

## Efficiënter lichtspectrum voor open gewassen: Focus op productie en vervolgteelt van uitgangsmateriaal



Juli 2012

S.W. Hogewoning, G. Trouwborst en C.S. Pot

# Efficiënter lichtspectrum voor open gewassen: Focus op productie en vervolgteelt van uitgangsmateriaal

Juli 2012

S. W. Hogewoning<sup>1</sup>, G. Trouwborst<sup>2</sup> en C.S. Pot<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Plant Lighting  
Julianaweg 78  
3525 VH Utrecht  
[www.plantlighting.nl](http://www.plantlighting.nl)

<sup>2</sup> Plant Dynamics B.V.  
Costerweg 5  
6702 AA Wageningen  
[www.plant-dynamics.nl](http://www.plant-dynamics.nl)

## REFERAAT

S.W. Hogewoning, G. Trouwborst en C.S. Pot, 2012. Efficiënter lichtspectrum voor open gewassen: Focus op productie en vervolgteelt van uitgangsmateriaal. Plant Lighting, Utrecht. 39p.

---

Uw sector investeert in dit project via het Productschap  Tuinbouw

---

PT projectnummer: 14427



Ministerie van Economische Zaken,  
Landbouw en Innovatie



© 2012 Plant Lighting & Plant Dynamics B.V.

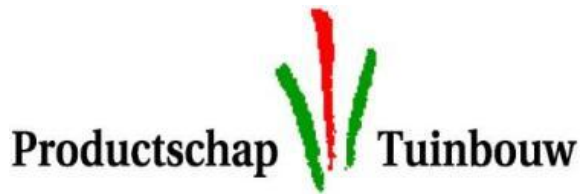
Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met het ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie en het Productschap Tuinbouw in het kader van het programma Kas als Energiebron, ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

Plant Lighting & Plant Dynamics zijn niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit deze uitgave.

# Inhoudsopgave

SAMENWERKENDE PARTIJEN.....	5
SAMENVATTING .....	6
DANKWOORD .....	8
1 INLEIDING EN DOELSTELLING .....	9
1.1 Aanleiding onderzoek.....	9
1.2 Probleemstelling en doelstellingen.....	10
1.3 Fysiologische achtergronden .....	12
2 MATERIAAL EN METHODEN OPKWEK EN VERVOLGTEELT .....	14
2.1 Plantmateriaal en proefopzet opkweek .....	14
2.2 Vervolgteelt.....	17
3 RESULTATEN EN DISCUSSIE .....	18
3.1 Klimaat opkweek.....	18
3.2 Opkweek oktober .....	19
3.3 Opkweek december .....	23
3.4 Vervolgteelt Kwekerij De Springplank .....	25
3.5 Algemene discussie en conclusies.....	27
3.5.1 De fytochroombalans als sleutelfactor om de plantvorm te beïnvloeden .....	27
3.5.2 Praktische consequenties van opkweek met een ander lichtspectrum .....	27
4 EFFICIËNTIE LICHTBRONNEN .....	29
4.1 Methode efficiëntiemetingen lampen.....	29
4.2 Resultaten.....	30
4.3 Discussie meetresultaten .....	32
5 SCENARIO-ANALYSE: ENERGIEBESPARING IN DE OPKWEK .....	33
5.1 Scenario 1: Versnelde opkweek op basis van LED-belichting .....	33
5.2 Scenario 2: Versnelde opkweek op basis van SON-T + LED-belichting .....	34
6 SAMENVATTENDE CONCLUSIES .....	36
REFERENTIES .....	37
BIJLAGE 1. WORTELGROEI.....	38
BIJLAGE 2. COMMUNICATIE.....	39

## Samenwerkende partijen



Kwekerij De Springplank



# Samenvatting

## *In het kort*

Het spectrum van licht heeft invloed op de vorm van een plant. Vooral bij gewassen met een open structuur, zoals in de opkweek, gaat veel licht verloren doordat het niet door de bladeren onderschept wordt. Sturen op een plantvorm die licht efficiënter onderschept kan daarom grote effecten op de groeisnelheid hebben. Dit onderzoek heeft laten zien dat een 15-25% snellere opkweek in de winter gerealiseerd kan worden door de fytochromen van de plant in de juiste balans te brengen met verrood licht. Anderzijds kan ook op een compactere plantvorm gestuurd worden. Een energiebesparing van 13-21% in de winterperiode door slim gebruik te maken van de combinatie assimilatie- en stuurlicht lijkt haalbaar voor de opkweek.

## *Achtergrond en onderzoeksvraag*

In eerder onderzoek is bij jonge komkommer- en tomatenplanten aangetoond dat een kunstmatig zonlichtspectrum tot een aanzienlijk snellere groei leidde dan (bij)belichting met eenzelfde intensiteit aan SON-T, TL of rood/blauw LED-licht. De gunstige effecten van het kunstmatige zonlichtspectrum waren gerelateerd aan een plantopbouw die efficiënt was in het onderscheppen van licht. Er waren geen verschillen in de fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad. Daarom zijn vooral grote effecten van een dergelijk lichtspectrum te verwachten bij gewassen met een open structuur, zoals uitgangsmateriaal. In open gewassen is de onderschepping van licht door het gewas namelijk nog sterk beperkend voor de groei.

Kunstmatig zonlicht is zeer geschikt voor onderzoek, maar in de meeste gevallen niet voor belichting van commerciële productiegewassen. Dit vanwege de inherent lage energetische efficiëntie ( $\mu\text{mol}$  licht per Joule energie-input). Om in de praktijk te kunnen profiteren van de gunstige effecten is een efficiënter lamptype nodig. Dit gaf aanleiding tot de vraag in hoeverre het zonlichtspectrum kan worden vereenvoudigd met behoud van de gunstige effecten. LED rood/blauw en SON-T stralen geen continu lichtspectrum en ook nauwelijks verrode golflengten uit, terwijl bekend is dat verrood via de *fytochroombalans* grote invloed heeft op de plantvorm. De *hoofdhypothese* in dit onderzoek is dat de gunstige effecten van kunstzonlicht toe te schrijven zijn aan de gevolgen van de verrode golflengten op de fytochroombalans. Daarnaast werd getoetst of het brede spectrum van zonlicht binnen het PAR-gebied een (aanvullend) positief effect geeft.

## *Aanpak*

De eerste proef vond in oktober 2011 plaats in een kas van Plantenkwekerij van der Lugt te Bleiswijk. Jonge geënte tomatenplanten en komkommerzaailingen werden in 10 verschillende proefvakken geplaatst en belicht met  $75 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  van vijf verschillende lichtbronnen (proef in tweevoud):

1. SON-T (referentie praktijk)
2. Zonlicht-plasmalamp (referentie "ideaal spectrum")
3. Zwavel-plasmalamp (kansrijk spectrum, hogere energetische efficiëntie dan zonlicht-plasma)
4. LED's 15% blauw/ 85% rood + verrood (kansrijk spectrum, fytochroom-sturing zoals zonlicht)
5. LED's 15% blauw/ 85% rood (standaard spectrum bij de meeste LED-proeven)

De fytochroombalans kan via een modelmatige berekening uitgedrukt worden in een zogenaamde PSS-waarde. De LED rood/blauw/verrood lampen waren zo samengesteld dat het spectrum vrijwel eenzelfde PSS aan de plant zou moeten geven als zonlicht (PSS= 0.72). De zwavel-plasmalamp geeft juist een breed spectrum, en een fytochroombalans (PSS= 0.77) tussen die van zonlicht en van SON-T (PSS= 0.85) in. Het LED rood/blauw spectrum geeft juist een hoge PSS (0.89). Om vermenging van de effecten van lichtkleur en van stralingswarmte vanuit de lampen te vermijden, is de koptemperatuur in alle behandelingen gelijk gehouden door warmtestralers toe te voegen aan de LED-lampen.



In december 2011 zijn de lichtbehandelingen SON-T, LED rood/blauw/verrood en LED rood/blauw voor komkommer herhaald. De planten zijn vervolgens uitgeplant bij kwekerij de Springplank te Dongen om de effecten van de belichting tijdens de opkweek op de verdere teelt te volgen.

### *Resultaten*

De LED rood/blauw/verrood planten hadden een vergelijkbare plantvorm met de zonlicht-plasma planten. Verder was het plantgewicht hoger dan bij de planten opgegroeid onder SON-T voor zowel komkommer (+21%) als tomaat (+15%). Zwavel-plasma zat er tussenin en LED rood/blauw resulteerde in de meest compacte plantvorm. Het hogere plantgewicht kan veroorzaakt zijn door:

1. Verhoogde fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad
2. Vergrootte bladoppervlakte
3. Plantopbouw en bladoriëntatie gunstig voor lichtonderschepping.

Voor tomaat en komkommer gold dat de fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad nauwelijks verschilde. Tevens verschilde in de oktoberteelt het aantal bladeren en de totale bladoppervlakte per plant niet. De toename in groei kan dus verklaard worden uit de bevorderende effecten van de plantopbouw en de bladoriëntatie op de lichtonderschepping: LED rood/blauw/verrood leidde tot minder zelfbeschaduwing door de langere stengels en de veel langere bladstelen (komkommer). Tevens was de bladoriëntatie ten opzichte van het licht gunstiger. Bij LED rood/blauw hingen de bladeren 'krulliger' terwijl ze bij LED rood/blauw/verrood veel vlakker waren. Door het grotere aandeel lamplicht in de decemberteelt was de plantrespons extremer dan in oktober. De planten onder LED rood/blauw/verrood waren bij aflevering 70% langer, hadden 15% meer bladeren en 23% meer bladoppervlakte. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de belichte winterteelt in de kas met 15-25% verkort kan worden onder een LED rood/blauw/verrood spectrum.

Bij de vervolgteelt kon bij de planten die opgegroeid waren onder LED rood/blauw/verrood twee dagen eerder geoogst worden. Dit komt waarschijnlijk doordat deze planten bijna één blad meer hadden. Verder zijn geen positieve of negatieve punten bij de vervolgteelt naar voren gekomen.

### *Conclusies en toepassing in de praktijk*

De resultaten geven duidelijk aan dat de fytochroombalans de sleutelfactor is met betrekking tot de 'zonlicht-respons': Planten onder LED rood/blauw/verrood leken sterk op planten onder kunstzonlicht en zwavel-plasma zat qua plantvorm en biomassa precies tussen SON-T en LED rood/blauw/verrood in. Onder LED rood/blauw (hoge PSS) waren de planten juist compacter dan onder SON-T. Ondanks de 15-25% verkorting van de teeltduur, lijkt toepassing van belichting met LED rood/blauw/verrood in de opkweek op de korte termijn niet haalbaar. Toepassing vergt flinke investeringen en de combinatie van rood en verrood LED-licht vraagt veel verrode LED's om de gewenste effecten op de plantvorm te bereiken. Berekeningen op basis van efficiëntiemetingen aan de LED's geven aan dat het stroomverbruik per branduur fors hoger komt te liggen dan bij SON-T.

Als alternatief kan waarschijnlijk op eenzelfde gunstige fytochroombalans gestuurd worden met een combinatie van verrode LED's en SON-T. Deze combinatie vraagt veel minder verrood om de gewenste PSS te bereiken en de bestaande SON-T installatie kan gebruikt blijven worden. Uit een scenarioanalyse blijkt dat de besparingen aan energie voor warmte en belichtingsuren bij een 15-25% teeltduurverkortung ruimschoots opwegen tegen de beperkte toename aan elektriciteitsverbruik per branduur door toevoeging van verrood. Dit lijkt de moeite waard om verder te onderzoeken. Concluderend kan gesteld worden dat gecombineerde benutting van assimilatie- en stuurlichteffecten nieuwe mogelijkheden biedt voor een efficiëntere belichting in de glastuinbouw.

# Dankwoord

Dit onderzoek werd ondersteund door het programma 'Kas als Energiebron', gefinancierd door het Ministerie van EL&I en het Productschap Tuinbouw, en een bijdrage vanuit Plantum. We bedanken Hortilux Schröder BV, Lemnis Lighting BV en Plasma International GmbH voor het leveren van diverse belichtingsinstallaties. We zijn Plantenkwekerij van der Lugt BV en Kwekerij De Springplank erkentelijk voor hun steun (teeltruimte en arbeid) en gastvrijheid.

We willen de volgende personen nog hartelijk bedanken voor hun bijdrage: onderzoekskoördinatoren Leo Oprel (EL&I) en Dennis Medema (PT); Claudia den Braver en Thijs Simons (Plantum); Peter de Jong, Jilles Koorneef, Ewald de Koning, Leo van der Stoep, Jos Bregman, Ruud van den Akker, Bert van der Lugt en overige medewerkers van Plantenkwekerij van der Lugt; Stefan Persoon (Inno-Agro); Jan-Willem de Vries en Piet Steenbergen (WUR-glas); Andreas Savvides en Wim van Ieperen (WUR-Tuinbouwketen); Harry Vollering en Aad van der Helm (Kwekerij De Springplank); Dennis van Dijk (LTO Groeiservice); Jan Peter Hock, Jeroen van Velzen en Rien van Og (Lemnis Lighting); Boris Lutterbach (Plasma International); René van den Dool, Marco Brok en Henk Vollebregt (Hortilux Schröder); Thijs Gipmans (Gipmans Planten).

Juli 2012,

Sander Hogewoning, Govert Trouwborst & Sander Pot



# 1 Inleiding en doelstelling

## 1.1 Aanleiding onderzoek

Het type lamp dat in de tuinbouw als assimilatiebelichting wordt toegepast, is tot dusverre een pragmatische keuze geweest. Decennia lang is de hogedruk natriumlamp (SON-T) de standaard geweest, vanwege de hoge efficiëntie ( $\mu\text{mol PAR/Joule}$ ) vergeleken met andere lampen. Sinds kort wordt volop geëxperimenteerd met rode LED's (met een klein % blauw), waarvan de efficiëntie sterk in opmars is. Echter, noch SON-T, noch LED's zijn lamptypen die gericht zijn ontwikkeld om planten optimaal mee te laten groeien. Hiertoe ontbrak ook de benodigde kennis over de effecten van lichtspectrum op de groei van planten.

In het verleden richtte men zich vooral op effecten van lichtkleur op de fotosynthesesnelheid (=groeikracht) per oppervlakte blad. Vandaar ook dat de klassieke onderzoeken van McCree (1972) en Inada (1976) naar het effect van lichtkleur op de momentane fotosynthesesnelheid van bladeren ('het actiespectrum') vaak aangehaald worden als het gaat over het lichtspectrum van groeilampen. De 'McCree-curve' is een term die regelmatig terugkomt. Een aantal recente onderzoeksprojecten hebben tot een verdieping van de kennis over de effecten van lichtkleuren op gewasproductie geleid (o.a. het STW project "The application of LEDs for plant production" 2005-2010). Een belangrijke conclusie hieruit is dat het actiespectrum niet één op één vertaald kan worden naar de effecten van het spectrum van de belichting op de fotosynthese van een gewas. Planten blijken zich namelijk aan te kunnen passen aan de lichtkleur van hun omgeving. Ook kan de fotosynthesesnelheid bij een combinatie van verschillende lichtkleuren hoger zijn dan de som der delen (Hogewoning *et al.* 2012a). Verder kwam naar voren dat beïnvloeding van de plantmorfologie (plantvorm) met de spectrale samenstelling van licht een van de belangrijke kansen biedt voor verbetering van de belichtingsefficiëntie in de tuinbouw (Hogewoning *et al.* 2010). Hierop bouwt het in dit rapport beschreven onderzoek voort.

