



59762189-TOS/TCM 08-7006

Gewasbelichting met hoogfrequent pulserende LED's

deel 2: pulserend licht met gelijke lichtsom

Arnhem, 21 februari 2008

Auteurs:

J.A.F. de Ruijter

E. Meinen, T.A. Dueck

KEMA Technical & Operational Services
Wageningen UR Glastuinbouw

In opdracht van Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit

auteur : J.A.F. de Ruijter
B 44 blz.


1 bijl.

08-02-28
WOO

beoordeeld : P.G.M. Wichern
goedgekeurd : M.R. de Potter

08-02-22
08-02-24

Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door GasTerra B.V. en door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Onderzoeksprogramma Energie (PT-projectnummer 12396).



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens KEMA Nederland B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, toekomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

| | blz. |
|---|------|
| SAMENVATTING | 4 |
| 1 Inleiding | 6 |
| 1.1 Achtergrond | 6 |
| 1.2 Doelstelling en aanpak | 9 |
| 1.3 Leeswijzer | 10 |
| 2 Ontwikkeling (pulserende) LED-lampen | 11 |
| 2.1 Ontwerpaspecten..... | 13 |
| 3 Plantexperiment met pulserende LED's | 22 |
| 3.1 Opzet van het experiment..... | 22 |
| 3.2 Materiaal en Methoden | 22 |
| 3.3 Resultaten..... | 25 |
| 3.3.1 Voorstudie: Frequentie en duty cycle | 25 |
| 3.3.2 Hoofdexperimenten: pulsering..... | 27 |
| 3.3.3 Discussie | 32 |
| 3.4 Verdere energetische analyse van plantexperimenten..... | 35 |
| 4 Conclusies en aanbevelingen..... | 37 |
| 4.1 Conclusies | 37 |
| 4.2 Aanbevelingen | 38 |
| Bijlage A Meetresultaten plantproeven | 41 |

SAMENVATTING

Assimilatiebelichting neemt een steeds belangrijker plaats in de Nederlandse glastuinbouw. Dit productiemiddel is echter een grootverbruiker van energie en de lichtuitstoot die met belichting gepaard kan gaan, is een belangrijk thema bij de maatschappelijke acceptatie van deze vorm van glastuinbouw. Uit het oogpunt van zowel energieverbruik, energiekosten als reductie van de lichthinder is het gewenst in de komende jaren assimilatiebelichting verder te verbeteren en beter af te stemmen op de plant, de energievoorziening van de kas en de omgeving. Omdat ten aanzien van de momenteel gangbare hogedruk natriumlampen in de toekomst nog slechts marginale verbeteringen worden verwacht, dient te worden gezocht naar lichttechnologie met doorbraakpotentieel. LED's (light emitting diodes) lijken dit potentieel te hebben.

LED's hebben de afgelopen jaren een sterke groei in het omzettingsrendement laten zien en ook in de lichtoutput per LED, terwijl de kosten per eenheid licht drastisch zijn gedaald. Desalniettemin dient de (autonome) ontwikkeling nog een aantal jaren door te gaan, voordat een omzettingsrendement op systeemniveau ($\mu\text{mol}_{\text{PAR}}/\text{s}/W_e$) gelijk aan dat van HD-natriumlampen wordt bereikt en een kostenniveau dat concurrerend is met bestaande assimilatiebelichting. De introductie van LED's kan mogelijk worden versneld door de LED's anders in te zetten dan bij de gebruikelijke belichting door gebruik te maken van een specifieke eigenschap van deze componenten. LED's kunnen als halfgeleidercomponent – in tegenstelling tot hogedruk natriumlampen snel worden in- en uitgeschakeld, waardoor (hoogfrequent) gepulst licht kan worden gecreëerd. Er zijn in de literatuur aanwijzingen gevonden, dat de fotosynthese bij hoog-frequent gepulst licht mogelijk efficiënter kan verlopen, waardoor energiebesparing kan worden gerealiseerd. Een eerste 'proof-of-principle' experiment uitgevoerd in het najaar van 2005 – waarbij planten in een klimaatcel werden belicht met continu (LED-)licht respectievelijk pulserend licht dat periodiek en hoogfrequent (met circa 2 kHz) werd in- en uitgeschakeld - leek deze aanwijzing te bevestigen. In het onderhavige project is een vervolg-experiment uitgevoerd om meer zekerheid te verkrijgen of daadwerkelijk het hoogfrequent pulseren van het licht verantwoordelijk is voor de gesignaleerde hogere netto fotosynthese en groei per eenheid elektrische energie.

In dit vervolgexperiment is sla in twee experimenten (van elk 3 weken) belicht met continu respectievelijk pulserend licht (frequentie 10 kHz), waarbij het laatste een duty-cycle had van 40%¹ maar toch qua lichtsom even intensief was als het continu licht. Dit betekent dat de momentane aan-intensiteit van het pulserend licht 2,5 x zo groot was als die van de continue

belichting. Bij de oogst bleek in beide experimenten, dat zowel het versgewicht als het drooggewicht van de planten niet significant van elkaar verschilden. Verder zijn fotosynthesemetingen uitgevoerd tijdens elk van de experimenten op een tweetal dagen aan steeds 8 planten per opstelling. Ook de fotosynthese bij beide behandelingen bleek niet significant te verschillen.

Voordat de groeiexperimenten zijn uitgevoerd is ter oriëntatie met behulp van fotosynthesemetingen aan sla respectievelijk zwarte nachtschade nog onderzocht of de duty-cycle respectievelijk de frequentie een belangrijke invloedsfactor was. Dit bleek in het onderzochte frequentiegebied van 100 Hz tot 100 kHz en duty-cyclegebied van 30 tot 100% niet het geval te zijn.

Het elektriciteitsverbruik bleek bij afnemende duty-cycle (en gelijke lichtsom) significant toe te nemen. Dit gold vooral voor de rode LEDs. Netto per verbruikte hoeveelheid elektrische energie, lag de fotosynthese en het vers- en drooggewicht bij de pulserende belichting daardoor lager dan bij continue belichting.

De resultaten van de plantproeven suggereren dat bij pulserend licht niet de momentane belichtingssterkte bepalend is voor de (momentane) fotosynthese - en daarmee samenhangend de gemiddelde fotosynthese en groei - maar de lichtsom per tijdseenheid, ongeacht de frequentie of duty-cycle van de pulsen.

Resumerend kan worden gesteld, dat uit het oogpunt van groei het aanbieden van pulserend licht aan een gewas met een gelijke lichtsom als bij continu licht energetisch (en financieel) geen zin heeft.

Pulseren met gelijke aan-intensiteit als bij continue belichting, kan wel zinvol zijn. Hierbij wordt het rendement van het armatuur iets beter en neemt de fotosynthese en groei per eenheid toegevoerd licht juist toe. (Dit bleek uit het eerste experiment [3]). Met de resultaten van de nieuwe experimenten wordt de effectievere fotosynthese bij het pulseren in het eerste experiment niet meer toegeschreven aan het pulseren zelf maar (vooral) aan het dimeffect dat hier op treedt, waardoor de lichtsom daalt en de fotosynthese op een efficiënter stuk van de lichtresponscurve terecht komt. (Maar de absolute groei per tijdseenheid is hierbij door de geringere lichtsom toch lager dan bij continue belichting.)

¹ Dit betekent dat de lamp 40% van de tijd aan staat en 60% van de tijd uit.

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Assimilatiebelichting in de glastuinbouw gaat gepaard met een hoog energieverbruik. Anno 2007 is meer dan 1/5 van het Nederlandse glasareaal belicht. Conventionele assimilatiebelichting verbruikt in het algemeen een forse hoeveelheid elektriciteit (25-125 W/m², bij belichtingsniveaus tussen circa 3.000 en 15.000 lux; op jaarbasis bij 3500 belichtingsuren betekent dit een elektriciteitsverbruik van circa 88 à 438 kWh/m² per jaar). Behalve een forse hoeveelheid primaire energie om de benodigde elektriciteit op te wekken, betekent het energieverbruik ook een forse kostenpost voor de tuinder (4,4 à 22 EUR/m² per jaar, uitgaande van een gemiddelde elektriciteitsprijs van 5 EURct/kWh). De glastuinbouwsector streeft naar energieneutrale bedrijven vanaf 2020. Bij belichte bedrijven betekent dat onder meer dat de belichting efficiënter moet worden [1].

Zowel uit energetisch als financieel oogpunt is het derhalve gewenst het energieverbruik van assimilatiebelichting zoveel mogelijk te beperken, uiteraard met behoud van de extra, aan belichting toe te schrijven gewasproductie. Omdat hoge-druk natriumlampen qua efficiëntie nagenoeg zijn uitontwikkeld (er worden door de fabrikanten nog slechts marginale verbeteringen verwacht [2]) wordt er gezocht naar alternatieve lichtbronnen die de hogedruk natriumbelichting qua efficiëntie voorbij kunnen streven.

In de in 2004 door KEMA uitgevoerde studie “Verkenning van het perspectief van LED’s voor gewasbelichting in de glastuinbouw” [2] is onderbouwd dat LED’s mogelijk die alternatieve lichtbron kunnen vormen. Als de historische ontwikkeling in de efficiëntiegroei van LED’s zich in de komende jaren doorzet dan zullen LED-belichtingssystemen naar verwachting ergens tussen 2008 en 2012 energie-efficiënter worden dan hogedruk natrium systemen.



Figuur 1.1
Voorbeeld van
hoogvermogen LED

Behalve het hogere omzettingsrendement op termijn hebben LED’s een aantal andere specifieke potentiële voordelen, waardoor LED’s een goed perspectief hebben om de lichtbron voor de toekomst te worden:

- de lichtkleur kan optimaal worden afgestemd op de behoefte van de plant
- LED’s zenden koud licht uit. Dat wil zeggen dat er geen warmtestraling in het licht zit, waardoor in principe hogere belichtingsniveaus haalbaar worden zonder dat het te heet wordt in de kas

- de warmteproductie van LED's kan relatief gemakkelijk worden afgevangen, worden opgeslagen en op een ander moment nuttig worden gebruikt. Bij HD-natriumlampen wordt het bij wat hogere lichtniveaus al snel te warm in de kas. De overtollige warmte wordt vaak 'afgelucht' en gaat dan verloren

Achtergrond

Zodra zaden die ontkiemen licht ontvangen, worden de (oorspronkelijk witte) plantjes groen. Er worden pigmenten gevormd die essentieel zijn voor de absorptie van lichtenergie. Chlorofyl is het meest bekende en belangrijke pigment dat zonlicht absorbeert en daarmee energie kan gebruiken voor het fotosyntheseproces. Lichtenergie in de vorm van fotonen bereikt reactiecentra in het chlorofyl en wordt daar opgevangen (de reactiecentra worden door de fotonen 'aangeslagen'). De centra geven na enige tijd de energie weer door aan de chemische verbindingen (NADPH en ATP), die bij het fotosyntheseproces een belangrijke rol spelen. De 'aangeslagen' reactiecentra in het blad die een lichtfoton hebben opgenomen, kunnen pas weer een nieuw foton opnemen, zodra de energie is doorgegeven. Het idee is nu dat in de fase dat de reactiecentra geen foton kunnen opnemen er in principe ook geen fotonen hoeven te worden aangeboden (de lamp kan dus even uit). Dit principe biedt bij kunstmatige assimilatiebelichting perspectief voor een reductie van de energiebehoefte voor die belichting. Door de belichting snel achter elkaar aan en uit te schakelen wordt een pulserende belichting verkregen die mogelijk dezelfde mate van fotosynthese (en droge stof productie) 'geeft' als continue belichting, maar met een lager energieverbruik. Over de precieze werking van de reactiecentra en de eventuele synchronisatie ervan door lichtpulsen is nog onvoldoende bekend. Ook over de optimale frequentie(s) en aan/uitverhouding van de lichtflitsen is nog onvoldoende bekend, maar gezien de potentie van het principe en de resultaten van een eerdere KEMA-studie ten aanzien van LED's [2] is begin 2005 een 'proof of principle' studie gestart. Hierbij zijn in een klimaatkamer groeiproeven met continue en gepulste belichting uitgevoerd en onderling vergeleken. De resultaten van de eerste experimenten waren bemoedigend [3]. Daarom is een vervolgoexperiment uitgevoerd, om meer zekerheid te krijgen en enkele vraagtekens die nog resten weg te nemen.

- LED's hebben een zeer lange levensduur (circa 50.000 à 100.000 branduren) (bij HD-natrium is dat circa 12.000 uur)
- door de veel lagere temperatuur van het lichtgevende element is de kans op brandgevaar veel lager dan bij HD-natriumbelichting
- het lichtniveau van LED's is eenvoudig regelbaar met behoud van het hoge omzettingsrendement
- LED's zijn klein waardoor er goede mogelijkheden zijn deze componenten op slimme wijze in armaturen en mogelijk zelfs doeken te verwerken. Hierdoor worden ook bijzondere toepassingen mogelijk zoals bijvoorbeeld meerlagenteelt. Dit is één van de eerste commerciële toepassingen van LEDs in de glastuinbouw

- de kleur van LED's kan zodanig worden gekozen dat het licht zich in een golflengte gebied bevindt, waarvoor het menselijk oog niet erg gevoelig meer is, maar de plant wel (in het bijzonder het rode gebied en blauwe gebied van het spectrum). Dit kan een bijdrage leveren aan de oplossing van de lichthinder die vaak gepaard gaat met assimilatiebelichting.

Pulserende LED's

Behalve de autonome technische ontwikkeling van LED's bij fabrikanten, waar R&D-inspanningen leiden tot steeds efficiëntere LED's, is er een ander fenomeen waardoor LED's mogelijk al eerder dan hiervoor aangegeven interessant kunnen worden voor gewasbelichting. We doelen hier op de mogelijkheid om met de LED's (hoogfrequent) gepulst licht te genereren. Er zijn aanwijzingen in de literatuur [6] dat planten bij (hoogfrequent) gepulst licht efficiënter met het aangeboden licht omgaan dan met continu licht (zie kader). Omdat bij gepulst licht de lamp gedurende een deel van de cyclus uit staat, is er bij dit type licht minder energie nodig dan bij continu licht (uitgaande van dezelfde lichtintensiteit op momenten dat de LED's aan zijn). KEMA heeft in samenwerking met PRI eind 2005 een project uitgevoerd om aan na te gaan of het hierboven beschreven effect daadwerkelijk aanwezig is [3].

