



50552411-KPS/TCM 06-7029

Gewasbelichting met hoogfrequent pulserende LED's

Proof-of-principle


Arnhem, 28 februari 2006



Auteurs:

J.A.F. de Ruijter
T.A. Dueck & J. Steenhuizen

KEMA Power Generation & Sustainables
PRI, Wageningen

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

auteur : J.A.F. de Ruijter  06-02-28
B 37 blz. 0 bijl.

beoordeeld : R. Hoogsteen  06-03-13
goedgekeurd : M.R. de Potter  06-03-20

Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Onderzoeksprogramma Energie (PT-projectnummer 12079).



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

© 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, bijkomstige 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	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelstelling en aanpak.....	9
1.3 Leeswijzer	10
2 Ontwikkeling LED-lampen	11
2.1 Ontwerpaspecten.....	12
3 Plantexperiment met pulserende LED's	19
3.1 Opzet van het experiment	19
3.2 Materiaal & Methoden	19
3.3 Resultaten.....	21
3.3.1 Keus frequentie en duty cycle	21
3.3.2 Experimenten.....	23
3.4 Verdere analyse van fotosynthese- en groeidata	29
3.5 Referenties hoofdstuk 3	34
4 Conclusies en aanbevelingen	35
4.1 Conclusies	35
4.2 Aanbevelingen	36
LITERATUUR.....	37

SAMENVATTING

Assimilatiebelichting neemt een steeds belangrijkere plaats in 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 hogedruknatriumlampen 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 (5 à 10) jaren door te gaan, voordat een omzettingsrendement 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 HD-natriumlampen - snel worden in- en uitgeschakeld, waardoor (hoogfrequent) gepulst licht kan worden gecreëerd. Er zijn in de literatuur aanwijzingen, dat de fotosynthese bij hoog-frequent gepulst licht mogelijk efficiënter kan verlopen, waardoor energiebesparing kan worden gerealiseerd.

In dit project is een "proof-of-principle" experiment uitgevoerd, waarin is nagegaan of het bedoelde effect daadwerkelijk aanwezig is. Daartoe is een groei-experiment uitgevoerd in een klimaatkamer met een (speciaal voor dit doel ontwikkelde) pulserende LED-belichting. Ter vergelijking is - lichttechnisch afgescheiden van het pulserende experiment - een controle-experiment verricht met een verder identieke, maar continu brandende LED-belichting. De groei-proeven zijn uitgevoerd met slapplanten, die gedurende 3 weken zijn belicht met pulserend respectievelijk continu LED-licht (met circa 80% rood en 20% blauw licht). Er is gewerkt met een puls-frequentie van 1000 Hz en een duty-cycle van 70% (dat wil zeggen de lamp is per cyclus 70% van de tijd aan en 30% uit). Voor beide proeven zijn aan het eind de toename van het vers- respectievelijk drooggewicht bepaald. Tevens zijn op 2 momenten tijdens de proeven fotosynthesemetingen verricht. Het gehele experiment is ter controle herhaald.

De resultaten zijn bemoedigend. Bij de fotosynthesemetingen in de tweede en derde week van de duurproeven verliep de fotosynthese bij pulslucht gemiddeld per eenheid PAR-licht 8,5% efficiënter en per eenheid elektrische energie 13,5% efficiënter dan bij continu licht.

Voor de groei over de gehele periode werd vastgesteld dat pulseren resulteerde in 5% minder versgewicht en 11 à 12% minder drooggewicht bij een 25 à 26% lager energieverbruik. Per eenheid elektrische energie betekent dit dat het versgewicht bij de pulserende belichting circa 28% hoger lag en het drooggewicht circa 19% hoger.

Een pulserende (rood/blauwe) LED-lamp waarbij de “aan-stroom” even groot is als van een zelfde maar continu brandende LED-lamp, blijkt een hoger fotonrendement te hebben (dat wil zeggen: de lamp zendt per eenheid elektrische energie meer fotonen uit). Bij 70% duty cycle en 1 kHz was de gebruikte LED-lamp tijdens de fotosynthesemetingen gemiddeld 5,4% efficiënter dan de continue lamp. Rekening houdend met het hogere fotonrendement van de pulserende LED-lamp, kan worden gesteld, dat per eenheid PAR-licht het versgewicht bij pulserend licht circa 21% en het drooggewicht circa 13% hoger lag dan bij continu licht.

Op basis van vergelijking met de lichtregel voor sla - 1% minder licht leidt tot 0,8% minder vers- en drooggewicht - mag worden geconcludeerd dat pulserende (LED-)belichting efficiënter is dan continue belichting: bij pulserende belichting leidt 1% minder licht tot slechts 0,25% minder versgewicht en 0,57% minder droog-gewicht.

Bij het vaststellen van de mate waarin puur het pulseren van het licht de verklaring is voor de verbeterde groei-efficiëntie (betrokken op PAR-licht) dient nog te worden nagegaan of (en zo ja, welk deel van) de verbetering wordt veroorzaakt door verschillende posities van de gemiddelde lichtintensiteiten van pulserend respectievelijk continu licht op de lichtresponscurve van sla (specifiek voor de gebruikte kleuren en kleurenverhouding).

Uit de fotosynthesemetingen die ter oriëntatie voorafgaand aan de groeiproeven zijn uitgevoerd bij verschillende duty cycles tussen 10% en 100%, bleek bij de onderzochte planten (sla, melganzevoet en zwarte nachtschade), dat de mate van fotosynthese per eenheid PAR-licht (“fotosynthese-efficiëntie”) het hoogst is bij kleine duty cycles, en wel meer naarmate de duty cycle kleiner is.

Op basis van de bovengenoemde bevindingen wordt aanbevolen de besturing van het pulserende LED-belichtingssysteem zodanig te wijzigen dat de pulsintensiteit kan worden opgevoerd bij afnemende duty-cycle, zodat met de LED-lamp in een - qua fotosynthese-efficiëntie - optimaal gebied kan worden geopereerd, en voor deze condities het groei-experiment nog eens te herhalen. Door het pulsniveau daarbij zodanig te kiezen, dat bij beiden typen licht dezelfde (gemiddelde) lichtsom wordt verkregen, worden vertroebelende effecten als verbetering van het fotonrendement van de pulserende LED-lamp en (mogelijke) “lichtresponscurveverschillen” uitgesloten en kunnen de resterende vraagtekens rond de conclusies worden weggenomen.

De gevonden resultaten gelden voor belichting in een klimaatcel zonder daglichttoetreding. In het geval van *additionele* belichting in een kas zullen voor het vers- en drooggewicht de verschillen tussen continue en pulserende belichting naar verwachting wat kleiner zijn. Om de grootte van het effect van additionele (pulserende) belichting vast te stellen, wordt aanbevolen het in de vorige alinea beschreven groei-experiment ook in een (proef)kas uit te voeren. Hiervoor is het nodig een ander LED-armatuur te ontwikkelen dat optimaal is afgestemd op toepassing in een kas. Hierbij dient met name daglichtonderschepping zoveel mogelijk te worden vermeden. Ook kan de kleurenverhouding rood/blauw mogelijk wat anders worden gekozen, afhankelijk van de behoefte aan aanvullend blauw licht. Minder blauw licht is in principe gunstig voor het omzettingsrendement van het integrale LED-systeem.

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

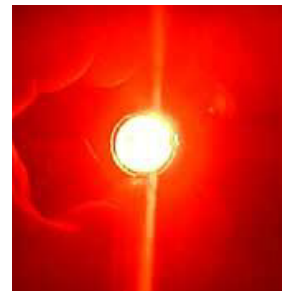
Assimilatiebelichting in de glastuinbouw gaat gepaard met een hoog energieverbruik. Anno 2005 is meer dan 1/5 van het Nederlandse glasareaal belicht. Assimilatiebelichting verbruikt in het algemeen een forse hoeveelheid elektriciteit (25-125 W/m², bij belichtingsniveaus tussen circa 3.000 en 15.000 lux; 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). Naarmate het belichtingsniveau verder boven de 5000 lux komt is het moeilijker (c.q. praktisch onmogelijk) voor belichtende tuinder om binnen de energienormen uit het Besluit glastuinbouw te blijven. In het over enkele jaren verwachte CO₂-emissiehandelsstelsel is de naar verwachting door de overheid vrij ter beschikking te stellen 'CO₂-ruimte' onvoldoende om zonder aankoop van CO₂-emissierechten te kunnen blijven produceren.

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 [1]) 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" [1] 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.

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



Figuur 1.1 Voorbeeld van hoogvermogen LED

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 significante 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 veel lager energieverbruik.

Over de precieze werking van de reactiecentra en 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 [1] 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 experimenten zijn in dit rapport gegeven.

- 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
- LED's hebben een zeer lange levensduur (circa 50.000 à 100.000 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

- De kleur van LED's kan zodanig worden gekozen dat het licht zich in een golflengte gebied bevindt, waarvoor het menselijk ook 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.

Behalve de autonome technische ontwikkeling van de LED's door fabrikanten, waardoor LED's efficiënter worden, 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 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 een project uitgevoerd om aan na te gaan of het hierboven beschreven effect daadwerkelijk aanwezig is. In dit rapport wordt de aanpak van het project beschreven en de resultaten gepresenteerd.

