

Consultancy opdracht:

Onderzoek naar de fundamente van energiebesparing in de belichte teelt

Projectnummer 14764.04



Ing. S. Persoon (Inno-Agro)

Dr. ir. S.W. Hogewoning (Plant Lighting B.V.)

V04

Financiering consultancy opdracht



Inhoudsopgave

1	Aanvraag	
2	Vooraf	3
3	Achtergrond & doelstelling onderzoek	3
3.1	Aanleiding onderzoek.....	3
3.2	Voorgaand onderzoek	3
3.3	Tegenstelling LED en warmte ontwikkeling	4
3.4	Toepassing stuurlicht.....	5
3.5	Doelstelling.....	5
4	Theoretisch kader verrood licht	7
4.1	Inleiding	7
4.2	Achtergronden energiezuiniger assimilatielicht.....	7
4.3	Achtergronden stuurlicht	9
4.3.1	Algemene uitleg over stuurlicht	9
4.3.2	Beïnvloeding plantontwikkeling met stuurlicht overdag	10
4.3.3	Beïnvloeding plantontwikkeling met stuurlicht aan het begin van de nacht	11
5	Praktische aanbevelingen voor belichtingsonderzoek bij tomaat met verrood licht	12
5.1	Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht overdag.....	12
5.2	Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht aan het begin van de nacht.....	13
6	Effect van temperatuurverloop op efficiency LED	14
6.1	Inleiding	14
6.2	Onderzoeksmethode	14
6.3	Meetresultaten.....	15
6.4	Discussie	15
6.5	Conclusie	15
7	Bepaling energie efficiency lichtbronnen	16
7.1	Inleiding	16
7.2	Onderzoeksmethode	16
7.3	Resultaten.....	17
7.4	Discussie	17

1 Vooraf

Van oktober 2012 tot april 2013 is in de Demokwekerij te Honselersdijk onderzoek gedaan naar innovatieve manieren van belichting in de tomatenteelt. Dit onderzoek was het sluitstuk na een periode van 4 jaar onderzoek naar LED belichting. De onderzoeken zijn uitgevoerd onder leiding van telersvereniging TTO. Deze telersvereniging heeft zich ten doel gesteld om onderzoek en ontwikkeling beter aan te laten sluiten op vragen uit de praktijk. De ambities van de vereniging sluiten aan op de ambities van de Topsector Tuinbouw.

Het onderzoek uit voorgaande jaren gaf voldoende aanleiding om in het teeltseizoen 2012-2013 een afsluitend onderzoek plaats te laten vinden, waarin de meest potentievolle concepten voor energiebesparing getoetst zouden worden. Dit onderzoek heeft ook plaatsgevonden, echter het werd niet gefinancierd door het programma 'de Kas als energiebron'. Ruim 95% van de belichtende tomatenkwekers hebben het onderzoek gefinancierd, waarbij speciale dank wordt uitgesproken voor FresQ telers Zwinkels en van der Lans welke hier een grote inspanning voor hebben geleverd.

Het Productschap Tuinbouw heeft een consultancy opdracht verstrekt aan TTO om in kaart te brengen tot welke energiebesparing de concepten kunnen leiden. In deze rapportage wordt op dit aspect ingegaan. Echter er is meer onderzoek uitgevoerd welke meerwaarde toe kan voegen aan dit consultancy rapport. Voor informatie over dit onderzoek dient u contact op te nemen met TTO gezien het private karakter en bijbehorende vertrouwelijkheid.

2 Achtergrond & doelstelling onderzoek

2.1 Aanleiding onderzoek

De belichte tomatenteelt zorgt in Nederland voor afzetspreiding en een rendabele duurzame teelt. Het belichten kent een hoog rendement doordat bij eigen opwekking: warmte, elektriciteit en stralingswarmte van de lampen in de kas worden gebruikt. Netto is er echter warmte over. Het rendement van belichting zou met 30% verbeterd kunnen worden door efficiëntere lampen en een andere plantopbouw. Watergekoelde LED lampen in hybride kunnen op het moment van de rapportage voor een energieafname van 18% zorgen, maar het rendement kan worden vergroot door het direct hergebruik van warmte. Verder kan het rendement vergroot worden door nabelichting met verrood.

2.2 Voorgaand onderzoek

De opkomst van LED's als mogelijke belichtingsbron voor tuinbouwgewassen heeft de aanleiding gevormd voor een reeks onderzoeken. Een korte samenvatting van belangrijke stappen die gemaakt zijn:

- 2005-2008: Fotosynthese functioneert bij rood + een klein % blauw LED-licht (WUR).
- 2008-2010: Effecten van 20 verschillende golflengten op fotosynthese gemeten (WUR).
- 2008-2009: Het ontbreken van stralingswarmte bij LED-belichting geeft ongunstige effecten (TTO).
- 2009-2010: Rood/blauw LED-licht geeft ook bij voldoende warmte-inbreng een andere gewasontwikkeling (TTO).
- 2010-2011: Minimale warmte-inbreng voor LED-teelt bepaald (TTO).

- 2011-2012: Onderzoek toegevoegde waarde andere lichtkleuren.
 - Toevoeging van wit (breedband) licht aan het LED rood/blauw spectrum heeft *geen* toegevoegde waarde en kost wel meer energie.
 - Kunstmatig zonlicht geeft een mooi natuurlijk ogend gewas, maar *niet* meer productie dan LED rood/blauw.
 - Toevoeging verrood licht leidt tot een sterkere assimilatenverdeling richting de vruchten, snellere afrijping, en een groter drogestofgehalte en brix in de vrucht. De energie-inbreng voor het verrood was hoog.

De meeste onderzoeken van TTO bij Demokwekerij Westland hebben zich gedurende de periode tussen 2008 en 2012 gericht op de toepassing van 100% LED belichting in de belichte glasgroenteteelt. Uit het LED onderzoek in teeltseizoen 2008-2009 kwam duidelijk naar voren dat de ontwikkeling (bloeisnelheid, trosaanmaak, internodiën lengte) van een tomatengewas achterblijft ten opzichte van SONT belichting.

Oorzaak van de vertraagde ontwikkeling werd gezocht in het feit dat LED lampen geen straling geven aan het gewas, waardoor het gewas een koudere kop krijgt. In teeltseizoen 2009-2010 heeft TTO daarom onderzoek uitgevoerd naar alternatieven om voldoende warmte te geven aan het gewas. Er is in kaart gebracht of het mogelijk was om met convectiewarmte (buis) het gebrek aan stralingswarmte op te heffen. Dit bleek goed mogelijk en is terug te lezen in de project 13842 'LED invloed stralingswarmte en spectrum'. In teeltseizoen 2013-2014 wordt dit onderzoek herhaalt, echter gebruik makende van luchtgekoelde LED topbelichting in project 14961 '50% besparing elektra tomaat'.