De effecten van lichtkleur op de plantmorfologie beïnvloeden de lichtonderschepping van een plant sterk. Hiermee wordt ook de totale gewasfotosynthese en dus de groei sterk beïnvloedt. Productie wordt immers niet alleen door de fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad bepaald, maar door een combinatie van fotosynthesesnelheid en totale bladoppervlakte. Vooral bij 'open gewassen' (zie bijvoorbeeld foto voorkant) is de totale lichtonderschepping door het gewas beperkend voor de gewasfotosynthese. Daarom lijkt het stimuleren van een plantvorm die gunstig is voor de lichtonderschepping vooral kansrijk bij een open gewasstructuur, waarbij relatief veel licht niet op het gewas valt en dus verloren gaat. Dit geldt voor zowel natuurlijk daglicht als licht van groeilampen. Meer lichtonderschepping geeft als het ware een 'rente op rente effect'; het extra onderschepte licht geeft de energie om meer groei te realiseren, waardoor nog meer licht wordt onderschept.

De potentie van het sturen van lichtonderschepping en groei door aanpassing van het lichtspectrum blijkt goed uit een proef bij WUR-Tuinbouwketen uit 2009: De groei van jonge komkommerplanten werd in een klimaatkamer vergeleken onder SON-T, TL en kunstmatig zonlicht. Het gebruik van kunstmatig zonlicht in deze proef was een primeur. Na 2 weken groei bij een gelijke lichtintensiteit ( $100 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ ) was de biomassa (drogestof) van de planten opgegroeid onder kunstzonlicht respectievelijk 1.6 en 2.3 keer hoger dan voor SON-T en TL (Foto 1). Deze spectaculaire verschillen waren volledig toe te schrijven aan een morfologie die een veel efficiëntere lichtonderschepping mogelijk maakte (grote bladoppervlakte, lange bladstelen) en hadden niets met de fotosynthese per oppervlakte blad te maken, deze verschilde namelijk niet (Hogewoning *et al.* 2010). In een opvolgende proef (2010) groeiden jonge tomatenplanten aanzienlijk sneller onder 100% kunstzonlicht, vergeleken met een gelijke lichtintensiteit bestaande uit 50% kunstzonlicht aangevuld met 50% SON-T of een combinatie van rode en blauwe LED's (Hogewoning *et al.* 2012b).

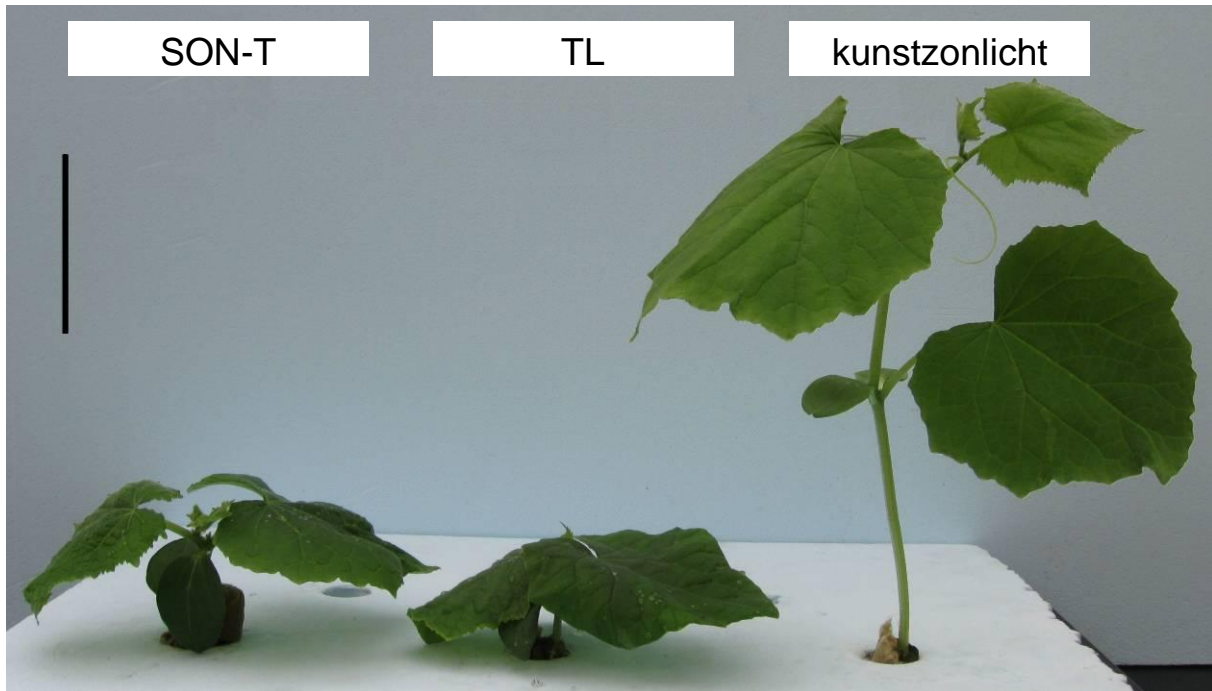


Foto 1. Komkommer opgegroeid in klimaatkamer bij een gelijke lichtintensiteit SON-T, TL, en kunstzonlicht. De biomassa van de planten opgegroeid onder kunstzonlicht was respectievelijk 1.6 en 2.3 keer hoger dan die van de planten opgegroeid onder SON-T en TL. Onderzoek gepubliceerd in Hogewoning et al. 2010.

## 1.2 Probleemstelling en doelstellingen

### Opkweek jonge planten en teelt open gewassen

De spectaculaire effecten van kunstzonlicht op groei (Foto 1) laten een grote potentie zien voor verbetering van de belichtingsefficiëntie van gewassen. Kunstzonlicht lampen zijn een belangrijke stap voorwaarts voor onderzoek, maar waarschijnlijk geen reële optie voor belichting in kassen, vanwege de inherent lage energie-efficiëntie van kunstzonlicht ( $\mu\text{mol PAR/Joule}$ ). De kans voor de glastuinbouw om op korte termijn energie te besparen, moet daarom gezocht worden bij energetisch efficiënte lampen met een spectrum dat wel de positieve effecten van kunstzonlicht op gewasgroei teweeg brengt.

Dit geeft aanleiding tot de vraag in hoeverre het zonlichtspectrum kan worden vereenvoudigd met behoud van de gunstige effecten. Het is nog niet bekend welke verschillen tussen het spectrum van kunstzonlicht en dat van SON-T en van LED's (rood/blauw) precies verantwoordelijk zijn voor de positievere effecten van kunstzonlicht. Een antwoord op deze vraag maakt het wellicht mogelijk om met andere lichtbronnen die in de praktijk bruikbaar zijn, vergelijkbare resultaten te boeken.

De hoofdhypothese die getoetst wordt, richt zich op het verrode gedeelte van het lightspectrum (700 tot 750 nm): Uit de literatuur is bekend dat deze verrode golflengten sterke invloed hebben op een breed scala aan processen in de plant, waaronder de plantmorfologie (zie H1.3). Het (vrijwel) ontbreken van verrood bij TL, SON-T en rood/blauwe LED's lijkt daarmee een voor de hand liggende factor met betrekking tot de achterblijvende groei ten opzichte van daglicht. Daarnaast wordt getoetst of andere golflengten een (aanvullend) positief effect hebben: zonlicht heeft een breed, continu spectrum over het gehele PAR-gebied (400 tot 700 nm), terwijl het spectrum van de andere genoemde lamptypes grote deficiënties vertoont. Mogelijk zijn de positieve effecten van een daglichtspectrum geheel of gedeeltelijk toe te schrijven aan golflengten binnen het PAR-gebied die niet, of niet voldoende, uitgestraald worden door de andere lamptypen.

Zoals in H1.1 uiteengezet, zullen open gewassen het meest kunnen profiteren van een lichtspectrum dat lichtonderschepping bevordert. Denk bij open gewassen aan uitgangsmateriaal, sla, of eenjarige snijbloemen. Een meer gesloten gewas, zoals een volgroeid tomatengewas, onderschept al veel licht en profiteert daardoor in mindere mate van een efficiëntere lichtonderschepping. Een snellere gewasontwikkeling leidt tot een verkorte teeltduur of een zwaarder gewas bij eenzelfde teeltduur. Uitgaande van een verkorte teeltduur levert dit energiebesparing (minder branduren lampen en verwarmingsuren) en arbeidsbesparing op per eenheid product. Vanwege de open gewasstructuur, en het aanzienlijke belichte teeltareaal is gekozen om dit belichtingsonderzoek uit te voeren met uitgangsmateriaal van tomaat en komkommer.

### **Vervolgteelt uitgangsmateriaal**

Een efficiëntere productie van open gewassen door anders te belichten is een grote stap vooruit voor de sector. Wat betreft uitgangsmateriaal speelt echter nog een belangrijke(re) vraag mee: Hoe presteren de jonge planten na aflevering bij de tomaten- of komkommerteler? Een andere plantvorm zou directe effecten op de prestaties van het jonge gewas bij de teler kunnen hebben. Er zijn al zo'n 10 tot 20 nieuwe bladeren aangelegd in de kop van de plant. Daarom is het interessant om te onderzoeken of een jonge plant die zich sneller ontwikkeld heeft bij de plantenkweker, zich ook sneller zal ontwikkelen bij de teler. Immers, in de eerste fase van een tomaten- of komkommerteelt is het gewas ook open, dus bladeren die licht efficiënter onderscheppen zullen de gewasgroei in het begin flink bevorderen. Dit zou ook kunnen leiden tot een snellere tros- of vruchtaanleg en dus vervroeging en verhoging van de productie. Daarnaast kan de teler energie besparen door minder te stoken. De 1.5 °C hogere temperatuur die vaak aangehouden wordt in de beginfase van de teelt is minder lang nodig bij een gewas dat sneller bovenaan de draad is. Daarom zijn de lichtbehandelingen, die het grootste verschil in respons lieten zien, herhaald met als doel om de verdere prestatie van het uitgangsmateriaal bij de teler te vergelijken met 'standaard' uitgangsmateriaal belicht met SON-T.

### **Energie-efficiëntie lichtbronnen**

Dit onderzoek leidt tot kennisontwikkeling over de effecten van de spectrale samenstelling van licht op de groei en ontwikkeling van gewassen met een open structuur. Het uiteindelijke doel is dat die kennis wordt toegepast om tot een energetisch efficiëntere gewasproductie te komen. De praktische haalbaarheid daarvan hangt af van de balans tussen de kosten (investeringen en energieverbruik lichtbronnen) en baten (o.a. versnelling teeltcyclus, kwaliteit plant) van een nieuwe belichtingsstrategie ten opzichte van de gangbare praktijk. Gegeven de staat van de technische ontwikkelingen ten tijde van dit onderzoek (2011-2012) wordt deze balans inzichtelijk gemaakt: Een gedegen analyse van de energie-efficiëntie ( $\mu\text{mol PAR output / Joule energie input}$ ) van de lichtbronnen die succesvol waren tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal maakt een economische analyse van de haalbaarheid van alternatieve belichting voor de praktijk mogelijk.

### **Hoofddoelstelling:**

Energiebesparing voor de tuinbouwsector middels een vernieuwende belichtingsstrategie waardoor planten gestimuleerd worden zowel daglicht als lamplicht efficiënter te onderscheppen.

Doelstellingen nader gespecificeerd:

- De reacties op een aantal kansrijke lichtbronnen worden in een praktijkproef onderzocht bij uitgangsmateriaal van tomaat en komkommer. De resultaten zijn direct vertaalbaar naar te verwachten effecten bij andere open gewassen (bv. sla, eenjarige snijbloemen). Een kortere teeltduur resulteert in minder belichtingsuren en verwarming per eenheid product, en dus in een aanzienlijke energiebesparing.
- Metingen aan de gewassen verschaffen inzicht in de mechanismen en oorzaken van de gewasreacties op de verschillende typen belichting. Begrip van de processen draagt bij aan verdere optimalisatie.

- De vervolgteelt van het uitgangsmateriaal bij een komkommerteler laat de lange termijn effecten van de belichtingsstrategie tijdens de opkweek zien. Even goede prestaties als het gangbare uitgangsmateriaal (SON-T belicht) zullen een voorwaarde zijn voor opkweekbedrijven om tot een nieuwe belichtingsstrategie over te willen gaan. Mocht het gewas sneller ontwikkelen tijdens de vervolgteelt, dan zal het energieverbruik per eenheid product omlaag gaan (kortere periode extra stoken) en waarschijnlijk leiden tot een eerder producerend gewas. Dit project beoogt verder geen diepgaande analyse van plantprocessen tijdens de vervolgteelt.
- Meting van de energetische efficiëntie van de succesvolle lichtbronnen. Op basis hiervan kan de praktijk een rationele economische afweging maken over het al dan niet toepassen van nieuwe belichtingssystemen.

### Leeswijzer

Het verslag is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 1 vervolgt met een korte uiteenzetting van de fysiologische achtergronden van deze proef, maar kan eventueel worden overgeslagen. In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe de kasproef is opgezet. In hoofdstuk 3 worden de resultaten besproken. Hoofdstuk 4 bevat de gegevens van de lampefficiënties en kan eventueel worden overgeslagen. Hoofdstuk 5 bevat scenario-analyses van de potentiële energiebesparing. In hoofdstuk 6 worden de conclusies puntsgewijze weergegeven.

## 1.3 Fysiologische achtergronden

Licht is zowel een *energiebron* voor de groei en ontwikkeling van planten (assimilatielicht) als een *informatiebron* over de omgeving van planten (stuurlicht). De informatie over de omgeving van de plant wordt doorgegeven via speciale pigmenten in planten, zogenaamde *fotoreceptoren*. Deze fotoreceptoren zijn gevoelig voor de spectrale samenstelling van licht. Afhankelijk van die spectrale samenstelling worden signalen afgegeven die de hormoonhuishouding in de plant reguleren. De balans van de verschillende hormonen (o.a. auxine, gibbereline) reguleert allerlei processen in de plant, zoals strekking, bloei-inductie, afrijpingsnelheid en veroudering. Doordat de spectrale samenstelling van het licht via stuurlichteffecten de opbouw van de plant beïnvloedt, wordt dus uiteindelijk ook de effectiviteit waarmee *lichtenergie* voor groei benut wordt, beïnvloedt: Vooral bij een open gewasstructuur leidt een plantvorm die licht efficiënt onderschept tot een snellere groei (zie H1.1).

