

Auswirkung von spektral moduliertem Licht auf die Photosynthese von Pflanzen

Jens Balasus, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract

Für einen profitablen Anbau von Pflanzen in geschlossenen Kultursystemen ist der Einsatz elektrischer Energie zu optimieren. Wesentlich hierfür ist das Erlangen von Kenntnissen über den Zusammenhang zwischen Bestrahlungssituation und Pflanzenwachstum. Als potentiell Maß für die Wachstumsleistung gilt die Photosyntheserate der Pflanze, die durch die Messung der CO₂-Aufnahme eines Blattes ermittelt wird. Von Vorteil ist hierbei, dass Auswirkungen auf die Photosynthese im Gegensatz zum Wachstum direkt messbar sind. Aus diesem Grund wird zunächst der Einfluss von verschiedenen Bestrahlungsspektren auf die Photosyntheserate untersucht.

Das Ergebnis zeigt, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts messbare Auswirkungen auf die Photosyntheserate hat. Um zukünftig den Zusammenhang zwischen Photosyntheserate und Pflanzenwachstum zu untersuchen zeigt der Ausblick, wie hierfür Versuchsstände in weiteren Studien aufgebaut sein können. Mit diesen können verschiedene Wachstumsparameter erfasst, und damit wiederum Korrelationen festgestellt werden.

1 Einleitung

Geschlossene Kultursysteme ermöglichen jahreszeitenunabhängigen, lokalen Gemüseanbau in beständiger Qualität, indem in kontrollierten und reproduzierbaren Umgebungen optimale Bedingungen für Pflanzen geschaffen werden. Sie ermöglichen die genaue Überwachung und Modifikation von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration der Luft, Nährstoffversorgung und Licht. Dies erlaubt eine deutliche Reduktion des Verbrauchs von Wasser und Düngemitteln und den gänzlichen Verzicht auf Pflanzenschutzmittel [1]. Gleichzeitig bedeutet dies einen erhöhten Bedarf an elektrischer Energie für die Bestrahlung mit Kunstlicht [1].

In dieser Untersuchung werden zunächst die Grundlagen der Pflanzenbestrahlung erläutert und anschließend ein Prinzip zur Messung der Photosynthese vorgestellt.



