

Erforschung der Veränderung der spektralen Reflektion von Blättern aufgrund verschiedener biochemischer

Inhaltsstoffe

Felix Wirth, Prof. Tran Quoc Khanh

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

Zusammenfassung

Die Forschung im Pflanzenanbau zeigt, dass die Lichtqualität eine entscheidende Rolle im Wachstum und Entwicklung spielt. [1] LED-Belichtungssysteme ermöglichen durch gezielte Anpassungen in Lichtintensität-, -dauer und -spektrum die physiologischen Prozesse wie Photosynthese, Blühzeitpunkt, Pflanzenarchitektur sowie Schutz gegen abiotischen und biotischen Stress, sowie die Anteile an Photopigmenten zu optimieren. [2] [3] Photopigmente wie Chlorophyll, Anthocyane und Carotinoide sind dabei von zentraler Bedeutung, da sie an der Photosynthese und Stressresilienzreaktionen sowie Aufbau und Schutz von Photosystemen beteiligt sind. Durch Kombinationen von Wellenlängen können artenspezifisch große Veränderungen hervorgerufen werden. [4] Zur quantitativen Analyse dieser Veränderungen wird das PROSPECT-D-Modell eingesetzt, welche die optischen Eigenschaften von Pflanzenblättern aufgrund von Veränderungen der Inhaltsstoffe simuliert. Mit Hilfe der erhaltenen Reflektionsgraden können unter Betrachtung der Normlichtart D65 die Farbveränderungen bewertet werden. Für Veränderung in Chlorophyll und Carotinoide lassen sich für Basilikum sichtbare Unterschiede erkennen, während Anthocyaninkonzentrationsveränderung nur minimale Farbverschiebungen hervorruft.

Index Terms: Basilikum, Horticulture, Prospect-D, Spektrale Lichtqualität, Chlorophyll

1 Einleitung

Basilikum, Salat, Tomaten, Gurken und Minze sind in der Horticulture-Forschung gut untersucht, da sie weltweit bedeutende Nutzpflanzen mit hoher wirtschaftlicher und ernährungsphysiologischer Relevanz sind. [5] Basilikum (*Ocimum basilicum* L.) ist im Vergleich relativ einfach anzubauen und eignet sich für den Gewächshausanbau, auch als CEA (Controlled Environment Agriculture), bezeichnet. [6]

Die Wirkung des Lichts ist ein Faktor für die Pflanzenarchitektur sowie die Nahrungseigenschaften. Moderne LED-Beleuchtungssysteme bieten die Möglichkeit präzise Steuerung des Lichts in Form der Lichtintensität, -dauer und -qualität



vorzunehmen. [1] Ein Ziel der Forschung sind dabei Lichtrezepte für effiziente Steuerung der Phytonährstoffgehalte unter Berücksichtigung von CO₂-Fußabdruck und Kosteneffizienz. Die Lichtrezepte zielen ab die Photosynthese, den Blühzeitpunkt [2], die Pflanzenarchitektur, die Resistenz gegen abiotischen und biotischen Stress, sowie die sekundären Metaboliten und die Konzentration von Photopigmenten zu optimieren. Als Photopigmente werden die Molekülkategorien Chlorophyll, Anthocyane und Carotinoide bezeichnet. Chlorophyll ist an der Photosynthese, die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie, beteiligt. Die Anthocyane besitzen eine schützende Funktion und sind an der Photosynthese und der Reaktion auf Stress beteiligt. Die Carotinoide unterstützen den Aufbau und den Schutz von Photosystemen. Die gezielte Stimulierung dieser Photopigmenten kann durch Emission unterschiedlicher Wellenlängen durch moderne Belichtungssysteme in Form von Kombinationen an Blau, rot, grün, fern rot und UV erreicht werden. [3] Die Quantifizierung der Effekte ist dabei Spezies abhängig. [3] Im nachfolgendem Kapitel wird deswegen eine kurze Literaturzusammenfassung über Basilikum gegeben.

