



LEDs: het pad naar de praktijk

Een roadmap voor tomaat

Mark van Hoogdalem, Kees Weerheim, Arie de Gelder en Anja Dieleman

Rapport WPR-1138

Referaat

In de afgelopen jaren is het elektriciteitsgebruik in de glastuinbouw snel toegenomen door toenemende arealen belichting en toename van de geïnstalleerde vermogens. Echter, de stijging van de energieprijzen begin 2022 heeft duidelijk gemaakt dat de afweging tussen kosten en opbrengsten bij belichting een grote invloed heeft op de keuze voor aanschaf en inzet van de belichting. In de ontwikkeling van duurzame, fossielvrije teeltsystemen spelen LEDs een belangrijke rol, vanwege hun hoge efficiëntie. De overstap naar LED belichting een systeemverandering is: het vervangen van SON-T door LEDs heeft consequenties voor de energiebalans van de kas, morfologie en fysiologie van het gewas, en overige factoren als gewasgezondheid. In dit rapport wordt geschetst welke ontwikkelpaden er zijn ten aanzien van LED belichting, waar we staan op deze ontwikkelpaden, en welke uitdagingen er nog zijn in de ontwikkeling van kennis over gebruik van LED belichting in een fossielvrij, duurzaam teeltsysteem voor tomaten.

Abstract

In recent years, electricity consumption in greenhouse horticulture has increased rapidly due to increasing areas of lighted cultivation and the increase in installed power. However, the rise in energy prices at the beginning of 2022 has made it clear that the trade-off between costs and revenues with respect to lighting has a major influence on the choices in purchase and use of lighting. LEDs are essential in the development of sustainable, fossil-free cultivation systems, due to their high efficiency. The transition to LED lighting is a system change: replacing HPS with LEDs has consequences for the energy balance of the greenhouse, morphology and physiology of the crop, and other factors such as crop health. This report outlines which development paths there are with regard to LED lighting, where we stand on these development paths, and what challenges there are still in the development of knowledge about the use of LED lighting in a fossil-free, sustainable cultivation system for tomatoes.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1138

Projectnummer: 3742295500

DOI: <https://doi.org/10.18174/575025>

Thema: Kasklimaat & energie

Dit project is gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en verduurzaming in de glastuinbouw van Glastuinbouw Nederland en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Disclaimer

© 2022 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding en doelstelling	7
	1.1 Achtergrond	7
	1.2 Doel	7
2	Analyse telen onder LEDs	9
	2.1 LED en de energiebalans van kas en gewas	9
	2.1.1 Principe van LED licht en hoe de input aan stroom wordt omgezet in licht en warmte.	9
	2.1.2 Warmteafgifte: Convectief, waterkoeling en straling	9
	2.1.3 Gewas-/Planttemperatuur, per planten deel	10
	2.1.4 Verdamping en daaraan gerelateerd nutriënten opname	11
	2.2 LED en de fysiologie van het gewas	11
	2.2.1 Spectrum	11
	2.2.1.1 Efficiëntie van lichtkleuren in de fotosynthese	12
	2.2.1.2 Perceptie van licht: fotoreceptoren	12
	2.2.1.3 Effect van lichtspectrum op tomaat	13
	2.2.2 Intensiteit	14
	2.2.3 Lichtverdeling	15
	2.2.4 Verhouding natuurlijk licht – LED licht	16
	2.2.5 Daglengte	16
	2.2.6 Dynamisch sturen	17
	2.2.6.1 Intensiteit	17
	2.2.6.2 Spectrum	18
	2.2.7 Type en rasverschillen	18
	2.3 LED ontwikkelingen	19
	2.3.1 Top- en tussenbelichting	19
	2.3.2 Integratie van LED in het kassysteem en de aansturing	19
	2.4 Overige factoren	20
	2.4.1 Arbeidsomstandigheden	20
	2.4.2 Effecten op gewasbescherming en biologische bestrijders	20
	2.4.3 Effecten op bestuiving	21
	2.4.4 Vruchtkwaliteit.	21

3	Visie en roadmap	23
3.1	Techniek	24
3.1.1	Efficiëntie	24
3.1.2	Output en koeling	25
3.1.3	Ontwerp, materiaalkeuze en duurzaamheid	25
3.1.4	Aansturing	25
3.2	LED licht en gewasfysiologie	26
3.2.1	Belichting naar behoefte	26
3.2.2	Lichtspectrum	26
3.3	LEDs en de energiebalans kas en gewas	27
3.3.1	Veranderingen van de energiebalans kas en gewas	27
3.3.2	Effecten op gewas	27
3.3.3	Invulling warmtebehoefte	28
3.4	Overige factoren	29
3.4.1	Gewasbescherming en bestuiving	29
3.4.2	Werkbaarheid en menselijke gezondheid	29
3.4.3	Stroomvoorziening	29
3.4.4	Kosten	30
3.4.5	Regelgeving	30
4	Conclusies en aanbevelingen.	31
4.1	Adoptie door telers	32
	Literatuur en internetbronnen	33

Samenvatting

In de afgelopen jaren is het elektriciteitsgebruik in de sector snel toegenomen door toenemende arealen van en intensiteiten bij de belichte teelten. Aan de andere kant heeft de stijging van de energieprijzen begin 2022 duidelijk gemaakt dat de afweging tussen kosten en opbrengsten bij belichting een grote invloed heeft op de keuze van de ondernemers over inzet van belichting. Bovendien moet het gasgebruik dat met het maken van elektriciteit voor belichting gepaard gaat teruggebracht worden om de CO₂ reductie doelstelling te halen. Belangrijke elementen om dit te realiseren zijn de volledige vervanging van SON-T belichting door LED, en strategieën om te belichten op behoefte van het gewas. De sector is zeer geïnteresseerd in LED belichting, maar implementatie ging tot begin 2022 langzaam. De stijging van de energieprijzen zal de implementatie versnellen. De uitdaging is dat de overstap naar LED belichting een systeemverandering is: het vervangen van SON-T door LEDs heeft consequenties voor de energiebalans van de kas, morfologie en fysiologie van het gewas, en overige factoren als gewasgezondheid. Dat betekent dat zowel de teeltstrategie als klimaatstrategie, watergift en bemesting op de overstap naar LED belichting afgestemd moeten worden.

Er was en is behoefte aan een visie hoe de sector tot een klimaatneutrale teelt kan komen, en wat daarvoor de komende jaren moet gebeuren. Het doel van dit project is het opstellen van deze roadmap richting een klimaatneutrale duurzame teelt onder LED belichting. In eerste instantie voor tomaat, maar de benadering kan als basis dienen voor LED toepassingen in het algemeen. Om tot een roadmap te komen, is eerst een inventarisatie gemaakt van de belangrijkste aspecten waar rekening mee moet worden gehouden bij de transitie van telen onder SON-T naar het telen onder LEDs. De resultaten van deze inventarisatie staan beschreven in hoofdstuk 2. Belangrijke onderwerpen zijn onder andere het effect van telen onder LEDs op de energiebalans van de kas en het gewas, en daarmee ook op de verdamping en de opname van nutriënten, de invloed van het spectrum op het gewas, dynamisch inzetten van LED belichting en de integratie van LEDs als onderdeel van het teeltsysteem. Uit de analyse blijkt dat *et al.* veel kennis is over het telen onder LEDs, maar dat er ook nog vragen beantwoord moeten worden om een fossielvrije tomatenteelt onder full LED mogelijk te maken.

De resultaten van de inventarisatie en analyse zijn gebruikt als basis voor de roadmap richting een fossielvrij tomatenteelt onder full LED. De onderwerpen die in hoofdstuk 2 benoemd zijn, vormen de elementen van deze roadmap en zijn gegroepeerd in 4 ontwikkelpaden met ieder een eigen einddoel: techniek, LED licht en gewasfysiologie, LEDs en de energiebalans in kas en overige factoren. De ontwikkelpaden staan niet compleet los van elkaar, er is sprake van interactie. Zo zullen de technologische ontwikkeling van LEDs invloed hebben op het type vragen dat moet worden beantwoord met betrekking tot de invloed van LEDs op het gewas. Het verschilt per ontwikkelpad hoe ver de ontwikkeling nog is verwijderd van het einddoel. Zo lijkt op het pad techniek het einddoel al aardig bereikt: men is in staat om duurzame LED modules te produceren die elektriciteit met een hoge efficiëntie omzetten in licht. Daarbij is niet alleen de lichtomzettingsefficiëntie hoog, maar ook op het gebied van het spectrum, de aansturing (dimmen), de lichtspreiding en de duurzaamheid/levensduur van de LEDs is men technologisch al dusdanig vergevorderd dat technologie waarschijnlijk geen limiterende factor is voor de transitie van SON-T naar LED belichting. Voor de andere ontwikkelpaden ligt dat anders. Op het gebied van LED licht en gewasfysiologie en LEDs en energiebalans is er genoeg kennis om kwalitatief goed te telen onder LEDs, maar er zijn nog vragen die beantwoord moeten worden voor optimalisatie en zo fossielvrij telen onder LEDs in de hele sector mogelijk te maken. Zo liggen er onder andere nog vragen over lichtbehoefte van het gewas en hoe deze veranderen gedurende de teelt onder verschillende omstandigheden. Hetzelfde geldt voor de warmtebehoefte van het gewas en hoe deze in te vullen. Er liggen ook nog kennisvragen over het effect van dynamisch belichten die met de huidige ontwikkelingen van de elektriciteitsprijs nog urgenter zijn geworden. Is het bijvoorbeeld mogelijk de lampen te dimmen of zelfs uit te schakelen op momenten van hoge energievraag zonder (teveel) in te leveren op productie en kwaliteit? Het ontwikkelpad overige factoren omvat de randvoorwaarden waaraan zal moeten worden voldaan om een de transitie naar een fossielvrije duurzame tomatenteelt onder full LED mogelijk te maken. Het is moeilijk om in te schatten waar we precies staan op dit moment omdat dit pad sterk beïnvloed wordt door de andere ontwikkelpaden. Zo zal de mate waarin de elektriciteitsvoorziening limiterend is afhangen van het antwoord op de vraag of het mogelijk is op momenten van veel energievraag terug te schakelen in belichting.

Concluderend kunnen we stellen dat die in de afgelopen 10 jaar zijn uitgevoerd laten zien dat tomaten telen onder LED belichting goed mogelijk is. Het grote voordeel van LED belichting is de hogere efficiëntie: met eenzelfde hoeveelheid elektriciteit wordt meer licht geproduceerd, en minder warmte, wat de ontwikkeling richting een duurzame, fossielvrije teelt binnen handbereik brengt. Een ander voordeel hiervan is dat vanwege de lagere warmteproductie er minder geventileerd hoeft te worden, dus minder verlies aan CO₂ en daarmee een betere benutting van schaars productiegoed. Bij toepassing van LED moet rekening gehouden worden met het feit dat de teelt anders is dan onder SON-T, met name de energiebalans, dus zijn er aanpassingen in het teelt aanpak nodig. Er is, zeker nu, volop vraag vanuit de praktijk naar de toepassing van LED. Vanuit dat perspectief is het "pad naar de praktijk" op gebied van LED belichting na de start van dit project al snel ingeslagen en wordt in de praktijk LED al toegepast, ondanks de vragen en onzekerheden die in dit rapport benoemd zijn.

Hoewel de praktijk ontwikkeling was naar hogere intensiteiten, hebben de recente ontwikkelingen op de energiemarkt ervoor gezorgd dat telers zich meer zijn gaan richten op de afweging tussen kosten en baten. Dit heeft ook invloed op welke kennisvragen de komende tijd beantwoord moeten worden om de gehele sector te overtuigen om te gaan telen onder LED belichting. Het gaat hierbij om vragen op het gebied van:

- Dynamisch belichten.
- Energiebalans.
- Opname water en nutriënten.
- Lichtverdeling.
-

Wat van groot belang is hierbij is dat de kennis op deze gebieden duidelijk gecommuniceerd wordt naar telers en andere stakeholders zoals investeerders. Daarnaast zullen demonstratieproeven waarin duurzaam wordt geteeld onder full LED en ervaringen van pionierende bedrijven van belang zijn om telers te overtuigen dat met energiezuinig telen onder full LED een rendabele teelt met goede productie en kwaliteit kan worden gerealiseerd.

1 Inleiding en doelstelling

1.1 Achtergrond

In de afgelopen jaren is het elektriciteitsgebruik in de sector snel toegenomen door toenemende arealen van en intensiteiten bij de belichte teelten. Aan de andere kant heeft de stijging van de energieprijzen begin 2022 duidelijk gemaakt dat de afweging tussen kosten en opbrengsten bij belichting een grote invloed heeft op de keuze van de ondernemers over inzet van belichting. Bovendien moet het gasgebruik dat met het maken van elektriciteit voor belichting gepaard gaat teruggebracht worden om de CO₂ reductie doelstelling te halen. Belangrijke elementen om dit te realiseren zijn de volledige vervanging van SON-T belichting door LED, en strategieën om te belichten op behoefte van het gewas. De sector is zeer geïnteresseerd in LED belichting, maar implementatie ging tot begin 2022 langzaam.

Op het LichtEvent, gehouden op 12 februari 2020, werd indertijd de balans op gebied van LED belichting opgemaakt. Daaruit bleek dat een eerste stap is dat voor ieder gewas en soms elk ras een juist spectrum gekozen moet worden. Onderzoek daarvoor zoekt naar wegen om dit generiek te benaderen (Dieleman, 2021a, 2021b; Plant Lighting, 2022). Na de keuze voor het lichtspectrum moet de teeltstrategie hierop goed afgestemd worden. Het is duidelijk dat het hier een systeemverandering betreft: het vervangen van SON-T door LED heeft consequenties voor strekking, bladstand, fotosynthese, assimilatenverdeling, productie en de kwaliteit van het product. Daar moeten zowel de teeltstrategie als klimaatstrategie, watering en bemesting op afgestemd worden.

Daarbij zijn vragen opgeworpen op gebied van energiebalans, planttemperatuur, verdamping, opname van nutriënten en efficiëntie van CO₂. De vragen hebben betrekking op positie van de belichting, type lampen, intensiteit, etc. Er was en is behoefte aan een visie hoe de sector tot een klimaatneutrale teelt van tomaat kan komen, en wat daarvoor de komende jaren moet gebeuren. Dit als "roadmap" voor tomaat en mogelijk breder voor de belichte teelten.

1.2 Doel

Hoofddoel van dit project is het opstellen van een roadmap richting een klimaatneutrale duurzame teelt, in eerste instantie voor tomaat. Op basis van deze roadmap wordt aangegeven welke kennis, proeven, simulaties of demonstraties nodig zijn om kennishiaten te vullen. Bij de teelt wordt uitgegaan van de basisprincipes van Het Nieuwe Telen die beschreven zijn in termen van balansen voor energie, plant, CO₂ en vocht. Het gewas tomaat wordt gebruikt als voorbeeld, maar de benadering kan als basis dienen voor LED toepassingen in het algemeen.

In het project voorstel was als energiedoelstelling geformuleerd de reductie van het elektriciteitsgebruik in een belichte tomatenteelt door SON-T te vervangen door LEDs met 35%, maar voor een duurzame, fossielvrije teelt is deze doelstelling niet voldoende. Het gaat om een volledig duurzame, fossielvrije en rendabele teelt.

