

Indoor-Gewächshäuser profitieren von den Entwicklungen der LED-Industrie

# LED – die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

*Gewächshäuser kennt man als Glaskästen, in denen Pflanzen durch mehr oder weniger kontrolliert einfallendes natürliches Licht wachsen und gedeihen sollen.*

*Doch mit den immer leistungsfähigeren und feiner abstimmbaren LEDs erlangen Indoor-Gewächshäuser zunehmende Bedeutung.*

*Worauf es bei der Auswahl der geeigneten Elektronik ankommt, erklären die Experten von Würth Elektronik eiSos.*

VON DR. RICHARD BLAKEY,  
APPLICATION ENGINEER  
VON WÜRTH ELEKTRONIK eiSOS

**M**it der wachsenden Weltbevölkerung und dem Trend zur Nachhaltigkeit wird eine einfache, aber dennoch hocheffiziente und standardisierte Nahrungsmittelproduktion immer wichtiger. Damit eröffnet sich ein potenziell riesiger neuer Landwirtschaftssektor, in dem Gewächshäuser eine bedeutende Rolle spielen. Während traditio-

nelle Gewächshäuser bereits millionenfach im Einsatz sind, bahnen sich künstlich beleuchtete Gewächshäuser in geschlossenen Räumen zunehmend ihren Weg auf diesen Markt. Unter anderem durch die Fortschritte hinsichtlich Beleuchtung, Beheizung, Bewässerung und Steuerung lassen sich in diesen Anlagen im Vergleich zu konventioneller Landwirtschaft und Low-Tech-Gewächshäusern deutlich höhere Erträge erzielen.

Einer der bedeutendsten Treiber für Indoor-Gewächshäuser ist die Weiterentwicklung der LED-Technologie. Die mittlerweile doch recht kostengünstig herzustellenden Bauteile sind extrem robust und im Vergleich zu anderen Beleuchtungstechnologien klein und langlebig, haben einen niedrigen Energiebedarf und erzeugen weniger Wärme, wodurch sie besonders effizient sind. Dadurch sinken die Betriebskosten von großen Hallengewächshäusern erheblich. Der Hauptvorteil der sogenannten Horticulture-LEDs (Horticulture = Gartenbau) liegt jedoch in der Möglichkeit, nur bestimmte Wellenlängen des Lichts zu erzeugen, über die sich beispielsweise die verschiedenen Pflanzenentwicklungsstadien steuern lassen, um höhere Erträge zu erzielen oder die Wachstumszeiten zu verkürzen. Pflanzen nutzen nur einen bestimmten Wellenlängenbereich für das Wachstum und haben unterschiedliche Anforderungen bei unterschiedlichen Frequenzen. Es wäre höchst ineffizient, durch elektrische Energie Wellenlängen zu erzeugen, die die Pflanze nicht nutzen wird bzw. kann. Daher



Beispiel eines Hallengewächshauses mit LED-Beleuchtung

konzentrieren sich die Hersteller in der Regel auf LEDs mit Wellenlängen von 660 nm (rot) und 450 nm (blau). Neuere Untersuchungen haben aber gezeigt, dass es neben den roten und blauen Wellenlängen auch noch weitere Wellenlängen gibt, die auf die Entwicklung der Pflanze Einfluss nehmen.

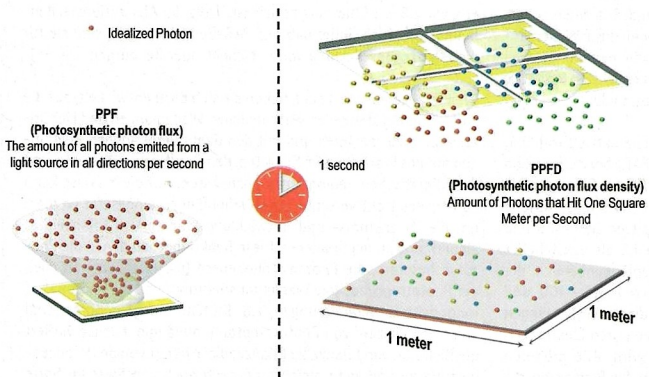
- Rotes Licht (630–660 nm) liefert die wichtigste Wellenlänge für die Photosynthese und ist wesentlich für das Längenwachstum verantwortlich. Diese Wellenlänge reguliert auch das Erblühen, die Ruhephase und die Keimung der Samen.
- Blaues Licht (400–520 nm) ist eine weitere Schlüsselwellenlänge für die Photosynthese, muss aber sorgfältig kontrolliert und mit anderen Frequenzen gemischt werden, weil eine Überbelichtung bei dieser Wellenlänge das Wachstum hemmen kann. Diese Wellenlänge wird auch mit der Regulierung der Chlorophyllkonzentration, der Förderung des Seitenknospenwachstums und der Blattdicke in Verbindung gebracht.
- Dunkelrotes Licht (engl.: far red light) (720–740 nm), das sich im IR-Spektrum befindet, beeinflusst die Keimung und kann die Blütezeit von Pflanzen verkürzen, aber auch das Längenwachstum fördern, im Rahmen der „shade avoidance response“.
- Grünes Licht (500–600 nm) wurde einst als unwichtig für die Pflanzenentwicklung angesehen, doch neuere Untersuchungen haben ergeben, dass Pflanzen im Schatten anderer Pflanzen wiederum im Rahmen der „shade avoidance response“ besonders auf diese Wellenlänge ansprechen.

