

LED lyskilder til styring af krysantemumvækst

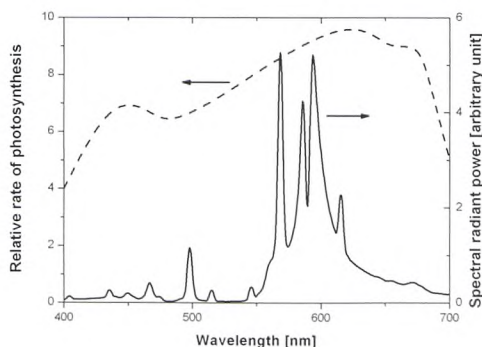
Af Birgitte Thestrup og Carsten Dam-Hansen, Forskningscenter Risø, DTU og Janni Bjerregaard Lund, Det Biovidenskabelige Fakultet (tidl. KVL), Københavns Universitet

LED lyskilder har et stort kommercielt potentiale som kunstlyskilde til potteplanteproduktion her i Danmark. I denne artikel beskriver vi et nyt LED lyskildesystem til fotosynteseforsøg hvor det er muligt, at styre lysets irradians og spektralfordeling i et klimakammer med krysantemumplanter. Disse specialudviklede LED lyskilder giver mulighed for, at få detaljeret viden om hvordan forskellige lysforhold påvirker planterne. Hensigten er at designe kunstlyset til en bestemt potteplanteplante, således at planternes fotosyntese og planteformning optimeres.

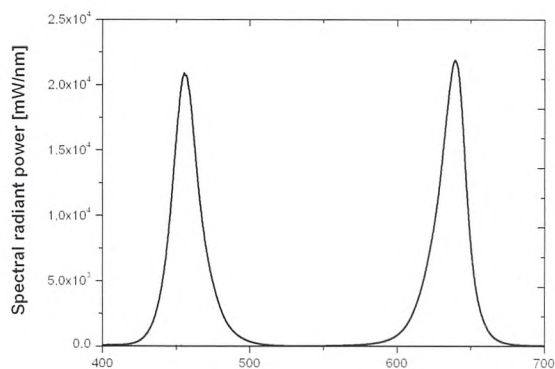
Indledning

Siden forskergrupper på Wisconsin University og NASA Kennedy Space Center i begyndelsen af 90'erne påbegyndte en række forsøg med LED lys til plantevækst i rummet [1,2], er der sket en rivende udvikling på LED området. Fra at være en ret energineffektiv lyskilde med et lysudbytte på få lumen per Watt (lm/W) fås i dag høj-effekts LED'er med et typisk lysudbytte på 50 lm/W, og effektiviteten af LED'er forventes i 2012 at nå op på 150 lm/W ifølge en lys-teknologi "roadmap" rapport fra The U.S. Department of Energy [3]. Dette vil svare til 10 gange effektiviteten af en almindelig 60 W glødepære og langt overgå effektiviteten af lysstofrør, der ligger på 50-100 lm/W. I takt med at LED'er er blevet mere effektive, er de begyndt at afløse og udkoncurrere traditionelle typer af lyskilder i en lang række anvendelser. Et af de områder, hvor LED'er er blevet kommercielt interessante indenfor de seneste år er indenfor væksthushproduktion af nytte- og pryplanter.

I Danmark har vi en stor væksthushproduktion af potteplanter, alene i 2003 udgjorde værdien af potteplanteproduktionen i nærheden af 3 mia. kr. For at få ensartede planter af høj kvalitet hele året, belyses disse i vintermånederne med kunstlys, hvilket betyder at gartnerierne har et stort el-forbrug til belysning (99 kWh/m² i 2004 i gennemsnit). Det er dog kun en mindre procentdel af det kunstlys, der benyttes i dag, som potteplanterne rent faktisk kan udnytte til fotosyntesen.



Figur 1A. Måling af spektralfordeling af en højtryksnatriumlampe (HPS) i PAR-området. Til sammenligning er skitseret fotosyntesens middelvirkningsspektrum for 20 forskellige afgrøder (baseret på data fra [4]).



Figur 1B. Måling af spektralfordeling for henholdsvis en blå og rød høj-effekts LED.