2.3 Tegenstelling LED en warmte ontwikkeling

Een LED produceert net als een SONT lamp een forse hoeveelheid warmte. Bij een SONT lamp wordt circa 40% van de elektrische energie omgezet in licht en de overige hoeveelheid in zowel convectiewarmte (+/- 15%) als stralingswarmte (+/- 55%). Een LED lamp is op het gebied van *lichtefficiency* momenteel circa 15-20% efficiënter dan een SONT lamp. Echter er blijft een grote hoeveelheid convectiewarmte over (+/- 55%).

De warmte welke een LED afgeeft zal afgevoerd moeten worden om de efficiency te kunnen behalen in de specificaties en de levensduur van de LED acceptabel kunnen houden. Om de warmte af te voeren kan momenteel worden gekozen uit een tweetal vormen:

1. Watergekoeld LED
2. Luchtgekoelde LED

Indien een LED luchtgekoeld wordt zonder dat de lucht (geforceerd) in beweging wordt gebracht zal het belichtingsarmatuur een koellichaam nodig hebben met voldoende oppervlak. Momenteel vindt de koeling veelal plaats door dat de LED geplaatst is tegen een aluminium extrusie profiel met een groot genoeg oppervlak. *Echter* indien er gebruik gemaakt wordt van topbelichting op een extrusie profiel, dan neem het profiel relatief veel licht weg uit te kas. De meest moderne opstelling zorgt momenteel (dec 2013) nog altijd voor 5% lichtonderschepping. Het toepassen van een puntlichtbron (hoge concentratie LED bijeen) is met luchtgekoelde LED niet mogelijk bij hogere vermogens (>500 Watt) omdat er niet voldoende koelend oppervlak is. Een nadeel van luchtgekoelde LED is dat er niet de keuze mogelijkheid bestaat om de warmte buiten de kas af te voeren. In warmte perioden kan er daardoor een warmte overschot ontstaan.

Indien een LED watergekoeld wordt dan is er een kleiner oppervlak benodigd, echter tot op heden werd gekoeld met water welke bij aanvang gelijk is met de ruimte temperatuur en bij uitgang een temperatuur van circa 30 graden Celsius. Water van deze temperatuur is zonder inzet van een warmtepomp niet te gebruiken in de teelt. Een ander groot nadeel is dat alle warmte van de LED

momenteel afgevoerd wordt uit de kas, bewerkt wordt middels een warmtepomp en wederom in de kas ingebracht wordt. Dit is omslachtig: warmte afvoeren, centraal bewerken en weer terug brengen in de kas.

Voor zowel de luchtgekoelde als de watergekoelde variant is het van belang om weet te hebben van de afname van de efficiency van de lichtbron bij het toenemen van de koeltemperatuur..

2.4 Toepassing stuurlicht

In het onderzoeksjaar 2011-2012 is er door TTO een lichtkleuren onderzoek uitgevoerd. In dat jaar bleek dat het herstellen van de fytochroom balans door toevoeging van verrood licht tot meerproductie kan leiden. Dit werd veroorzaakt door:

- een sterkere assimilatenverdeling richting de vruchten (generatiever gewas)
- een snellere afrijping van de vruchten (minder graaddagen)
- een diepere doordringing van licht in het gewas (meer strekking)

Daarnaast waren het drogestofgehalte en de brix-waarde 10-20% hoger in de geogoste vruchten. Indien deze waarden omgezet zouden kunnen worden in productie, zou dit een extra verhoging betekenen.

De keerzijde van het herstellen van de fytochroom balans was dat het energieverbruik van het verrode licht ontoelaatbaar hoog was voor praktijktoepassing en dat de effecten te extreem waren. Een meer energie efficiënte toepassing is gewenst.

2.5 Doelstelling

Doelstelling: het aantonen van de energiebesparing van een hybride combinatie van LED en watergekoelde SON-T, alsmede het onderzoeken van de mogelijkheden van verrood licht en wijze van koeling.

Hiertoe worden de volgende zaken onderzocht:

1. Theoretisch kader van nabelichting met verrood
2. Aan de hand van literatuur onderzoek en de proefresultaten van 2012 wordt een aanbeveling gedaan voor een regime voor toepassing van verrood. Gevolgen van PSS waarden worden uiteen gezet en mogelijkheden op een rij.
3. Effect van temperatuurverloop op efficiency LED
4. Bepaling van de energie efficiency van verschillende lichtbronnen

Naar aanleiding van de doelstelling en de onderzoeksvragen kan een advies gegeven worden voor toepassing van LED belichting in de glastuinbouw.



Foto 1: Belichtingsonderzoek van vorig jaar (2011-2012).

3 Theoretisch kader verrood licht

3.1 Inleiding

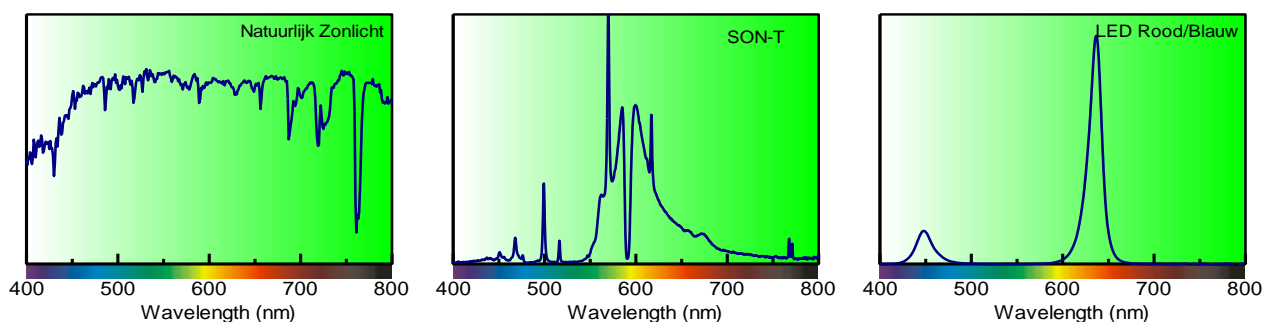
Licht is zowel een *energiebron* voor de groei en ontwikkeling van planten (assimilatielicht) als een *informatiebron* over de omgeving van planten (stuurlicht). In de belichte tomatenteelt is het assimilatie-aspect van licht van cruciaal belang: Een tomatengewas heeft nu eenmaal een aanzienlijke assimilatenproductie nodig om voldoende vruchten te produceren. In de winter is hiervoor onvoldoende daglicht en dus moet de fotosynthese voor een gedeelte aangedreven worden met lamplicht. Eén onderdeel van dit onderzoek speelt in op de vraag hoe assimilatielicht met zo min mogelijk elektra verbruik succesvol kan worden toegepast. De fysiologische achtergronden die daarbij van belang zijn worden kort toegelicht in paragraaf 4.3.

