

Der Weg zur effizienten Belichtungsregelung in Algen-Photobioreaktoren

Tim Hegemann, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme
und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Zusammenfassung

Zur effizienten Belichtungsregelung in Algen-Photobioreaktoren müssen viele Regelparameter aufeinander abgestimmt werden. Neben den aktuellen Lichtbedingungen sorgen Vorhersagen der zu erwartenden Tageslichtmenge sowie der Energiepreise für langfristig energieeffiziente Regelstrategien im Algenanbau. Maßgebende Messgröße für das Tageslicht ist hierbei die photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD). In diesem Paper werden drei Methoden zur Bestimmung der PPFD von Tageslichtspektren mit kostengünstigen Spektrosensoren vorgestellt. Die erste Methode schätzt die PPFD anhand der Kanalempfindlichkeitskurven. Bei der zweiten Methode wird die PPFD auf der Grundlage der berechneten ähnlichsten Farbtemperatur (CCT) und einer spektralen Rekonstruktion unter Verwendung des CIE-Tageslichtmodells berechnet. Und die dritte Methode basiert auf einem Regressionsmodell zur Berechnung der PPFD. Es wird gezeigt, dass die tatsächlichen Tageslichtspektren zu stark vom CIE-Tageslichtmodell abweichen, um eine hinreichende Aussage zur PPFD zu treffen. Abschließend erfolgt ein Test der Robustheit dieser Methoden anhand von realen Messdaten, die mit den Sensoren im Freien bei verschiedenen Tageslichtverhältnissen erzeugt wurden.

Index Terms: Algenbelichtung, Spektrosensorik, Messtechnik, Modellierung

1 Einleitung

Die Belichtung von konservativen Algen-Photobioreaktoren erfolgt häufig ausschließlich durch Sonnenlicht. In modernen Photobioreaktoren dagegen wird bereits additiv, jedoch oft pauschal von außen, belichtet. Durch die Verwendung von integrierten Lichtquellen mit auf den Reaktor abgestimmten Einkoppeloptiken kann die Effizienz eines Photobioreaktors gesteigert werden. Für eine weitere Effizienzsteigerung bedarf es jedoch zusätzlicher Regelung, welche das zur Verfügung stehende, sowie das zu erwartende Tageslicht berücksichtigt und den Anteil künstlicher Belichtung dynamisch anpasst. Durch den Einsatz von optischen



Messsystemen kann das aktuelle Tageslicht und somit die aktuelle Belichtungssituation erfasst und in das Regelsystem gegeben werden. Mithilfe kurzfristiger Energiekostenprognosen können Regelstrategien vorgeplant und die Effizienz maximiert werden.

Maßgebende Messgröße für das Tageslicht ist hierbei die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) welche angibt, wie viele Photonen im Spektralbereich der PAR-Strahlung (400 nm bis 700 nm) pro Fläche und Zeiteinheit aufgenommen werden. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der PPFD ist es möglich, die Lichtsumme eines Flächenelements über den gesamten Tag zu bestimmen (Tageslichtintegral (DLI)).

Das Algenwachstum wird vor allem durch Temperatur, Nährstoffzufuhr und Licht beeinflusst. Ähnlich zum Algenanbau werden im modernen Gartenbau Gärtner zunehmend durch Technologie unterstützt, um die für Pflanzen wichtigen Umgebungsparameter zu erfassen und den Anbau so effizient wie möglich zu gestalten. So werden z.B. Entscheidungen über die Temperierung oder Bewässerung im Gewächshaus durch gängige Sensoren unterstützt [1].

Das für Pflanzen relevante Licht, d.h. das Licht, welches zur Photosynthese der Pflanze beiträgt, ist nach McCree 1972 als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) für den Bereich von 400nm bis 700nm definiert [2]. Innerhalb des PAR-Bereichs werden alle Photonen ohne weitere Gewichtung summiert. Anbauer und Landwirte messen die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, was angibt, wie viele Photonen im Spektralbereich der PAR-Strahlung pro Fläche und Zeiteinheit empfangen werden. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der PPFD ist es möglich, die Lichtsumme eines Flächenelements über den gesamten Tag zu bestimmen, was als Tageslichtintegral (DLI) bezeichnet wird.

Wird das Tageslichtintegral über die Lebensdauer einer Pflanze dokumentiert, kann mithilfe geeigneter kulturabhängiger Modelle eine Vorhersage des Wachstums und der Blüte gemacht werden. Vorhersagemodelle für den DLI auf der Grundlage der Sonneneinstrahlung werden von Albright et al. vorgeschlagen [3].

