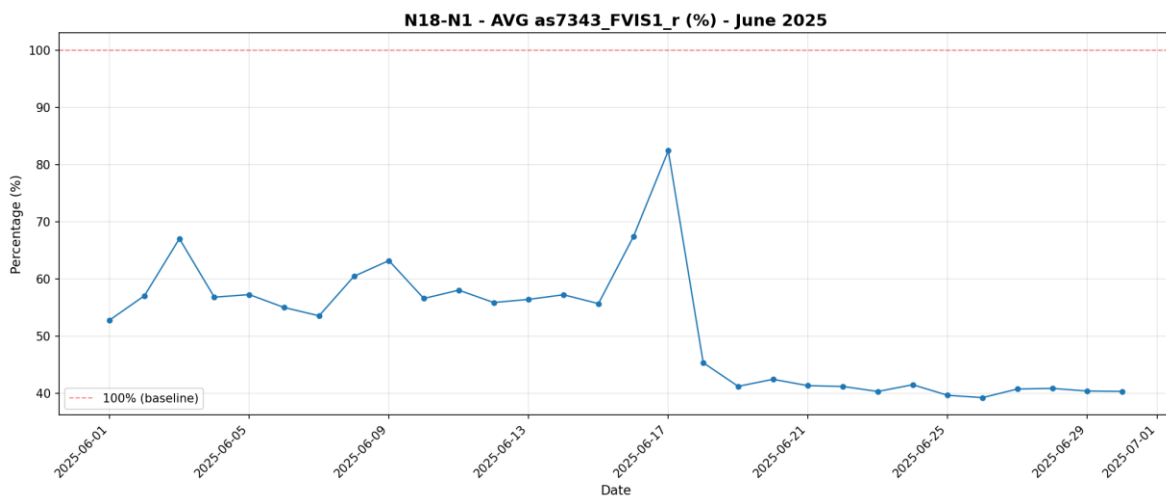


Abbildung 22: Darstellung der Verschattungseffektivität in Prozent gegenüber der gemessenen Einstrahlung an der Außenstation.

Abbildung 22 zeigt, dass zu Beginn des Monats die Verschattungseffektivität zwischen 50 und 60% des Sonnenlichts beträgt. Die dargestellten „Ausreißer“ zu Beginn des Monats,

zum Beispiel am 09.06.2025, resultieren aus der an diesem Tag vorherrschenden Bewölkung, so dass die Außenstation lokal stärker wechselnde Lichtbedingungen aufzeichnete im Vergleich zum dargestellten Sensorknoten im Inneren. Abgesehen von diesen Phänomenen ist die durchschnittliche Effektivität gut erkennbar. Die markantesten Punkte in dieser Abbildung sind von 16.06. bis 18.06. gut erkennbar. In diesem Zeitraum wurde zuerst das Dach des Gewächshauses gereinigt, was zu einer starken Abnahme der Verschattungswirkung geführt hat, und danach neue Schattierungsfarbe aufgetragen. Daraus resultiert die ab 18.06. sehr gut erkennbare starke Verschattungswirkung, d.h. es fallen nur mehr rund 40% des gesamten Sonnenlichts ins Innere des Gewächshauses ein.

In Anbetracht der aufgrund des Klimawandels zu erwartenden häufigeren und intensiveren Sonneneinstrahlung, ermöglichen diese Auswertungen eine gezielte Überwachung der Verschattung und ein Ergreifen der entsprechend notwendigen Gegenmaßnahmen.