2 Analyse telen onder LEDs

2.1 LED en de energiebalans van kas en gewas

2.1.1 Principe van LED licht en hoe de input aan stroom wordt omgezet in licht en warmte.

De ontwikkeling van de LED gaat terug tot 1962 met als eerste toepassing indicatielampjes. Voor verlichting is de ontwikkeling pas aan het eind van de vorige eeuw op gang gekomen. In een LED (light emitting diode) wordt licht uitgestraald als elektrische stroom door een elektronische halfgeleider wordt gestuurd. Het laatste decennium is de efficiëntie waarmee een LED per hoeveelheid stroom licht uitstraalt sterk omhoog gegaan. Voor LEDs, die rood licht produceren, is de efficiëntie nu 3.7 $\mu\text{mol}/\text{J}$. Voor andere kleuren is dit lager, maar toch ook sterk verbeterd. Bij de doorgang van de stroom door de halfgeleider ontstaat naast licht ook warmte en die wordt door geleiding afgevoerd. Dat afvoeren van warmte is nodig omdat de efficiëntie om licht uit te stralen bij kamertemperatuur veel beter is dan bij hogere temperaturen. Een LED die niet goed de warmte kwijt kan, zal snel verslijten, terwijl als de warmte wel goed wordt afgevoerd de levensduur wel 50.000 branduren is 5.7 jaar continu aan kan zijn.

De reactie op temperatuur verschilt sterk van een hogedruk natriumlamp waar een heel hoge temperatuur ($>1000^\circ\text{C}$) en druk nodig zijn om licht te laten uitstralen door het natrium in de lamp. De warmte in de natriumlamp wordt niet primair door geleiding afgevoerd maar door warmtestraling. Daarbij wordt de gehele armatuur, die via de reflector ook een deel energie opneemt, warm en kan dan door convectie nog een deel van de energie aan de lucht afstaan.

De golflengtes van het licht van een hogedruk natriumlamp is breedbandig met een piek rond de 600 nm. De straling van een LED is in principe licht met een bepaalde golflengte met een scherpe piek voor de meest voorkomende golflengte (smalbandig). Door combinaties van LEDs in één behuizing kunnen LED armaturen worden gemaakt, die voor ons oog meerdere kleuren kunnen aannemen. Hierbij wordt met stroomsterkte de hoeveelheid licht per afzonderlijke LED gestuurd zodat ons oog de combinatie kleur waarneemt.

2.1.2 Warmteafgifte: Convectief, waterkoeling en straling

De warmte van een LED wordt in de behuizing afgevoerd door geleiding. Daarbij wordt de behuizing warmer en staat het via convectie en warmtestraling de energie af aan de lucht en de omgeving. De overdracht van energie aan de lucht via convectie neemt toe als er luchtbeweging door en rond de armatuur is. Als dit via temperatuureffecten van de lucht plaatsvindt (schoorsteen effect) is het een passieve koeling. De armaturen worden dan zo ontworpen dat dit effect maximaal wordt benut. Als er een ventilator in de armatuur wordt ingebouwd is het een vorm van actieve koeling. Als de lucht daarbij naar boven wordt geblazen is de luchtstroom gelijk aan de natuurlijke luchtbeweging door warmte. Als de luchtstroom naar beneden is gericht, om warmte lager in de kas te krijgen, wordt tegen de natuurlijke luchtstroming in gewerkt. De warmte kan ook via een waterkoeling aan het armatuur worden onttrokken. Dan moeten de armaturen op een buizensysteem zijn aangesloten waardoor water van kastemperatuur of kouder kan worden geleid.

De temperatuur van een LED armatuur bepaalt hoeveel en waar er warmtestraling is. Er is vrijwel geen warmtestraling uit de LED. Dit in tegenstelling tot de hogedruk natriumlamp, die veel warmtestraling geeft die direct en via de reflector naar het gewas en de omgeving wordt uitgezonden. Bij SON-T is daarmee het uitstralingspatroon voor PAR en warmtestraling meer met elkaar vergelijkbaar dan bij een LED armatuur. Bij SON-T zijn de verschillen in warmtestraling tussen verschillende typen armatuur niet groot en worden vooral bepaald door de gebruikte reflector. Bij LED is de warmtestraling afhankelijk van de vorm van het armatuur. De ontwikkelaars zetten daarbij vooral in op grote afvoer van warmte door geleiding en veel minder door straling. Omdat de vorm van de LED armatuur, in combinatie met eventuele actieve koeling of waterkoeling sterk verschillend is en ook de efficiëntie van de LEDs verschillen kent vertoont de warmteafgifte bij LED armaturen een grote variatie. Voor een zorgvuldige toepassing zou de teler naast de lichtverdeling ook moeten weten hoe de warmte verdeling/uitstraling van de LED armatuur zal zijn. Tot nu toe wordt dit niet onderzocht.

2.1.3 Gewas-/Planttemperatuur, per planten deel

Alle energie die door een LED wordt opgenomen, wordt omgezet in licht of warmte. Licht is een energiedrager en zal een plant verwarmen. Slechts een deel van het licht wordt door een plant gebruikt in de fotosynthese. Het grootste deel van het PAR licht (400-700 nm) en warmtestraling (> 700 nm) wordt opgenomen en omgezet in warmte en zal de planttemperatuur verhogen, de rest wordt gereflecteerd. Met toenemende efficiëntie van de LED voor licht zal bij gelijke lichtintensiteit het effect op de gewastemperatuur kleiner worden. De plant ontvangt minder warmtestraling. Bij gelijke stroominput zal het effect op planttemperatuur kleiner zijn dan van SON-T, omdat meer energie via convectie aan de kaslucht wordt overgedragen. Er is geen effect van de efficiëntie op de hoeveelheid energie die de plant ontvangt, alleen het aandeel PAR wordt bij hogere efficiëntie groter. Omdat de warmtestraling van een LED armatuur niet gericht is en de PAR wel zal een plant bij hogere efficiëntie van de LED meer energie ontvangen en kan warmer worden, maar nog steeds minder dan van een SON-T lamp (zie Tabel 1).

Tabel 1

Rekenvoorbeeld voor verdeling energiestromen bij gelijke lichtintensiteit en bij gelijk stroom gebruik voor LED met verschillende efficiëntie voor licht in vergelijking met SON-T.

	SON-T	Gelijke lichtintensiteit		Gelijk stroom gebruik		Eenheid
		LED	LED	LED	LED	
PAR Intensiteit	100	100	100	143	195	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Efficiëntie	1.9	2.7	3.7	2.7	3.7	$\mu\text{mol}/\text{J}$
Stroom gebruik	52.6	36.8	27.0	52.6	52.6	W/m^2
convectie	12	26	26	26	26	%
PAR	33	47	64	47	64	%
Warmte	55	27	10	27	10	%
convectie	6.4	9.6	7.0	13.7	13.7	W/m^2
PAR*	17.4	17.3	17.3	24.7	33.7	W/m^2
Warmte straling	28.9	9.9	2.7	14.2	5.3	W/m^2
Som PAR+Warmte	46.3	27.2	20.0	38.9	38.9	W/m^2

De energie van de straling komt op de plantendelen die het licht direct ontvangen. Dus de bovenste bladeren en hooggelegen groeipunten en knoppen. De lichtverdeling is belangrijk voor de gewastemperatuur en niet alleen voor de fotosynthese. Een slechte lichtverdeling zal ook een slechte verdeling in de gewastemperatuur geven. Plantendelen die minder licht ontvangen zullen eveneens minder energie opnemen en kunnen koel blijven.

In de vorige paragraaf is beschreven dat restwarmte van de LEDs en de LED-armatuur vooral door convectie in de kas komt en veel minder door warmtestraling. Het aandeel convectie in de energie overdracht is bij LED daarom groter. Dit heeft tot gevolg dat de warmte van het armatuur vooral met de luchtstroom mee boven in de kas komt. Afkoeling aan het kasdek zorgt dan voor een natuurlijke luchtstroom in de kas, deze kan met een verticale ventilator versterkt worden. Bij LED zal van nature de warmte boven in de kas komen en daarmee een temperatuur gradiënt veroorzaken van een lage temperatuur onderin een gewas en hoger bij de bovenste delen van het gewas en de hoogste temperatuur in de nok. Door de veranderende temperatuurverdeling onder LEDs ten opzichte van SON-T gaat het bij de vervanging van SON-T door LEDs om een systeemverandering die vraagt om een andere totaalaanpak (teeltstrategie) waarbij gebruik kan worden gemaakt van schermen en eventueel ontvochtiging met warmteterugwinning. In paragraaf 2.3.2. wordt hier dieper op ingegaan.

2.1.4 Verdamping en daaraan gerelateerd nutriënten opname

LED licht kan op meerdere manieren invloed hebben op de verdamping van een gewas. Bekend is dat blauw licht de opening van de huidmondjes stimuleert. Wanneer de huidmondjes verder open gaan, neemt de verdamping toe en de gewastemperatuur zal dan dalen. Als de fotosynthese toeneemt, zal door het ontstaan van O₂ en het gebruik CO₂ een reactie in de plant op gang komen waardoor de huidmondjes verder opengaan en de verdamping toeneemt. Deze reactie verloopt onafhankelijk van blauw licht. De effecten van warmtestraling bij LED zijn veel minder dan bij SON-T of zonlicht en dat zorgt er voor dat het gewas minder verdampt en in het algemeen koeler zal zijn onder LED verlichting. Een groot deel van verdamping door een plant is nodig om de plant te koelen. Dat is bij LED dus minder nodig. Toch wordt in proeven met LED vrijwel nooit melding gemaakt van een duidelijk lagere wateropname. Blijkbaar is de verdamping door de open huidmondjes en de luchtbeweging zo groot dat er geen duidelijk verschil wordt geconstateerd. Ook kunnen door lichtspectrum effecten verschillen ontstaan in morfologie van een blad waardoor de verdamping wordt beïnvloed (Palmitessa et al. 2021). In de proeven bij Delphy-Improvement Centre met tomaat voor een fossiel vrije teelt wordt de watergift en nutriëntenopname gevolgd (Delphy - Fossielvrij). Verschil in verdamping kan vooral voor passief opgenomen nutriënten, zoals Ca, tot lokale verschillen in beschikbaarheid in de plant leiden. Als die worden geconstateerd, kan dit door klimaatmaatregelen zoals geforceerde luchtbeweging met een ventilator of gebruik van verwarming worden beïnvloed.

2.2 LED en de fysiologie van het gewas

2.2.1 Spectrum

LED belichting heeft een aantal voordelen, waaronder de hogere energie-efficiëntie dan andere lichtbronnen, zoals beschreven in paragraaf 2.1. Een andere eigenschap van LED belichting, in tegenstelling tot SON-T, is dat LEDs licht kunnen afgeven in het gewenste spectrum, in de range van 400 tot ca. 750 nm. Dit opent een heel nieuw scala aan mogelijkheden om een gewas te sturen op basis van lichtkleuren.

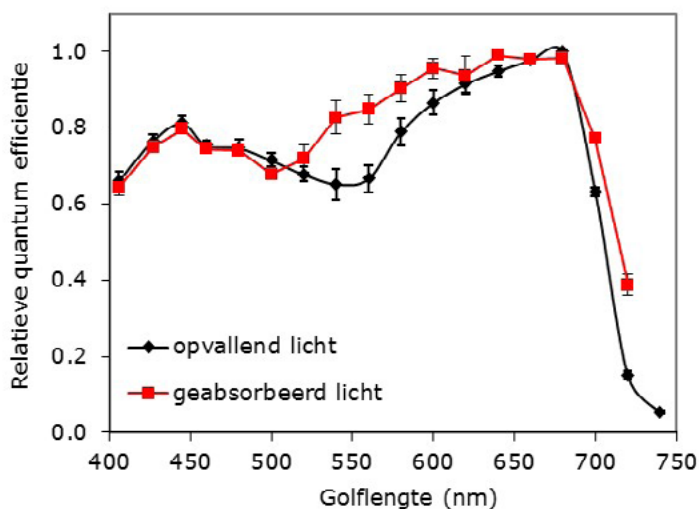
Lichtspectrum kan het gewas via een aantal processen beïnvloeden:

- Direct effect op de fotosynthese.
- Effect op plantarchitectuur (stengelstrekking, bladstand, bladgrootte) hetgeen o.a. de lichtonderschepping door het gewas bepaalt.
- Bloei en vruchtzetting, en daarmee de assimilatenverdeling tussen vegetatieve en generatieve delen.

In onderstaande paragrafen staan deze effecten beschreven. Een uitgebreidere beschrijving van de effecten van LED belichting en verschillende lichtkleuren op glastuinbouwgewassen is te vinden in het rapport "Denkkader licht" (Dieleman et al. 2020).

2.2.1.1 Efficiëntie van lichtkleuren in de fotosynthese

De efficiëntie waarmee licht gebruikt wordt in de fotosynthese in een blad is niet voor alle lichtkleuren hetzelfde. Al in de 70er jaren van de vorige eeuw werd dit effect beschreven door McCree (1972) en Inada (1976), en hiervoor wordt over het algemeen de term McCree curve gebruikt. De meest efficiënte lichtkleur in het aandrijven van de fotosynthese is rood licht (600 – 700 nm; Figuur 1). Daarom, en omdat rood energetisch efficiënt is te maken, is rood in bijna alle lichtrecepten de basiskleur. Omdat bovendien een hoog aandeel van het rode licht wordt geabsorbeerd door bladeren, is de efficiëntie van het rode licht hoog, zowel in het geval van opvallend licht als van geabsorbeerd licht.



Figuur 1 Relatieve efficiëntie van de fotosynthese van een volgroeid blad van roos (cv Akito) gebaseerd op opvallend licht en geabsorbeerd licht (Aangepast uit Snel et al. 2011).

Wanneer het wordt uitgedrukt in efficiëntie van geabsorbeerd licht is de efficiëntie van groen licht (500 - 600 nm) in de fotosynthese hoger dan dat van blauw licht (400 - 500 nm). Omdat de lichtabsorptie van groen licht door een blad lager is dan van blauw licht, is de fotosynthese efficiëntie van blauw licht hoger dan van groen licht als het wordt uitgedrukt per hoeveelheid op het blad vallende straling (Figuur 1).

De fotosynthese efficiëntie neemt sterk af bij golflengtes boven de 685 nm (Figuur 1). Als het blad tegelijkertijd blootgesteld wordt aan licht met golflengtes boven de 690 nm en minder dan 680 nm, is de fotosynthese veel hoger dan de som van de fotosynthesesnelheden bij de afzonderlijke golflengtes. Dit fenomeen staat bekend als het Emerson-effect (of Emerson enhancement effect; Emerson et al. 1957) en wordt verklaard doordat voor een optimale fotosynthese fotosysteem I en fotosysteem II, die verschillende absorptiespectra hebben, moeten samenwerken. Recent ligt de focus op het toevoegen van verrood licht aan rood/blauw (LED) licht (Dieleman et al. 2017). Ook dan blijkt dat als verrood licht (700 – 800 nm) wordt toegevoegd aan rood/blauw LED licht, de fotosynthese toeneemt (Zhen en Van Iersel, 2017; Zhen and Bugbee, 2020). Belangrijk om te vermelden is dat zowel de McCree curve als het Emerson effect van toepassing zijn op fotosynthese op bladniveau, en niet op het niveau van een geheel gewas. Het optimale spectrum voor gewasfotosynthese kan anders zijn.

