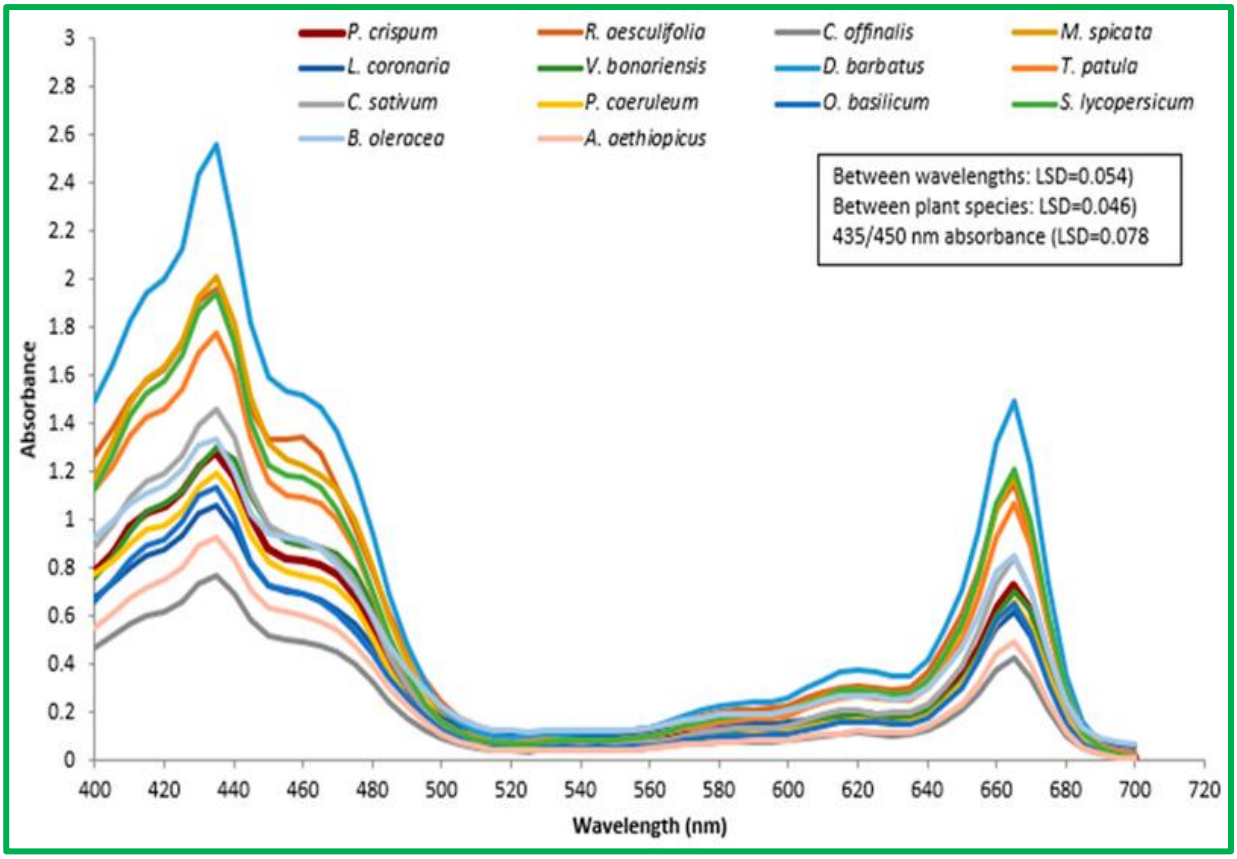
# Spektral optimering af lysregime og biomassevækst hos sød basilikum i vertikaldyrkning




*Figur 1: Absorptionsspektrum for 13 plantearter – Fuldstændig kildeangivelse jf. Litteraturliste. (Rihan et al., 2020).*

| **Projekt Forskerspirer 2026** | |
|---|---|
| **Titel** | Spektral optimering af lysregime og biomassevækst hos sød basilikum i vertikaldyrkning. |
| **Identifikationskode** | AX024 |
| **Navn** | Tristan Stefadouros |
| **Gymnasium** | Gammel Hellerup Gymnasium |
| **Fagområde** | NAT |