Het tweede onderdeel van dit onderzoek is gebaseerd op de sturende effecten van licht. Met betrekking tot een effectieve productie is het van belang dat het daglicht en assimilatielicht zo goed mogelijk wordt benut. Hieraan kan stuurlicht mogelijk een bijdrage leveren door o.a. de gewasvorm zo te beïnvloeden dat het licht gelijkmatiger over het gewas verdeeld wordt en door meer assimilaten richting de vruchten te laten stromen. Op die manier wordt indirect ook de effectiviteit vergroot waarmee *lichtenergie* voor groei wordt benut. De fysiologische achtergronden die daarbij van belang zijn worden uitgebreider toegelicht in paragraaf 4.3.

3.2 Achtergronden energiezuiniger assimilatielicht

Deze paragraaf gaat in op een aantal belangrijke achtergronden en aandachtspunten m.b.t. een combinatie van SON-T lampen en LED-lampen voor belichting van tomaat. Vanuit het oogpunt van energiebesparing is de winst te behalen door een lager elektriciteitsverbruik per micromol uitgestraald licht door de LED-lampen. Op basis van eerder onderzoek lijkt een aandeel van 40% SON-T licht (bij een belichting van $\pm 150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) redelijk om de kop van het gewas van voldoende stralingswarmte te voorzien. LED's produceren namelijk geen warmtestraling. Voldoende warmte bij de kop van het gewas is een vereiste om de afsplitsingsnelheid van de bladeren en trossen op peil te houden (Heuvelink en Marcelis, 1996). In voorgaande jaren is onder leiding van TTO uitgebreid onderzoek gedaan naar de warmtebehoefte van het gewas (zie Peekstok et al. 2010; Persoon et al. 2011).

Behalve de stralingswarmte heeft de keuze voor energetisch zuinigere LED's gevolgen voor de spectrale samenstelling van de belichting. De combinatie van SON-T en rode (90%) en blauwe (10%) LED's resulteert in een lichtspectrum dat anders is dan een daglicht-spectrum (zie figuur 1 links), maar relatief meer blauwe en rode golflengten bevat dan puur SON-T licht. SON-T licht bevat rond de 4.5% aan blauwe golflengten.

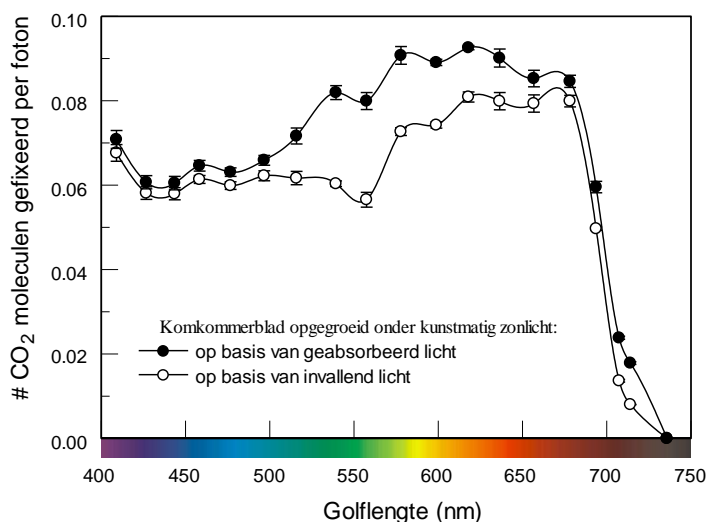


Figuur 1. Spectrale samenstelling van natuurlijk daglicht (links), SON-T licht (midden) en een combinatie van rode (90%) en blauwe (10%) LED's.

Uit onderzoek in klimaatkamers is bekend dat een aandeel blauw licht onmisbaar is voor een goed functionerende fotosynthese (Matsuda et al. 2004; Hogewoning et al. 2010). Het is niet bekend of een aandeel blauwe golflengten in het lichtspectrum van het lamplicht noodzakelijk is voor een kasteelt in de winter. Het gewas wordt immers al voorzien van blauwe golflengten door het daglicht. Omdat de lichtintensiteiten en het aantal uren daglicht per etmaal laag zijn in de winter, is het de vraag of het natuurlijke blauwe licht voldoende is. Om het risico van een productie-beperking door een tekort aan blauw licht uit te sluiten, is daarom tot op heden een ruim aandeel (10%) blauw LED-licht aan te raden. De vraag of en hoeveel blauw licht noodzakelijk is in een kasteelt, is dus nog altijd een gat in de bestaande kennis.

Wat betreft de overige verschillen tussen een daglichtspectrum en het lichtspectrum onder de combinatie SON-T en LED rood/blauw zijn geen opvallende effecten op productie te verwachten. In 2012-2013 is onderzoek gedaan naar de effecten van de spectrale samenstelling van belichting in de Demokwekerij. In dit onderzoek is zeer overtuigend aangetoond dat het toevoegen van breedband licht ('wit licht') aan LED-rood/blauw geen toegevoegde waarde geeft. Zelfs een kunstmatig zonlicht-spectrum, dat uit een combinatie van vele verschillende LED-typen was samengesteld, resulteerde niet in een betere productie dan de combinatie LED rood (90%)/blauw(10%). Dit ondanks dat het gewas een veel natuurlijker voorkomen had onder het kunstzonlicht. Er is een uitgebreide rapportage beschikbaar over het belichtingsonderzoek 2011-2012 in de Demokwekerij ¹.

In bovengenoemd onderzoek (zie ¹) gaf alleen de toevoeging van verrood licht aanleiding tot kansen voor een efficiëntere productie. Puur verrood licht in het golflengtegebied 700-750 nm draagt slechts in zeer beperkte mate direct bij aan de fotosynthese (zie Figuur 2). Echter, in combinatie met andere golflengten levert het verrode licht wel een bijdrage aan de fotosynthese. De fysiologische verklaring hiervoor is omschreven in het onderzoeksrapport¹. Belangrijker nog is het 'stuurlicht-effect' van het verrode licht.



Figuur 2. Effect van de golflengte (=kleur) van licht op de fotosynthesesnelheid van een komkommerblad. Weergegeven voor licht dat op een blad valt (open cirkels; 'actiespectrum') en licht dat al door het blad is geabsorbeerd, dus gecorrigeerd voor verliezen door reflectie en transmissie (gevulde cirkels; 'kwantumefficiëntie'). Data uit Hogewoning et al. 2012. *Plant Cell* 24 (5): 1921-1935.