2.2.1.2 Perceptie van licht: fotoreceptoren

De hoeveelheid licht, de richting er van, daglengte en de lichtkleuren (golflengtes) vormen voor de plant een bron van informatie over de omgeving. Planten nemen dit waar via fotoreceptoren, die een schakel vormen naar een complex signaleringsnetwerk in de plant, wat uiteindelijk leidt tot veranderingen in bijvoorbeeld plantvorm. Er zijn verschillende fotoreceptoren in planten bekend. Hieronder staat een aantal benoemd, met de processen die ze sturen die van invloed zijn op de groei en ontwikkeling van tomaat.

Fytochroom: vooral gevoelig voor de balans rood/verrood licht. Deze receptor beïnvloedt processen zoals stengelstrekking, bladgrootte, chlorofylgehalte van het blad en ontwikkeling van de huidmondjes

Cryptochroom: vooral gevoelig voor UV-A, blauw en groen licht. Deze receptor beïnvloedt in tomaat vooral de bladstand, in de richting van het licht, stengelstrekking en bloei.

Fototropine: vooral gevoelig voor UV-A en blauw licht, en stuurt de huidmondjesopening en de bladstand.

Meer informatie over fotoreceptoren is beschreven in Denkkader licht (Dieleman et al. 2020).

2.2.1.3 Effect van lichtspectrum op tomaat

Al sinds 2009 wordt geëxperimenteerd met de toepassing van LED belichting in tomaat. In die tijd was de energie-efficiëntie van de LEDs nog vergelijkbaar met SON-T. Uit die proeven bleek al dat het goed mogelijk was om tomaten onder LEDs te telen, maar dat de etmaaltemperatuur onder LEDs wel hoger ingesteld moest worden dan onder SON-T, vanwege het gebrek aan warmtestraling, en dus een lagere planttemperatuur onder LEDs dan onder SON-T (Dueck et al. 2010; Persoon et al. 2010). Uit deze onderzoeken bleek verder dat het goed mogelijk is tomaten te telen onder een LED lichtspectrum dat grotendeels uit rood licht bestaat, met een aanvulling van ca. 5% blauw licht.

Echter, uit onderzoek met tomaat en andere gewassen blijkt dat het gunstig kan zijn om te telen onder LEDs met een breder spectrum. Zo bleek uit onderzoek naar 'de perfecte roos' dat telen onder LEDs met een spectrum met alleen blauw en rood licht voor kwaliteitsproblemen zorgde en dat dit op kon worden gelost door het spectrum aan te passen: er werd groen licht, maar ook verrood licht toegevoegd ten koste van rood licht (de Gelder et al. 2022). Uit onderzoek met tomaat in 2011-2012 bleek dat het toevoegen van verrood licht aan het spectrum een positief effect kan hebben op de vroege productie, maar dat dit op de lange termijn ook zeer schadelijk kan zijn voor het gewas, als de gegeven intensiteit te hoog is (Hogewoning et al. 2013).

Toevoegen van verrood licht aan het spectrum

In de jaren hierna is meerdere malen aangetoond dat tomaten goed te telen zijn onder een 95% rood/5% blauw licht spectrum (Dueck, 2010; Dieleman et al. 2017; Delphy Fossielvrij). Echter, er bleef veel aandacht voor de mogelijke voordelen van het toepassen van verrood licht aan het spectrum. Wanneer aan een rood/blauw lichtspectrum van 185 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verrood licht met een intensiteit van 30 of 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ werd toegevoegd, bleek de productie van tomaat eind april met 6% respectievelijk 15% toegenomen te zijn (Dieleman et al. 2017). In 2017 is dit herhaald met meerdere rassen, en bleek dat het effect van het toevoegen van verrood licht op de productie van tomaat altijd positief was, maar dat de grootte van het effect afhing van het ras (Dieleman et al. 2017). Het positieve effect van verrood licht op de groei en productie van tomaat wordt vooral veroorzaakt door een andere assimilatenverdeling: de aangemaakte assimilaten worden vooral naar de vruchten gestuurd, ten koste van de bladeren (Ji et al. 2019). Dat maakt de bladeren lichter van kleur en meer gevoelig voor bijvoorbeeld bladrandjes, al hoeft dit niet tot echte problemen te leiden. De vruchtkwaliteit werd positief beïnvloed door het toevoegen van verrood licht: de gehaltes aan glucose, fructose en sucrose in de vruchten namen toe (Fanwoua et al. 2019).

Echter, het toevoegen van verrood licht aan het spectrum leidt tot een hogere elektriciteitsbehoefte. De vraag daarbij is wat er zou gebeuren als het verrode licht niet extra gegeven zou worden, maar als vervanging van een deel van het PAR licht zodat de totale elektriciteitsbehoefte vergelijkbaar blijft. Wanneer dit wordt gedaan, blijkt de productie niet te verschillen tussen de behandelingen. Wel is het dan nog steeds zo dat de kwaliteit van de vruchten hoger is wanneer een hoeveelheid verrood licht wordt gegeven: het suikergehalte ligt hoger.

Toevoegen van groen licht aan het lightspectrum

In een aantal gewassen, zoals sla, is gebleken dat wanneer een lightspectrum grotendeels bestaat uit rood/blauw (LED) licht, het toevoegen van groen licht positief kan zijn voor de productie (Stutte et al. 2009; Kim et al. 2004), maar dat niet altijd is (Li en Kubota, 2009). De positieve effecten van groen licht (lichtdoordringing dieper in het gewas) zouden in dat geval niet op wegen tegen bijvoorbeeld de sluiting van huidmondjes door meer groen licht of het feit dat er meer assimilaten aan de groei van de stengel besteed worden door meer stengelstrekking. Juist in gewassen met meerdere bladlagen zoals tomaat, zou het toevoegen van groen licht aan het LED spectrum kunnen leiden tot een betere lichtverdeling in het gewas en een hogere gewasfotosynthese (Smith et al. 2017). Dit is recent onderzocht in tomaat, waarbij het aandeel groen licht in het spectrum verhoogd werd van 7% (rood/blauwe LED belichting met een achtergrond van zonlicht) tot 39% (rood/blauw/groene LED belichting met een achtergrond van zonlicht) (Kaiser et al. 2019). De toevoeging van groen licht aan het spectrum leidde tot een toename van het totaal plant drooggewicht en het gewicht van de geogoste tomaten. Een beperking van dit onderzoek was dat er alleen jonge planten geteeld werden, tot de eerste tros oogstrijp was. Naast het effect op de plant zelf, blijkt uit onderzoek dat groen licht in het spectrum invloed kan hebben op plagen en biologische plaagbestrijders. In paragraaf 2.4.2 wordt hier dieper op ingegaan.

2.2.2 Intensiteit

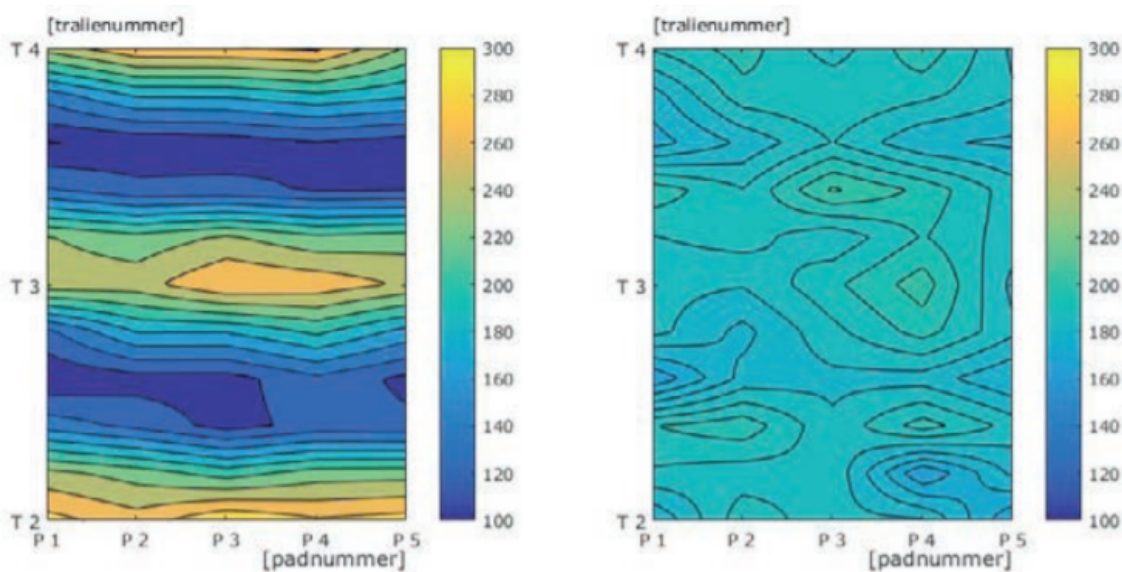
De lagere stralingswarmte van LEDs ten opzichte van SON-T lampen, bij gelijk opgenomen elektrisch vermogen, maakt het mogelijk met meer licht te telen zonder dat de gewas temperatuur zodanig oploopt dat er stress of schade ontstaat aan het gewas. Telers kunnen door gebruik te maken van LEDs een hogere intensiteit installeren en dit inzetten gedurende periodes dat er beperkt zonlicht is (winter) en hogere lichtintensiteiten realiseren. Daarnaast stelt het, door de lagere stralingswarmte die LEDs produceren, telers in staat om ook gedurende periodes dat de buitentemperaturen hoger liggen gebruik te maken van assimilatiebelichting waardoor ook dan hogere lichtintensiteiten kunnen worden gerealiseerd in vergelijking tot telen onder SON-T.

Telen met hogere lichtintensiteiten leidt over het algemeen tot hogere producties in tomaat. Zo zijn er onderzoeken uitgevoerd waarbij geteeld is onder LED licht (voornamelijk rood licht, met een klein percentage blauw) tot een intensiteit van 385 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Vanlommel 2019, Vanlommel 2020), waaruit bleek dat de productie toenam bij een toename in lichtintensiteit. Echter, de efficiëntie waarmee het licht omgezet wordt in productie (het aantal kg productie per mol PAR licht) neemt af bij toenemende lichtintensiteiten. Met de toenemende efficiëntie van LEDs zal het echter steeds minder kosten met zich meebrengen.

Het is van belang om meer inzicht te krijgen in de optimale lichtintensiteit van assimilatie belichting voor het telen van tomaten. Daarbij dient niet alleen gekeken te worden naar het effect van verhogen van de lichtintensiteit op productie, maar ook op de plantvorm, vruchtkwaliteit en de weerbaarheid van de plant tegen ziekten en plagen. De optimale lichtintensiteit zal daarnaast afhangen van klimaatfactoren als temperatuur, luchtvochtigheid, CO_2 en van plantaspecten als het ras, ontwikkelingsstadium en plantbelasting. Tot slot zal bij het verhogen van lichtintensiteit de keuze voor het juiste lightspectrum een nog belangrijkere rol spelen dan bij lagere intensiteiten, aangezien de LEDs sterker bepalend zullen zijn voor het spectrum wat de plant ontvangt. Omdat daarmee de balans tussen zonlicht en lamplicht verschuift, wordt ook de discussie over het meest geschikte spectrum voor tomaat weer gevoerd.

2.2.3 Lichtverdeling

De verdeling van het licht door het gewas is een belangrijk aspect bij elk belichtingssysteem. Een goede verdeling leidt tot minder plantvariatie waardoor er beter gestuurd kan worden op het gewas en er meer energie bespaard kan worden. Het licht dat door een lamp wordt geproduceerd, verspreidt zich in 3 dimensies (richtingen). De intensiteit neemt af naarmate de afstand vanaf de lamp groter wordt doordat het licht over een steeds groter oppervlak wordt verdeeld. Wanneer lampen echter in een verband worden gemonteerd, integreren de uitstralingspatronen van de lampen en ontstaat er een lichtverdeling op een vlak binnen de kasruimte die een zekere homogeniteit kent. Deze verdeling kan worden berekend met behulp van speciaal hiervoor ontwikkelde software waarin de lampkarakteristieken worden meegenomen. Een ideale homogene lichtverdeling leidt tot een gelijke intensiteit op elk punt in het gebied van interesse. Een niet-ideale lichtverdeling kent bijvoorbeeld een grote variatie in horizontale- of verticale verdeling (Figuur 2).



Figuur 2 Vergelijking van een lichtverdeling met grote variatie (links) en kleine variatie (rechts). De gekleurde balk geeft de intensiteit weer in $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. In het linker plaatje is te zien hoe de intensiteit varieert van 100-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, terwijl in de rechterverdeling de intensiteit varieert van ongeveer 180-220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Raaphorst en Weerheim, 2019)

Een grote variatie in horizontale verdeling leidt tot verschillen in lichtsom tussen planten. Een grote variatie in verticale lichtverdeling leidt ertoe dat bepaalde delen van de plant relatief meer of minder licht ontvangen, waardoor er inefficiënties kunnen ontstaan. Bladeren dieper in het gewas kunnen bijvoorbeeld licht te kort komen ("verhongerend"), terwijl de fotosynthese efficiëntie van bladeren hoger in het gewas suboptimaal kan zijn door een overmaat aan licht.

De lichtverdeling wordt bepaald door de karakteristieken van de belichtingsmodule en de plaatsing in de ruimte. Wat betreft LED modules zijn er een aantal verschillen in vergelijking met SON-T lampen. Een SON-T bol straalt het licht uit in alle richtingen, en een reflector bepaald hoe het licht wordt verspreid. Een LED module bevat een groot aantal individuele LEDs die afhankelijk van het productieproces het licht in een bepaalde hoek verspreidt. Vervolgens kan er over de LEDs een materiaal of lens worden geplaatst om deze hoek te beïnvloeden. Dit gaat echter wel ten koste van de opbrengst en dus de efficiëntie van de module (Signify, 2021b). Met de ontwikkeling van LED modules die een hogere opbrengst hebben dan SON-T modules wordt de verdeling een grotere uitdaging. Logischerwijs zal het licht meer van de zijkant het gewas inkomen.

De lichtverdeling kan worden bepaald op een aantal manieren. Het kan bepaald worden met of zonder gewas. De horizontale en verticale lichtverdeling kan gemeten worden boven het gewas, eronder, en op verschillende hoogtes in het gewas. De bepaling zonder gewas is nuttig om te bepalen of de lichtverdeling overeenkomt met de verwachting. Er is weinig literatuur wat betreft deze verdeling en in de berekeningen is de lichtverdeling niet standaard opgenomen.