Für die Messung der PPFD wurden in früheren Arbeiten verschiedene Ansätze verfolgt. Wie von Ross und Sulev dargelegt, können verschiedene Techniken verwendet werden: (1) Spektrometer, (2) Pyranometer mit halbkugelförmigen Glasfiltern oder (3) Sensoren auf der Basis von Silizium-Photodioden (Quantensensoren) [4-18].

Bei Messungen mit Spektrometern bleibt die spektrale Zusammensetzung als Information erhalten, wobei Spektrometer für die meisten Anwendungen zu teuer oder für die Umgebungsbedingungen am Messort ungeeignet sind. Pyranometer werden zur Messung der Sonnenstrahlung, einschließlich des IR-Bereichs bis etwa $2,8 \mu\text{m}$, eingesetzt. Im Gartenbau werden heute Quantensensoren eingesetzt, die das einfallende Licht mit Photodioden erfassen. Zu diesem Zweck wird ein optischer Filtersatz verwendet, um das einfallende Spektrum nach der Photonenenergie sowie der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers zu gewichten. Die Information über die spektrale Zusammensetzung des einfallenden Lichts geht dabei verloren. Die

Genauigkeit von Quantensensoren ist sehr unterschiedlich und hängt weitgehend von der spektralen Empfindlichkeit des Sensors und der Lichtquelle ab. Barnes et al. zeigen zum Beispiel, dass eine höhere Genauigkeit bei breiten Spektren erreicht wird. Fehler von mehr als 30 % konnten sowohl von Blonquist et al. als auch von LI-COR in Experimenten mit verschiedenen Sensor-Lichtquellen-Paarungen ermittelt werden [19-21].

Neuere Arbeiten haben bereits das Potenzial von Spektralsensoren für die Messung der PPFD gezeigt. [22-24]

Aufgrund ihres Aufbaus können Spektralsensoren jeweils nur einen schmalen Teil des einfallenden Spektrums erfassen. Zu diesem Zweck werden Arrays von Fotodioden in der Regel mit einzelnen optischen Filtern beschichtet. In Kombination mit den Filtereigenschaften und der Empfindlichkeit des Halbleiters entstehen so optische Bandpassfilter. Je nach Anzahl und Verteilung der verschiedenen Fotodioden-Filter-Kombinationen (Kanäle) kann der Verlust an spektraler Information reduziert werden. Je nach Anwendung werden optische Filter zur Anpassung der Empfindlichkeitsfunktion und für (1) spektrale Messungen, (2) eine Anpassung an die Farbempfindlichkeitskurven des Auges, (3) eine Anpassung an die Lichtausbeutefunktion für photopisches Sehen $V(\lambda)$ und (4) einen Fit zur Berechnung der R-G-B-Komponenten verwendet. Keiner dieser Filter ermöglicht eine direkte Messung der PPFD, aber diese Filter können verwendet werden, um Informationen über das Spektrum zu erhalten. Dies ermöglicht die Berechnung eines Umrechnungsfaktors zur Berechnung der PPFD aus der gemessenen Bestrahlungsstärke.

2 Methoden

In dieser Arbeit werden verschiedene Methoden zur Berechnung der PPFD in der Praxis verifiziert. Zu diesem Zweck wurden an mehreren Tagen zeitsynchron Tageslichtmessungen mit einem Spektralsensor (AS7341, ams-OSRAM AG) und einem Handspektrometer (CSS45, Gigahertz Optik GmbH) durchgeführt. Der Spektralsensor verfügt über 8 Kanäle im sichtbaren Bereich sowie über einen Kanal im IR-Bereich und einen ohne Filteroptik [25].

Aufgrund der IR-Empfindlichkeit einiger Spektralkanäle des Spektralsensors wurde ein IR-Filter (FESH0750, Thorlabs) vorgeschaltet. Um die Messungen vergleichbar zu machen, wurde die Integrationszeit für jede Verstärkungsstufe konstant gehalten. Zwischen jeder Messung wurde eine Dunkelstrommessung mit dem Spektrometer und eine Verstärkungseinstellung des Spektralsensors durchgeführt.

Bei der ersten Methode wird eine reduzierte PAR-Gewichtungsfunktion zur Berechnung der PPFD verwendet. Bei der zweiten Methode wird das CIE-Tageslichtmodell zur Schätzung der PPFD verwendet, und die dritte Methode stützt sich auf ein Gauß-Modell zur Berechnung der PPFD. Für diese Methoden werden die spektralen Empfindlichkeitskurven der Kanäle des Spektralsensors benötigt. Diese werden mithilfe eines Monochromators (LOT MSH-300) und einer Xenon-Lichtquelle in einer Ulbricht-Kugel bestimmt. Ein Spektrometer (Spectro 320, Instrument Systems) wird als Referenz verwendet.