2 Einfluss von Lichtspektren auf Pigmentkonzentration in Basilikum

Das photosynthese wirksame Lichtspektrum umfasst die Bereiche von 400-700nm PAR bzw. 400-750nm ePAR. [7] Die Bereiche im UV und Infrarot Bereiche können darüber hinaus für die Anreicherung für Sekundärmetaboliten sowie für die Manipulation der Pflanzenarchitektur und Fruchtreifungsprozesse eingesetzt werden. Im Allgemeinen fördert der rote Wellenlängenbereich (610-760nm) die Biomasseakkumulation, die Stängelverlängerung und die Blattexpansion. [8]

Der blaue Bereiche (400-500nm) dagegen ist an der Produktion von Chlorophyll beteiligt, der Blätteröffnung und der Öffnung der Stomata. Beide Wellenlängenbereiche tragen hauptsächlich zur Photosynthese bei. Der Grüne Bereiche hat geringeren Einfluss auf die Photosynthese und Photomorphogenese aber eine größere Tendenz, das untere Kronendach zu durchdringen und die Blätter bei der Photosynthese und Kohlenstoffassimilation zu unterstützen. Der Ultraviolette Bereich unterstützt darüber hinaus die Akkumulation von Sekundärmetaboliten wie Antioxidantien. Gelbe (570-590nm) und Orange (590-610nm) Wellenlängenbereiche konnten positiven Einfluss auf Früchte zeigen. Dieser Effekte sowie die Veränderungen der Pflanzenmorphologie ist ebenfalls für den Fernroten Bereich gezeigt wurden. [8]

In dieser Studie wird exemplarisch Basilikum als Referenzpflanze genutzt. Bei der Betrachtung der Literatur wird die Analyse auf die Photopigmentveränderungen bei Chlorophyll (Chl), Carotinoiden (Car) und Anthocyaninen (Anth) in Basilikum unter dem Einfluss verschiedener emittierter Wellenlängen beschränkt, da diese maßgeblich an der Farberscheinung des Blattes beteiligt sind. Ein Fokus wird dabei auf die Quantifizierung der Pigmentveränderung gelegt.

Ciurli (2023) untersuchte die Auswirkungen von UVA-Bestrahlung im Bereich von 280-320 nm auf die Pigmentkonzentrationen in Basilikum. Es wurde festgestellt, dass sowohl der Gesamtchlorophyllgehalt (TCC) als auch die Carotinoidkonzentration

unter UVA-Behandlung abnehmen. Nach 11 Tagen erreichte der Gehalt an Chlorophyll a&b sowie Carotinoiden ihr Minimum, bevor sie nach 22 Tagen wieder leicht anstiegen, jedoch weiterhin unter den Werten ohne UVB-Behandlung lagen. Die Chlorophyll a-Konzentration variierte von 0.15 bis 0.65 mg/g per FW, Chlorophyll b von 0,2 bis 0,4 mg/g und Carotinoide von 0 bis 0,1 mg/g per FW. [9]

Brazaitytė (2014) stellte fest, dass unterschiedliche UVA-Wellenlängen (360-402 nm) keine signifikante Auswirkung auf die Chlorophyllkonzentration in Basilikum haben. Es zeigte sich jedoch, dass eine Erhöhung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) zu einer höheren Anthocyankonzentration führt, während die Chlorophyllkonzentration unverändert bleibt. Die Anthocyaninkonzentration reichte von 0,4 bis 0,93 mg/g, mit einem Anstieg des Chlorophyllindex um den Faktor 1,18. [10]

Vaštakaitė (2015b) untersuchte die Wirkung von Licht im Bereich von 390 nm und stellte eine Verringerung der Anthocyan-Konzentration in Basilikum fest. [10]

Im Vergleich dazu führte Blaulicht (447 nm) laut Vaštakaitė (2015) zu einer Zunahme der Anthocyan-Konzentration um 42,5 %, von 0,8 mg/g auf 1,14 mg/g per Frischgewicht (FW). [11]

Chutimanukul (2022) zeigte, dass die Anthocyankonzentration bei Bestrahlung mit verschiedenen Lichtverhältnissen im Bereich von 600-700 nm und 400-500 nm signifikant erhöht wird. Die höchste Konzentration wurde bei einem Verhältnis von 3:1 von Rot zu Blau erreicht, mit einer Erhöhung um den Faktor 1,8. [12]

Haddaji (2023) legt dar, dass die Kombination von blauem (450-470 nm) und rotem Licht (620-700 nm) sowohl den Chlorophyll- als auch den Carotinoidgehalt in Basilikum erhöhte. Die Chlorophyllkonzentration stieg von 2.3 auf 2,9 mg/g FW, während die Carotinoide von 0,023 auf 0,052 mg/g FW anstiegen. [4]