I figur 1A er vist en målt spektralfordeling i det synlige område for en højtryksnatriumlampe (HPS), som er den kunstlyskilde, der primært benyttes i væksthuse i dag. I samme figur er til sammenligning skitseret et middelvirkningsspektrum for fotosyntesen af 20 forskellige afgrøder. Under fotosyntesen benytter planter energi i hele det synlige område af spektret fra 400 nm til 700 nm, men dog primært i det blå og det røde område af spektret, eftersom lyset fortrinsvis absorberes af de to grønne pigmenter klorofyl a og b. Klorofyl a har absorptionstoppe ved 435 nm og 665 nm, mens klorofyl b har absorptionstoppe ved 465 nm og 640 nm [4]. Højtryksnatriumlampen er mest effektiv i det gul-orange område, som ligger uden for de ovennævnte absorptionstoppe. Derudover har lampen en relativ stor varmestråling, som ikke kan ses i figuren. Dette, samt tab i lampen, betyder, at det er en begrænset del af lampens elforbrug, der går til energi som direkte kan anvendes af potteplanterne. Til sammenligning er i figur 1B vist målte spektralkurver for henholdsvis en blå og en rød høj-effekts LED, hvis spektre med peakbølgelængder på 455 nm og 639 nm dækker begge toppe i fotosyntesens virkningsspektrum i modsætning til højtryksnatriumlampens spektrum.

På trods af, at højtryksnatriumlamper er særdeles energi-effektive (se boks 1), forventes det, at potteplanteplanteplante, der belyses med LED lyskilder med et spektralt design tilpasset potteplantens virkningsspek-

trum, vil kunne udnytte 25-33 % af lampernes energiforbrug i fotosyntesen med de LED'er, der findes i dag. Det er en virkningsgrad, der matcher den der opnås med højtryksnatriumlamper, og virkningsgraden for LED lyskilder forventes at stige i de kommende år. LED lyskilder har desuden den fordel frem for højtryksnatriumlamper, at lyset ikke indeholder varmestråling og derfor kan lyskilderne placeres tæt på planterne, hvilket gør lyskilderne interessante til f.eks. plantetransport. For en given potteplanteekultur, er det derfor interessant at bestemme den optimale LED spektralfordeling og det optimale lysintensitetsniveau for fotosyntesen.

Boks 1: Lidt om LED lys

Lysemitterende dioder (LED'er) anses af mange som værende fremtidens belysningsteknologi på grund af en række fordele ved disse relativt nye lyskilder i forhold til traditionelle lyskilder. LED'er er kompakte, robuste enheder med høj lysstrøm, høj energieffektivitet, ingen IR-lysstråling og UV-stråling, lang levetid på 20.000-50.000 timer og mulighed for dæmpning. Effektiviteten af LED'er afhænger af farven og ligger i området fra 15 lm/W for blå LED'er og op til omkring 100 lm/W for rød/orange LED'er. Den totale lysudstråling fra de kraftigste LED'er ligger over 100 lm.

LED'er er halvlederkomponenter, som udsender lys i et snævert spektralområde med en bredde på 20-30 nm. Der fremstilles LED'er i en lang række forskellige farver, som i det synlige område dækker farverne blå, cyan, grøn, orange, rød/orange og rød.

Effektivitet af lyskilder til plantebelysning:
(enheder forklares i boks 2)

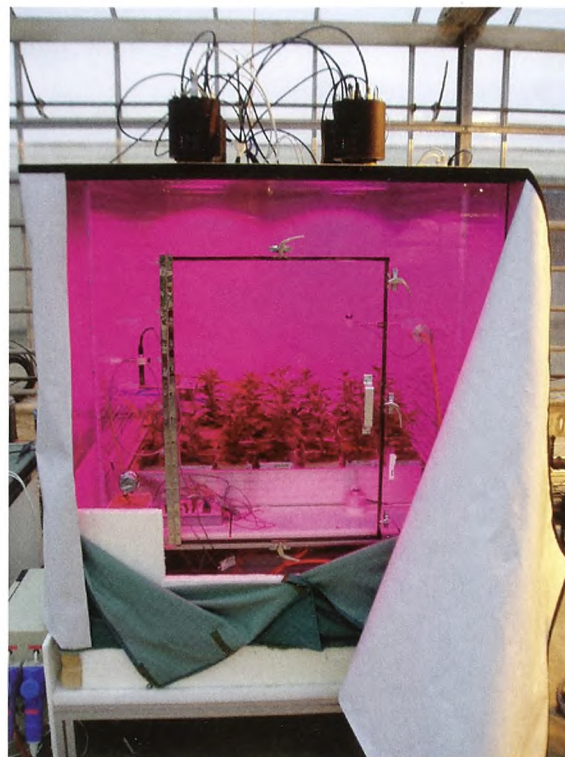
Lyskilde	Effektivitet	
	$\mu\text{mol/s/W}$	lm/W
HPS	1,9	140
Lysstofrør	1,2	50-100
Rød LED	1,1	50-70
Blå LED	0,8	10-15

