

NACHHALTIGE
TECHNOLOGIEN

LED IT GROW

DIE LEUCHTDIODE ALS WACHSTUMSTURBO
FÜR PFLANZEN



Bild: Osram

at.rs-online.com



LED it grow

Die Leuchtdiode als Wachstumsturbo für Pflanzen

Bis zum Jahr 2050 soll die Weltbevölkerung auf 9,7 Milliarden Menschen anwachsen. Die Landwirtschaft muss sich der Aufgabe stellen, diese Menschen zu ernähren und dabei gleichzeitig möglichst schonend mit den Ressourcen Boden, Wasser und Energie umgehen. Ein Lösungsansatz hierfür ist LED-Horticulture: Diese Technik nutzt überdachte Anbauflächen und verzichtet auf das Sonnenlicht. Sie fußt auf der Erkenntnis, dass sich das Wachstum von Pflanzen durch gezielt eingesetztes farbiges Licht von Leuchtdioden optimieren lässt.

LEDs sind energiesparend und minimieren mittelbar den Einsatz von Pestiziden und Dünger sowie den Verbrauch von Wasser- und Fläche. Transportwege können durch den Bau von Hallen-Gewächshäusern in der Nähe urbaner Zentren verkürzt und so die CO₂-Belastung reduziert werden. In den USA beispielsweise werden 98% des Salats in Kalifornien und Arizona angebaut. Um das Gemüse zu den Verbrauchern in New York zu bringen, legt ein Lkw oder ein Güterzug bis zu 4.200 Kilometer zurück. Da die Transportkosten einen großen Einfluss auf den Verkaufspreis haben, könnte das Urban-Farming-Konzept Gemüse sogar günstiger machen.

Versorgungstrends wie Urban Farming (Lebensmittelproduktion in städtischen Ballungsgebieten) bzw. Vertical Farming (vertikaler bzw. senkrechter Pflanzenanbau) werden durch entsprechende Beleuchtung mit LEDs erst möglich.

Neben der Lebensmittelproduktion sehen Analysten auch die Legalisierung von Cannabis als Wachstumstreiber der LED-Horticulture.

Der Kostenaspekt

Die wichtigste Lichtquelle für Pflanzen im Hallenanbau waren früher Hochdruck-Natriumdampf-Lampen. LEDs sind jedoch energieeffizienter, erzeugen weniger Wärme und haben eine längere Lebensdauer (Tabelle 1).

Lichtquelle	Eingangsleistung (W)	PPF (μmol s ⁻¹)	Photoneneffizienz (μmol J ⁻¹)
Hochdruck-Natriumdampf			
400W (magnetisch)	443	416	0,94
1000W (magnetisch)	1067	1090	1,02
1000W (elektrisch)	1024	1333	1,30
LED (@350mA)			
WL-SMDC Deep Blue	1,12	2,31	2,06
WL-SMDC Hyper Red	0,84	1,81	2,15
WL-SMTC Moonlight	1,12	1,58	1,41
WL-SMTC Daylight	1,12	1,69	1,51

Tabelle 1. Photoneneffizienz von LED- und HID-Lichtquellen im Vergleich (Quelle: Würth Elektronik).

Im Allgemeinen sind die Investitionskosten von Natriumdampf-Hochdrucklampen zwei- bis viermal niedriger als die von LED-Systemen. Aber der Return on Investment einer LED-basierten Beleuchtung kann aufgrund des geringeren Energieverbrauchs schon nach ein bis zwei Jahren erreicht sein. Dieser Zusammenhang wird als Steckdosen-Effizienz bezeichnet, sie kennzeichnet das Verhältnis zwischen optischer Leistung und elektrischer Leistung beziehungsweise, welcher Prozentsatz der Leistung in Licht umgewandelt wird.

Das effizienteste verfügbare Hochdruck-Natriumsystem kann eine Steckdosen-Effizienz von mehr als 50% erreichen. Das effizienteste LED-System mit einer Kombination aus hyperroten 616-Nanometer-LEDs und tiefblauen 450-Nanometer LEDs (diese beiden Wellenlängen sind perfekt für Gartenbau-Anwendungen) kann Werte über 80% erreichen.