2.2.4 Verhouding natuurlijk licht – LED licht

Voor planten is het van belang dat de hoeveelheid licht wordt uitgedrukt in de eenheid van μmol per vierkante meter per seconde ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), en niet in andere eenheden zoals Watt of Lux die een golflengtegebied aanduiden wat breder of smaller is dan wat planten benutten voor de fotosynthese. Over het algemeen wordt er weinig onderscheid gemaakt tussen natuurlijk licht en LED licht als het gaat om de hoeveelheid energie die de plant ontvangt terwijl dit een cruciaal verschil is. LED belichting wordt terecht gezien als aanvulling op zonlicht, maar in de winterperiode is LED verlichting de voornaamste energiebron voor de plant. Waar SON-T 33% van de energie omzet in PAR en de rest in warmte (Tabel 1) loopt dit getal voor LED op tot 60%. Voor zonlicht is dit getal niet constant, het varieert van 20-75% afhankelijk van de hoek van de zon en bewolingsgraad.

Dit betekent dat de verhouding natuurlijk licht – LED licht een onzekerheid met zich meebrengt omdat het onduidelijk is of er over PAR of straling wordt gesproken. Wat PAR betreft kan de intensiteit gelijk zijn tussen zon- en LED licht, maar de hoeveelheid straling die de plant ontvangt is anders.

Dit betekent dat de planttemperatuur/licht verhouding verandert bij gelijke PAR uit beide lichtbronnen.

In de meeste teelten wordt in de zomer nauwelijks belicht, terwijl in de winter de belichting 80% van de totale lichtsom kan uitmaken. In dergelijke gevallen is het zonlicht in de winter dus ondergeschikt aan LED licht als energiebron voor de plant. Een ander verschil is het lichtspectrum. De meeste gangbare LED spectra bevatten een hoog aandeel rood en relatief lage aandelen van andere golflengten. Zoals besproken in paragraaf 2.2.1.1 is rood licht de meest efficiënte golflengte voor fotosynthese. Dit betekent dat de assimilatieaanmaak op bladniveau hoger kan zijn dan onder zonlicht maar dit is nauwelijks onderzocht op praktisch niveau. Daarnaast betekent een eventuele hogere fotosynthese op bladniveau niet dat de fotosynthese op gewasniveau, wat sterk bepalend is voor de productie, ook hoger zal zijn.

2.2.5 Daglengte

Over het algemeen laat onderzoek in tomaat zien dat, binnen bepaalde grenzen, meer licht toelaten in de teelt leidt tot meer groei en een hogere opbrengst. Een toename in licht kan daarbij gerealiseerd worden door te telen bij een hogere lichtintensiteit maar ook door de daglengte te verlengen door langer te belichten. Zo is uit onderzoek met tomaat onder SON-T belichting gebleken dat, indien met dezelfde intensiteit werd belicht, een hogere productie werd gerealiseerd bij een daglengte van 18 uur dan bij een daglengte van 15 uur (Dueck et al. 2007). Maar als met een lagere intensiteit langer wordt belicht, en de totale hoeveelheid licht niet hoger is bij de daglengte van 18 uur ten opzichte van 15 uur, dan heeft het verlengen van de dag geen gunstig effect op groei en productie (Dueck et al. 2007). Hoewel langer belichten dus een gunstig effect kan hebben op groei en productie in tomaat, zitten hier wel grenzen aan. Zo blijkt uit verschillende onderzoeken naar continu belichten dat het telen van tomatenplanten bij continu licht (24 uur per dag) tot schade aan het gewas door chlorose en bladveroudering, tot verminderde fotosyntheseactiviteit en ophoping van suikers in het blad kan leiden (Dorais et al. 1996; Dueck et al. 2007; Velez-Ramirez et al. 2012; Lanoue et al. 2019). Dergelijke negatieve effecten worden, in mindere mate, ook al waargenomen in planten geteeld bij daglengtes van 18 uur of langer (Dorais et al. 1996).

De onderzoeken waaruit de negatieve effecten van telen onder zeer lange dagen of continu licht blijken, zijn veelal nog uitgevoerd met SON-T lampen. Onderzoek naar telen onder langere dagen door middel van het inzetten van LEDs heeft laten zien dat de eigenschappen van LEDs (lagere temperaturen, specifiek spectrum) het beter mogelijk maken om te telen onder langere dagen. Zo blijkt de schade onder continu licht in het gewas te kunnen worden beperkt door gedurende een deel van de dag een lagere temperatuur aan te houden (Haque et al. 2017), iets wat met LEDs beter te realiseren is door de verminderde afgifte van warmtestraling. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat met het toepassen van alleen blauw LED licht tijdens wat normaal gesproken de nachtperiode zou zijn geen schade optreedt in het gewas en groei en productie niet negatief worden beïnvloed (Lanoue et al. 2019).

Het telen onder LEDs biedt telers in theorie dus de mogelijkheid om daglengtes van 24 uur aan te houden en daarmee mogelijk hogere producties te realiseren. Echter, uit onderzoek met SON-T belichte teelten blijkt dat bij een langere daglengte de fotosynthese efficiëntie afneemt en dat het transport van assimilaten naar de vruchten moeizamer verloopt (Dorais et al. 1996). Als dit ook het geval is onder LED belichting dan betekent het dat de extra energie die wordt ingezet voor de belichting om de dag te verlengen steeds minder efficiënt wordt omgezet in productie. Mogelijk zijn deze negatieve effecten van telen onder lange dag op te vangen door het realiseren van een bepaald klimaat of inzet van een specifiek spectrum. Bijvoorbeeld door het verhogen van het aandeel van verrood licht om het transport van assimilaten van de vruchten te stimuleren. Echter, hier is nog geen onderzoek naar gedaan. Daarnaast liggen er nog vragen over het effect van daglengte op andere zaken die uiteindelijk bepalend zijn voor de opbrengst zoals de plantarchitectuur, bloei, vruchtzetting, plantweerbaarheid en het effect van daglengte op biologische bestrijders.

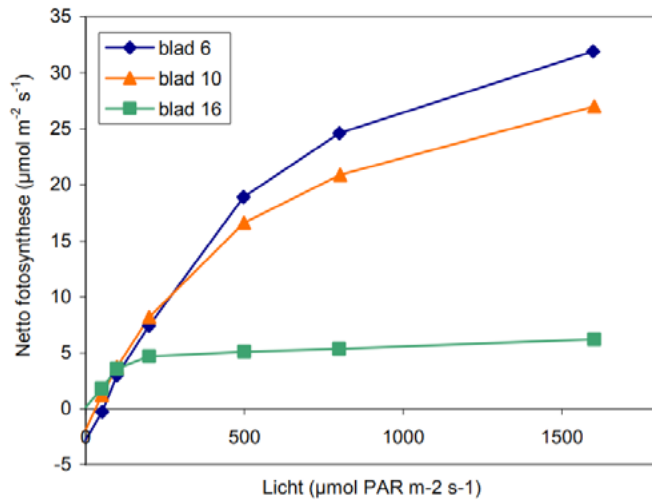
2.2.6 Dynamisch sturen

2.2.6.1 Intensiteit

Een extra stuurmogelijkheid van LED lampen in vergelijking met SON-T is dat LEDs dimbaar zijn en het daardoor mogelijk is om de intensiteit van de belichting te variëren. Het regelmatig aan/uit schakelen van LEDs heeft geen effect op de levensduur van de lampen. Dimmen van de lampen kan bijdragen aan het efficiënter inzetten van belichting voor fotosynthese van het gewas en daarmee voor de productie. Het is namelijk zo dat de fotosynthese in een gewas als tomaat niet lineair blijft toenemen bij een hogere PAR intensiteit, zoals te zien is in Figuur 3 (Dueck et al. 2007), maar dat de toename in bladfotosynthese afvlakt bij een toename in lichtintensiteit. In Figuur 3 wordt deze afvlakking zichtbaar vanaf $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Om de energie voor belichting zo efficiënt mogelijk in te zetten voor fotosynthese en productie zou een teler in dit geval door middel van het dimmen van de lampen moeten zorgen dat de lichtintensiteit op gewasniveau niet boven de $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ komt indien de lampen worden ingezet. Een voorbeeld: als er op een zeker moment op de dag $480 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ natuurlijk licht is in de kas, en een teler heeft voor $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR LED licht geïnstalleerd, dan is het efficiënter om op dat moment de lampen te dimmen tot 10% ($20 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en zo in totaal $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR te realiseren. De energie voor de belichting die door het dimmen uitgespaard wordt op dat moment, kan dan efficiënter worden ingezet op een later tijdstip waarbij er minder instraling is. Een bijkomend voordeel van het dimmen van de LEDs is dat de LEDs er nog efficiënter van worden, maar bij sterk dimmen (>70%) wordt de efficiëntie weer minder.

Naast dat het dimmen van LEDs kan worden gestuurd op het PAR niveau in de kas, kan het ook worden gebruikt om te voorkomen dat er teveel energie voor belichting wordt ingezet op momenten dat de plant niet in staat is om het licht volledig te benutten. Bijvoorbeeld op momenten dat de fotosynthesecapaciteit lager is door ophoping van assimilaten in het blad aan het einde van de dag of doordat er weinig opname van CO_2 is omdat huidmondjes gesloten zijn.

Tot slot is het ook mogelijk om het dimmen van lichtintensiteit te sturen op basis van de prijs en beschikbaarheid van elektriciteit. Wel is het van belang hierbij rekening te houden met het effect van het dimmen op de groei en ontwikkeling van het gewas.



Figuur 3 Lichtresponsecurve van 3 tomatenbladeren (nummering gebaseerd op positie vanaf bovenste blad) bij 700 ppm CO₂. (Figuur afkomstig uit Dueck et al. 2007).

2.2.6.2 Spectrum

Om zo efficiënt mogelijk energie voor belichting om te zetten in productie is het van belang dat de plant in staat is het licht op te vangen en de assimilaten kan inzetten voor productie van vruchten. Uit paragraaf 2.2.1 blijkt dat het spectrum hierbij een belangrijke rol speelt aangezien het onder andere effect heeft op de plantarchitectuur en daarmee lichtonderschepping, maar ook de assimilatenverdeling en de weerbaarheid. Het dimmen van LEDs kan ook op niveau van bepaalde lichtkleuren, waardoor het mogelijk is om het spectrum van de belichting te variëren. Ook al blijkt tot nu toe dat telen onder LEDs met een spectrum dat voornamelijk uit rood licht bestaat en zo'n 5% blauw goed mogelijk is, zou het voordelig kunnen zijn om op bepaalde momenten een ander spectrum in te kunnen stellen. Maar wanneer welk LED spectrum het beste is, is (nog) niet duidelijk. Dit hangt mogelijk samen met de intensiteit waarmee wordt belicht. Omdat met toenemende intensiteiten belichting het aandeel LED licht ten opzichte van zonlicht groter wordt, is de keuze van spectrum en het sturen daarvan belangrijker. Daarnaast hangt het meest ideale spectrum mogelijk af van het tijdstip van de dag. Doordat de biologische klok van planten ervoor zorgt dat veel belangrijke componenten (zoals lichtreceptoren en regeleiwitten) in lichtsignaleringsroutes vooral aanwezig of actief zijn op bepaalde momenten van de dag, kan het effect van het lichtspectrum op plantprocessen afhangen van het moment op de dag waarop een spectrum wordt toegepast. Zo is bekend dat het effect van verrood in het lichtspectrum op strekking het sterkst is wanneer dit wordt toegepast aan het einde van de dag. Echter, voor veel andere effecten van spectra op plantgroei en ontwikkeling is nog niet duidelijk of het tijdstip waarop het spectrum wordt waargenomen een rol speelt, en als dit wel het geval zou zijn, op welk tijdstip het effect dan het sterkst is.

2.2.7 Type en rasverschillen

In de tomatenteelt wordt een groot aantal verschillende types geteeld (cherry, cocktail, tros, losse, vleestomaat), en per type verschillende rassen. De vraag is of er een generiek lichtspectrum bestaat voor al deze types en rassen, of dat het lichtspectrum geoptimaliseerd dient te worden per type en ras.

In het onderzoek naar de toepassing van verrood licht bij tomaat is gebruik gemaakt van verschillende types en rassen tomaat. Daar bleek dat het effect altijd hetzelfde was, maar dat de grootte van het effect sterk kon verschillen. Wanneer bij een aantal verschillende (pre)rassen trostomaat verrood licht aan het spectrum werd toegevoegd, bleken er grote verschillen te zijn in de productie tot en met april: van nauwelijks effect tot 25% meerproductie (Arkesteijn, 2018). Dit betekent dat er ook nog een grote taak ligt voor de veredelingsbedrijven, die specifiek rassen zullen moeten selecteren voor toepassing onder LED belichting, en die de telers inzicht zullen moeten geven in het effect van lichtspectrum op die rassen, zodat de rassenkeuze in combinatie met het kasklimaat (inclusief LED spectrum) geoptimaliseerd kan worden.

2.3 LED ontwikkelingen

2.3.1 Top- en tussenbelichting

De lagere stralingswarmte die wordt afgegeven door LEDs maakt het beter mogelijk om de lampen dichter op het gewas te plaatsen. LEDs kunnen tussen het gewas gehangen worden. Dat het toepassen van extra belichting in de vorm van tussenbelichting met LEDs tot een hogere productie kan leiden in tomatenteelt is in verschillende nationale en internationale onderzoeken aangetoond (Tewolde et al. 2018; Paucek et al. 2020). Echter, minder duidelijk is of telen met LED tussenbelichting voordelen heeft (bijvoorbeeld ten aanzien van productie of kwaliteit) ten opzichte van extra belichting van bovenaf met eenzelfde intensiteit.

Het toepassen van tussenbelichting heeft een aantal voordelen. Zo resulteert het in een betere verticale lichtverdeling in het gewas, waardoor in theorie de gewasfotosynthese hoger zal zijn. Ook zal de verticale temperatuurverdeling gelijkmatiger zijn doordat de LED armaturen als groeibuis functioneren. Nadelen van tussenbelichting zijn een slechtere horizontale lichtverdeling, met als gevolg lokaal hoge lichtintensiteiten en lokaal hogere temperaturen door de geringe afstand tussen gewas en armaturen. Daarnaast gaat het toepassen van tussenbelichting veroudering van het blad onderin het gewas tegen en daarmee de herverdeling van droge stof naar jongere plantdelen. Uit recente modelberekeningen blijkt dat pas bij het toepassen van hogere intensiteiten LED licht (vanaf 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) de gewasfotosynthese iets toeneemt als een deel van de intensiteit wordt geleverd door de tussenbelichting (50 of 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) (Trouwborst et al. 2021). Of dit ook leidt tot een hogere productie is afhankelijk van hoe zwaar de nadelen van de tussenbelichting meewegen.

Toch is uit onderzoek bij Proefcentrum Hoogstraten in 2019 gebleken dat vooral in de winterperiode dat telen onder LEDs met 135 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting in combinatie met 75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting in een iets hogere productie resulteerde dan wanneer geteeld werd met 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting (Wittemans et al. 2020). De hogere productie onder de combinatie top en tussenbelichting was het gevolg van grotere vruchten en niet een hoger aantal. Het aantal geoogste vruchten lag zelfs lager. Mogelijk heeft dit te maken met de veranderde warmteverdeling en het effect daarvan op vruchtontwikkeling, maar dat is niet onderzocht.