In bovengenoemd onderzoek leidde de combinatie van rode, blauwe en verrode LED's tot een forse

¹ Rapportage belichtingsonderzoek in de Demokwekerij van 2011-2012: . S.W. Hogewoning, J. Sanders, T. Peekstok & S. Persoon, 2012. Lichtkleuren onderzoek: Wat is de ontbrekende schakel voor succesvolle productieverbodiging? 49 pp.

http://www.energiek2020.nu/fileadmin/user_upload/energiek2020/onderzoek/licht/docs/Lichtkleurenonderzoek-1.pdf

toename in internodiënlengthe. Hierdoor was de verticale lichtverdeling gelijkmatiger in dit gewas. Een gelijkmatigere verticale lichtverdeling is gunstig voor de gewasfotosynthese, hetgeen ook de gedachte is achter tussenbelichting (Trouwborst, 2010) en een diffuus kasdek (Dueck et al. 2012). Tevens was het aantal graaddagen korter en bevatte de vruchten 10-20% meer drogestof en brix. Eenzelfde patroon van toename in het percentage drogestof en brix werd ook gemeten bij de kunstmatig zonlicht behandeling, waarbij de lampen ook verrode golflengten uitstralen.

Eén en ander resulteerde in een grote voorsprong in versproductie tot en met de kortste dag onder LED rood/blauw/verrood: 25 % oftewel 0.9 kg meer productie t.o.v. het op één na best presterende proefvak (LED rood/blauw). Indien met teeltsturing het hogere percentage drooggewicht omgezet zou kunnen worden in meer versgewicht, dan zou de op zich al spectaculaire voorsprong nog groter geweest zijn. Na de kortste dag werd duidelijk dat het verrode licht een te generatief sturend effect had. Hierdoor werd de bladmassa steeds kleiner, hetgeen onvermijdelijk leidde tot een afname in productie. Uiteindelijk resulteerde dat in een gemiddelde productie aan het einde van de proef in week 19 van 2013.

De resultaten gaven voldoende aanleiding om de positieve effecten van het verrode licht verder te verkennen en een manier te vinden om de negatieve effecten te voorkomen. Hieronder volgt de fysiologische onderbouwing voor de toepassing van verrood stuurlicht.

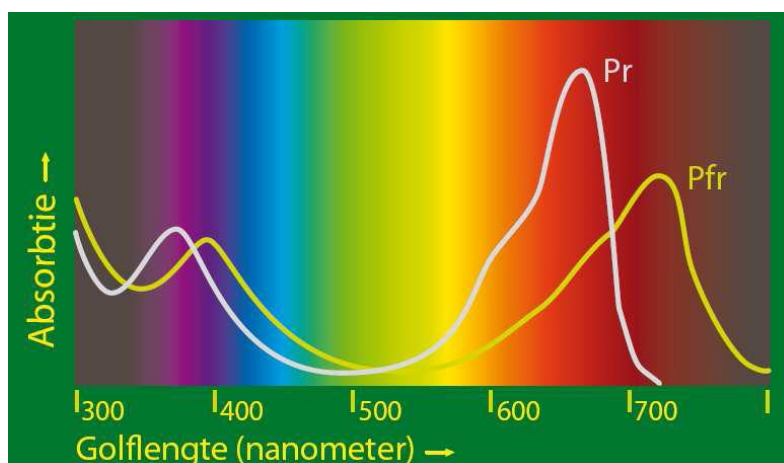
3.3 Achtergronden stuurlicht

3.3.1 **Algemene uitleg over 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, cytokinine, abscisinezuur) reguleert allerlei processen in de plant, zoals strekking, verdeling van assimilaten tussen verschillende plantorganen, bloei-inductie, afrijpingssnelheid en veroudering.

Er zijn drie groepen fotoreceptoren bekend: *cryptochromen*, *fototropinen* en *fytochromen*. De cryptochromen en fototropinen zijn beiden gevoelig voor golflengten van het UV tot het blauw/groene gedeelte van het kleurenspectrum (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 de groei van planten richting het licht ('fototropisme') en opening van de huidmondjes.

Naar de werking van fytochromen zijn is tot dusverre veruit het meeste onderzoek verricht. Er zijn velen aantal verschillende klassen fytochromen en het werkingsmechanisme is zeer complex. Daarom volgt hieronder slechts een beperkte uitleg over het mechanisme voor zover er een verband is met deze onderzoeksrichting. Fytochromen zijn gevoelig voor het volledige lichtspectrum (UV tot verrood), maar reageren vooral sterk op rode en verrode golflengten (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Rood licht ordt 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). De PSS heeft een grote invloed op de hormoon-huishouding van de plant. Die hormoonhuishouding is weer 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).



Figuur 3. 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). Plant Lighting BV beschikt over een model waarmee de PSS berekend kan worden voor ieder willekeurig lichtspectrum. De PSS waarde beïnvloedt de gewasontwikkeling sterk.

3.3.2 Beïnvloeding plantontwikkeling met stuurlicht overdag

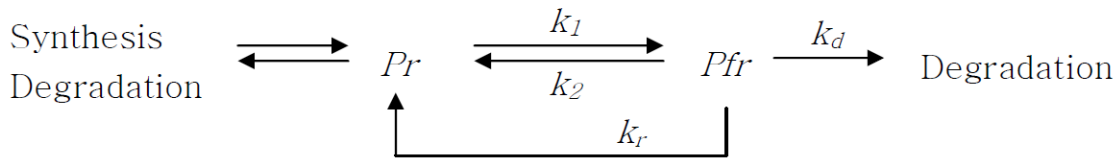
Een lichtspectrum met een groter aandeel verrode golflengten stuurt de PSS richting lagere waarden, dus relatief meer inactief fytochroom (Pr). Hierdoor wordt onder andere de remmende werking op de aanmaak van de hormonen auxine en gibbereline verlaagd, zodat o.a. strekking, generativiteit en apicale dominantie worden bevorderd. Een lichtspectrum met een klein aandeel verrood licht t.o.v. het aandeel rood licht stuurt juist op een hoge PSS-waarde en dus relatief meer actief fytochroom (Pfr). Actief fytochroom remt juist de aanmaak van de hormonen die o.a. strekking bevorderen en leidt tot meer vertakking (o.a. Keuskamp et al. 2010).

In het belichtingsonderzoek 2011-2012 in de Demokwekerij waren interessante effecten geconstateerd bij de combinatie LED rood/blauw/verrood. Echter, het energieverbruik van deze belichtingsmethode was zeer hoog. Dit komt doordat het aanbrengen van de juiste PSS-waarde bij een lichtbron gebaseerd op rode LED's (660 nm) zeer veel verrode LED's (730 nm) vergt. In Figuur 3 wordt duidelijk waarom: De rode LED's stralen een lichtspectrum uit dat precies op de gevoeligheidspiek valt van inactief fytochroom (Pr). Daarom is veel verrood (730 nm) licht nodig om Pfr voldoende licht te laten absorberen en zo de juiste balans te verkrijgen.