# Indholdsfortegnelse

**INDLEDNING** ..... 3

**PROBLEMFORMULERING OG AFGRÆNSNING** ..... 3

**TEORETISK BAGGRUND** ..... 4

**Den lysafhængige reaktion** ..... 4

**McCree-kurven og det spektrale kvanteudbytte** ..... 4

**Emerson effekten** ..... 7

**Fotomorfogenese** ..... 7

**Fysiologiske kapacitetsændring og dynamisk lysregulering.** ..... 8

**EMPIRISK GRUNDLAG** ..... 9

**FORSØGSDESIGN OG METODE** ..... 9

**Forsøgsopstilling** ..... 10

**Kontrollerede variable** ..... 10

**Målinger (afhængige variable)** ..... 10

**Databehandling** ..... 10

**FORVENTEDE RESULTATER** ..... 11

**TAK** ..... 11

**KILDER** ..... 12

**Litteraturliste** ..... 12

**Figurliste** ..... 13

**BILAG 1** ..... 14

**BILAG 2** ..... 16

# Indledning

Med en voksende verdensbefolkning og et stigende pres på landbrugsarealer, vokser behovet for nyere og mere tekniske samt effektive dyrkningsmetoder som vertikal dyrkning og lukkede plantedyrkningssystemer. I disse systemer erstattes de store marker med mindre pladskrævende plantefabrikker[1] som i modsætning til traditionelt landbrug, styres af et miljø som kan kontrolleres og ændres hvornår som helst. I disse kontrollerede miljøer er sollyset blevet erstattet med kunstig belysning, hvilket gør optimeringen af lysets sammensætning afgørende for planternes vækst og energiudnyttelse.

Fotosyntesen drives af specifikke bølgelængder i det elektromagnetiske spektrum og forskellige plantearter besidder ligeledes forskellige absorptionsspektre. Særligt for kommercielt værdifulde plantearter som sød basilikum, (*Ocimum basilicum*) er det afgørende at sammensætte et optimalt forhold af LED-dioder, for at maksimere den fotosyntetiske effekt og opnå det bedste udbytte af biomassevækst på mindst mulige areal.

I dette projekt undersøges, hvordan en tilpasning af spektret af LED-belysning påvirker fotosynteseraten og biomassevæksten hos sød basilikum. Formålet med projektet er at afdække hvilket lysforhold samt lysregime der vil yde den mest optimale biomassevækst i disse plantagefabrikker.

# Problemformulering og Afgrænsning

Vækst og urbanisering øger presset på landbrugsarealerne, hvilket skaber behov for nytænkning i fødevaresektoren for at sikre en fremtidig fødevaresikkerhed. Vertikaldyrkning er en af løsningerne på denne pladsmangel, hvilket leder til følgende problemformulering.

*Hvilket potentiale har vertikaldyrkning som svar på den stigende pladsmangel i fødevareproduktionen, og hvordan kan man med et dynamisk lysregime og diodeforhold optimere belysningen i disse plantefabrikker, således der opnås maksimal fotosyntetiskeffekt, biomassevækst og energiudnyttelse for sød basilikum.*

Projektet undersøger hvorledes man kan kombinere rødt og blåt lys for den optimale fotosyntetiske effekt samt effekten af en dynamisk lysopsætning, hvor lysintensiteten, eller i denne sammenhæng, PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density, $\frac{\mu mol}{m^2 * s}$) øges gradvist i takt med basilikummens vækstfaser under et fast forhold af rødt/blåt lys, sammenlignet med en kontrolgruppe under konstant lys. Sød basilikum anvendes som modelplante pga. sin hurtige vækst. Øvrige vækstfaktorer (fotoperiode, vand, gødning, temperatur og $CO_2$ niveauet) holdes konstante. Derudover bestemmes biomassevæksten ud fra friskvægten af plantens overjordiske dele, skåret af lige over vækstmediet for at sikre en akkurat måling af plantens masse, uden at medregne jorden på rødderne.

[1] På engelsk betegnet som Plant Factory Systems (PFS). Jf. Rihan et al. (2020).

# Teoretisk baggrund

## Den lysafhængige reaktion

Fotosyntesen opdeles i den lysafhængige reaktion og den lysuafhængige Calvin-cyklus[2] i stroma. Da Calvin-cyklussen kræver de to energirige molekyler ATP og NADPH[3] fra lysreaktionen for at omdanne $CO_2$ til glukose, udgør de to faser ét indbyrdes afhængigt system. I thylakoidmembranen[4] absorberer antennekomplekser (klorofyl a og b) fotoner og overfører energi til reaktionscentret P680 i fotosystem II (PS II). Dette exciterer en elektron, som sendes gennem elektrontransportkæden. Den afgivne elektron erstattes ved fotolyse, hvor vand ($H_2O$) spaltes til ilt ($O_2$), protoner ($H^+$) og elektroner ($e^-$). Elektrontransporten fører til en ophobning af protoner i thylakoidens lumen (matrix), som driver dannelsen af ATP via ATP-syntase. Elektronen videreføres herefter til fotosystem I (PS I), hvor lysenergi i reaktionscentret P700 genexciterer elektronen, så den slutteligt bruges til dannelsen af NADPH.