Het toepassen van LED tussenbelichting in plaats van extra topbelichting met dezelfde intensiteit lijkt dus gunstig te zijn voor productie, vooral bij hogere intensiteiten. Echter, het is de vraag of de relatief kleine toename in productie (die tot zover is aangetoond en berekend) opweegt tegen de eerder benoemde nadelen van tussenbelichting voor het gewas en meer praktische en financiële nadelen van het toepassen van tussenbelichting zoals het moeten aanschaffen van meer armaturen, installeren van ophangsystemen, onderhoud en schoonhouden van de modules en het mogelijk in de weg hangen van armaturen bij gewashandelingen of teeltwisselingen. Daarnaast liggen er nog vragen over de juiste toepassing van tussenbelichting. Zo is het bijvoorbeeld niet precies duidelijk op welke hoogte en onder welke hoek deze belichting het beste kan worden gehangen, wat het juiste spectrum is voor tussenbelichting en of dit verschilt van het spectrum voor topbelichting.

2.3.2 Integratie van LED in het kassysteem en de aansturing

Een kas waarin een gewas geteeld wordt, is een systeem, waarin alle elementen geoptimaliseerd moeten worden om te kunnen komen tot een effectief en duurzaam productiesysteem. Dat betekent dat wanneer LEDs ingepast worden in dit systeem, het systeem opnieuw ingericht moet worden. Dat geldt zowel als de uitgangssituatie een SON-T belichte kas was, of een onbelichte teelt.

Wanneer LED belichting toegepast wordt in een kas, wordt naast een lichtbron ook een warmtebron ingebracht, hetgeen de energiebalans van de kas verandert. Dat betekent dat de energie-input via de buizen aangepast wordt, met mogelijk effecten op de verticale temperatuurgradiënt in de kas, en daarmee eventueel ook op de afrijping van de trossen. Verder leidt de inpassing van LEDs tot een verandering in gewasverdamping, en daarmee op raamopening voor de afvoer van vocht, en daarmee ook op het verlies aan CO₂ uit de kas. Omdat een LED lamp bij eenzelfde lichtoutput minder warmte afgeeft dan een SON-T lamp (zie ook paragraaf 2.1.2), is de planttemperatuur onder LED belichting 1-2 °C lager dan onder SON-T belichting, afhankelijk van de intensiteit van de belichting. Een lagere planttemperatuur leidt tot een lagere ontwikkelingssnelheid (blad- en trosafplitsing). Wanneer dat niet gewenst is zal de kasluchttemperatuur verhoogd moeten worden om de gewasontwikkeling vergelijkbaar te houden (Dieleman et al. 2017). Dat kan door meer warmte in te brengen maar ook door de aanwezige warmte in de kas beter/langer vast te houden door het inzetten van een energiedoek. Dit vereist ook een andere manier van denken: niet meer de kasluchttemperatuur staat centraal, maar de planttemperatuur als basis voor de gewasontwikkeling.

Zoals beschreven staat in paragraaf 2.2.1 kan de balans vegetatief-generatief in een tomatengewas gestuurd worden met het lichtspectrum. Een hoger aandeel verrood licht in het spectrum leidt er toe dat er meer assimilaten in de richting van de vruchten worden gestuurd, ten koste van het blad. Verder kan met LED belichting langer doorbelicht worden in het voorjaar, en kan er een hogere lichtintensiteit gegeven worden zonder dat de temperatuur in de kas te hoog oploopt. Al deze factoren samen maken dat de aansturing van het gewas onder LED belichting anders is dan in een onbelichte of een SON-T belichte teelt.

In de afgelopen jaren is er steeds meer aandacht voor "data-driven" of autonoom telen. Hierbij wordt meer gebruik gemaakt van data die in de teelt worden verzameld, met name gegevens over het gewas. Juist in de intensivering van de teelt onder in vloed van LED belichting, en de specifieke effecten van LED op zowel de verhouding planttemperatuur-kasluchttemperatuur en op gewasontwikkeling en assimilatenverdeling, is het verzamelen van de juiste plantdata en hierop sturen van groot belang.

2.4 Overige factoren

2.4.1 Arbeidsomstandigheden

Over werken onder LED met specifieke lichtkleuren is nog weinig informatie, en er zijn nog geen specifieke regels over het werken onder (LED) belichting in kassen. Wat duidelijk is dat blauw een lichtkleur is die schadelijk kan zijn voor de ogen, maar niet duidelijk is in hoeverre de intensiteiten die gebruikt worden in een kas schade op kunnen leveren. Hierbij is de positie van de belichting mogelijk ook van belang: een tussenbelichting op ooghoogte van mensen in de kas is mogelijk schadelijker dan topbelichting. Verder is het zo dat vanwege de gevoeligheid van het menselijk oog (vooral voor groen licht), een overmaat van blauw en rood licht ons waarnemingsvermogen kan verstoren. Dat betekent dat zonder een aandeel groen of wit licht bijvoorbeeld het scouten op ziektes en plagen lastiger is, maar ook de waarneming van plant- en vruchtkleur. Rode tomaten zijn moeilijker van groene te onderscheiden als er geen groen licht in de lichtbron aanwezig is.

Er is door WUR gevraagd naar ARBO onderzoek voor werken onder verschillende kleuren LEDs. De aanbeveling vanuit ARBO was om een bril met kleurcorrecties te dragen. Verder is het nodige dat armatuur voldoet aan technische regelgeving die gericht is op veiligheid.

2.4.2 Effecten op gewasbescherming en biologische bestrijders

In de afgelopen 15 jaar is er veel kennis opgedaan over de effecten van LED belichting en spectrum op de groei en ontwikkeling van gewassen. Bij de toepassing van LED is gewasgezondheid een randvoorwaarde: het mag niet zo zijn dat er een lichtspectrum toegepast gaat worden dat voor het gewas goed is, maar leidt tot het opkomen van nieuwe ziektes en plagen, of een verminderde effectiviteit van bestaande natuurlijke vijanden. In de afgelopen jaren is het onderzoek hiernaar gestart.

Voor planten is rood licht een efficiënte lichtbron. Echter, mijten en insecten kunnen geen rood en verrood licht waarnemen. Dat betekent dat alle lichtspectra met voornamelijk rood licht voor hen gelden als weinig licht. Wel hebben mijten en insecten fotoreceptoren voor UV-A en groen licht en kunnen sommige soorten ook blauw licht waarnemen. De verwachting was daarom dat natuurlijke vijanden die overdag op zoek gaan naar plaaginsecten, zoals sluipwespen, minder actief zijn onder lichtspectra met weinig voor hen waarneembaar groen licht. Dit werd inderdaad bevestigd in onderzoek waarin de sluipwespsoort *Aphidius ervi* twee keer zoveel bladluizen parasiteerde onder een 'wit' LED spectrum (met gelijke delen rood, groen en blauw licht) dan bij een rood-blauw LED spectrum (dat bestond uit 95% rood en 5% blauw licht) (Dieleman et al. 2022a). Daarentegen zijn er andere soorten bestrijders, zoals de voor de bladluis bestrijding essentiële soort *Aphidoletes aphidimyza*, die juist bij lage lichtintensiteiten (schemering) de grootste zoekactiviteit vertonen en zich bij hogere lichtintensiteiten schuilhouden. De invloed van de hoeveelheid groen licht in het LED spectrum zal daarom op *Aphidoletes* waarschijnlijk een geheel andere invloed hebben dan op sluipwespen, en is tot dusver nog nooit onderzocht. Niet alle biologische bestrijders zijn gevoelig voor het lichtspectrum. Voor zowel de populatie-opbouw van *Amblyseius swirskii* in aubergine als het aantal nakomelingen van *Macrolophus pygmaeus* in tomaat werd geen invloed van het lichtspectrum gevonden (Dieleman et al. 2019).

Tevens is het belangrijk om te weten welke invloed LED spectrum heeft op de ontwikkeling van plagen. Voor het gewas tomaat, waar we de toename in het gewicht van rupsen van de tomatenmineermot (*Tuta absoluta*) en de eileg van tabakswittevlieg hebben bepaald onder verschillende LED lichtspectra zagen we een significant hogere groeisnelheid van *Tuta absoluta* rupsen onder 'witte' LED (met gelijke aandelen rood, groen en blauw). De eileg van tabakswittevlieg bleek niet aantoonbaar beïnvloed. Het toevoegen van verrood licht aan het spectrum, waarvan de verwachting was dat het de plantweerbaarheid zou verslechteren, bleek slechts marginale effecten te hebben op deze plagen (Dieleman et al. 2022b).

Samenvattend zou gezegd kunnen worden dat in het toepassen van lichtspectra in de teelt van tomaat, de effecten op het gewas leidend zijn. Uit onderzoek blijkt dat het lichtspectrum van invloed kan zijn op de activiteit van zowel plagen als biologische bestrijders. Echter, de huidige beperkte kennis op dit gebied geeft nog geen aanleiding om het lichtspectrum aan te passen. Dit verandert mogelijk wanneer in de toekomst de kennis op dit gebied toeneemt.

2.4.3 Effecten op bestuiving

In de teelt van tomaat, spelen bestuivers een belangrijke rol. Alle bestuivende insecten maken gebruik van kleur als ze bloemen zoeken op zoek naar stuifmeel en nectar, waarbij ze vooral gevoelig zijn voor licht in het gebied van UV tot groen/geel, en dat ze moeite hebben licht in de kleuren rood en verrood waar te nemen. In de afgelopen jaren is gebleken dat in een aantal winterteelten onder LED belichting, er problemen waren met bestuiving en sterfte van hommels. Of dit ook echt aan de LED belichting of het spectrum ligt, is niet duidelijk. Wel is uit voorlopige resultaten duidelijk dat hommels moeite hebben de bloemen te vinden als het lichtspectrum bestaat uit grotendeels rood licht, hetgeen kan leiden tot een mindere bestuiving en zetting. Dit pleit dus voor het inzetten van LEDs met een breder spectrum dan alleen rood en blauw.

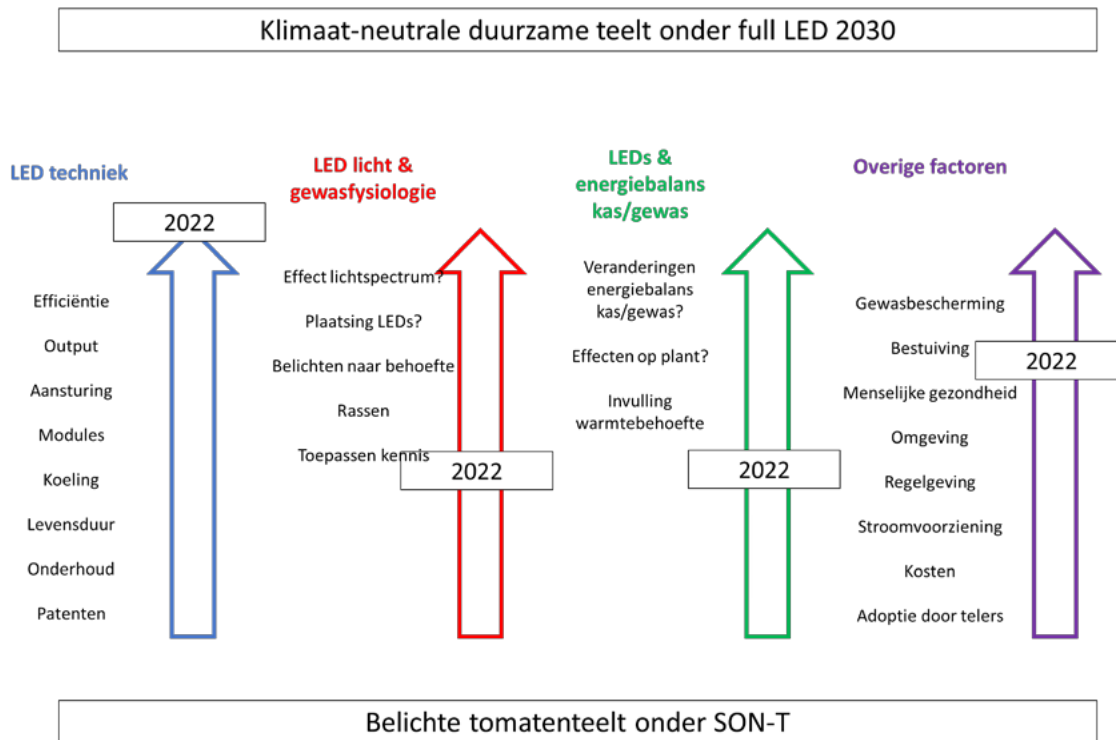
2.4.4 Vruchtkwaliteit.

Tot nu toe zijn er geen negatieve effecten aangetoond van telen onder LEDs op vruchtkwaliteitskenmerken zoals smaak, droge-stofgehalte en stevigheid na de oogst in vergelijking met teelten onder SON-T lampen (Witte et al. 2020; Hogewoning et al. 2012; Signify 2021a). Echter, zoals uit voorgaande paragrafen blijkt kan het LED spectrum waaronder geteeld wordt of het systeem wel invloed hebben op de vruchtgewicht, maar ook op andere kwaliteitskenmerken van tomaat. Zo heeft onderzoek laten zien dat het toevoegen van verrood aan het LED spectrum de Brix waarde van tomaten (een indicatie voor het suikergehalte) kan verhogen en een positief effect kan hebben op de smaak (Hogewoning et al. 2012; Kim et al. 2020). Dat spectrum effect heeft op smaak komt echter niet in alle studies duidelijk naar voren, mogelijk hangt het effect van het spectrum op vruchtkwaliteit af van het geteelde ras, de verschillen tussen geteste spectra en/of andere teeltfactoren zoals de temperatuur. Onderzoek van Verkerke en Labrie (Verkerke et al. 2015) heeft laten zien dat met gerichte belichting het vitamine C gehalte van vruchten is te sturen.

3 Visie en roadmap

De Nederlandse glastuinbouw streeft naar een fossielvrije duurzame teelt in 2030. In de huidige belichte tomatenteelt staat gebruik van de WKK centraal. Deze voorziet in de benodigde warmte, elektriciteit voor belichting en CO₂. Echter, omdat de WKK draait op de verbranding van aardgas past deze, in de huidige vorm, niet in de toekomstige fossielvrije duurzame teelt. Hoewel het in principe mogelijk is om een WKK aan te passen voor gebruik van groene brandstoffen zoals biogas zal door de beperkte beschikbaarheid en hoge kosten van deze brandstoffen op weg naar een fossielvrije duurzame teelt de nadruk moeten liggen op het gebruik maken van alternatieve energiebronnen en energiezuiniger telen om zo de vraag naar energie voor verwarming en belichting te verminderen en fossielvrij te maken. Dit kan door koeler te telen en door aan de (resterende) warmtevraag te voldoen door gebruik te maken van (rest)warmte afkomstig van industrie, geothermie of van laagwaardige warmte uit een koude/warmte opslag (aquifer) of de kaslucht. Door het inzetten van een warmtepomp en het beter isoleren van de kas, onder andere door gebruik te maken van energieschermen, kan de benutting van deze verschillende soorten energiebronnen worden verhoogd op een efficiënte manier (De Zwart et al. 2019).