Vandaar het advies om in vervolgonderzoek dat gericht is op energiebesparing een SON-T spectrum te combineren met verrode LED's: SON-T straalt relatief veel licht uit rond 600 nm (geel/oranje; zie Figuur 1). In Figuur 3 is te zien dat Pr rond 600 nm veel minder sterk geprikkeld wordt dan rond 660 nm. Daarom zijn ook veel minder verrode LED's nodig om Pr en Pfr in balans te brengen in combinatie met SON-T dan in combinatie met rode LED's. Vanuit die gedachte zou het mogelijk moeten zijn om de positieve effecten van het verrode licht op de fytochrombalans te benutten, maar dan wel met fors minder energieverbruik dan in de proef in de Demokwekerij in 2011-2012 (Hogewoning et al. 2012).

3.3.3 *Beïnvloeding plantontwikkeling met stuurlicht aan het begin van de nacht*

Zoals hierboven omschreven wordt de fytochrombalans overdag in sterke mate bepaald door de spectrale samenstelling van het licht. In donker wordt het actieve fytochroom (Pfr) zowel omgezet in inactief fytochroom (Pr), als afgebroken. Een ander wordt inzichtelijk gemaakt in Figuur 4.



Figuur 4. Schema voor de dynamiek van de fytochromomzetting. Pr en Pfr geven de concentraties van beide vormen aan. k_1 en k_2 zijn de omzettingsconstanten (rate constants) en zijn afhankelijk van het lichtspectrum. k_r is de omzettingsconstante in het donker. In het donker wordt tevens Pfr afgebroken. Pr kan of bijgemaakt of afgebroken worden. De omzettingssnelheid in het licht is afhankelijk van de absorptie door Pr en Pfr en hoe effectief het geabsorbeerde licht wordt gebruikt voor de reactie (Bron: Bae en Choi, 2008).

Een korte puls met een relatief lage intensiteit verrood licht aan het begin van de nacht versnelt de afbraak van actief fytochroom (Pfr). Een intensiteit van minder dan een micromol kan al effectief zijn en kan resulteren in effecten vergelijkbaar met een hoge dosis verrood overdag (o.a. Fankhauser en Casal, 2004; Dubois et al., 2008). Een korte puls van een zeer lage dosis verrood biedt natuurlijk grote praktische voordelen ten opzichte van een hogere dosis overdag, omdat dit veel minder lampen en energieverbruik vergt. Echter, in de literatuur beschreven experimenten leverden niet altijd grote verschillen op en zijn mogelijk afhankelijk van het type gewas, de cultivar en de daglengte, waarbij de effecten het grootst lijken bij een kortere daglengte (Lund et al. 2008). De relatief korte nachten bij de belichte tomatenteelt lijken de effectiviteit van nabelichting met verrood in ieder geval niet ten goede te komen. Onderzoek naar belichting met verrood aan het begin van de nacht bij tomaat is aan te bevelen, omdat bij een gunstige werking praktijktoepassing zeer aantrekkelijk is. Het vergt immers minimale investeringen en het energieverbruik is verwaarloosbaar. Het is moeilijk om van te voren te kunnen inschatten in hoeverre nabelichting met verrood bij tomaat succesvol kan zijn.

4 Praktische aanbevelingen voor belichtingsonderzoek bij tomaat met verrood licht

Op basis van de aanbevelingen in het voorgaande hoofdstuk en de proefresultaten van het belichtingsonderzoek in 2011-2012, wordt hier een aanbeveling gedaan voor een regime voor toepassing van verrood in vervolgonderzoek. In het vorige hoofdstuk zijn twee richtingen voor toepassing van verrood licht onderbouwd op basis van de wetenschappelijke literatuur:

1. Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht overdag
2. Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht aan het begin van de nacht

4.1 Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht overdag

Deze strategie is alleen zinvol om toe te passen in combinatie met SON-T belichting, en niet in combinatie met hybride belichting (SON-T + LED). Zoals hierboven toegelicht, is voor een combinatie met hybride belichting een relatief grote hoeveelheid verrood licht nodig om de juiste PSS-waarde (fytochroom-balans) te bereiken. Immers, de spectrale samenstelling van hybride belichting heeft een dominante piek rond de 660 nm, vanwege het substantiële aandeel rode LED's (zie ook Figuur 1 en 3 in voorgaande hoofdstuk).

In het belichtingsonderzoek in de demokwekerij van 2011-2012 is bij behandeling met LED rood/ blauw/ verrood gestuurd op een PSS-waarde van 0.73. Hiertoe was een groot aandeel verrood licht nodig, met een hoog energieverbruik als gevolg. Om eenzelfde PSS-waarde te verkrijgen door SON-T met verrood te combineren is *slechts* 30% van die hoeveelheid verrood licht nodig. Een enorme besparing dus qua investering in verrood lampen, en energie benodigd om het verrood te laten branden.

Bovendien waren de verrood-effecten in het belichtingsonderzoek in de Demokwekerij van 2011-2012 duidelijk te extreem: Er werden teveel assimilaten richting de vruchten gestuurd ten koste van het blad. In het begin van de teelt leidde dit tot een spectaculaire verhoging in opbrengst, maar gedurende de loop van de teelt liep dat voordeel terug, vanwege een te klein geworden bladpakket.

Het advies luidt dus om in een vervolgproef naar een *hogere PSS-waarde* te streven. De ideale waarde is niet met zekerheid te voorspellen en daarom is het volgende advies enigszins arbitrair: In plaats van de PSS-waarde van 0.73 in het voorgaande onderzoek nu een PSS-waarde van 0.77 à 0.78. Dit getal ligt tussen de PSS-waarde bij puur SON-T licht (PSS=0.83-0.86, afhankelijk van het type SON-T lamp) en de waarde bij daglicht (PSS=0.71) in. Om van een PSS van 0.73 naar een PSS van 0.77 à 0.78 te gaan is in combinatie met SON-T licht slechts 53% tot 63% van de hoeveelheid verrood licht nodig. Vergeleken met de proef in het voorgaande jaar (verrood in combinatie met rood/blauwe LED's) dus 30% (zie alinea's hierboven) maal 53 % tot 63%, is 16% tot 19% verrood. Nog altijd komt dat neer op 20 tot 24 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verrood licht, als uitgegaan wordt van een combinatie met 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ SON-T licht.