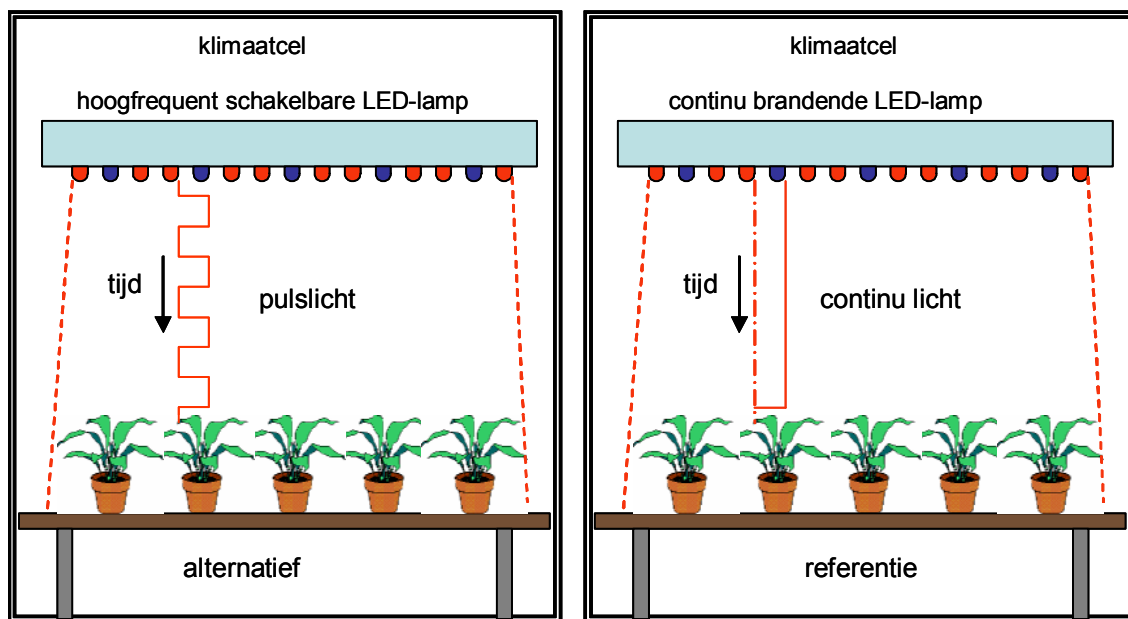
1.2 Doelstelling en aanpak

Doel van het project was het aantonen van het principe dat bij gewasbelichting met hoogfrequent geschakelde (pulserende) belichting een significante besparing op het specifieke energieverbruik voor belichting - uitgedrukt in kWh_e per eenheid product - mogelijk is in vergelijking met continue belichting (proof-of-principle).

Hiertoe zijn twee belichtingsarmaturen met LED's ontwikkeld, waarvan er één gepulst licht kan uitzenden en de ander vergelijkbaar, maar alleen continu licht. Er is voor LED's gekozen omdat hoogfrequent pulseren niet met hogedruknatrium lampen kan, terwijl LED's hiervoor wel bij uitstek geschikt zijn. In een klimaatcel zijn 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.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft beknopt het ontwerpproces van de LED-lampssystemen 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.



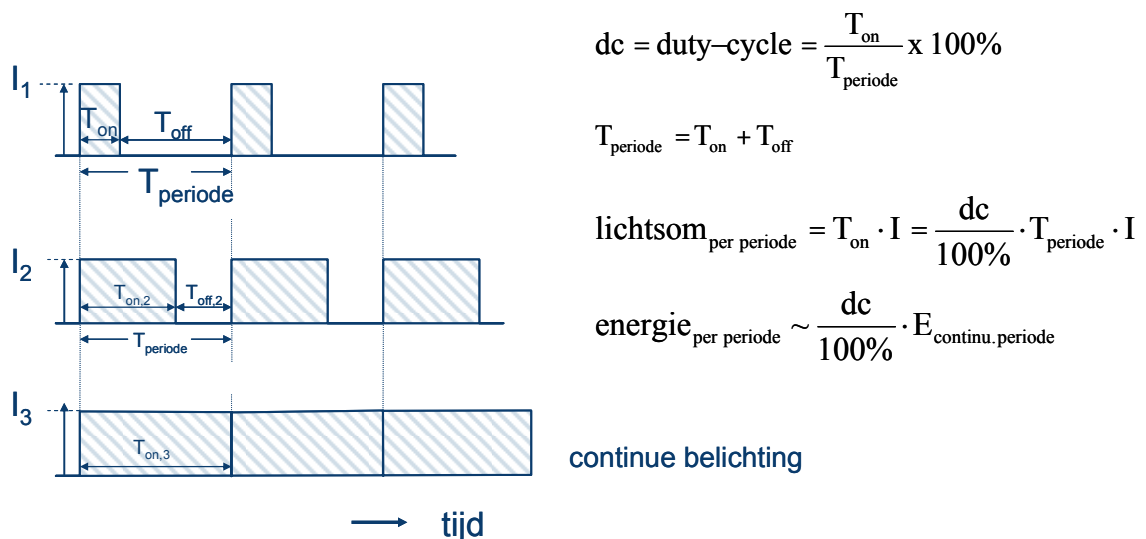
Figuur 1.2 Principe van het plant-experiment ten behoeve van het “proof-of-principle”

2 ONTWIKKELING LED-LAMPEN

Aan de LED-lampen voor het proof-of-principle 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:

- het lichtniveau moet zo hoog zijn, dat goede plantengroei mogelijk is zonder daglicht. Als streefniveau voor de continue lamp is $300 \mu\text{mol/s/m}^2$ gehanteerd¹
- 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) [2]. Daarnaast wordt circa 20% blauw licht toegevoegd, om er voor te zorgen dat er geen ongewenste strekkingsgroei optreedt [3]
- de geschakelde LED-lamp (“pulslamp”) moet zo mogelijk bedreven kunnen worden met frequenties tussen 0 en 10 kHz en een instelbare duty-cycle tussen 0 en 100%. De duty-cycle is gedefinieerd als de verhouding van de aan-tijd en de totale periodetijd, zie figuur 2.1
- de pulsvorm moet de rechthoek zo goed mogelijk benaderen
- als de pulslamp continu licht uitzendt, moet dit hetzelfde niveau en lichtverdeling hebben als de continue lamp



I = lichtintensiteit (in $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)

Figuur 2.1 Principe van geschakelde belichting en definitie van duty-cycle

¹ Bij assimilatiebelichting gaat het 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 $\mu\text{mol/s/m}^2$.

- de LED-lampen moeten elk een oppervlak van circa 80 bij 80 cm² egaal beschijnen, zodat circa 16 plantjes per opstelling kunnen worden gebruikt
- de warmte die de LED's produceren moet op zodanige wijze worden afgevoerd, dat de bedrijfstemperatuur niet te hoog oploopt. Dit geldt in het bijzonder voor de rode LED's omdat het omzettingsrendement van die LED's nogal afhangt van de temperatuur [1]
- de LED's dienen te worden verwerkt in een stevig 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) zend bij een chiptemperatuur van 25 °C circa 1,14 µmol/s uit [1]. 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.

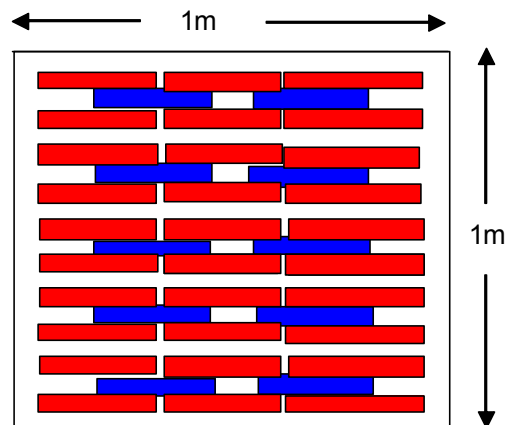
Uit montagetechnisch oogpunt is gekozen voor LED-strips waarop 12 LED's zijn voormonteerd (Luxeon Lines). De LED's hierop hebben een goede warmteafvoer naar de aluminium draagstrip. De LED's op de strip zijn voorzien van externe optiek en geven een gerichte lichtbundel met een openingshoek van 2x6° (dat 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 2.2.

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) worden aluminium koelelementen gemonteerd, (Grotendeels) via deze elementen wordt de in de LEDchips 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 2.2 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-LEDchiptemperatuur die verwacht werd bij 24 °C omgevingstemperatuur ten tijde van ontwerp. De verhouding van rood en blauw licht is ongeveer 4:1

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

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 constante stroom bedreven. Derhalve is er voor gekozen de LED-strips met een stroombronmodule aan te sturen (één per strip).

Voor de geschakelde LED's moet het mogelijk zijn de stroom in- en uit te schakelen. Omdat alle LED's tegelijkertijd in en uit moeten schakelen, worden de verschillende modules aangestuurd met een blokgolfgenerator waarvan het signaal op de pulsingang van de stroombronmodules wordt aangesloten. Met de blokgolfgenerator 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%).

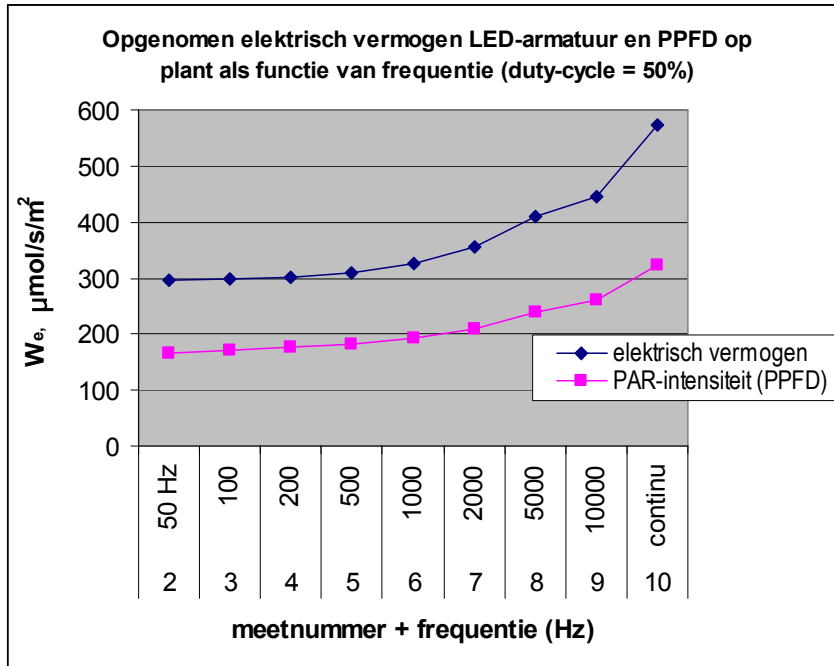
De belangrijkste kenmerken van de LED-lampen zijn samengevat in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kenmerken van LED-lamp voor proof-of-principle experiment

