

Optische Blatteigenschaften zur Verwendung in virtuellen Pflanzenmodellen

Jens Balasus, M.Sc., Tim Hegemann, M.Sc., Prof. Tran Quoc Khanh

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

Zusammenfassung

Für eine jahreszeitenunabhängige Kultur von Pflanzen ist in Deutschland eine künstliche Belichtung der Pflanzen unabdingbar. Einher geht diese mit erheblichen Aufwendungen an elektrischer Energie. Eine Reduzierung des Energieeinsatzes, beispielsweise durch eine Optimierung der Belichtungsspektren ist entsprechend wünschenswert. Bisher werden solche Optimierungen in Wachstumsstudien mit realen Pflanzen durchgeführt. Eine andere Möglichkeit ist eine Eruiierung des Optimierungspotentials mittels Computermodellen.

Mit Hilfe von virtuellen Pflanzenmodellen kann die Lichtverteilung, sowohl spektral als auch integral, innerhalb von Pflanzen in verschiedenen Blattebenen simuliert werden. Dies ermöglicht eine Analyse der von Pflanzenleuchten erzeugten Spektren und Lichtverteilungen. Eine Erprobung von Lichtrezepten in Abhängigkeit des Wachstumsstadiums kann ebenfalls durch verschiedene Pflanzenstadien erfolgen.

Die Aussagefähigkeit solcher Simulationen wird durch die Wahl der optischen Blattparameter beeinflusst. Für eine genaue Simulation werden sowohl spektrale Reflexions- als auch Transmissionseigenschaften der Blätter benötigt. Diese müssen für die adaxiale, als auch für die abaxiale Blattseite ermittelt werden. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Messung und der Analyse der spektralen Reflexionseigenschaften.

Index Terms: Light Simulation, BRDF, Reflectance, Plant Simulation

1 Einleitung

Seit mehr als 10 Jahren werden konventionelle Lichtquellen in Straßen-, Raum- und Kfz-Beleuchtung durch energiesparende LED-Lösungen erfolgreich ersetzt, da diese eine vielfach höhere Lichtausbeute besitzen. In der Pflanzenbelichtung wird die Photonenausbeute als Maß der Energieeffizienz herangezogen. Diese ist bei modernen LED-Pflanzenleuchten deutlich höher als bei den konventionellen Natriumdampfhochdruckleuchten. Neben einer höheren Photonenausbeute geht die Einführung der LED mit vielen technischen Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich spektraler Abstrahlcharakteristik einher. Seit Einführung der LED in der



Pflanzenbelichtung stellt sich insbesondere die Frage nach einem optimierten Belichtungsspektrum. Neue Ansätze verwenden virtuelle Pflanzenmodelle um die Auswirkungen verschiedener Leuchtenkonfigurationen auf die Photosynthese von Pflanzen zu simulieren [1]. Im Hinblick auf einen stark reduzierten Versuchsaufwand stellen solche Simulationen ein hilfreiches Werkzeug dar.

Die Basis der lichttechnischen Simulation stellt eine entsprechend genaue Abbildung der optischen Eigenschaften der Pflanzenbestandteile dar. Mit Hilfe von Ray-Tracing Verfahren können diese genutzt werden um Lichtverteilungen auf und in der Pflanze zu simulieren. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der richtungsabhängigen Messung dieser optischen Eigenschaften und stellt exemplarisch die Eigenschaften zweier Blätter dar.

2 Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)

Die Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (engl. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF)), definiert nach [2], beschreibt das Verhältnis der von aus einer bestimmten Richtung einfallenden Lichts erzeugten Bestrahlungsstärke auf einer Oberfläche und der in eine bestimmte Richtung reflektierten Strahldichte. Die BRDF kann wie folgt berechnet werden:

$$BRDF(\vartheta_e, \varphi_e, \vartheta_r, \varphi_r) = \frac{dL_{e,r}(\vartheta_r, \varphi_r)}{dE_{e,e}(\vartheta_e, \varphi_e)} \quad (1)$$

Der Winkel ϑ beschreibt den Azimutwinkel des einfallenden/reflektierten Lichts, bezogen auf die Flächennormale des betrachteten Flächenelements. Der Winkel φ beschreibt den Polarwinkel zwischen der Flächennormale und dem einfallenden/reflektierten Licht. Die Indizes e und r kennzeichnen das einfallende von dem reflektierten Licht. Die Berechnung der BRDF der entsprechenden Einfalls- und Ausfallswinkel erfolgt durch Bildung des Verhältnisses zwischen einfallender Bestrahlungsstärke und im Beobachtungspunkt auf dem Flächenelement gemessener Strahldichte. Aus Formel 1 geht hervor, dass eine ideal diffus streuende Oberfläche eine konstante BRDF in sämtliche Richtungen aufgrund der konstanten Leuchtdichte aufweist.

