APPLICATION NOTE

LED‘s – Die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

ANO002 VON DR. RICHARD BLAKEY

1. Einleitung

Der Anbau in Gewächshäusern ist zwar keine neue Technologie, aber mit der wachsenden Weltbevölkerung und dem Trend zur Nachhaltigkeit wird eine einfache, aber dennoch hocheffiziente und standardisierte Nahrungsmittelproduktion in den kommenden Jahren immer mehr zur Normalität werden und einen potenziell riesigen neuen Landwirtschaftssektor eröffnen, der die neuesten Technologien aus den Bereichen Biowissenschaften und Ingenieurwissenschaften beinhaltet. Doch wie können Forscher und Mitarbeiter aus diesen Bereichen die wechselseitig abhängigen Anforderungen von Indoor-Gewächshäusern verstehen?
Gewächshäuser haben eine lange Tradition, angeblich aus der römischen Epoche, wurden aber erst im 20. Jahrhundert für eine nachhaltige Intensivbewirtschaftung genutzt. Heutzutage gibt es weltweit Millionen von kontrollierten, geschützten Anlagen, von denen der Großteil natürliches Licht nutzt. Durch die Fortschritte in den Bereichen Beleuchtung, Beheizung, Bewässerung und Steuerung konnten jedoch riesige, künstlich beleuchtete Gewächshäuser in geschlossenen Räumen errichtet werden (Abbildung 1). Diese Anlagen können im Vergleich zu konventioneller Landwirtschaft und Low-Tech-Gewächshäusern deutlich höhere Erträge erzielen.

Abbildung 1: Beispiel eines Hallengewächshauses mit LED-Beleuchtung

Es gibt noch einige weitere Vorteile. Die verschiedenen Pflanzenentwicklungsstadien können durch die Nutzung unterschiedlicher Lichtwellenlängen gesteuert werden, um höhere Erträge zu erzielen oder die Wachstumszeiten zu verkürzen. Ein geschlossener Wasserkreislauf sorgt für einen nachhaltigen Wasserverbrauch. Auch die Bekämpfung bzw. Eliminierung von Insekten-, Pilz- oder Bakterienschädlingen ist durch das geschlossene System effektiver. Darüber hinaus kann der CO2-Fußabdruck der Nahrungsmittelproduktion und -versorgung durch den Bau von Anlagen in der Nähe von Ballungszentren deutlich reduziert werden, da Transportwege verkürzt bzw. der allgemeine Transportbedarf reduziert wird.
Einer der bedeutendsten Fortschritte für den stetig wachsenden Einsatz von Indoor-Gewächshäusern ist die Weiterentwicklung der LED-Technologie. Ursprünglich waren LEDs sehr teuer, aber mit dem Fortschritt in der Herstellung werden LEDs immer mehr zur bevorzugten Lösung für den Indoor-Anbau. LEDs können jetzt so gestaltet werden, dass sie sehr spezifische Lichtwellenlängen emittieren und dabei extrem robust und im Vergleich zu anderen Beleuchtungstechnologien relativ klein sind. Darüber hinaus sind LEDs langlebig, haben einen niedrigen Energiebedarf und erzeugen nicht so viel Wärme, wodurch sie besonders effizient sind. Dadurch werden die Betriebskosten von großen Hallengewächshäusern erheblich gesenkt.

