

Das Phytochromsystem und die Horticulture-Beleuchtung

Was ist der Nutzen von dunkelrotem Licht?

Über LEDs für Horticulture-Anwendungen hat man bereits viel gehört.

Wenig beachtet wurde bislang jedoch der Zusammenhang zwischen rotem bzw. dunkelrotem Licht und dem gezielten Pflanzenwachstum.

Neue Gartenbau-LEDs unterstützen nun ein Funktionsprinzip zur Steuerung vieler photomorphologischer Prozesse in Pflanzen.

VON JOHANN WALDHERR
UND DR. RICHARD BLAKEY,
WÜRTH ELEKTRONIK eISOS

Der Lichtbedarf von Pflanzen ist weitaus komplexer als ursprünglich angenommen. Das hat zur Entwicklung verschiedener LED-Technologien geführt, mit denen eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtspektren erzeugt werden kann – sowohl monochromatisch als auch polychromatisch. Die sinnvolle Aufnahme einiger Wellenlängen in Lichtrezepte ist noch experimentell, aber eine nicht zu vernachlässigende Region des Spektrums ist der dunkelrote Bereich. Dunkelrot (engl. far-red) umfasst die Wellenlängen von 700 bis 800 nm – ein Bereich des Lichtspektrums, der beim Menschen am Rande der Sichtbarkeit liegt. Diese Wellenlängen führen nachweislich zu schnellerem Wachstum, erhöhter Biomasse und besseren sensorischen Merkmalen (z.B. Geruch, Geschmack, Textur, Farbe).

Aber warum sind Wellenlängen, die nicht in der Photosynthese verwendet werden, so wichtig für die Pflanzenentwicklung? Im Gegensatz zu Mensch und Tier können sich Pflanzen nicht bewegen. Ohne äußere Einflussnahme müssen sie an einem einzigen Ort wachsen und leben. Die Konsequenz für die Pflanzen ist, dass sie in der Lage sein müssen, sich in ungünstigen Bedingungen zurechtzufinden und

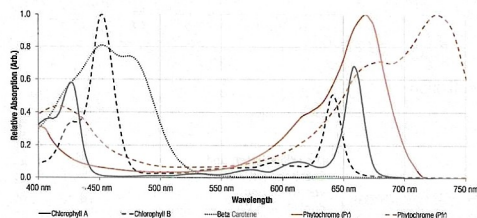
auch zu überleben, wenn sich ihre Umgebung ändert. Die Reaktion auf begrenzte Ressourcen wie Wasser, Nährstoffe und Licht sowie zirkadiane und zirkuläre Zyklen ist für die Pflanzen überlebenswichtig. Diese Reaktionen können manipuliert werden, um günstige Wachstumseigenschaften zu erreichen. Aber warum sind dunkelrote Wellenlängen nun unerlässlich für die Pflanzenbeleuchtung?

Photorezeptoren und das Phytochromsystem

Licht wird in erster Linie für die Photosynthese benötigt – den Hauptenergieumwandlungsmechanismus einer Pflanze und den wichtigsten Entwicklungsfaktor, der hauptsächlich durch rotes und blaues Licht über Chlorophyll in den Photosystemen II und I angetrieben wird. Dabei sind drei Faktoren wichtig:

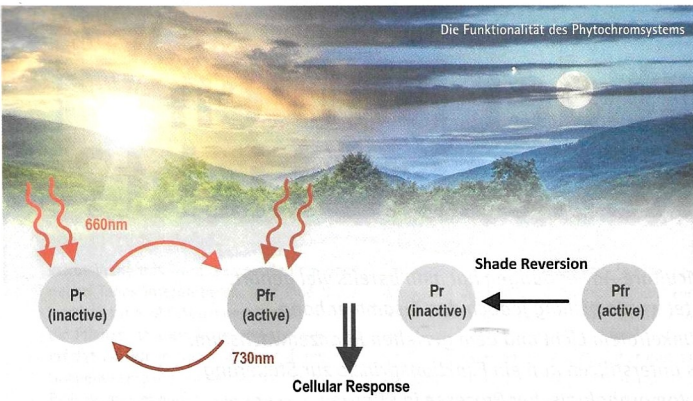
- **Lichtintensität** – die Menge an Photonen, die zur Verfügung steht
- **Photoperiodismus** – zeigt die Dauer der Exposition an
- **Lichtqualität** – entspricht den Wellenlängen von Pflanzen, denen sie ausgesetzt sind

Licht beeinflusst aber auch eine Reihe anderer pflanzlicher Prozesse. Jeder Prozess kann mit einem Photorezeptor verknüpft werden, der auf einen bestimmten Wellenlängenbereich reagiert. Kryptochrome beispielsweise erfassen blaues und UVA-Licht und sind für Phototropismus und Photomorphogenese verantwortlich, während Photorezeptoren, die Phytochrome genannt werden, dunkelrotes Licht



Typische Absorptionsspektren der Hauptpigmente von Pflanzen

Die Funktionalität des Phytochromsystems



erkennen. Phytochrome sind anders als kryptochrome Blaulichtrezeptoren, denn das Phytochrom-System ist von Natur aus auf das Zusammenspiel zweier Wellenlängen angewiesen.