2 Licht und Photosynthese

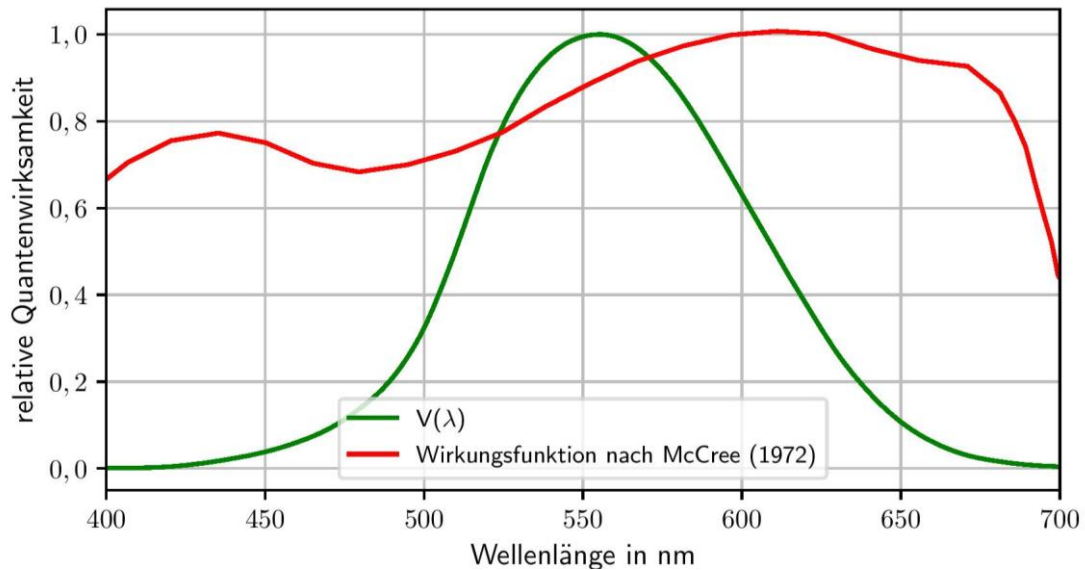


Abbildung 1: $V(\lambda)$ -Kurve und Photosynthese-Wirkungsfunktion nach McCree [2] im Vergleich. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede im kurzwelligen blauen und im langwelligen roten Bereich.

Pflanzen benötigen Photonen um Photosynthese zu Betreiben. Abb. 1 beschreibt die Effizienz der Photosynthese unter Einfluss von monochromatischem Licht. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die Wellenlängen, die für die Photosynthese am wichtigsten sind, durch die $V(\lambda)$ -Kurve sehr schwach gewichtet werden. Die $V(\lambda)$ -Kurve besitzt ihr Maximum bei 555 nm und beschreibt die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges im photopischen Bereich. In diesem Bereich ist die Photosynthese jedoch am ineffizientesten. Eine mit der Hellempfindlichkeit des Auges gewichtete Größe, wie in der Lichttechnik üblich, ist zur Beschreibung von Pflanzenbestrahlung also nicht sinnvoll. Die Verwendung von energetischen Größen ist ebenfalls nicht sinnvoll, da diese nicht berücksichtigt, wie viele Photonen tatsächlich zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund werden photon-basierte Größen verwendet. Eine Umrechnung von lichttechnischen und energetischen in photon-basierte Größen ist möglich, sofern ein Relativspektrum und eine absolute Größe, oder das Absolut Spektrum zur Verfügung stehen. Die Umrechnung erfolgt für diskrete Werte gemäß folgender Formel:

$$X_p = \frac{1}{N_A \cdot h \cdot c} \int \lambda \cdot X_e(\lambda) \cdot d\lambda$$

Hierbei ist N_A die Avogadro Konstante, h das Planck'sche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge, $X_e(\lambda)$ der wellenlängenabhängige Strahlungsfluss und X_p der berechnete Photonenstrom.