Bei entsprechenden Temperaturen (unter der maximalen Betriebstemperatur) arbeiten LEDs bis zu 60.000 Stunden, was 9,1; 13,7 und 20,5 Jahren entspricht, wenn sie 18, 12 bzw. 8 Stunden pro Tag betrieben werden. Bei höheren Temperaturen oder bei Betrieb mit höheren Strömen sinkt dieser Wert extrem. LEDs können bis auf rund 70% ihrer Lichtleistung betrieben werden. (Quelle: Würth Elektronik)

Beidseitig bestückte Natriumdampf-Hochdrucklampen (1000W) haben eine Lebensdauer von 10.000 bis 24.000 Stunden, das heißt 3,7; 5,5 und 8,2 Jahre bei einem durchschnittlichen Einsatz von 18, 12 und 8 Stunden pro Tag. Aufgrund der gewünschten Einhaltung des Lichtstromes wird jedoch erwartet, dass eine Lampe innerhalb der ersten fünf Jahre ausgetauscht wird. (Quelle: Würth Elektronik)

Halogen-Metalldampflampen haben eine Lebensdauer zwischen 6.000 und 20.000 Stunden, während Leuchtstofflampen (T-5 und T-8) eine Lebensdauer von 20.000 bis 36.000 Stunden haben. Auch hier ist aufgrund der Einhaltung eines bestimmten Lumenwertes damit zu rechnen, dass die Lampen ausgetauscht werden, bevor dieses Maximum erreicht ist. (Quelle: Würth Elektronik)

Die Farbe macht's

Verschiedene Eigenschaften des Lichts wirken zusammen, um das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen zu steuern: Es sind in erster Linie das richtige Spektrum der Lichtquelle, die Effizienz der Lichtquelle und die Lichtintensität. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielen die Lebensdauer sowie Investitions- und Betriebskosten der Beleuchtung eine wichtige Rolle.

Weiße LEDs sind immer noch effizienter als Hochdruck-Natriumsysteme, aber mit einer Steckdosen-Effizienz von 66 Prozent liegt diese Option deutlich unter einer direkt emittierenden Rot/Blau-Kombination.

Da Pflanzen "unbeweglich" sind, können sie nur auf einstrahlende Wellenlängen und Lichtintensitäten reagieren. Was beispielsweise Reaktionen auf das Wachstum im Schatten, während der Tag/Nacht-Periode oder auf unterschiedliches Klima hervorruft. Mit künstlichem Licht unterschiedlicher Wellenlängen können deshalb die Wachstums- und Entwicklungsstadien von Pflanzen gesteuert oder manipuliert werden. Zu den daraus erfolgenden Reaktionen zählen die Geschwindigkeit der Photosynthese (Photosyntheserate), die Beeinflussung der Pflanzenanatomie (Photomorphogenese) und die Bestimmung der Wachstumsrichtung (Phototropismus).

Die von Pflanzen betriebene Photosynthese ist ein Prozess, bei dem Licht in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird. Sie erzeugt energiereiche Biomoleküle aus energieärmeren Stoffen mit Hilfe von Lichtenergie. Bei diesem Prozess wird mithilfe von lichtabsorbierenden Farbstoffen (Pigmenten) wie Chlorophyll Licht in chemische Energie umgewandelt. Diese wird dann hauptsächlich zum Aufbau von Kohlenhydraten aus Kohlenstoffdioxid und Wasser verwendet.