Übertragbarkeit auf andere Anwendungen

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt Sense4Energy können direkt auf andere Anwendungen im Gemüsebau bzw. anderen Produktionssparten übertragen werden. Die Methoden zur Energieeinsparung, die in diesem Projekt entwickelt wurden, sind generell gültig und können somit auch in anderen Gewächshäusern angewendet werden, um den Energieverbrauch für Klimatisierung und Beleuchtung, durch die lokal aufgelöste Datenakquise zu optimieren. Die verwendete Sensorik macht es möglich einen sehr breiten Parameterraum z.B.: vom UV-Bereich bis hin zum IR-Bereich zu erfassen. Damit ist gewährleistet das die Überwachung für unterschiedlichste Bereiche realisierbar ist, insbesondere für zum Beispiel Anwendungen in Kulturen, die empfindlich auf gewisse Lichtspektren reagieren. Die Resultate des Projekts zeigen, dass mittels des Sensornetzwerks die Anpassung an saisonale Bedingungen optimal erfolgen kann und wie gezeigt, selbst während der typischerweise „ungünstigen“ Jahreszeiten die natürliche Sonneneinstrahlung in Zukunft optimal genutzt werden kann, um den Energieverbrauch zu senken. Die Modularität der Sensorknoten in Kombination mit der umgesetzten skalierbaren und größtenteils auf handelsüblichen Komponenten aufsetzenden Vernetzung demonstriert, dass das realisierte System ein vielseitiges Werkzeug für die Optimierung der Lebensmittelproduktion werden kann.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der im Rahmen des Projekts geschaffenen Datenbasis und den gezeigten Auswertungsmöglichkeiten konnte der Grundstein für ein System gelegt werden, das die tatsächlichen Licht- und klimatischen Verhältnisse dort aufzeichnete, wo sie auch wirksam werden. Damit wurde auch eine Datenbasis geschaffen, um in Zukunft effizientere Ansteuerungskonzepte zu ermöglichen. Zusätzlich wurden Problemstellungen wie Schattenwurf oder die Effektivität der Verschattung untersucht.

Ganz allgemein sind die im Rahmen des Projekts gewonnen Erkenntnisse auf unterschiedliche Szenarien, z.B. andere Gemüsesorten, Gewächshausformen oder Materialien übertragbar. Die verwendete Sensorik erlaubt aufgrund ihrer hohen Auflösung im spektralen Bereich bei Bedarf noch gezieltere, auf die Kultur zugeschnittenen Auswertungen zu realisieren. Der über die Projektlaufzeit nahezu reibungslose Betrieb des Sensornetzwerks ohne hohen Installations- und Wartungsaufwand zeigt einerseits die Machbarkeit zu einer durchgängigen, lokal aufgelösten Überwachung auf, und andererseits, dass mit Hilfe solcher Netzwerke generell Optimierungspotentiale und Konzepte für unterschiedliche Nutzer im Bereich des Gemüseanbaus identifiziert werden können.

Den nächsten Schritt zur Digitalisierung von Gewächshäusern stellt die Verknüpfung der bisher getrennten Systeme, wie zum Beispiel der Beleuchtungssteuerung oder der Klimasteuerung dar, wie dies bereits im Bereich der Beleuchtung vorgestellt wurde. Damit werden sich selbst regelnde Bereiche ermöglicht und die bisher notwendigen manuellen Vorgaben vereinfacht, da „nur“ mehr die gewünschten Zielwerte vorgegeben werden müssen und das System selbständig dazu in der Lage sein wird, die lokal optimalen Bedingungen zu schaffen. Die dafür nötigen Softwareschnittstellen sind, wie Recherchen im Rahmen des Projekts ergaben, teilweise bereits vorhanden und könnten auch vom Sensornetzwerk gesteuert werden.

Dissemination

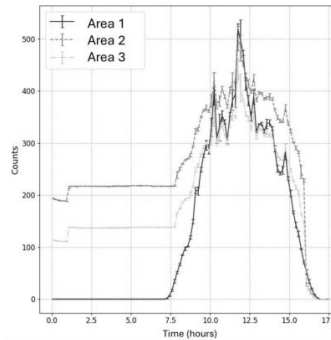
Im Rahmen der Dissemination zu den Projektergebnissen wurden folgende Aktivitäten durchgeführt:

- Vorstellung der Entwicklungsarbeiten in der BML-Steuerungsgruppe am 2. Oktober 2024 mit Vertreterinnen der LK Österreich Obst und Gemüsebau, sowie dem Österreichischer Branchenverband für Obst und Gemüse.
- Publikation auf einer Fachkonferenz: *C. Krutzler, C. Fagner, A.P. Weiss, Innovative Sensortechnologien zur Überwachung von Umweltparametern, ENOVA International Conference, Intelligente Energie- und Klimastrategien, Energie – Gebäude – Umwelt, Pinkafeld, Austria, Juni 25-26, 2025, SCIENCE.RESEARCH.PANNONIA. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Burgenland. Band 33.*
- Teilnahme am Tag der Ressortforschung des BML am 02.05.2024
- Teilnahme am Tag der Ressortforschung des BML am 05.05.2025
- Diverse Treffen und Gespräche zur Weiterführung der Entwicklungsarbeiten mit Akteuren aus diesem Bereich:
 - HBLFA Raumberg-Gumpenstein, <https://raumberg-gumpenstein.at>
 - Ziviltechniker-Kanzlei Dipl.-Ing. Georg Brunnhofer, <https://www.agrar-zt.com/>
 - Better Plants R&D GmbH, <https://www.better-plants.com>
 - Pessl Instruments GmbH, <https://metos.at>
- Dissemination im Europäischen Programm PhotonHub PHACTORY (<https://photonhub.eu/about/phactory/>), im Bereich Agrifood – siehe Folie in Abbildung 23.
- Geplante weiterführende Dissemination der Projektergebnisse auf wissenschaftlichen Konferenzen, z.B. 2026 IEEE Conference on AgriFood Electronics

Smart Sensor System for increased Greenhouse Efficiency



Wireless sensor network to determine the local spectral light intensities for optimum control of the daily light integral DLI.



Acknowledgements:
This project is funded by
the Austrian government.

Federal Ministry
Agriculture and Forestry, Climate
and Environmental Protection,
Regions and Water Management
Republic of Austria



Partner:

- JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, MATERIALS – Institute for Sensors, Photonics and Manufacturing Technologies, Smart Connected Lighting
- FZ Development GmbH, 100% Tochterfirma der Frutura Obst & Gemüse Kompetenzzentrum GmbH

Abbildung 23: Präsentation des Projekts für Outreach-Aktivitäten im Programm PhotonHub PHACTORY.

Schlussfolgerungen

"Sense4Energy" hatte das Ziel, ein kostengünstiges und robustes Sensornetzwerk für Gewächshäuser zu entwickeln. Die erfolgreiche Implementierung dieses Netzwerks ermöglicht eine räumlich verteilte Datenakquise, die es erlaubt, die zu Projektbeginn definierten Szenarien zu quantifizieren. Die generierten Daten bieten wertvolle Einblicke und bilden die Grundlage für zukünftige Konzepte und Optimierungen in der Landwirtschaft, insbesondere im Bereich der Umweltparameterüberwachung.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Projekts ist die Erkenntnis, dass die Technologien aus dem Projekt auch in anderen landwirtschaftlichen Bereichen eingesetzt werden können, um die Effizienz und Nachhaltigkeit zu steigern. Die verteilten Sensornetzwerke ermöglichen eine präzise und kontinuierliche Datenerfassung, was in anderen Gewächshäusern oder Freilandkulturen genutzt werden könnte, um Umweltparameter wie Lichtintensität, Temperatur und Feuchtigkeit zu überwachen. Dies könnte beispielsweise helfen, den Wasser- und Düngbedarf genauer zu bestimmen und somit Ressourcen zu sparen. Erste Gespräche hinsichtlich einer Adaptierung bzw. von Re-Designs der Sensorik zur Erweiterung des Einsatzspektrums wurden bereits in ersten Besprechungen mit möglichen Anwendern geführt.