Een proef moet uitwijzen of die 20 tot 24 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verrood licht voldoende meerwaarde biedt om de investering en het energieverbruik te kunnen verantwoorden. In ieder geval zal de meerwaarde van het verrood groter moeten zijn dan het toevoegen van een hoeveelheid SON-T licht met eenzelfde energieverbruik. In het geval van 20 tot 24 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verrood licht komt dat overeen met een energieverbruik van 26 tot 32 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ SON-T licht (basis berekening: efficiency verrood 1.4 $\mu\text{mol}/\text{J}$ en SON-T 1.85 $\mu\text{mol}/\text{J}$).

4.2 Beïnvloeding plantontwikkeling met verrood stuurlicht aan het begin van de nacht

Deze strategie is wel zinvol om toe te passen in combinatie met hybride belichting. Zoals hierboven toegelicht, is bij belichting aan het begin van de nacht slechts een lage dosis verrood gedurende korte tijd nodig. Omdat er bij verrood-belichting aan het begin van de nacht geen sprake is van spectrale menging met andere lichtbronnen, doet het er niet zoveel toe welk lichtspectrum overdag is gebruikt. Vandaar dat de hybride belichting, in tegenstelling tot toepassing van verrood overdag, niet verstorend zou moeten werken. Bij een hybride belichting is dit de enige mogelijk kansrijke strategie zonder een enorme hoeveelheid energie voor het verrode licht nodig te hebben.

De intensiteit en de duur van verrood-belichting aan het begin van de nacht zijn volgens eerder onderzoek aan de strekking tomatenonderstammen uitwisselbaar: Een langere belichtingsduur met een lage intensiteit had evenveel effect als een kortere duur met een hogere intensiteit (Chia en Kubota, 2010). Het ging dus om de totale dosis verrood licht. Dat is gunstig voor commerciële toepassing, omdat langer belichten met een lagere intensiteit aanzienlijk minder investeringen vergt dan wanneer een hogere lichtintensiteit verrood vereist is. Een dosis van 8 μmol per m^2 per dag bleek verzadigend te zijn. Eén uur belichten met een intensiteit van 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ staat gelijk aan een dosis van 3.6 μmol per m^2 per dag.

Bij een proef met verrood aan het begin van de nacht luidt het advies om een ruime dosis te kiezen. Verrood gedurende 1 uur met een intensiteit van 5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ zou zeker voldoende moeten zijn. Zoals in het vorige hoofdstuk opgemerkt werkt de korte nachtduur (6 tot 7 uur donker) in de belichte tomatenteelt de werking van deze strategie voor toepassing van verrood mogelijk tegen. Bij lange nachten is het effect van verrood-belichting aan het begin van de nacht namelijk groter. Een proef zal duidelijk maken of deze strategie van verrood-belichting zinvol is bij tomaat.

5 Effect van temperatuurverloop op efficiency LED

5.1 Inleiding

Op dit moment wordt LED belichting alleen in combinatie met SONT belichting toegepast omdat LED's weliswaar warmte genereren, maar deze warmte betreft geen infrarode stralingswarmte. Momenteel is de aanbeveling om in Tomaat ten minste 80-100umol belichting aan te bieden in de vorm van top belichting met SONT. Indien er met 100% LED wordt belicht dan is het gevolg hiervan een hogere benodigde buistemperatuur (Persoon et al. 2010). Recent onderzoek heeft dit nogmaals bevestigd, de buistemperatuur dient 30% hoger te zijn om de planttemperatuur op peil te houden (Dieleman et al. 2014).

Aangezien LED techniek zicht door blijft ontwikkelen en de lichtefficiency toeneemt, is het van belang om de geproduceerde warmte in het gewas te kunnen gebruiken. Voor zowel lucht als watergekoelde LED lampen is het daarom goed om te weten in welke mate de output van de lamp in $\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{sec}$ afneemt naarmate de temperatuur toeneemt. Immers voor watergekoelde lampen kan het interessant zijn om een hoge uitgangstemperatuur te hebben zodat de warmte eenvoudig 'hergebruikt' kan worden. Voor luchtgekoelde lampen geldt per definitie dat de temperatuur hoger is dan een watergekoelde lamp.

5.2 Onderzoeksmethode

In het onderzoek van TTO bij Demokwekerij Westland is er op twee verschillende wijzen onderzoek gedaan naar de invloed van temperatuur op de efficiency:

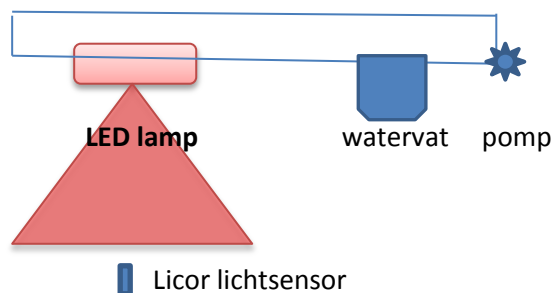
1. Middels een field test
2. Middels een proefopstelling

Field test

Ten tijde van het onderzoek was de uitdrukkelijke wens van kwekers en onderzoekers om de mogelijkheden te hebben om de uitgangstemperatuur van het koelwater op 40 graden Celsius te krijgen. Hiertoe is de stroomsnelheid van het koelwater dermate verlaagd dat het uitgangswater 40 graden werd. Vervolgens zijn er bij verschillende temperaturen metingen uitgevoerd. Echter deze meet methode bleek niet betrouwbaar.

Proefopstelling

Er is een proefopstelling gebouwd volgens onderstaande figuur. Er is een lamp opgehangen op een hoogte van 1m1 vanaf de grond. Deze lamp werd gekoeld door een gesloten koelsysteem waardoor de temperatuur van het koelwater in de tijd genomen verder opliep. Middels een Licor lichtmeter is de lichtoutput periodiek gemeten en middels een Voltcraft temperatuurmeter is de temperatuur bijgehouden.



Figuur 5. Proefopstelling

5.3 Meetresultaten

Delta T	Hoeveelheid licht ($\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{sec}$)	Terugloop ($\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{sec}$)	%
0,0	563		0,00%
2,0	561	2	0,36%
9,0	558	3	0,89%
16,0	556	2	1,24%
20,1	554	2	1,60%
28,5	549	5	2,49%
32,0	546	3	3,02%
35,0	545	1	3,20%
37,6	543	2	3,55%
39,4	542	1	3,73%

Tabel 1

% per 10 gr
0,95%

5.4 Discussie

De terugloop is per 10 graden Celsius bijna 1%. Het verdient dus de aanbeveling om bij het toepassen van watergekoelde LED's de uitgaande temperatuur circa 45 graden te laten worden. Op deze manier kan de warmte direct weer in de groeibuis (LT) gebruik worden. Uitgaande van een aanvoertemperatuur welke boven het condensatiepunt ligt (22 graden Celsius) is de maximale terugloop van de lampen dus 1,71%. Gemiddeld genomen is dit 0,86% over de gehele belichtingsinstallatie. Rekenvoorbeeld: Het gebruik van de restwarmte van LED's kost bij een installatie van 185 μmol in totaal 15,8 μmol aan licht. De watergekoelde armaturen kennen een lichtonderschepping in de kas van 0,6% per 100 μmol , gebaseerd op de afmetingen van 520 x 150 x 140 (lxbxh) en koelsslangen gemonteerd onder de tralie.