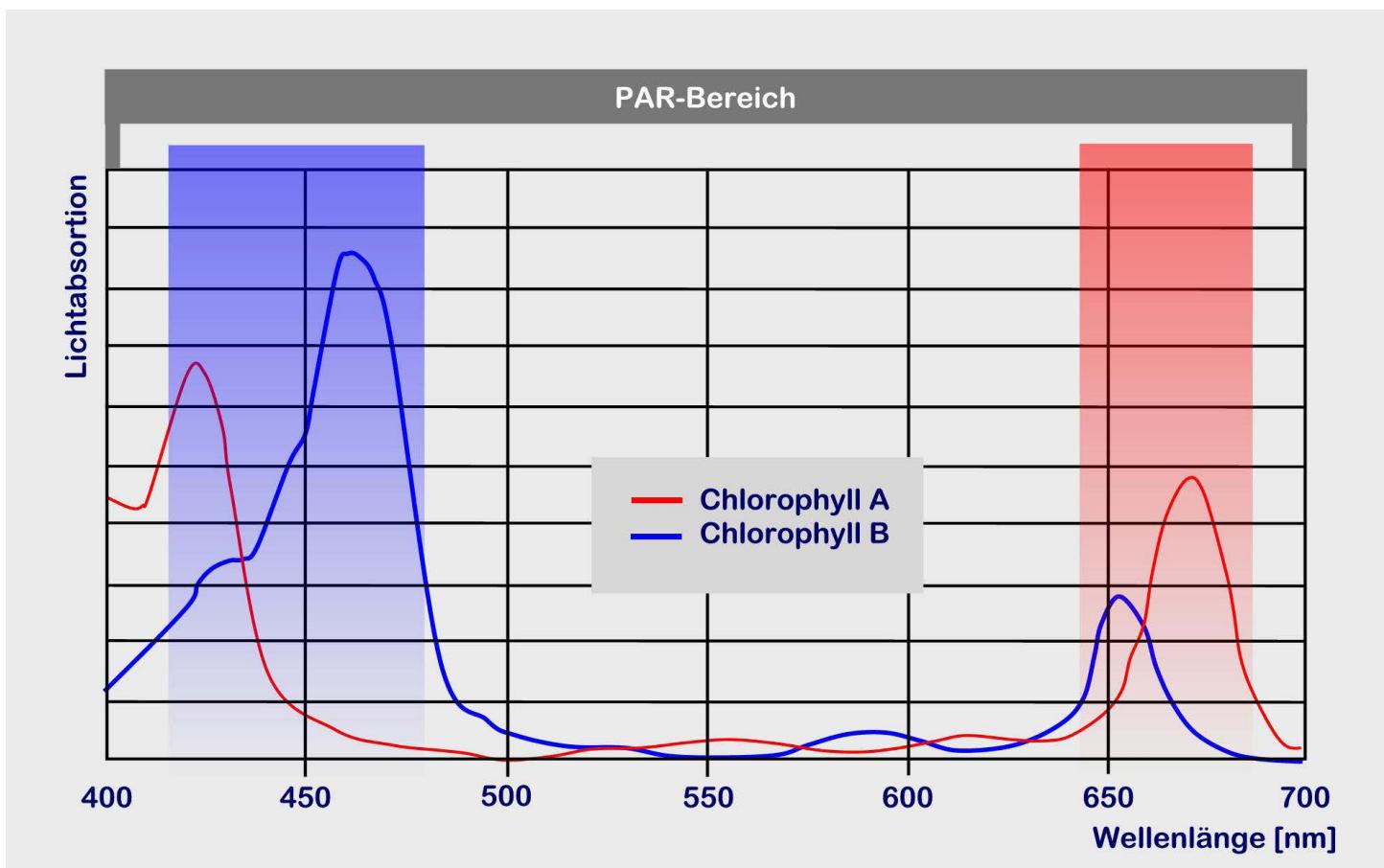


Bild 1. Photosynthetisch aktive Strahlung im PAR-Bereich.

Die wichtigsten Pigmente sind Chlorophyll A und Chlorophyll B. Chlorophyll A ist das primäre Lichtpigment, das etwa 75% der photosynthetischen Aktivität ausmacht und Absorptionsspitzen bei ~435nm und ~675nm aufweist. Chlorophyll B erweitert den Wellenlängenbereich, der für die Photosynthese mit Absorptionsspitzen bei ~460nm und ~640nm genutzt werden kann. Dieser rot/blaue Bereich wird als photosynthetisch aktive Strahlung oder PAR-Bereich (Photosynthetically Active Radiation) bezeichnet und reicht von etwa 400nm bis 700nm (Bild 1). Experimente zeigen, dass ein rot-blaues Spektrum zu einem deutlich höheren Anteil an Biomasse führt als das Spektrum einer weißen Lichtquelle.

Grünes Licht (500 - 600nm) wurde lange Zeit als unwichtig für die Pflanzenentwicklung eingeschätzt, Untersuchungen haben aber ergeben, dass Pflanzen im Schatten anderer Pflanzen als Reaktion auf die "shade avoidance response" besonders auf diese Wellenlänge ansprechen. Licht in diesem Wellenlängenbereich wird in der Regel mit weißen LEDs erzeugt, welche auch blaue Wellenlängen liefern.

Beim Indoor-Farming werden heute überwiegend rote und blaue oder auch rote und weiße LEDs kombiniert. Weiße LEDs deshalb, weil sie "von Natur aus" einen hohen Blauanteil emittieren. Sie liefern allerdings auch Licht im roten Wellenlängenbereich, der in der Regel bereits von roten LEDs im Beleuchtungssystem abgedeckt wäre. Eine Beleuchtung nur "in weiß" würde erheblich mehr Energie für eine vergleichbare Anzahl roter Photonen benötigen als direkt rot emittierende LEDs.