LED lyskilder til klimakammerforsøg

Hos Institut for Jordbrugsvidenskab på KVL er i foråret 2006 igangsat et tværfagligt projekt i samarbejde med Forskningscenter Risø, Dong Energy, RGB lamps og Dansk Erhvervsgartnerforening omkring elbesparelser i væksthuse med LED vækstlys systemer. En del af projektet går ud på at udvikle LED lyskilder til styring af krysantemumvækst, hvor målet i første omgang er at fastlægge det optimale forhold mellem blåt og rødt LED lys for fotosyntesen i en Krysantemum plantebestand. Et forhold, der ikke kendes præcist eftersom det afhænger af plantearten og eftersom der forventes at være mindre forskelle selv imellem sorter af samme planteart. Et højt indhold af blåt lys i dagtimerne vides at give mere kompakte planter.

På længere sigt er målet at udvide undersøgelserne

med LED lys ved andre bølgelængder såsom i det grønne og dybrøde område. Grønt lys absorberes af planternes gul-orange pigmenter, karotenoiderne, og indvirker derved også på fotosyntesen. Dybrødt lys (omkring 660 nm) påvirker fotoreceptoren fytochrom, der blandt andet regulerer strækningsvæksten. Hvis strækningsvæksten kan hæmmes via LED lys, vil det på sigt kunne reducere brugen af retarderingsmidler ("stråforkortere") i potteplanteproduktionen.



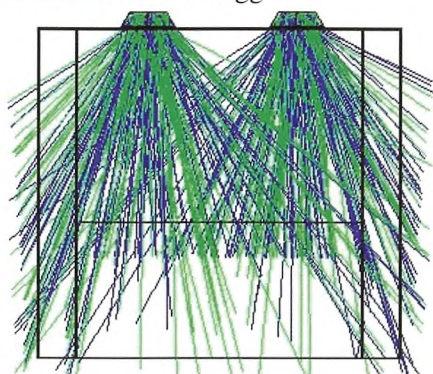
Figur 2. Klimakammer med plantebakke og LED lys. De nyudviklede LED lyskilder er monteret lige over kammeret og selve kammeret kan afdækkes med lystæt stof.

Ved hjælp af et klimakammer, som er specialudviklet på KVL [5] er det muligt relativt at bestemme fotosynteseraten løbende for en potteplantebestand ved at måle planternes CO_2 -udveksling med omgivelserne. I klimakammeret, som er vist i figur 2, kan parametre som luftens temperatur, CO_2 -koncentrationen, luft flowet og vandingen kontrolleres. Ved at placere specialudviklede blå-røde LED lyskilder over kammeret og overdække kammeret med lystæt stof er det muligt at styre irradiansen og spektralsammensætningen af lyset i kammeret. Derved kan planternes CO_2 -udveksling bestemmes som funktion af blå-rødt forholdet i LED lyset.

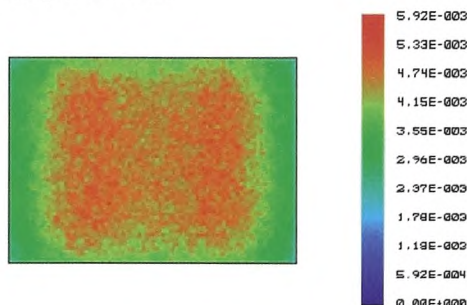
For fotosynteprocesserne i Krysantemum forventes det optimale forhold af blåt lys i forhold til den samlede lysmængde af rødt og blåt lys at ligge i området mellem 5 og 35 % målt i $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ (enheden forklares i boks 2). Det er derfor et krav, at LED lyskilderne som minimum kan styre blåforholdet indenfor disse grænser. For at opnå pålidelige resultater, er det desuden vigtigt, at belysningsniveauet (irradiansen) ligger væsentlig højere end lyskompensationspunktet, som er det punkt hvor fotosyntesen lige balancerer planternes

respiration. En egentlig plantevækst foregår kun ved irradiansværdier, der ligger over dette punkt, som er i størrelsesordenen $50\text{--}80 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ i en plantebestand.