Er zijn drie groepen fotoreceptoren bekend: cryptochromen, fototropinen en fytochromen. De eerste twee zijn beiden gevoelig voor golflengten van het UV tot het blauw/groene gedeelte van het kleurspectrum (zie Ahmad, 2001). Het lichtspectrum heeft via de cryptochromen invloed op onder andere de biologische klok van een plant en de stengelstrekking. Fototropinen zijn onder andere betrokken bij het de groei van planten richting het licht ('fototropisme') en opening van de huidmondjes. In het verleden is naar de werking van de fytochromen veruit het meeste onderzoek verricht.

Fytochromen zijn gevoelig voor het volledige spectrum (UV tot verrood), maar reageren vooral sterk op rode en verrode golflengten (Fig. 1). Rood licht wordt voornamelijk geabsorbeerd door de Pr-vorm (inactieve vorm) van fytochroom en verrood licht door de Pfr-vorm (actieve vorm) van fytochroom. Als gevolg van de absorptie van rood licht wordt Pr omgezet in Pfr en omgekeerd wordt Pfr door absorptie van verrood licht weer omgezet in Pr. Op die manier bepaalt het lichtspectrum het fytochroom-evenwicht, de zogenaamde 'phytochrome photostationary state' (PSS). Deze PSS is via de hormoonhuishouding bepalend voor belangrijke ontwikkelingsprocessen in de plant, zoals kieming van zaden, bloemknopontwikkeling (lange dag en korte dag planten), stengelstrekking, okselknopuitloop en veroudering (zie o.a. Whitelam en Halliday, 2007; Pot en Trouwborst, 2011; Trouwborst *et al.* 2010ab,

2012, van Ieperen en Heuvelink, 2012).

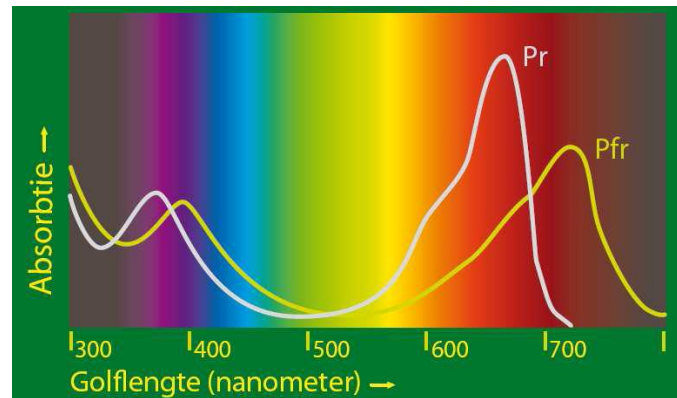


Fig. 1. Indicatieve illustratie van de spectrale gevoeligheid van de inactieve (Pr) en actieve (Pfr) vorm van fytochroom. Het lichtspectrum stuurt de balans tussen deze twee verschillende vormen van fytochromen en kan via een modelberekening uitgedrukt worden in een waarde: de PSS (phytochrome photostationary state). De PSS waarde heeft een sterke invloed op gewasontwikkeling.

De invloed van het fytochroomevenwicht op de ontwikkeling van planten kan in zekere mate voorspeld worden door de PSS-waarde te bepalen. Plant Lighting en Plant Dynamics beschikken over een model dat de PSS-waarde bij een gegeven lichtspectrum kan berekenen. De PSS-waarde geeft een veel betere waardering aan de lichtkwaliteit van een lichtbron dan een conventionele rood/verrood-verhouding wanneer het gaat om processen waarbij fytochroom in de plant een rol speelt (van Ieperen en Heuvelink, 2012). Er bestaat namelijk geen lineaire relatie tussen PSS en de rood/verrood ratio (Fig. 2). Tevens geeft een rood/verrood ratio groter dan twee bijna geen extra respons meer op de PSS (en ook niet op de plantontwikkeling).

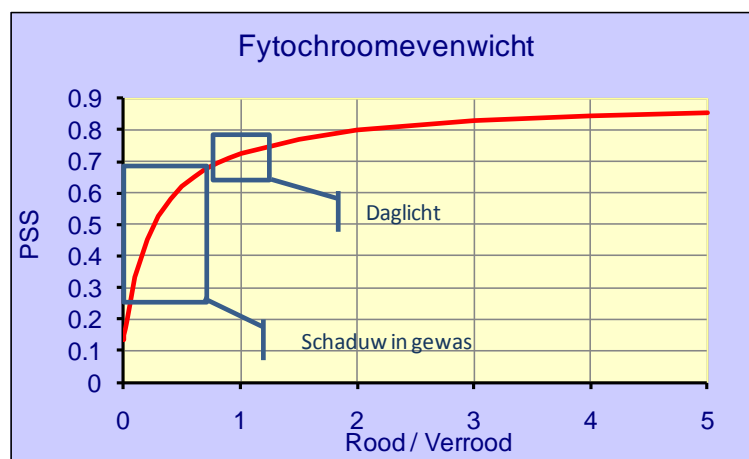


Fig. 2. Verhouding PSS ten opzichte van de rood/verrood ratio (naar Smit, 1995).



## 2 Materiaal en Methoden opkweek en vervolgteelt

### 2.1 Plantmateriaal en proefopzet opkweek

In oktober 2011 werd de proef gestart bij Plantenkwekerij van der Lugt te Bleiswijk. De kasafdeling was 480m<sup>2</sup> (6.4m breed en 75m lang) en lag op de zuidwesthoek van het perceel. De gangbare praktijkomstandigheden (klimaatsinstellingen, teelt op betonvloer etc.) werden zoveel mogelijk gehandhaafd.

#### Opkweek oktober

Tomaat (*Lycopersicon esculentum* cv. Mecano) en komkommer (*Cucumis sativus* cv. Venice) werden op steenwol gezaaid onder standaard teeltomstandigheden. Op 18 oktober werden de planten in de proef ingezet. Voor komkommer was dit 6 dagen na zaaien. De tomatenplanten waren eerder gezaaid, vervolgens geënt en getopt na het tweede blad zodat twee scheuten ontstonden. De scheutjes waren 8-10 cm bij de start van de proef. Gedurende de proef werd het teeltregime voor komkommer gevolgd (temperatuursinstellingen, voedingsoplossing, etc.). Voor tomaat wordt normaliter een  $\pm 2$  °C lagere dagtemperatuur aangehouden.



Foto 2. Startstadium tomaat en komkommer. De komkommer was 6 dagen oud. Tomaat is geënt en vervolgens na het tweede blad getopt. De twee zijscheuten van 8-10 cm zijn goed zichtbaar.

De planten werden belicht met vijf verschillende lichtbronnen en de lichtbehandelingen werden in tweevoud uitgevoerd (10 proefvakken). SON-T belichting (Philips Greenpower Plus 1000W, 400V) werd gebruikt als praktijkreferentie. Als tweede referentiebehandeling werd een speciaal ontwikkeld type plasmalamp gebruikt dat een spectrum uitstraalt dat vrijwel gelijk is aan dat van natuurlijk daglicht (zie van Ieperen *et al.* 2012). Zo'n kunstmatig zonlichtspectrum had namelijk in eerdere proeven zeer positieve effecten op de groeisnelheid, maar het type lamp is niet efficiënt genoeg voor toepassing als assimilatielamp in commerciële teelten (zie hoofdstuk 1). Vandaar de term 'referentie'-behandeling: Het laat zien of groei onder de andere lamptypen planteigenschappen zoals onder kunstmatig zonlicht kan benaderen. Ter toetsing van de hoofdhypothese (zie H1.2) zijn verrode (730 nm) LED's



toegevoegd aan een 'standaard' LED-spectrum bestaande uit 15% blauw (450 nm) en 85% rood (630 nm) LED-licht (Lemnis Lighting). De hoeveelheid verrood is zo berekend dat een fytochrome-evenwicht zoals dat bij zonlicht benaderd zou moeten worden (PSS= 0.73). Overigens worden in armaturen voor gewasbelichting tegenwoordig meestal rode LED's met een piekgolflengte rond 660 nm gebruikt. Er is nu voor 630 nm gekozen vanwege de geringere benodigde hoeveelheid verrood om een PSS van 0.73 te bereiken (zie H1.3). Om de effecten van het verrood goed te kunnen scheiden van overige golflengten is ook een behandeling met alleen 15% blauw en 85% rood LED-licht toegevoegd. Ter toetsing van de mogelijke toegevoegde waarde van andere golflengten in het PAR-gebied is een zwavel-plasmalamp (Plasma International GmbH) gebruikt. In Tabel 1 worden de lichtbehandelingen weergegeven en in Fig. 3 de bijbehorende lichtspectra.

Tabel 1. Behandelingen in de opkweek van oktober, alle behandelingen werden in tweevoud uitgevoerd.

Nr.	Behandeling	Reden	PSS lichtbron
1	SON-T	referentie praktijk	0.85
2	Zonlicht-plasmalamp	referentie "ideaal spectrum"	0.72
3	Zwavel-plasmalamp	kansrijk spectrum met hogere energetische efficiëntie dan kunstzonlicht	0.77
4	LED's 15% blauw/ 85% rood + verrood	kansrijk spectrum, fytochrome-sturing zoals zonlicht	0.73
5	LED's 15% blauw/ 85% rood	standaard spectrum bij LED-proeven	0.89

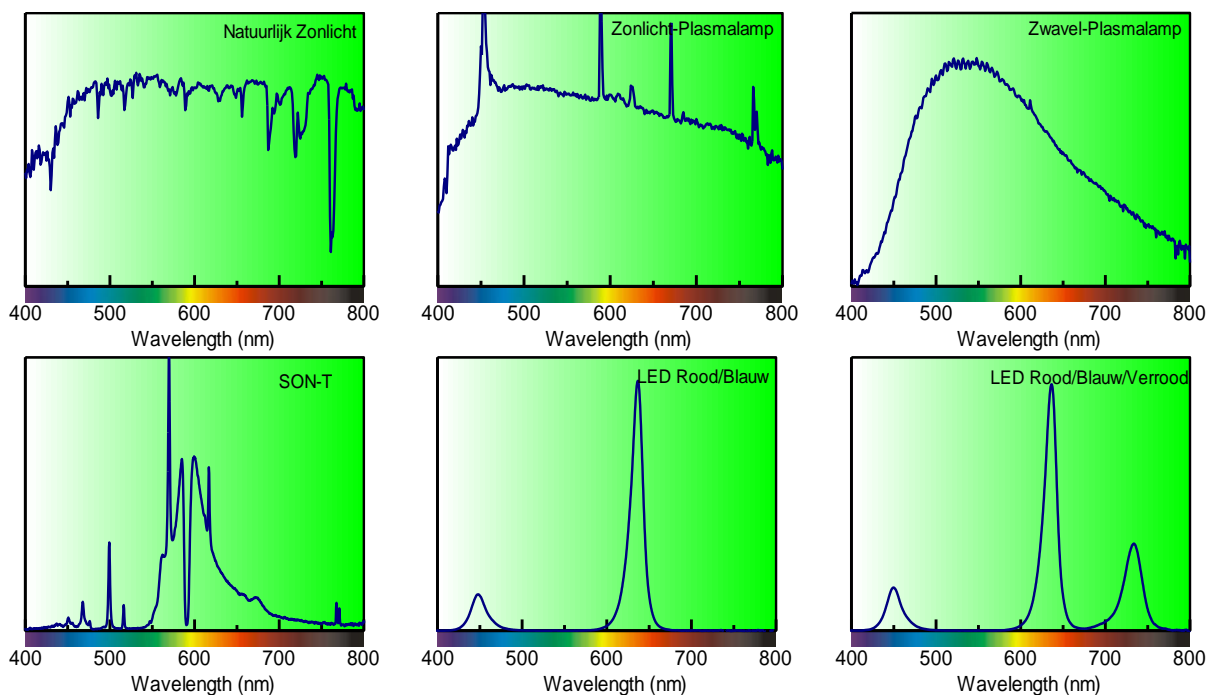


Fig. 3. Spectrale samenstelling van natuurlijk daglicht (linksboven) en van de gebruikte lampen.

De 10 proefvakken werden spectraal van elkaar gescheiden door het ophangen van zwart-wit plastic in een U-vorm (wit richting de planten), de zuidkant werd opengelaten (Foto 3). Tevens lagen de vakken 3.8m uit elkaar. Hierdoor was versturende overlap van licht uit de verschillende proefvakken uitgesloten. Het plastic werd bevestigd op SON-T hoogte en liep door tot de hijsverwarming die ongeveer 1 meter boven de grond hing. Links van de middengoot stond komkommer (18 planten/m<sup>2</sup>) en rechts tomaat (12 planten/m<sup>2</sup>; zie Foto 3).

Ieder proefvak was bruto 10m<sup>2</sup> groot. De lichtintensiteit in de vakken werd bepaald met een Li-190 kwantumsensor, waarbij er per plot volgens een meetraster op 49 punten metingen werden verricht (Dueck en Pot, 2010). Om een voldoende homogene lichtverdeling in de proefvakken te garanderen bleef een netto proefvak van 4m<sup>2</sup> in het midden van het bruto proefvak over (2m<sup>2</sup> links en 2 m<sup>2</sup> rechts van de middengoot). De randplanten rondom het netto proefvak werden niet gebruikt voor metingen. In de proefvakken met de zonlicht-plasmalamp werd een onvoldoende homogene lichtverdeling gemeten en daarom worden de kwantitatieve metingen aan deze planten buiten beschouwing gelaten in de resultaten. Er werd 16 uur per dag bijbelicht (0.00-16.00 uur) met een lichtintensiteit van 75  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ . Bij de behandeling LED rood/blauw/verrood is de gemeten PAR-waarde met +7% gecorrigeerd. Dit vanwege de relatief grote hoeveelheid verrode golflengten (700-750 nm) die niet door de kwantumsensor worden gemeten, maar wel gedeeltelijk bijdragen aan de fotosynthese. De correctiefactor is berekend op basis van recente inzichten in de bijdrage van golflengten buiten het PAR-gebied aan de fotosynthese (Hogewoning *et al.* 2012a).



Foto 3. Proefplots afgeschermd met zwart-wit plastic, op de rechterfoto is de hijsverwarming omhoog

Voor de twee LED-behandelingen werden watergekoelde armaturen gebruikt. Deze lichtbronnen produceren daardoor geen stralingswarmte en (vrijwel) geen convectiewarmte in de proefvakken, in tegenstelling tot de andere lichtbronnen. Verschillen in de koptemperatuur van het gewas werden vermeden door in beide LED-behandelingen gebruik te maken van warmtstralers (medium wave IR heater, Heraeus Noblelight, Hanau, Germany), zodat effecten van warmte en van lichtspectrum niet door elkaar zouden gaan lopen.