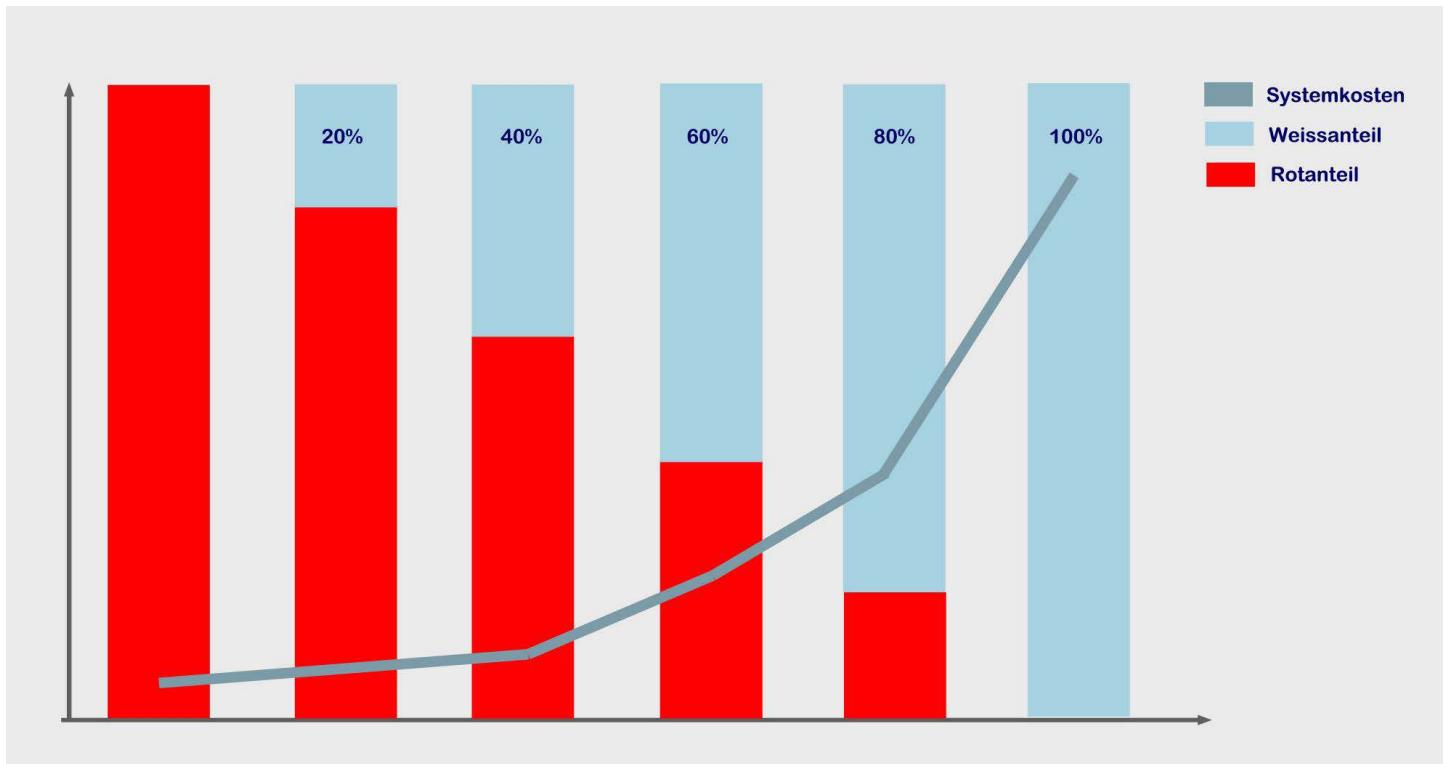


Bild 2. Kostenentwicklung beim Einsatz roter und weißer LEDs

Osram hat bei seiner [Osconiq S 5050](#) eine höhere Systemausbeute im rot-weißen Lichtspektrum erreicht, indem der Anteil der phosphorkonvertierten roten Photonen reduziert wird. Ein spezieller Leuchtstoff setzt sozusagen die Schere beim roten Spektralbereich an. Der Rotanteil im weißen Licht der LED ist dadurch erheblich geringer und eine Rot/Weiß-LED-Kombination würde sich energiemäßig rechnen.