- UV-Licht (280–400 nm) wird in der Pflanzenzucht noch eher experimentell eingesetzt und derzeit erforscht. Obwohl dieser Wellenlängenbereich zellschädigend ist, sind einige Pflanzen (z.B. Salat, Tomaten) dagegen viel widerstandsfähiger. Studien deuten darauf hin, dass diese Wellenlängen als Pilzbekämpfung bei unempfindlichen Arten eingesetzt werden können. Zusätzlich kann UV-Licht für die Bildung bestimmter Schutzmoleküle wie Antioxidantien und Polyphenole verantwortlich sein, die für die menschliche Ernährung wichtig sind.

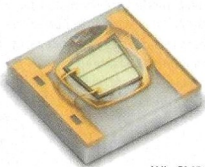
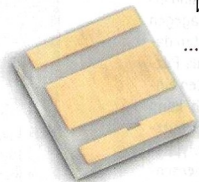
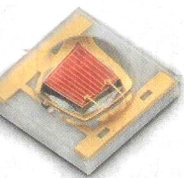
Allerdings ist zu beachten, dass jede Pflanzenart unterschiedlich auf verschiedene Kombinationen von Lichtwellenlänge und Intensität reagiert. Darüber hinaus werden für verschiedene Pflanzenarten unterschiedliche physikalische Eigenschaften benötigt. Zum Beispiel ist es wünschenswert, dass Salatgemüse dünne, leichte Blätter hat, um die Konsistenz beim Verzehr zu verbessern, während bei Aloe Vera dicke Blätter wünschenswert sind, um mehr Latex zu produzieren. Deshalb suchen Gewächshausbetreiber und Hersteller von Beleuchtungsanlagen immer wieder nach neuen Wellenlängen-Kombinationen, die ein speziell abgestimmtes Lichtspektrum für bestimmte Arten und sogar Sorten (Unterarten) von Pflanzen erzeugen.

### Spezifische Horticulture-LEDs

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bietet Würth Elektronik die Serie WE-SMDC SMD Mono-color Ceramic LED Waterclear an. Das Spektrum von WL-SMDC wurde um die Wellenlängen von 450 nm (Deep Blue), 660 nm



Der Unterschied zwischen photosynthetisch aktivem Photonenfluss (links) und photosynthetischer Photonenflussdichte (rechts) mit mehreren Farben



Würth Elektronik  
WL-SMDC SMD Mono-color  
Ceramic LED Waterclear

(Hyper Red) und 730 nm (Far Red) erweitert, die auf die Absorptionsspektren von photosynthetischen Pigmenten abgestimmt sind. Zusätzlich zu den bestehenden Produkten des Sortiments sind vielfältige Kombinationen

möglich, die auf die Zielsorte abgestimmt werden können.

#### Wichtige Parameter, Kenngrößen und Einheiten

Verschiedene Organisationen und Unternehmen haben Messgrößen und Parameter festgelegt, um die Effizienz künstlicher Beleuchtungssysteme zu messen, zu quantifizieren und zu qualifizieren. In den letzten Jahren wurden einige Anstrengungen unternommen, um diese Parameter zu vereinheitlichen, insbesondere durch die American Society of Agricultural and Biological Engineering (ASABE), die mehrere Dokumente zur Identifizierung und Koordinierung des Einsatzes von LEDs für das Pflanzenwachstum mit einer Reihe von Standards und Richtlinien für die Mess- und Prüfmethoden zur Quantifizierung des Energieverbrauchs und der Leistungsmerkmale erstellt hat. Bis vor kurzem basierten die Parameter auf der menschlichen Wahrneh-

mung von Licht, das vor allem auf die grün/gelben Wellenlängen, nicht aber auf blaues und rotes Licht ausgerichtet ist. Deshalb können herkömmliche Parameter, wie z.B. Lumen, nicht verwendet werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Parameter für LEDs im Horticulture-Bereich aufgelistet.