Om het elektriciteitsverbruik voor belichting te verlagen, en zo fossielvrij telen mogelijk te maken, zullen SON-T lampen moeten worden vervangen door LED belichting. Daarmee vormt het toepassen van LEDs een belangrijke basis voor een klimaat neutrale tomatenteelt in 2030. Zoals uit hoofdstuk 2 blijkt, zijn er verschillende aspecten waar rekening mee moet worden gehouden bij het toepassen van LEDs. Dit leidt ook tot vragen over de juiste wijze van toepassen. De vragen hebben niet alleen betrekking op het effect van bijvoorbeeld het lichtspectrum en de lichtintensiteit op het gewas, maar ook op de veranderende energiebalans onder LEDs, die gevolgen heeft voor de warmtevraag. Om een overzicht te geven van wat er de komende tijd moet gebeuren om een succesvolle implementatie van LEDs in de tomatenteelt te realiseren is een roadmap opgesteld (Figuur 4). De aspecten/onderwerpen die in hoofdstuk 2 benoemd zijn, vormen de elementen van deze roadmap en zijn gegroepeerd in 4 ontwikkelpaden: techniek, LED licht en gewasfysiologie, LEDs en de energiebalans in de kas, en overige factoren. Onder dit laatste pad behoren zaken zoals de invloed van LEDs op bestuiving, gewasbescherming en economische ontwikkelingen. Belangrijk om hierbij te vermelden is dat er de vier paden niet volledig losstaan van elkaar, maar dat er interactie is. Zo zullen de technologische ontwikkeling van LEDs invloed hebben op het type vragen dat moet worden beantwoord met betrekking tot de invloed van LED belichting op het gewas. Het verschilt per ontwikkelpad hoe vergevorderd we op dit moment zijn. Dit wordt in de roadmap weergegeven door de positie van het blokje met '2022'. Het gaat daarbij niet om de ontwikkeling van elk van de deel aspecten die zijn benoemd onder een algemeen thema, maar waar het thema gemiddeld zich bevindt. Zo zijn we op het gebied van technische ontwikkeling van LEDs al dusdanig ver dat dit waarschijnlijk geen belemmering zal vormen voor de implementatie van full LED in de tomatenteelt. Over de effecten van het LED spectrum op het gewas en hoe om te gaan met de veranderende energiebalans bij het telen onder LED zijn veel meer onzekerheden. In de volgende paragrafen wordt voor de verschillende ontwikkelpaden geschetst waar we op dit moment staan, waar we naartoe gaan (de verschillende bestemmingen) en wat er de komende jaren nog moet gebeuren om deze te bereiken.



Figuur 4 Roadmap richting een klimaat neutrale duurzame teelt onder full LED

3.1 Techniek

Als het om de technische ontwikkeling van LEDs gaat dan moet het einddoel zijn om duurzame LED modules te ontwikkelen die elektriciteit zo efficiënt mogelijk omzetten in licht dat het gewas optimaal kan benutten. Daarbij is niet alleen de lichtomzettingsefficiëntie van belang, maar ook het spectrum, de aansturing (dimmen), de lichtspreiding en de duurzaamheid/levensduur van de LEDs en behuizing.

3.1.1 Efficiëntie

De SON-T lamp is nog steeds de standaard in de belichte tomatenteelt, hoewel telers steeds vaker kiezen voor een hybride of full LED systeem. De huidige generatie SON-T lampen heeft een lichtomzettingsefficiëntie van 1.85 $\mu\text{mol}/\text{J}$, en de verwachting is dat deze niet of nauwelijks nog zal toenemen. De huidige generatie LEDs hebben een veel hogere efficiëntie van rond de 3.7 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (in het geval van 'standaard' rood/blauwe LED armaturen) en deze neemt zelfs iets toe indien de lampen gedimd worden. Ook al is de huidige generatie LEDs al tweemaal zo efficiënt als de gangbare SON-T lampen, de verwachting is dat deze efficiëntie nog iets kan toenemen. De meeste getallen over efficiëntie zijn gebaseerd op de gangbare combinatie van rode LEDs met een beperkt percentage (5-10%) blauw. Echter, uit onderzoek naar lichtbehoeften van verschillende gewassen blijkt dat het gunstig is om andere kleuren aan het spectrum toe te voegen, dus zal het ook van belang zijn dat de efficiëntie van andere typen LEDs, zoals breedbandig wit of ver rood, ook toeneemt.

3.1.2 Output en koeling

In de huidige belichte tomatenteelt met SON-T wordt ongeveer 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR licht toegepast. Dit is bij toepassing van SON-T ook ongeveer het maximale, aangezien bij toepassen van hogere intensiteiten met SON-T belichting de hogere stralingswarmte schade kan veroorzaken aan het gewas. Met LEDs is het goed mogelijk om bij hogere intensiteiten te telen, zonder dat dit tot een hogere warmte straling leidt. Voor de output van de LED zal onder andere verbetering nodig zijn in de elektronische aansturing van de LEDs. Bij hogere intensiteiten en dus meer LED per armatuur zal het koelen van de LEDs belangrijker worden. Op dit moment zijn de meest LED armaturen die worden toegepast in de glastuinbouw passief gekoeld en zijn de LED armaturen zodanig ontworpen dat de warmteoverdracht van de LEDs aan de kaslucht zo goed mogelijk verloopt. Echter, bij hogere output, hogere lichtintensiteiten, is de vraag of passieve koeling nog voldoet en zullen er mogelijk actieve koeltechnieken moeten worden toegepast zoals lucht- of waterkoeling. Hoe deze technieken zich zullen ontwikkelen, zal mede afhankelijk zijn van inzichten in de effecten van LEDs op de temperatuurverdeling in het gewas en hoe dit de gewasgroei en ontwikkeling en uiteindelijk de productie beïnvloedt.

3.1.3 Ontwerp, materiaalkeuze en duurzaamheid

Op dit moment is er een grote diversiteit aan LED armaturen beschikbaar voor de glastuinbouw. Het ontwerp hangt onder andere af van de manier waarop de lampen worden gekoeld, hoe het licht wordt verspreid (het type reflectoren gebruikt en positioneren van de LEDs), hoe de lampen worden geplaatst (top of tussenbelichting) en of het gaat om armaturen die SON-T lampen 1-op-1 vervangen of niet. Op een aantal gebieden kunnen de komende jaren nog stappen worden gezet om het telen met LEDs nog energiezuiniger en aantrekkelijker te maken voor telers. Onder andere door het compacter maken van modules, of de modules zodanig ontwerpen dat deze in de kasconstructie geïntegreerd kunnen worden en zo min mogelijk natuurlijk licht onderscheppen. Daarnaast worden er stappen gezet om de lichtspreading van de modules te verbeteren met zo min mogelijk verlies van licht. Dit kan worden gerealiseerd door het ontwerp van de modules zelf en/of de ontwikkeling en inpassing van nieuwe typen reflectoren en coatings. Ook zullen de LED modules steeds duurzamer en onderhoudsvriendelijker worden. Zo wordt er bijvoorbeeld gezocht naar nieuwe robuuste materialen waarmee de modules beter bestand zijn tegen externe factoren zoals straling, temperatuursveranderingen, vocht, stof en chemicaliën. Overigens zijn er ook stappen te zetten als het om de duurzaamheid/levensduur van de LEDs zelf gaat: de degradatiesnelheid van LEDs die bepaalde lichtkleuren afgeven, zoals bijvoorbeeld verrood, zal nog verder omlaag moeten om te voorkomen dat hierdoor verschuivingen in het spectrum optreden in verloop van tijd.

3.1.4 Aansturing

Een groot voordeel van het toepassen van LED belichting ten opzichte van SON-T is dat het meer aansturingmogelijkheden biedt: de lampen kunnen met grotere regelmaat aan/uit worden geschakeld zonder dat dit de levensduur beïnvloedt, en de lampen kunnen gedimd worden, waarbij de efficiëntie van de LEDs toeneemt. Het aan/uitschakelen en dimmen kan zelfs per lichtkleur, ook al zijn de mogelijkheden hiervoor nu nog afhankelijk van de fabrikant en het type module. Het snel aan en uit schakelen of dimmen van lampen stelt telers in staat de belichting meer af te stemmen op de behoeften van het gewas, en zo efficiënter met de energie voor belichting om te gaan. Daarnaast biedt het de mogelijkheid om de belichting af te stemmen op de beschikbaarheid van elektriciteit en zo kosten te besparen. Het dimmen van de lampen, eventueel per kleur, is technisch mogelijk. Dit is een ontwikkeling die de komende jaren nog voortgezet zal worden. Er loopt een initiatief om de aansturing van LEDs te uniformeren voor de glastuinbouw (Dennis Medema, pers. med.). Maar om het inzetten van deze mogelijkheden aantrekkelijk te maken, zal niet alleen moeten worden gewerkt aan de aansturing van het dimmen van LEDs maar vooral ook aan de kennis over de lichtbehoefte van het gewas. Op basis van deze kennis kan het aansturen van de LEDs dan bijvoorbeeld gedaan worden op basis van het tijdstip op de dag, of op basis van metingen aan het kasklimaat of de plant. In de volgende paragraaf zal hier dieper op in worden gegaan.

3.2 LED licht en gewasfysiologie

De technische eigenschappen van LEDs maken dat de energie voor belichting veel efficiënter kan worden ingezet voor productie dan met SON-T. Echter, er moeten ook meer keuzes worden gemaakt als het gaat om de belichtingsstrategie. Zo kan door combineren van verschillende type LEDs in eenzelfde armatuur in principe ieder gewenst spectrum worden gegeven, waar het spectrum van SON-T in principe vast staat. Daarnaast is het door de lagere warmtestraling mogelijk om met LEDs onder hogere intensiteiten te telen en tussenbelichting toe te passen. Ook kunnen LEDs, in tegenstelling tot SON-T lampen, snel worden aan/uit geschakeld en gedimd zonder de levensduur van de lampen te beïnvloeden. Dit alles maakt dat met LEDs beter kan worden ingespeeld op de daadwerkelijke belichtingsbehoefte van het gewas dan wanneer geteeld wordt onder SON-T: het juiste lichtspectrum, juiste intensiteit, op het juiste moment van de dag. Het einddoel van dit ontwikkelpad is dan ook het zo efficiënt mogelijk inzetten van LED belichting voor productie en kwaliteit. Hoewel telen onder LEDs dus de mogelijkheden biedt om dit te bereiken, moeten er nog veel vragen worden beantwoord om dit te kunnen realiseren.

3.2.1 Belichting naar behoefte

Om te belichten naar behoefte van het gewas moet duidelijk zijn waar de plant behoefte aan heeft. De kennis hiervan is cruciaal om energie voor belichting zo efficiënt mogelijk in te zetten voor productie. Bij welke instraling is belichten nog rendabel en met welke intensiteit zal dit dan moet worden gedaan. Daarbij is de vraag of dit de hele dag door op dezelfde manier benaderd kan worden of dat op bepaalde momenten van de dag, bijvoorbeeld het begin of einde, minder belichting nodig is. De lichtbehoefte van het gewas hangt sterk af van de vraag naar assimilaten en deze hangt weer af van factoren die de verbruikssnelheid van assimilaten bepalen zoals de temperatuur en plantbelasting. Om te belichten naar behoefte van het gewas is de komende tijd meer inzicht nodig in de vraag van assimilaten van het gewas over de dag en hoe deze te meten of nauwkeurig te berekenen. Omdat de aanmaak van assimilaten niet alleen afhangt van de hoeveelheid licht, maar ook van andere omgevingsfactoren zoals CO₂ en temperatuur is het belangrijk om hier de belichting op af te stemmen. Om uiteindelijk de energie voor LED belichting zo efficiënt mogelijk in te kunnen zetten is het dus nodig dat er meer inzicht komt in (het bepalen) van de lichtbehoefte en benuttingsefficiëntie van het gewas en de invloed van omgevingsfactoren op de lichtverzadiging van het gewas. Dit is nodig om optimaal technische mogelijkheden als dimmen te benutten.

3.2.2 Lichtspectrum

Op dit moment wordt in de tomatenteelt LED belichting toegepast met een spectrum dat voornamelijk bestaat uit rood licht, aangevuld met blauw, breedbandig wit en in sommige gevallen een aandeel verrood. Uit de ervaringen in de praktijk en onderzoek blijkt het prima mogelijk om tomaten te telen onder een dergelijk spectra. Echter, over het daadwerkelijke effect van verschillende spectra op belangrijke aspecten zoals fotosynthese, sinksterkte, plantarchitectuur, bloei, productkwaliteit en biologische gewasbescherming is de kennis niet volledig. Helemaal wanneer het gaat om de effecten van lightspectra op bepaalde momenten van de dag of tijdens specifieke teeltfasen, of om de effecten van het spectrum op verschillende hoogtes in het gewas. Het zal belangrijk zijn om de komende jaren meer inzicht te krijgen in deze effecten om zo het LED licht zo goed mogelijk in te zetten als aanvulling op het natuurlijk aanwezige zonlicht. Hierbij moet enerzijds rekening worden gehouden met ras-afhankelijke effecten van het lightspectrum. Anderzijds zullen veredelaars op basis van onderzoek naar de effecten van LED spectra, maar ook van telen onder LEDs algemeen, moeten werken aan de selectie van nieuwe rassen op basis van planteigenschappen die gewenst zijn bij het telen onder LEDs.

Uiteindelijk zal de kennis die de komende jaren ontwikkeld wordt op het gebied van lichtbehoefte van gewassen en inzet van LED belichting met bepaalde intensiteiten en spectra zo efficiënt en economisch rendabel ingezet moeten worden. Daarbij is het naast het opbouwen van kennis door onderzoek van belang dat er wordt gewerkt aan het updaten van kas en gewasmodellen op basis van deze kennis om het zo toegankelijk te maken voor toepassing door telers.

3.3 LEDs en de energiebalans kas en gewas

Zoals in hoofdstuk 2 wordt beschreven kan het vervangen van SON-T lampen door LEDs niet worden gezien als een simpele verandering van de lichtbron in een teeltsysteem maar gaat het om een verandering die aanpassingen vereist in het gehele teeltsysteem. Het toepassen van LEDs heeft in vergelijking met SON-T lampen namelijk ook invloed op de energiebalans van de kas en het gewas, wat weer gevolgen heeft voor bijvoorbeeld de inzet van de buisverwarming, raamopening en CO₂ dosering. Doordat stralingswarmte die wordt afgegeven door LEDs veel lager is dan van SON-T lampen zal de gewastemperatuur bij eenzelfde intensiteit belichting lager liggen wanneer geteeld wordt onder LEDs dan onder SON-T. Dit geldt met name voor de plantdelen die de meeste stralingswarmte opvangen, zoals de bovenste bladlagen, waardoor de temperatuurverdeling in het gewas verandert. De planttemperatuur is van invloed op veel processen in de plant zoals de fotosynthese, de aanmaak en omzetting van assimilaten en de activiteit van hormonen. Een te lage planttemperatuur kan daardoor tot gevolg hebben dat de ontwikkeling trager verloopt dan gewenst, of dat het licht niet optimaal benut wordt door het gewas. Voor een duurzame rendabele teelt onder LEDs moet er daarom gestuurd worden op een optimale planttemperatuur door gebruik te maken van energiezuinige technieken en teeltstrategieën. Om tot dit punt te komen zijn er vragen die beantwoord zullen moeten worden met betrekking tot de invloed van LEDs op de energiebalans, het effect van de temperatuurverdeling op het gewas, en technieken en strategieën waarmee op een energiezuinige duurzame manier de gewenste planttemperatuur kan worden gerealiseerd.