Samuolienė (2016) zeigte, dass der Carotinoidgehalt unter Licht im Bereich von 638 nm und in Kombinationen von Blau, Rot (638 nm, 665 nm) und Fernrot (731 nm) signifikant erhöht wurde, mit einer Steigerung von 33,65 µg/g FW auf 60 µg/g FW. [13]

Lobiuc (2017) untersuchte die Auswirkungen unterschiedlicher Rot-Blau-Verhältnisse bei 440 nm und 640 nm auf die Konzentrationen von Chlorophyll, Carotinoiden und Anthocyanen. Es wurde festgestellt, dass alle drei Pigmente bei variierendem Anteil von Rot und Blau erhöht wurden. Chlorophyll stieg von 0,77 mg/g auf 1 mg/g, Carotinoide von 0,1 mg/g auf 0,15 mg/g und Anthocyane von 1,44 mg/g auf 2,45 mg/g per FW. [14]

Hikosaka (2021) stellte fest, dass Carotinoide unter einem Verhältnis von 1:4 Rot zu Blau signifikant erhöht wurden. Die Effektgröße lag zwischen 0,6 und 1,3 mg/g Trockengewicht (DW). [15]

Diese Ergebnisse, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind, verdeutlichen, dass unterschiedliche Wellenlängen die Photopigmentkonzentrationen in Basilikum beeinflussen. Die Quantifizierung der Effektgröße bietet die Grundlage für eine mögliche Veränderung des spektralen Reflexionsgrades von Basilikumblättern mit veränderten Pigmentanteilen bieten.

| Author | Wellenlänge | Erkenntnis | Quantifizierung |
|-------------------------|---------------------------------------|---|--|
| Ciurli, 2023 [9] | 280-320nm | Abnahme von TCC und Carotinoiden unter UVA, Erntezeit relevant, nach 11Tagen d Minimum des Gehalts, nach 22T Anstieg im Vergleich zu 11T, aber immer noch niedriger als ohne UVB-Behandlung | Chlorophyll a: 15 bis 65mg/g; Chlorophyll b 0,2 - 0,4 mg/g; Carotinoide 0 - 0,1 mg/g |
| Brazaitytė, 2014 [10] | 360-402nm | Keine Auswirkung auf Basilikum für Chlorophyll bei verschiedenen UVA-Wellenlängen, PPFd Erhöhung führt zu höherem Anthocyan-Konzentration in Basilikum verringert | Anthocianin 0.4-0.93mg/g, Chl Index + 1,18 |
| Vaštakaitė, 2015b [16] | 390nm | Anthocyan-Konzentration in Basilikum verringert | 1 mg/g auf 0.7 mg/g per FW |
| Vaštakaitė, 2015 [11] | 447 nm | Zunahme von Anthocyan unter blauem Licht | Anstieg um 42,5% von 0,8 mg/g auf 1,14 mg/g per FW |
| Chutimanukul, 2022 [12] | 600-700nm, 400-500nm, 500-600nm | Anthocyan-Konzentration erhöht, | max. in : 3R:1B, Erhöhung von Faktor 1.8 |
| Haddaji, 2023 [4] | 450-470nm, 620-700nm | Erhöhung des Chlorophyll- und Carotinoidgehalts unter rotem und blauem Licht | 2.6-2.9 Chl mg/g per FW, 0,023 -0.052 mg/g per FW |
| Samuolienė, 2016 [13] | 447nm, 638nm, 731nm, 665nm | Carotinoidgehalt erhöht unter R638 und Kombination von B,R638,R665,FR1 | 33,65ug/g per FW - 60ug/g per FW |
| Lobiuc, 2017 [14] | 440nm, 640nm | Chl, Car und Anth erhöht unter verschiedenen Anteil an R:B | Chl: 0,77mg/g - 1 mg/g Car: 0,1 mg/g - 0,15 mg/g Anth: 1,44mg/g - 2,45mg/g |
| Hikosaka, 2021 | 400-500nm, 600-700nm | Car erhöht unter R:B 1:4 | Effektgröße von 0,6 - 1.3mg/g DW |

Tabelle 1 Die Tabelle zeigt den Einfluss unterschiedlicher Wellenlängen auf die Photopigmentanteile in Basilikum. Betrachtetn wurde Effekte auf Chlorophyll (Chl), Anthocyane (Ant) und Carotinoide (Car). FW steht für Fresh Weight, DW für Dry Weight und T für Tage.