Das System besteht aus zwei Formen von Phytochromen, die sich in ihren absorbierten Wellenlängen unterscheiden: Pr (Phytochromrot) hat ein Absorptionsmaximum bei 660 nm und Pfr (Phytochromdunkelrot; engl: Phytochrom far red) ein Absorptionsmaximum bei 730 nm. Interessanterweise können Pr und Pfr jedoch ihre Molekularstruktur abhängig vom Verhältnis von roten und dunkelroten Wellenlängen reversibel miteinander umwandeln. Pfr-Photorezeptoren gelten als die aktive Form, die in Gegenwart von rotem Licht mit 660 nm aus der Pr-Form umgewandelt wird. Pfr ist physiologisch aktiv und löst biologische Reaktionen aus, ist aber instabil. Das heißt, bei verminderter oder fehlendem Licht von 660 nm kehrt es in die Pr-Form zurück. Die Pfr-Form wird

auch in Gegenwart von dunkelrotem Licht mit 730 nm in die inaktive Pr-Form umgewandelt. Daher beeinflusst das Verhältnis (Lichtqualität) neben der Belichtungszeit (Photoperiodismus) und der Gesamtmenge (Lichtintensität) von roten und dunkelroten Wellenlängen, denen eine Pflanze ausgesetzt ist, das Phytochrom-System. Unterschiedliche Verhältnisse von Rot-/Dunkelrot-Wellenlängen können biologische Signalwege auslösen, die die gewünschten Eigenschaften von Pflanzen signifikant beeinflussen können.

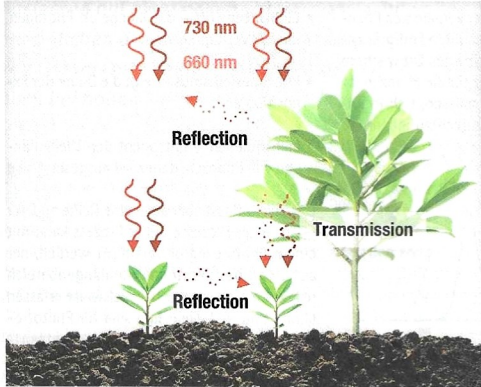
Die morphologische Reaktion

Das Phytochromsystem steuert eine Vielzahl molekularer Prozesse, die eine Reihe von morphologischen Veränderungen bewirken, die es den Pflanzen ermöglichen, sich an ihre Lichtumgebung anzupassen. Diese Reaktionen auf

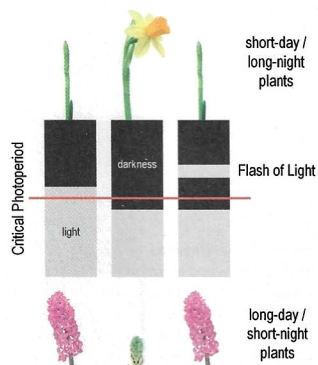
rotes und dunkelrotes Licht entwickelten sich als Reaktionen auf die Umwelt und stellen in einigen Fällen Überlebensmethoden dar. Genauer gesagt, das Schattenfluchsystem für den Fall, dass eine Pflanze nicht genügend Licht erhält. Dies kann entweder durch ein festes Objekt (welches das gesamte Licht verdeckt) oder durch andere Pflanzen (die einige Wellenlängen des Lichts weitergeben) verursacht werden. Ein weiterer Punkt ist die Veränderung des Tages- und Jahreslichts, was Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen und der Reaktion der Pflanze auf diese Bedingungen entspricht.

Lichtqualität und Schattenflucht

Wo Pflanzen in extrem hoher Dichte wachsen, konkurrieren sie um eine begrenzte Menge an Licht, die die Photosynthese antreibt. Um in dieser Umgebung zu überleben, spüren die Pflanzen, wie viel Schatten sie im Phytochrom-System haben. Das rote und dunkelrote Licht, das im direkten Umfeld zur Verfügung steht, kann die Pflanze über verschiedene Wege erreichen. Der Großteil des Lichts aus dem dunkelroten Bereich wird entweder reflektiert oder durch pflanzliches Gewebe übertragen, wodurch das Verhältnis von roten/fernothen erreichbaren Pflanzen in der unmittelbaren Umgebung verringert wird. Dies kann als Reflexion von den umgebenden Pflanzen oder als Lichtdurchtritt durch eine ausgewachsene Baumkrone bzw. Blätterhaube erfolgen. Das bedeutet, dass direktes Sonnenlicht einen hohen Anteil an rotem Licht hat,



Die reflektierten und übertragenen Lichtwege von roten und dunkelroten Wellenlängen in Ökosystemen von Pflanzen



Die Wirkung des roten und dunkelroten Photoperiodismus auf das Blühen von Pflanzen

während das Licht, das von Blättern durchgelassen oder reflektiert wird, einen roten Mangel aufweist und einen höheren Anteil an dunkelrotem Licht hat.