### Metingen

Bladfotosynthese werd gemeten met behulp van een Li-6400 draagbare fotosynthesemeter. Kort voor de eind oogst werd bij drie planten per proefvak bij zowel komkommer als tomaat de fotosynthese gemeten bij verschillende lichtniveaus (van laag licht tot lichtverzadiging). De procedure die gevolgd is, staat uitgebreid beschreven in Trouwborst *et al.* (2010). De gebruikte CO<sub>2</sub>-concentratie was 500 ppm, dit lag op het hetzelfde niveau als van de kaslucht. Voor komkommer werd het tweede volgroeide blad gemeten en voor tomaat het derde volgroeide blad van één van de zijscheuten. Van beide soorten waren dit onbeschaduwde bladeren.

Bij de oogst werden het vers en drooggewicht van bladeren en stengels bepaald. Ook werd het aantal bladeren, de bladoppervlak en de stengeldiameter bepaald. Er is op twee momenten geoogst: een tusse oogst gedurende de proef (2 weken na start belichting) en een eind oogst (3 weken na start belichting). Voor komkommer werden 16 planten per proefvak gemeten tijdens de tusse oogst en 32 planten tijdens de eind oogst, ten dele gemeten in paren (n=16 of n=32). Voor tomaat werden 10 en 14 planten per proefvak gemeten tijdens respectievelijk de tusse- en eind oogst. De lengte, stengeldiameter en het aantal bladeren werden alleen van de onderste scheut van iedere tomatenplant gemeten (zie Foto 2).

### **Opkweek december**

In december werden drie behandelingen (SON-T controle, LED rood/blauw, LED rood/blauw/verrood) herhaald bij komkommer (*Cucumis sativus* cv. Amaranta). Deze planten werden gebruikt voor vervolgteelt bij een komkommerkweker (zie H2.2). Er werd aan deze planten slechts een beperkt aantal morfologische metingen verricht. Om voor de vervolgteelt voldoende planten te krijgen werden de duplo's samengevoegd zodat er proefvakken van 20 m<sup>2</sup> ontstonden.

## **2.2 Vervolgteelt**

Op 23 december werden de komkommerplanten van de behandelingen SON-T, LED rood/blauw, LED rood/blauw/verrood uitgeplant bij Kwekerij 'De Springplank' te Dongen (Foto 7). Hier werd de verdere ontwikkeling van de planten gemonitord. Op 18 januari 2012 zijn de plantlengte, het aantal bladeren, de vrucht lengte, het aantal bladeren voor de eerste vrucht, de SPAD-waarde (indicatie van concentratie bladgroen) en de huidmondjesgeleidbaarheid gemeten aan 12 planten per behandeling. Alle planten zijn in een niet-belichte afdeling geplaatst. Begin mei werden deze planten geruimd.

## 3 Resultaten en discussie

### 3.1 Klimaat opkweek

Oktober 2011 is de boeken ingedaan als hebbend 34% meer zonuren dan het langjarig gemiddelde (bron: KNMI). Hierdoor was de hoeveelheid daglicht gedurende de eerste opkweek in oktober ruim 2.5 keer zo hoog dan gedurende de 2<sup>e</sup> opkweek in december (Fig. 4).

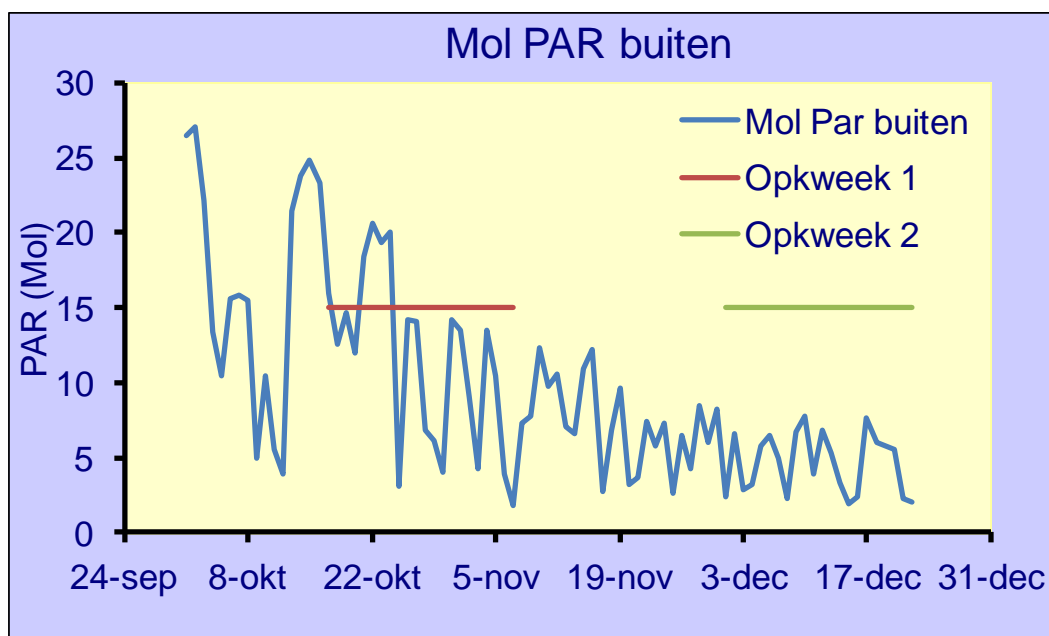


Fig. 4. Lichtsom gedurende de twee opkweekperiodes in oktober en december 2011. De hoeveelheid daglicht gedurende opkweek 1 was ruim 2.5 keer zo hoog dan gedurende opkweek 2.

Om de effecten van lichtspectrum en stralingswarmte uit elkaar te houden werden er bij de LED-behandelingen warmtestralers ingezet. De instelling van de warmtestralers werd bepaald door de koptemperatuur van de planten. De koptemperatuur varieerde tussen de behandelingen maximaal 0.5-1.0°C. Zonder gebruik van de warmtestralers zou de koptemperatuur onder de LED-behandelingen 2°C lager zijn geweest (Tabel 2).

Tabel 2. Temperatuurmetingen (°C). Voor de metingen aan de kop van de planten en in de steenwol is een thermokoppel gebruikt. Voor meting van het stukje dofzwart metaal is een infrarood-thermometer gebruikt.

<i>lamp</i>	<i>Zwart metaal</i>	<i>kop komkommer</i>	<i>kop tomaat</i>	<i>steenwol komkommer</i>	<i>steenwol tomaat</i>
SON-T	24.6	19.8	19.0	18.8	17.6
LED rood/blauw, warmtestraler aan	23.8	19.5	19.5	18.5	18.0
LED rood/blauw/verrood warmtestraler aan	23.7	20.0	19.0	19.2	17.5
LED rood/blauw/verrood, warmtestraler uit		18	17	16.5	15.5
Zwavelplasma	24.6	20.5	19.5	19.0	17.7
Zonplasma	24.5	20.0	19.5	19.0	17.5

## 3.2 Opkweek oktober

Ondanks de extreem zonnige oktober, waren er aanzienlijke verschillen in plantrespons door de spectrale verschillen van de bijbelichting. Planten die bijbelicht werden met zonlicht-plasma en LED rood/blauw/verrood zagen er visueel hetzelfde uit en waren het meest gestrekt, terwijl planten die bijbelicht werden met SON-T en vooral met LED rood/blauw het meest compact waren. Planten onder zwavelplasma namen een middenpositie in (Foto 4).

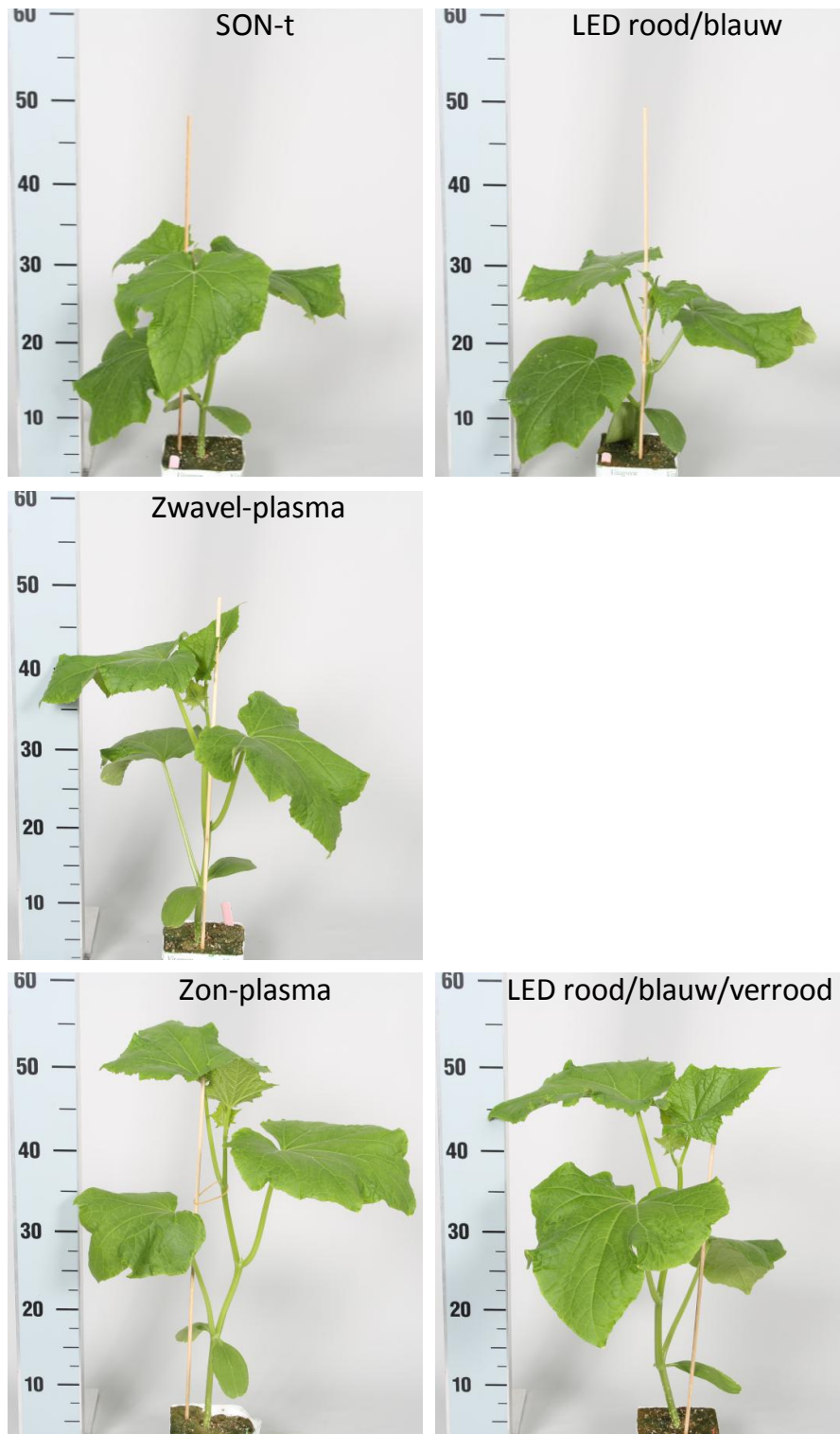


Foto 4. Reactie van de plantvorm op bijbelichting met verschillende lichtspectra (foto's 3 november 2011).



Voor zowel komkommer als tomaat was de totale biomassa het laagst voor LED rood/blauw en SON-T, het hoogst voor LED rood/blauw/verrood, terwijl zwavelplasma een middenpositie innam (Tabel 3). De LED rood/blauw/verrood had, vergeleken met SON-T, na 2 weken belichting 13% en 15% meer drooggewicht voor respectievelijk komkommer en tomaat. Na 3 weken belichting was het verschil voor komkommer toegenomen tot 21%, terwijl het voor tomaat was afgenomen tot 7% meer drooggewicht. De verschillen tussen de 2<sup>e</sup> en de 3<sup>e</sup> week worden naar alle waarschijnlijkheid verklaard door de dichtheid van het gewas: Na 2 weken had komkommer nog een zeer open gewasstructuur, waardoor de verschillen verder konden uitlopen. Tomaat begon toen al een vrij dicht gewas te vormen (Foto 6). Hierdoor gingen de tomatenplanten elkaar beschaduwden, waardoor de verschillen tussen de verschillende lichtbehandelingen logischerwijs kleiner werden.



Foto 5. Komkommer en tomaat 10 dagen na start van de belichtingsbehandelingen. Het tomatengewas is al veel dichter gegroeid dan het komkommernewas.

De grote verschillen in biomassa bij de verschillende lichtspectra kunnen veroorzaakt zijn door:

1. Verhoogde fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad
2. Vergrootte bladoppervlakte
3. Plantopbouw en/of bladoriëntatie gunstig voor lichtonderschepping.

#### *Fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad*

De maximale fotosynthese (gemeten bij hoog licht) was hoger voor tomaat dan voor komkommer (Fig. 5). Per gewas laat de fotosynthese-lichtrespons slechts beperkte verschillen zien tussen de behandelingen. De maximale fotosynthese van komkommer onder LED rood/blauw was iets lager dan onder de andere behandelingen. Echter, bij de lagere lichtintensiteiten die gangbaar zijn voor wintercondities ( $50\text{-}200\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) zijn de verschillen in fotosynthesesnelheid verwaarloosbaar klein. De conclusie kan dan ook getrokken worden dat de verschillen in plantgewicht (Tabel 3) niet verklaard kunnen worden door een verschil in fotosynthesesnelheid per eenheid bladoppervlakte.

#### *Bladoppervlakte*

Er waren geen opvallende verschillen in bladoppervlakte en ook het aantal bladeren verschilde niet significant tussen de behandelingen (Tabel 3 en Tabel 4). Het drooggewicht per oppervlakte blad (LMA) was wel iets hoger voor LED rood/blauw/verrood, maar ook hier waren de verschillen niet significant. De forse verschillen in plantgewicht zijn dus ook niet terug te voeren op verschillen in bladoppervlakte of bladmassa.