3 Veränderungen des Reflexionsgrades aufgrund verschiedener Pigment mittels des Prospect-D Modells

Um aus den ermittelten möglichen Veränderungen der Pigmentkonzentration einen Reflexionsgrad zu bestimmen, wird das Prospect Modell [17] verwendet. Dieses modelliert den spektralen hemisphärischen Reflexionsgrad von Blättern in Abhängigkeit der folgenden Blatteigenschaften: Strukturparameter N, des absoluten Chlorophyllgehalt Chl und der äquivalente Wasserdicke EWT. Das in dieser Veröffentlichung verwendete Modell Prospect-D [18] enthält derarüber hinaus die Blatinhaltsstoffe Carotinoid Gehalt Car, Anthocyan Ant, sowie Blatteinheitsflächenmasse LMA. Um diese Parameter als Ausgangswert zu besitzen

| Latein Name | Umgangsprachlicher Name | Chl ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | AChl ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | BChl ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | A+B Car ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | Anth ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | LMA (g/cm^2) |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Ocimum basilicum</i> L. | Basilikum | 23,7010 | 7,8902 | 31,5913 | 7,2643 | 0,3812 | 0,0020324 |
| <i>Ocimum basilicum</i> L. | Basilikum | 27,3903 | 10,3285 | 37,7188 | 8,6221 | 0,8889 | 0,0023438 |

Tabelle 2: Die Tabelle zeigt die relevanten Blatteigenschaften zur Nutzung des Prospect Modells basierend auf der Lotus 2 Datenbank [3]. Gezeigt sind zwei Messungen für Basilikum.

wird die Lotus-2 Datenbank für spektrale und biochemische Zusammensetzung von Blättern herangezogen (vgl. Tabelle 2) [3].

Aus der Literaturrecherche aus Kapitel 2 ergeben sich die Skalierungsfaktoren der Ausgangswerte wie folgt. Dabei wurden die maximalen in der Literatur beobachteten Beeinflussungen der Photopigmente berücksichtigt.

Nach Lobiuc [14]:

- Carotinoide: Grün - Skalierungsfaktor $\approx 1,50$, Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,22$
- Chlorophyll: Grün - Skalierungsfaktor $\approx 1,43$, Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,20$
- Anthocyane: Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,70$

Nach Vaštakaitė [11]:

- Anthocyane: Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,43$

Nach Hosseini [20]:

- Chlorophyll: Grün - Skalierungsfaktor ≈ 6 , Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,20$
- Anthocyane: Rot - Skalierungsfaktor $\approx 1,66$

Daraus ergeben sich für eine äquidistante Betrachtung und unter der Zunahme von den Faktoren 2 und 3 für eine arbiträrgewählte Maximumeffektbetrachtung folgende Skalierungsfaktoren:

Chlorophyll (Total): 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.3, 1.4, 2, 3

Anthocyane: 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 3

Carotinoide: 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.3, 1.5, 2, 3

In der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Konzentrationen von Chlorophyll, Carotinoiden und Anthocyanen auf das Reflexionsspektrum von Pflanzenblättern wurde der Ausgangswert mit diesen Faktoren multipliziert. Es wurde der singulare Effekt der einzelnen Pigmentveränderung betrachtet. Im Fall von Chlorophyll wurde dafür die Werte CAR = 7, ANT = 0.4, EWT = 0.016, LMA = 0.002, N = 1.3 unverändert gelassen und der Ausgangswert von Chlorophyll von 23 mit den 10 Faktoren multipliziert, wodurch sich für Chlorophyll in aufsteigender Reihenfolge die Werte 6.9, 11.5, 16,1, 18.4, 20.7,23, 25.3, 29.9, 32.2, 46 und 69 ergeben haben. Für Anthocyane und Carotinoide erfolgte das Vorgehen analog. Die resultierenden spektralen Reflexionsgrade sind in Abbildung 1 zu sehen.

Für den Einfluss unterschiedlicher Chlorophyllkonzentrationen auf das Reflexionsspektrum zeigt sich mit zunehmender Chlorophyllkonzentration eine Verschiebung des Maximums des Reflexionsspektrums in den grünen Bereich des Lichtspektrums. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Amplitude im grünen und hellroten Bereich zu beobachten. Dieser Effekt resultiert in einer Veränderung des Verhältnisses zwischen Reflexion im hellroten und fernroten Bereich, was sich signifikant auf den NDVI (Normalized Difference Vegetation Index [21]) auswirkt. Der NDVI ist ein entscheidender Parameter zur Bewertung der Pflanzenvitalität und wird durch diese Verschiebung beeinflusst, was seine Korrelation zum Chlorophyll Gehalt bestätigt.