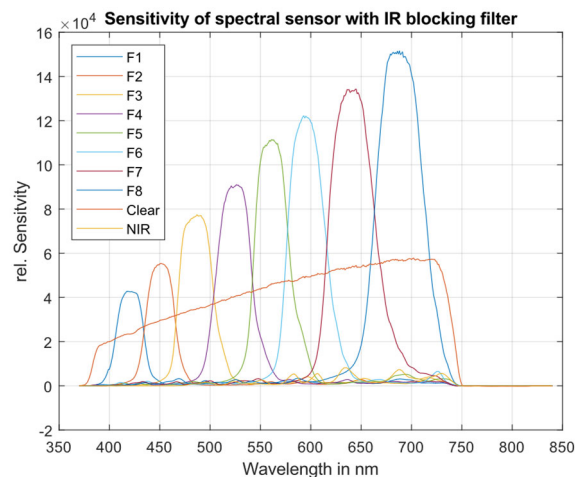


Abbildung 1: Gemessene und berechnete Kanalempfindlichkeiten des verwendeten Spektralsensors

Die in Abbildung 1 dargestellten Empfindlichkeitskurven werden für den Spektralsensor mit der einfachen Schätzmethode nach HP Laboratories ermittelt. [26,27]

Mithilfe des Spektrums des einfallenden Lichts und der Empfindlichkeitskurven der Kanäle lässt sich die für den Kanal relevante spektrale Bestrahlungsstärke berechnen. Die Umrechnung der spektralen Bestrahlungsstärke in PPFD kann mithilfe einer PAR-Gewichtungskurve $W(\lambda)$ und Umrechnungsfaktoren erfolgen [24].

$W(\lambda)$ ist eine Funktion zur Gewichtung der spektralen Bestrahlungsstärke nach dem Energiegehalt der Photonen bei der spezifischen Wellenlänge λ und ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Umrechnung der energiebezogenen Größe $W \text{ m}^{-2}$ in die Größe $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erfolgt über das Plancksche Wirkungsquantum h ($6,6261 \times 10^{-34} \text{ J s}$), die Avogadro-Konstante N_A ($6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) und die Lichtgeschwindigkeit c ($299\,792\,458 \text{ m/s}$).

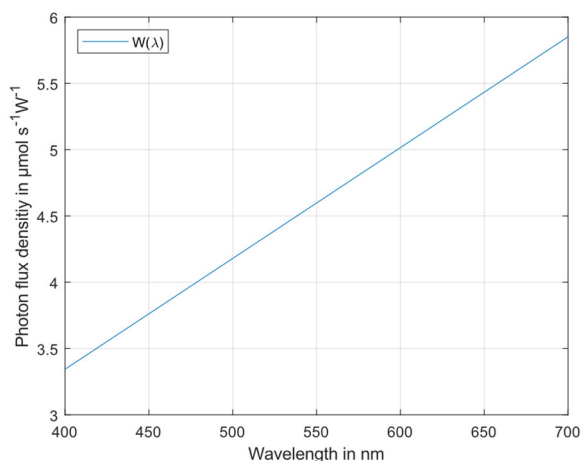


Abbildung 2: PAR-Gewichtungsfunktion $W(\lambda)$. Außerhalb des Par Bereichs ist die Funktion gleich null.

$$W(\lambda) = \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} \quad (1)$$

Die erste Methode zur Berechnung der PPFd mithilfe von Spektralsensoren basiert auf den Empfindlichkeiten $S_n(\lambda)$ der Kanäle. So wird die Funktion $W(\lambda)$ mithilfe der Empfindlichkeiten und eines Faktors simuliert, welcher vom Wert der Funktion $W(\lambda)$ bei der mittleren Wellenlänge jedes Kanals abhängt. Durch Integration der einfallenden Spektren ($E_e(\lambda)$) mit der Empfindlichkeitskurve jedes Kanals $S_n(\lambda)$ und deren Gewichtung mit dem Wert der $W(\lambda)$ -Kurve bei der entsprechenden Mittenwellenlänge jedes Kanals, kann eine simulierte Kanal-PPFD ($PPFD_n$) ermittelt werden.

$$PPFD_n = W(\lambda_{center}) \int_{400}^{700} S_n(\lambda) \cdot E_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Durch Division des $PPFD_n$ -Wertes und des gemessenen Kanalwertes F_n kann der Skalierungsfaktor α_n für jeden Kanal ermittelt werden.

$$\alpha_n = \frac{PPFD_n}{F_n} \quad (3)$$

$$PPFD = \sum_{n=1}^8 F_n \cdot \alpha_n \quad (4)$$

Die Summe dieser faktorisierten Kanäle ergibt die PPFd der einfallenden Spektren. Wegen der Überlappung der Kanäle ist ein Offset zur Korrektur erforderlich. Um die Werte von α_n zu ermitteln, wurden die Daten in Trainingsdaten (80%) und Testdaten (20%) aufgeteilt.