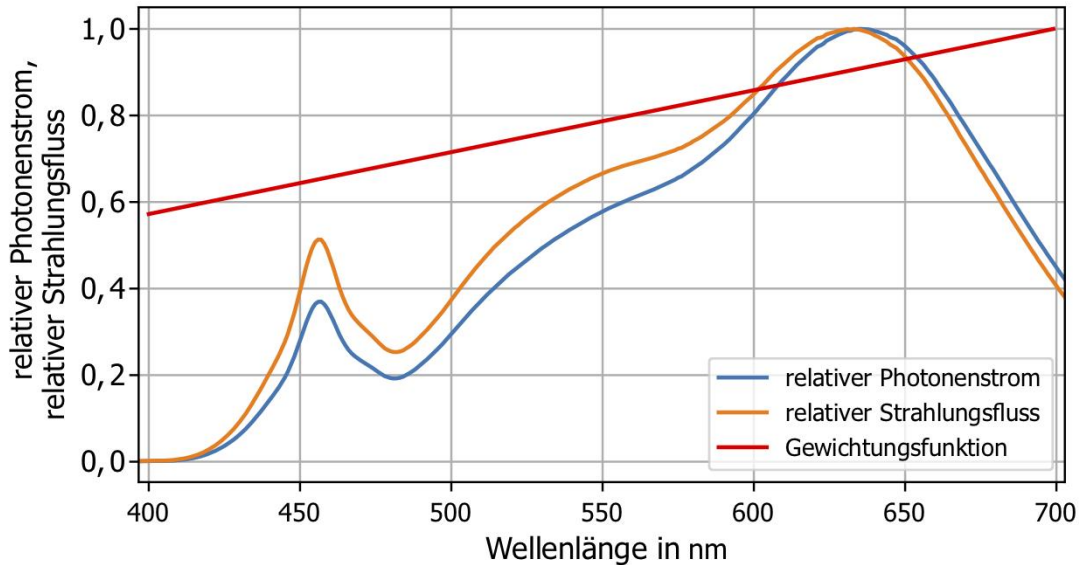


Abbildung 2 relativer Photonenstrom und relativer Strahlungsfluss einer weißen LED im Vergleich. Zu erkennen sind die deutlichen Unterschiede der relativen Verteilung im blauen Bereich.

In Abbildung 2 sind die Gewichtungsfunktion und exemplarisch ein Spektrum des relativen Strahlungsflusses und des relativen Photonenstroms einer weißen LED dargestellt. Hierbei sind, insbesondere im blauen Bereich, deutliche Abweichungen der relativen Verteilung ersichtlich.

3 Messung der Photosynthese

Im Prozess der Photosynthese wandelt die Pflanze Wasser und aufgenommenes Kohlenstoffdioxid unter Abgabe von Sauerstoff in organische Substanzen. Die Aufnahme von CO_2 ist damit ein Maß für die Effizienz der Photosynthese. Diese kann mit einem Gaswechsellmessgerät gemessen werden. In diesem Gerät wird das Blatt einer Pflanze in einer Küvette eingeklemmt, beleuchtet, und mit einem definierten Messgas umströmt. Die Luftfeuchtigkeit, sowie der CO_2 -Gehalt des Messgases werden auf einen eingestellten Wert geregelt. Vor und nach dem Umströmen des Blattes wird der CO_2 -Gehalt des Gases gemessen. Die hierbei auftretende CO_2 -Differenz entspricht der von dem Blatt aufgenommenen CO_2 -Menge. Nach diesem Prinzip ist es nun möglich, die Photosyntheseleistung eines Blattes unter verschiedenen Bestrahlungssituationen zu bestimmen. Das aufgenommene CO_2 , aufgetragen über der Photonenstromdichte, wird hierbei als Lichtantwort beschrieben. Eine mögliche Lichtantwort ist in idealisierter Form in Abbildung 3 dargestellt.

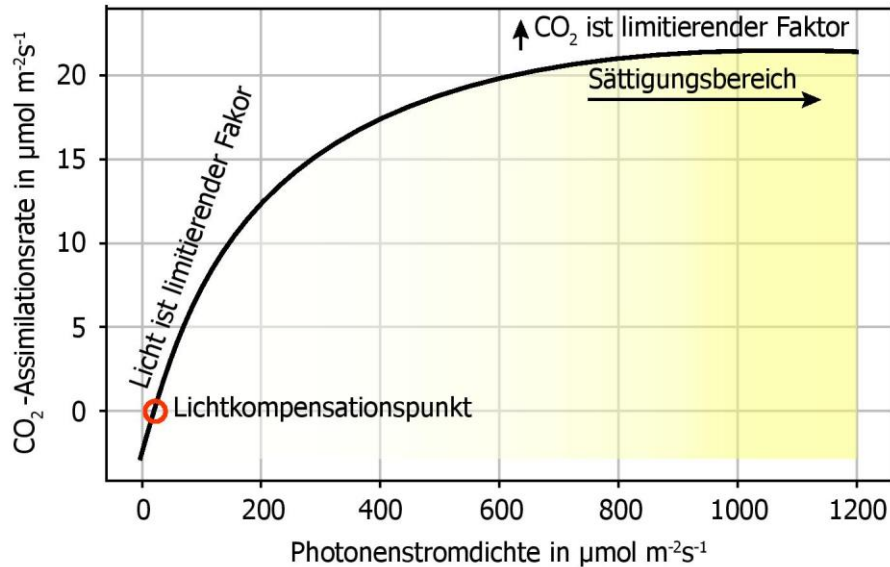


Abbildung 3 exemplarische Lichtantwort mit charakteristischen Punkten.