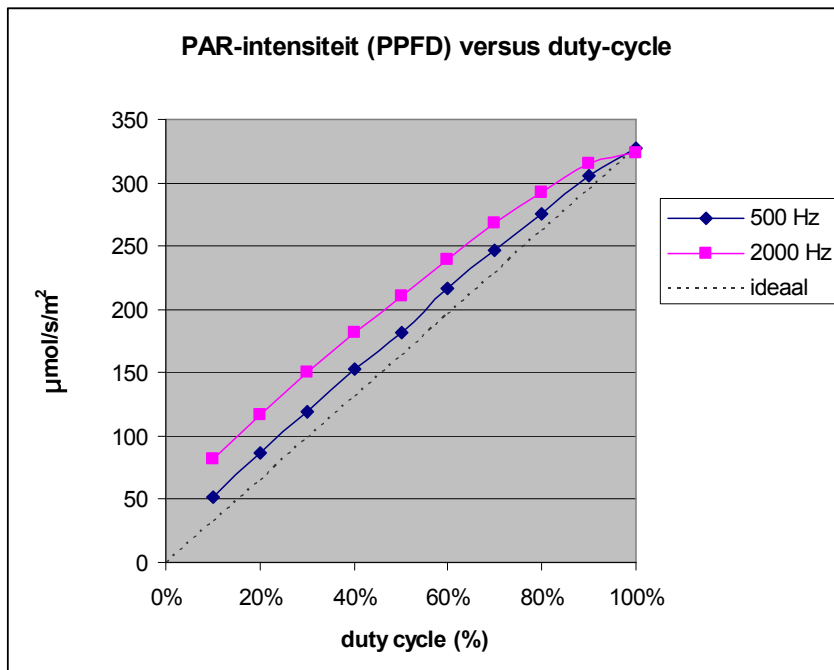
	Waarde	eenheid	Opmerking
golflengte rode LED's	620-631	nm	
golflengte blauwe LED's	480-485 460-465	nm nm	90% van de blauwe LED's 10% van de blauwe LED's
aantal LED's rood	360		30 x 12-LED-strips
aantal LED's blauw	120		10 x 12-LED-strips
PAR-lichtstroom (foton flux)	ca 385	$\mu\text{mol/s}$	Tomg = 18 °C
opgenomen elektrisch vermogen	567	W_e	AC-vermogen voeding
fotonrendement LED-systeem	ca 0,68	$\mu\text{mol/s}/W_e$	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 ca 60% van het uitgezonden licht
Gemiddelde PPFd op testoppervlak	325	$\mu\text{mol/s}/\text{m}^2$	Bij continu branden. Piek 350 $\mu\text{mol/s}/\text{m}^2$ in centrum

Geschakelde LED-armatuur

Met het geschakelde LED-armatuur kunnen frequenties tot 10 kHz worden ingesteld. Bij lage frequenties (tot 100 Hz) is de pulsvorm bij goede benadering rechthoekig. Op de stroompulsen (van circa 650 mA) zit een kleine hoogfrequente zaagtand gesuperponeerd (circa 250 kHz, +/-25 mA). Dit heeft te maken met de wijze waarop de stroombronmodule werkt (geschakelde transistor met inductieve belasting en vrijloopdiode, rendement circa 87%). Bij hogere frequenties wordt de pulsvorm wat minder ideaal. Met name de "dalende" flank van de pulsvorm wordt wat minder stijl en wel meer naarmate de frequentie hoger wordt. Daardoor wordt ook de energie-inhoud van de pulsen wat groter bij toenemende frequentie en daarmee samenhangend de hoeveelheid licht per puls. Voor een ingestelde "duty-cycle" van 50% is voor verschillende frequenties het opgenomen elektrisch vermogen en de PAR-lichtintensiteit (PPFD, in $\mu\text{mol/s}/\text{m}^2$) ter hoogte van het gewas aangegeven in Figuur 2.3.



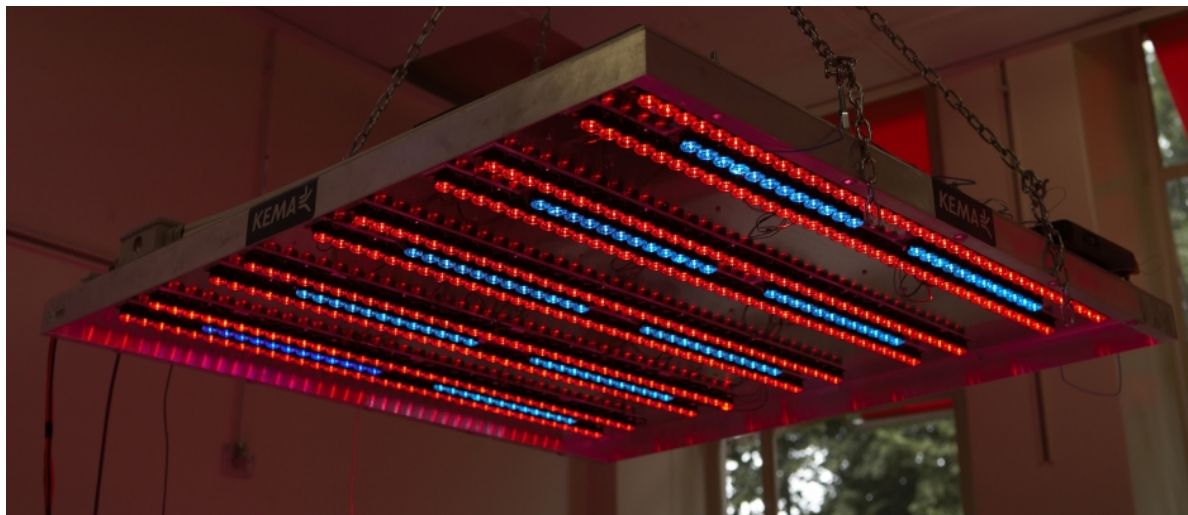
Figuur 2.3 Gemeten opgenomen elektrisch vermogen van het geschakelde LED-armatuur als functie van de puls-frequentie uitgaande van een pulsduty-cycle van 50%. Tevens is de PAR-lichtintensiteit gegeven ter hoogte van het gewas



Figuur 2.4 PAR-intensiteit (PPFD) van geschakeld LED-armatuur als functie van de duty-cycle bij twee verschillende puls-frequenties. Tevens is de ideale schakellijn aangegeven (gestippeld)

Figuur 2.4 geeft de PAR-lichtintensiteit van het geschakelde armatuur weer als functie van de duty-cycle, voor frequenties van 500 respectievelijk 2000 Hz. Ter referentie is ook de ideale schakellijn aangegeven (gestippeld). Het feit dat bij 2000 Hz de lichtintensiteit iets hoger ligt dan bij 500 Hz is in overeenstemming met het hoger opgenomen elektrisch vermogen bij de eerste frequentie (zie Figuur 2.3).

Er wordt verder nog opgemerkt dat de intensiteit van de stroompulsen door de pulserende LED's even hoog is als de intensiteit van de stroom van de continu brandende LED's. De momentane lichtintensiteit van de gepulste LED's in de aan-fase is waarschijnlijk iets hoger, omdat de armatuurtemperatuur van de pulserende LED-lamp vanwege de lagere vermogensdissipatie wat lager ligt dan van de continue lamp. Hoeveel hangt onder meer af van de duty cycle. Bij 50% duty cycle en 2000 Hz ligt de armatuurtemperatuur circa 6 °C lager. Dit betekent met name dat de rode LED's van de pulserende lamp wat efficiënter zullen zijn dan die van de continu brandende LED's [1]. Op basis van de documentatie wordt de efficiencywinst van de rode LED's geschat op circa 13%. Voor de blauwe LED's is de efficiencywinst geringer (circa 1,3%). Omdat de totale LED-lamp een systeem is bestaande uit een combinatie van rode en blauwe LED's-, stroombronbesturingen en geschakelde gelijkspanningsvoeding ingebed in een bepaalde (thermische) omgeving, zal de efficiencyverandering van het complete armatuur een resultante zijn van de effecten van de diverse onderdelen en de omgevingscondities. Het totale effect laat zich lastig exact berekenen. Tijdens het plantexperiment (zie hoofdstuk 3) zijn lichthoeveelheidsmetingen en elektrische vermogensmetingen uitgevoerd op basis waarvan een indicatie is verkregen. Daarbij is verondersteld, dat de gebruikte PAR-lichtmeter (die in principe de lichthoeveelheid over 1 seconde bepaalt) ook in staat is de gemiddelde hoeveelheid gepulst licht correct te meten. Daarnaast is een berekening gemaakt op basis van de thermische huishouding van de LED-armaturen aangevuld met de gemeten elektrische vermogens van de continue en gepulste LED-lampen. Voor 50% duty cycle en een puls frequentie van 2 kHz wordt op basis van boven beschreven analyses een efficiencyverbetering van circa 11,5 à 12% verwacht ten opzichte van de continue LED-lamp. Voor 70% duty-cycle en 1 kHz (condities plant-experiment) wordt op basis van thermische berekeningen een circa 7,3% hogere efficiency verwacht dan bij continu bedrijf. Ook tijdens de fotosynthesemetingen bij verschillende duty cycles (zie paragraaf 3.3) zijn PAR-lichtmetingen (met een andere, in de fotosynthesemeter geïntegreerde sensor) en elektrische vermogensmetingen uitgevoerd. De grootste rendementsverbetering trad hierbij op bij een duty cycle van 40% en lag tussen 4 en 6% (onder andere afhankelijk van frequentie en waarschijnlijk ook van de mate waarin een stationaire thermische toestand is bereikt). Bij de interpretatie van de groei-experimenten moet rekening worden gehouden met een efficiencyverbetering van de gepulste lamp afhankelijk van de schakelcondities. Ook zal de verhouding rood/blauw iets verschuiven (procentueel iets meer rood bij de continue lamp).



Figuur 2.5 LED-lamp voor “proof-of-principle” van pulserend licht

Uitvoeringsvorm

Figuur 2.5 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 binnentredende licht. 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 blauw licht, hetgeen in principe gunstig is voor het omzettingsrendement van het belichtingssysteem.