Das Verhältnis von Rot zu Dunkelrot ermöglicht die Kontrolle des Phytochromsystems und damit die Vermeidung von Schatten bei schattunverträglichen oder sonnenliebenden Pflanzen. Studien haben gezeigt, dass diese Reaktionen eine beschleunigte Verlängerung von Hypokotylen (Keimstängeln), Internodien und Stielen, erhöhte Blattneigungen zur Horizontalen und reduzierte Verzweigungen zur Folge hat, um mehr Sonnenlicht einzufangen und die Photosynthese zu fördern. Dieses Verhalten soll das Überleben der Pflanze sichern. Darüber hinaus kann die Reaktion auf die Schattenflucht eine verfrühte Blüte auslösen, wodurch die Pflanze das Wachstum reduziert und die Fortpflanzungsphase beginnt, um diese zu sichern.

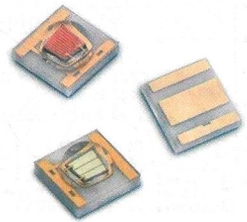
Die praktische Anwendung hängt von den gewünschten Eigenschaften der zu kultivierenden Pflanze ab. Im Salat wird die Keimung durch weites Rotlicht gehemmt, aber es ist wichtig zu wissen, dass die Keimreaktion hier von der letzten Lichtbestrahlung abhängt. Die Ergänzung mit dunkelrotem Licht während der Wachstumsphase führt zu einem erhöhten Trieb- und Wurzelwachstum mit höherem Frischgewicht der Triebe und der Blattfläche. Eukalyptus-Stecklinge haben einen größeren Wurzelersfolg bei niedrigen Verhältnissen von Rot zu Dunkelrot. Dunkelrotes Licht kann die Erträge von grünen Bohnen erhöhen und das Wachstum von Tomatenpflanzen fördern. Interessanterweise kann dunkelrotes Licht auch verwendet werden, um das Stammwachstum bei Pflanzen zu hemmen, bei denen es ungünstig ist, zu hoch zu wachsen, wodurch sich

der Einsatz von Wachstumshemmern reduziert oder sogar ganz vermeiden lässt. Das Phytochromsystem steuert auch die Kohlenstoffverteilung und den Stoffwechselstatus in sich entwickelnden Pflanzen.

Der Photoperiodismus und der zirkadiane Rhythmus

Pflanzen sind auch sensibel für die Verschiebung der Wellenlängen von rotem zu blauem Licht, die bei Sonnenaufgang und – entgegengesetzt – bei Sonnenuntergang stattfindet. Außerdem können sie die Dauer dieser täglichen Ereignisse wahrnehmen, was sich auf Pflanzenprozesse wie die Blüte auswirkt. Wie die meisten Lebensformen muss auch der natürliche Rhythmus der Welt mit Aktivitäts- und Ruhephasen angepasst werden, um den Energieaufwand auf den Zeitpunkt zu begrenzen, zu dem er am effektivsten und nützlichsten ist. So ist es beispielsweise in der Regel nicht vorteilhaft, wenn eine Pflanze nachts oder im Winter blüht, wenn in diesen Zeiten nur wenige oder keine Bestäuber aktiv sind.

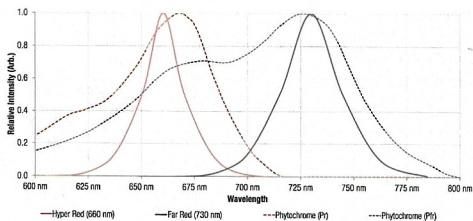
Während sich die Pflanzen entwickeln, gibt es eine vegetative Phase (Wachstum) und eine reproduktive Phase (Blüte). Während sich die Pflanzen, Blätter und Triebe während der Wachstumsphase durch die Photosynthese entwickeln, findet in der Blütephase fast kein Wachstum statt. Durch die Entwicklung von Blüten können Pflanzen bestäubt werden und Früchte oder Samen produzieren. Der Prozess der Blütenproduktion ist nach Auslösung irreversibel, sodass der Zeitpunkt dieser Phase entscheidend ist. Die gezielte Beeinflussung der Blütenbildung spielt gerade für Zierpflanzen- und Samenproduzenten eine enorm wichtige Rolle.