Uit de "duty-cycle experimenten" van het "proof-of-principle" project bleek, dat de fotosynthese zowel per Watt elektriciteitsverbruik als per eenheid PAR-licht het meest efficiënt verloopt bij korte pulsen (bij "duty-cycles" van 20 à 40%, zie figuur 3.3 in [3]). Hierbij wordt circa 50 à 80% energie bespaart ten opzichte van continue belichting. Er is bij deze duty-cycles in absolute zin over de tijd geïntegreerd echter zo weinig licht, dat de absolute fotosynthese wel lager ligt, dan bij continu licht. Om deze lagere fotosynthese te verhogen tot een "normaal" niveau (of mogelijk nog hoger), maar (hopelijk) met behoud van een substantiële besparing op het elektriciteitsverbruik ten opzichte van continue belichting, werd voorgesteld de intensiteit van de belichting bij korte duty-cycles te verhogen en het "proof-of-principle" experiment te herhalen voor de nieuwe condities.

Dit vergt een andere elektronische aansturing van de LED's (de bestaande systemen hebben een vaste "aan-intensiteit" bij een veranderende duty cycle). Randvoorwaarden hierbij zijn de maximaal toelaatbare stroom van de LED's en de maximale toegestane LED-temperatuur ("junction-temperatuur"). Uit kostenoverwegingen werd aanbevolen de aansturing te ontwikkelen voor en te implementeren op het LED-armatuur dat in het "proof-of-principle" project is gebruikt (zie Figuur 2.8 in hoofdstuk 3).

Deze gewijzigde aansturing kan ook worden gebruikt om het uitgevoerde pulslicht experiment te herhalen waarbij de pulshoogte van de pulserende belichting zodanig gekozen wordt dat het gemiddelde PAR²-lichtniveau gelijk wordt aan dat van de continue belichting. Hierdoor wordt bij beide belichtingen een gelijke lichtsom bereikt. Op deze wijze bevinden de PPF³'s van pulserende belichting en continue belichting zich op dezelfde plaats op de lichtresponscurve (wat betreft de gemiddelde lichtsom per seconde), waardoor een mogelijk "lichtresponscurve-verschil" wordt uitgesloten. Op deze wijze kan op eenduidige wijze het effect van pulseren worden vastgesteld en is derhalve een nuttige aanvulling op het eerder uitgevoerde "proof-of-principle". Overigens kan in plaats van 70% duty cycle zoals bij het eerste experiment ook een lagere duty cycle worden genomen, zolang de stroom door de pulserende LED's maar niet de maximale waarde overschrijdt. Het twee alinea's terug beschreven effect pleit er voor de duty-cycle zo laag te nemen, dat net de maximaal toelaatbare stroom door de LED's wordt bereikt.

1.2 Doelstelling en aanpak

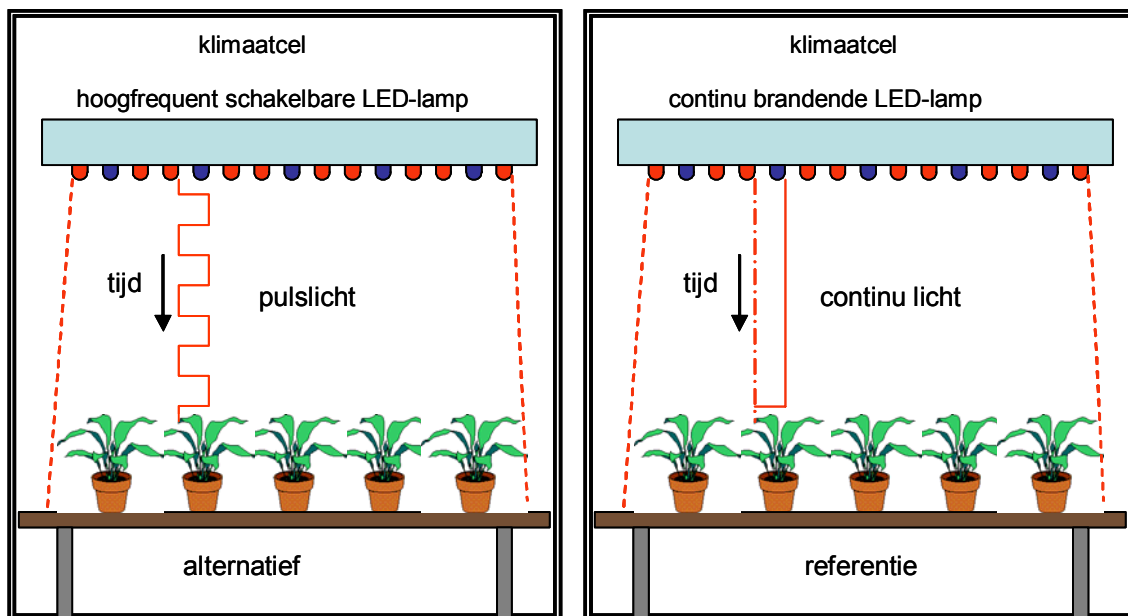
Doel van het onderhavige project is het aantonen van het principe dat bij gewasbelichting met hoogfrequent geschakelde (pulserende) belichting de fotosynthese en groei efficiënter verloopt en dat een significante besparing op het specifieke energieverbruik voor belichting - uitgedrukt in kWh_e per eenheid product - mogelijk is in vergelijking met continue belichting.

Hiertoe zijn twee belichtingsarmaturen met LED's ontwikkeld met een specifieke elektronische besturing, waarvan er één hoog-frequent gepulst licht kan uitzenden en de ander vergelijkbaar, maar alleen continu licht. Er is voor LED's gekozen omdat hoogfrequent pulseren niet met hogedruk natrium lampen kan, terwijl LED's hiervoor wel bij uitstek geschikt zijn. In een klimaatcel zijn parallel groeiproeven uitgevoerd met slapplanten, die gedurende 2 x 3 weken 14 uur per dag òf met pulserend licht òf met continu licht zijn belicht (zie figuur 1.2). Na afloop is van beide groepen planten het versgewicht en drooggewicht bepaald en onderling vergeleken. Tussentijds zijn ook fotosynthesemetingen verricht.

² PAR = photosynthetically active radiation, licht in het spectrale golflengtegebied van 400 – 700 nm
³ PPF³ = photosynthetic photon flux density = PAR-lichtintensiteit in $\mu\text{mol/s/m}^2$.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft beknopt het ontwerp van de LED-lampsystemen en de elektronische aansturing daarvan en geeft de belangrijkste eigenschappen. In hoofdstuk 3 wordt het plantexperiment beschreven en de keuzes van frequentie en aan/uit-verhouding toegelicht. Ook worden de resultaten van de experimenten gepresenteerd en besproken. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies en enkele aanbevelingen.



Figuur 1.2 Principe van het plantexperiment met pulslicht respectievelijk continu licht (in de praktijk zijn beide experimenten tegelijkertijd in één klimaatkamer uitgevoerd, onderling gescheiden door wit plastic)

2 ONTWIKKELING (PULSERENDE) LED-LAMPEN

De LED-lampen die in het vervollexperiment zijn gebruikt, zijn in de basis dezelfde als die toegepast zijn in het proof-of-principle experiment (gerapporteerd in hoofdstuk 2 in [3]). De verschillen zitten met name in de besturing, die ter gelegenheid van dit experiment opnieuw ontwikkeld werd.

Voor de continu brandende LEDs is er slechts een kleine wijziging in de (bestaande) besturing aangebracht. De wijziging betrof het aanbrengen van een spanningssturing waarmee de lichtintensiteit van het armatuur kon worden ingesteld tussen 0 en maximaal.

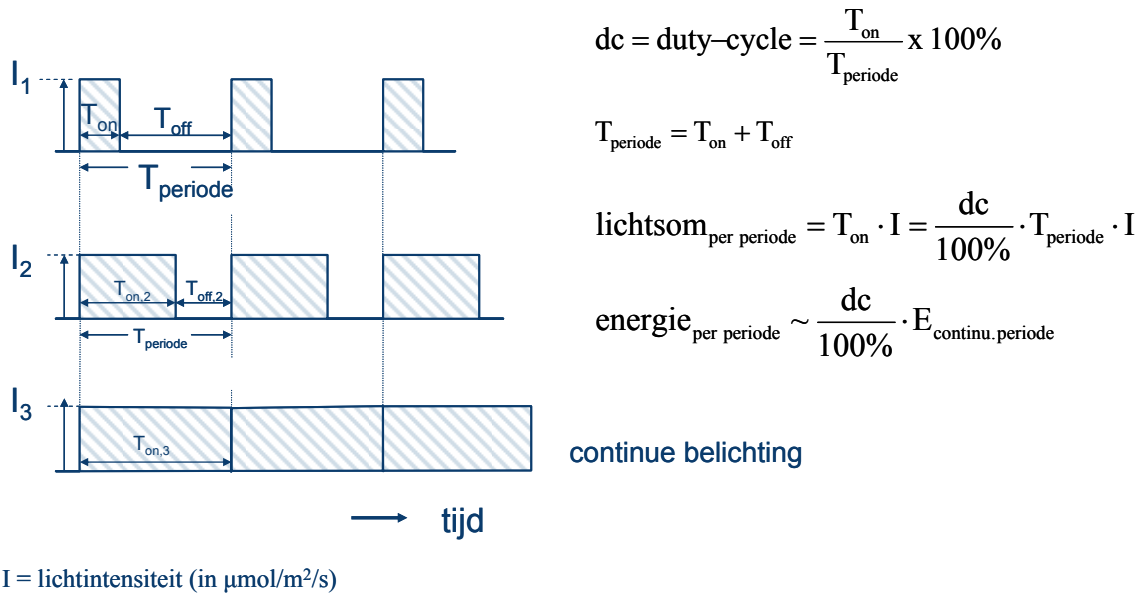
Voor het pulserend-licht armatuur is een compleet nieuwe besturing ontwikkeld waarmee in tegenstelling tot de oorspronkelijke besturing de intensiteit van de stroom- (en licht-)pulsen automatisch toeneemt naarmate de duty-cycle lager wordt. Het principe van de nieuwe besturing is schematisch aangegeven in figuur 2.2 (dat van de oude ter referentie in figuur 2.1).

Aan de LED-lampen voor het continu-licht/puls-licht experiment worden een aantal eisen gesteld om een succesvol experiment te kunnen uitvoeren. De eisen liggen op het optische, elektronische, thermische of mechanische vlak.

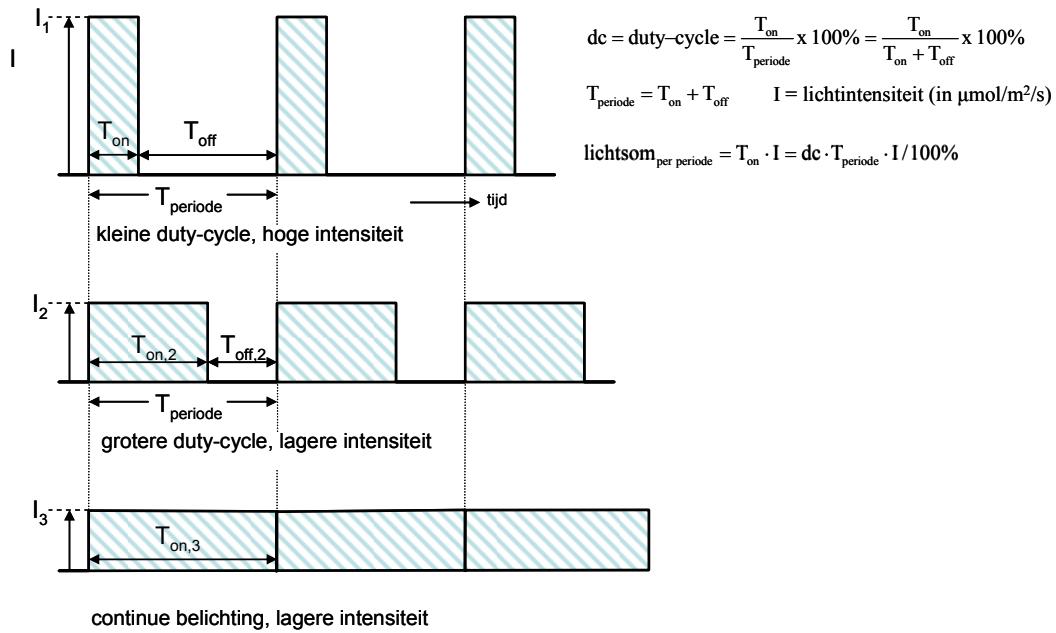
Ontwerpeisen:

1. het lichtniveau moet zo hoog zijn, dat goede plantengroei mogelijk is zonder daglicht. Als streefniveau voor de continue lamp is $300 \mu\text{mol/s/m}^2$ gehanteerd⁴
2. het licht moet de belangrijkste kleuren bevatten voor plantengroei: ter stimulering van de fotosynthese wordt rood licht genomen (hoofdkleur). Dit licht heeft de laagste energie-inhoud per lichtdeeltje (foton) maar toch dezelfde effectiviteit bij de fotosynthese als andere fotonen in het PAR-gebied (400-700 nm) [4]. Daarnaast wordt circa 20% blauw licht toegevoegd, om er voor te zorgen dat er geen ongewenste strekkingsgroei optreedt [5]
3. de geschakelde LED-lamp ("pulslamp") moet zo mogelijk bedreven kunnen worden met frequenties tussen 10 Hz en 100 kHz en een instelbare duty-cycle tussen 10 en 100%. De duty-cycle is gedefinieerd als de verhouding van de aantijd en de totale periodetijd, zie figuur 2.1
4. de pulsvorm moet de rechthoek zo goed mogelijk benaderen
5. als de pulslamp continu licht uitzendt, moet dit hetzelfde lichtsom en lichtverdeling hebben als de continue lamp

⁴ Volgens de bestaande belichtingstheorie gaat het bij assimilatiebelichting met name om het aantal lichtdeeltjes per oppervlakte-eenheid en per eenheid tijd in het foto-actieve golflengtegebied tussen 400 en 700 nm (PAR-licht). Dit aantal wordt uitgedrukt in $\mu\text{mol/s/m}^2$.