Elektrische aansluiting

De primaire zijde van de (geschakelde) gelijkspanningsvoeding van het LED-lampstelsel wordt aangesloten op een normaal 220 V wisselspanningsnet. De aansluitwaarde bedraagt circa 571 W. Het (continu brandende) LED-lampstelsel gedraagt zich als een capacatieve belasting met een $\cos\phi$ van circa 0,78. Voor de pulserende lamp is de $\cos\phi$ nagenoeg gelijk maar varieert tussen 0,76 en 0,80 afhankelijk van de schakelcondities (bij 70% duty cycle en 1000 Hz was gemiddelde waarde 0,79 met een enkele “uitschieter” naar 0,78 respectievelijk 0,80). Met een oscilloscoop is visueel de golfvorm van het wisselspanningspunt waarop de

LED-lampen waren aangesloten, geïnspecteerd op mogelijke vervormingen in de sinus of spanningspiekjes. Deze verschijnselen werden in de (beperkte) visuele inspectie niet aangetroffen.

Bij capacatieve belastingen kunnen grote inschakelstromen optreden. In de huidige opstelling zijn die beperkt door de "inrushstroom" bij het inschakelen te beperken door een serieweerstand in het circuit op te nemen, die na de startup wordt kortgesloten. Deze oplossing zit standaard in de gebruikte schakelende voeding verwerkt. Bij eventueel grootschalige gebruik van LED's met schakelende voedingen in kassen, zal met inschakelstromen ook rekening moeten worden gehouden. Dit kan onder andere door de LED-lampen niet alle tegelijk in te schakelen, maar bijvoorbeeld sectiegewijs (bij conventionele assimilatiebelichting gebeurt dat overigens meestal ook zo). Een andere (eventueel additionele) oplossing is - met behulp van elektronica - de lampen precies op het moment van de nuldoorgang van de wisselspanning in te schakelen. Dit schakelmoment geeft de laagste inschakelstroom. De duur en hoogte van de inschakelstroom wordt mede bepaald door het kortsluitvermogen van het voedende net.

3 PLANTEXPERIMENT MET PULSERENDE LED'S

Door: Tom Dueck & Johan Steenhuizen, PRI, Wageningen.

3.1 Opzet van het experiment

In een plantexperiment uitgevoerd in een klimaatkamer bij PRI, werden de mogelijkheden van energiebesparing door LED-belichting te laten pulseren getest. De respons van planten blootgesteld aan pulserende LED's werd vergeleken met de respons van planten blootgesteld aan continue brandende LED's. Daarvoor moeten de overige klimaatcondities bij beide belichtingregimes vergelijkbaar zijn, en zodanig gekozen dat normale groei mogelijk is.

Er werd een experiment in een klimaatkamer uitgevoerd met twee behandelingen, één behandeling waarin planten werden blootgesteld aan continue LED-belichting ("control"), en één behandeling waarin planten werden blootgesteld aan pulserende LED-belichting.

3.2 Materiaal & Methodes

Voorstudie

Voorafgaand aan het feitelijke experiment is er een aantal metingen uitgevoerd aan verschillende plantensoorten om een indruk te krijgen van de plant-respons op veranderingen in pulserende LED's, de frequentie van pulsen en de verhouding van duur van de "licht-aan" periode en de duur van de totale periode, de zogenaamde duty cycle. De gebruikte plantensoorten waren zwarte nachtschade (*Solanum nigrum*) en melganzevoet (*Chenopodium album*).

Planten

Het experiment werd uitgevoerd met sla (*Lactuca sativa*). Kropsla Zendria RZ werd vooraf gezaaid en opgekweekt in potten met potgrond (1 plant per pot) tot dat aan volgroeide bladeren fotosynthese gemeten kon worden, dat wil zeggen de bladeren waren groot genoeg om volledig in het bladcuvet van de fotosynthesemeter te passen (met in totaal 4-7 bladeren, waarvan 2-3 volgroeide bladeren). Onder beide LED-opstellingen werden 16 potten met slaplanten geplaatst op een vochtig-gehouden viltdoek in een kweekbak. Om de dag werden de planten van plaats in de kweekbak verwisseld om effecten van plaatselijke verschillen in lichtintensiteiten te minimaliseren.

Experimentele condities

De behandelingen vonden plaats in een klimaatkamer, en waren van elkaars' invloed gescheiden door een plastic wand tussen beide op te trekken.

Het experiment werd herhaald. Nadat het eerste experiment beëindigd was, zijn jonge planten opnieuw ingezet. De beoogde duur van de herhalingen bedroeg 4 weken. Vanwege kropvorming bedroeg de duur van de herhalingen respectievelijk 24 en 22 dagen.

Klimaat

Het klimaat in de klimaatkamer werd ingesteld met een dag/nacht temperatuur van 18°C/15°C en 70% RV. De LED-belichting werd ingeschakeld om 08:00 met 14/10 uur dag/nacht. Het licht was afkomstig van LED-armaturen, samengesteld met overwegend rood licht met daarnaast (circa 20%) blauw licht.

De lichtintensiteit werd gemeten op planthoogte met een lichtsensor van ADC op de fotosynthesemeter van LCPro. Onder de continue LED-belichting werd op een bepaalde positie in de buurt van het midden van de kweekbak een gemiddelde lichtintensiteit van $296 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemeten. Bij pulserend licht (op ongeveer dezelfde positie in de andere kweekbak) werd een gemiddelde lichtintensiteit van circa $236 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ vastgesteld. Deze ligt lager doordat bij pulserende belichting de LED's steeds even uitgaan. Hierbij dient te worden vermeld dat er gemeten is met een ADC lichtsensor die lichtintensiteit registraties integreert per seconde.

Fotosynthese metingen

Van 8 planten werd de bladfotosynthese gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCPro, ADC, U.K.) aan het vierde (volgroeide) blad (van boven geteld). Metingen werden uitgevoerd bij standaardcondities in de bladcuve, 500 ppm_{CO2} en 16°C. De fotosynthesemeter meet de CO₂ concentratie en waterdampspanning van de lucht die de bladkamer binnenkomt en van de uitgaande lucht. Op basis van het verschil wordt de fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en de geleidbaarheid van de huidmondjes ($\text{m}^2 \text{s}/\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}$) en de CO₂ concentratie in het blad (ppm) berekend.

Destructieve oogst

Na beëindiging van het experiment werden de planten geoogst en de data geanalyseerd. De krop werd verwijderd, gewogen voor versgewicht, gedroogd 48 uur bij 80°C en daarna opnieuw gewogen en het drooggewicht bepaald.

3.3 Resultaten

3.3.1 Keus frequentie en duty cycle

Door metingen van de actuele fotosynthese aan zwarte nachtschade, melganzevoet en sla bij verschillende frequenties en duty cycles van de lichtpulsen, werd een indruk verkregen hoe planten reageren op deze variabelen. Op basis van deze resultaten werd een keus gemaakt voor de te gebruiken frequentie en duty cycle in het (duur)experiment.

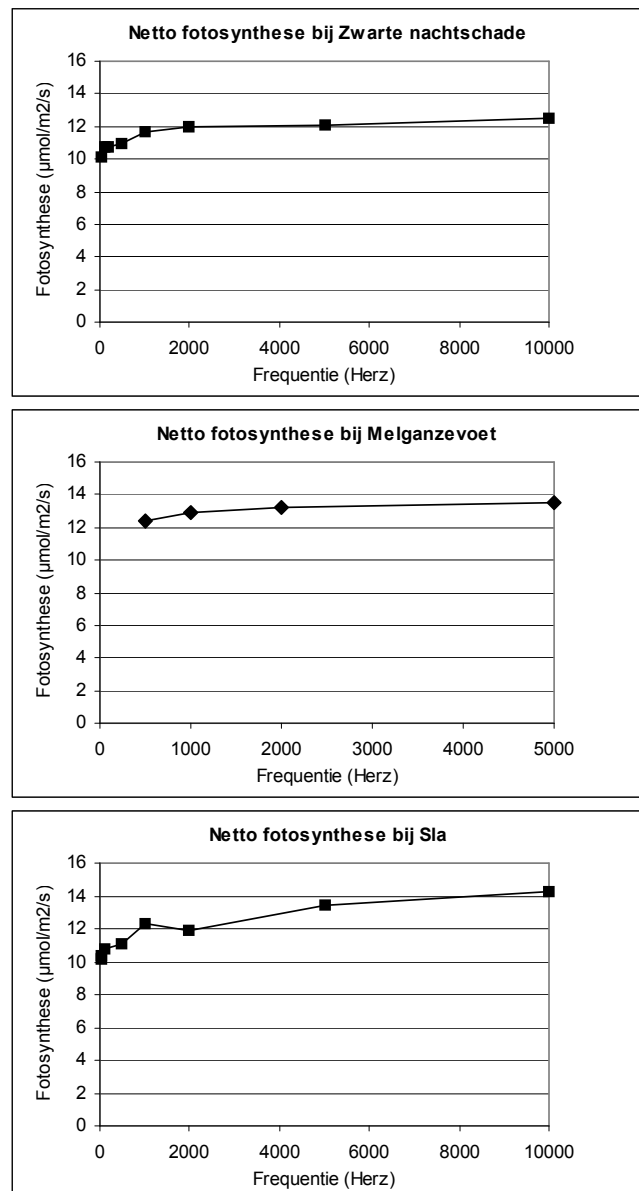
3.3.1.1 Fotosynthese metingen bij verschillende frequenties

Het effect van puls-frequentie op de fotosynthese werd bij alle drie plantensoorten vastgesteld bij een duty cycle van 50%.

De maximale fotosynthese werd gemeten voor alle soorten in de controle bij continu licht, dat wil zeggen bij 100% duty cycle, en bedroeg $12-14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (zie Figuur 3.1). Bij zwarte nachtschade en melganzevoet werd de fotosynthese bij afnemende frequentie geleidelijk minder tot aan circa 1000 Hz waaronder het snel vermindert. Vooral bij zwarte nachtschade, waar meerdere metingen zijn verricht bij lager frequenties is dat goed zichtbaar.

Bij sla geldt hetzelfde, al was de gemeten fotosynthese bij 2000 Hz iets lager dan wat verwacht zou mogen worden, gelet op de overige metingen bij sla en de vorm van de curves bij zwarte nachtschade en melganzevoet.

Er is gekozen om de fotosynthesemetingen aan sla tijdens het experiment uit te voeren bij een frequentie van 1000 Hz.



Figuur 3.1. Fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gemeten aan zwarte nachtschade, melganzevoet en sla bij 50% duty cycle en verschillende frequenties.