Für den Einfluss unterschiedlicher Carotinoid-Konzentrationen auf das Reflexionsspektrum zeigt sich mit abnehmender Carotinoid-Konzentration eine Verschiebung des Maximums in den roten Bereich des Spektrums. Parallel dazu nimmt die Amplitude im Grün- und Hellblaubereich zu, was auf die veränderte Absorption und Reflexion von Licht durch die Carotinoide hinweist. Diese Veränderungen können ggf. wichtige Informationen über den Zustand und die Anpassungsfähigkeit der Pflanze an Umweltbedingungen liefern.

Im Gegensatz zu Chlorophyll und Carotinoiden zeigt die Variation der Anthocyan-Konzentration keine merkliche Verschiebung des Maximums im spektralen Reflexionsgrad. Dies deutet darauf hin, dass Anthocyane in erster Linie die Farbintensität beeinflussen, ohne die spektrale Verteilung des reflektierten Lichts signifikant zu verändern. Diese Eigenschaft könnte bspw. genutzt werden, um spezifische Pflanzeigenschaften, wie z. B. Stressreaktionen, zu überwachen, ohne die spektrale Zusammensetzung des reflektierten Lichts zu beeinflussen.

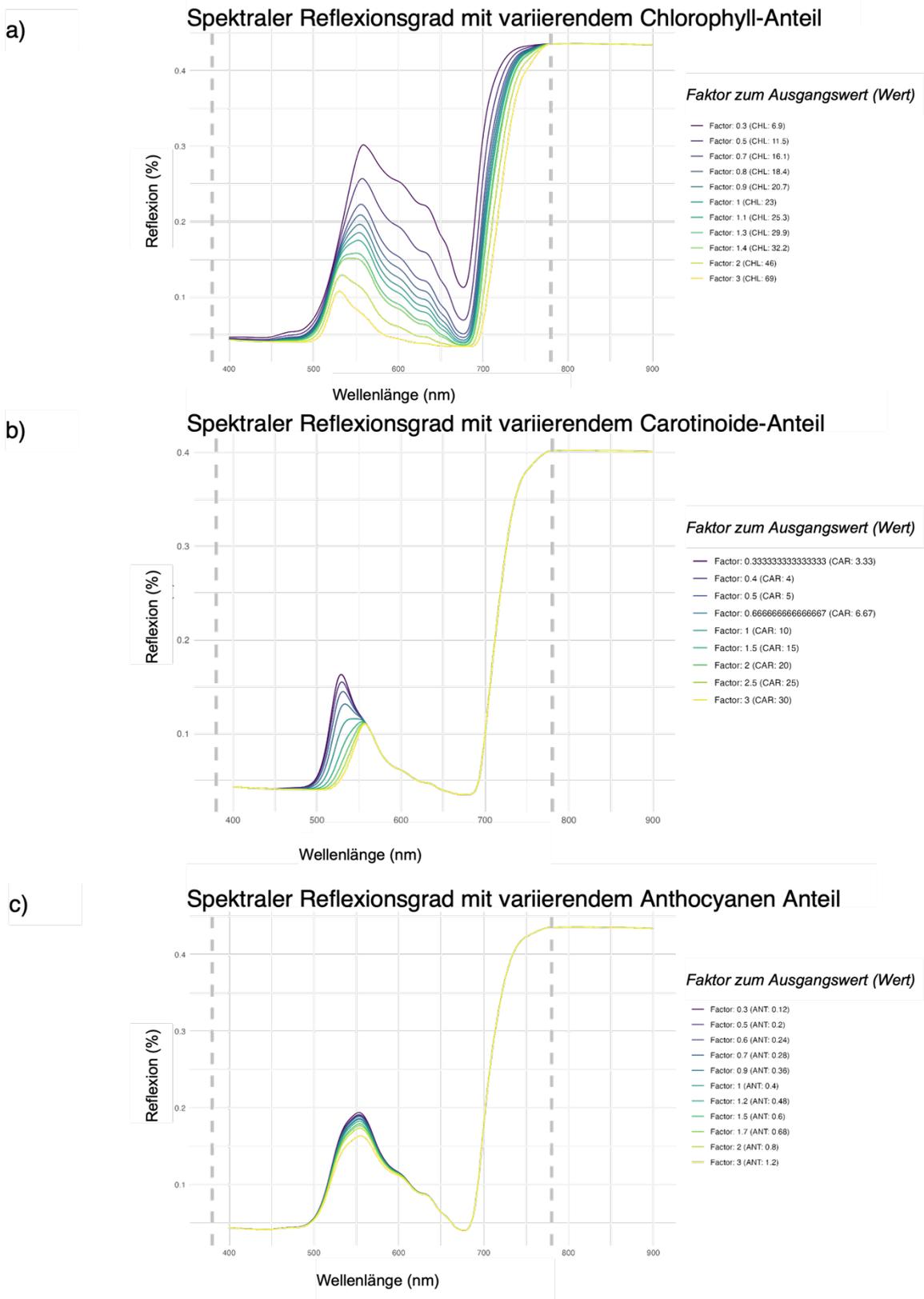


Abbildung 1 Die Abbildung zeigt die spektralen Reflexionsgraden für unterschiedliche Chlorophyll(a), Carotinoide (b) und Anthocyanen (c). Die spektralen Reflexionsgrade wurden mit Hilfe des Prospect-D Modells erzeugt und wurden mit den Ausgangswerten CHL = 23, CAR = 7, ANT = 0.4, EWT = 0.016, LMA = 0.002, N = 1.3 erstellt.