- Wellenlänge ( $\lambda$ , nm) – gibt die Wellenlänge des von der LED abgestrahlten Lichts an.
- Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, ~400 bis ~700 nm) – das ist der konventionell genutzte Wellenlängenbereich des Lichts, das Pflanzen für die Photosynthese benötigen. Diese Zahl kann manchmal irreführend sein, weil in diesem Bereich alle Wellenlängen als gleich wichtig für die Photosynthese angesehen werden, obwohl Rot und Blau die Haupttreiber der Photosynthese sind. Das bedeutet, dass die Wellenlängen einer grünen LED innerhalb des PAR-Bereichs liegen können, aber nur einen sehr begrenzten Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben.

## Grundlagenwissen zum Thema Horticulture-LED

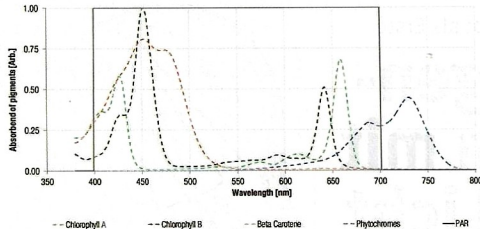
# Spektrale Anforderungen von Pflanzen

Photosynthese ist der Prozess, der Wasser und Kohlenstoffdioxid in komplexe Kohlenhydrate (z.B. Zucker) und Sauerstoff mit Hilfe von Lichtenergie umwandelt. Obwohl die von der Sonne abgestrahlte Energie, die die Erdoberfläche erreicht, aus dem gesamten Spektrum des sichtbaren Lichts besteht (und mehr), nutzen Pflanzen nur bestimmte Lichtfrequenzen für die Photosynthese. Diese Frequenzen stehen im Zusammenhang mit den Absorptionseigenschaften verschiedener Pigmente, die in den Chloroplasten – sogenannte Zellorganellen – vorrätig sind, verschiedenste Funktionen der Photosynthese zu beeinflussen. Die meisten dieser Pigmente absorbieren Licht in den Wellenlängen, die den Farben Blau und Rot entsprechen. Deshalb erscheinen die meisten Blätter grün, weil diese Wellenlängen nicht absorbiert werden, und Karotten erscheinen orange, weil sie sehr wenig Chlorophyll enthalten. Die gebräuchlichsten Pigmente sind Chlorophyll A, Chlorophyll B und die Carotinoide.

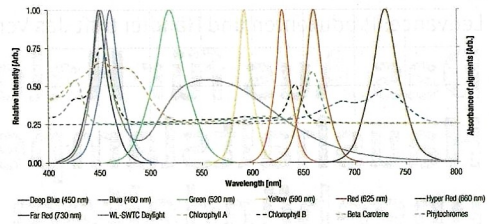
Diese Frequenzen werden als photosynthetische aktive Strahlung (engl.: Photosynthetically Active Radiation; PAR) bezeichnet und sind in einem Bereich von 400 bis 700 nm definiert. Chlorophyll A ist das primäre Lichtpigment, das etwa 75 % der photosynthetischen Aktivität ausmacht und Absorptionsspitzen bei ~435 und ~675 nm aufweist. Chlorophyll B, ursprünglich als zusätzliches Lichtpigment betrachtet, erweitert den Wellenlängenbereich, der für die Photosynthese mit Absorptionsspitzen bei ~460 und ~640 nm genutzt werden kann. Energie aus diesen Wellenlängen wird von Chlorophyll B eingefangen, bevor sie durch Elektronenspinresonanz an Chlorophyll A abgegeben wird. Alle größeren Pflanzen bestehen hauptsächlich aus diesen beiden Pigmenten, die ihnen ihre grüne Farbe verleihen. Carotinoide haben einen ver-

gleichsweise viel breiteren Wellenlängenabsorptionsbereich als die Chlorophyllen mit einem Absorptionsbereich von ~400 bis ~510 nm. Zusätzlich zu ihrer ergänzenden Funktion der Lichtgewinnung spielen sie eine wesentlich komplexere Rolle als ursprünglich angenommen, indem sie die Chlorophyllen vor Photooxidation schützen, wenn die Lichtintensität in Bereichen mit niedriger Wellenlänge (d.h. mit höherer Energie) zu hoch ist. Deshalb überschneiden sich die Absorptionswellenlängen der Carotinoide mit denen der Chlorophyllen. Darüber hinaus sind Phytochrome Photorezeptoren (Lichtsensoren), die zahlreiche Prozesse bei 660 und 730 nm steuern, wie z.B. die Chlorophyllsynthese. Trotz der Absorptionswellenlängen, die auch außerhalb des PAR-Bereichs liegen, sind sie für die Pflanzenentwicklung von entscheidender Bedeutung.