3.3.1.2 Fotosynthesemetingen bij verschillende duty cycles

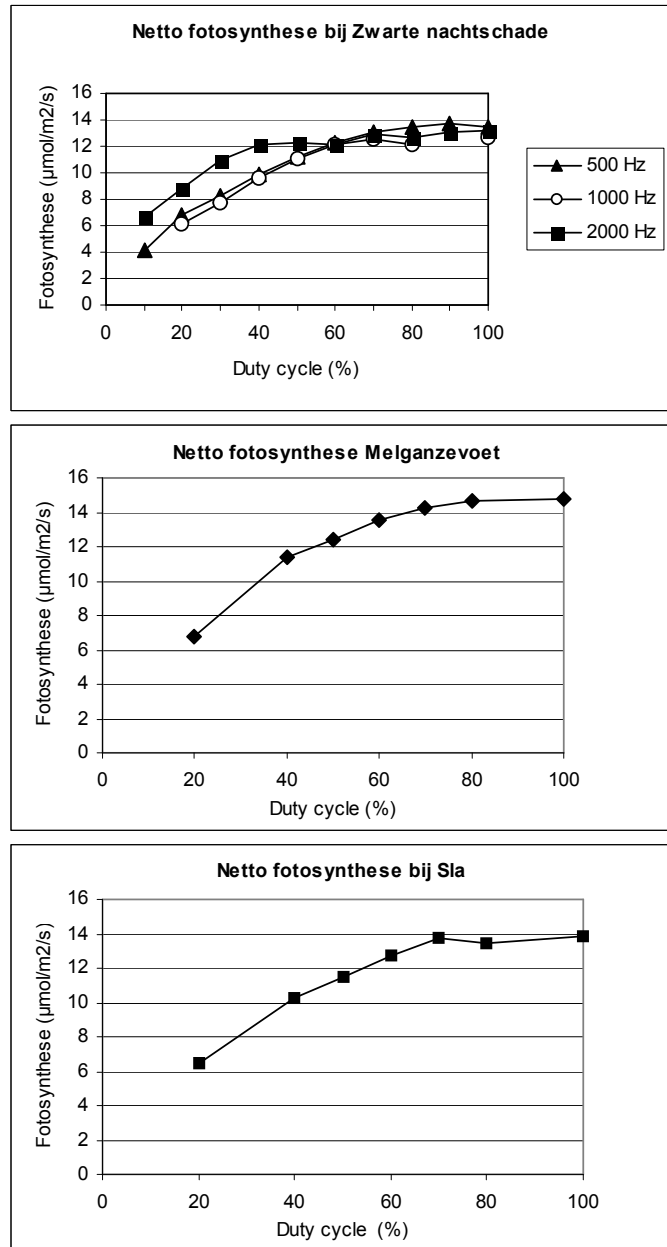
Het effect van de duty cycle op de fotosynthese werd bij alle drie plantensoorten vastgesteld bij één of meerdere frequenties.

Omdat er in de literatuur (Jao & Fang, 2003; Kenji & Yasuhiro, 2004) aanwijzingen zijn dat bij lage duty cycles een verbeterde groei mogelijk was, zijn de verkennende metingen bij een grote reeks van duty cycles uitgevoerd. Het verkregen beeld bij alle drie de plantensoorten echter, gaf een toename in de fotosynthese met een toenemende duty cycle aan (Figuur 3.2).

Metingen bij 2000 Hz aan zwarte nachtschade suggereerden dat al een hoge fotosynthese bereikt kon worden bij duty cycles vanaf 50%. Tussen 50% en 100% duty cycle leek er niet veel meer fotosynthese mogelijk.

De fotosynthese van melganzevoet en sla, gemeten bij respectievelijk 500 en 1000 Hz, liet een verzadigingscurve zien die op een lichtresponscurve lijkt. Dit suggereerde dat met een toenemende "licht-aan" periode de fotosynthese ook toeneemt.

Op basis van deze waarnemingen is er voor gekozen om de duurproeven aan sla uit te voeren bij een duty cycle van 70%, omdat de fotosynthese hierbij slechts weinig minder is dan bij continu licht, terwijl bij een lagere duty cycle de fotosynthese vrij snel gaat dalen.



Figuur 3.2 Fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gemeten aan zwarte nachtschade (bij 500, 1000 en 2000 Hz), melganzevoet (500 Hz) en sla (1000 Hz) bij duty cycles van 10-100%.

3.3.2 Experimenten

3.3.2.1 Klimaatcondities tijdens experiment

De temperatuur op gewashoogte werd gemeten vanwege het verschil in energieopname die bij de continue en pulserende LED-belichting optreedt, waardoor er mogelijk ook een verschil in temperatuur bij de planten zou kunnen zijn. Op planthoogte onder continue belichting werd een gemiddelde temperatuur van 19,4°C gemeten, terwijl onder pulserend belichting 19,2°C werd gemeten.

3.3.2.2 Experiment 1

Fotosynthese metingen

Fotosynthesemetingen werden uitgevoerd in de tweede en vierde week van het experiment. Omdat de slapplanten begonnen met kroppen was het in de vierde week vaak niet meer mogelijk om het gewenste blad (het vierde, volgroeide blad) in het bladcuvet te plaatsen zonder het te breken. Er werden een aantal fysiologisch oudere bladeren gemeten waardoor de metingen bemoeilijkt werden door overlappende bladeren met veel meer variatie tussen de metingen als gevolg. Deze metingen werden onbetrouwbaar geacht en zijn derhalve niet meegenomen in deze rapportage.

Tabel 3.1 Netto fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) van sla (gemiddelde \pm SE²) bij continue en pulserende LED-belichting (1000 Hz, 70% duty cycle) na twee en vier weken behandeling (n=8). Tevens zijn de gemeten lichtintensiteit en het opgenomen elektrische vermogen van de LED-lampen gegeven

Behandeling	Fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		PARlicht ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Elektrisch vermogen W	
	2 ^e week	4 ^e week	2 ^e week	4 ^e week	2 ^e week	4 ^e week
continu	16,53 \pm 0,24	*	291	291	566,8	566,8
Puls	14,23 \pm 0,36	*	234	238	431,7	430,2
Ratio puls/continu	0,86		0,806	0,818	0,762	0,759
* metingen onbetrouwbaar						

² SE = standard error = standaard deviatie gedeeld door wortel van het aantal waarnemingen.

De fotosynthesemetingen onder continue LED-belichting, dat wil zeggen met een duty cycle van 100%, en die bij pulserende LED-belichting (70% duty cycle en 1000 Hz) zijn weergegeven in Tabel 3.1. Bij de gegeven lichtomstandigheden werd gemiddeld $16,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ geassimileerd bij continue belichting. Bij pulserende LED's werd $14,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gemeten, 86% van de fotosynthese ten opzichte van die bij continue belichting. Dit betekent dat bij circa 74% van de verbruikte energie bij pulserende LED's ten opzichte van continue LED's (= verhouding van het gemeten elektrisch vermogen van pulsbelichting respectievelijk continue belichting) een vermindering van 14% in fotosynthese werd gerealiseerd.

Biomassa en groei

Voorafgaande aan het experiment werden 6 slaplanten geoogst. De vers- en drooggewicht bedroeg bij de start van het experiment gemiddeld bijna 11 en 0,5 g (Tabel 3.2). Na beëindiging van het experiment, werden alle planten geoogst. Bij meerdere planten in beide behandelingen werd aan de jongste 3-5 bladeren een lichte mate van rand geconstateerd.

De gemeten biomassa aan vers- en drooggewicht is in Tabel 3.2 weergegeven. Zowel het vers- als drooggewicht bereikt onder continue LED-belichting was hoger dan onder pulserend LED-belichting. De verhouding biomassa bij pulserend licht ten opzichte van continu licht was 0,95 voor het versgewicht en 0,88 voor het drooggewicht.

Tabel 3.2 Biomassa (g) van sla (gemiddelde \pm SE) bij continue en pulserende LED-belichting (1000 Hz, 70% duty cycle)

Behandeling/datum	Versgewicht (g)	Drooggewicht (g)
Start exp. 27-09-2005	$10,76 \pm 0,50$	$0,47 \pm 0,19$
Oogst 20-10-2005		
continu	$129,11 \pm 4,17$	$8,98 \pm 0,23$
puls	$123,06 \pm 2,94$	$7,91 \pm 0,22$
verhouding puls/continu	0,95	0,88

Gedurende het experiment heeft de pulserende LED-lamp 134,6 kWh elektrische energie verbruikt en de continue LED-lamp 182,7. Dit betekent dat bij 73,7% van de verbruikte energie bij pulserende LED's ten opzichte van continue LED's, een vermindering van 5% in versgewicht en 12% in drooggewicht werd gerealiseerd.

3.3.2.3 Experiment 2

Fotosynthesemetingen

De tweede herhaling van het experiment duurde van 25 oktober tot en met 15 november, 22 dagen in totaal. Fotosynthesemetingen werden uitgevoerd in de tweede en derde week van het experiment. De fotosynthesemetingen onder continue LED-belichting (duty cycle van 100%), en die bij pulserende LED-belichting (70% duty cycle en 1000 Hz) zijn weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Netto fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) van sla (gemiddelde \pm SE) bij continu en gepulserende LED-belichting van experiment 2 (1000 Hz, 70% duty cycle) na twee en drie weken behandeling. Tevens zijn de gemeten lichtintensiteiten en de opgenomen elektrische vermogens van de LED-lampen gegeven.

Behandeling	Fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		PARlicht ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Elektrisch vermogen W	
	2 ^e week	3 ^e week	2 ^e week	3 ^e week	2 ^e week	3 ^e week
continu	17,08 \pm 0,41	14,57 \pm 0,60	298	304	566,8	567,1
puls	14,40 \pm 0,39	13,02 \pm 0,39	238	241	433,0	433,0
Ratio puls/continu	0,843	0,894	0,798	0,792	0,764	0,764

Bij de gegeven lichtomstandigheden werd op 2 november 17,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ geassimileerd bij continue belichting. Bij pulserend LED's werd 14,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemeten, wat betekent circa 84% van de fotosynthese ten opzichte van die bij continue belichting. Dit betekent dat bij circa 24% minder energie (76% van de verbruikte energie bij pulserende LED's ten opzichte van continue LED's) een vermindering van 16% in fotosynthese werd gerealiseerd. Op 9 november was de fotosynthese wat minder ten opzichte van de week daarvoor, en bedroeg 14,6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij continue en 13,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij pulserend LED-belichting. Onder invloed van pulserende belichting werd 89% (= 11% vermindering) van de fotosynthese gerealiseerd ten opzichte van de fotosynthese onder continue belichting bij 76% van het energieverbruik.