Bei der zweiten Methode wird die Farbkoordinate aus den Kanälen des Spektralsensors mithilfe eines Regressionsmodells berechnet. Anhand der Farbkoordinaten und der Umrechnung nach McCamy kann die Farbtemperatur CCT berechnet werden [28]. Mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums kann ein entsprechendes Tageslichtspektrum mit der berechneten Farbtemperatur erzeugt werden und mithilfe der $W(\lambda)$ -Kurve die PPFd berechnet werden [29].

Außerdem wird ein Modell verwendet, um die CCT direkt aus den Messwerten der Kanäle des Spektralsensors zu approximieren.

Die dritte Methode nutzt ein Regressionsmodell, um die PPFd direkt aus den gemessenen Kanalwerten zu berechnen.

3 Ergebnisse

Für diese Arbeit wurden nur Messwerte eines Verstärkungsfaktors mit fester Integrationszeit verwendet, um Nichtlinearitäten zwischen Verstärkungsstufen auszuschließen. Der Datensatz umfasst 276 Messpunkte und wurde in 80 % Trainingsdaten und 20 % Testdaten aufgeteilt.

Methode 1

Abbildung 3 zeigt die mit Gleichung 4 vorhergesagte PPFD im Vergleich zu der mit dem Referenzgerät gemessenen PPFD. Es ist zu erkennen, dass es möglich ist, die PPFD zu schätzen, aber sie weist eine hohe Varianz auf. Mit dieser Methode ergibt sich ein R^2 von 0,92 und ein RMSE von 86,75. Die zur Gewichtung der gemessenen Kanalwerte verwendeten Faktoren sind in Tabelle 1 aufgeführt.

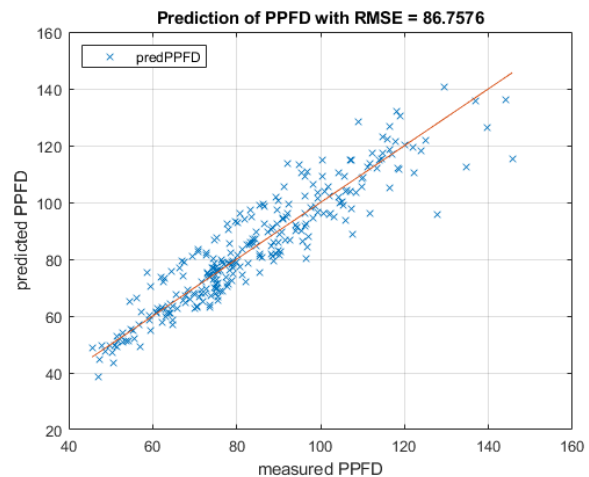


Abbildung 3: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mit der Methode 1 bei der Verwendung aller 8 Kanäle im sichtbaren Bereich.

Tabelle-1: Übersicht der Kanäle des AS7341 mit der mittleren Wellenlänge, PAR-Gewichtungsfaktor sowie Gewichtungsfaktor α_n .

Kanal	Mittlere Wellenlänge in nm	$W(\lambda)$ in $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$	α_n
1	415	3.452	0.056
2	445	3.703	0.063
3	480	3.995	0.056
4	515	4.204	0.059
5	555	4.539	0.057
6	590	4.915	0.056
7	630	5.249	0.055
8	680	5.751	0.054

Methode 2

Bei der zweiten Methode wird zuerst der Farbart (x, y, z) anhand der Spektralkanäle mithilfe eines Regressionsmodells berechnet. Die Kanäle 3, 5 und 8 werden für die Modellierung verwendet, da diese jeweils einen Kanal aus dem roten, blauen und grünen Spektralbereich abdecken. Die Verwendung aller Kanäle für die Modellierung führte nicht zu signifikanten Verbesserungen. Es wurden verschiedene Ansätze aus den Bereichen lineare Regression, Regressionsbäume, Support-Vektor-Maschinen, Gaußsche Prozessregression (GPR) und neuronale Netze getestet. Ein Modell aus der Gaußschen Prozessregression erwies sich als das beste Modell.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die mit dem Modell berechneten Farbkoordinaten (x, y) im Vergleich zu denen der Referenz. Mit einem RMSE von 0,0014 für x und 0,0012 für y können die Farbkoordinaten ausreichend gut berechnet werden.