“Lichtfutter”: Der richtige Mix

Leuchten für den Gartenbau müssen eine gewisse Menge an Photonen bereitstellen, um ein effizientes Pflanzenwachstum zu gewährleisten. Die erforderliche Lichtintensität für verschiedene Pflanzenarten variiert und muss aus folgenden Größen zusammengestellt werden:

- Aus der Leistung einer Leuchte in **PPF (Photosynthetic Photon Flux)** - die Menge der emittierten Photonen pro Sekunde. Die Einheit ist $\mu\text{mol}/\text{s}$.
- Aus der Menge an Photonen, die in einer Sekunde auf einen Quadratmeter Fläche treffen. Hier ist die Kenngröße **PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density)**. Die Einheit ist $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.
- Und die **Photosynthetic Photon Efficacy (PPE)**. Sie gibt an, wie effizient eine Beleuchtung ist, wenn sie elektrische Energie in Photonen im PAR-Bereich umwandelt. Die Einheit ist $\mu\text{mol}/\text{J}$.

So benötigen Tomaten eine photosynthetische Photonenflussdichte oder PPFD zwischen 300 und $500\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, Salat zwischen 150 und $300\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ und Cannabis zwischen 300 und $1100\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

Pro Quadratmeter führt eine höhere Photonenintensität in der Regel zu mehr Pflanzenwachstum durch die Photosynthese, aber dieser Prozess ist begrenzt und hängt von der Menge an Kohlendioxid ab, die die Pflanzen aufnehmen und verarbeiten können. Für jede Pflanzenart gilt eine andere logarithmisch geformte Kurve.

Beim Einsatz von LED-Beleuchtungen kann an vielen optischen und elektrischen Stellschrauben gedreht werden, um Erträge zu verbessern oder Wachstumsphasen zu beeinflussen. Die Erstellung eines entsprechenden Lichtrezepts ist komplex. Zur Unterstützung der Anwender stellen Leuchtdioden-Hersteller Online-Tools zur Entwicklung von sogenannten Lichtrezepten zur Verfügung.