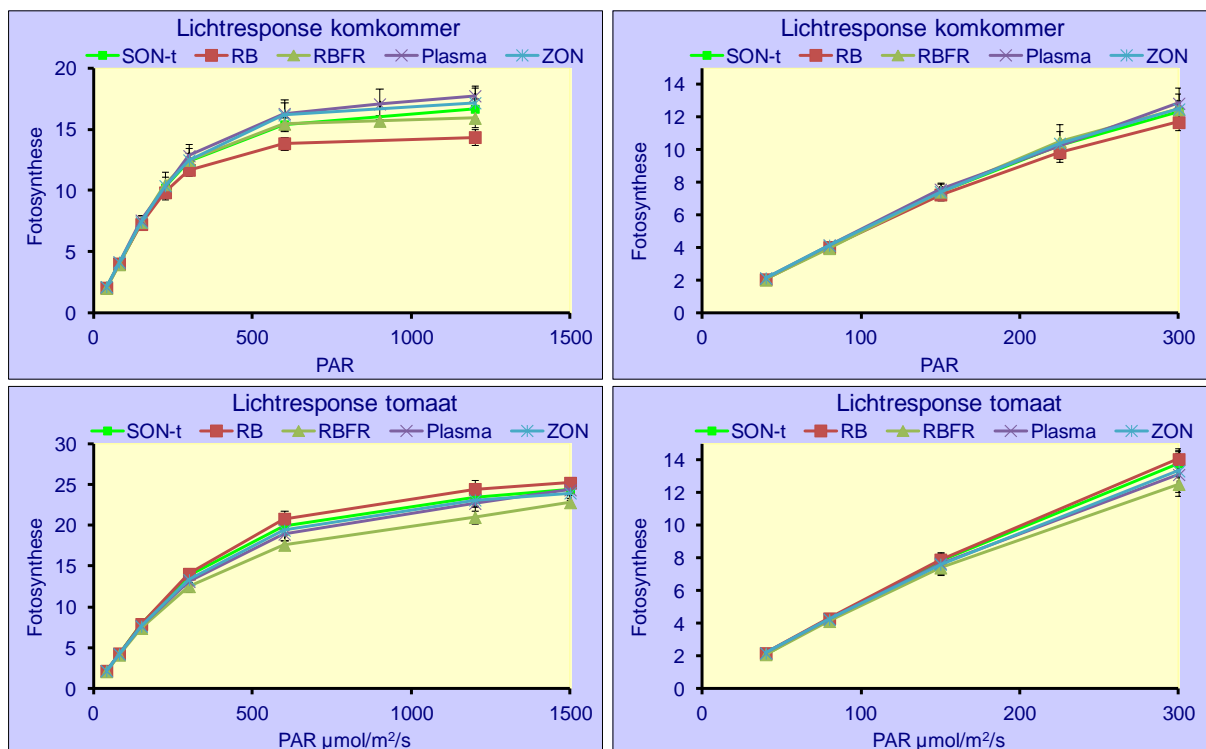


Fig. 5. Fotosynthese-lichtrespons van komkommer en tomaat onder de vijf verschillende lichtspectra. RB staat voor LED rood/blauw en RBFR staat voor LED rood/blauw/verrood. Figuren links en rechts geven dezelfde metingen weer (rechts alleen voor de lichtintensiteiten die representatief zijn voor wintercondities in Nederlandse kassen).

#### Plantopbouw en bladoriëntatie

De plantopbouw is in beeld gebracht door metingen aan de stengel (gewicht, lengte en diameter) en de bladsteellengte. Het stengelgewicht liet dezelfde trend als het totaal drooggewicht van de plant (Tabel 3): stengeldelen van de planten onder LED rood/blauw/verrood waren 50% (week 3) en 47% (week 2) zwaarder voor respectievelijk komkommer en tomaat vergeleken met SON-T. In diezelfde weken hadden komkommer en tomaat onder zwavelplasma een 20% en 24% zwaarder stengelgewicht. Het verschil in totaal plantgewicht wordt dus grotendeels verklaard door verschillen in stengelgewicht.

Het grotere stengelgewicht uitte zich in meer lengte, de stengeldiameter was namelijk niet significant (komkommer) of nauwelijks (tomaat) groter. Het percentage drogestof van de gehele plant was bij komkommer zelfs iets lager voor LED rood/blauw/verrood ten opzichte van SON-T, en varieerde voor beide gewassen tussen de 5.2% en 6.7% van het versgewicht. Hoewel het hypocotyl al gevormd was voordat de planten onder de verschillende lichtbronnen geplaatst werden, volgde ook de hypocotyl-lengte eenzelfde trend als de totale stengellengte.

De planten onder LED rood/blauw/verrood, en in mindere mate onder zwavelplasma, legden dus meer energie vast als drooggewicht in extra stengellengte. Deze hogere biomassaopbouw vond plaats zonder dat de bladoppervlakte en de fotosynthesesnelheid per bladoppervlakte bij een gelijke lichtintensiteit groter waren. De verklaring hiervoor moet gezocht worden bij een gunstigere lichtonderschepping: De bladsteellengte volgde bij komkommer eenzelfde trend als stengelgewicht en stengellengte: +65%, +33% and -11% voor respectievelijk LED rood/blauw/verrood, zwavelplasma en LED rood/blauw vergeleken met SON-T. Opvallend was overigens dat bij tomaat geen verschillen in bladsteellengte werden gemeten. Door de langere stengels en langere bladstelen (komkommer) was de plantopbouw onder LED rood/blauw/verrood dus veel gunstiger voor een hoge

lichtonderschepping. Als laatste kan nog genoemd worden dat bij deze behandeling ook de bladoriëntatie ten opzichte van het licht gunstiger was. Bij LED rood/blauw en SON-T hingen de bladeren 'krulliger' terwijl ze bij LED rood/blauw/verrood veel vlakker waren (Foto 4 en Foto 6).

De wortelontwikkeling verschilde niet opvallend tussen de behandelingen, voor zover dat beoordeeld kan worden op basis van de wortels zichtbaar aan de onderkant van de steenwolpotjes (zie Bijlage 1).

Tabel 3. Effect van de verschillende lichtspectra op de ontwikkeling van **komkommer**. Alle waarnemingen zijn weergegeven als percentage ten opzichte van de meting aan de SON-T planten (SON-T=100%). Bij SON-T is ook de werkelijke waarde van de parameters tussen haakjes weergegeven. De getallen zijn gemiddelden van 16 of 32 meetplanten. Verschillende letters (a, b, c, d) geven statistisch significante verschillen tussen de gemiddelden aan (Fisher's LSD,  $\alpha < 0.05$ ; ns=geen significant verschil).

Percentage t.o.v. SON-T	SON-T	LED rood/blauw	LED rood/blauw/verrood	Zwavelplasma
<b>Waarnemingen tussentijdse oogst (2 weken belicht)</b>				
<b>Drogestof plant (g)</b>	100 <sup>ns</sup> (1.18)	102 <sup>ns</sup>	113 <sup>ns</sup>	102 <sup>ns</sup>
<b>Drogestof blad (g)</b>	100 <sup>ns</sup> (0.91)	105 <sup>ns</sup>	104 <sup>ns</sup>	99 <sup>ns</sup>
<b>Drogestof stengel (g)</b>	100 <sup>c</sup> (0.27)	91 <sup>d</sup>	143 <sup>a</sup>	115 <sup>b</sup>
<b>Aantal bladeren</b>	100 <sup>ns</sup> (3.3)	94 <sup>ns</sup>	103 <sup>ns</sup>	97 <sup>ns</sup>
<b>Bladoppervlak (cm<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ns</sup> (491)	103 <sup>ns</sup>	99 <sup>ns</sup>	94 <sup>ns</sup>
<b>Stengeldiameter (mm)</b>	100 <sup>ns</sup> (6.2)	96 <sup>ns</sup>	97 <sup>ns</sup>	102 <sup>ns</sup>
<b>Plantlengte (cm)</b>	100 <sup>c</sup> (15.3)	86 <sup>d</sup>	136 <sup>a</sup>	115 <sup>b</sup>
<b>Waarnemingen eind oogst (3 weken belicht)</b>				
<b>Drogestof plant (g)</b>	100 <sup>c</sup> (3.71)	97 <sup>c</sup>	121 <sup>a</sup>	109 <sup>b</sup>
<b>Drogestof blad (g)</b>	100 <sup>ns</sup> (2.51)	102 <sup>ns</sup>	107 <sup>ns</sup>	102 <sup>ns</sup>
<b>Drogestof stengel (g)</b>	100 <sup>c</sup> (1.20)	87 <sup>d</sup>	150 <sup>a</sup>	124 <sup>b</sup>
<b>Aantal bladeren</b>	100 <sup>ns</sup> (6.6)	96 <sup>ns</sup>	100 <sup>ns</sup>	100 <sup>ns</sup>
<b>Bladoppervlak (cm<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ns</sup> (1565)	102 <sup>ns</sup>	100 <sup>ns</sup>	96 <sup>ns</sup>
<b>LMA (g/m<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ns</sup> (15.3)	97 <sup>ns</sup>	106 <sup>ns</sup>	105 <sup>ns</sup>
<b>Bladsteellengte (cm)</b>	100 <sup>c</sup> (8.6)	89 <sup>d</sup>	165 <sup>a</sup>	133 <sup>b</sup>
<b>Hypocotyllengte (cm)</b>	100 <sup>c</sup> (6.5)	92 <sup>d</sup>	141 <sup>a</sup>	117 <sup>b</sup>
<b>Stengeldiameter (mm)</b>	100 <sup>ns</sup> (8.3)	103 <sup>ns</sup>	106 <sup>ns</sup>	102 <sup>ns</sup>
<b>Plantlengte (cm)</b>	100 <sup>c</sup> (50.3)	84 <sup>d</sup>	129 <sup>a</sup>	116 <sup>b</sup>

Tabel 4. Effect van de verschillende lichtspectra op de ontwikkeling van **tomaat**. Alle waarnemingen zijn weergegeven als percentage ten opzichte van de meting aan de SON-T planten (SON-T=100%). Bij SON-T is ook de werkelijke waarde van de parameters tussen haakjes weergegeven. De getallen zijn gemiddelden van 10 of 14 meetplanten. Verschillende letters (a, b, c) geven statistisch significante verschillen tussen de gemiddelden aan (Fisher's LSD,  $\alpha < 0.05$ ; ns=geen significant verschil).

<b>Percentage t.o.v. SON-T</b>	<b>SON-T</b>	<b>LED rood/blauw</b>	<b>LED rood/blauw/ verrood</b>	<b>Zwavelplasma</b>
<b>Waarnemingen tussentijdse oogst (2 weken belicht)</b>				
<b>Drogestof plant (g)</b>	100 <sup>b</sup> (5.19)	101 <sup>b</sup>	115 <sup>a</sup>	104 <sup>b</sup>
<b>Drogestof blad (g)</b>	100 <sup>ab</sup> (3.60)	103 <sup>a</sup>	101 <sup>ab</sup>	96 <sup>b</sup>
<b>Drogestof stengel (g)</b>	100 <sup>c</sup> (1.58)	95 <sup>c</sup>	147 <sup>a</sup>	120 <sup>b</sup>
<b>Aantal bladeren</b>	100 <sup>ns</sup> (7.8)	101 <sup>ns</sup>	101 <sup>ns</sup>	97 <sup>ns</sup>
<b>Bladoppervlak (cm<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ab</sup> (1340)	103 <sup>a</sup>	100 <sup>ab</sup>	95 <sup>b</sup>
<b>Stengeldiameter (mm)</b>	100 <sup>b</sup> (7.8)	105 <sup>a</sup>	102 <sup>ab</sup>	101 <sup>b</sup>
<b>Plantlengte (cm)</b>	100 <sup>c</sup> (45.7)	98 <sup>c</sup>	125 <sup>a</sup>	116 <sup>b</sup>
<b>Waarnemingen eind oogst (3 weken belicht)</b>				
<b>Drogestof plant (g)</b>	100 <sup>b</sup> (12.44)	102 <sup>ab</sup>	107 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>
<b>Drogestof blad (g)</b>	100 <sup>b</sup> (7.55)	106 <sup>a</sup>	97 <sup>bc</sup>	94 <sup>c</sup>
<b>Drogestof stengel (g)</b>	100 <sup>b</sup> (4.89)	97 <sup>b</sup>	122 <sup>a</sup>	108 <sup>b</sup>
<b>Aantal bladeren</b>	100 <sup>ns</sup> (10.1)	105 <sup>ns</sup>	101 <sup>ns</sup>	101 <sup>ns</sup>
<b>Bladoppervlak (cm<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ab</sup> (2459)	102 <sup>a</sup>	100 <sup>ab</sup>	97 <sup>b</sup>
<b>LMA (g/m<sup>2</sup>)</b>	100 <sup>ns</sup> (30.7)	103 <sup>ns</sup>	97 <sup>ns</sup>	98 <sup>ns</sup>
<b>Bladsteellengte (cm)</b>	100 <sup>ns</sup> (9.0)	98 <sup>ns</sup>	92 <sup>ns</sup>	100 <sup>ns</sup>
<b>Plantlengte (cm)</b>	100 <sup>b</sup> (81.0)	94 <sup>c</sup>	109 <sup>a</sup>	105 <sup>a</sup>

### 3.3 Opweek december

Om voldoende planten te verkrijgen voor de vervolgteelt bij Kwekerij De Springplank, werd de proef herhaald in december 2011 met alleen een komkommerteelt. Hiertoe werden de twee proefvakken per behandeling samengevoegd tot één groot proefvak. Dit werd gedaan voor de behandelingen LED rood/blauw, LED rood/blauw/verrood en SON-T. De komkommerzaailingen werden op 2 december in de proefvakken geplaatst.

Het aandeel natuurlijk daglicht was fors lager in deze periode vergeleken met de opweek in oktober (Fig. 4). De plantrespons op het verschil in lichtspectrum van de bijbelichting volgde dezelfde trend als in oktober, alleen waren de verschillen veel groter. Op de 16<sup>e</sup> dag na uitplanten in de kas was bij LED rood/blauw en SON-T de betonvloer nog duidelijk zichtbaar, terwijl bij LED rood/blauw/verrood de betonvloer al goed door het gewas bedekt was en dus een groter aandeel van het invallend licht door het gewas onderschept werd (Foto 6). Ook was bijvoorbeeld de stengellengte op de 21<sup>e</sup> dag (dag van aflevering) voor planten onder LED rood/blauw/verrood 70% langer dan van SON-T, terwijl de planten onder LED rood/blauw juist 21% korter waren (Tabel 5). Belangrijk is ook dat de behandeling LED rood/blauw/verrood 15% meer bladeren had en een 23% grotere totale bladoppervlakte. Het hogere

percentage toename in bladoppervlakte ten opzichte van de toename in het aantal bladeren geeft aan dat ook de individuele bladeren groter waren voor LED rood/blauw/verrood. Het grotere aantal bladeren wijst erop dat de fysiologische plantleeftijd hoger is en de planten dus eerder zullen bloeien.

De toename in bladoppervlakte en aantal bladeren werd niet waargenomen in de oktober-opkweek. Dit kan enerzijds liggen aan het feit dat er toen veel meer daglicht was. Het relatieve effect van de bijbelichting is dan kleiner. Mogelijk kan het ook een cultivar-eigenschap zijn (cv. Amaranta in plaats van cv. Venice).

Op basis van het feit dat de planten onder LED rood/blauw/verrood bij aflevering 70% langer waren, 23% meer bladoppervlakte hadden en 15% meer bladeren, kan worden geconcludeerd dat de teeltduur in de kas vanaf het zaailingstadium met 15-25% verkort kan worden onder een LED rood/blauw/verrood spectrum.