Die aus den Farbkoordinaten mit McCamy berechneten Farbtemperaturen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Im Vergleich dazu zeigt ein anderes GPR-Modell die direkte Berechnung der Farbtemperatur aus den Kanalwerten (Abbildung 7). Durch die Modellierung der CCT direkt aus den Kanalwerten (RMSE=79,2) ist die Vorhersage der CCT wie erwartet genauer als die Modellierung der Farbkoordinaten und die Berechnung der CCT (RMSE=92,44).

Für die Berechnung der CIE-Tageslichtspektren unter Verwendung des CIE-Tageslichtmodells mit einem absoluten Wert wird ein Skalierungsfaktor benötigt. Dieser Skalierungsfaktor konnte durch Verwendung der Referenzspektren und Aufteilung der Daten in Trainings- und Testdaten ermittelt werden.

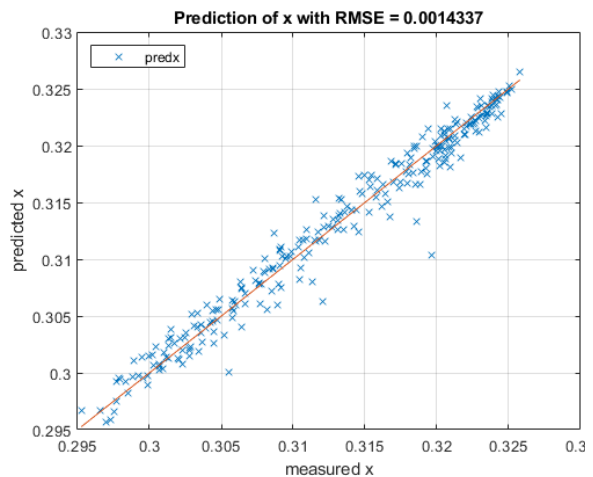


Abbildung 4: Berechnung der Farbkoordinate x mithilfe des GPR-Modells.

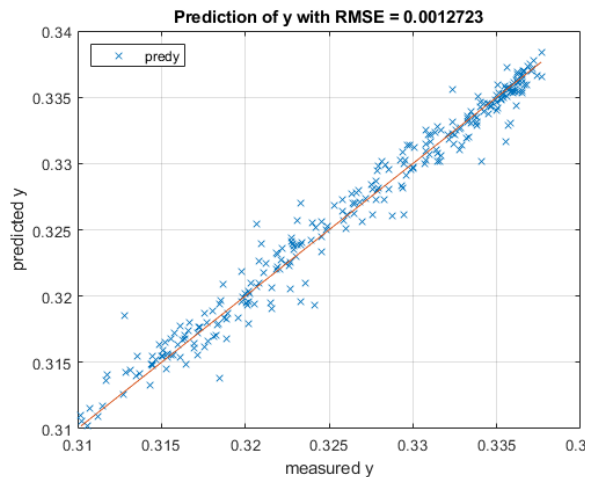


Abbildung 5: Berechnung der Farbkoordinate y mithilfe des GPR-Modells.

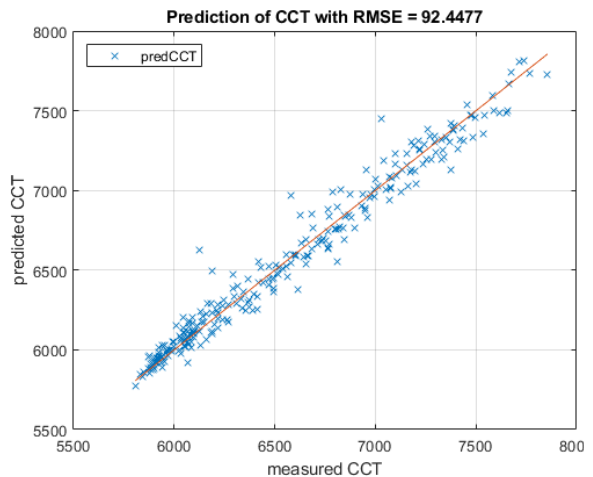


Abbildung 6: Berechnung der CCT aus den Farbkoordinaten nach McCamy.