Figuur 2.1 Principe van geschakelde belichting met vaste pulshoogte ($I_1=I_2=I_3$) en definitie van duty-cycle (proof-of-principle project)



Figuur 2.2 Principe van geschakelde belichting in de nieuwe uitvoering met variabele pulshoogte ($I_1 > I_2 > I_3$)

6. de LED-lampen moeten elk een oppervlak van circa 80 cm bij 80 cm egaal beschijnen, zodat circa 16 plantjes per opstelling kunnen worden gebruikt
7. de warmte die de LED's produceren moet op zodanige wijze worden afgevoerd, dat de bedrijfstemperatuur niet te hoog oploopt. Warmteafvoer is vooral voor de rode LED's van belang omdat het omzettingsrendement van die LED's nogal afhangt van de temperatuur [2]
8. de LED's dienen te worden verwerkt in een stevige armatuur dat kan worden opgehangen aan het plafond. Het armatuur moet nauwelijks doorbuiging vertonen opdat de lichtverdeling goed blijft.

2.1 Ontwerpaspecten

Optisch ontwerp

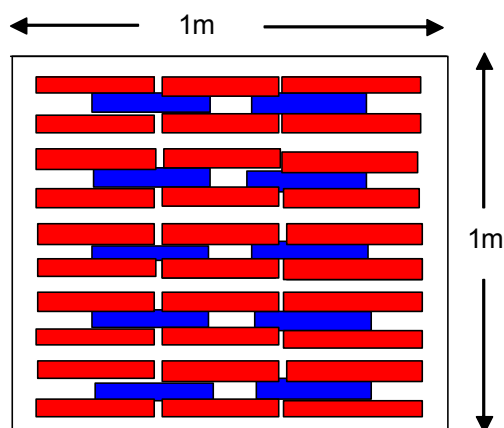
De LED-lampen worden opgebouwd met hoogvermogen LED's. De "grootste" (ten tijde van het ontwerp beschikbare) LED's hadden een elektrisch vermogen van circa 5 W. Omdat het rendement (en de levensduur) van deze LED's (en ook die van 3 W LED's) lager was dan die van 1 W LED's is er voor gekozen om uit te gaan van 1 W LED's. Een rode 1 W LED (van Lumileds, anno 2004/2005⁵) zendt bij een chiptemperatuur van 25 °C circa 1,14 µmol/s uit [2]. Bij een chiptemperatuur van 75 °C daalt dit tot circa 0,68 µmol/s. Voor een lichtstroom van 240 µmol/s zijn circa 353 rode LED's nodig. Dit rode licht wordt aangevuld met blauwe 1,2 W LED's, die per LED circa 0,83 µmol/s bij 25 °C uitzenden (en circa 0,80 µmol/s bij 75 °C). Voor 60 µmol/s blauw licht zijn circa 75 blauwe LED's nodig. Uit montagetechnisch oogpunt is gekozen voor LED-strips waarop 12 LED's zijn voorge monteerd (Luxeon Lines). De LED's hierop hebben een goede warmteafvoer naar de aluminium draagstrip. De LED's op de strip zijn voorzien van externe optiek en geven een gerichte lichtbundel met een openingshoek van 2x6° (dat wil zeggen op +6° en -6° gemeten vanaf de hoofdas is de lichtintensiteit tot 50% gereduceerd).

De LED-strips worden zodanig ten opzichte van elkaar geplaatst dat ze op circa 1,5 à 2 meter een zo goed mogelijk egale lichtverdeling geven. Er is gekozen voor 30 rode strips en 10 blauwe strips. De blauwe strips zijn tussen de rode strips gemonteerd op een stevige aluminium plaat. Er zijn 5 rijen, waarbij elke rij bestaat uit achtereenvolgens een rode, een blauwe en een rode (sub)rij. De configuratie is schematisch weergegeven in figuur 2.3.

⁵ Bij de meest moderne LEDs zouden deze waarden hoger zijn. Zoals eerder gesteld is om kostentechnische redenen uitgegaan van de armaturen uit een eerder project. Voor het aantonen van het principe van pulseren maakt dit verder ook niet uit.

Thermisch ontwerp

Zoals hierboven aangegeven wordt de warmte van de LED's via de aluminiumstrip waarop ze gemonteerd zijn, afgevoerd naar een stevige aluminium plaat (van 100 x 100 cm x 0,5 cm). Om de warmteoverdracht te bevorderen wordt een warmtegeleidende pasta tussen strips en plaat aangebracht. Op de achterzijde van de plaat (dit is in de opstelling de bovenzijde) zijn aluminium koelelementen gemonteerd. Hoofdzakelijk via deze elementen wordt de in de LED-chips geproduceerde en aan de aluminium plaat overdragen warmte (op passieve wijze) afgevoerd naar de omgevingslucht. De koelelementen zijn zodanig berekend dat bij een omgevingstemperatuur van 24 °C een LED-chip temperatuur lager dan 75 °C wordt gerealiseerd. De ontwerpwaarden zijn gegeven in Tabel 2.1.

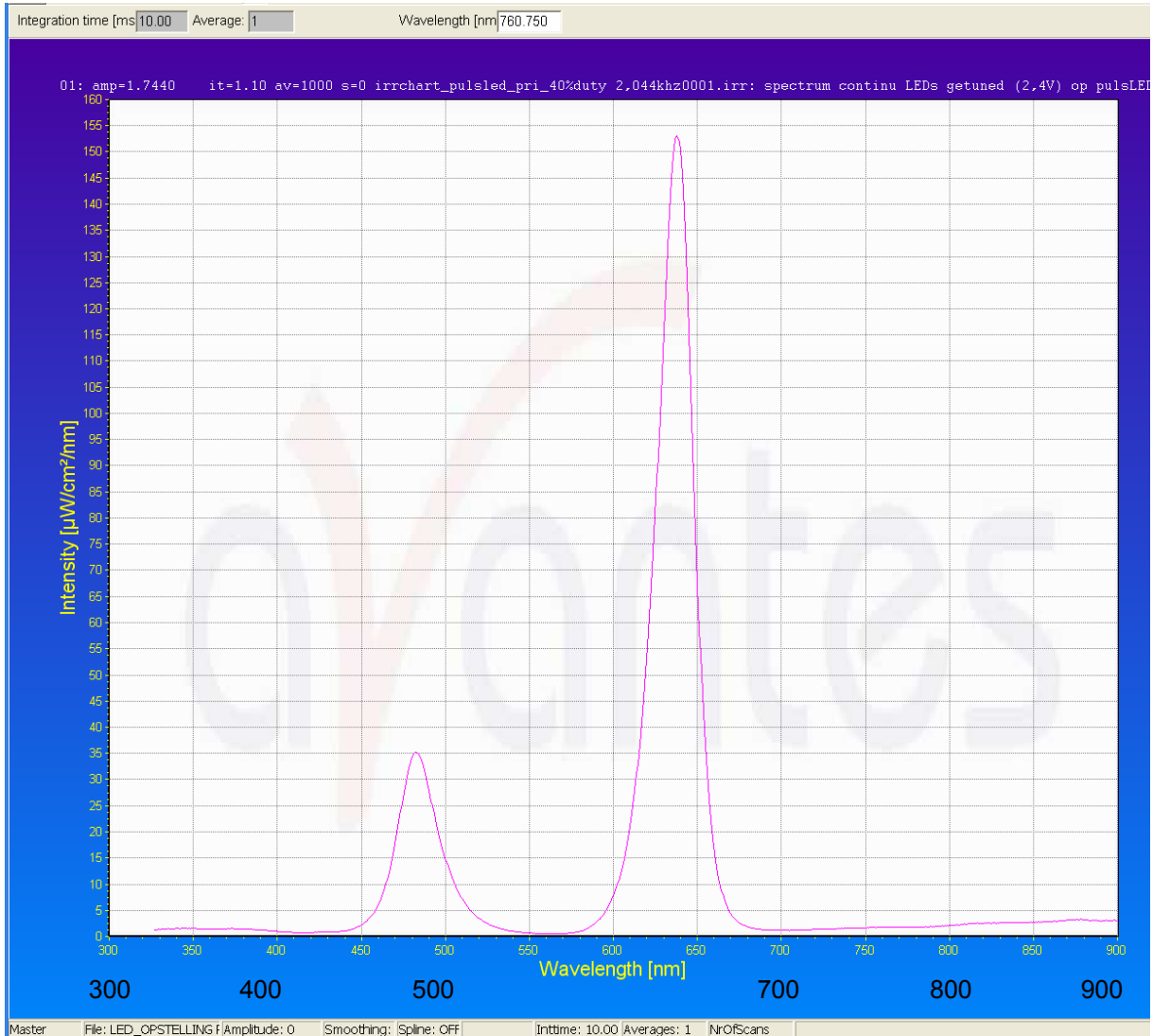


Figuur 2.3 Schematische weergave van de plaatsing van de rode en blauwe “12-LED-strips” op het LED-armatuur

Tabel 2.1 Verwachte lichtopbrengst van rode en blauwe LED-strips bij een chiptemperatuur van 25 °C respectievelijk bij de ontwerp-LED-chiptemperatuur (60 à 65 °C) die verwacht werd bij 24 °C omgevingstemperatuur ten tijde van ontwerp. De verhouding van rood en blauw licht is dan ongeveer 4:1

| kleur | # lineaire arrays | LED | | | | JunctieT °C | rel.output Tomgeving: | totaal μmol/s 24 | verdeling proc.μmol °C |
|--------|-------------------|---------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| | | lumen (25 °C) | per LED μmol/s (25 °C) | totaal μmol/s (25 °C) | verdeling proc.μmol | | | | |
| rood | 30 | 450 | 11.6 | 348.6 | 84.6% | 59.51 | 70.3% | 245.1 | 80.0% |
| blauw | 10 | 100 | 6.32 | 63.21 | 15.4% | 64.71 | 96.7% | 61.10 | 20.0% |
| Totaal | 40 | 14500 | | 411.8 | | | | 306.2 | |

Het spectrum van het uitgezonden licht van het LED-armatuur is gegeven in Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Spectrum van het licht van het ontworpen LED-armatuur. De figuur toont duidelijk de piek van het dominante rode licht (maximale waarde bij een golflengte van circa. 635 nm) en tevens de (veel kleinere) blauwe piek (maximale waarde bij circa. 480 nm)

Elektrisch en elektronisch ontwerp

De LED-strips bevatten 12 LED's die elektrisch in twee parallelle rijen van 6 zijn geschakeld. De nominale stroom door de strip is 700 mA, bij een spanning van circa 18 V voor de rode LED's en circa 21 V voor de blauwe LED's. Omdat de spanning enigszins kan variëren

tussen verschillende LED's van dezelfde kleur en ook over de LED's zelf bij variërende LED-temperatuur, worden de LED's bij voorkeur met een stroombronmodule aangestuurd (één per strip). Voor de geschakelde LED's moet het mogelijk zijn de stroom periodiek in en uit te schakelen. Omdat alle LED's tegelijkertijd in en uit moeten schakelen, worden de verschillende modules aangestuurd met een blokvolggenerator waarvan het signaal op de pulsingang van de stroombronmodules wordt aangesloten. Met de blokvolggenerator wordt de gewenste frequentie en duty-cycle ingesteld. De stroombronmodules en daarmee de LED's worden gevoed met een gelijkstroomvoeding van 24 V. Omwille van een zo hoog mogelijk rendement is gekozen voor een geschakelde voeding (met een rendement van circa 89%). De belangrijkste kenmerken van de LED-lampen zijn samengevat in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kenmerken van LED-lampen voor het vervollexperiment (bij continu bedrijf)

| | Waarde | eenheid | Opmerking |
|---|-----------------------|-----------------------|---|
| golflengte rode LED's | 620-650 | nm | |
| golflengte blauwe LED's | 480-485 460-465 | nm nm | 90% van de blauwe LED's 10% van de blauwe LED's |
| aantal LED's rood | 360 | | 30 x 12-LED-strips |
| aantal LED's blauw | 120 | | 10 x 12-LED-strips |
| PAR-lichtstroom (foton flux) | circa 385 | µmol/s | Tomg = 18 °C |
| opgenomen elektrisch vermogen | 567 | W _e | AC-vermogen voeding |
| fotonrendement LED-systeem | ca 0,68 | µmol/s/W _e | Tomg = 18 °C |
| gemiddelde LED-stroom | 318 rood 307 blauw | mA mA | per LED bij continu branden |
| Effectief beschenen oppervlak ("testoppervlak") | 0,84x 0,84 | m ² | Ontvangt circa 60% van het uitgezonden licht |
| Gemiddelde PPFD op testoppervlak | 325 | µmol/s/m ² | Bij continu branden. Piek 350 µmol/s/m ² in centrum |