Biomassa en groei

Het versgewicht van de slaplanten bij het begin van de tweede herhaling van het experiment was 12,5 g en in de 3 weken daarna onder LED-belichting werd ongeveer 90 g aan versgewicht gewonnen (Tabel 3.4). Op 15 november werd het experiment beëindigd en werden alle planten geoogst.

Bij meerdere planten in beide behandelingen werd aan de jongste 3-5 bladeren een licht mate van rand geconstateerd.

Tabel 3.4 Biomassa (g) van sla (gemiddelde \pm SE) bij continue en pulserende LED-belichting van experiment 2 (1000 Hz, 70% duty cycle)

Behandeling/datum	Versgewicht (g)	Drooggewicht (g)
Start exp. 25-10-2005	12,49 \pm 1,05	0,68 \pm 0,06
Oogst 15-11-2005		
continu	106,83 \pm 2,97	7,10 \pm 0,17
puls	101,63 \pm 3,45	6,30 \pm 0,18
verhouding puls/continu	0,95	0,89

Zoals ook bij fotosynthese het geval was, was zowel het vers- als drooggewicht bereikt onder continue LED-belichting hoger dan onder pulserende LED-belichting. De verhouding biomassa bij pulserend licht ten opzichte van continu licht was ook 0,95 voor het versgewicht en 0,89 voor het drooggewicht.

Gedurende het experiment heeft de pulserende LED-lamp 139,5 kWh elektrische energie verbruikt en de continue LED-lamp 185,4. Dit betekent dat bij 75,2% van de verbruikte energie bij pulserende LED's ten opzichte van continue LED's, een vermindering van 5% in versgewicht en 11% in drooggewicht werd gerealiseerd.

3.3.2.3 Discussie

Het experiment werd uitgevoerd om het “proof of principle” te testen: is het mogelijk om energie te besparen door licht te laten pulseren. In het ideale geval zou een vermindering van het lichtsom door LED's te laten pulseren gepaard gaan met handhaving van de groei. Van een aantal plantensoorten is gerapporteerd dat ze goed kunnen groeien onder LED-belichting, waaronder slaplanten (Jao & Fang, 2003). In vergelijking met de huidige LED-samenstelling (circa 80% rood en 20% blauw), is eerder gevonden dat rode LED's met 10% blauw fluorescent belichting bij tarwe resulteerde in vergelijkbare drooggewicht productie als onder wit licht (Goins et al., 1997). Ook werd geconstateerd dat de plantvorm en drooggewicht productie bij sla verbetert onder invloed van blauw licht ten opzichte van wit licht (Yamazaki et al., 2000).

Beoogd werd in dit experiment dezelfde productie te realiseren bij pulserend licht als bij continu licht, en zo niet, tenminste een aanwijzing verkrijgen dat energiebesparing mogelijk is. In dit experiment was de fotosynthese en groei van slaplanten, onder invloed van pulserende LED-belichting in alle gevallen minder dan dat onder invloed van continue LED-belichting³. Op zich hoeft dat geen negatief resultaat te zijn. Immers, het toegepaste pulserende licht met een 70% duty cycle kost circa 25 à 26% minder energie. Hierbij wordt ongeveer 20% minder licht geproduceerd. Het is nu de vraag of bij pulserend licht de fotosynthese-efficiëntie gelijk is of hoger dan bij continu licht. De data van de fotosynthese en de groei bij sla suggereren een energiebesparing bij pulserende LED's. Bij een energiebesparing van gemiddeld 25,5% door LED's te laten pulseren, werd de fotosynthese (slechts) met 11-16% verminderd, de droogstof productie met 11-12% en het versgewicht met 5%. Dit betekent ongeveer 11-12% minder groei (op droge stof basis) bij 25,5% minder energie (en circa 20% minder licht). In Marcelis et al. (2004) wordt gerapporteerd dat onder zonlichtomstandigheden in de kas de productie van zowel het versgewicht als het drooggewicht van sla met gemiddeld 0,8% afneemt bij een vermindering van 1% van de lichtintensiteit. In het huidige experiment was er een verschil in lichtintensiteit van circa 20% dat heeft geresulteerd in een afname van het versgewicht met 5% en van het drooggewicht van 11-12%. Dit zou betekenen dat met 1% minder licht, een afname wordt gerealiseerd van 0,25% minder versgewicht en 0,57% minder drooggewicht. Voor het versgewicht is de afname circa 31% van de één-procent-respons van slaplanten op zonlicht (0,8%), en voor het drooggewicht is dat 72%, beide in het voordeel van LED-belichting. Hiermee lijkt het “proof of principle” geleverd te zijn.

³ De fotosynthese van experiment 1 in de 4-de week lag gemiddeld wel hoger dan dat van de continue meting. De verhouding puls/continu bedroeg hier circa 1,15. Hierbij moet worden bedacht dat deze fotosynthesewaarden een relatief grote onnauwkeurigheid hebben en gemeten zijn aan fysiologisch oudere, deels bedekte bladeren met een circa 50% lager fotosyntheseniveau.

Er dienen echter nog enkele vragen te worden beantwoord. Er dient nog beter te worden nagegaan in hoeverre de verhoogde energiebenuttingsefficiëntie bij de pulsbelichting een gevolg is van betere lichtbenuttingsefficiëntie door de plant respectievelijk een beter omzettingsrendement (“fotonrendement”) van de pulserende LEDlamp. Daartoe dient nauwkeuriger dan in de uitgevoerde experiment is gebeurd te worden vastgesteld wat de lichtsom (over de proefperiode) is van het pulserende LED-licht respectievelijk het continue LED-licht. (De fotosynthese bij beide behandelingen dient bij voorkeur ook te worden vergeleken bij gelijke lichtsom, zie voorlaatste alinea van paragraaf 3.4). De nu geschatte 20% reductie in de lichthoeveelheid is gebaseerd op de lichtmetingen gedaan tijdens de 4 fotosynthesemetingen. Dit zijn relatief kortstondige metingen en de waarden van de continue belichting en pulsbelichting zijn enigszins afhankelijk van de plaats in de kweekbak, waardoor de bepaalde gemiddelde verhouding niet representatief hoeft te zijn voor het gemiddelde over de gehele tafel (en over de gehele meetperiode). Verder dient te worden nagegaan of de lichtmeter in staat is om de (gemiddelde) lichtsom bij pulserend licht correct te meten, of dat er mogelijk afwijkingen op treden door het pulserende karakter van het licht.

Verder moet worden bedacht dat behalve de genoemde betere lichtbenutting (fotonbenutting) door de plant, en het betere omzettingsrendement (“fotonrendement”) van de pulsLED-lamp, mogelijk ook de verwachte verschuiving van de rood/blauwverhouding bij pulserende LED's een rol bij de groeiverschillen kan hebben gespeeld.

Er zou moeten worden getest of de lichtintensiteit die een plant “registreert” gelijk is aan de lichtintensiteit die een lichtsensor registreert (en integreert per seconde). Daarmee zouden de verschillen in fotosynthese groei mogelijk (deels) kunnen worden verklaard. Een dergelijk test was technisch niet mogelijk om uit te voeren in het experiment, maar dient wel onderzocht te worden. Het is zo dat het primaire fotochemisch proces van fotosynthese plaats vindt in zeer korte tijd (picoseconde tot nanoseconde) volgens Diner (1986), en het electrontransport proces in iets langere tijd (microseconde tot milliseconde) volgens Whitmarsh & Cramer (1979). Kenji & Yasuhiro (2004) vonden dat de electronen flow beter verloopt onder invloed van pulserend licht. Dit zijn aanwijzingen dat de (puls)lichtintensiteiten die er gemeenten zijn, mogelijk anders door de plant worden ervaren.

De verkregen data suggereren dat energiebesparing mogelijk is door het toepassen van pulserende LED-belichting. Of de gekozen frequentie en duty cycle de beste combinatie is geweest moet nog worden onderzocht.

3.4 Verdere analyse van fotosynthese- en groeidata

Jacques de Ruijter, KEMA.

Uit de fotosynthesedata van Tabel 3.1 en Tabel 3.3 zijn naast de genoemde verhoudingsgetallen (ratio's) van de puls- respectievelijk continue waarden van fotosynthese, PAR-lichtintensiteit en elektrisch vermogen de volgende verhoudingen bepaald:

- “ratio PAR-lichtintensiteit” / “ratio elektrisch vermogen”
- “ratio fotosynthese” / “ratio PAR-lichtintensiteit”
- “ratio fotosynthese” / “ratio elektrisch vermogen”.