APPLICATION NOTE

LED‘s – Die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

2. 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 - so genannte Zellorganelle - 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, da diese Wellenlängen nicht absorbiert werden, und Karotten erscheinen orange, da sie sehr wenig Chlorophyll enthalten. Die gebräuchlichsten Pigmente sind Chlorophyll A, Chlorophyll B und die Carotinoide**.**

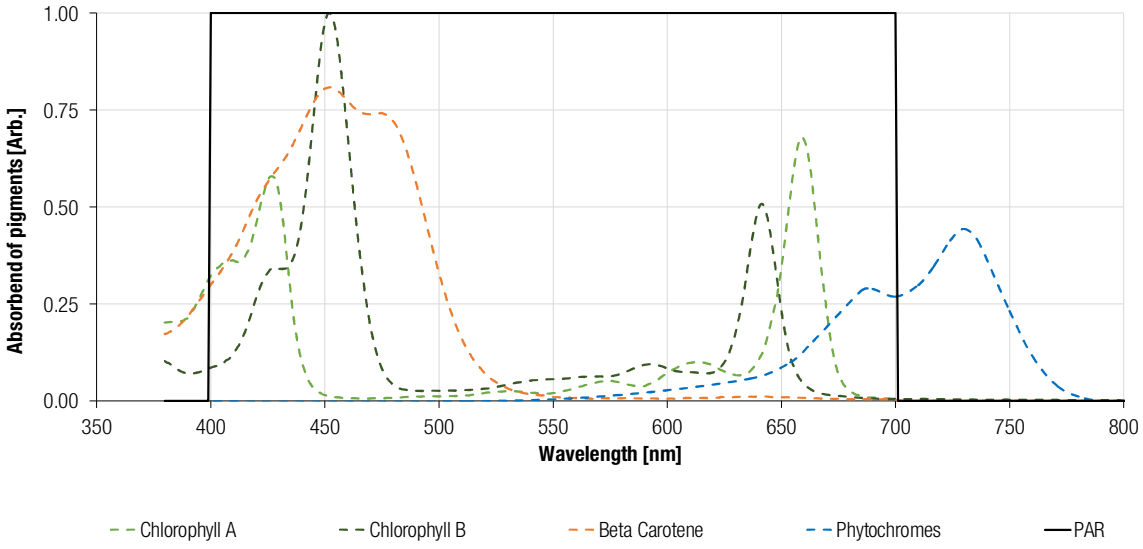

Abbildung 2: Charakteristische Absorptionsspektren verschiedener Pigmente für die Photosynthese [1]

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 nm und ~675 nm aufweist. Chlorophyll B, ursprünglich als zusätzliches Lichtpigment betrachtet, erweitert den Wellenlängenbereich, der für die Photosynthese mit Absorptionsspitzen bei ~460 nm 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, welche ihnen ihre grüne Farbe verleihen. Carotinoide haben einen vergleichsweise viel breiteren Wellenlängenabsorptionsbereich als die Chlorophyllen mit einem Absorptionsbereich von ~400 nm 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[2]. Deshalb überschneiden sich die Absorptionswellenlängen der Carotinoide mit denen der Chlorophyllen. Darüber hinaus sind Phytochrome Photorezeptoren (Lichtsensoren), welche zahlreiche Prozesse bei 660 nm 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.

Da 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 [3].

3. Horticulture LED‘s

Leuchtdioden sind feste, lichterzeugende Komponenten, die, wie bereits erwähnt, aufgrund ihrer Vorteile gegenüber konventioneller Lichtquellen wie Glühbirnen, Leuchtstoffröhren, Natriumdampf-Hochdrucklampen und Quecksilberlampen zu einem der entscheidenden Faktoren für den Ausbau von Indoor-Gewächshäusern geworden sind. Ihr Hauptvorteil liegt in der Möglichkeit, nur bestimmte Wellenlängen des Lichts zu erzeugen. Wie wir im vorigen Kapitel gesehen haben, nutzen Pflanzen nur einen bestimmten Wellenlängenbereich für das Wachstum und haben unterschiedliche Anforderungen bei unterschiedlichen Frequenzen. Es wäre höchst ineffizient, durch elektrische Energie Wellenlängen zu erzeugen, welche die Pflanze nicht nutzen wird bzw. kann. Daher konzentrieren sich die Hersteller in der Regel auf LEDs mit Wellenlängen von 660 nm (rot) und 450 nm (blau). Neuere Untersuchungen haben 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 Wellenlängen regulieren 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, da 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),** dass 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 diese Wellenlängen zellschädigend sind, sind einige Pflanzen (z.B. Salat, Tomaten) gegen diese Wellenlängen 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 Polyphenolen verantwortlich sein, die für die menschliche Ernährung wichtig sind**.**