Die Verlängerung des Projektzeitraums um 3 Monate, um insbesondere die Datenerfassung auf eine weitere Übergangsperiode von September bis November auszudehnen, hat sich als besonders wertvoll erwiesen. Besonders diese Übergangsperioden zeigen ein großes Potential zur Nutzung von Effizienzsteigerungen.

Abschließend möchten sich das Projektteam an dieser Stelle für die große Unterstützung der FZ Development GmbH bzw. Frutura Obst & Gemüse Kompetenzzentrum GmbH bedanken.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zu jenem Bereich des Gewächshauses (Abteilung mit einer Fläche von ca. 1 ha), in welchem das Sensornetzwerk installiert worden ist. Die dicken schwarzen Linien symbolisieren die Wände des nach unten im Bild noch weiterlaufenden Gewächshauses. Die grauen vertikalen Linien symbolisieren die Reihen der Pflanzen im Gewächshaus. Die Positionierung der Sensorknoten ist durch die blauen Punkte mit der Bezeichnung N2, N3, ... bis N21 angedeutet. Der als „Best-Case“ bewertete Bereich ist orange umrandet und der „Worst-Case“ Bereich rot umrandet dargestellt (siehe Text)...	11
Abbildung 2: Schema zur Positionierung der Sensorknoten über dem Bereich der kultivierten Pflanzen und unterhalb von Beschattung und der künstlichen Beleuchtung. .	12
Abbildung 3: Montage der Sensorknoten an den Stehern des Gewächshauses (linkes Bild). Beispielhaftes Spektrum unter sonnigen Verhältnissen (rechtes Bild).....	12
Abbildung 4: Der Vishay RGB/C/IR Sensor VEML3328 (links) mit der spektralen Empfindlichkeit seiner einzelnen Kanäle in der rechten Grafik – siehe https://www.vishay.com/docs/84968/veml3328.pdf	17
Abbildung 5: Der Multi-Spektralsensor AS 7343 von AMS-Osram mit der spektralen Empfindlichkeit seiner insgesamt 14 Kanäle – siehe https://look.ams-osram.com/m/5f2d27fff9a874d2/original/AS7343-14-Channel-Multi-Spectral-Sensor.pdf	18
Abbildung 6: Normalisierte spektrale Sensitivitäten (ambient light – Grafik links, UV-Bereich – Grafik rechts) für den LITEON LTR-390 UV – siehe https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf	18
Abbildung 7: Spektralverteilungen in ca. 2 m (blaue Kurven), 3 m (orange Kurven), und 4 m Höhe (graue Kurven) über dem Boden. Bild links: Position unter einer LED-Lampe bei geschlossenem Energieschirm. Bild Mitte: Position unter einer Na-Dampflampe mit geschlossener Beschattung. Bild rechts: Position in etwa in der Mitte von 4 Lampen bei geöffneten Schirmen (Beschattung & Energieschirm).....	19
Abbildung 8: Assemblierung der Sensorknoten. Steuerungsplatine mit Mikrokontroller und Schnittstellen zu den Sensorkomponenten (rechts unten), Raspberry-PI (links unten), Gehäuse mit montierten Interfaces, Tastern und Sensor-Boards (links oben), sowie zwei weitere Sensor-Boards (rechts oben).	21
Abbildung 9: Sensorknoten mit einzelnen Komponenten. Rechtes Bild: Laser-geschnittenes Diffusor-Plättchen für die lichtsensitiven Sensoren.....	21
Abbildung 10: Final assembliertes Funktionsmuster (ohne Deckel) zum Sensorknoten der ersten Generation.	22