Het eerste getal geeft aan hoeveel maal de PAR-lichtintensiteit per Watt elektriciteit bij pulseren hoger ligt dan bij continu licht. Op basis hiervan kan de toename van efficiency van de LED's worden ingeschat als gevolg van het pulseren (of eigenlijk als gevolg van de temperatuurdaling van de LED's die daardoor optreedt). De tweede ratio geeft aan hoeveel maal de fotosynthese per eenheid PAR-licht bij pulseren hoger ligt dan bij continu licht. De derde ratio geeft aan hoeveel maal de fotosynthese per eenheid elektrische energie bij pulseren hoger ligt dan bij continu licht. De resultaten zijn gegeven in Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Verhoudingsgetallen van puls- respectievelijk continue belichtingssituatie van uitgevoerde fotosynthesemetingen bij sla bij een puls duty cycle van 70% en een frequentie van 1000 Hz (4 momentopnamen + gemiddelde)

Puls/continu ratio's	1-ste experiment		2-de experiment		Gemiddeld*
	2-de week	4-de week	2-de week	3-de week	
Ratio fotosynthese	0,86	**	0,843	0,894	0,866
Ratio PAR-lichtintensiteit	0,806	0,818	0,798	0,792	0,803
Ratio elektrisch vermogen	0,762	0,759	0,764	0,764	0,762
Ratio PAR-licht/Ratio elektr.vermogen	1,058	1,077	1,045	1,037	1,504
Procentuele toename PAR-licht per eenheid elektr.energie door pulseren ***	5,8%	7,7%	4,5%	3,7%	5,4%
Ratio fotosynthese/ratio PAR-licht	1,068	**	1,056	1,129	1,085
Procentuele toename fotosynthese per eenheid PAR-licht door pulseren	6,8%	**	5,6%	12,9%	8,5%
Ratio fotosynthese/ratio elektr.vermogen	1,130	**	1,104	1,171	1,135
Procentuele toename fotosynthese per eenheid elektrische energie door pulseren (+ temp effect)	13,0%	**	10,4%	17,1%	13,5%

* gemiddelde is over 3 waarnemingen bepaald indien een betrouwbare waarde voor de 4-de week van het eerste experiment ontbrak, anders over 4 waarnemingen

** gegevens worden onbetrouwbaar geacht

*** de toename is eigenlijk een gevolg van het temperatuurverschil dat als gevolg van de verminderde vermogenstoevoer door het pulseren optreedt

Uit de tabel blijkt op basis van de 3 in de resultaten meegenomen fotosynthesemetingen dat de fotosynthese per eenheid PAR-licht bij pulserend licht gemiddeld 8,5% efficiënter is geweest. Per eenheid energie was dat 13,5%⁴. Bij de vergelijking van puls en continue data van de fotosynthesemetingen moet worden bedacht dat de fotosynthesemeter zo goed mogelijk op dezelfde plaats onder het armatuur is geplaatst, maar kleine positieverschillen zijn niet uitgesloten en kunnen een deel van de variatie in de cijfers verklaren.

⁴ Zouden overigens de metingen van de 4-de week van het eerste experiment (waarin een grotere variatie zit) in de resultaten worden meegenomen dan zouden de twee genoemde cijfers 16,5% respectievelijk 23% bedragen.

Verder zijn voor de vers- en drooggewicht meetgegevens voor de twee experimenten (waarin de integrale effecten over een duur van 3,5 respectievelijk 3 weken zijn vervat) ook de hierboven genoemde ratio's bepaald. Daarbij is voor de verbetering van de LED-efficiency door pulseren, die niet integraal over de meetperiodes is bepaald, als best guess de gemiddelde waarde uit Tabel 3.5 genomen (5,4%). De resultaten staan in Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Verhoudingsgetallen van de puls- respectievelijk continue belichtingssituatie van de uitgevoerde vers- en drooggewicht bepalingen van de 2 groei-experimenten van sla (pulskenmerken: duty cycle 70%, frequentie 1 kHz)

Puls/continu ratio's	1-ste experiment		2-de experiment		Gemiddeld exp.1+2	
	Vers-gewicht	Droog-gewicht	Vers-gewicht	Droog-gewicht	Vers-gewicht	Droog-gewicht
Ratio groei	0,95	0,88	0,95	0,89	0,95	0,885
Ratio PAR-lichtintensiteit*	0,803*	0,803*	0,803*	0,803*	0,803	0,803
Ratio elektrisch energieverbruik	0,737	0,737	0,752	0,752	0,745	0,745
Ratio PAR-licht/Ratio elektr.vermogen*	1,054*	1,054*	1,054*	1,054*	1,054	1,054
Procentuele toename PAR-licht per eenheid elektr.energie door pulseren ***	5,4%	5,4%	5,4%	5,4%	5,4%	5,4%
Ratio groei/ratio elektr.energieverbruik	1,294	1,196	1,263	1,183	1,278	1,189
Procentuele toename fotosynthese per eenheid elektrische energie door pulseren (+ temp effect)	29,4%	19,6%	26,3%	18,3%	27,8%	18,9%
					vers	droog
Ratio groei/ratio PAR-licht	1,228	1,134	1,198	1,122	1,213	1,128
Procentuele toename groei per eenheid PAR-licht door pulseren	22,8%	13,4%	19,8%	12,2%	21,3%	12,8%

* hiervoor is de gemiddelde waarde van de 4 fotosynthesemetingen genomen (zie Tabel 3.5)

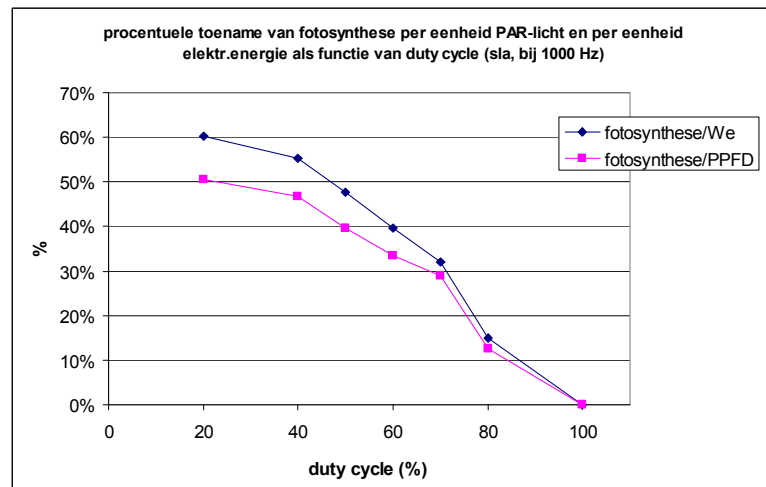
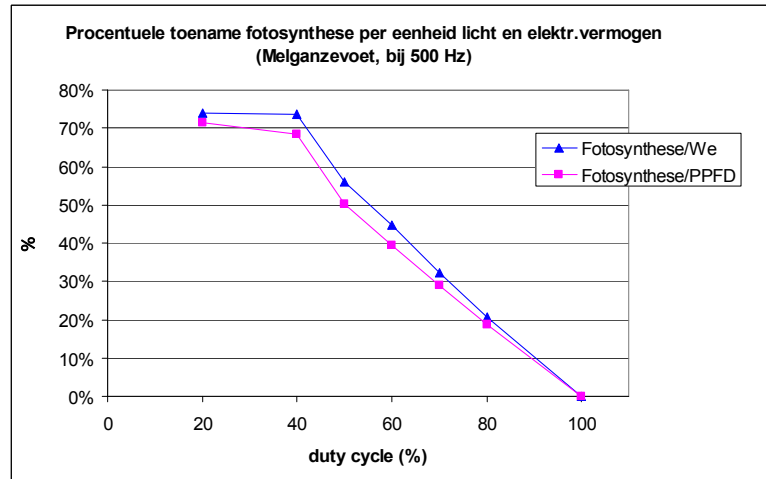
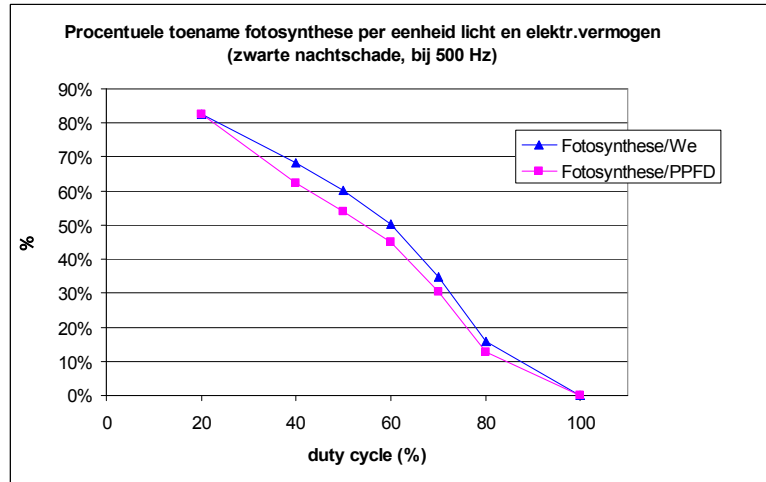
** de toename is eigenlijk een gevolg van het temperatuurverschil dat als gevolg van de verminderde vermogenstoevoer door het pulseren optreedt

Uit de laatste (vetgedrukte) cijfers van Tabel 3.6 blijkt dat de procentuele toename van de groei van sla per eenheid PAR-licht door pulseren gemiddeld circa 21% bedroeg voor het versgewicht en circa 13% voor het drooggewicht.

Bij de interpretatie van deze cijfers dient nog te worden afgevraagd of een deel van de toename van de groei-efficiëntie per eenheid licht door het pulseren mogelijk nog kan worden verklaard door de mogelijkheid dat de gemiddelde lichtniveaus van pulslicht respectievelijk continu licht zich op een deel van de lichtresponscurve bevinden met een verschillende hel-

ling (dit effect zou met name optreden als het continu-lichtniveau te dicht in de buurt van verzadiging zou komen). De lichtresponscurven van sla zijn niet onder deze LED-belichting gemeten en zijn bovendien mogelijk voor gepulst licht anders als voor continu licht. Het is zinvol in een projectvervolg hier meer onderzoek naar te verrichten, of – beter nog - een zodanig experiment in te richten dat een zo'n mogelijk "lichtresponseffect" uitgesloten wordt. Dit laatste kan bijvoorbeeld worden bereikt door het pulslucht zodanig te "dimensioneren" dat het gemiddelde pulslucht per eenheid tijd evenveel PAR-licht bevat als continu licht (gelijke lichtsom). Dit betekent dat de pulsintensiteit in de aanperiode hoger moet worden dan het niveau van de continue belichting. In dat geval wordt naar verwachting ook grotendeels het temperatureffect op de efficiency van de pulserende LED-lamp vermeden. Met de huidige aansturing van de LED-lampen kan een hogere pulsintensiteit niet worden gerealiseerd, met een andere besturing naar verwachting wel. Er wordt aanbevolen dit in een projectvervolg nader te onderzoeken, ter gehele of gedeeltelijke bevestiging van de gevonden bevindingen en om resterende vraagtekens weg te nemen.