Foto 6. Bijbelichting met  $75 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  LED rood/blauw (links) en LED rood/blauw/verrood (rechts). De lichtverliezen zijn bij de linkerfoto veel groter dan bij de rechterfoto. Let ook op de stand van het blad. (foto 16 december 2011, 14 dagen na start belichting en 6 dagen voor aflevering).

Tabel 5. Resultaten opkweek december 2011. Ter vergelijking staan de resultaten van oktober 2011 tussen haakjes vermeld. Verschillende letters (a, b, c) geven statistisch significante verschillen tussen de gemiddelden aan (Fisher's LSD,  $\alpha < 0.05$ ; ns=geen significant verschil).

Meting 22/12/2012 en (07/11/2012)	SON-T	LED rood/blauw	LED rood/blauw/verrood
% plantlengte t.ov. SON-T	100 <sup>b</sup> (100 <sup>b</sup> )	79 <sup>c</sup> (84 <sup>c</sup> )	170 <sup>a</sup> (129 <sup>a</sup> )
% bladoppervlakte t.ov. SON-T	100 <sup>b</sup> (100 <sup>ns</sup> )	97 <sup>b</sup> (102 <sup>ns</sup> )	123 <sup>a</sup> (100 <sup>ns</sup> )
aantal bladeren	5.0 <sup>b</sup> (6.6 <sup>ns</sup> )	5.1 <sup>b</sup> (6.3 <sup>ns</sup> )	5.7 <sup>a</sup> (6.6 <sup>ns</sup> )



### 3.4 Vervolgteelt Kwekerij De Springplank

Op 22 december 2011 werd de komkommerplanten van de decemberproef geleverd aan Kwekerij De Springplank en de dag erna geplant in een niet-belichte afdeling. Foto 7 laat de verschillen in plantgrootte zien bij uitplanten. Het gewas werd begin mei 2012 geruimd.



Foto 7. Komkommerplanten opgevoed bij LED rood/blauw/verrood (links), SON-T (midden) en LED rood/blauw (rechts) op het moment van planten bij Kwekerij De Springplank.

Belangrijke observaties waren hierbij:

- Visueel gezien waren er tussen de behandelingen geen verschillen in de wortelpruik die onder het steenwolblokje uitkwam.
- De LED rood/blauw/verrood planten waren op het moment van planten 25 cm langer dan de planten opgevoed onder SON-T en 18 januari nog maar 16 cm langer (Tabel 6). Het lengteverschil groeide er langzaam maar zeker uit.
- De LED rood/blauw/verrood vruchten lopen iets voor (+33% lengte op 18 januari; Tabel 6), deze zijn uiteindelijk 2 dagen eerder geoogst.
- De kleinere plant kreeg aldus de teler (Aad van der Helm) een strekkingsspurt in de eerste 2 dagen en vormde 2 kleine, misvormde bladeren, alvorens normaal verder te groeien.
- Aantal bladeren, huidmondjesgeleidbaarheid en chlorofyl waren bij de nieuw gevormde bladeren in de kas vrijwel gelijk (Tabel 6).
- Aan het einde van de teelt (begin mei) vielen de LED rood/blauw/verrood planten niet eerder uit dan de planten afkomstig van SON-T en LED rood/blauw.
- Er werden verder geen opvallende verschillen waargenomen in teelt, totale productie en ziektedruk.

Tabel 6. Metingen uitgevoerd bij Kwekerij de Springplank (18 januari 2012). Verschillende letters (a, b, c) geven per kolom statistisch significante verschillen tussen de gemiddelden aan (Fisher's LSD,  $\alpha < 0.05$ ; ns=geen significant verschil).

Behandeling	Stengel- lengte (cm)	Vrucht- lengte (mm)	Aantal bladeren (ex kop)	Chlorofyl-index blad 5 v.a. top	Geleidbaar- heid blad 5 v.a. top
SON-T	204 <sup>b</sup>	61 <sup>b</sup>	16.2 <sup>ns</sup>	29 <sup>b</sup>	167 <sup>ns</sup>
LED R/B	197 <sup>b</sup>	64 <sup>b</sup>	16.2 <sup>ns</sup>	30 <sup>b</sup>	149 <sup>ns</sup>
LED R/B/verrood	220 <sup>a</sup>	81 <sup>a</sup>	16.1 <sup>ns</sup>	31 <sup>a</sup>	179 <sup>ns</sup>

Buiten de vervroeging van de oogst van twee dagen voor de LED rood/blauw/verrood-behandeling was er dus geen sprake van een positief of negatief na-ijl effect van het verschil in opkweek. Verder werd in de BCO nog benoemd dat de planten van de LED rood/blauw/verrood-behandeling te lang waren om fijn mee te werken bij het uitplanten. Dit kan eenvoudig worden voorkomen door de planten eerder te leveren zodat de teeltduur bij de plantenkweker in de kas wordt verkort met 15-25%.



Foto 8. Metingen bij Kwekerij De Springplank, diameter van de eerste vruchten (links), verdampingsmetingen (rechts).



## 3.5 Algemene discussie en conclusies

### 3.5.1 De fytochrombalans als sleutelfactor om de plantvorm te beïnvloeden

In eerder onderzoek werden zeer positieve effecten van kunstzonlicht aangetoond op de groeisnelheid van jonge komkommerplanten (Hogewoning *et al.* 2010) en tomatenplanten (van Ieperen *et al.* 2012). De snellere groei onder kunstzonlicht ten opzichte van SON-T, TL of rood/blauw LED-licht bleek toe te schrijven aan een plantvorm die de lichtonderschepping door de planten bevorderde. Daarom zijn de aangetoonde effecten met name relevant voor gewassen met een open structuur, waarin de individuele planten elkaar (nog) niet beschaduen. In dichtere gewassen is lichtonderschepping minder beperkend voor de totale gewasfotosynthese. Dus hoe opener het gewas, hoe meer een plantvorm die lichtonderschepping van individuele planten bevordert zal bijdragen tot meerproductie.

Ondanks dat kunstzonlicht in deze eerdere onderzoeken de groeisnelheid bevorderde, is kunstzonlicht in de meeste gevallen toch ongeschikt voor belichting van commerciële teelten. Dit vanwege de lage energetische efficiëntie ( $\mu\text{mol PAR/Joule}$ ; zie in H1.2). Dit gaf aanleiding tot de vraag in hoeverre het zonlichtspectrum kan worden vereenvoudigd met behoud van de gunstige effecten. Hiertoe werd de *hoofdhypothese*, dat de gunstige effecten van kunstzonlicht toe te schrijven zijn aan de gevolgen van de verrode golflengten in het zonlicht op de fytochrombalans, geformuleerd. Daarnaast werd getoetst of het brede spectrum van zonlicht binnen het PAR-gebied een (aanvullend) positief effect heeft. LED rood/blauw en SON-T stralen namelijk geen continu lichtspectrum en ook nauwelijks verrode golflengten uit (Fig. 3). De LED rood/blauw/verrode lampen waren zo samengesteld dat het spectrum vrijwel eenzelfde fytochrombalans aan de plant zou moeten geven als zonlicht (PSS=0.72, zie Tabel 1). De zwavel-plasmalamp geeft juist een breed spectrum, met een fytochrombalans (PSS= 0.77) dat tussen dat van zonlicht en van SON-T (PSS= 0.85) in zit. De resultaten geven duidelijk aan dat de fytochrombalans de belangrijkste rol speelt met betrekking tot de 'zonlicht-respons': Planten onder LED rood/blauw/verrode leken sterk op planten onder kunstzonlicht (Foto 4). De zwavel-plasmalamp zat qua plantvorm en biomassa (Tabel 3 en 4) precies tussen SON-T en LED rood/blauw/verrode in. Onder LED rood/blauw (PSS= 0.89) waren de planten juist compacter dan onder SON-T.

Concluderend kan gesteld worden dat de fytochrombalans een sleutelfactor is om de plantvorm te beïnvloeden. De modelmatige berekende PSS-waarde voor de verschillende lichtspectra blijkt een goede voorspeller te zijn voor de plantvorm. Aan de overige golflengten binnen het PAR-gebied zijn voor wat betreft dit onderzoek geen opvallende planteigenschappen toe te kennen. Het zonlichtspectrum kan dus vereenvoudigd worden met behoud van de positieve effecten op groeisnelheid voor open gewassen. Deze gecombineerde benutting van belichting als assimilatie- en als stuurlicht biedt nieuwe mogelijkheden voor belichting in de glastuinbouw.

### 3.5.2 Praktische consequenties van opkweek met een ander lichtspectrum

De groeisnelheid was het hoogst bij planten opgegroeid onder LED rood/blauw/verrode. In oktober leidde dat tot een toename in drooggewicht van respectievelijk 21% en 15% voor komkommer en tomaat, ten opzichte van belichting met SON-T.

Dit kan veroorzaakt zijn door:

1. Verhoogde fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad
2. Vergrootte bladoppervlakte
3. Plantopbouw en/of bladorientatie gunstig voor lichtonderschepping.

Zoals in H3.2 al uiteengezet leidden de verschillende lichtbehandelingen niet of nauwelijks tot verschillen in de fotosynthesesnelheid per oppervlakte blad. Ook het aantal bladeren en de totale bladoppervlakte lieten in de oktoberteelt geen verschillen zien die de grotere biomassa bij LED rood/blauw/verrood en zwavelplasma kunnen verklaren. De gevonden verschillen in groei kunnen dus verklaard worden uit de effecten van de verschillen in plantopbouw en bladoriëntatie op de lichtonderschepping. Bij de LED rood/blauw/verrood-planten was minder zelfbeschaduwning door de langere stengels en de langere bladstelen (komkommer; Tabel 3). Tevens was de bladoriëntatie ten opzichte van het licht gunstiger. Bij LED rood/blauw hingen de bladeren 'krulliger' terwijl ze bij LED rood/blauw/verrood veel vlakker waren (Foto 4 en Foto 6). Bij zwavelplasma zaten de effecten hier tussenin.

In oktober zat de toename van het drooggewicht voornamelijk in de stengel en waren de bladoppervlakte en het aantal bladeren niet hoger. Dit doet de vraag rijzen of de toename in drooggewicht veel praktische relevantie heeft. Meer stengelgewicht is op zich niet per se wenselijk. Wel zou de verhoogde lichtonderschepping per eenheid bladoppervlakte kunnen leiden tot een krachtigere uitgroei na aflevering bij de vruchtgroentekweker. Echter, bij de vervolgteelt van de komkommerplanten opgekweekt in december zijn geen spectaculaire verschillen in gewasontwikkeling gevonden. Alleen meer stengelgewicht op zich is dus geen stap vooruit voor de praktijk.

Daarentegen waren in de decemberteelt het aantal bladeren en de totale bladoppervlakte wel groter bij de LED rood/blauw/verrood belichte planten (respectievelijk 15% en 23%; Tabel 5). De verschillen tussen de behandelingen waren over het algemeen extremer in december, hetgeen goed te zien is aan de +70% lengte in december tegenover +29% in oktober voor LED rood/blauw/verrood t.o.v. SON-T. Waarschijnlijk is deze extremere plantrespons te wijten aan het veel grotere aandeel lamplicht in de december ten opzichte van de uitzonderlijk zonnige maand oktober. In oktober en december werden niet dezelfde cultivars geteeld, waardoor invloed van de cultivar op het verschil in plantrespons niet kan worden uitgesloten.

Concluderend kan op basis van de verschillen in bladoppervlakte, aantal bladeren en lengte gesteld worden dat het aantal belichte dagen gedurende de decemberteelt 15-25% minder had kunnen zijn onder een LED rood/blauw/verrood spectrum. Tijdens de winterperiode kan dus een aanzienlijke energiebesparing gerealiseerd worden door assimilatie- en stuurlicht te combineren (zie verdere analyse in H5). Het is nog niet duidelijk of de te realiseren verkorting van de teeltduur met een ander lichtspectrum sterk afhankelijk is van gewassoort en cultivar.

Bij de vervolgteelt kon bij de planten die opgegroeid waren onder LED rood/blauw/verrood twee dagen eerder geoogst worden. Dit komt waarschijnlijk doordat deze planten bijna één blad meer hadden (Tabel 5). Verder zijn geen positieve of negatieve punten bij de vervolgteelt naar voren gekomen. Het combineren van assimilatie- en stuurlicht in de opkweek biedt dus vooral potentiële voordelen voor de opkweekbedrijven, terwijl de gevolgen voor de vruchtgroentekweker neutraal lijken te zijn. Slimme combinaties assimilatie- en stuurlicht bieden ook perspectieven voor andere gewassen waarbij voordeel te halen is uit optimalisatie van de lichtonderschepping door het gewas. Daarnaast wordt ook de lichtverdeling binnen het gewas beïnvloed. Een betere verticale lichtverdeling kan ook leiden tot een efficiëntere lichtbenutting, hetgeen ook de gedachte is achter tussenbelichting (Trouwborst *et al.* 2010) en een diffuus kasdek (Dueck *et al.* 2012).

## 4 Efficiëntie lichtbronnen

In de vorige hoofdstukken zijn de effecten van de spectrale samenstelling van belichting op de groei en ontwikkeling van jonge komkommer- en tomatenplanten beschreven. Echter, met het oog op praktijktoepassing van innovatieve belichtingsstrategieën in de glastuinbouw is niet alleen de wisselwerking tussen lichtspectrum en gewas van belang. De voordelen van een gunstiger lichtspectrum moeten opwegen tegen de kosten die gepaard gaan met het energieverbruik, de jaarlijkse afschrijvingen op de investeringskosten en de onderhoudskosten van de lichtbronnen. Om meer inzicht te bieden in de kansen voor praktijktoepassing van de lichtspectra die succesvol bleken tijdens het opweekonderzoek is de energetische efficiëntie van een aantal lichtbronnen gemeten. Op basis daarvan is een analyse gemaakt van de balans tussen energieverbruik van de lichtbronnen en energiebesparing door een kortere opkweektijd (H5).

### 4.1 Methode efficiëntiemetingen lampen

De efficiëntiemetingen zijn uitgevoerd in lijn met het KEMA protocol voor het meten van de prestaties van tuinbouwbelichtingssystemen met LED's (De Ruijter 2010). De metingen zijn verricht aan de drie in het onderzoek gebruikte LED-typen (blauw-450 nm; rood-630 nm; verrood-730 nm) en tevens aan dieprode LED's met een piekgolflengte van 660 nm. Het laatstgenoemde type LED is het meest algemeen in LED-armaturen voor gewasbelichting (zie H2.1).