„WL-SMDC SMD Mono-color
Ceramic LED Waterclear“ von Würth Elektronik

Das Phytochromsystem ist das Schlüsselsystem zur Identifizierung und Reaktion auf diese Veränderungen. Phytochrom Pr wird von der Pflanze bei Dunkelheit produziert und akkumuliert. Das tagsüber durch dunkelrotes Licht erzeugte Pfr kehrt langsam in die inaktive Pr-Form (Halbwertszeit = 2,5 h) zurück, was als Dunkelreversion bezeichnet wird. Tagsüber wird die Pr-Form in Pfr umgewandelt, wodurch das Pr/Pfr-Gleichgewicht wiederhergestellt wird. Daher ist das Verhältnis von Pr/Pfr in der Nacht hoch, während es tagsüber niedrig ist. Die Wirkung der Reaktion des Phytochromsystems auf diese Veränderungen hängt von der Art der Pflanze ab. Pflanzen können in Langtagspflanzen (LDP) und Kurztagspflanzen (SDP) unterteilt werden. SDP brauchen eine Dunkelphase zur Blüte, die nicht durch Licht unterbrochen werden darf. Wird diese Dunkelphase nicht erreicht, blüht die Pflanze nicht. Umgekehrt benötigen LTP eine Beleuchtungsphase, um zu blühen.

Die Hyper-Red-LED emittiert 660-nm-Licht im roten Spektralbereich und die 730-nm-LED im dunkelroten Spektralbereich. Eine Pflanze, die im Vergleich zu blauem Licht mehr rotem Licht ausgesetzt ist, mit einem niedrigen Rot/Dun-



Die Absorptionsspektren der Phytochromen Pr und Pfr und die Lichtleistung der hyperroten (150353HS74500) und dunkelroten (150353FS74500) keramischen WL-SMDC-LEDs.

kelrot-Verhältnis, wird dies als Beginn eines neuen Tages interpretieren, was eine Blüte auslösen kann. Mit steigendem Verhältnis weiß die Pflanze, dass der Übergang zur Tageszeit erfolgt ist. Wenn das Verhältnis durch den Sonnenuntergang wieder sinkt, spürt die Pflanze, dass es dunkel wird, und so beginnen metabolische und morphologische Veränderungen für scotophile (nachtliebende) Prozesse. Die Länge der Nacht kann einen großen Einfluss auf die Morphologie der Pflanze haben.

Die Anwendungsmöglichkeiten sind je nach Art der zu kultivierenden Pflanze vielfältig. Zierpflanzenzüchter können durch die gezielte Manipulation des Phytochromsystems feststel-

len, wann Produkte marktreif sind. Darüber hinaus kann die Pflanze mehrmals im Jahr zur Blüte gezwungen werden. Bei künstlichem Licht sind die Wachstums-/Blumenzyklen nicht an die Jahreszeiten gebunden. Daher gibt es die Möglichkeit, die Pflanze bei schlechten Lichtverhältnissen im Winter zur Blüte zu bringen. Ebenso lassen sich in den Sommermonaten unerwünschte Blütezeiten vermeiden. Damit können Landwirte ihre eigene optimierte Lichtrezeptur für Kulturpflanzen entwickeln.

Zusammenfassung

Phytochrome sind Photorezeptoren und eine der wesentlichen Möglichkeiten der Pflanzen,

ihre Umwelt wahrzunehmen. Sie sind für die Erkennung von rotem und dunkelrotem Licht verantwortlich, das in den verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanzenproduktion eine Vielzahl von Reaktionen auslöst und steuert. Das Funktionsprinzip von Phytochrom Pr (660 nm) und Pfr (730 nm) kann zur Steuerung vieler photomorphologischer Prozesse in einer Pflanze genutzt werden. Die genaue Wirkung hängt von der Art und der Sorte ab. Mit Hilfe der gartenbaulichen Expertise kann es zu einer Erhöhung der gewünschten Qualitätsparameter führen, weshalb der kombinierte Einsatz von rotem und weitem Rotlicht in Pflanzenleuchten unerlässlich ist. Für den Züchter ist es von Vorteil, die 730-nm-LEDs separat zu steuern und an seine Bedürfnisse oder seine eingestellten Qualitätsparameter anzupassen. Je nach Ziel ist es sinnvoll, dass die LEDs mit der Wellenlänge 730 nm in einem einzigen Kanal separat dimmbar sind. Aus diesem Grund hat Würth Elektronik eiSos spezielle Gartenbau-LEDs mit Wellenlängen von 660 nm (Hyper Red) und 730 nm (Far Red) entwickelt, die in der WL-SMDC-Horticulture-Serie von Würth Elektronik eiSos enthalten sind. Diese Produkte wurden so optimiert, dass sie dem Absorptionsspitzenwert der beiden Phytochromformen entsprechen. (nw)