3.3.1 Veranderingen van de energiebalans kas en gewas

De lagere stralingswarmte van LEDs zorgt voor een lagere planttemperatuur in vergelijking met SON-T. Dit geldt met name voor de delen van de plant die de directe straling opvangen. Het gevolg is dat de temperatuurverdeling in het gewas verandert. Daarnaast zal het verschil tussen de plant- en de kastemperatuur minder groot worden, waardoor er bij telen onder LED belichting op een andere manier moet worden gestuurd op klimaat. De planttemperatuur onder LEDs hangt af technische eigenschappen van de armaturen zoals de vorm, het materiaal en actieve koelingssysteem indien deze aanwezig is. Daarnaast hangt deze af van de plaatsing van de LEDs en de afstand tot het gewas. Vooral dit laatste zal een groot effect hebben op de temperatuurverdeling in het gewas. Hoe deze factoren de gewastemperatuur precies beïnvloeden, en in welke mate, is tot nu toe nog niet volledig in kaart gebracht. Maar voor het creëren van optimale teeltcondities met LEDs als lichtbron zal dit wel nodig zijn.

3.3.2 Effecten op gewas

Planttemperatuur is van invloed op veel plantprocessen die bepalend zijn voor de groei en ontwikkeling van gewassen en uiteindelijk ook op de productie en kwaliteit. Echter, over het effect van de lagere planttemperatuur en veranderende temperatuurverdeling onder LEDs in het gewas op belangrijke plantprocessen is nog veel onbegrepen. Zo is de verwachting dat de lagere planttemperatuur onder LEDs ervoor zorgt dat een plant minder verdampt. Dit zou de opname van water en voedingsstoffen die passief met de waterstroom worden opgenomen beperken. Echter, tot nu toe blijkt dat wateropname niet duidelijk lager is bij het telen van tomaten onder LEDs. De vraag is of er daadwerkelijk minder verdamping plaatsvindt bij het telen onder LEDs of juist wel meer dan gewenst?

Een door telers vaak gestelde vraag is hoeveel verdamping er eigenlijk nodig is voor een goede gewasontwikkeling en productie. Daarnaast is er veel onduidelijk over de effecten van de veranderende temperatuurverdeling op de assimilatenbalans en de hormoonbalans in het gewas. Factoren, die samen met de gewas temperatuur, van grote invloed zijn op de ontwikkeling van het gewas en de afrijping van vruchten en daarmee de productie. De veranderde temperatuurverdeling kan gevolgen hebben voor de temperatuur van verschillende organen. Verschuivingen hierin kunnen de sink/source balans beïnvloeden wat effect kan hebben op de assimilatenverdeling. Hierbij is het belangrijk om te bedenken dat de effecten van de veranderende temperatuurverdeling onder LEDs ook kunnen afhangen van de teeltomstandigheden, de ontwikkelingsfase en de stand van het gewas. Ook kunnen verschillende rassen anders reageren. Onderzoek zal de komende jaren nodig zijn om de vragen met betrekking tot de effecten van de veranderende temperatuurverdeling onder LEDs op plantprocessen te beantwoorden en zo inzicht te krijgen in wat de gewenste plant- en orgaantemperaturen (en temperatuurverdeling) zijn om een hoogwaardige, duurzame en rendabele teelt te realiseren. Met deze inzichten zal duidelijk worden of er eventuele energiebehoeften zijn in een teeltsysteem met LEDs. De vervolgstap zal zijn om deze eventuele warmtetekorten op een duurzame energiezuinige manier in te vullen.

3.3.3 Invulling warmtebehoefte

Er zijn verschillende technieken beschikbaar die gebruikt kunnen worden om (een deel van) de warmtetekorten bij het telen onder LEDs op een duurzame energiezuinige manier in te vullen. Deze technieken worden nog niet op grote schaal in de praktijk toegepast. Om dit te bereiken zal er de komende jaren ingezet moeten worden op het verder ontwikkelen en toepassen van deze technieken in de teelt onder LEDs. Het is daarbij goed denkbaar dat de mogelijkheid voor toepassen van specifieke technieken afhankelijk is van karakteristieken van individuele bedrijven zoals de locatie en het teeltoppervlak. Voorbeelden van fossielvrije methoden om te voldoen aan de (extra) warmtevraag bij het telen onder LEDs zijn het gebruik maken van warmte afkomstig van geothermische bronnen of industriële restwarmte. Daarnaast is het mogelijk om warmte overschotten uit de kas in te zetten om de kas te verwarmen wanneer hier behoefte aan is. De warmte overschotten kunnen worden opgeslagen in een warmte/koude opslag (aquifer) zodat deze gedurende periodes van warmte tekorten kunnen worden gebruikt om de kas te verwarmen. Deze methoden kunnen weliswaar als fossielvrij worden beschouwd maar verbruiken door de inzet van onder andere warmtepompen, die nodig zijn voor het oogsten van de warmte en het omzetten van laagwaardige warmte in hoogwaardige bruikbare warmte om de kas te verwarmen, wel elektriciteit. Omdat door de energietransitie de vraag naar elektriciteit sterk zal toenemen de komende jaren is het noodzakelijk dat de warmtebehoefte niet alleen fossielvrij wordt ingevuld, maar ook met zo min mogelijk gebruik van elektriciteit. Een aantal technieken kan helpen met het beter vasthouden van de warmte in de kas waardoor er minder elektriciteit wordt gebruikt om deze te produceren. Voorbeelden die in onderzoek en op beperkte schaal in de praktijk worden toegepast zijn ontvochtigingsinstallaties (met warmteterugwinning), die er voor zorgen dat ramen vaker gesloten kunnen blijven, en de inzet van (meerdere) energieschermen. De teeltstrategie kan ook bijdragen aan het beter vasthouden van de warmte in de kas, bijvoorbeeld door het handhaven van een stabiel klimaat (minder groot verschil tussen dag en nacht temperatuur; kleinere DIF). Het is wel van belang dat duidelijk wordt wat het effect hiervan is op het gewas, of dit verschilt per ras en welke gevolgen dit verder heeft voor de teeltstrategie (bijvoorbeeld in relatie tot bemesting en gewasbescherming).

Zoals in de paragraaf hiervoor is aangegeven, is het belangrijk om de warmtebehoeften van het gewas goed in kaart te brengen. Daarbij is ook een belangrijke vraag of de warmtebehoefte niet te verlagen is. Bijvoorbeeld door het aanpassen van het lichtspectrum of andere teeltcondities. Zo is warmte nodig voor voldoende snelle ontwikkeling van het gewas en afrijping van vruchten. Aangezien deze processen ook hormonaal gereguleerd worden, en de hormoonbalans niet alleen door temperatuur maar ook door licht(spectrum) wordt beïnvloed, zijn er wellicht mogelijkheden om een lagere planttemperatuur te compenseren met een specifiek lichtspectrum. De vraag naar warmte voor verdamping van het gewas is mogelijk ook in te vullen door het spectrum of door luchtbeweging rond het gewas. Daarnaast zouden veredelaars zich kunnen richten op het ontwikkelen van rassen die beter aangepast zijn aan een energiezuinige teelt onder LEDs.

3.4 Overige factoren

Hoewel in dit rapport de nadruk wordt gelegd op de technische ontwikkelingen en de effecten van telen onder LEDs op het kasklimaat en het gewas zijn er nog andere factoren waar rekening mee moet worden gehouden bij de transitie naar duurzaam telen onder full LED. Deze vormen randvoorwaarden waar aan zal moeten worden voldaan om een de transitie naar een fossielvrije duurzame tomatenteelt onder full LED mogelijk te maken.

3.4.1 Gewasbescherming en bestuiving

Om een duurzame energiezuinige tomatenteelt onder full LED te realiseren is het noodzakelijk dat er een gezond gewas kan worden geteeld, waarbij steeds minder gebruik gemaakt wordt van chemische gewasbeschermingsmiddelen. Daarnaast zal er altijd een goede bestuiving plaats moeten kunnen vinden. De veranderende condities bij het duurzaam telen onder LED belichting kunnen op verschillende manieren effect hebben op gewasgezondheid en bestuiving. De condities kunnen effect hebben op de weerbaarheid van de plant zelf, via de hormoonbalans en productie van afweerstoffen, of de kwaliteit van de bloemen. Ook kunnen de condities de ontwikkeling van ziekten en plagen of het vlieggedrag van bestuivende insecten beïnvloeden. Ook al is de groei en ontwikkeling van het gewas het uitgangspunt bij het duurzaam telen van tomaat onder LEDs, er zal ook aandacht moeten worden besteed aan deze vragen. Op dit moment is de kennis van effecten van bijvoorbeeld lichtspectra, intensiteit en (plant)temperatuur op de activiteit van biologische gewasbeschermers en bestuivers nog zeer beperkt. Ook liggen er nog vragen over het effect van onder andere het spectrum en de planttemperatuur op de plantweerbaarheid. Werkt dit hetzelfde als in Arabidopsis, waarin veel onderzoek is gedaan? Is er een uitruil (trade-off) tussen weerbaarheid en groei? Kan deze eventueel worden omzeild?

3.4.2 Werkbaarheid en menselijke gezondheid

Naast de gezondheid van het gewas is het natuurlijk ook van groot belang dat de kas een gezonde en prettige werkomgeving vormt voor alle mensen die betrokken zijn bij de teelt. Het telen onder LEDs kan daar aan bijdragen doordat bijvoorbeeld het spectrum kansen biedt om het gewas te sturen of weerbaar te telen en zo het gebruik van chemische remmiddelen of gewasbeschermingsmiddelen te beperken.

Om een gezonde prettige werkomgeving te creëren is het ook van belang dat LED licht geen negatieve effecten heeft op de gezondheid (zowel geestelijk als fysiek). Het LED spectrum waaronder op dit moment doorgaans tomaten geteeld wordt (voornamelijk rood licht met een laag percentage blauw) wordt door veel mensen als onprettig ervaren en het kan het beoordelen van het gewas lastig maken. Daarnaast kan het blauwe licht mogelijk schadelijk kunnen zijn voor de ogen. Echter, er is nog maar weinig bekend over de effecten van LED licht op het menselijke oog. Het dragen van een beschermende bril kan het oog beschermen tegen eventuele schadelijke effecten van het licht. Daarnaast kan toevoeging van een kleine hoeveelheid groen licht aan het spectrum ervoor zorgen dat mensen het licht als wit ervaren wat het werken prettiger maakt en ervoor zorgt dat het gewas beter te beoordelen wordt. Voor subsidie op LED belichting in de tuinbouw stelt het ministerie van LNV dan ook de voorwaarde dat er minimaal 5% groen licht in het spectrum zit. De vraag is of het dragen van een bril en/of toevoeging van 5% groen licht in het spectrum voldoende is om goed en veilig te kunnen werken. Om dit vast te kunnen stellen zal er de komende jaren meer onderzoek gedaan moeten worden naar de effecten van LED licht op de mens. Het is goed mogelijk dat er uiteindelijk onderscheid gemaakt moet worden tussen een lichtspectrum waaronder gewerkt wordt en een spectrum dat optimaal is voor het gewas. Lampen met een variabel spectrum bieden dan uitkomst.

3.4.3 Stroomvoorziening

Door de energietransitie zal de vraag naar groene elektriciteit de komende jaren sterk toenemen. Maar ook het aanbod van groene elektriciteit zal meer gaan fluctueren.

De verwachting is dat er niet direct aan de toenemende vraag zal kunnen worden voldaan door twee limiterende factoren:

- De productie van duurzame energie.
Op dit moment in Nederland voornamelijk opgewekt door windturbines en zonnepanelen. Beiden hebben als nadeel dat ze niet onder alle condities een constante hoeveelheid benodigde energie produceren.
- De capaciteit van het elektriciteitsnet.
Het huidige net in een groot deel van Nederland is op dit moment al niet in staat om alle duurzaam opgewekte elektriciteit op te vangen en te transporteren. De verwachting is dat dit de komende jaren niet opgelost zal worden (De Boer, 20 oktober 2021).

Het gevolg is dat er niet altijd voldoende elektriciteit beschikbaar zal zijn voor de belichting in de glastuinbouw, zeker op momenten dat er weinig elektriciteit kan worden opgewekt of op tijdstippen dat er een piek is in de vraag naar elektriciteit. Dit is mogelijk (deels) op te lossen door het lokaal produceren van duurzame energie op bedrijven of het tijdelijk opslaan van energie. Toch zal dat waarschijnlijk niet voldoende zijn en is het goed mogelijk dat telers het stroomverbruik zullen moeten verlagen door de lampen te dimmen of helemaal uit te schakelen bij beperkte beschikbaarheid van duurzame elektriciteit. De vraag daarbij is hoe telers dit het beste kunnen aanpakken terwijl en tegelijk een rendabele teelt draaien en dus niet (teveel) in te leveren in productie en kwaliteit? Daarvoor moet onder andere uitgezocht worden wat het effect op het gewas is van tijdelijk minder of helemaal niet belichten. Kan dit zonder teveel in te leveren op productie en kwaliteit? Is het bijvoorbeeld mogelijk om eventuele effecten van periodes waarop minder of niet wordt belicht te compenseren door op andere momenten meer te belichten? Er zijn echter ook omgekeerde effecten waarbij de sector juist kan helpen om een overaanbod van elektriciteit van het net op te nemen en te belichten terwijl die voor de teelt niet nodig is.

3.4.4 Kosten

Het vervangen van SON-T door LEDs vraagt een grote investering. Bovendien gaat het om een systeemverandering die mogelijk meerdere aanpassingen van het teeltsysteem vereist, zoals de plaatsing van schermen, en daarmee extra investeringen. Op zichzelf hoeft de hoogte van de investering geen drempel te vormen voor telers om over te stappen naar een teelt met full LED. De terugverdientijd zal zwaar wegen bij deze beslissing. De terugverdientijd hangt af van de aanschafprijs, de overheidssubsidies op de aanschaf van LEDs, de elektriciteitsbesparing ten opzichte van SON-T, de prijs van de elektriciteit, de effecten op productie en de gerealiseerde opbrengstprijzen. Ontwikkeling van de aanschafprijs laat zich moeilijk voorspellen: de techniek is ver ontwikkeld en er wordt veel geproduceerd, maar tegelijkertijd is de vraag erg hoog. Wel zal bij een gelijke belichtingscapaciteit het elektriciteitsverbruik voor belichting een stuk lager zijn bij LEDs en aangezien de verwachting is dat de elektriciteitsprijzen zullen stijgen de komende jaren door de toenemende schaarste zal de terugverdientijd voor LEDs steeds korter worden ten opzichte van SON-T.

3.4.5 Regelgeving

Regelgeving vanuit de overheid zal ook van invloed zijn op de beslissing van telers om SON-T te vervangen door full LED. Daarbij kan men denken aan regelgeving omtrent arbeidsomstandigheden en lichtuitstoot naar de omgeving die het wellicht lastiger kunnen maken voor een teler om te telen onder full LED.