Geschakelde LED-armatuur

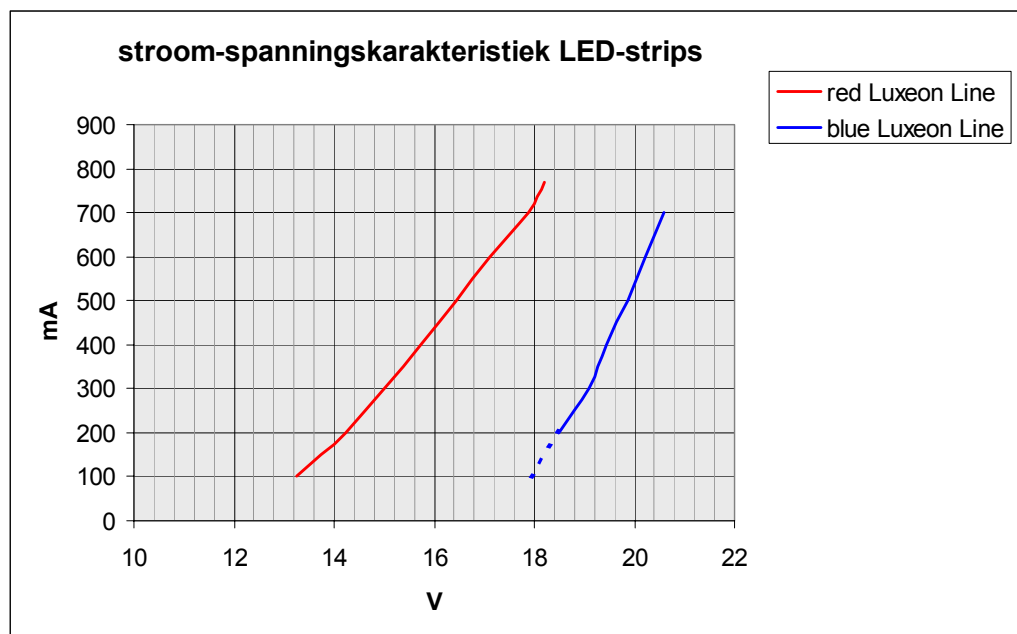
Voor het geschakelde LED-armatuur is een nieuwe elektronische besturing ontworpen die blokvolgige stroompulsen produceert. De frequentie is instelbaar van circa 10 Hz tot 100 kHz. Verder kan de duty-cycle worden ingesteld (tussen circa 10% en 100%). Bij kleiner wordende duty-cycle neemt de amplitude van de stroompulsen toe. De stroomamplitude is in principe omgekeerd evenredig met de duty-cycle ($I_{puls} = I_{100\%/dc}$). Bij een duty-cycle van 50% ($dc=0.5$) is de amplitude 2 x de stroomwaarde bij 100% duty-cycle. Voor afstemming van het gemiddelde lichtniveau op dat van de continue belichting, kan de $I_{100\%}$ -waarde worden

ingesteld. Overigens zijn er praktische beperkingen aan het werkgebied van de amplitude/duty-cycle relatie. Als de duty-cycle heel klein wordt (in de praktijk onder de circa 25%) dan zou voor een verviervoudiging van de stroomamplitude een veel hogere voedingsspanning dan de eerder genoemde 24 V nodig zijn om de LED-spanning zo hoog te krijgen dat ook daadwerkelijke deze LED-stroompulsen gaan lopen. In de praktijk is de voedingsspanning beperkt tot circa 29 V. Hiermee konden nog stroompulsen met een duty-cycle van circa 33 % worden gegenereerd, waarvoor de stroomamplitude/duty-cycle relatie nog bestond. (Bij kleinere duty-cycles werd de stroomsterkte dus kleiner dan op basis van de relatie werd verwacht).

Overigens werd in het praktijkexperiment het puls-LED armatuur zodanig afgeregeld met de $I_{100\%}$ -stroom dat bij een bepaalde gekozen frequentie en duty-cycle de met een PAR-lichtmeter gemeten (over 1 seconde gemiddelde) lichtintensiteiten van de continu brandende LED's en de puls-LED's gelijk waren. In deze situatie kregen de planten dus per seconde een zelfde hoeveelheid micromol licht aangeboden (in continu respectievelijk pulsvorm). Dit betekent dus een gelijke lichtsom.

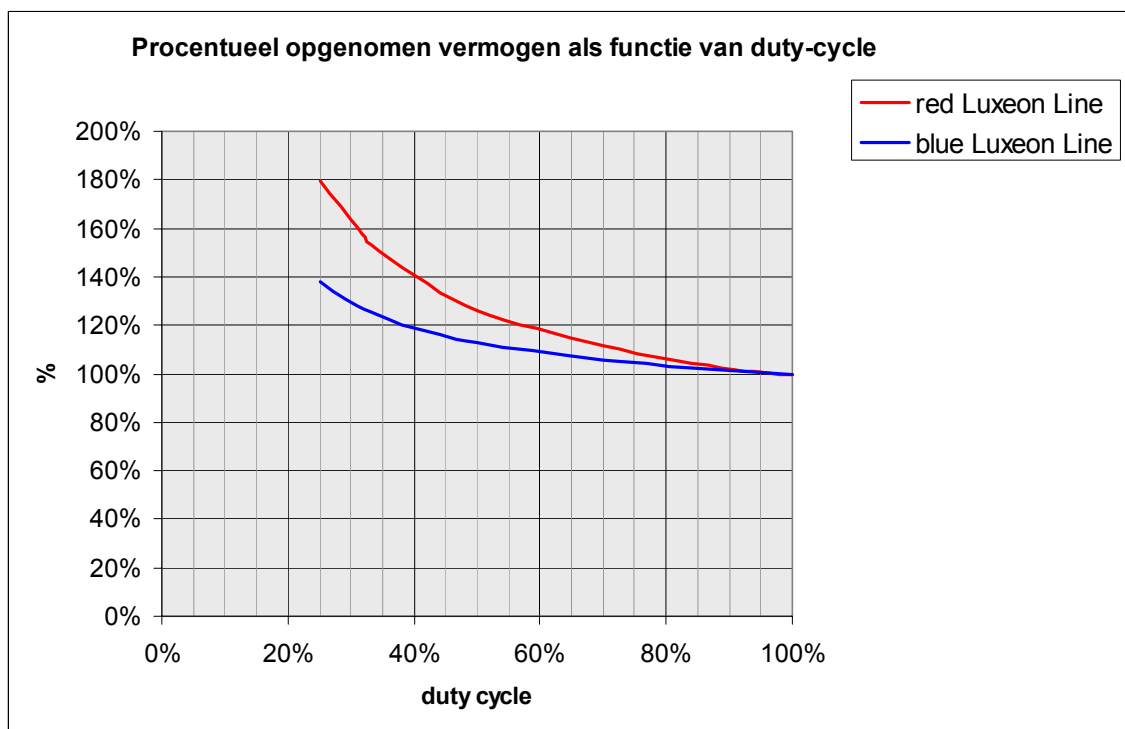
Elektrische eigenschappen

De stroom-spanningskarakteristieken van de gebruikte LED-strips is gegeven in Figuur 2.5 (voor het normale werkgebied).



Figuur 2.5 Stroom-spanningskarakteristiek van de rode respectievelijk blauwe “12-LED-strips” die in het LED-armatuur zijn gebruikt

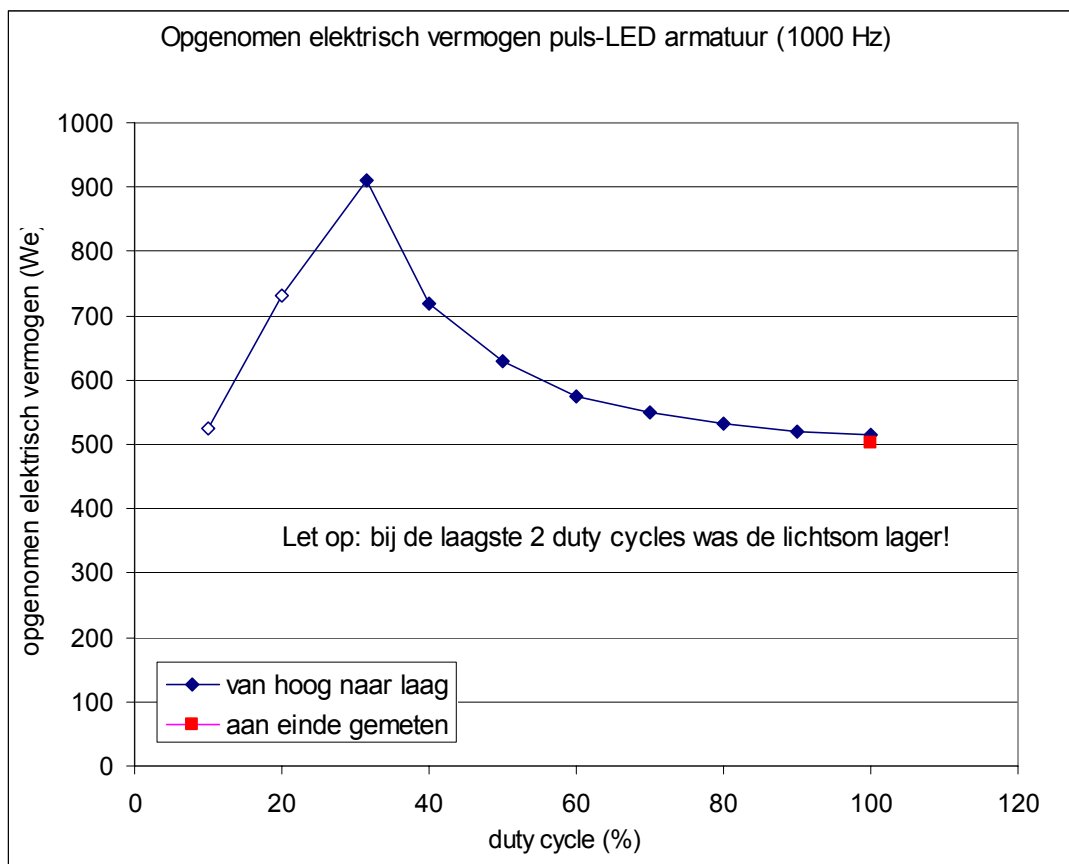
Bij pulserend bedrijf worden grotere momentane stromen gebruikt dan in de figuur aangegeven (bij 33% duty-cycle is de stroompuls bijvoorbeeld 2100 mA). In eerste instantie is aangenomen dat de karakteristieken van Figuur 2.5 bij hogere stromen lineair mogen worden geëxtrapoleerd. Onder deze aanname kan het gemiddelde procentuele energieverbruik van de pulsen bij verschillende duty-cycles berekend worden ten opzichte van de situatie met continue stroom. Het resultaat hiervan is aangegeven in Figuur 2.6. Uit deze figuur blijkt dat in het bijzonder bij rode LED's het opgenomen (tijdgemiddelde) vermogen vrij sterk toeneemt met afnemende duty-cycle. Dit heeft te maken met de ohmse verliezen in de LED, die kwadratisch toenemen met de stroomsterkte.



Figuur 2.6 Procentueel opgenomen elektrisch vermogen van de rode respectievelijke blauwe “12-LED-strips” als functie van de duty-cycle ten opzichte van continue aansturing. Vooral bij de rode LEDs neemt het procentuele energieverbruik flink toe met afnemende duty-cycle

Het werkelijk opgenomen elektrisch vermogen van het gebruikte armatuur (met voeding) bij verschillende duty-cycles is ook gemeten en uitgezet in een grafiek (zie Figuur 2.7). Uit de grafiek blijkt dat bij afnemende duty-cycle (en gelijke lichtsom) het (gemiddeld) opgenomen

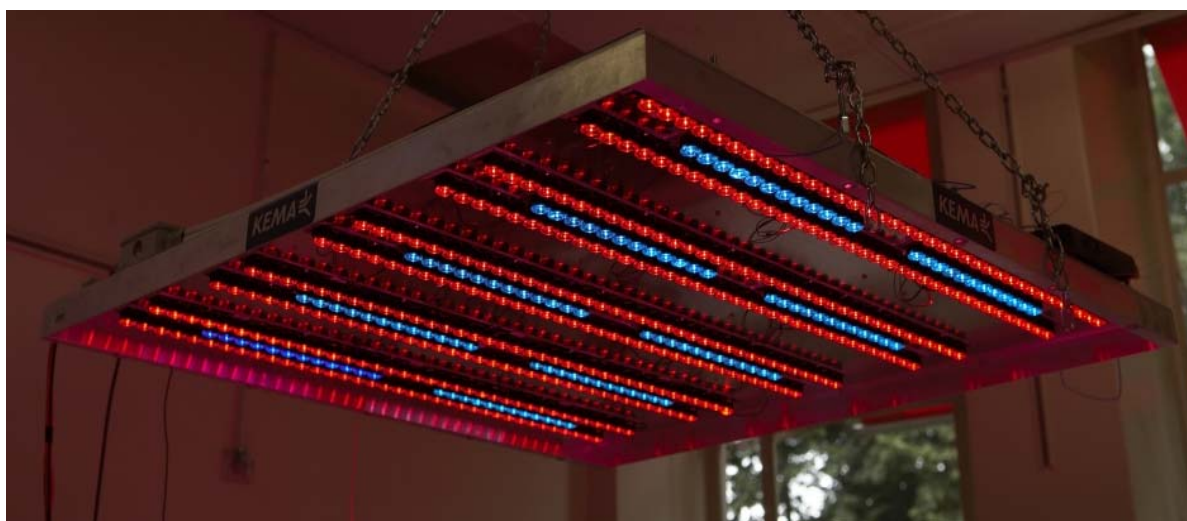
vermogen door de LED's en voeding inderdaad vrij sterk toeneemt (zie het gebied tussen circa 33% en 100% duty-cycle). Onder de 33% neemt het vermogen weer af, maar in deze situatie kan de beoogde stroompulsintensiteit niet meer worden gehaald en neemt de lichtsom dus af. De toename in het (over de tijd gemiddeld) opgenomen vermogen bij afname van de duty-cycle is redelijk in lijn met wat op basis van de stroomspanningskarakteristieken (Figuur 2.5) en daaruit afgeleid procentueel vermogen (Figuur 2.6) mocht worden verwacht.



Figuur 2.7 Opgenomen elektrisch vermogen van de voeding van de pulsLED-armatuur als functie van de duty-cycle ten opzichte van continue aansturing (duty-cycle = 100%). Het vermogen neemt sterk toe met afnemende duty-cycle. Hierbij moet opgemerkt worden, dat bij de 'laatste' twee punten (duty-cycle = 10% respectievelijk 20%) de stroompulsen niet meer in omgekeerde verhouding staan tot de duty-cycle en hier de lichtsom lager is

Opmerking

Voor en tijdens het plantexperiment (zie hoofdstuk 3) zijn lichthoeveelheidsmetingen uitgevoerd met een LICOR PAR-lichtmeter. Daarbij is verondersteld, dat de gebruikte lichtmeter (die in principe de lichthoeveelheid over 1 seconde bepaalt) ook in staat is de gemiddelde hoeveelheid gepulst licht correct te meten.