Ved hjælp af computermodellering er det muligt at bestemme og optimere LED lyskildedesignet, så det overholder de belysnings- og designkrav, der er fastsat i forskningsprojektet omkring irradiansniveau, spektralsammensætning, blå-rødt forhold og fysiske dimensioner. Figur 3A viser et layout af en tredimensional model af klimakammeret med fire "optimerede" LED lyskilder med reflektorenheder. Modellen er opbygget i et optisk designprogram, hvor det er muligt at simulere irradiansfordelinger i forskellige detektorplaner ved at modellere lysstrålers udbredelse gennem brugerdefinerede optiske systemer, idet der tages hensyn til bl.a. brydning, refleksion og absorption af lysstrålerne i de forskellige optiske elementer. Hver enkelt lyskildemodul er baseret på i alt 72 tætpakkede røde og blå højeffekts LED'er, der hver udsender $500\text{--}600 \text{ mW}$ ved en operationsstrøm på 700 mA . I modellen er det antaget, at lysudstrålingsfordelingen fra en enkelt LED kan tilnærmes lysudstrålingsfordelingen fra Lambertstråler, hvis strålingsstyrke aftager med cosinus til udstrålingsvinklen. Reflektorenheden hørende til hver lampe er bl.a. designet ud fra et ønske om at undgå totale interne refleksioner af lyset i klimakammerets polycarbonat topplade samt at reducere lystabet ud gennem klimakammerets vægge.

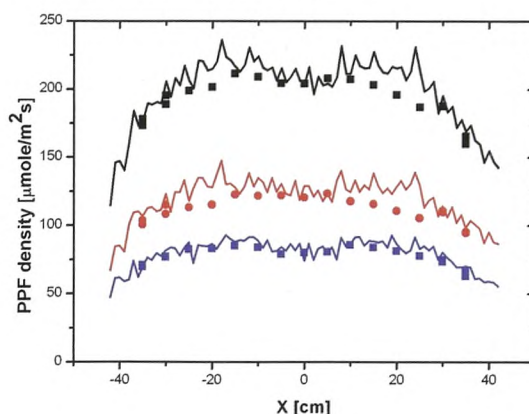


Figur 3A. Model layout af klimakammeret – set fra siden – med de fire "optimerede" LED lyskilder, hvor udvalgte blå og røde lysstråler er indikeret med hhv. blå og grønne farver. De to bagerste lyskilder kan ikke ses i dette layout. Den sorte vandrette streg midt i modellen angiver et detektorplan placeret i planteniveau.



Figur 3B. Simuleret irradiansfordeling i planteniveau for et areal svarende til plantebakken. Røde farver svarer til høj irradians, grønne til middel irradians og blå til svage eller ingen irradians. Det maksimale irradiansniveau er $5,92 \text{ mW}/\text{cm}^2$ i denne simulering, hvor lyskildernes effekt ligger på 44 % af totaleffekten.

Figur 3B viser en tilhørende simuleret irradiansfordeling i planteniveau over det område, der svarer til plantebakkens størrelse og placering i klimakammeret. Som det ses i figuren opnås en pæn homogen fordeling af lyset fra de fire LED lyskilder over stort set hele det område, hvor der skal placeres planter.



Figur 4. Simulerede (fuldt optrukne linier) og målte (punkter) PPF tæthedsfordelinger langs en centerlinie i planteniveau for henholdsvis blå, rødt og blå + rødt LED lys.

Boks 2: Måleenheder for plantelys

Mennesker og planter er følsomme over for lys i næsten den samme del af foton-spektrret. Denne del af det synlige spektrum fra 400 nm til 700 nm betegnes PAR-området for Photosynthetic Active Region. Men der er stor forskel på planter og menneskers respons overfor lys i dette område, og derfor også i hvordan lysmængden måles og angives. I radiometriske målinger angives en lyskildes udsendte effekt i W og effekttæthed i W/m^2 . I fotometriske målinger tages højde for øjets lysfølsomhed, som er maksimal i det grønne spektralområde ved 555 nm , her måles effekten fra en lyskilde i lumen (lm) og effekttætheden som kaldes illuminans i $\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lux}$. For biologiske processer er den mest almindeligt benyttede enhed μmol fotoner (10^{-6} fotoner = $6,023 \cdot 10^{17}$ fotoner). En lyskildes udsendte effekt, som kaldes photosynthetic photon flux (PPF) måles i $\mu\text{mol}/\text{s}$ og effekttætheden benævnes photosynthetic photon flux density (PPFD) og måles i $\mu\text{mol}/\text{s m}^2$.