APPLICATION NOTE

LED‘s – Die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

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. Im Hinblick auf die Blütezeit müssen Zierpflanzen ihre Blüten so lange wie möglich erhalten, während sie in der Ananas die Blütezeit optimal hemmen, um die Erntezeit besser kontrollieren zu können. Deshalb suchen Gewächshausbetreiber und Hersteller von Beleuchtungsanlagen immer wieder nach neuen Wellenlängen-Kombinationen, welche ein speziell abgestimmtes Lichtsprektrum für bestimmte Arten und sogar Sorten (Unterarten) von Pflanzen erzeugen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bietet Würth Elektronik die WE-SMDC SMD Mono-color Ceramic LED Waterclear Serie an (Abbildung 3). Das Spektrum von WL-SMDC wurde um die Wellenlängen von 450 nm (Deep Blue), 660 nm (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 (Abbildung 4).

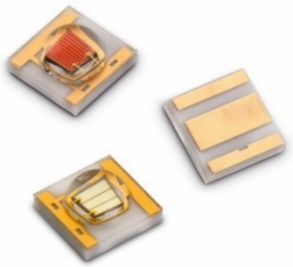

Abbildung 3: Würth Elektronik WL-SMDC SMD Mono-color Ceramic LED Waterclear

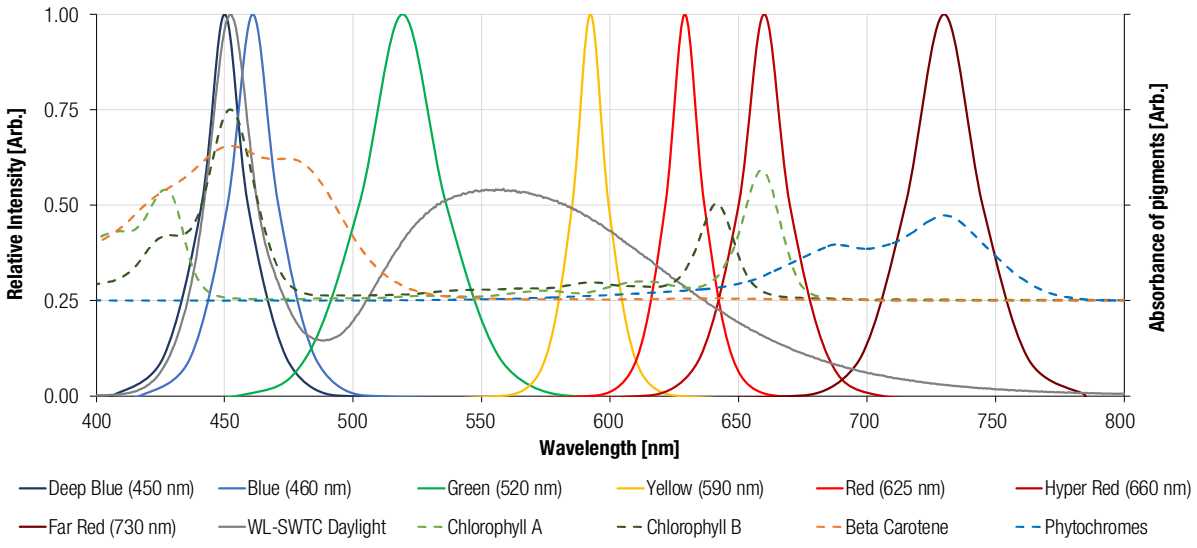

Abbildung 4: Die Emissionsspektren der WL-SMDC-LEDs überlagert mit den Absorptionsspektren der photosynthetischen Pigmente.