Figuur 2.8 LED-lamp voor vervolproef pulserend licht

Uitvoeringsvorm

Figuur 2.8 toont een foto van het ontwikkelde LED-armatuur. Hierbij wordt nog opgemerkt dat de uitvoering zoals ontwikkeld, bedoeld is voor gebruik in een klimaatkamer en nadrukkelijk niet geschikt is voor toepassing in een kas. Hiervoor zal een geheel ander ontwerp nodig zijn met veel minder lichtonderschepping van het van boven binnentredend licht⁶. Omdat er in een kas, in tegenstelling tot de klimaatcel, sprake is van aanvullende belichting op het daglicht, kan in de eerste situatie met een lagere verlichtingssterkte (of liever gezegd fotosynthetische fotonfluxdichtheid) worden volstaan. Voor een (PPFD-)equivalent van 10.000 lux SON-T (hoge-druk natrium) licht is circa 36% van de hoeveelheid LED's per oppervlakte-eenheid nodig als in het hierboven getoonde LED-belichtingssysteem voor de klimaatcel is toegepast. Verder kan bij gebruik van LED's als aanvullende belichting in een kas in veel gevallen worden volstaan met een kleiner aandeel

⁶ Inmiddels zijn er door fabrikanten diverse ontwerpen van LED-armaturen ontwikkeld die in de kas kunnen worden gebruikt. Een aantal hiervan zullen in het winterseizoen 2007 – 2008 op praktijkschaal bij verschillende teelten op verschillende locaties worden getest.

blauw licht, hetgeen in principe gunstig is voor het omzettingsrendement van het belichtingssysteem.



Figuur 2.9 Foto van proefopstelling in de klimaatcel. Op de voorgrond ziet u een kweekbak met daarin in een PAR-lichtmeter. De twee opstellingen (eerste pulserend, de tweede continu) waren tijdens de experimenten gescheiden door wit plastic. De armaturen bevonden zich op ongeveer 1.8 m boven de kweekbak

3 PLANTEXPERIMENT MET PULSERENDE LED'S

Door: Esther Meinen en Tom Dueck, Wageningen UR Glastuinbouw.

3.1 Opzet van het experiment

Uit de resultaten van de 'proof of principle' studie die eerder is uitgevoerd (De Ruijter et al. 2006, [3]), werd geconcludeerd dat er circa. 13% energiebesparing mogelijk was met pulserende LED's. Daarbij werd de intensiteit van de pulsen van de pulserende LED's gelijk gehouden aan die van de continu brandende LED's. De lichtsom van de pulserende LEDs was lager dan van de continu brandende LED's. In het experiment dat hier wordt beschreven, werd de intensiteit van de pulserende LED's verhoogd zodat de hoeveelheid licht die de plant bereikt (lichtsom), gelijk was aan die van continue LED-belichting. Bij Wageningen UR Glastuinbouw werd sla geteeld in een klimaatkamer met hierin twee verschillende belichtingsregimes: continue LED-belichting en pulserende LED-belichting. De (tijd)gemiddelde lichtintensiteit (lichtsom) en de overige klimaatcondities van beide belichtingsbehandelingen waren gelijk. Het experiment is herhaald waarbij de plaats van de behandelingen in de klimaatkamer gewisseld is. De experimenten zijn uitgevoerd van 16 april tot en met 8 mei (experiment 1) en van 9 mei tot en met 30 mei 2007 (experiment 2).

3.2 Materiaal en Methodes

Voorstudie: Frequentie en duty-cycle

Voordat de experimenten startten is eerst onderzocht op welke manier het gepulseerde licht gegeven zou worden. De frequentie van de pulsen en de verhouding van duur van de 'licht-aan' en de duur van de totale periode (duty cycle) zijn gevarieerd en getest op zwarte nachtschade (*Solanum nigrum*; gebruikt als testplant) en op sla (*Lactuca sativa*). De volgende frequenties zijn getest: 0.1-1-3-10-100 kHz bij een duty cycle van 40%. De volgende duty-cycles zijn getest: 35-40-50-60-70-80-90-100 % bij frequenties van 1 en 10 kHz (bij 1 kHz was de laagste duty cycle geen 35% maar 31.5%).

Hoofdexperimenten: pulsering

Planten

Het experiment werd uitgevoerd met sla (*Lactuca sativa*). Slaplanten (kropsla, Manouska) van Jongerius uit Houten werden in potten geplant in potgrond (1 plant per pot). De planten hadden op dat moment 6 blaadjes. Onder beide LED-opstellingen werden 16 potten met slaplanten geplaatst op een vochtig gehouden viltdoek in een kweekbak van 0.9 m². Potten

werden zodanig geplaatst dat de planten elkaar niet beschaduwden. Bij de start van het experiment stonden de potten dichtbij elkaar. Na verloop van tijd werden de potten verder van elkaar geplaatst om onderlinge beschaduwning te voorkomen. Twee keer per week werden de potten van plaats in de kweekbak gewisseld om effecten van plaatselijke verschillen in lichtintensiteit te minimaliseren.

Experimentele condities

De planten werden gekweekt in een klimaatkamer van 9 m². Beide behandelingen waren van elkaar gescheiden door wit plastic. Het tweede experiment werd ingezet 1 dag nadat het eerste experiment beëindigd was. Daarin zijn de LED-opstellingen in de klimaatkamer omgewisseld om eventuele effecten van positie in de klimaatkamer gelijk over de behandelingen te verdelen. De experimenten duurden 22 (experiment 1) en 21 dagen (experiment 2). Op dat moment waren er kroppen gevormd.

Behandelingen

Er werden 2 behandelingen gegeven:

Continu: LED-belichting werd continu gegeven

Puls: LED-belichting werd gepulseerd gegeven.

In de voorstudie is bepaald bij welke frequentie en duty cycle de pulsen gegeven worden. Er is besloten om een frequentie van 10 kHz te geven en een duty cycle van 40% (zie resultaten voorstudie).

Klimaat

Slaplanten werden geteeld bij een dag/nachttemperatuur van 18°/15°C en een relatieve luchtvochtigheid van 70%. De LED-belichting was ingeschakeld van 8:00 uur tot 22:00 uur. In het midden van de kweekbakken werd de lichtintensiteit gemeten met een quantumsensor van LiCor. De (tijdgemiddelde) lichtintensiteit van de 2 behandelingen werd gelijk aan elkaar ingesteld op 285 $\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ in het midden van de kweekbak. Aan de randen van de kweekbak was de lichtintensiteit lager. Twee keer in de week werd de lichtintensiteit net boven de planten gemeten op 9 verschillende plaatsen in de kweekbak bij beide behandelingen. Deze posities lagen direct boven de planten in de 4 hoeken van de kweekbak en midden tussen deze 4 posities, zodat er in totaal 9 meetposities waren. Er werd tijdens de teelt geen CO₂ gedoseerd in de klimaatkamer.

Fotosynthese

Fotosynthese werd gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCpro+, ADC, Hoddesdon, Verenigd Koninkrijk) met een bladkamer van 6.25 cm². In de bladkamer stroomt lucht met een constante snelheid langs het blad. Uit het verschil van de hoeveelheid CO₂ van de ingaande en uitgaande lucht wordt de netto fotosynthese berekend. Uit het verschil van de luchtvochtigheid van de ingaande en uitgaande lucht werden de verdamping en de huidmondjes geleidbaarheid berekend. De klimaatcondities in de bladkamer werden ingesteld. De CO₂ concentratie was 500 ppm, de temperatuur was 18°C en de relatieve luchtvochtigheid van de uitgaande lucht was circa 75%. De lichtintensiteit op het meetblad was afkomstig van de LED-belichting. De positie in de kweekbak werd zodanig gekozen dat de (tijdgemiddelde) lichtintensiteit op het meetblad gelijk was tussen de twee behandelingen. Fotosynthese werd gemeten 1 week en 2 weken nadat de planten in de klimaatkamer waren geplaatst. Er werd gemeten aan blad dat al redelijk volgroeid was. De eerste week na de start van het experiment werd de fotosynthese gemeten aan het 5^e blad, de tweede week aan het 7^e blad geteld vanaf het groeipunt. Per meetdag werd de fotosynthese van 8 planten gemeten per behandeling.

Tijdens het tweede experiment zijn ook lichtresponscurves gemeten aan 4 planten. Met een externe lichtbron met LED-lampen (onderdeel van de fotosynthesemeter) werden verschillende lichtintensiteiten gegeven en werd de netto fotosynthese gemeten bij 500 ppm CO₂ in de bladkamer. De LED's in de lichtbron produceerden licht met golflengtes van 660 nm (90-95%) en 470 nm (5-10%).

Destructieve oogst

Bij de start van de experimenten werden 10 slaplanten geoogst. Aan het einde van de experimenten werden alle planten geoogst. Het versgewicht van de krop werd gewogen, gedurende 2 dagen gedroogd bij 80°C en daarna werd het drooggewicht bepaald.

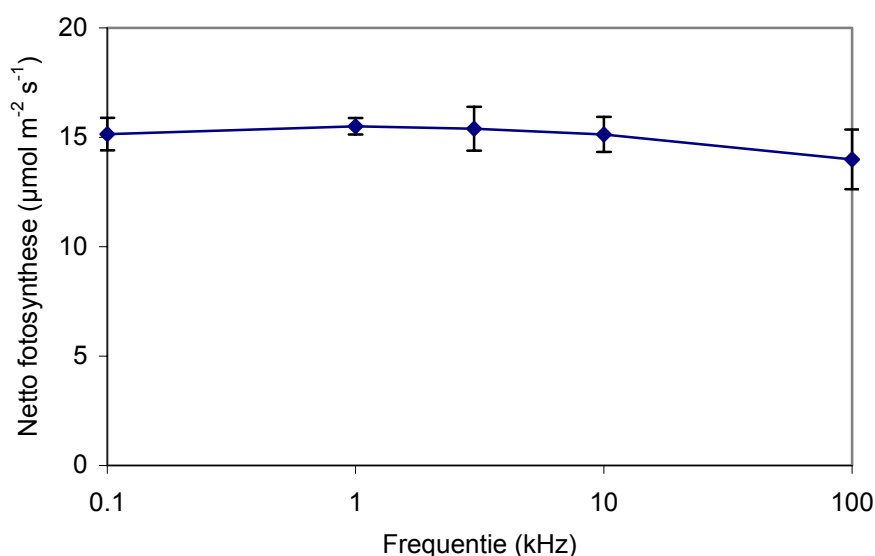
Statistische analyse

Data zijn geanalyseerd met GenStat Release 9.2 (Rothamsted Experimental Station). Er is een variantieanalyse uitgevoerd op de data, waarbij getoetst is of de 2 behandelingen significant verschillend waren met een betrouwbaarheid van 95%. Het experiment werd geanalyseerd als blokkenproef met 2 blokken (herhaling in de tijd).

3.3 Resultaten

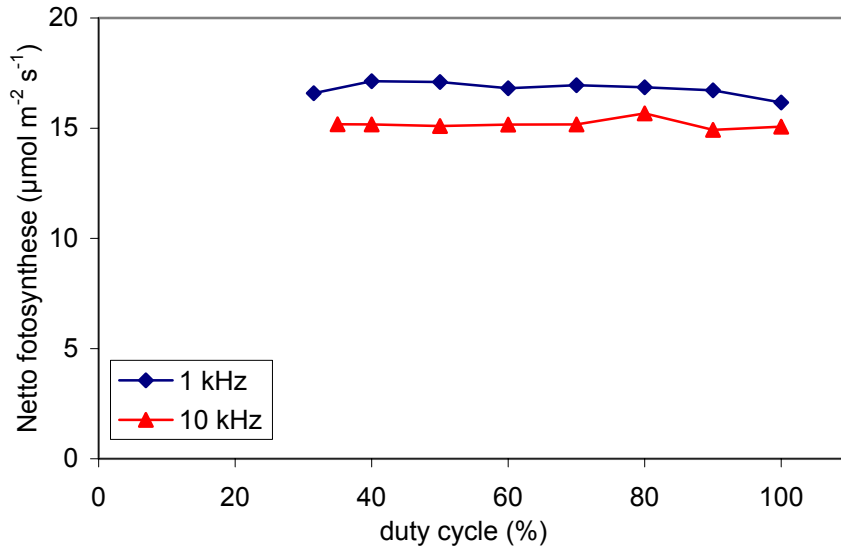
3.3.1 Voorstudie: Frequentie en duty cycle

Pulserend licht kan gegeven worden met verschillende frequenties en met verschillende duty cycles. Er zijn verschillende frequenties getest bij sla met een duty cycle van 40%. In figuur 1 is te zien dat de netto fotosynthese van sla bij 0.1 tot 100 kHz redelijk constant is.



Figuur 1 Netto fotosynthese van slabladeren onder pulserende LED-belichting gemeten bij verschillende frequenties en een duty cycle van 40%. Klimaatcondities in het blad kamer: gemiddeld 270 µmol PAR/m²/s op het blad, 500 ppm CO₂, 18°C (n=3 met standaardfout)

De invloed van de duty cycle op de netto fotosynthese is gemeten bij 2 frequenties en getest bij zwarte nachtschade. In figuur 2 is te zien dat de netto fotosynthese vrijwel constant is bij verschillende duty-cycles.



Figuur 2 Netto fotosynthese van zwarte nachtschadebladeren onder pulserende LED-belichting gemeten bij verschillende duty-cycles en bij 2 frequenties. Klimaatcondities in de bladkamer: gemiddeld 274 µmol PAR/m²/s op het blad, 500 ppm CO₂, 18°C

De fotosynthese gemeten met een frequentie van 1 kHz is iets hoger dan bij 10 kHz bij alle duty-cycles. Alle metingen bij een bepaalde frequentie zijn gemeten aan dezelfde plant. Het verschil tussen de 2 niveaus wordt veroorzaakt door plantvariatie.