Van de zon-plasmalamp was al bekend dat de energetische efficiëntie dermate laag is dat deze lamp alleen geschikt is voor onderzoeksdoeleinden. Er is besloten om metingen aan de zwavelplasma ook achterwege te laten. Tijdens de proef vergde dit type lamp veel onderhoud ter ondervanging van verschillende technische mankementen. Derhalve achten de onderzoekers het niet zinvol om dit type lamp in zijn huidige configuratie aan een verdere analyse over de mogelijkheden voor praktijktoepassing te onderwerpen. Hierbij moet opgemerkt worden dat het effect van de zwavelplasmalamp op de ontwikkeling van de planten wel nadere aandacht waardig is. Het spectrum van deze lamp leidt wellicht juist tot een gewenst evenwicht tussen een toename in lichtonderschepping en groei t.o.v. SON-T, maar een minder extreme strekking dan bij kunstzonlicht en LED rood/blauw/verrood (zie Foto 4). Indien technische ontwikkelingen leiden tot een robuuster model van dit lamptype, dan is het van belang dat de efficiëntie hiervan gemeten wordt en is verder onderzoek naar toepassingen zinvol.

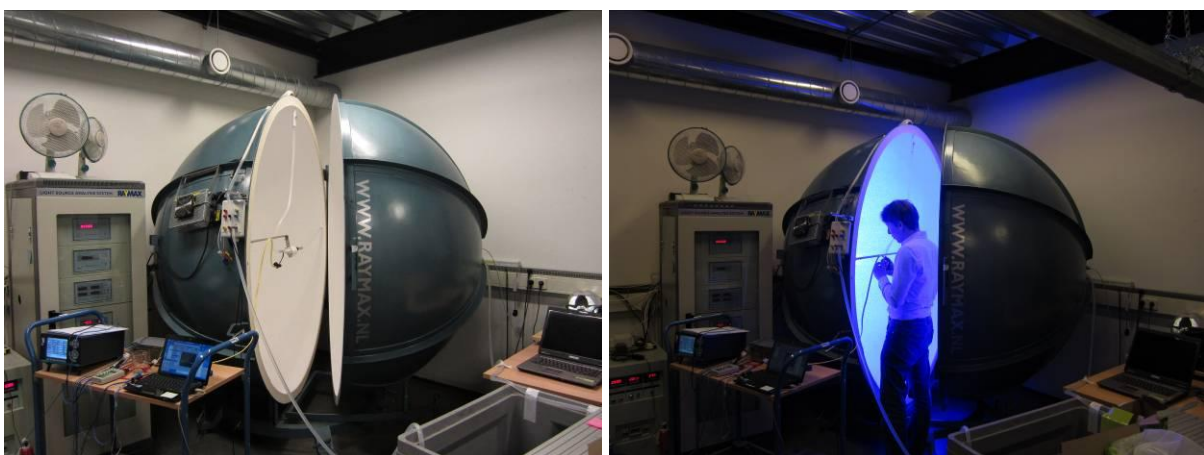


Foto 9. Bol van Ulbricht waar efficiëntie-metingen in uitgevoerd zijn.

#### Puntsgewijze opsomming kenmerken efficiëntiemeting:

- Metingen in bol van Ulbricht (2 m doorsnede, zie Foto 9) van Raymax BV te Monster
- Energetische efficiëntie wordt uitgedrukt in  $\mu\text{mol}$  fotonenstroom per Joule energie-input in de lamp (1 Watt = 1 Joule per seconde).
  - Volledige fotonenstroom gemeten, dus niet alleen het PAR-gebied (400-700 nm).
  - Gelijktijdige lichtmetingen met twee typen lichtmeters op vrijwel dezelfde positie:
    - kwantumsensor (Li-190; geen meting 730 nm LED's mogelijk).
    - spectraradiometer (USB 20000, Ocean Optics, meetgebied 400-800 nm), gekalibreerd met kalibratie -halogeenlamp (Philips).
  - Lichtmeting in bol gekalibreerd met SON-T lamp waarvan de waarden bekend zijn:
    - indirecte kalibratie met Philips SON-T 600W, 230 V.
    - waarden gemeten bij Philips (vermogen 601 Watt; spanning lamp 118 V; output in PAR-gebied 1076  $\mu\text{mol/s}$ ; efficiëntie in PAR-gebied 1.79  $\mu\text{mol/J}$ ).
- Gestabiliseerde voeding.
  - Energieverbruik voeding buiten beschouwing gelaten vanwege irrealistisch hoog verbruik in proefopstelling ten opzichte een van praktijksituatie waarin veel meer armaturen op 1 voeding zijn aangesloten.
- Aparte watergekoelde armaturen gebouwd door Lemnis voor alle 4 de LED-typen.
  - 3 armaturen per LED-type gemeten ( $\pm 48\text{V}$  en  $\pm 71\text{W}$  per armatuur).
- Armatuur opgesteld in centrum bol (4  $\pi$ -meting, zie De Ruiter 2010).
  - Metingen verricht onder 8 verschillende hoeken.
- Armaturen doorgemeten bij stabiele temperatuur
  - Koelwater door armatuur gepompt via transparante siliconenslang.
  - Koelwatertemperatuur  $14.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$ .
  - Temperatuur continu gemonitord met thermokoppel.
- Temperatuurrepons armaturen doorgemeten.
  - Koelwatertemperatuur minimaal  $4^\circ\text{C}$  en maximaal  $48^\circ\text{C}$  (rond  $45^\circ\text{C}$  schakelen de armaturen automatisch uit).

## 4.2 Resultaten

De gemeten spectrale samenstelling was voor alle drie de LED armaturen per LED-type en bij alle 8 meethoeken in de bol gelijk (Fig. 6).

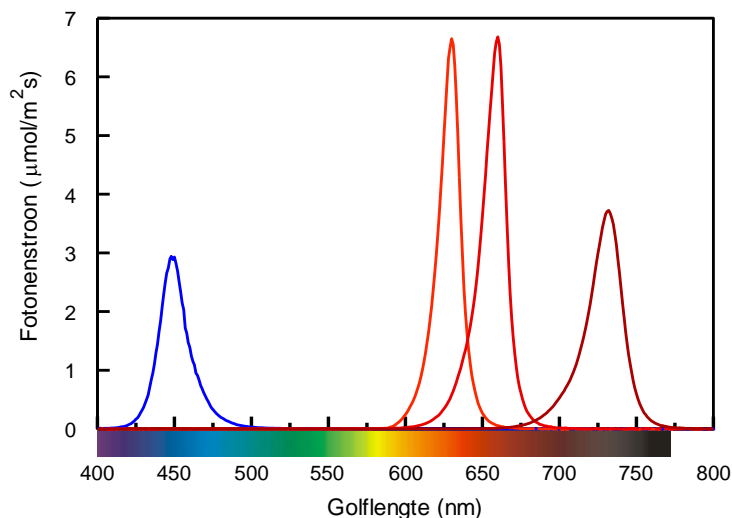


Fig. 6. Spectrale verdeling van de fotonenstroom uitgestraald door de blauwe, rode, dieprode en verrode LED-armaturen (van links naar rechts) bij een opgenomen vermogen van  $\pm 71\text{W}$ .

De metingen vonden plaats onder de verschillende hoeken ten opzichte van de meetsensoren omdat de LED-armaturen slechts vanaf één zijde licht uitstralen, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een SON-T lamp die in alle richtingen uitstraalt. Daardoor kan de meethoek invloed hebben op de reflecties binnen de bol en daarmee op de gemeten fotonenstroom. Voor een zo goed mogelijk vergelijk met de metingen aan de kalibratielamp in de bol (SON-T standaard) is per LED-armatuur de gemiddelde waarde van alle acht meethoeken gebruikt voor de efficiëntieberekening. De invloed van de meethoek op de gemeten fotonenstroom bleek maximaal 5% af te wijken van de gemiddelde waarde.

De efficiëntie van de verschillende LED-armaturen varieerde zeer weinig voor de 3 gemeten armaturen per LED-type (maximaal 2% afwijking van het gemiddelde). Een kwantumsensor kan bij metingen aan smalband LED's waarden weergeven die enige procenten afwijken van de werkelijke lichtintensiteit. Daarom is alleen de efficiëntie van de lichtbronnen gebaseerd op lichtmetingen met de spectroradiometer weergegeven in Tabel 7. Zoals in het onderschrift van de tabel te lezen, week de efficiëntie op basis van de twee meetmethoden alleen voor de blauwe LED's noemenswaardig af. Dit kan liggen aan een systematische fout in de meting met de kwantumsensor en/of aan de lagere lichtoutput van de blauwe armaturen die de kans op onnauwkeurigheden vergroot (lagere signal/noise ratio).

Tabel 7. Efficiëntie van de gebruikte lampen.

Lamp	Piek-golflengte (nanometer)	Input (Watt)	Output * ( $\mu\text{mol/s}$ )	Efficiëntie ( $\mu\text{mol/Joule}$ )
LED blauw	449	71.2	65.3	0.92
LED rood	630	71.4	113.9	1.60
LED dieprood	660	71.1	132.3	1.86
LED verrood	732	71.2	100.1	1.40

\*Output gemeten met de spectroradiometer. De efficiëntie, berekend op basis van de output gemeten met de kwantumsensor, was 0.87, 1.59 en 1.87 voor respectievelijk LED blauw, LED rood en LED dieprood. Verrood kan niet goed gemeten worden met een kwantumsensor.

Bij het oplopen van de koelwatertemperatuur nam het verbruikte vermogen van de armaturen een fractie toe (<math>0.5\text{W}</math>), terwijl de lichtoutput afnam. Deze afname verschilde sterk per LED-type (Fig. 7). De afname in efficiëntie was vrijwel evenredig met de toename in temperatuur bij de blauwe, dieprode en verrode LED's. Vooral de dieprode LED's waren niet erg gevoelig voor de koelwatertemperatuur, met iets meer dan 1% efficiëntieverlies per 10 °C temperatuurstijging. Bij de rode (630 nm) LED's was het temperatuursafhankelijke efficiëntieverlies veruit het grootst.

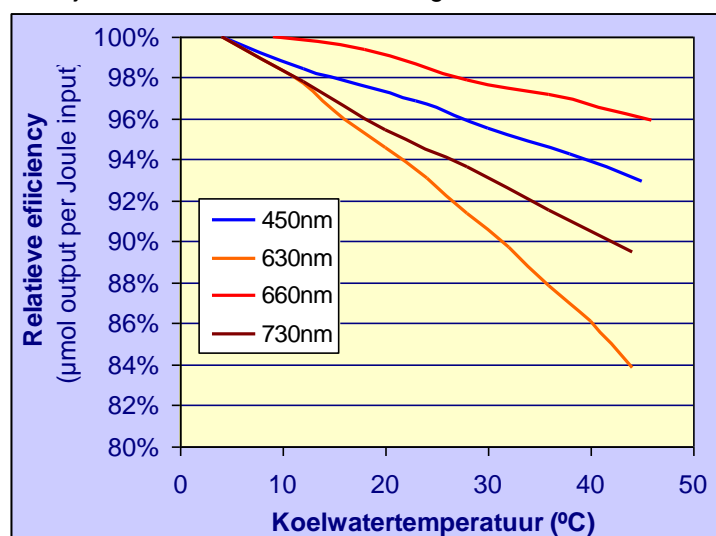


Fig. 7. Temperatuursafhankelijkheid van de efficiëntie van de 4 verschillende LED-types. De gegevens in Tabel 7 zijn gebaseerd op een koelwatertemperatuur van 14.8 °C.

### 4.3 Discussie meetresultaten

De betrouwbaarheid van de absolute efficiëntiegetallen in Tabel 7 is sterk afhankelijk van de betrouwbaarheid van de kalibratiegegevens van de SON-T referentielamp (meetrapport Philips: 1.79  $\mu\text{mol}/\text{Joule}$ ). In ieder geval zijn de onderlinge efficiëntieverhoudingen van de gemeten LED-typen goed vergelijkbaar. Voor alle LED-typen was hetzelfde soort armaturen gebruikt. Mogelijk leidt optimalisatie van het armatuur tot een hogere efficiëntie dan weergegeven in Tabel 7. In het kader van het gewasonderzoek zijn de efficiëntiemetingen aan de verrode LED's het meest interessant. Een analyse van de mogelijkheden voor toepassing om energie te besparen in de opkweek volgt in H5.

In de efficiëntieberekeningen is het energieverbruik van de voeding niet meegenomen, omdat in een proefopstelling het energieverbruik slecht te vergelijken valt met een praktijksituatie. Evenals bij SON-T belichting in de praktijk dient rekening gehouden te worden met dit soort efficiëntieverliezen. Bij toepassing van watergekoelde LED-systemen dient ook rekening gehouden te worden met het energieverbruik van de pomp. Omdat de efficiëntieverliezen bij stijging van de koelwatertemperatuur meevallen (behalve bij 630 nm; Fig. 7) is het twijfelachtig of de energiekosten die gepaard gaan met koeling via bassinwater (als koelwater voor praktijk) opwegen tegen de winst aan lichtopbrengst.



## 5 Scenario-analyse: Energiebesparing in de opkweek

Belichting met LED rood/blauw/verrood leidde tijdens de opkweekproeven tot een aanzienlijk hogere biomassa en tijdens de december-opkweek ook tot 15% meer bladeren, 23% meer bladoppervlakte en 70% meer lengte, vergeleken met SON-T belichting (zie 3.2 en 3.3). Op basis hiervan is geconcludeerd dat een verkorting van 15% tot 25% van het aantal dagen belichte teelt haalbaar is. Dat betekent 15-25% minder uren belichting en verwarming in die periode. Mogelijke aanvullende positieve neveneffecten, zoals een reductie van arbeidskosten en gebruik van bestrijdingsmiddelen, worden hier verder buiten beschouwing gelaten.

Tegenover de 15-25% besparing op gas en elektriciteit staat het elektriciteitsverbruik van de nieuwe lichtbron. Hieronder volgen twee scenario's met betrekking tot energieverbruik:

1. Versnelde opkweek op basis van LED-belichting (H5.1).
2. Versnelde opkweek op basis van een combinatie van SON-T en LED-belichting (H5.2).

### 5.1 Scenario 1: Versnelde opkweek op basis van LED-belichting

Een basis van 15% blauw en 85% rood LED-licht, aangevuld met verrode LED's om tot de versnelde opkweek te komen, leidt tot een energieverbruik als aangegeven in Tabel 8.

Tabel 8. Energieverbruik bij  $75 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  PAR belichting met verschillende lichtbronnen (22.4% van de fotonen uitgestraald door de verrode LED's worden hier meegeteld als PAR).