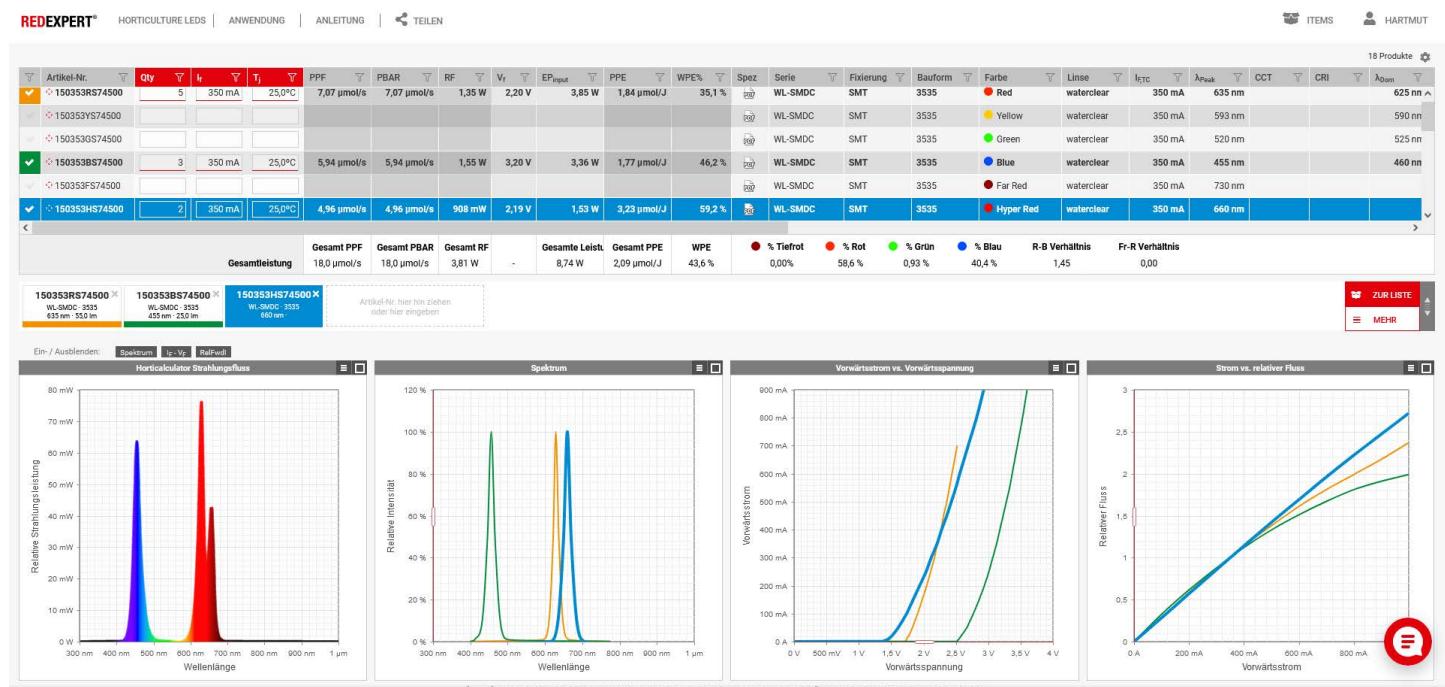


Bild 3. Würths „[Horticulator](#)“ ist Bestandteil des kostenlosen Online-Design-Werkzeugs Redexpert. (Bild: Eigener Screenshot Oktober 2021)

Der „[Horticulator](#)“ von Würth Elektronik ist Bestandteil des kostenlosen Online-Design-Werkzeugs Redexpert. Der Horticulator ermöglicht die Gestaltung individueller Lichtrezepte für den Einsatz von Horticulture-LEDs. Aus Angaben zum Beispiel zur Anzahl der verwendeten LEDs und des Eingangsstroms können unter anderem Vollspektren, fotosynthetischer Photonenfluss (PPF) und Wellenlängen-Farbverhältnisse berechnet werden.

Zur Entwickler-Unterstützung bietet Würth ein „[Lighting Development Kit](#)“ an (der aufmerksame Leser erkennt: Die Überschrift für diesen Beitrag ist hier „geklaut“). Es basiert auf einem Horticulture-LED-Panel mit LEDs in Deep Blue, Hyper Red, Far Red und White und einer Leistung von bis zu 30μmol/s.



Bild 4. Lighting Development Kit von Würth Elektronik (Bild: RS Components)

Erste Simulationen für Beleuchtungen können auch mit dem online frei verfügbaren [Gartenbau-Tool](#) von Osram OS realisiert werden.