Op basis van deze voorstudie is besloten de experimenten bij sla uit te voeren met een frequentie van 10 kHz en een duty cycle van 40%. Door deze duty cycle te kiezen wordt het verschil met de continue LED-belichting (duty cycle 100%) het grootst. (Bij een nog lagere duty cycle was een lichtsom van 285 µmol PAR/m²/s net te realiseren in het midden van de kweekbak. Om niet aan de grenzen van de instellingen van de belichting te gaan zitten is gekozen voor een duty cycle van 40%.) Bij een duty cycle van 40% is het 60% van de tijd donker met eenzelfde lichtsom als bij de continue behandeling. De lichtintensiteit van de lichtpuls is dus 2.5 keer hoger in de pulserende LED-belichtingsbehandeling dan in de continue behandeling. Er is gekozen voor een frequentie van 10 kHz, mede omdat het tot een hogere fotosynthese en drogestof productie heeft geleid voor sla bij duty-cycles van 20-70% (Kenji et al. 2004, [6]).

3.3.2 Hoofdexperimenten: pulsering

Planten

Bij beide experimenten trad in de laatste week van het experiment bij alle planten 'rand' op. Rand is een afwijking die zich uit door afsterving van bladweefsel aan de bladranden bij de buitenste zichtbare bladeren in de krop. Er was geen verschil te zien tussen de planten van beide behandelingen.

Klimaat

Tijdens de experimenten is 2 keer per week de lichtintensiteit net boven de planten gemeten op 9 posities in de kweekbak. In tabel 1 staat de (plaats)gemiddelde lichtintensiteit van de 2 experimenten.

Tabel 1 (Plaats)gemiddelde lichtintensiteit net boven de slapplanten tijdens de 2 experimenten met de continue LED-belichting en de pulserende LED-belichting.

| Experiment | Lichtintensiteit ($\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) | | |
|------------|--|------|-----------|
| | Continu | Puls | gemiddeld |
| 1 | 238 | 242 | 240 |
| 2 | 221 | 224 | 223 |
| gemiddeld | 230 | 233 | 232 |

Fotosynthese

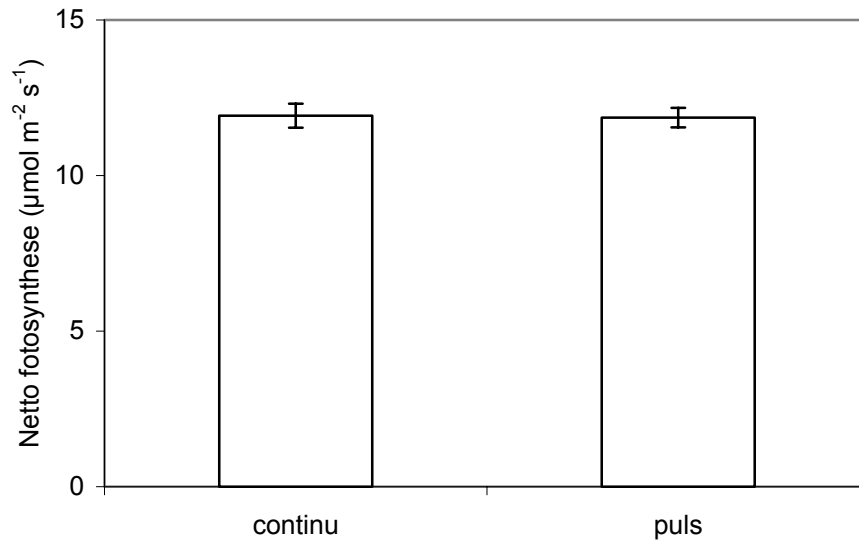
Fotosynthese werd gemeten in de tweede en de derde week van beide experimenten. In tabel 2 is de gemiddelde fotosynthese weergegeven van beide experimenten. In bijlagen A.1 en A.2 staan de data van alle planten.

Tabel 2 Gemiddelde netto fotosynthese van slabladeren van de 2 experimenten. In elk experiment is op 2 momenten de fotosynthese gemeten aan 8 planten per behandeling per dag (1 blad per plant).

| Experiment | Behandeling | Licht ($\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$) | Netto fotosynthese ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) | SE* |
|------------|-------------|---|---|------|
| 1 | Continu | 239 | 12.55 | 0.47 |
| | Puls | 239 | 12.27 | 0.42 |
| 2 | Continu | 234 | 11.21 | 0.59 |
| | Puls | 233 | 11.45 | 0.45 |
| gemiddeld | Continu | 237 | 11.93 | 0.39 |
| | Puls | 236 | 11.86 | 0.31 |

* SE is de 'standard error' (standaardfout) van fotosynthese

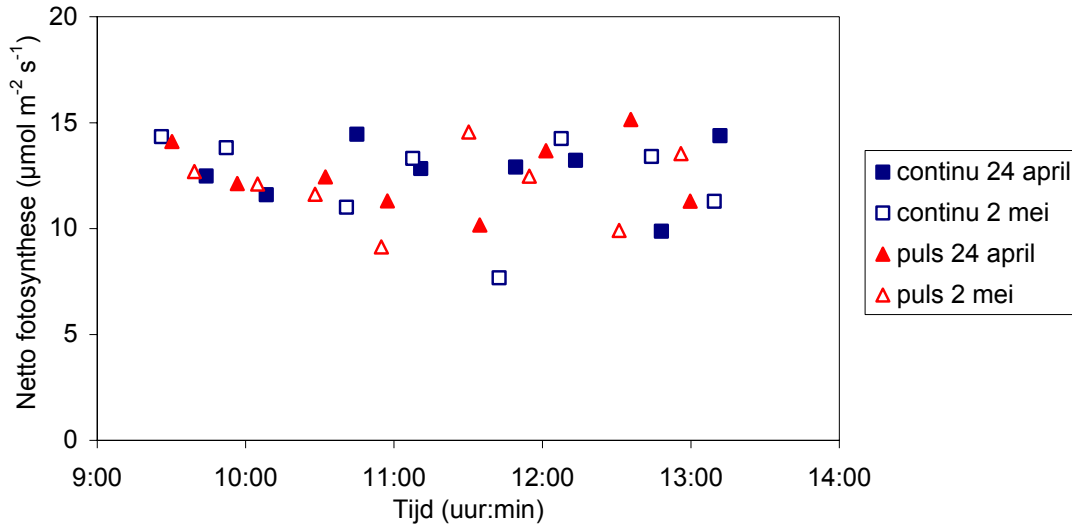
Tijdens de fotosynthesemetingen werd de lichtintensiteit gemeten die op het ingeklemde blad in de bladkamer viel. Deze lichtintensiteit staat in tabel 2 en wijkt iets af van de gemiddelde lichtintensiteit boven de planten in de kweekbak in tabel 1. Bij experiment 1 was de lichtintensiteit op het blad tijdens de fotosynthesemeting met $239 \mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ iets hoger dan bij experiment 2 met een gemiddelde lichtintensiteit op het blad van $234 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. In figuur 3 is de gemiddelde fotosynthese van beide experimenten weergegeven.



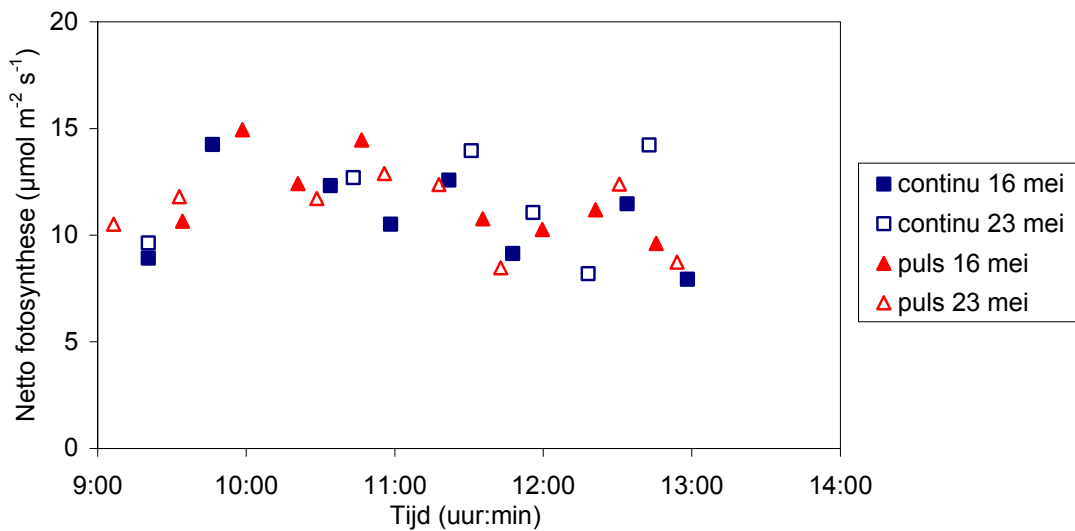
Figuur 3 Gemiddelde netto fotosynthese van slabladeren (2 experimenten) onder continu LED-belichting en onder pulserende LED-belichting. Klimaatcondities in de bladkamer: gemiddeld 237 µmol PAR/m²/s op het blad, 500 ppm CO₂, 18 °C

Uit statistische analyse bleek dat er geen significant verschil bestaat tussen de twee behandelingen (met een betrouwbaarheid van 95%).

In figuren 4 en 5 is de fotosynthese gemeten in respectievelijk experiment 1 en 2 uitgezet tegen de tijd op de meetdag. Hieruit blijkt dat de fotosynthese redelijk constant is tussen 9:30 en 13:30 uur. Er is duidelijk variatie tussen de planten.

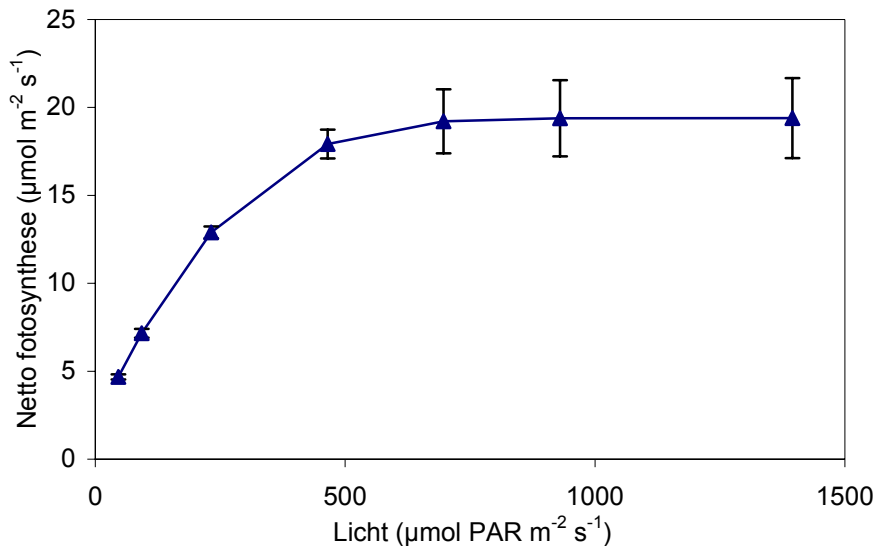


Figuur 4 Netto fotosynthese van slabladeren gedurende de dag (experiment 1, metingen van 2 data) onder continue LED-belichting en onder pulserende LED-belichting. Klimaatcondities in de bladkamer: gemiddeld 239 $\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ op het blad, 500 ppm CO_2 , 18°C. Elk meetpunt is 1 meting aan steeds een ander blad



Figuur 5 Netto fotosynthese van sla gedurende de dag (experiment 2, metingen van 2 data) onder continue LED-belichting en onder pulserende LED-belichting. Klimaatcondities in de bladkamer: gemiddeld 234 $\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ op het blad, 500 ppm CO_2 , 18°C. Elk meetpunt is 1 meting aan steeds een ander blad

Om de relatie vast te stellen tussen lichtintensiteit en fotosynthese zijn lichtresponscurven gemeten aan 4 verschillende planten (bij continue belichting). De lichtresponscurve vertoont een normaal beeld.



Figuur 6 Netto fotosynthese van slabladeren (n=4 met SE) bij 500 ppm CO₂ in de bladkamer en 18°C bij verschillende lichtintensiteiten op het blad. Licht werd gegeven met een externe lichtbron van de fotosynthesemeter met LED-belichting (continu). Metingen zijn uitgevoerd tijdens experiment 2

De lichtresponscurve vertoont een verzadiging bij hogere lichtintensiteiten, vanaf ongeveer 700 $\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ (figuur 6). In de experimenten was de (tijdgemiddelde) lichtintensiteit boven de planten bij beide behandelingen gelijk, (plaats)gemiddeld 232 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. Bij de pulserende belichting was de momentane lichtintensiteit tijdens de pulsen echter hoger, circa 580 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$.

Biomassa en groei

Bij het starten van de experimenten werden 10 slaplanten geoogst en aan het einde van de experimenten werden alle slaplanten geoogst en werd het vers- en drooggewicht bepaald.