4 Veränderungen des Reflexionsgrades aufgrund verschiedener Pigment mittels des Prospect-D Models

Um die Auswirkungen von Variationen in den Anteilen von Chlorophyll, Carotinoiden und Anthocyanen auf mögliche Farbwahrnehmungsunterschiede zu untersuchen werden die Farbkoordinaten der simulierten spektralen Reflexionsgraden im CIE 1976 (u' , v')-Farbraum berechnet [22]. Diese Farbkoordinaten wurden aus den simulierten Reflexionsgraden mithilfe des Normspektrums D65 berechnet, welches die standardisierte Lichtquelle für Tageslicht darstellt. Die Berechnung der Farbkoordinaten stützt sich dabei auf folgende Gleichungen:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z},$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y,$$

Diese Normfarbkoordinaten x und y werden anschließend verwendet, um die einheitlichen Farbkoordinaten im CIE 1976 (u' , v')-Farbraum zu berechnen:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

Die resultierenden u' , v' Diagramme sind in Abbildungen 2 zu sehen.

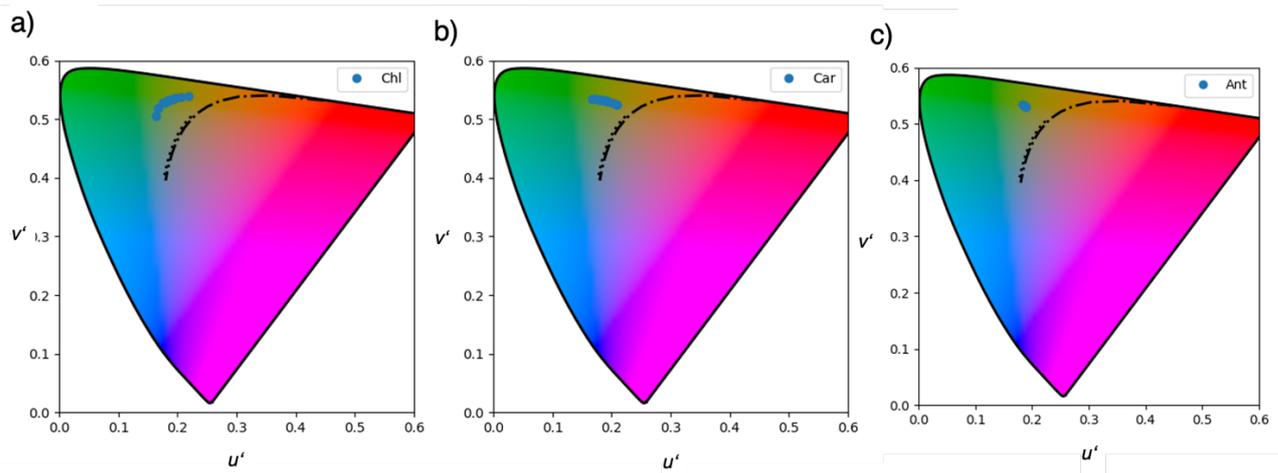


Abbildung 2 Die Abbildung zeigt die Farbkoordinaten der jeweils 10 spektralen Reflexionsgrade unter Nutzung des D65 Normlicht für die Experimentreihen mit Veränderungen der Chlorophyll- a), Carotenoide- b) und Anthociane- c) Werte.