Lichtbron	Scenario $\mu\text{mol}/\text{J}$	SON-T		Basis LED's 630 nm		Basis LED's 660 nm	
		$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	$\text{W}/\text{m}^2$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	$\text{W}/\text{m}^2$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	$\text{W}/\text{m}^2$
SON-T	1.79	75	41.9	-	-	-	-
LED blauw (450 nm)	0.92	-	-	10.4	11.3	9.8	10.7
LED rood (630 nm)	1.60	-	-	58.7	36.7	-	-
LED dieprood (660 nm)	1.86	-	-	-	-	55.6	29.9
LED verrood	1.40	-	-	26.3	18.8	42.6	30.4
Totale energie belichting ( $\text{Watt}/\text{m}^2$ )			41.9		66.8		71.0

In Tabel 8 is uitgegaan van de efficiëntiemetingen aan de lampen zelf (Tabel 7). Het is duidelijk dat het elektriciteitsverbruik in de huidige praktijksituatie ( $75 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  SON-T belichting) veel lager ligt dan voor de geschetste scenario's met combinaties van rood, blauw en verrood LED-licht. Het energieverbruik per  $\text{m}^2$  ligt zelfs 59-69% hoger voor de LED-combinaties vergeleken met SON-T. Dit komt doordat een basis van rode LED's veel verrode LED's vergt om de gewenste fytochroombalans te bereiken (PSS van 0.73). Bij dieprode LED's (660 nm) zijn nog meer verrode LED's nodig dan bij rode LED's (630 nm) om die PSS-waarde te bereiken (zie H1.3 voor de theoretische onderbouwing). Daar staat tegenover dat dieprode LED's efficiënter (in  $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) zijn dan rode LED's.

In deze berekening is overigens geen rekening gehouden met het energieverbruik van de warmtestralers die bij de LED-behandelingen gebruikt zijn om de koptemperatuur in alle proefvakken gelijk te houden (zie p. 16). De stralingswarmte van SON-T belichting zal bij 100% LED-belichting gecompenseerd moeten worden door iets meer warmte via de buis toe te voeren.

Concluderend lijkt het in huidige situatie geen reële optie voor opkweekbedrijven om LED rood/blauw/verrood voor versnelde opkweek te installeren. LED-armaturen uitgerust met relatief veel verrode LED's vergen een forse investering en het elektriciteitsverbruik ligt 59-69% hoger. Wellicht weegt de energiebesparing door de gereduceerde verwarmingskosten bij een snellere opkweekcyclus in de koudste maanden toch op tegen het toegenomen elektriciteitsverbruik (zie Fig. 6). Echter, op korte termijn biedt dit waarschijnlijk niet voldoende voordeel om tot een dergelijke investering over te gaan. Wellicht dat in de toekomst een gunstiger scenario ontstaat door toename van de efficiëntie van de LED's en daling van de investeringskosten.

In H5.2 wordt een scenario geschetst dat op korte termijn meer perspectief biedt.

## 5.2 Scenario 2: Versnelde opkweek op basis van SON-T + LED-belichting

De samenstelling van de rode, blauwe en verrode LED's in de lichtbehandeling LED rood/blauw/verrood was zo berekend dat een fytochroombalans zoals bij een zonlichtspectrum benaderd werd (PSS van 0.73). Uit de opkweekproeven bleek dat de eerder aangetoonde versnelde groei van jonge planten bij kunstzonlicht (Hogewoning *et al.* 2010 en van Ieperen *et al.* 2012) ook te bereiken is met deze LED-samenstelling (zie H3). Zoals in H5.1 uiteengezet staan de investeringskosten en het verhoogde elektriciteitsverbruik praktijktoepassing van deze LED-combinatie nog in de weg.

Omdat de fytochroombalans de sleutel lijkt te zijn voor de spectrale effecten op de snellere uitgroei van jonge planten (zie 3.5.1), zijn er beter haalbare alternatieven voor belichting met LED rood/blauw/verrood. In de huidige praktijk wordt belicht met SON-T. Met de combinatie van SON-T en verrode LED's kan ook een fytochroombalans van zonlicht benaderd worden. Deze combinatie vergt zelfs veel minder verrode LED's dan een combinatie van (diep)rode LED's en verrood. Hierdoor hoeft een teler slechts te investeren in een beperkte hoeveelheid verrode LED's als aanvulling op de bestaande SON-T installatie. Tevens is door de beperktere hoeveelheid benodigd verrood het extra elektriciteitsverbruik zeer beperkt. Dit lijkt een beter haalbaar scenario dan de combinatie van (diep)rode, blauwe en verrode LED's (H5.1.)

Onderstaand een analyse van de te verwachten energiebesparing bij een combinatie van SON-T en verrode LED's. De analyse is gemaakt op basis van de potentiële verkorting van het aantal dagen opkweek van de kasperiode (H3.3), de efficiëntie van de verschillende lichtbronnen (H4), de energiegegevens van Plantenkwekerij van der Lugt (Fig. 8), en modelmatige berekeningen van de fytochroombalans bij combinaties van lichtbronnen.

### Winst:

- Bij aflevering hadden de planten onder het efficiëntere lichtspectrum 15% meer bladeren en 23% meer bladoppervlakte (december-opkweek).
- Op basis hiervan is een verkorting van het aantal te belichten dagen van tenminste 15% en maximaal 25% haalbaar. Er wordt dus *minimaal* 15% bespaard op het aantal branduren voor de belichting en op het gas voor warmte. Daarnaast is er kostenbesparing op arbeid voor gewasonderhoud en wellicht ook een reductie in gebruik van bestrijdingsmiddelen per plant.

### Verlies:

- Op basis van de energie-efficiëntie van de verrode lampen neemt het elektriciteitsverbruik per branduur belichting (SON-T + verrood) maximaal 15% toe.
- De extra benodigde energie voor belichting wordt dus al gecompenseerd door de verwachte

winst in teeltduurverkorting.

### Balans:

- Er blijft een besparing over van 15-25% aan energie benodigd voor de warmte (stookkosten) door de verkorting van het aantal dagen belichte teelt.
- Gedurende de winterperiode (week 41 tot week 9) blijkt het aandeel energie voor warmte 85% van de totale energiebehoefte (warmte + elektra) te zijn (Fig. 8).
- De totale besparing op energie (licht+warmte) bedraagt dus 12.8% tot 21.3% ( $0.85 \cdot 15-25\%$ ).
- In absolute zin zou dit tussen week 42 en week 9 geleid hebben tot een besparing aan gasequivalenten van  $3.4 \text{ m}^3$  tot  $5.6 \text{ m}^3$  per  $\text{m}^2$ .

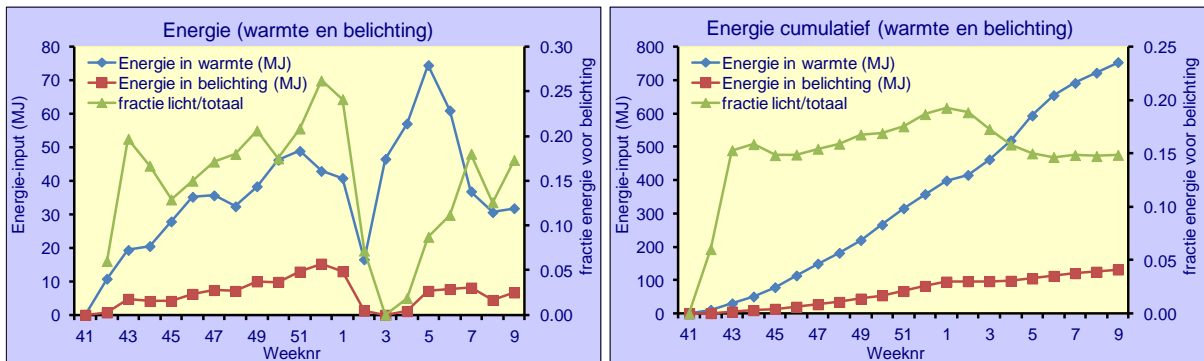


Fig. 8. Energieverbruik per week (links) en cumulatief energieverbruik (rechts) voor belichting en warmte gedurende winter '11/'12 in kas 1, afdeling 16 van Plantenkwekerij van der Lugt (voornamelijk komkommerteelt).

Concluderend lijkt dit tweede scenario een reële kans te bieden voor energiebesparing in de opkweek en andere teelten met een open gewasstructuur. In tegenstelling tot het eerste scenario (combinatie LED rood/blauw/verrood) zijn de effecten van SON-T + verrood op de plantontwikkeling slechts gebaseerd op voorspellingen aan de hand van modelmatige berekeningen van de fytochrombalans door Plant Lighting en Plant Dynamics. Het is de moeite waard om proefondervindelijk aan te tonen of een combinatie van SON-T en verrood licht werkelijk leidt tot de verwachte versnelde uitgroei van het gewas en de daaraan gekoppelde energiebesparing.

## 6 Samenvattende conclusies

- De planten opgegroeid onder kunstzonlicht vertoonden een vergelijkbare ontwikkeling met de planten opgegroeid onder LED rood/blauw/verrood.
- LED rood/blauw/verrood leidde tot beduidend meer biomassa bij komkommer en tomaat (respectievelijk +21% en +15% drooggewicht in oktober), vergeleken met SON-T.
- De resultaten bij zwavel-plasmalicht zaten tussen SON-T en LED rood/blauw/verrood in.
- LED rood/blauw gaf de meest compacte plantvorm.
- In december (minder daglicht) waren de effecten aanzienlijk groter dan in oktober: 15% meer bladeren, 23% meer bladoppervlakte en 70% meer lengte bij LED rood/blauw/verrood, vergeleken met SON-T. Hieruit wordt geconcludeerd dat een 15-25% kortere belichte opkweektijd haalbaar is.
- De lengtegroei is onpraktisch, maar zal voor een groot deel teniet gedaan worden door een kortere opkweektijd.
- Het fytochroomevenwicht, getalsmatig uitgedrukt als PSS-waarde, is de sleutelfactor voor de spectrale effecten op een snellere groei, of omgekeerd een compactere plantvorm.
- De oorzaak van de spectrale effecten op snellere groei is niet een verhoogde fotosynthese per oppervlakte blad, maar een plantvorm die efficiënter is in het onderscheppen van licht. Daarom is vooral bij gewassen met een open structuur voordeel te halen uit dit type belichtingsstrategie.
- De grote verschillen in plantvorm van het uitgangsmateriaal leidden niet tot opvallende verschillen in uitgroei en productie bij de komkommerteler. Van de planten opgekweekt onder LED rood/blauw/verrood kon twee dagen eerder worden geoogst. Versnelde opkweek biedt opkweekbedrijven dus voordelen, terwijl de gevolgen voor de vruchtgroentekweker neutraal lijken.
- De verrode LED's hebben een redelijk hoge efficiëntie: 1.4  $\mu\text{mol}$  lichtoutput per Joule energie-input. Dat is 75% ten opzichte van het meest efficiënte gemeten LED-type (dieprood, 660 nm).
- De afname van de efficiëntie van de LED's bij stijging van de koelwatertemperatuur was afhankelijk van het type LED: 1%, 2.5% en 4% per 10°C voor respectievelijk dieprood (660 nm), verrood (730 nm) en rood (630 nm). Hoe kleiner de temperatuurgevoeligheid, hoe eenvoudiger de toepassing van watergekoelde LED-systemen.
- Toepassing van LED-belichting op basis van rood, blauw en verrood in de opkweek is op korte termijn niet haalbaar vanwege de relatief grote hoeveelheid benodigde verrode LED's, waarmee forse investeringen en een aanzienlijk elektriciteitsverbruik gepaard gaan.
- Toepassing van verrood LED-licht in combinatie met de bestaande SON-T installatie in de opkweek lijkt op korte termijn wel haalbaar. De onderzoekers gaan uit van slechts een beperkt aantal benodigde verrode LED's. Als een 15-25% kortere belichte opkweektijd bereikt wordt, dan wegen de besparingen aan verwarming en branduren van de belichting ruimschoots op tegen het iets hogere elektriciteitsverbruik per branduur.
- Onderzoek moet aantonen of een combinatie van SON-T en verrood licht werkelijk leidt tot de verwachte versnelde uitgroei van het gewas en de daaraan gekoppelde energiebesparing.

# Referenties

- Ahmad M, Grancher N, Heil M, Black RC, Giovani B, Galland P, Lardemer D. 2002. Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, **129**: 774-785.
- De Ruijter JAF. 2010. Protocol voor het meten van tuinbouwbelichtingsystemen met LED's. Arnhem: KEMA Nederland BV, 30.
- Dueck TA, Pot S. 2010. Lichtmeetprotocol : lichtmetingen in onderzoekskassen met LED en SON-T belichting. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw/Plant Dynamics and Wageningen Universiteit, 14.
- Hogewoning SW. 2010. On the photosynthetic and developmental responses of leaves to the spectral composition of light, PhD thesis, Wageningen University, the Netherlands.
- Hogewoning SW, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Harbinson J. 2010. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *J. Exp. Bot.* 61: 1267-1276.
- Hogewoning SW, Wientjes E, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Croce R, Harbinson J. 2012a. Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell*, 24: 1921-1935.
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Meinen E, van Ieperen W. 2012b. Finding the optimal growth-light spectrum for greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, publicatie in oktober 2012.
- Pot CS, Trouwborst G. 2011. LED-tussenbelichting bij Roos: Praktijkonderzoek bij Van den Berg Roses. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 24.
- Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning SW, Harbinson J, van Ieperen W. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum*, 138: 289-300.
- Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM. 2010a. Haalbaarheid van LED-tussenbelichting bij roos: Praktijkonderzoek op Marjoland. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 35.
- Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM. 2010b. Spectraal effect van LED tussenbelichting op scheutuitloop van roos in de zomer. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 16.
- Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM. 2012. Knopuitloop bij roos: effecten van stuurlicht en temperatuur. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 33.
- van Ieperen W, Heuvelink E. 2012. *Compacte planten door geïntegreerde groeiregulatie*. Leerstoelgroep Tuinbouwketens, Wageningen University, 36p.
- van Ieperen W, Hogewoning SW, Meinen E. 2012. *Groeilicht met Zonlichtlampen*. Wageningen: Leerstoelgroep Tuinbouwketens, Wageningen University, 30p.
- Whitelam G, Halliday K. 2007. *Light and plant development*, Oxford, Blackwell Publishing.



## Bijlage 1. Wortelgroei



*Beworteling komkommer opgegroeid onder 5 verschillende lichtspectra. Van boven naar beneden: SON-T, LED rood/blauw, LED rood/blauw/verrood, Zwavelplasma en ZON, 3 planten per behandeling (horizontaal). Foto's 27 oktober 2011, 9 dagen na start belichting.*

## Bijlage 2. Communicatie

Rondom deze proef is de volgende communicatie geweest:

1. Vier BCO's
2. Artikel LTO-nieuwsbrief (nummer 4, december 2011)
3. Artikel op website [www.energiek2020.nu](http://www.energiek2020.nu) (9 december 2011)
4. Presentaties op voorlichtingsbijeenkomsten:
  - a. Arenasessie groeilicht (17 januari 2012)
  - b. Bijeenkomst ondernemersplatform licht (26 januari 2012)
  - c. Bijeenkomst ondernemersplatform licht (25 april 2012)
  - d. Opkweekmiddag voedingstuinbouw opkweek vanuit Plantum (11 september 2012)
  - e. Wetenschappelijk congres (7th International Symposium on Light in Horticultural Systems, oktober 2012).
5. Artikel resultaten in Groenten en Fruit (week 4, 2012)
6. Artikel eindresultaten in Onder Glas (nummer 6, 2012)
7. Artikel (Engelstalig) in Acta Horticulturae (oktober 2012)