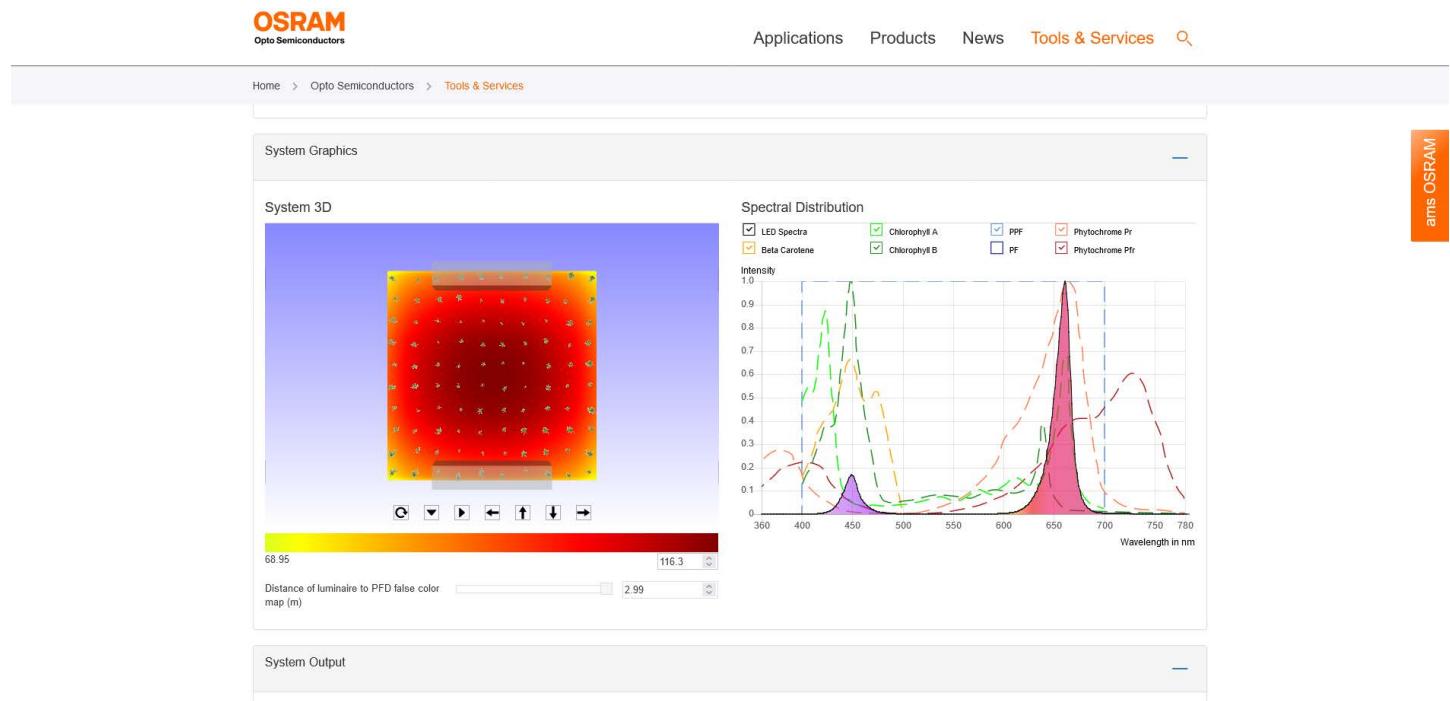


Bild 5. [Gartenbau-Tool](#) von Osram OS (Bild: Eigener Screenshot Oktober 2021)

Weiterhin hat Osram für F&E-Zwecke das LED-basierte Pflanzenleuchten-System [Phytofy RL](#) entwickelt. Forscher und Landwirte können es im Labor oder in Klimakammern nutzen, um neue pflanzenspezifische Licht- und Wachstumsrezepte zu entwickeln, die später die gewünschten Eigenschaften wie Qualität, Menge und Inhaltsstoffe hervorbringen. Das kalibrierte System liefert eine Karte über die Bestrahlungsstärke, die von einer Software berechnet wird und Messungen überflüssig macht. Nutzer bekommen nach der Registrierung fünf Lichtrezepte, die von Osram entwickelt wurden. Das Design (667mm x 299mm x 44mm, knapp 9kg) ist für vertikale Farmen, Regalsysteme und Wachstumskammern optimiert.

Kleines Horticulture-Glossar

- **Rotes Licht (630 - 660 nm)** ist eine wichtige Wellenlänge für die Photosynthese und ist primär für das Längenwachstum verantwortlich. Rotes Licht beeinflusst auch das Blühen, die Ruhephase und die Keimung.
- **Blaues Licht (400 - 520 nm)** ist eine weitere wichtige Wellenlänge für die Photosynthese, muss aber mit anderen Wellenlängen gemischt werden, da zu viel Blau das Wachstum hemmen kann. Diese Wellenlänge wird auch mit der Beeinflussung der Chlorophyll-Konzentration, der Steigerung des Seitenknospen-Wachstums und der Blattdicke in Verbindung gebracht.
- **Dunkelrotes Licht (720 - 740 nm)** aus dem IR-Spektrum beeinflusst die Keimung und soll die Blütezeit von Pflanzen verkürzen und das Längenwachstum fördern.
- **UV-Licht (280 - 400 nm)** befindet sich im Forschungsstadium. Eigentlich zellschädigend, sind einige Pflanzen (z.B. Salat, Tomaten) gegen diese Wellenlängen widerstandsfähig. Studien deuten darauf hin, dass diese Wellenlängen zur Pilzbekämpfung eingesetzt werden können. UV-Licht kann für die Bildung von Antioxidantien und Polyphenolen verantwortlich sein, die für die Pflanzenernährung wichtig sind.
- **Wellenlänge (λ , nm)** - gibt die Wellenlänge des von der LED abgestrahlten Lichts an.
- **Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, ~400 nm - ~700 nm)** - ist der Wellenlängenbereich des Lichts, den Pflanzen für die Photosynthese benötigen. 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, $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)** - 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 quantifiziert wird, die pro Anzahl der Photonen erzeugt werden.
- **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 Mesooberfläche 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 ($\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$)** - Dieser Parameter gibt an, wie effizient die LED bei der Erzeugung von PPF pro Joule der eingesetzten elektrischen Energie ist.
- **Wall-plug efficiency (WPE, %)** - Das 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.