Für Farbveränderungen durch Chlorophyll lässt sich dabei Folgendes feststellen:

Der Farbort bewegt sich mit zunehmendem Chlorophyllgehalt entlang einer spezifischen Kurve im u' - v' -Diagramm. Diese Bewegung reflektiert die

charakteristischen Absorptionseigenschaften von Chlorophyll im blauen und roten Bereich des sichtbaren Spektrums. Die Berechnungen zeigen, dass der Farbort bei steigendem Chlorophyllgehalt in den grüneren Bereich des Spektrums verschoben wird, was plausibel ist, da Chlorophyll das dominante Pigment ist, das die grüne Färbung von Pflanzenblättern bestimmt.

Abbildung 2b) zeigt, dass eine Variation der Carotinoidwerte zu einer Verschiebung des Farborts zwischen Grün und Orange führt. Carotinoide, die primär im blauen Spektralbereich absorbieren und rotes sowie gelbes Licht reflektieren, verursachen diese Verschiebung in Richtung wärmerer Farbtöne. Die Berechnungen bestätigen, dass die Erhöhung der Carotinoidkonzentration den Farbort in Richtung der roten und gelben Bereiche verschiebt, was auf die Rolle dieser Pigmente bei der Modulation der Blattfarbe hinweist.

Im dritten Plot 2c) wird deutlich, dass der Anthocyaningehalt nur minimale Auswirkungen auf den Farbort hat. Obwohl Anthocyane hauptsächlich im grünen Bereich absorbieren und rote sowie blaue Lichtanteile reflektieren, zeigen die Berechnungen, dass ihre Wirkung auf den Farbort im Vergleich zu Chlorophyll und Carotinoiden weniger ausgeprägt ist, was bereits durch die geringe Verschiebung des Maximums im spektralen Reflexionsgrad angedeutet ist. (vgl. Abbildung 1c)

5 Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Berechnungen und die daraus resultierenden Farbplots im CIE 1976 (u',v')-Farbraum zeigen beispielhaft die, aus der Basilikum fokussierten Lichtforschung hergeleiteten, Auswirkungen von Pigmentkonzentrationen auf die wahrnehmbare Farbe von Pflanzenblättern. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Chlorophyll und Carotinoide die dominierenden Faktoren sind, die die Farbgebung von Pflanzen bestimmen, während Anthocyane eine minimale ergänzende Rolle spielen. Diese Erkenntnisse können dazu beitragen eine Entwicklung präziser Analysetools zur Überwachung der Pigmentveränderungen unter verschiedenen Umweltbedingungen zu unterstützen. Darüberhinaus können anhand der Literarurübersicht Anbauexperimente gestaltet werden, welche die gezeigten simulierten spektralen Reflexionsgrade und damit zusammenhängende Farbveränderung bestätigen, erweitern oder widerlegen.