Es ist grundsätzlich zwischen Brutto- und Nettphotosynthese zu unterscheiden, da auch bei Pflanzen eine Atmung (Dissimilation) stattfindet. Hierbei wird CO₂ abgegeben und O₂ aufgenommen. Aus diesem Grund ist bei Dunkelheit eine negative CO₂-Assimilationsrate zu messen. Wird ein Blatt unter konstanter CO₂-Konzentration der Umgebungsluft gehalten und die Photonenstromdichte schrittweise erhöht, so tritt ein Punkt in Erscheinung, an dem sich die CO₂-Aufnahme und die CO₂-Abgabe kompensieren. Bei Bestrahlung laufen Assimilation und Dissimilation parallel ab. Dementsprechend gibt es einen Punkt, an dem diese gleich groß sind. Dieser in Abbildung 3 eingezeichnete Punkt wird als Lichtkompensationspunkt der Photosynthese bezeichnet. Er gibt an, wie viel Licht erforderlich ist, um CO₂-Verluste durch die Atmung zu kompensieren. Ebenso liefert er Auskunft über die auf lange Sicht zum Überleben der Pflanze erforderliche Photonenmenge. Ein Wachstum findet in diesem Zustand jedoch nicht statt. Wird die Photonenstromdichte über den Lichtkompensationspunkt hinaus erhöht, so steigt auch die Nettphotosynthese an. Die Photosynthese steigt mit dem Photonenstrom an, bis sie in einen Sättigungsbereich gelangt. In diesem Bereich ist trotz Erhöhen der Lichtintensität keine Steigerung der Photosynthese mehr möglich, da die Assimilationsrate der Pflanze durch das zur Verfügung stehende CO₂ limitiert wird. [3]

4 Angepasste Bestrahlungseinheit für das Gaswechsellmessgerät



Abbildung 4 Gaswechsellmessung an dem Blatt einer Spinatpflanze

Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Lichtantwort kann mit einem Gaswechsellmessgerät gemessen werden. Dieses ist herstellerseitig mit einer Leuchte ausgestattet, die ein konstantes LED-Spektrum besitzt. Hierbei kann lediglich die Intensität variiert werden, jedoch nicht die spektrale Zusammensetzung des Lichtes. Aus diesem Grund wird eine neue Leuchte inklusive einer Ansteuerelektronik aufgebaut, die darüber hinaus eine Variation der spektralen Zusammensetzung erlaubt. Zusätzlich lässt sich diese mit der Messsoftware des Herstellers ansteuern und erlaubt daher die automatisierte Messung beliebiger Bestrahlungssituationen. Die aufgebaute Bestrahlungseinheit besteht aus 450 nm und 660 nm LEDs. Bei maximaler Bestromung kann somit eine Photonenstromdichte von $1800 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$ bzw. $1750 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$ erreicht werden. Die Photonenstromdichte an einem unbewölkten Sommertag beträgt im Freiland ca. $2000 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$. Die Bestrahlungseinheit auf der Küvette mit dem eingespannten Blatt einer Spinatpflanze ist in Abbildung 4 dargestellt.