APPLICATION NOTE

LED‘s – Die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

4. Wichtige Parameter, Kenngrößen und Einheiten

Wie bei jeder neuen Anwendung wurden von verschiedenen Organisationen und Unternehmen verschiedene 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 Wahrnehmung 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 Horticulturebereich aufgelistet [4].

- **Wellenlänge (λ, nm) -** gibt die Wellenlänge des von der LED abgestrahlten Lichts an.
- **Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, ~400 nm – ~700 nm) -** das ist der konventionell genutzte Wellenlängenbereich des Lichts, welche Pflanzen für die Photosynthese benötigen (Abbildung 2). Diese Zahl kann manchmal irreführend sein, da in diesem Bereich alle Wellenlängen als gleich wichtig für die Photosynthese angesehen werden, obwohl, wie wir oben gesehen haben, 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.
- **Photosynthetischer Photonenfluss (PPF, µmol-s-1) -** damit wird die Gesamtmenge der photosynthetisch aktiven Photonen beziffert, die von LEDs pro Sekunde erzeugt werden. 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.

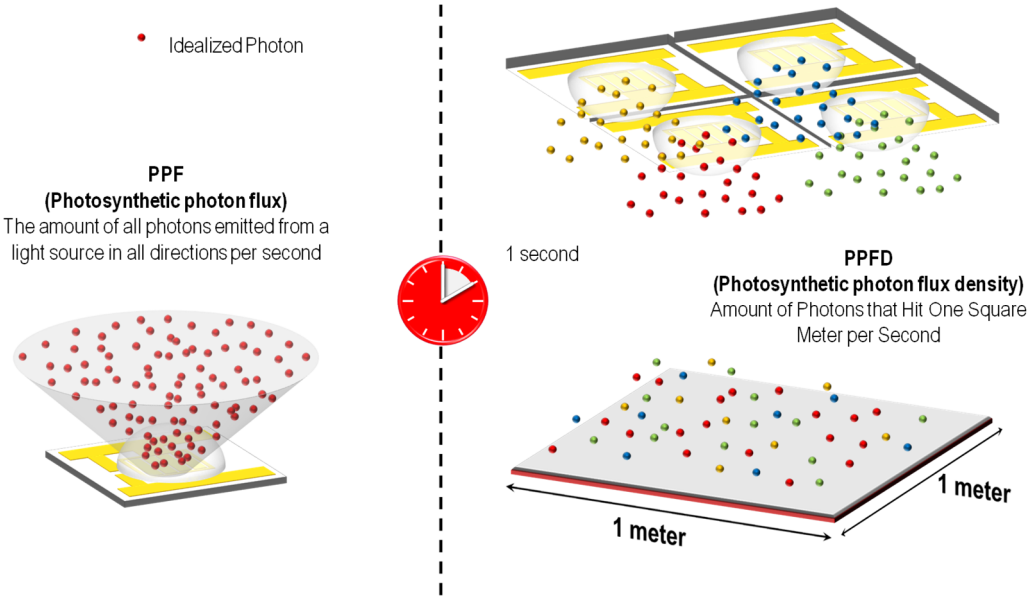

Abbildung 5: Der Unterschied zwischen Photosynthetisch aktivem Photonenfluss links und Photosynthetischer Photonenflussdichte rechts mit mehreren Farben

- **Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD, µmol-m-2-s-1) -** sie quantifiziert die Gesamtmenge der photosynthetisch aktiven Photonen, die pro Sekunde die Messoberfläche erreichen. Dieser Parameter ist stark abhängig von der Entfernung und dem Winkel von der Quelle. Dies wird normalerweise mit einem Quantenmessgerät gemessen, das nur auf PAR Wellenlängen reagiert.
- **Photon efficacy (µmol·J)** – 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 Energieumwandlungswirkungsgrad, 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.