6 References

- [1] R. Paradiso, „Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems“, *J. Plant Growth Regul.*, 2022.
- [2] P. A. Davis und C. Burns, „Photobiology in protected horticulture“, 2016.
- [3] F. Thoma, „Effects of Light on Secondary Metabolites in Selected Leafy Greens: A Review“, *Front. Plant Sci.*, Bd. 11, 2020.
- [4] H. E. Haddaji u. a., „Effects of Light-Emitting Diodes (LEDs) on Growth, Nitrates and Osmoprotectant Content in Microgreens of Aromatic and Medicinal Plants“, 2023.
- [5] S. Chandra u. a., „Assessment of Total Phenolic and Flavonoid Content, Antioxidant Properties, and Yield of Aeroponically and Conventionally Grown Leafy Vegetables and Fruit Crops: A Comparative Study“, *Evid. Based Complement. Alternat. Med.*, Bd. 2014, Nr. 1, S. 253875, Jan. 2014, doi: 10.1155/2014/253875.
- [6] L. Sipos u. a., „Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments – a review“, *Sci. Hortic.*, Bd. 289, S. 110486, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.scienta.2021.110486.
- [7] S. Zhen, M. Van Iersel, und B. Bugbee, „Why Far-Red Photons Should Be Included in the Definition of Photosynthetic Photons and the Measurement of Horticultural Fixture Efficacy“, *Front. Plant Sci.*, Bd. 12, S. 693445, Juni 2021, doi: 10.3389/fpls.2021.693445.
- [8] A. Ali, P. Santoro, A. Ferrante, und G. Cocetta, „Investigating pulsed LED effectiveness as an alternative to continuous LED through morpho-physiological evaluation of baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Acephala*)“, *South Afr. J. Bot.*, Bd. 160, S. 560–570, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.sajb.2023.07.052.
- [9] A. Ciurli, T. Huaranca Reyes, und L. Guglielminetti, „Commercial advantages on basil architecture by ultraviolet-B irradiation“, *Adv. Hortic. Sci.*, S. 215-221 Pages, Juni 2017, doi: 10.13128/AHS-20460.
- [10] A. Brazaitytė u. a., „Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens“, *Int. Agrophysics*, Bd. 29, Nr. 1, S. 13–22, Jan. 2015, doi: 10.1515/intag-2015-0004.
- [11] V. Vaštakaitė u. a., „THE EFFECT OF UV-A SUPPLEMENTAL LIGHTING ON ANTIOXIDANT PROPERTIES OF OCIMUM BASILICUM L. MICROGREENS IN GREENHOUSE“, in *Proceedings of the 7th International Scientific Conference Rural Development 2015*, Aleksandras Stulginskis University, Lithuania: Aleksandras Stulginskis University, Nov. 2015. doi: 10.15544/RD.2015.031.
- [12] P. Chutimanukul, „The influence of different light spectra on physiological responses, antioxidant capacity and chemical compositions in two holy basil cultivars“, *Sci. Rep.*, 2022.
- [13] G. Samuolienė, A. Brazaitytė, A. Viršilė, J. Jankauskienė, S. Sakalauskienė, und P. Duchovskis, „Red Light-Dose or Wavelength-Dependent Photoresponse of Antioxidants in Herb Microgreens“, *PLOS ONE*, Bd. 11, Nr. 9, S. e0163405, Sep. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0163405.
- [14] A. Lobiuc u. a., „Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens“, 2017.
- [15] S. Hikosaka, F. Moriyama, und E. Goto, „Effects of Photosynthetic Photon Flux Density and Red/Blue Light Ratio on the Leaf Shape and Concentrations of Functional and Aromatic Compounds in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.)“, *Hortic. J.*, Bd. 90, Nr. 4, S. 357–364, 2021, doi: 10.2503/hortj.UTD-273.
- [16] V. Vaštakaitė u. a., „The Effect of Blue Light Dosage on Growth and Antioxidant Properties of Microgreens“.
- [17] S. Jacquemoud und F. Baret, „PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra“, *Remote Sens. Environ.*, Bd. 34, Nr. 2, S. 75–91, Nov. 1990, doi: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z.
- [18] J.-B. Féret, A. A. Gitelson, S. D. Noble, und S. Jacquemoud, „PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle“, *Remote Sens. Environ.*, Bd. 193, S. 204–215, Mai 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.03.004.
- [19] R. D. Peters und S. D. Noble, „1 A New Dataset of Leaf Optical Traits to Include Biophysical Parameters in 2 Addition to Spectral and Biochemical Assessment“.
- [20] A. Hosseini, M. Zare Mehrjerdi, und S. Aliniaefard, „Alteration of Bioactive Compounds in Two Varieties of Basil (*Ocimum basilicum*) Grown Under Different Light Spectra“, *J. Essent. Oil Bear. Plants*, Bd. 21, Nr. 4, S. 913–923, Juli 2018, doi: 10.1080/0972060X.2018.1526126.
- [21] „NDVI Index“, PhysicsOpenLab. Zugegriffen: 14. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://physicsopenlab.org/2017/01/30/ndvi-index/>
- [22] K. A. G. Smet, „Tutorial: The LuxPy Python Toolbox for Lighting and Color Science“, *LEUKOS*, Bd. 16, Nr. 3, Art. Nr. 3, Juli 2020, doi: 10.1080/15502724.2018.1518717.