Tabel 3 Vers- en drooggewicht van slaplanten (bovengronds) bij start en einde van de 2 experimenten.

| Expe- riment | Start/ einde | Behan- deling | Vers- gewicht (g) | SE* | Droog- gewicht (g) | SE | Droge- stof (%) | SE |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------------|------|--------------------------|------|-----------------------|------|
| 1 | start | | 3.21 | 0.20 | 0.19 | 0.01 | 5.84 | 0.07 |
| | einde | continu | 120.2 | 1.47 | 6.16 | 0.09 | 5.13 | 0.03 |
| | | puls | 123.4 | 1.61 | 6.40 | 0.12 | 5.19 | 0.08 |
| 2 | start | | 5.10 | 0.20 | 0.30 | 0.01 | 5.84 | 0.00 |
| | einde | continu | 102.0 | 1.58 | 5.69 | 0.09 | 5.58 | 0.07 |
| | | puls | 107.3 | 1.72 | 5.76 | 0.09 | 5.38 | 0.06 |
| gemiddeld | start | | 4.15 | 0.26 | 0.24 | 0.01 | 5.84 | 0.03 |
| | einde | continu | 111.1 | 1.94 | 5.92 | 0.07 | 5.35 | 0.05 |
| | | puls | 115.3 | 1.85 | 6.08 | 0.09 | 5.28 | 0.05 |

* SE is 'standard error' (standaardfout)

Het vers- en drooggewicht van de slaplanten is bij beide experimenten iets hoger bij de behandeling met de pulserende LED-belichting vergeleken met de continue LED-belichting (tabel 3). Echter, de gemiddelde lichtintensiteit bij de pulserende LED-belichting was ook iets hoger dan bij de continue LED-belichting; bij experiment 1 was dat 1.68 % en 1.36% bij experiment 2. Volgens Marcelis et al. [7] neemt bij 1% minder licht het vers- en drooggewicht van sla onder zonlichtomstandigheden gemiddeld met 0.8% af. Als de vers- en drooggewichten gecorrigeerd worden voor deze verschillen in lichtintensiteit dan zijn nog steeds de gewichten bij de pulserende LED-belichting iets hoger, maar niet significant verschillend, en met een betrouwbaarheid van 95%.

3.3.3 Discussie

In 2006 is onderzoek uitgevoerd met pulserende LED-belichting bij sla (de Ruijter et al., 2006) [3]. In dat experiment was de lichtintensiteit van de pulsen gelijk aan de lichtintensiteit van de continue belichting. De gemiddelde lichtintensiteit van de continue LED-belichting was gemiddeld 295 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$ en bij de gepulseerde LED-belichting 236 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$. Uit dat onderzoek bleek dat gepulseerd belichten (70% duty cycle en frequentie van 1 kHz) resulteerde in een circa. 20% lagere lichtsom dan bij continue belichting. De

fotosynthese per eenheid elektrische energie was echter 13.5% gunstiger bij puls-belichting, en werd ook 19% meer drogestof geproduceerd per eenheid elektrische energie. Geconcludeerd werd dat pulserende belichting – bij de gehanteerde condities - energetisch gezien, voordelig was ten opzichte van continue belichting.

In het huidige experiment is de methode aangepast en waren de tijdgemiddelde lichtintensiteiten (lichtsom) tussen de behandelingen gelijkgesteld. Uit de voorstudie bleek al dat pulseren met eenzelfde lichtsom geen invloed had op de netto fotosynthese (figuur 2). Dit was gemeten aan planten die momentaan aan verschillende pulserende lichtbehandelingen werden blootgesteld. In de hoofdexperimenten werden planten 3 weken geteeld onder pulserende LED-belichting dan wel continue LED-belichting. Maar ook hier werd een gelijke fotosynthese en groei gevonden van planten onder continue LED-belichting respectievelijk onder pulserende LED-belichting.

Om een indruk te krijgen van het te verwachten niveau van fotosynthese werd een lichtresponscurve gemaakt met lichtintensiteiten van 50 tot 1500 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$ (zie figuur 7 in box⁷). De lichtintensiteit in het experiment bij continu LED-belichting was 232 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$ en in de pulserende LED-belichting 580 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (voor 40% van de tijd). Deze lichtintensiteiten zijn in figuur 7 met een stippellijn aangegeven. Hieruit zou de te verwachten fotosynthese berekend kunnen worden. Op basis van de lichtresponscurve en 40% duty cycle zou er een lagere netto fotosynthese berekend worden (circa. $18,5 \times 40\% = 7.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Echter, de gemeten netto fotosynthese van de 2 behandelingen in dit experiment was gelijk (circa. $12 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$). Op basis van deze berekening zou geconcludeerd kunnen worden dat pulserende belichting efficiënter is. Daarbij komt dat volgens de lichtresponscurve de fotosynthese bij continue belichting (232 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) zich in de steile fase van de curve bevond, en de (kortere) puls belichting (580 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) in het bijna verzadigde deel van de curve. In de steile fase van de lichtrespons is de fotosynthese in principe efficiënter dan in het verzadigde deel van de curve. Bevindingen van Kenji et al. [6] waarin een hogere biomassa werd geproduceerd na belichting met pulserende LEDs, ondersteunen deze berekeningen. Daarentegen vonden zij dat pulserende LEDs ook tot meer biomassa leidde, iets wat hier niet werd gevonden.

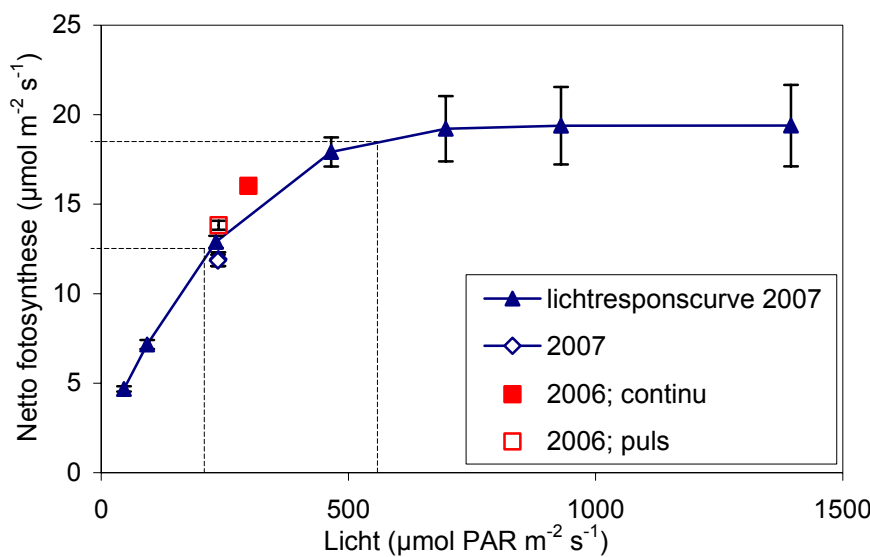
⁷ De lichtresponscurve is een gemiddelde van meerdere curves die voor verschillende bladeren aan verschillende planten op verschillende dagen is bepaald, zie Appendix A.3

Fotosynthese gemeten in 2006 en 2007

In onderstaande figuur 7 wordt de gemeten lichtresponscurve in dit project weergegeven door de blauwe lijn. Het blauwe symbool (ruit) is de gemiddelde fotosynthese van 2007 van beide behandelingen, waarbij de lichtintensiteiten gelijk waren. Ook de gemeten fotosynthese van beide belichtingsbehandelingen was gelijk.

De rode symbolen (vierkant) zijn de gemiddelde fotosynthesesnelheden gemeten in 2006, waarbij het laagste punt (open symbool) de pulsbehandeling vertegenwoordigt en het hogere punt (gesloten symbool) de continue behandeling. Uit deze figuur blijkt dat de gemeten fotosynthese van 2006 redelijk op deze curve ligt.

In 2006 werd geconcludeerd dat pulserende LED-belichting een hogere fotosynthese-efficiëntie had dan bij continue belichting. Zoals te zien is op een lichtresponscurve, is de fotosynthese-efficiëntie hoger bij lagere lichtintensiteiten. De helling van de curve is namelijk groter bij lagere lichtintensiteiten. De gevonden verschillen in fotosynthese-efficiëntie worden vermoedelijk veroorzaakt doordat het gepulseerde licht een lagere lichtsom had⁸.



Figuur 7 Lichtresponscurve sla bij 500 ppm CO₂ en 18°C in de bladkamer gemeten in 2007. De actuele fotosynthese snelheden gemeten in 2007 en in 2006 zijn in de figuur aangegeven. De stippellijnen geven de lichtintensiteiten aan bij continue belichting in 2007 (232 µmol PAR/m²/s) en de (momentane) lichtintensiteit van de pulserende belichting (580 µmol/m²/s) in 2007

⁸ Ervan uitgaand dat de lichtresponscurve ook voor pulserend licht geldt

Echter, de fotosynthese bij continue en pulserende belichting was hetzelfde, bij een gelijke lichtsom. Blijkbaar reageert het gewas in dit experiment onder deze condities en bij deze frequentie op de gemiddelde lichtintensiteit en niet op de momentane lichtintensiteit van de lichtpulsen die gedurende 40% van de tijd worden gegeven gevolgd door een donkerperiode.

Pas wanneer blijkt dat de gepulseerde lichtbehandeling energetisch goedkoper is bij het gevonden niveau van fotosynthese (gelijk aan die onder continue belichting), dan pas mag geconcludeerd worden dat het pulseren van LED-belichting rendabel is.

3.4 Verdere energetische analyse van plantexperimenten

Jacques de Ruijter, KEMA

Door de vers- en drooggewichtgegevens van tabel 3 te normeren op het elektrische energieverbruik van de gebruikte belichtingssystemen in de teeltperioden, wordt inzicht verkregen in de energetische effectiviteit van de belichtingswijze in kwestie. De uitkomsten zijn aangegeven in tabel 4.

Tabel 4 Elektriciteitsverbruik en toename vers- en drooggewicht van slaplanten (bovengronds) gedurende de 2 experimenten. Tevens is de toename per eenheid elektrische energie getabelleerd

| Experiment | Behandeling | Elektriciteitsverbruik kWh | versgewicht | | | Drooggewicht g _{dry} | toename | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------|--------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| | | | toename g | toename g | toename g/kWh | | drooggewicht g _{dry} | drooggewicht g _{dry} /kWh |
| 1 start einde einde | continu puls | | 3.21 | | | 0.19 | | |
| | | 102.3 | 120.2 | 117.0 | 1.14 | 6.16 | 5.97 | 0.058 |
| | | 185.9 | 123.4 | 120.2 | 0.65 | 6.40 | 6.21 | 0.033 |
| 2 start einde einde | continu puls | | 5.1 | | | 0.30 | | |
| | | 95.6 | 102.0 | 96.9 | 1.01 | 5.69 | 5.39 | 0.056 |
| | | 167.8 | 107.3 | 102.2 | 0.61 | 5.76 | 5.46 | 0.033 |
| gemiddeld start einde einde | continu puls | | 4.2 | | | 0.25 | | |
| | | 98.9 | 111.1 | 106.9 | 1.08 | 5.93 | 5.68 | 0.057 |
| | | 176.8 | 115.4 | 111.2 | 0.63 | 6.08 | 5.84 | 0.033 |

Uit de tabel (6-de en 9-de kolom) blijkt dat de toename van het versgewicht respectievelijk drooggewicht per kWh elektriciteit bij de gebruikte pulserende belichting circa. 42% lager ligt dan bij de continue belichting. Op basis van het verwachte energieverbruik bij pulserende rode en blauwe LEDs met hoge intensiteit en gelijke lichtsom (zie hoofdstuk 2, Figuur 2.6), komt dit niet als een verrassing. Het betekent echter dat pulserende belichting - in ieder geval in de vorm zoals deze bij de uitgevoerde experimenten is toegepast - energetisch niet zinvol is.

Pulseren met gelijke aan-intensiteit als bij continue belichting, kan wel zinvol zijn. Hierbij wordt het omzettingsrendement van het armatuur iets beter en neemt de fotosynthese en groei per eenheid toegevoerd licht juist toe. (Dit bleek uit het eerste experiment [3]). Met de resultaten van de nieuwe experimenten wordt de effectievere fotosynthese bij het pulseren in het eerste experiment niet meer toegeschreven aan het pulseren zelf maar (vooral) aan het dim-effect dat hier op treedt, waardoor de lichtsom daalt en de fotosynthese op een efficiënter stuk van de lichtresponscurve "terecht komt" (zie ook figuur 7 in het kader op pag. 33).

4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde experimenten, waarbij in een klimaatcel pulserende LED-belichting werd vergeleken met continue LED-belichting met een gelijke lichtsom, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Energetische aspecten pulseren

1. Pulserende LED's met een bepaalde lichtsom zijn elektrisch minder efficiënt dan continue brandende LED's met dezelfde lichtsom (dit betekent dat ze een lager fotonrendement hebben, oftewel ze zenden per eenheid elektrische energie minder fotonen uit).
2. Dit in tegenstelling tot een pulserende (rood/blauwe) LED-lamp waarbij de aan-stroom even groot is als van een zelfde maar continue brandende LED-lamp. De pulserende lamp heeft dan juist een hoger fotonrendement [3].
3. De relatieve efficiëntie van pulserende LED's (ten opzichte van continue brandende LED's met gelijke lichtsom) is lager naarmate de duty-cycle kleiner is.
4. Bij rode LED's is het extra elektriciteitsverbruik bij pulseren (met gelijke lichtsom) groter dan bij blauwe LED's (circa 40% versus 19%, bij een duty-cycle van 40%).

Fotosynthesemetingen bij verschillende frequenties c.q. duty-cycles

5. Bij pulserende belichting met een bepaalde duty-cycle (getest bij 40%) maar variabele frequentie in het frequentiegebied van circa 100 Hz tot 100.000 Hz is de fotosynthese (bij sla) maar weinig afhankelijk van de frequentie.
6. Bij pulserende belichting met een veranderende duty-cycle, maar gelijke lichtsom en een bepaalde frequentie (getest bij 1 kHz en 10 kHz) is de fotosynthese in het geteste duty-cycle gebied vrijwel constant (geen statistisch significante verschillen binnen de meetnauwkeurigheid in het duty-cycle gebied van circa 30% tot 100%; uitgevoerd op zwarte nachtschade).

Experimenten met sla

7. Bij twee groeiexperimenten met sla, waarbij per experiment een behandeling met continue LED-licht respectievelijk pulserend LED-licht - met een duty-cycle van 40%, een frequentie van 10 kHz en een gelijke lichtsom - werd toegepast, bleek de fotosynthese van de planten (gemeten aan steeds 8 planten op 2x2 dagen verspreid over de experimenten) bij beide behandelingen niet significant te verschillen.
8. Alhoewel aan het eind van de proeven zowel het versgewicht als drooggewicht van de met pulslucht behandelde planten iets hoger was dan dat van de continue belichte planten,

bleek dit - na correctie voor een klein verschil in lichtsom - niet significant van elkaar te verschillen.