Die PPFD wird unter Verwendung der beiden berechneten CCT sowie des CIE-Tageslichtmodells berechnet. Die Ergebnisse der beiden PPFD-Berechnungen werden in den Abbildungen 8 und 9 verglichen. Während die direkte Berechnung der CCT aus den Kanalwerten genauer ist als die Berechnung über die Farbortkoordinate, zeigen beide Methoden bei der Berechnung der PPFD ungefähr die gleiche Genauigkeit. Die Berechnung über die Farbortkoordinate ist mit einem $RMSE=73$ minimal besser als die über die Kanalwerte mit einem $RMSE=74,2$. Beide Bestimmungen weisen eine hohe Varianz auf und sind für eine präzise PPFD-Bestimmung nicht geeignet.

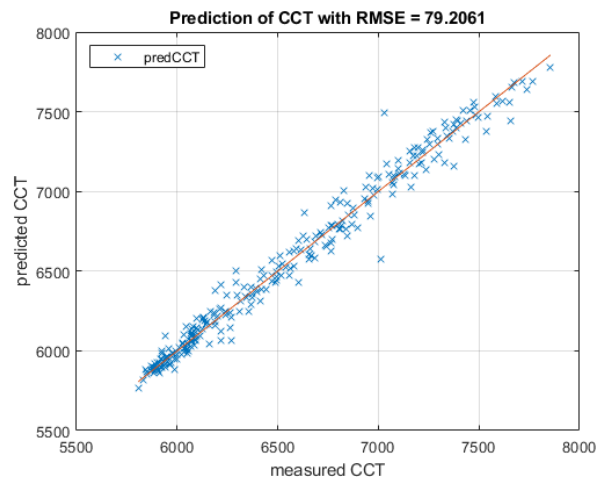


Abbildung 7: Berechnung der CCT anhand der Kanalwerte und dem GPR-Modell.

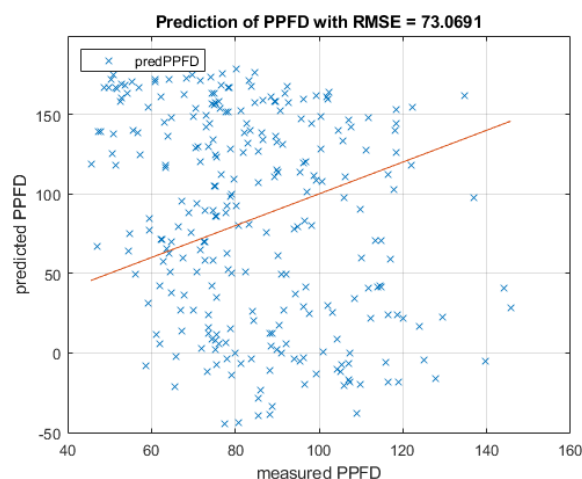


Abbildung 8: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums und Farbtemperaturberechnung nach McCamy.

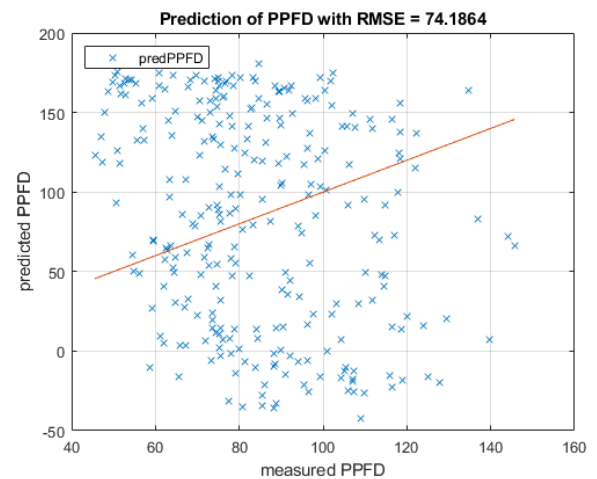


Abbildung 9: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums und Farbtemperaturberechnung mithilfe des GPR-Modells.

Methode 3

Bei der dritten Methode wurden ebenfalls verschiedene Ansätze wie lineare Regression, Regressionsbäume, Support-Vektor-Maschinen, Gaußsche Prozessregression (GPR) und neuronale Netze getestet, um die PPFD direkt aus den Kanalwerten zu bestimmen. Auch hier schnitt ein GPR-Ansatz am besten ab.

Abbildung 10 zeigt erneut den Vergleich zwischen der berechneten PPFD und der gemessenen Referenz (RMSE=3,06).