Ved benyttelse af et kalibreret spektroradiometersystem kan den spektrale strålingsstrøm $\Phi_\lambda(\lambda)$ [W/nm] fra en lyskilde måles. Da strålingsenergien af $1 \mu\text{mol}$ fotoner ved bølgelængden λ er givet ved:

$$E_{\mu\text{mol}} = 10^{-6} N \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

kan den spektrale PPF, dvs. antallet af fotoner pr. sekund pr. nanometer beregnes ud fra

$$\Psi_\lambda^{\mu\text{mol}}(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(\lambda)}{E_{\mu\text{mol}}} = \frac{\Phi_\lambda(\lambda)\lambda}{10^{-6} N hc} \quad (2)$$

Den samlede photosynthetic photon flux eller PPF i PAR området er så givet ved:

$$\Psi_{\text{PAR}} = \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} \frac{\Phi_\lambda(\lambda)\lambda}{10^{-6} N hc} d\lambda \quad (3)$$

Ud fra de simulerede irradiansfordelinger samt målinger af den totale spektrale strålingsflux for henholdsvis blå og røde dioder, er det muligt at beregne estimerede fotosyntetisk foton flux (PPF) tæthedsfordelinger i planteniveau fra de modellerede LED lyskilder (se boks 2). Figur 4 viser sådant et eksempel på estimerede PPF tæthedsfordelinger for blå og rødt LED lys langs en centerlinie i den 85 cm brede plantebakke i planteniveau. I eksemplet er irradiansfordelingen taget fra simuleringen i figur 3B ved at udtage dataværdier langs centerlinien i figuren. Som det ses af figur 4 er der i denne simulering valgt en blå-rød indstilling, der giver et relativt højt blåforhold – omkring 40 %.

En tilsvarende spektrometrisk måling af PPF tæthedsfordelingerne for henholdsvis blå og rødt LED lys langs den faktiske centerlinie i klimakammeret er vist i samme figur. LED lyskilderne er her indstillet til samme effektniveau som der er brugt i simuleringen. Som det ses i figuren er der en god overensstemmelse mellem faktiske PPF tætheder og simulerede PPF tætheder.

Over hele plantebakken, på nær et mindre kantområde, opnås et relativt jævnt belysningsniveau på 150-200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Dette niveau ligger væsentligt over lyskompensationspunktet som ønsket, hvilket illustrerer, at det udviklede LED lyskildedesign er velegnet til at udføre fotosyntesemålinger i klimakammeret.

Afrunding

De nyudviklede LED lyskilder til styring af krysantemumvækst er installeret i KVL's klimakammer i december 2006. Lyskilderne, der er udviklet på Risø, gør det muligt at styre irradiansen og spektralsammensætningen af lyset i kammeret. De egentlige fotosyntesemålinger for forskellige blåforhold i LED lyset for en krysantemumbestand begynder i foråret 2007. De indledende tests af LED lyskilderne viser, at der kan opnås belysningsniveauer i klimakammeret på over 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, hvilket er tilstrækkeligt til forsøgene. Fotosyntesemålingerne skal benyttes til at bestemme det optimale blå-røde lysforhold for en krysantemumbestand og herefter skal lamperne afprøves i egentlige væksthuse med potteplanter, hvor indflydelsen af dagslyset også skal tages med i overvejelserne.

Projektet beskrevet i denne artikel er finansieret af PSO midler fra Dansk Energi-Net under projekt nr. 338-022. En stor tak rettes til alle der har bidraget til udvikling af LED lyskilderne.

Litteratur

- [1] D.J. Barta, T.W. Tibbitts, R.J. Bula, R.C. Morrow (1992), Evaluation of light emitting diode character-

istics for a space-based plant irradiation source, Adv. Space Res. **12**, 141-149.

- [2] G.D. Massa, J.C. Emmerich, R.C. Morrow, C.M. Bourget, C.A. Mitchell (2006), Plant-Growth Lighting for space life support: A Review, Gravit. Space Biol. **19**, 19-30.
- [3] Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination, Ed. by J.Y. Tsao (Optoelectronics Industry Development Association 2002), http://www.netl.doe.gov/ssl/workshop/Report%20led-%20November%202002a_1.pdf.
- [4] K.J. McCree (1972), The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants, Agric. Meteorol. **9**, 191-216.
- [5] L. T. Jensen, E. Rosenqvist, J.M. Aaslyng (2006), A daylight climate chamber for testing greenhouse climate control strategies and calculating canopy carbon dioxide exchange, Hort. Technology **16**, 1-8.



Birgitte Thestrup er seniorforsker og hendes forskningsområder er diodelasersystemer til bl.a. industrielle anvendelser samt nye LED lyskilder til generelle belysningsformål.



Carsten Dam-Hansen er seniorforsker og arbejder med direkte laserskrivning af optiske elementer samt anvendelser af lysdiodeteknologi til en række belysningsformål i samarbejde med dansk industri.



Janni Bjerregaard Lund, cand. hort., forsker i regulering af plantevækst ved hjælp af ændringer af lysets spektralfordeling.