9. Resumerend zijn er bij deze experimenten onvoldoende aanwijzingen gevonden, dat pulserende belichting, waarvan de lichtsom even groot is als van continue belichting, qua fotosynthese en groei (versgewicht en drooggewicht) significant beter scoort dan continue belichting.
10. Rekening houdend met de extra energie die nodig is om te pulseren met gelijke lichtsom is bij pulseren de netto fotosynthese en groei per eenheid elektrische energie lager dan bij continue belichting.
11. Het lijkt alsof ook bij pulserende belichting – net als bij continue belichting - vooral het gemiddelde lichtniveau (= de lichtsom per tijdseenheid over één of meerdere totale pulscycli, dat wil zeggen aan- plus uitdeel) bepalend is voor de fotosynthese en groei, en niet de frequentie of duty-cycle van de pulsen.
12. Blijkbaar geldt de lichtresponscurve niet voor de momentane waarde van de lichtintensiteit bij hoogfrequent pulserend licht. Was dit wel het geval geweest, dan had bij de experimenten met pulserend licht met 40% duty-cycle de opbrengst circa 41% lager moeten zijn dan bij continue belichting met dezelfde lichtsom. Dit bleek echter niet het geval. Het versgewicht en drooggewicht van beide behandelingen was nagenoeg even groot. (In zoverre is de momentane fotosynthese dus wel efficiënter, maar de gemiddelde waarde hiervan over een hele puls - aan+uitdeel - niet meer).

4.2 Aanbevelingen

De onderzoekers verwachten dat de conclusies (en in het bijzonder conclusie 11, die stelt dat de lichtsom en niet de duty-cycle respectievelijk frequentie van de pulsen bepalend zijn voor fotosynthese en groei) ook geldig zijn voor andere planten dan sla. Meer zekerheid over de geldigheid en 'werkgebied' (frequenties/duty-cycles) van deze conclusie, zou kunnen worden verkregen door soortgelijke experimenten uit te voeren voor andere planten en eventueel in een groter werkgebied.

Om zo goed mogelijk de effecten van het pulseren te kunnen vaststellen is het belichtingsexperiment uitgevoerd in een klimaatcel zonder daglichttoetreding. In de beoogde uiteindelijke toepassingen zullen de LED's (in veel gevallen) als aanvullende belichting op het daglicht gebruikt gaan worden. De resultaten uit het belichtingsexperiment mogen niet zonder meer vertaald worden naar de situatie van aanvullende belichting. Om de effecten bij aanvullende (LED-)belichting te kwantificeren, wordt aanbevolen ook groei-experimenten uit

te voeren in een proef- of demokas⁹. Hiervoor is het nodig een ander ontwerp van het belichtingsstelsel te maken dat rekening houdt met daglichttoetreding. Recentelijk zijn er LED-armaturen op de markt geïntroduceerd, waarmee dat naar verwachting zou kunnen.

⁹ In het laatste kwartaal van 2007 zijn (door meerdere fabrikanten/leveranciers) een aantal grootschalige experimenten gestart met speciaal ontwikkelde LED-armaturen voor assimilatiebelichting in afdelingen van commerciële kassen. Het effect van deze LED-belichting op de gewasgroei zal worden onderzocht in vergelijking met de groei in afdelingen die met bestaande hoge-druk-natrium belichting worden belicht. Vooral nog is het opgehangen vermogen per m² kas van de LED-belichting veel lager dan van de HD-Na-belichting, zodat de PAR-lichtsom van de LED-belichting naar verwachting ook veel lager is. De leveranciers claimen echter dat "hun" groeilicht efficiënter is en mikken op een gelijke opbrengst met veel minder elektrisch vermogen. De eerste resultaten van de experimenten worden aan het eind van het belichtingsseizoen 2007-2008 verwacht.

LITERATUUR

- 1 Ruijter, J.A.F. de, L.F.M. Marcelis, M. Schreurs, "Ingrediënten voor een energieneutrale belichte glastuinbouw in 2020, Position Paper Licht", 59762332-TOS/MEC 07-9022, maart 2007.
- 2 Ruijter, J.A.F. de, "Verkenning van het perspectief van LED's voor gewasbelichting in de glastuinbouw", rapportnummer 50361787-KPS/TCM 04-2059, KEMA, juli 2004.
- 3 Ruijter, J.A.F. de, T.A. Dueck, J. Steenhuizen, "Gewasbelichting met hoogfrequent pulserende LED's, Proof-of-principle", rapportnummer, 50552411-KPS/TCM 06-7029, KEMA/WUR, februari 2006.
- 4 "Veel fabels rond belichting", Groenten & Fruit, wk 37, 2003.
- 5 "Feiten en fabels in belichtingsland", Vakblad voor de bloemisterij 39 (2003).
- 6 Kenji, Y. & Yasuhiro, M. 2004. Method of cultivating plant and illuminator for cultivating plant. Patent nr. US2004109302.
- 7 Marcelis, L., Broekhuijsen, G., Meinen, E., Nijs, L. & Raaphorst, M. 2004. Lichtregel in de tuinbouw: 1% licht = 1% productie? PRI Nota 305, 82 p.

BIJLAGE A MEETRESULTATEN PLANTPROEVEN

De metingen in deze bijlage zijn uitgevoerd door Wageningen UR Glastuinbouw

Data fotosynthesemetingen aan alle gemeten planten van experiment 1 (16 april – 8 mei 2007) CO₂ in de bladkamer was 500 ppm, temperatuur in de bladkamer was 18°C.

| Datum metingen | Behandeling | Licht op het blad ($\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$) | Netto fotosynthese ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) | Stomataire geleidbaarheid ($\text{mol/m}^2/\text{s}$) |
|----------------|-------------|--|---|---|
| 24 april | Continu | 243 | 14.39 | 0.42 |
| | | 242 | 12.91 | 0.44 |
| | | 242 | 12.48 | 0.37 |
| | | 242 | 11.60 | 0.26 |
| | | 244 | 12.83 | 0.30 |
| | | 242 | 9.88 | 0.20 |
| | | 242 | 13.23 | 0.51 |
| | | 243 | 14.45 | 0.49 |
| | Puls | 242 | 13.67 | 0.42 |
| | | 242 | 14.11 | 0.43 |
| | | 242 | 10.16 | 0.26 |
| | | 242 | 12.44 | 0.30 |
| | | 242 | 15.15 | 0.55 |
| | | 242 | 11.29 | 0.19 |
| | | 240 | 11.31 | 0.32 |
| | | 241 | 12.13 | 0.22 |
| 2 mei | Continu | 235 | 14.34 | 0.42 |
| | | 236 | 11.01 | 0.35 |
| | | 236 | 13.41 | 0.46 |
| | | 236 | 7.68 | 0.25 |
| | | 236 | 11.29 | 0.39 |
| | | 238 | 13.31 | 0.37 |
| | | 236 | 13.82 | 0.48 |
| | | 236 | 14.25 | 0.48 |
| | Puls | 236 | 9.14 | 0.34 |
| | | 235 | 11.62 | 0.38 |
| | | 236 | 14.56 | 0.47 |
| | | | | |

Bijlage A blad 2

| Datum metingen | Behandeling | Licht op het blad ($\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$) | Netto fotosynthese ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) | Stomataire geleidbaarheid ($\text{mol/m}^2/\text{s}$) |
|-----------------------|--------------------|--|---|---|
| | | 236 | 12.69 | 0.32 |
| | | 236 | 9.91 | 0.44 |
| | | 236 | 12.10 | 0.34 |
| | | 236 | 12.47 | 0.36 |
| | | 236 | 13.54 | 0.44 |

Bijlage A. blad 3

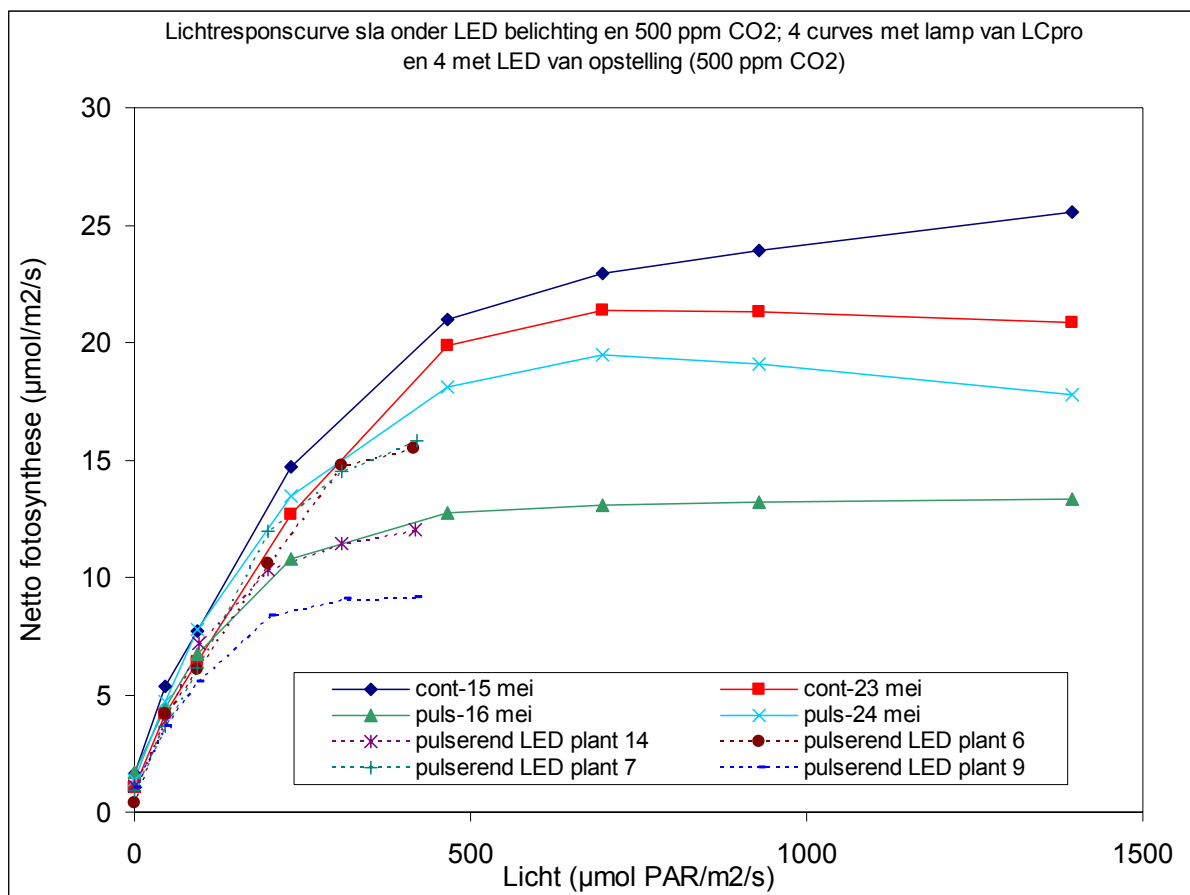
Data fotosynthesemetingen aan alle gemeten planten van experiment 2 (9 april – 30 mei 2007). CO₂ in de bladkamer was 500 ppm, temperatuur in de bladkamer was 18°C.

| Datum metingen | Behandeling | Licht op het blad (µmol PAR/m ² /s) | Netto fotosynthese (µmol/m ² /s) | Stomataire geleidbaarheid (mol/m ² /s) | |
|----------------|-------------|--|---|---|------|
| 16 mei | Continu | 235 | 7.93 | 0.19 | |
| | | 236 | 8.92 | 0.12 | |
| | | 235 | 9.14 | 0.21 | |
| | | 234 | 11.47 | 0.26 | |
| | | 236 | 12.32 | 0.34 | |
| | | 236 | 14.25 | 0.35 | |
| | | 235 | 10.52 | 0.21 | |
| | | 235 | 12.58 | 0.26 | |
| | | Puls | 236 | 14.46 | 0.40 |
| | | | 236 | 12.42 | 0.41 |
| | | | 236 | 10.27 | 0.25 |
| | | | 236 | 10.77 | 0.36 |
| | | | 235 | 14.94 | 0.35 |
| | | | 236 | 11.19 | 0.34 |
| 23 mei | Continu* | 235 | 10.65 | 0.33 | |
| | | 236 | 9.61 | 0.22 | |
| | | 232 | 12.70 | 0.36 | |
| | | 232 | 13.96 | 0.24 | |
| | | 232 | 14.23 | 0.36 | |
| | | 232 | 11.06 | 0.23 | |
| | | 232 | 9.64 | 0.14 | |
| | | 232 | 8.20 | 0.14 | |
| | | Puls | 232 | 10.52 | 0.14 |
| | | | 229 | 8.47 | 0.18 |
| | | | 229 | 12.37 | 0.21 |
| | | | 229 | 12.40 | 0.21 |
| | | | 232 | 11.80 | 0.18 |
| | | | 229 | 8.74 | 0.21 |
| | 228 | 12.89 | 0.26 | | |
| | 229 | 11.71 | 0.26 | | |

* Bij deze behandeling zijn metingen aan 2 planten niet goed verlopen; deze data zijn niet gebruikt

Lichtresponscurven

Gemeten lichtresponscurven¹⁰ bij continue belichting (continue lijnen) respectievelijk pulsbelichting (onderbroken lijnen), bij verschillende planten. (N.B. de lijnen puls-16 mei en puls-24 mei horen bij planten die onder de pulserende lampen hebben gestaan, maar die ten behoeve van de lichtresponscurvemeting met continu licht van de LCpro lamp zijn belicht).



¹⁰ Bij deze individuele lichtresponscurven, die zijn gemeten aan verschillende planten, zijn gegeven ter informatie. Er moet worden bedacht dat er altijd natuurlijke verschillen tussen planten bestaan. De verschillende lichtresponscurven uit deze figuur mogen niet individueel met elkaar vergeleken worden (dat wil zeggen de geconstateerde verschillen tussen een individuele 'continue curve' en een 'pulserende curve' mogen niet zonder meer worden toegeschreven aan bijvoorbeeld het aspect pulseren). Vergelijkingen mogen alleen worden gemaakt voor een gemiddelde van een statistisch voldoende groot aantal individuele metingen