Die Reaktionen von Pflanzen auf verschiedene spektrale Zusammensetzungen von Licht sind vielfältig, weswegen die Reflexionseigenschaften in dieser Arbeit spektral abhängig untersucht werden. Die entsprechenden Größen $L_{e,r}$ und $E_{e,e}$ werden daher spektral gemessen. Zudem wird zur weiteren Verarbeitung aus der Strahldichte die Strahlstärke berechnet. Dies ermöglicht eine einfachere Implementierung der gewonnenen Daten in die Simulationssoftware.

3 Messung der spektralen BRDF

Die Messung der vollständigen BRDF ist aufgrund der vielen Winkel mit einem enormen Messaufwand verbunden. Der verwendete Messaufbau besteht aus einem rotierbarem Probenhalter, rotierbarem Arm mit Lichtquelle und einem Spektralradiometer. Eine Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt. Mit diesem Aufbau können die Polarwinkel, nicht jedoch die Azimutwinkel variiert werden.

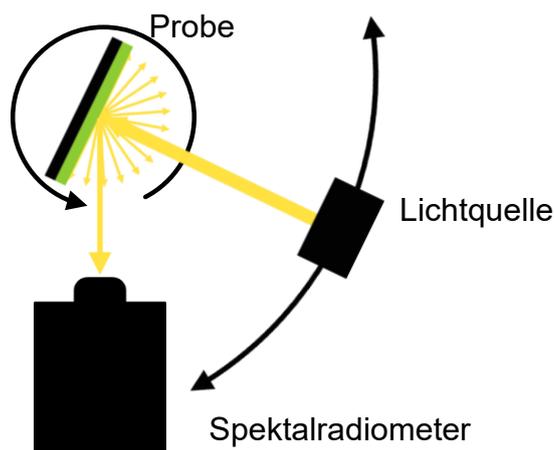


Abbildung 1 Messaufbau, mit rotierbarer Lichtquelle, rotierbarem Probenhalter und Spektralradiometer

Der Abstand zwischen Lichtquelle und Probe ist variabel um, je nach verwendeter Lichtquelle, die photometrische Grenzentfernung einhalten zu können. In dieser Arbeit wird eine Lichtquelle, bestehend aus warmweißen LEDs mit einem CRI von 95, sowie quasi monochromatischen 730 nm LEDs verwendet. Der Bereich um 730 nm ist für Pflanzen von besonderem Interesse, weswegen in diesem ausreichend Strahlung zur Verfügung stehen soll. Die Lichtquelle ist ringförmig aufgebaut, wodurch auch die Reflexion bei einem 0° Einfallswinkel gemessen werden kann. Einher geht dieser ringförmige Aufbau jedoch mit einem Fehler der durch weniger kohärentes einfallendes Licht verursacht wird. Das Spektrum der verwendeten Lichtquelle ist in Abbildung 2 dargestellt.

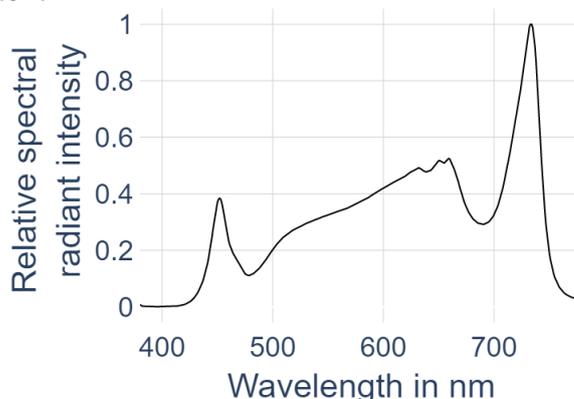


Abbildung 2 Relatives Spektrum der verwendeten Lichtquelle

Zur Berechnung der BRDF erfolgt initial eine Messung der Bestrahlungsstärke. Hierzu wird in 0° Position mit einem Weißstandard als Probe die Strahldichte gemessen und daraus die Bestrahlungsstärke berechnet.

Der Messaufbau fährt die programmierbaren Messwinkel automatisiert ab und speichert die gemessenen Spektren für die weitere Auswertung. Variiert wird in den Messungen der Lichteinfallswinkel, sowie der Messwinkel, wobei der Messwinkel üblicherweise höher aufgelöst gewählt wird.

In der Auswertung erfolgt die Berechnung der spektralen Reflexionsverteilung bei einem konstanten Azimutwinkel aus den gemessenen Spektren.