Weil Pflanzen ortsfest sind, haben sie sich dazu entwickelt, auf die zur Verfügung stehenden verschiedenen Wellenlängen und Lichtintensitäten zu reagieren und mit den damit verbundenen Reaktionen auf das Wachstum im Schatten, dem Tag/Nacht-Rhythmus und den klimatischen Bedingungen anzupassen. Auf diese Weise kann künstliches Licht verschiedener Wellenlängen eingesetzt werden, um die Wachstums- und Entwicklungsstadien von Pflanzen zu steuern und zu manipulieren. Diese Reaktionen, zu denen die Photosyntheserate, die Photomorphogenese (die Pflanzenanatomie), der Phototropismus (die Wachstumsrichtung) und die Photonastie (ungerichtete Veränderungen, z.B. Blütenöffnung) gehören, sind von einer Vielzahl von Photorezeptoren abhängig. Ebenso variiert die Reaktion von Pflanze zu Pflanze; diese hängt von der Pflanzengattung ab und kann gleichzeitig auch noch von Sorte zu Sorte unterschiedlich sein. (nw)



Charakteristische Absorptionsspektren verschiedener Pigmente für die Photosynthese



Das Emissionsspektrum der WL-SMDC-LEDs überlagert mit den Absorptionsspektren der photosynthetischen Pigmente.

- Photosynthetischer Photonenfluss (PPF,  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – damit wird die Gesamtmenge der photosynthetisch aktiven Photonen beziffert, die LEDs pro Sekunde erzeugen. Obwohl es für einen Elektroingenieur seltsam erscheinen mag, die Leistung einer Lichtquelle anhand der Anzahl der emittierten Photonen zu quantifizieren, muss man bedenken, dass die Photosynthese ein biochemischer Prozess ist, der durch die Anzahl der Zuckermoleküle, die pro Anzahl der Photonen erzeugt werden, quantifiziert werden kann, obwohl Photonen verschiedener Wellenlängen unterschiedliche Energieniveaus haben. Die Umwandlung von elektrischer Energie in PPF erfolgt unter Verwendung der Plank-Einstein-Relation und der Avogadro-Zahl und ist die Summe aller im Wellenlängenbereich erzeugten Photonen.
- Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD,  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – sie quantifiziert

die Gesamtmenge der photosynthetisch aktiven Photonen, die pro Sekunde die Messoberfläche erreichen. Dieser Parameter ist stark abhängig von der Entfernung von der Quelle und dem Winkel. Dies wird normalerweise mit einem Quantenmessgerät gemessen, das nur auf PAR-Wellenlängen reagiert.

- Photon Efficiency ( $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ ) – dieser Parameter gibt an, wie effizient die LED bei der Erzeugung von PPF pro Joule der eingesetzten elektrischen Energie ist.
- Wall-plug Efficiency (WPE, %) – dies ist definiert als der Energieumwandlungs-Wirkungsgrad, ein Verhältnis der elektrischen Leistung zur optischen Leistung.
- R-B Ratio – dieses Verhältnis beschreibt das Verhältnis von rotem zu blauem Licht, das vom LED-System emittiert wird.

### Fazit

Die Verbesserung der Effizienz, der optischen Leistung, des Preises und der Lebensdauer haben dazu geführt, dass LEDs aus dem Forschungsstadium der Entwicklung zu einer praktikablen Alternative zu herkömmlichen Lichtquellen in der Anwendung im Horticulture-Bereich geworden sind. Obwohl der genaue Einfluss von Wellenlängenverhältnissen und die Rolle von Wellenlängen außerhalb von Rot und Blau untersucht und verstanden werden muss, werden LEDs in Zukunft Marktanteile von anderen konventionellen Lichtquellen übernehmen und in den kommenden Jahren dominieren. Mit der Freigabe des erweiterten Produktbereiches der WL-SMDC bietet Würth Elektronik LEDs die für die Photosynthese nötigen Wellenlängen sowie für spezielle Anforderungen, die für bestimmte Anlagentypen erforderlich sind. (nw)