Het verhogen van de intensiteit van de lichtpulsen lijkt ook nog vanuit een ander perspectief interessant. De resultaten van de duty cycle experimenten suggereren dat bij het verkorten van de duty-cycle de mate van fotosynthese per eenheid licht (de "fotosynthese-efficiency") toeneemt. Dit effect is geïllustreerd in grafieken van Figuur 3.3 (tevens is hierin de fotosynthese per eenheid toegevoerde elektrische energie uitgezet, die in het grootste deel van de curve nog wat hoger ligt, omdat bij duty cycles kleiner dan 100% de LEDlampefficiëntie wat toeneemt). Omdat echter – bij gelijkblijvende "aan-lichtintensiteit" van de LED's - de absolute hoeveelheid licht afneemt naarmate de duty cycle korter wordt, zal de absolute fotosynthese en daarmee de gewasproductie toch dalen. Het idee is nu door bij kortere pulsen (kleinere duty cycles) de lichtintensiteit van de LED's in de aan-fase te verhogen (binnen wat technisch toelaatbaar is), het absolute niveau van de fotosynthese kan worden verhoogd (zo mogelijk tot het zelfde niveau als bij continue belichting), terwijl de energiebesparing die optreedt bij de kortere pulsen voor een aanzienlijk deel behouden blijft. De (kostbare) LED's worden dan ook – qua potentiële lichtstroom - beter benut, wat ook beter is voor de rentabiliteit van het LED-belichtingssysteem. Er wordt aanbevolen een projectvervolg uit te voeren waarbij dit "korte-puls/hoge-intensiteits-principe" nader wordt onderzocht.



Figuur 3.3 Procentuele toename van de fotosynthese per eenheid PAR-licht (PPFD) en per eenheid elektrisch vermogen als functie van de duty cycle voor zwarte nachtschade (500 Hz), melganzevoet (500 Hz) en sla (1000 Hz).

Reductie fotosynthese

Uit de fotosynthesemetingen aan sla in de 2-de en 3-de week (en vierde week bij experiment 1) bleek de absolute fotosynthese voor zowel continue als pulserende belichting na de tweede week af te nemen (zie Tabel 3.1 en Tabel 3.3). Bij continue belichting was de afname groter dan bij pulserende belichting (voor de derde week circa 15% voor continue- versus 10% voor pulslicht). Deze waarnemingen suggereren dat de fotosynthese bij pulserende belichting minder hard terugloopt dan bij continue belichting.

3.5 Referenties hoofdstuk 3

- Diner, B.A. 1986. The reaction center of Photosystem II. In *Encyclopedia of Plant Physiology*. (Staehelein & Arntzen, eds). Pp. 422-436. Springer Verlag, Berlin.
- Goins, G.D., Yorio, N.C., Sanwo, M.M. & Brown, C.S. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LED's) with and without supplemental blue lighting. *J. Exp. Bot.* 48:1407-1413.
- Jao, R.C. & Fang, W. 2003. An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. *Appl. Eng. Agricult.* 19:601-608.
- Kenji, Y. & Yasuhiro, M. 2004. Method of cultivating plant and illuminator for cultivating plant. Patent nr. US2004109302.
- Marcelis, L., Broekhuijsen, G., Meinen, E, Nijs, L. & Raaphorst, M. 2004. Lichtregel in de tuinbouw: 1% licht = 1% productie? PRI Nota 305, 82p
- Whitmarsh, J. & Cramer, W.A. 1979. Cytochrome f function in photosynthetic electron transport. *Biophys. J.* 26:223-234.
- Yamazaki, A., Tsuchiya, H., Miyajima, H., Honma, T. & Kan, H. 2000. Application of red laser diode as a light source for plant production. In: *Transplant Production in the 21st Century* (C. Kubota & C. Chun, eds). pp. 119-124. Kluwer Academic Publishers.

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, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Experimenten met sla:

1. De met een frequentie van 1 kHz en een duty cycle van 70% pulserende LED-belichting levert bij een 25 à 26% lager energieverbruik 5% minder versgewicht en 11 à 12% minder drooggewicht.
2. Per eenheid energie betekent dit dat het versgewicht bij de pulserende belichting circa 28% hoger lag en het drooggewicht circa 19% hoger.
3. Een pulserende (rood/blauwe) LED-lamp waarbij de aanstroom even groot is als van een zelfde maar continu brandende LED-lamp heeft een hoger fotonrendement (dat wil zeggen: zendt per eenheid elektrische energie meer fotonen uit).
4. Op basis van de PAR-lichtmetingen in de fotosynthesemeter en onder de aanname dat de lichtmeter de lichtsom van het pulserende licht correct meet, wordt geraamd dat de lichtsom (in $\mu\text{mol m}^{-2}$) bij de pulserende LED-lamp (bij 70 % duty cycle en 1 kHz) circa 79 à 80% was van die van continue belichting. Het elektrisch energieverbruik bedroeg circa 74 à 75% van dat van continue belichting.
5. Bij 70% duty cycle en 1 kHz was de gebruikte LED-lamp tijdens de fotosynthesemetingen gemiddeld 5.4% efficiënter dan de continue LED-lamp.
6. Rekening houdend met het hogere fotonrendement van de pulserende LED-lamp, kan worden gesteld, dat per eenheid PAR-licht het versgewicht bij pulserend licht circa 21% en het drooggewicht circa 13% hoger lag dan bij continu licht.
7. Op basis van vergelijking met de lichtregel voor sla – 1% minder licht leidt tot 0,8% minder vers- en drooggewicht - mag worden geconcludeerd dat pulserende belichting efficiënter is dan continue (LED-)belichting (bij pulserende belichting leidt 1% minder licht tot slechts 0,25% minder versgewicht en 0,57% minder drooggewicht).
8. Bij het vaststellen van de mate waarin puur het pulseren van het licht de verklaring is voor de verbeterde groei-efficiëntie (betrokken op licht) dient nog te worden nagegaan of (en zo ja welk deel van) de verbetering wordt veroorzaakt door de plaats van de PPFD's (photosynthetic photon flux density) van pulserend respectievelijk continu licht op de licht-responscurve van sla (voor de gebruikte kleuren en kleurverhouding).

Fotosynthesemetingen:

9. Bij de fotosynthesemetingen aan sla in de tweede en derde week van de duurproeven verliep de fotosynthese (bij een puls frequentie van 1 kHz en een duty cycle van 70%) gemiddeld per eenheid PAR-licht 8,5% efficiënter en per eenheid elektrische energie 13,5% efficiënter dan bij continu licht.
10. De absolute fotosynthese bij sla nam voor zowel continue belichting als pulserende belichting af na de tweede week. Bij de continu belichte planten was de afname groter dan bij de pulserend belichte planten.
11. Uit de fotosynthesemetingen uitgevoerd bij verschillende duty cycles, blijkt bij zowel sla als melganzevoet en zwarte nachtschade, dat de mate van fotosynthese per eenheid PAR-licht ("fotosynthese-efficiëntie") het hoogst is bij kleine duty cycles, en wel meer naarmate de duty cycle kleiner is.

4.2 Aanbevelingen

Uit de "duty-cycle experimenten" van het "proof-of-principle" project blijkt, 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). Hierbij wordt ca 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 met behoud van een substantiële (circa 25 à 40%) besparing op het elektriciteitsverbruik ten opzichte van continue belichting wordt 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 geheel andere elektronische aansturing van de LED's (de bestaande systemen hebben een vaste intensiteit bij veranderende duty cycle). Randvoorwaarden hierbij zijn de maximaal toelaatbare stroom van de LED's en de maximale toegestane LED-temperatuur ("junction-temperatuur"). Uit kostenoverwegingen wordt aanbevolen de aansturing te ontwikkelen voor en te implementeren op het LED-armatuur dat in het "proof-of-principle" project is gebruikt (zie Figuur 2.5).

Deze gewijzigde aansturing kan ook worden gebruikt om het uitgevoerde 70% duty-cycle experiment te herhalen waarbij de pulshoogte van de pulserende belichting zodanig gekozen wordt dat het gemiddelde PAR-lichtniveau gelijk wordt aan dat van de continue belichting. Hierdoor wordt bij beide belichtingen een gelijke lichtsom bereikt. Op deze wijze wordt ongeveer dezelfde LED-lamp temperatuur verkregen, waardoor er bij het pulseren geen LED-efficiency-verbetering optreedt, en bevinden de PPFD's van pulserende belichting en continue belichting zich op dezelfde plaats op de lichtresponscurve, waardoor een mogelijk "licht-

responsecurve-verschil" wordt uitgesloten. Op deze wijze kan op eenduidige wijze het effect van pulseren worden vastgesteld en is derhalve een nuttige aanvulling op het hier uitgevoerde "proof-of-principle". Overigens kan in plaats van 70% duty cycle ook een lagere duty cycle worden genomen, zolang de stroom door de pulserende LED's maar niet de maximale waarde overschrijdt. Gezien het in de eerste alinea beschreven effect wordt aanbevolen de duty-cycle zo laag te nemen, dat net de maximaal toelaatbare stroom door de LED's wordt bereikt.

Om zo goed mogelijk de effecten van het pulseren te kunnen vaststellen is het proof-of-principle-experiment uitgevoerd in een klimaatcel zonder daglichttoetreding. In de beoogde uiteindelijke toepassingen zullen de LED's (in de meeste gevallen) als aanvullende belichting op het daglicht gebruikt gaan worden. De resultaten uit het proof-of-principle experiment 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 proefkas. Hiervoor is het nodig een ander ontwerp van het belichtingssysteem te maken dat rekening houdt met daglichttoetreding. Zowel het mechanische, thermische als optische ontwerp van het LED-belichtingssysteem dienen hiervoor te worden aangepast. Bij de toepassing van aanvullende belichting kan de verlichtingssterkte (PPFD) beperkt blijven tot een fractie van de PPFD in de klimaatcel (circa 20 à 40%). Ook kan de kleurenverhouding rood/blauw mogelijk wat anders worden gekozen, afhankelijk van de behoefte aan aanvullend blauw licht. Minder blauw licht is in principe gunstig voor het omzettingsrendement van het integrale LED-systeem.

LITERATUUR

- [1] J.A.F. de Ruijter, "Verkenning van het perspectief van LED's voor gewasbelichting in de glastuinbouw", rapportnummer 50361787-KPS/TCM 04-2059, KEMA, juli 2004.
- [2] "Veel fabels rond belichting", Groenten & Fruit, wk 37, 2003.
- [3] "Feiten en fabels in belichtingsland", Vakblad voor de bloemisterij 39 (2003).