4 Spektrale Reflexionsverteilung eines Weißstandards

Um die Funktionsfähigkeit des Aufbaus zu verifizieren, wird zunächst die Reflexionsverteilung eines Weißstandards bestimmt. Dieser wird unter einem

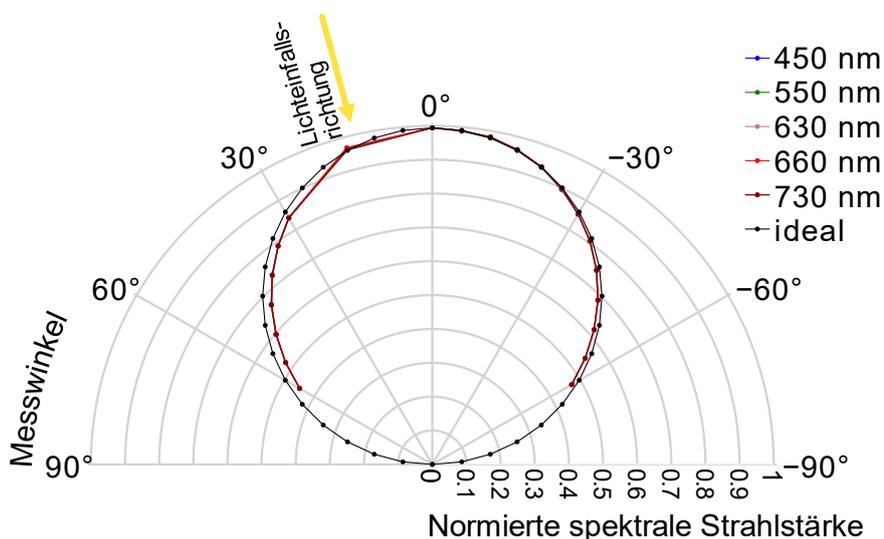


Abbildung 3 Spektrale Reflexionsverteilung eines Weißstandards

Lichteinfallswinkel von 15° und Messwinkeln zwischen -60° und 60° in Schritten von 5° vermessen. Eine Lücke an Messwerten entsteht hierbei in einem Bereich von $\pm 10^\circ$ um die Lichtquelle, da diese in dem Bereich die Probe verdeckt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 für verschiedene Wellenlängen dargestellt. Normiert sind die jeweiligen

Verteilungen auf ihren Maximalwert. Zu erkennen ist dabei, dass bei allen dargestellten Wellenlängen die ideal diffus gestreute Reflexion näherungsweise erreicht wird.

Die gemessene spektrale Strahldichte dient der Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e,e}$ um die Reflexion für die weiteren Messungen berechnen zu können.

5 Spektrale Reflexionsverteilung von Pflanzen

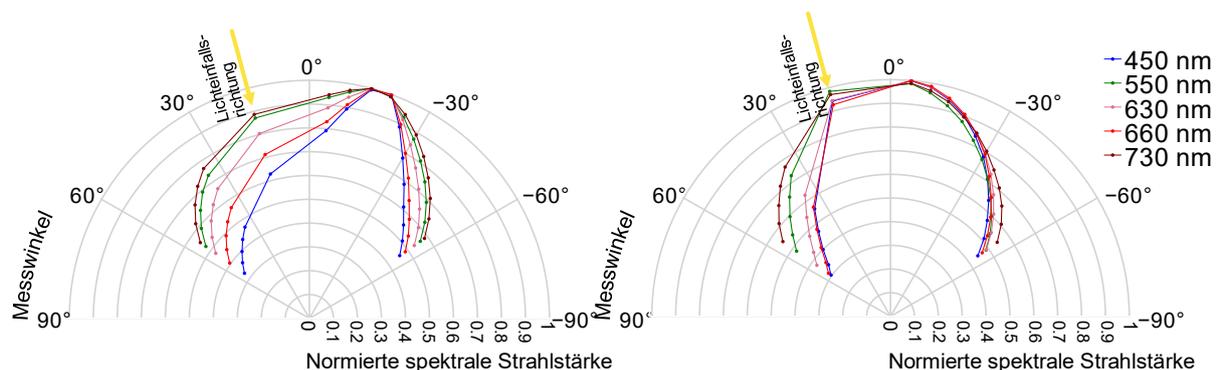


Abbildung 4 Gemessene winkelabhängige Reflexion bei einem Lichteinfallswinkel von 15° eines Maisblattes (links) und eines Salatblattes (rechts), normiert ist auf die jeweiligen Maximalwerte im jeweiligen Wellenlängenbereich