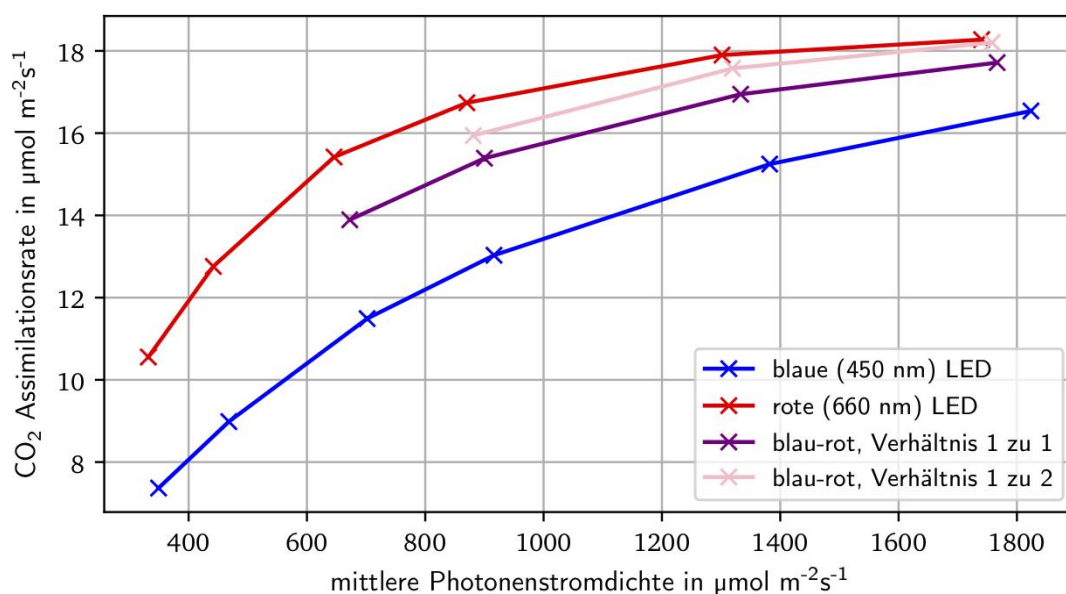


Abbildung 5 Lichtantworten eines Spinatblattes bei Bestrahlung mit verschiedenen blau/roten LED-Spektren.

Mit der neu gebauten Bestrahlungseinheit werden verschiedene spektrale Verhältnisse eingestellt und die CO₂ Aufnahme des Blattes einer zwei Wochen alten Spinatpflanze gemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei der Messung wird jeweils mit der höchsten Intensität gestartet und das Blatt mit dieser für 20 Minuten beleuchtet. Im Anschluss werden drei Messungen der CO₂ Aufnahme durchgeführt und diese gemittelt. Anschließend wird die Intensität auf die nächstniedrigere Intensitätsstufe gestellt und das Blatt für vier Minuten beleuchtet. Daraufhin erfolgt die Messwertaufnahme. Diese Reihe wird fortgesetzt, bis die Messung bei der niedrigsten Photonenstromdichte abgeschlossen ist. In Vorversuchen zeigte sich bei der Erstbestrahlung mit maximaler Intensität eine Stabilisierung des Messwertes nach 20 Minuten. Bei einer nachfolgenden Bestrahlung mit geringerer Intensität betrug die Adaptationszeit lediglich vier Minuten.

In dem Experiment wird zunächst eine Lichtantwort mit der roten 660 nm-LED aufgenommen, im Anschluss daran eine Lichtantwort mit der blauen 450 nm-LED. Schließlich werden beide LEDs gleichzeitig mit unterschiedlichen Verhältnissen aktiviert. Emitieren sowohl die blaue als auch die rote LED die gleiche Anzahl an Photonen, so beträgt das Verhältnis 1:1. Zusätzlich wird das Verhältnis 1:2 eingestellt. Die höchste Assimilationsrate wird bei Bestrahlung mit ausschließlich rotem Licht erzielt. Jedoch erreicht auch eine Bestrahlung mit blauen und roten LEDs im Verhältnis von 1:2 die gleiche Assimilationsrate, bei entsprechend hoher Intensität. Die niedrigste Rate erreicht eine Bestrahlung mit ausschließlich blauem Licht.

Das Experiment zeigt, dass der neu entwickelte Aufbau geeignet ist, um spektrale Einflüsse auf die Photosyntheserate zu untersuchen. Es kann damit zukünftig in weiteren Untersuchungen eine Vorauswahl von Spektren für Wachstumsversuche getroffen werden. Die Spektren, welche die höchste Photosyntheserate bewirken, müssen in jedem Fall in einem Wachstumsversuch auf ihre Langzeitwirkung überprüft werden, da durch das Licht neben der Assimilationsrate weitere wichtige Prozesse der Pflanze gesteuert werden.