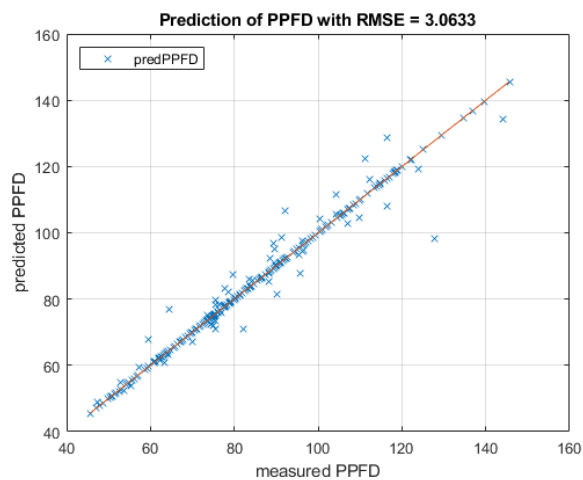


Abbildung 10: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aus den gemessenen Kanalwerten unter Verwendung des GPR-Modells.

4 Diskussion

Mit Methode 1 und 3 ist es möglich, die PPFD zu berechnen. Wobei die dritte Methode die genaueste Bestimmung ermöglicht (siehe Tabelle 2). Methode 1 erfordert ein kalibriertes Spektrometer und einen Monochromator für die Berechnung der PPFD_n sowie ein Lichtlabor zur Aufnahme der Empfindlichkeitskurven der Spektralkanäle. Die daraus resultierende Genauigkeit bei der PPFD-Schätzung ist nicht genau genug, um diesen Aufwand zu rechtfertigen. Methode zwei verwendet das CIE-Tageslichtmodell und die CCT oder Farbkoordinaten (x, y, z) zur Bestimmung der PPFD. Die Bestimmung der CCT über beide Methoden ist nicht genau genug, um die PPFD anschließend genau zu bestimmen. Eine weitere Schwäche dieser Methode ist das CIE-Tageslichtmodell, das eine rein farbt temperaturabhängige Spektralverteilung vorsieht. Aufgrund von Standort, Wolken, Schatten oder Partikeln in der Atmosphäre kann die spektrale Verteilung am konkreten Messort jedoch erheblich vom Modell abweichen. Die Berücksichtigung von Standort und Bewölkung kann helfen, das Tageslichtspektrum besser zu modellieren. Auch die Verwendung echter xyz-Sensoren könnte die Bestimmung der CCT verbessern.

Mit der dritten Methode kann ein Modell gefunden werden, das die PPFD auf der Grundlage der Kanalwerte bestimmen kann. Für die Berechnung des Modells wird Rechenleistung benötigt, aber anschließend kann das Modell auch auf Mikrocontroller-Basis übertragen werden, was einen kostengünstigen Sensor mit einem

kostengünstigen Einplatinencomputer kombiniert und somit ein kostengünstiges Messsystem ergibt.

Tabelle-2: Vergleich des RMSE der drei Methoden.

	Methode 1	Methode 2 (xyz)	Methode 2 (CCT)	Methode 3
RMSE	86,75	73,0	74,0	3,06

5 Literaturverzeichnis

- [1] Van Lersel MW, Chappell M, Lea-Cox JD. Sensors for improved efficiency of irrigation in greenhouse and nursery production. HortTechnology 2013; 23: 735–746. DOI: 10.21273/HORTTECH.23.6.735.
- [2] McCree K. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. Agricultural Meteorology 1972; 10: 443–453. DOI: 10.1016/0002-1571(72)90045-3.
- [3] Albright LD, Both AJ, Chiu AJ. Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. Transactions of the ASAE 2000; 43: 421–431. DOI: 10.13031/2013.2721.
- [4] Pinho P, Hytönen T, Rantanen M, Elomaa P, Halonen L. Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment. Lighting Research and Technology 2013; 45: 295–304. DOI: 10.1177/1477153512444064.
- [5] Schwend T, Beck M, Prucker D, Peisl S, Mempel H. Test of a par sensor-based, dynamic regulation of led lighting in greenhouse cultivation of helianthus annuus. European Journal of Horticultural Science 2016; 81: 152–156. DOI: 10.17660/eJHS. 2016/81.3.3.
- [6] van lersel MW, Gianino D. An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses. HortScience 2017; 52: 72–77. DOI: 10.21273/HORTSCI11385-16.
- [7] Federer CA, Tanner CB. Sensors for measuring light available for photosynthesis. Ecology 1966; 47: 654–657. DOI: 10.2307/1933948.
- [8] McCree KJ. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. Agricultural Meteorology 1966; 3: 353–366. DOI: 10.1016/0002-1571(66)90017-3.
- [9] Biggs WW, Edison AR, Eastin JD, Brown KW, Maranville JW, Clegg MD. Photosynthesis light sensor and meter. Ecology 1971; 52: 125–131. DOI: 10.2307/1934743.