Nach der Charakterisierung des Messaufbaus werden erste Messungen an realen Blättern durchgeführt. Hierbei wird ein Maisblatt, sowie ein Salatblatt von der Pflanze abgetrennt und in den Aufbau eingespannt. Die Vermessung erfolgt unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln zwischen -60° und 60° in Schritten von 15° und Messwinkeln in einem Bereich von -55° bis 55° in Schritten von 5° . Aufgrund der Abdeckung durch die Lichtquelle wird ein Bereich von $\pm 10^\circ$ um den Lichteinfallswinkel ausgespart. In Abbildung 4 sind die Messergebnisse exemplarisch für eine Blattprobe dargestellt. Zur Bewahrung der Übersichtlichkeit wird die Ansicht auf fünf Wellenlängen beschränkt. Die ausgewählten Wellenlängen befinden sich in den Effizienzmaxima der Photosynthese (450 nm, 630 nm und 660 nm), die gleichzeitig auch den gängigen Spitzenwellenlängen der in der Pflanzenbelichtung eingesetzten LEDs entsprechen. Physiologisch besonders interessant ist auch der Wellenlängenbereich um 730 nm, der ebenfalls gezielt mit LEDs angesprochen werden kann. Die höchste Reflexion tritt bekanntlich in dem Bereich um 550 nm auf, weswegen dieser ebenfalls zu Vergleichszwecken dargestellt ist. Die dargestellten Daten erheben keinen Anspruch repräsentativ für die jeweilige Art zu sein und sollen viel mehr mögliche Unterschiede aufzeigen, die in weiteren Studien noch zu verifizieren und zu verallgemeinern sind.

In den Messdaten des Maisblattes ist in allen Wellenlängenbereichen ein gerichteter Anteil zu erkennen. Am stärksten ist dieser bei 450 nm und 660 nm ausgeprägt. Den

größten diffusen Anteil weist die Verteilung im Bereich von 730 nm und 550 nm. Die Messung bei 630 nm befindet sich dazwischen.

Im Gegensatz zu dem Maisblatt sind in den Reflexionsverteilungen des Salatblattes kaum gerichtete Anteile zu erkennen. Hier lässt sich jedoch ebenfalls die Tendenz erkennen, dass Licht bei 450 nm und 660 nm weniger diffus reflektiert wird. Die Reflexion bei 730 nm weist auch bei diesem Blatt die stärkste diffuse Reflexion auf, gefolgt von der bei 550 nm. Die Messung bei 630 nm befindet sich ebenfalls dazwischen.

6 Diskussion und Ausblick

Wie zu erwarten, können keine spektralen und messwinkelabhängigen Unterschiede bei der Vermessung des Weißstandards festgestellt werden. Hingegen sind bei den Vermessungen der beiden exemplarischen Blättern Unterschiede, sowohl in spektraler, als auch in messwinkelabhängiger Hinsicht feststellbar. Insbesondere das Licht bei 450 nm und 660 nm weist in beiden Fällen gerichteterere Eigenschaften im Vergleich zu den anderen Wellenlängen auf. Interessanterweise fallen diese beiden Bereiche mit den Effizienzmaxima der Photosynthese zusammen. Bei 730 nm ist in beiden Fällen der höchste Anteil an gestreuter Reflexion feststellbar. Sehr ähnlich verhält sich auch die Reflexion bei 550 nm. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits von Bousquet et al. [3] bei Messungen mit Blättern von verschiedenen Laubbäumen festgestellt.

Der Vergleich zeigt, dass Unterschiede in der richtungsabhängigen spektralen Reflexion von verschiedenen Pflanzen existieren und diese mit dem Messaufbau messbar sind. Dies bildet die Basis für zukünftige Untersuchungen. Hierin sollen verschiedene Anbaupflanzen hinsichtlich dieser Eigenschaften charakterisiert werden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können dann in optische Simulationsmodelle für Pflanzen einfließen und helfen die Lichtwirkungen zu simulieren.

Offene Fragen stellen sich in der Anzahl der zu vermessenden Blätter und in Abhängigkeit von deren Alter, bzw. Position innerhalb der Pflanze. Zusätzlich ist zu klären, inwieweit sich eine längere Messzeit von, je nach gewünschter Genauigkeit, mehreren Stunden auf die Eigenschaften der Blätter auswirkt. Für eine vollumfängliche Charakterisierung ist zudem neben der Reflexion auch die Transmission zu messen. Da Vorder- und Rückseite von Blättern unterschiedliche Strukturen aufweisen sind alle Messungen für beide Seiten durchzuführen.

Langfristig können die so gewonnenen Daten verwendet werden um in Kombination mit 3D-Modellen und Photosynthese-Modellen eine Optimierung von Pflanzenleuchten zu ermöglichen.

7 Quellen

[1] Kim J, Kang WH, Son JE. Interpretation and Evaluation of Electrical Lighting in Plant Factories with Ray-Tracing Simulation and 3D Plant Modeling. *Agronomy*. 2020; 10(10):1545. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101545>

[2] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. 1992. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *Radiometry*. Jones and Bartlett Publishers, Inc., USA, 94–145.

[3] Bousquet, L., Lachérade, S., Jacquemoud, S., & Moya, I. (2005). Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote Sensing of Environment*, 98, 201-211.