Een ander alternatief is het toepassen van passief luchtgekoelde armaturen. De lichtonderschepping van deze profielen bedragen momenteel (begin 2014) 2% per 100 μmol . Het voordeel van een dergelijke opstelling is dat de warmte zonder technische toepassingen in de kas blijft doordat de armaturen hun warmte afstaan aan de lucht middels convectie. Het nadeel is de lichtonderschepping van de armaturen.

Indien de temperatuur van LED's boven de +/- 70 graden is, zal de levensduur van de LED afnemen. Dit is echter afhankelijk van het type LED, de fabrikant en de gekozen lichtkleur. Een levensduur van tenminste 20.000 uur zou wenselijk zijn (8 jaar met 2.500 branduren).

5.5 Conclusie

De terugloop in licht van watergekoelde armaturen bedraagt 0,95% per 10 graden Celsius.

6 Bepaling energie efficiency lichtbronnen

6.1 Inleiding

Het aangaan van het private lichtonderzoek van TTO in Demokwekerij Westland in 2012-2013 was aansluitend op eerdere onderzoeken op kleine schaal in de periode 2009-2012. Al meerdere jaren werd gesproken over de vermeende betere efficiency van LED's echter tot op dat moment was de efficiency van LED nauwelijks beter te noemen dan die van SONT. Een belangrijke eis van het programma Kas als Energiebron is om in absolute zin energie te besparen. Daarnaast was de wens van de ondernemers van het private TTO onderzoek om onafhankelijk duidelijkheid te verkrijgen over de gebruikte lichtbron. Hoofdstuk 7 doet verslag van de lichtbron welke gebruikt is en hoe de efficiency van deze lichtbron zich verhoudt tot SONT.

6.2 Onderzoeksmethode

Conventioneel worden armaturen gemeten in een bol van Ulbrich (Figuur 6). Een nadeel van deze meetmethode bij LED is dat bij een dergelijke lichtbron het absorberend oppervlak relatief groot is.

De metingen aan de LED armatuur hebben daarom plaatsgevonden middels een geautomatiseerde meting a.d.h.v. een robotarm bij het bedrijf Olino. De wijze van meten is uitgebreid toegelicht op <http://bit.ly/1sLOybA>

Van SON-T lampen is al zeer veel informatie over de prestaties van bol en armatuur. Ook in relatie tot bijvoorbeeld vervuiling. Deze gegevens worden gebruikt als basis. Daarnaast is ter vergelijking eveneens een SON-T armatuur doorgemeten bij Onlino.

Een tweede onafhankelijke meting is uitgevoerd bij het Duitse meetinstituut DIAL.

Het LED armatuur was van het type Lemnis Oreon waarvan specificaties in bijlage 1 te vinden zijn. Een nieuw SON-T armatuur Type HSE NXT 1000W is ter beschikking gesteld door een toeleverancier. De bol heeft vooraf 120 uur 'ingebrand'.

Er is bewust voor gekozen om nieuwe armaturen met nieuwe LED's of bol te meten. De vervuiling is niet meegenomen omdat vervuiling geleidelijk optreedt. Meerdere metingen over meerdere jaren zijn dan nodig.



Figuur 6 : Bol van Ulbrich (binnenzijde)



Figuur 7 : robotarm met armatuur

6.3 Resultaten

In Tabel 2 zijn de meetresultaten weergegeven van de gemeten armaturen: Lemnis Oreon en de HST 1000W (SONT). In bijlage 2 en 3 zijn de meetrapporten terug te vinden.

Instituut	Olino	Olino	Dial
Armatuur	LEMNIS OREON NGL 600W	HST 1000W	HST 1000W
Lichtbron	LED 90% 660nm LED 10% 450nm	Philips HID-GVIII 1000 W/P GP-SON 400V	Philips HID-GVIII 1000 W/P GP-SON 400V
burning hours	100	120	122
mmol (PAR)	1371	1778	1807,7
mmol >700 nm	0	niet gemeten	258,1
watt	670	1017,7	1015
mmol/ watt PAR	2,05	1,75	1,78
mmol/watt TOT	nvt	nvt	2,04

6.4 Discussie

De efficiency van de armaturen komt overeen met de opgegeven waarde welke vooraf door Lemnis gegeven wordt. Uit oogpunt van betrouwbaarheid is het beter om meerdere armaturen te meten, echter fabrikanten hebben er weinig belang bij om lampen ter beschikking te stellen en aanschaffen van lampen liet het budget van het onderzoek niet toe. De efficiency welke uit de metingen bij Olino en Dial kwamen, waren niet conform de praktijk.

Inzake de SONT lamp is daarom eveneens aan fabrikanten gevraagd om een opgave te doen. Hieruit kwam het volgende naar voren:

Omschrijving			
Nieuwe Bol SON-T 1000W	2100	umol	
armatuur	1032	watt	
kabels kas	12	watt	
refelctor	0,92	transmissie	
systeem met kabels kas	1,85	umol/W	
systeem zonder kabels kas	1,87	umol/W	

Tabel 2 : meetresultaten

Daarnaast is door Inno-Agro bij 4 bedrijven in de praktijk gemeten, waarbij er sprake was van drie verschillende fabrikanten en een nieuwe installatie. De installatie had reeds 400-700 uur gedraaid. Hieruit kwamen de volgende waarden naar voren kwamen:

	Kwekerij 1	Kwekerij 2	Kwekerij 3	Kwekerij 4
umol op 1,57m	179,5	183	188,5	188

Tabel 3 : meetresultaten praktijkmetingen

De efficiency van de armaturen lag tussen de 1,78 en 1,88 umol per watt. Om voordelen niet teveel richting LED lampen te berekenen wordt in de vervolg berekeningen 1,85 umol/watt genomen voor een nieuwe lamp. De lamp welke gemeten is heeft 90% 660 nm LED's en 10% 450nm LED's. Uitgaande van een vergelijkbare hoeveelheid blauw licht is het beter om uit te gaan van 95% 660nm en 5% 450nm. Ten tijde van de rapportage is de LED lamp van 95-5% verbeterd naar 2,29 umol/watt (bijlage 4).

terugloop

Zowel LED armaturen als SONT armaturen zullen in de loop der tijd minder licht afgeven. De terugloop in efficiency werd bij SONT veroorzaakt door veroudering van de bol en door vervuiling van de reflector. De veroudering van de bol kan worden opgevangen door EVA (elektronisch voorgeschakelde apparatuur). De vervuiling van de reflector bedraagt 1% per 1000 branduur. De reflector is gemaakt van

geanodiseerd aluminium en het is niet bekend of het glas van een LED lamp in minder mate vervuult. Om deze reden gaan we in deze rapportage uit van dezelfde mate van vervuiling.

berekening

Wanneer er op een conservatieve manier gerekend wordt kan er uitgegaan worden van het volgende: SONT efficiency 1.85 umol per J en LED 2.29 umol = 24% betere efficiency.