Abbildung 11: Sensordaten in 3 unterschiedlichen Bereichen über den Zeitverlauf von 0 Uhr Mitternacht bis 17:30 Uhr. Die y-Achse zeigt die Counts zum VIS-Kanal.	23
Abbildung 12: Sensordaten in 3 unterschiedlichen Bereichen über den Zeitverlauf. Die y-Achse zeigt die Counts zum blauen Kanal (linkes Bild), sowie zum IR-Kanal im Bild (rechtes Bild).....	25
Abbildung 13: Beispielbild zu „brauner Verfärbung“ außerhalb der Haupt-Gehäusedichtung.....	26
Abbildung 14: Schematische Darstellung des realisierten Netzwerks.....	27
Abbildung 15: Darstellung des entwickelten Sensor-Dashboards zur Visualisierung der Daten.	28
Abbildung 16: Tagesverlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der Temperatur (N2 – blauer und N19 – violetter Liniengraph), der relativen Luftfeuchtigkeit (N2 – rot und N19 – orange strichlierte Graphen) und der Rohwerte des Lichtsensors an den Sensorknoten N2 (grüne Linie) und N19 (türkise Linie) am 11.04.2025.	30
Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote Linie, Sensorknoten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknoten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 17.11.2025.	32
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote Linie, Sensorknoten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknoten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 04.11.2025.	32
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf (x-Achse von 0 Uhr bis 24 Uhr) der $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Werte dargestellt für drei Bereiche im Gewächshaus (Sensorknoten N2 bis N9 gemittelt – rote Linie, Sensorknoten N12 bis N17 gemittelt – türkise Linie, und Sensorknoten N18 bis N21 gemittelt – violette Linie) und die Außenstation (N1 – blaue Kurve) am 06.10.2025.	34
Abbildung 20: Vergleich der Sensordaten am 16.09.2024 aus 3 unterschiedlichen Bereichen – Außenstation (rote Kurve), Sensorknoten im „Best-Case“-Bereich (grüne Kurve) und Sensorknoten im „Worst-Case“-Bereich (magenta Kurve).	36
Abbildung 21: Vergleich der Sensordaten am 22.09.2024 aus 3 unterschiedlichen Bereichen – Außenstation (rote Kurve), Sensorknoten im „Best-Case“-Bereich (grüne Kurve) und Sensorknoten im „Worst-Case“-Bereich (magenta Kurve).	36
Abbildung 22: Darstellung der Verschattungseffektivität in Prozent gegenüber der gemessenen Einstrahlung an der Außenstation.	37
Abbildung 23: Präsentation des Projekts für Outreach-Aktivitäten im Programm PhotonHub PHACTORY.	41

Literaturverzeichnis

Ke, X., Yoshida, H., Hikosaka, S., & Goto, E. (2023). Photosynthetic photon flux density affects fruit biomass radiation-use efficiency of dwarf tomatoes under LED light at the reproductive growth stage. *Frontiers in Plant Science*, 14.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076423>

Serale, G., Gnoli, L., Giraudo, E., & Fabrizio, E. (2021). A Supervisory Control Strategy for Improving Energy Efficiency of Artificial Lighting Systems in Greenhouses. *Energies*, 14(1), 202. <https://doi.org/10.3390/en14010202>

Abkürzungen

DLI	Daily Light Integral (Tageslichtintegral)
GUI	Graphical User Interface - Bildschirmoberfläche mit grafischen Elementen
IR	IR-Bereich, der infrarote Bereich des Lichtspektrums > 700 nm
Na	Natrium
nm	Nanometer
PCB	Printed Circuit Board - Leiterplatte für elektronische Bauteile
PPFD	Photosynthetische Photonenflussdichte
UV	UV-Bereich, der ultraviolette Bereich des Lichtspektrums < 400 nm
UV-A	Teil des ultravioletten Lichtspektrums mit längeren Wellenlängen (315–400 nm)
VIS	VIS-Bereich, der sichtbare Bereich des Lichtspektrums von ca. 400 nm bis 700 nm
VPN	Virtual Private Network - virtuelles privates Netzwerk, das eine sichere und verschlüsselte Verbindung über ein öffentliches Netzwerk herstellt
WiFi	Wireless Fidelity - Drahtlose Netzwerktechnologie zur Datenübertragung über Funkwellen, typischerweise im Frequenzbereich von 2,4 GHz und 5 GHz.