5. Zusammenfassung

Die Verbesserung der Effizienz, der optischen Leistung, des Preises und der Lebensdauer haben dazu geführt, dass LEDs aus dem Forschungsstadium der Entwicklung zu einer innovativen, praktikablen Alternative zu herkömmlichen Lichtquellen in der Anwendung im Horticulturebereich 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 für die, für die Photosynthese notwendigen Wellenlängen, sowie für spezielle Anforderungen, die für bestimmte Anlagentypen erforderlich sind.

6. Referenzen

[1] Jigang, L., Gang, L., et al, 2011, Phytochrome Signaling Mechanisms, **The Arabidopsis Book / American Society of Plant Biologists**, 9, e0148.

[2] Yamamoto, H.Y., Bassi, R., 2006, Chapter 30: Carotenoids: Localisation and function. **Oxygenic Photosynthesis: The Light Reactions**, P539-563, Springer Science & Business Media.

[3] Hogewoning, S.W., Douwstra, P., et al, 2010, An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with climate room irradiance spectra, **Journal of Experimental Botany**, 61 (5), P1267-1276.

[4] Salisbury, F.B., 1996, Chapter 9: Electromagnetic Radiation, **Units, Symbols, and Terminology for Plant Physiology: A Reference for Presentation of Research Results in the Plant Sciences**, P75-80, Oxford University Press.

Würth Elektronik ANO002a Englische Ausgabe

APPLICATION NOTE

LED‘s – Die Zukunft der Horticulture-Beleuchtung

IMPORTANT NOTICE

The Application Note is based on our knowledge and experience of typical requirements concerning these areas. It serves as general guidance and should not be construed as a commitment for the suitability for customer applications by Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. The information in the Application Note is subject to change without notice. This document and parts thereof must not be reproduced or copied without written permission, and contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose.

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG and its subsidiaries and affiliates (WE) are not liable for application assistance of any kind. Customers may use WE’s assistance and product recommendations for their applications and design. The responsibility for the applicability and use of WE Products in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate and investigate, where appropriate, and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

The technical specifications are stated in the current data sheet of the products. Therefore the customers shall use the data sheets and are cautioned to verify that data sheets are current. The current data sheets can be downloaded at www.we-online.com. Customers shall strictly observe any product-specific notes, cautions and warnings. WE reserves the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services.

WE DOES NOT WARRANT OR REPRESENT THAT ANY LICENSE, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, IS GRANTED UNDER ANY PATENT RIGHT, COPYRIGHT, MASK WORK RIGHT, OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT RELATING TO ANY COMBINATION, MACHINE, OR PROCESS IN WHICH WE PRODUCTS OR SERVICES ARE USED. INFORMATION PUBLISHED BY WE REGARDING THIRD-PARTY PRODUCTS OR SERVICES DOES NOT CONSTITUTE A LICENSE FROM WE TO USE SUCH PRODUCTS OR SERVICES OR A WARRANTY OR ENDORSEMENT THEREOF.

WE products are not authorized for use in safety-critical applications, or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death. Moreover, WE products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network etc. Customers shall inform WE about the intent of such usage before design-in stage. In certain customer applications requiring a very high level of safety and in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health, customers must ensure that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications. Customers acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of WE products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by WE. CUSTOMERS SHALL INDEMNIFY WE AGAINST ANY DAMAGES ARISING OUT OF THE USE OF WE PRODUCTS IN SUCH SAFETY-CRITICAL APPLICATIONS.

USEFUL LINKS

Application Notes:
www.we-online.com/appnotes

REDEXPERT Design Tool:
www.we-online.com/redexpert

Toolbox:
www.we-online.com/toolbox

Product Catalog:
www.we-online.com/products

CONTACT INFORMATION

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg · Germany
Tel. +49 7942 945 - 0 · Fax +49 7942 945 - 5000
appnotes@we-online.de · www.we-online.com