Waar in berekeningen veelal geen rekening mee wordt gehouden is het feit dat een SONT lamp een licht, maar ook een warmte efficiency heeft. De stelregel is dat per 13,15 umol er 0,7 graad temperatuurverhoging plaatsvindt in de kas. Een tomatengewas heeft in veel perioden van het belichtingsseizoen baat van deze warmte. Om deze reden wordt veelal hybride belichting toegepast; onderzoek bij Demokwekerij Westland Peekstok T, Duyvesteijn R, Persoon S, Sanders J, de Jong, A. 2011 heeft aangetoond dat het minimale niveau aan stralingswarmte 80 umol SONT bedraagt.

Onderzoek bij WUR Glastuinbouw naar 100% luchtgekoelde LED resulteerde in een 10% hogere gasverbruik Dieleman A, 2014. (presentatie). Echter het resultaat is niet meegenomen in de berekening omdat ten tijde van deze verslaglegging het eindrapport nog niet gereed was.

			SON-T	LED	Hybride
Energieprijzen	Elektriciteitsprijs	[€/kWh]	€ 0,07	€ 0,07	€ 0,07
	Gasprijs	[€/m ³]	€ 0,27	€ 0,27	€ 0,27
	Verbrandingsenergie aardgas	[MJ/m ³]	31,65	31,65	31,65
Belichtingsinstallatie	Lichtniveau	[umol/s/m ²]	185	185	185
	Netto efficiency	[umol/J]	1,85	2,29	2,11
	Geïnstalleerd elektrisch vermogen	[W/m ²]	100	81	88
Licht	Branduren belichting	[hrs]	2.500	2.500	2.500
	Lichtstroom	[mol/yr]	1.665	1.665	1.665
Elektriciteitsverbruik	Elektriciteitsverbruik belichting	[kWh/m ² /yr]	250	202	219
Elektriciteitskosten		[€/yr]	€ 17,50	€ 14,14	€ 15,31
Onderhoud	Vermogen armatuur	[W]	1.032	1.032	1.032
	Investering armatuur	[€]	€ 200,00	€ 800,00	€ 560,00
	Investering lamp		€ 50,00	0 €	50,00
	Lampwissels	[pcs]	1,75		1,75
Kosten lampwissels		[€/yr]	€ 1,21	-	€ 0,48
Investering	Investering belichting	[€]	€ 19,38	€ 62,62	€ 47,49
	Afschrijvingstermijn	[yrs]	7	7	7
	Afschrijvingskosten	[€/yr]	€ 2,77	€ 8,95	€ 6,78
	Rente	[%]	5%	5%	5%
	Rentelasten	[€/yr]	€ 0,48	€ 1,57	€ 1,19
Subtotaal investeringskosten			€ 3,25	€ 10,51	€ 7,97
Totale kosten			€ 21,96	€ 24,65	€ 23,77
Break even points					
Kosten LED lamp in geval		€ 625	€ 21,96	€ 25,37	€ 25,45
Elektriciteitsprijs		€ 0,12	€ 39,58	€ 39,44	€ 39,56

Tabel 4 : rentabiliteitsberekening

6.5 Conclusie

Op het moment van de rapportage kan geconcludeerd worden dat voor toepassing in de tomatenteelt, bij de huidige prijzen van LED armaturen en stroomkosten LED belichting nog niet rendabel is.

6.6 Aanbeveling

Het verdient de aanbeveling om de ontwikkelingen op het gebied van efficiency van LED nauwgezet te volgen omdat de laatste 5 jaar de efficiency met 40% is toegenomen t.o.v. SONT. Voorts zal de restwarmte van LED beter (her)gebruikt moeten worden teneinde 100% LED toe te kunnen passen.

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.
- Chia PL, Kubota C. 2010. End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation. *Hortscience* 45, 1501-1506.
- Dubois PG, Olsefski GT, Flint-Garcia S, Setter TL, Hoekenga OA, Brutnell TP. 2010. Physiological and genetic characterization of end-of-day far-red light response in maize seedlings. *Plant Physiology*, 154: 173-186.
- Dueck TA, Janse J, Kempkes FLK, Li T, Elings A, Hemming S. 2012. Diffuus licht bij tomaat. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw.
- Fankhauser C, Casal JJ. 2004. Phenotypic characterization of a photomorphogenic mutant. *Plant Journal* 39: 747-760
- Heuvelink E, Marcelis LFM. 1996. Influence of assimilate supply on leaf formation in sweet pepper and tomato. *Journal of Horticultural Science* 71, 405-414
- Hogewoning, S.W. 2010. On the photosynthetic and developmental responses of leaves to the spectral composition of light. *Proefschrift*, Wageningen UR, Wageningen, Nederland.
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61: 3107-3117.
- Hogewoning SW, Wientjes E, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Croce R, Harbinson J. 2012. Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell*, 24: 1921-1935.
- Hogewoning SW, Sanders J, Peekstok T, Persoon S, 2012. Lichtkleuren onderzoek: Wat is de ontbrekende schakel voor succesvolle productieverhoging? 49 pp. TTO & Plant Lighting B.V.
- Keuskamp DH, Sasidharan R, Pierik R. 2010. Physiological regulation and functional significance of shade avoidance responses to neighbors. *Plant signaling & behavior*, 5: 655-662.
- Matsuda R, Ohashi-Kaneko K, Fujiwara K, Goto E, Kurata K. 2004. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant And Cell Physiology*, 45: 1870-1874.
- Peekstok T, Duyvesteijn R, Persoon S, Sanders J, de Jong, A. 2011. LED proeven TTO 2010-2011-Focus op energie. TTO.
- Persoon S, Peekstok T, Sanders J. 2010. Onderzoek naar invloed stralingswarmte en spectrale effecten LED belichting, TTO
- Pot CS, Trouwborst G, Schapendonk AHCM. 2010. LED-tussenbelichting in tomatenteelt: Praktijkonderzoek bij Dekker Glascultures. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 32.
- Trouwborst G. 2011. On the photosynthetic responses of crops to intracanopy lighting with light emitting diodes. *Proefschrift*, Wageningen UR, Wageningen, Nederland.
- 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.
- Whitelam G, Halliday K. 2007. *Light and plant development*, Oxford, Blackwell Publishing.