5 Konzept zur Optimierung von Bestrahlungsspektren mittels Wachstumsversuchen

Neben der Photosynthese wirkt Licht auch auf Photorezeptoren von Pflanzen und beeinflusst diese dadurch in ihrer Entwicklung. Die bisherige Untersuchung betrachtete lediglich die Wirkung der Photosynthese an einem definierten Blattausschnitt. Bildet eine Pflanze jedoch unter einer Bestrahlungssituation besonders große Blätter aus, so wirkt sich dies auf die absolute CO₂-Assimilation der ganzen Pflanze aus. Diese Effekte müssen für eine Optimierung ebenfalls berücksichtigt werden. Deshalb fließt deren messtechnische Bestimmung in das Versuchskonzept mit ein.

Zur Optimierung der Bestrahlung ist es erforderlich, neben der Photosynthese weitere Parameter zu erfassen. Einen geeigneten Parameter stellt die projizierte Blattfläche der Pflanze dar, welche ein Maß für die CO₂-Assimilation der gesamten Pflanze ist.

Diese kann mit einer Kamera erfasst werden. Neben der projizierten Blattfläche wird auch das Gewicht der Pflanzen kontinuierlich erfasst. Damit ist es möglich, auch Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit zwischen verschiedenen Versuchsgruppen zu detektieren. Die Messung mehrerer Größen in zeitlichen Abständen von einer Stunde erlaubt gegenüber herkömmlichen Wachstumsversuchen, bei denen die Pflanzen nach einer bestimmten Zeitdauer abgeerntet werden, einen gesteigerten Erkenntnisgewinn. So ist es auch möglich, während des Versuchs die Bestrahlungssituation zu ändern und zu messen, nach welcher Zeit dies Auswirkungen auf das Wachstum der Pflanzen hat.

Zukünftig werden Wachstumskammern gebaut, um parallel mehrere Versuche durchführen zu können. Die bereits genannte Messtechnik wird in diesen Kammern integriert. Damit kann eine umfassende Optimierung des Bestrahlungsspektrums erfolgen. Durch die Vielzahl der erfassten Parameter und der gegenüber konventionellen Versuchen erhöhten Datenlage soll zudem überprüft werden, ob eine Optimierung der Bestrahlung mittels künstlicher Intelligenz möglich ist.

6 Fazit und Ausblick

Die bisherige Untersuchung zeigt, dass mit dem aufgebauten System die Auswirkung verschiedener Bestrahlungssituationen auf die Photosynthese gemessen werden kann. Dies stellt eine wichtige Basis zur weiteren Erforschung von Licht auf Pflanzen dar. Die aufgebaute Leuchte inklusive deren Ansteuerelektronik sind so gestaltet, dass diese zukünftig auch mit weiteren LED-Spektren ergänzt werden können. Damit ist es möglich, vielfältige LED-Spektren in ihrer Wirkung auf die Photosynthese zu untersuchen. Die Messung der Assimilationsrate kann in vergleichsweise kurzer Zeit von ca. 40 Minuten erfolgen. Verglichen mit einem Wachstumsversuch, der im Fall von Spinatpflanzen ca. 2 Wochen benötigt, können hierbei innerhalb kurzer Zeit potentiell geeignete Spektren erarbeitet werden. Mit diesen sind anschließend Wachstumsversuche über einen längeren Zeitraum durchzuführen um auch die physiologischen Auswirkungen des Lichtes auf die Pflanzen zu untersuchen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] T. Kozai, Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms, Springer Singapore, 2018.
- [2] K. J. McCree, „The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants,“ *Agricultural Meteorology*, Bd. 9, pp. 191-216, 1971.

[3] P. Schopfer und A. Brennicke, Pflanzenphysiologie, 7. Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.