- [10] Muchow RC, Kerven GL. A low cost instrument for measurement of photosynthetically active radiation in field canopies. *Agricultural Meteorology* 1977; 18: 163–239. DOI: 10.1016/0002-1571(77) 90036-
- [11] Woodward FI. Instruments for the measurement of photosynthetically active radiation and red, far-red and blue light. *Journal of Applied Ecology* 1983; 20: 103–115. DOI: 10.2307/2403379.
- [12] Mims FM III. A 5-year study of a new kind of photosynthetically active radiation sensor. *Photochemistry and Photobiology* 2003; 77(1): 30–33. DOI: 10.1562/0031-8655(2003)0770030AYSOAN2.0.CO2.
- [13] Caya MVC, Alcantara JT, Carlos JS, Cereno SSB. Photosynthetically active radiation (par) sensor using an array of light sensors with the integration of data logging for agricultural application. In: 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 377–381. DOI: 10.1109/ ccoms.2018.8463321.
- [14] Yadav D, Sumesh M, Beno T, Karanth S, Sadashivappa G. Design of photosynthetically active radiation sensor. *Examines in Physical Medicine and Rehabilitation* 2018; 1(5). DOI: 10.31031/ epmr.2018.01.000521.
- [15] Rajendran J, Leon-Salas WD, Fan X, Zhang Y, Vizcardo MA, Postigo M. On the development of a low-cost photosynthetically active radiation (par) sensor. In: 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/iscas45731.2020. 9181220.
- [16] McCree K. The measurement of photosynthetically active radiation. *Solar Energy* 1973; 15: 83–87. DOI: 10.1016/0038-092X(73)90010-8.
- [17] Norman JM, Tanner CB, Thurtell GW. Photosynthetic light sensor for measurements in plant canopies. *Agronomy Journal* 1969; 61: 840–843. DOI: 10.2134/agronj1969.00021962006100060004x.
- [18] Ross J, Sulev M. Sources of errors in measurements of PAR. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000; 100: 103–125. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00144-6.
- [19] Barnes C, Tibbitts T, Sager J, Deitzer G, Bubenheim D, Koerner G, et al. Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux. *HortScience* 1993; 28: 1197–1200. DOI: 10.21273/HORTSCI.28.12.1197.
- [20] Biosciences LC. Comparison of quantum sensors with different spectral sensitivities. LI-COR Biosciences Technical Note 2018, Retrived from, Spectral sensors to determine photosynthetic photon flux density 11 *Lighting Res. Technol.* 2022; 0: 1–12 <https://www.licor.com/documents/oi26ib7eb6wm5y5u9ebv4b3jodm09tf9>.
- [21] Blonquist M, Johns J. Accurate PAR measurement: comparison of eight quantum sensor models. Apogee Instruments Research Report 2018, Retrived 20th

August 2021 from, <https://www.apogeeinstruments.com/content/Comparison-of-Eight-Quantum-Sensor-Models.pdf>.

[22] Bäumker E, Zimmermann D, Schierle S, Woias P. A novel approach to obtain PAR with a multi-channel spectral microsensor, suitable for sensor node integration. *Sensors* 2021; 21: 3390. DOI: 10.3390/s21103390.

[23] Leon-Salas WD, Rajendran J, Vizcardo M, Postigo-Malaga M, Postigo-Malaga M. Measuring photosynthetically active radiation with a multichannel integrated spectral sensor: 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, South Korea, May 22–28:2021. DOI:10.1109/iscas51556.2021.9401321.

[24] Hegemann T, Balasus J, Trinh Q, Herzog A, Khanh T. Using spectral sensors to determine photosynthetic photon flux density in daylight – A theoretical approach. *Lighting Research & Technology*. April 2022. doi:10.1177/14771535221077881

[25] AMS. AS7341 11-channel multi-spectral digital sensor. Retrived 20th August 2021 from, https://ams.com/documents/20143/36005/AS7341_DS000504_3-00.pdf.

[26] Vora PL, Farrell JE, Tietz JD, Brainard DH. Digital color cameras - 2 - spectral response. HP Laboratories Technical Report 1997: 97–54.

[27] Hubel PM, Sherman D, Farrell JE. A comparison of methods of sensor spectral sensitivity estimation. HP Laboratories Technical Report 1994: 45–48.

[28] McCamy CS. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. DOI: 10.1002/col.5080170211

[29] CIE. Technical Report 015:2008 Colorimetry. 4th Edition. Vienna: CIE, Central Bureau, 2018. ISBN 978-3-902842-13-8. DOI: 10.25039/TR.015.2018.