4 Conclusies en aanbevelingen.

Alle onderzoeken die in de afgelopen 10 jaar zijn uitgevoerd laten zien dat tomaten telen onder LED belichting goed mogelijk is. Er is, zeker nu, volop vraag vanuit de praktijk naar de toepassing van LED. Vanuit dat perspectief is het "pad naar de praktijk" op gebied van LED belichting na de start van dit project al snel ingeslagen en wordt in de praktijk LED al toegepast, ondanks de vragen en onzekerheden die in dit rapport benoemd zijn.

Het grote voordeel van LED belichting is de hogere efficiëntie: met eenzelfde hoeveelheid elektriciteit wordt meer licht geproduceerd, en minder warmte, wat de ontwikkeling richting een duurzame, fossielvrije teelt binnen handbereik brengt. Een ander voordeel hiervan is dat vanwege de lagere warmteproductie er minder geventileerd hoeft te worden, dus minder verlies aan CO₂ en daarmee een betere benutting van schaars productiegoed.

Bij toepassing van LED moet rekening gehouden worden met het feit dat de teelt anders is dan onder SON-T, met name de energiebalans, dus zijn er aanpassingen in het teelt aanpak nodig.

De praktijkontwikkeling was naar hogere lichtintensiteiten, maar de recente ontwikkelingen van de energiemarkt hebben deze ontwikkeling gekeerd door de afweging van kosten en baten.

De ontwikkeling van LED zijn vier paden onderscheiden.

Op het pad techniek is de ontwikkeling vrij ver. Er kunnen duurzame LED modules geproduceerd worden die elektriciteit met een hoge efficiëntie omzetten in licht dat het gewas optimaal kan benutten. Daarbij is niet alleen de lichtomzettingsefficiëntie hoog, maar ook op het gebied van het spectrum, de aansturing (dimmen), de lichtspreiding en de duurzaamheid/levensduur van de LEDs is men technologisch al dusdanig vergevorderd dat technologie waarschijnlijk geen limiterende factor zal zijn voor de transitie van SON-T naar LEDs.

Op de ontwikkelpaden van LED en gewasfysiologie en LEDs en energiebalans is er genoeg kennis om kwalitatief goed te telen onder LEDs, maar er zijn nog vragen die beantwoord moeten worden voor optimalisatie en zo fossielvrij telen onder LEDs in de hele sector mogelijk te maken. De vragen richten zich op de lichtbehoefte van het gewas en hoe deze verandert gedurende de teelt en onder verschillende omstandigheden. Hetzelfde geldt voor de warmtebehoefte van het gewas en hoe deze in te vullen. Er liggen ook nog kennisvragen over het effect van dynamisch belichten die met de huidige ontwikkeling van de elektriciteitsprijs urgent zijn geworden. Is het bijvoorbeeld mogelijk de lampen te dimmen of zelfs uit te schakelen op momenten van hoge energievraag zonder (teveel) in te leveren op productie en kwaliteit?

Het ontwikkelpad overige factoren omvat de randvoorwaarden waaraan zal moeten worden voldaan om een de transitie naar een fossielvrije duurzame tomatenteelt onder full LED mogelijk te maken. Het is moeilijk om in te schatten waar we precies staan op dit moment omdat dit pad sterk beïnvloed wordt door de andere ontwikkelpaden. Zo zal de mate waarin de elektriciteitsvoorziening limiterend is afhangen van het antwoord op de vraag of het mogelijk is op momenten van veel energievraag terug te schakelen in belichting. Daarnaast laten sommige factoren, zoals de opbrengstprijzen, zich zeer moeilijk voorspellen terwijl deze een grote invloed kunnen hebben op de inzet van belichting in het algemeen.

Voor de eerste stap naar full LED zijn de belangrijkste aandachtspunten opgelost, maar voor een optimale inzet van LED belichting voor groei en ontwikkeling is kennis nodig over:

- Dynamisch belichten: mogelijkheden om op momenten van veel energievraag terug te schakelen in belichting?
- Energiebalans: wat is de benodigde gewastemperatuur, hoe kun je dit met zo min mogelijk energie realiseren (schermstrategie, ontvochtigen, etc.)?
- Water en nutriënten: hoeveel verdamping is echt nodig? Is minder verdamping is minder vraag naar ontvochtiging (actief of luchten) en dus energiezuiniger?
- Wat is de beste lichtverdeling?

Voor praktijktoepassingen is demonstratie op grotere schaal, monitoring en kennis overdracht belangrijk.

4.1 Adoptie door telers

Uiteindelijk is het belangrijk dat telers het vertrouwen hebben dat telen onder full LED goed mogelijk is. Om dit te bereiken zijn er op het gebied van gewasfysiologie nog de nodige uitdagingen. De antwoorden en kennis uit onderzoek moeten duidelijk worden gecommuniceerd naar telers en andere stakeholders zoals investeerders. Daarnaast zullen ook demonstratieproeven waarin duurzaam wordt geteeld onder full LED en ervaringen van pionierende bedrijven van belang zijn om telers te overtuigen dat met energiezuinig en fossielvrij telen onder full LED een rendabele teelt met goede productie en kwaliteit kan worden gerealiseerd.

Literatuur en internetbronnen

- Arkesteijn, M., (2018).
Carbon LED: kennisontwikkeling en demo in een. CO₂ -voetafdruk belichte tomaat kan 45% omlaag dankzij succesvol samenwerkingsproject. *Onder Glas* 15(8): 18-19
- De Boer, S. (20 oktober, 2021).
Volle elektriciteitsnetten frustreren economie en energietransitie. <https://www.energiepodium.nl/artikel/volle-elektriciteitsnetten-frustreren-economie-en-energietransitie-geraadpleegd-30-03-2022>
- De Gelder, A., Warmenhoven, M., van der Stoep, R., & Hartog, B. (2022).
Een perfecte roos is duurzaam geteeld. Rapport Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw; WPR-1145. DOI: <https://doi.org/10.18174/569124>
- De Zwart, F., Vanthoor, B., & Koreneef, S. (2019).
Tuinbouw zonder fossiele energie (No. WPR-853). Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw. Delphy Fossielvrij.
<https://www.kasalsenergiebron.nl/onderzoeken/20159-tomaat-fossielvrij-met-led/en>
<https://www.kasalsenergiebron.nl/onderzoeken/20184-tomaat-fossielvrij-met-led-meer-is-niet-altijd-beter/geraadpleegd-23-3-2022>.
- Dieleman, J.A., De Beer, E., Millenaar, F., & Hoogstraten, van, K. (2017).
Jaarrond tomatenteelt kan energiezuiniger én productiever met uitgekiende LED-belichting. Extra verrood licht laat productiestijging tot 17 procent zien. *Onder Glas* 10: 22-23
- Dieleman, J.A., P.H.B. De Visser, E. Meinen, J.G. Grit, T.A. Dueck, 2019.
Integrating Physiological Responses of Tomato Plants to Light Quality to the Crop Level by 3D Modelling. *Frontiers in Plant Sciences*. doi: 10.3389/fpls.2019.00839
- Dieleman, J.A. (2021a).
Spectrumproef met dynamische LED's bij freesia. *Onder Glas*, 18(12), 55-55.
- Dieleman, J.A. (2021b).
Spectrumproeven met dynamische LED-belichting chrysanth. *Onder Glas*, 2021/18(5), 35-35.
- Dieleman, J.A., de Gelder, A., Weerheim, K., Kruidhof, M., Verkerke, W., Garcia, N., Kromwijk, A., Elings, A., de Visser, P., & Janse, J. (2020).
Denkkader licht: Naar een effectief gebruik van LED belichting in de glastuinbouw. Rapport Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw; WPR-774. <https://doi.org/10.18174/526138>
- Dieleman, J.A., Carpineti, C., Kruidhof, H.M., Geurts, J., & Weerheim, K. (2022a).
Chrysanth en alstroemeria: sturen met lichtspectrum. Rapport WPR 856, 68 pp.
- Dieleman, J.A., Weerheim, K., Kruidhof, H.M., Carpineti, C., Fradin, E., Plantenga, F., Van Hoogdalem, M. & Leiss, K. (2022b).
Duurzame teeltssystemen met LEDs. Rapport WPR 1080, 128 pp.
- Dorais, M., S. Yelle & A. Gosselin (1996).
Influence of extended photoperiod on photosynthate partitioning and export in tomato and pepper plants, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24:1, 29-37, DOI: 10.1080/01140671.1996.9513932
- Dueck, T.A., Meinen, E., Steenhuizen, J. W., Muusers, R., Uenk, D., & Marcelis, L. F. M. (2007).
Belichting tomaat: elk belichtingsuur volledig benutten (No. 439). Wageningen UR, Glastuinbouw.
- Dueck, T., Janse, J., Schapendonk, A., Kempkes, F., Eveleens, B., Scheffers, K., Pot, S., Trouwborst, G., Nederhoff E., Marcelis, L. 2010.
Lichtbenutting van tomaat onder LED en SON-T belichting. Wageningen UR, rapport GTB-1040. 92 pp.
- Emerson, R., Chalmers, R., and Cederstrand, C. (1957).
Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(1):133-143.
- Fanwoua, J., Vercambre, G., Buck-Sorlin, G., Dieleman, J. A., de Visser, P., and Génard, M., 2019.
Supplemental LED lighting affects the dynamics of tomato fruit growth and composition. *Scientia Horticulturae*, 256:108571.
- Haque, M. S., de Sousa, A., Soares, C., Kjaer, K. H., Fidalgo, F., Rosenqvist, E., & Ottosen, C. O. (2017).
Temperature variation under continuous light restores tomato leaf photosynthesis and maintains the diurnal pattern in stomatal conductance. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1602.

- Hogewoning, S. W., Sanders, J., Peekstok, T., & Persoon, S. (2013).
Lichtkleuren onderzoek: Wat is de ontbrekende schakel voor succesvolle productieverhoging? 49 pp. TTO & Plant Lighting BV.
- Inada, K., (1976).
Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiology* 17(2): 355–365.
- Ji, Y., Ouzounis, T., Corbier, S., Kaizer, E., Nguyen, P.T., Schouten, H.J., Visser, R.G.F., Pierik, R., Marcelis, L.F.M. and Heuvelink, E., 2019.
Far-red radiation increases dry matter partitioning to fruit but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato. *Env. Exp. Bot.* 168: 103889.
- Kaiser, E., Weerheim, C., Schipper, R., Dieleman, J.A., (2019).
Green light increases biomass and yield in tomato and evokes shade avoidance responses. *Scientia Horticulturae* 249: 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.005>
- Kim, H.H., Wheeler, R.M., Sager, J.C., 2004.
A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs. *Acta Horticulturae* 659: 467-475.
- Kim, H. J., Yang, T., Choi, S., Wang, Y. J., Lin, M. Y., & Liceaga, A. M. (2020).
Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261, 108985.
- Lanoue, J., Zheng, J., Little, C., Thibodeau, A., Grodzinski, B., & Hao, X. (2019).
Alternating red and blue light-emitting diodes allows for injury-free tomato production with continuous lighting. *Frontiers in plant science*, 10, 1114.
- Li, Q, Kubota, C. (2009).
Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby lettuce. *Environ. Exp. Bot.*, 67: 59-64
- McCree, K.J. (1972).
The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Metereol.* 9: 191-216.
- Palmitessa, O.D. , Prinzenberg, A. E., Kaiser, E. & Heuvelink, E. (2021).
Led and SON-T supplementary light differentially affect gas exchange in tomato leaves. *Plants* 10, 810.
- Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrelli, X., Orsini, F. & Gianquinto, G. (2020).
Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the Mediterranean. *Agronomy*, 10(7), 1002.
- Persoon, S., Aulbers, A., Oosterhuis, G., Draaijer, A., Sanders, J. 2010.
Onderzoek naar invloed stralingswarmte en spectrale effecten LED belichting: teeltseizoen 2009-2010. TTO. 46 pp.
Plant Lighting Fundamentele kennis ontwikkeling
<https://www.kasalsenergiebron.nl/onderzoeken/20150-fundamentele-kennisontwikkeling-led-belichting-voor-praktische-toepassing-in-de-kas/> geraadpleegd 22-3-2022
- Raaphorst, M. en Weerheim K. (2019).
Full LED op praktijkbedrijf tomaat : als onderdeel van het monitoringsproject. Rapport WPR 886.
- Signify (2021a)
<https://www.groentennieuws.nl/article/9328556/zo-teel-je-lekkere-tomaten-met-led/> geraadpleegd 24-3-2022
- Signify (2021b).
assets.signify.com/is/content/Signify/Assets/philips-lighting/global/20210928-product-sheet-greenpower-led-toplighting-force.pdf geraadpleegd 23-3-2022
- Smith, H.L, McAusland, L, & Murchie, E.H. (2017).
Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *J. Exp. Bot.*, 68: 2099-2110
- Stutte, G.W., Edney, S., Skerritt, T., 2009.
Photoregulation of Bioprotectant Content of Red Leaf Lettuce with Light-emitting Diodes. *HortScience* 44: 79-82.
- Tewelde, F. T., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai, T., & Yamori, W. (2018).
Supplemental LED inter-lighting compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine. *PLoS one*, 13(11), e0206592.

- Trouwborst, G., Sam-Sin, G., & Hogewoning, S. W. (2021).
Een modelstudie naar het effect van tussenbelichting op assimilatie van tomaat. Deelrapport I project
"fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas" Plant Lighting B.V.,
Bunnik. 32p.
- Vanlommel W. (2019).
<https://www.proeftuinnieuws.be/wp-content/uploads/2019/02/Tomaten-telen-met-300-%C2%B5mol-per-m%C2%B2s-led-licht-kan-maar-is-duur.pdf> Geraadpleegd 23-3-2022
- Vanlommel W. (2020).
[https://glitch-innovatie.eu/wp-content/uploads/2020/10/WP-4.1-Rapport-teeltproef-2018-2019..pdf?iframe=true#:~:text=De%20vraag%20is%20dan%20ook,gebruikt%20\(Vanlommel%20\(2020\)\).](https://glitch-innovatie.eu/wp-content/uploads/2020/10/WP-4.1-Rapport-teeltproef-2018-2019..pdf?iframe=true#:~:text=De%20vraag%20is%20dan%20ook,gebruikt%20(Vanlommel%20(2020)).)
Geraadpleegd 23-3-2022
- Velez-Ramirez, A. I., Heuvelink, E., van Ieperen, W., Vreugdenhil, D., & Millenaar, F. F. (2012).
Continuous light as a way to increase greenhouse tomato production: expected challenges. In VII
International Symposium on Light in Horticultural Systems 956 (pp. 51-57).
- Verkerke W. , C. Labrie, T. Dueck (2015).
The effect of light intensity and duration on Vitamin C concentration in tomato fruits Acta Hort 1106:49-53
- Wittemans L., Vanlommel W., Vermeiren J., Steppe K. (2020).
Led-toplight versus led-interlight in tomaat. Proeftuinnieuws 4: 20-21.
- Zhen, S. and Bugbee, B., 2020.
Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining
photosynthetically active radiation. Plant, Cell and Environment, 43(5):1259–1272.
- Zhen, S. and van Iersel, M. W., 2017.
Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. Journal of Plant Physiology,
209:115–122.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1138

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.