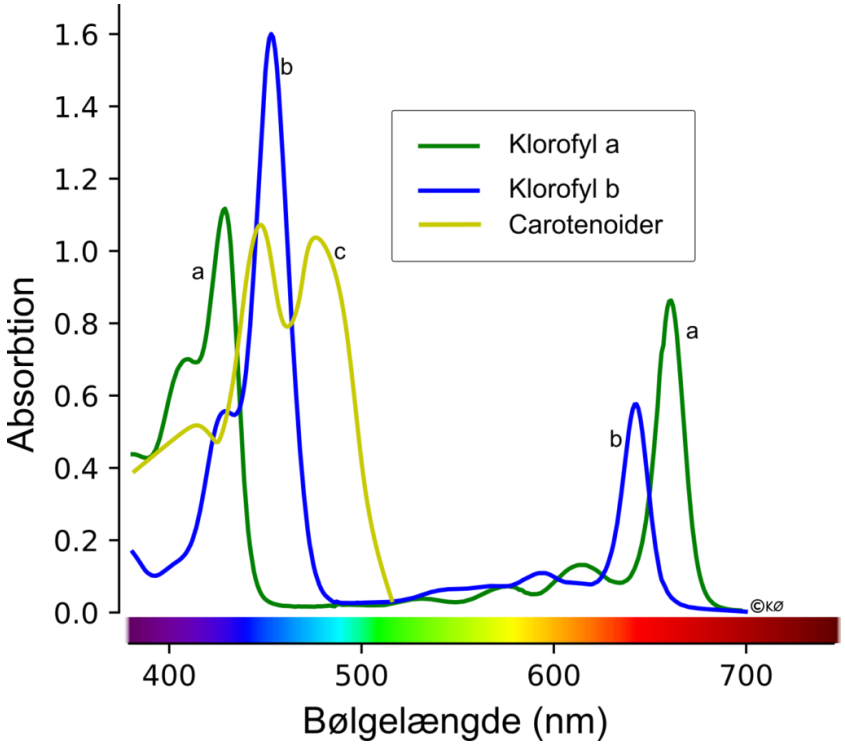
*For visualisering af kloroplastens opbygning samt en mere dybdegående figur jf. fotosyntesens reaktioner henvises man til bilaget (Figur B.1.1 og B.2).*

## McCree-kurven og det spektrale kvanteudbytte

Selvom den lysafhængige reaktion udgår selve processen for omdannelse af lys til kemisk energi, er det vigtigt at erkende, at planter ikke udnytter alt, lys ens. Netop da klorofyl a, b og de forskellige tilbehørspigmenter har unikke absorptionsprofiler, varierer fotosyntesens effektivitet for forskellige bølgelængder - bølgelængder inden for det synlige lys af det elektromagnetiske spektrum (380 – 750 nm). For at forstå, hvordan vi kan optimere denne absorption med kunstig lyst, må vi se nærmere på absorptionsspektret og aktionsspektret (McCree-kurven), som fremhæver plantens faktiske fotosyntetiske effektivitet på tværs af lysets spektrum.

Absorptionsspektret er en grafisk afbildning af de bølgelængder af synligt lys, som de forskellige klorofylmolekyler absorberer og hvor i spektret fordelingen af absorption ligger. Et sådant spektrum kan ses nedenfor.

[2] Den proces i kloroplastens stroma hvor kuldioxid omdannes til glukose vha. ATP og NADPH fra lysreaktionen. Processen kræver ikke lys direkte men ophører når lys reaktionen gør.
[3] ATP og NADPH, hhv. Adenosintrifosfat (cellens primære energikilde) og Nicotinamidadenindinukleotidfosfat (koenzymet som transporterer de nødvendige elektroner og brintioner som kræves for omdannelsen af CO2 til sukker).
[4] Kloroplastens indre membransystem, hvor klorofyl absorberer lysenergi, og hvor lysreaktionen danner ATP og NADPH.




*Figur 2: Absorbtionsspektrum for fotosyntesepigmenterne klorofyl a – og b, carotenoider.* Førsteaksen illustrerer bølgelængden i nm, mens andenaksen illustrerer absorbansen som følger Lambert-Beers lov[5] (Østergaard, n.d). En absorbans på 1.6 svarer til, at 97.5% af lyset absorberes ved den tilsvarende bølgelængde.

Kurven illustrerer, hvordan plantepigmenters kemiske opbygning (Bilag: Figur B.1.3), betinger deres lysabsorption i de blå og røde bølgelængdeområder, hvilket danner grundlag for optimering af LED-spektre for sød basilikum. Pigmenterne opdeles i:

1. **Hovedpigmenterne** *(Klorofyl a* og *b):* Absorberer primært blåt- (ca. 430 – 480 nm) og rødt lys (ca. 650 – 680nm). Manglende absorption af grønt/gult lys medfører refleksion, som giver bladene deres grønne farve.

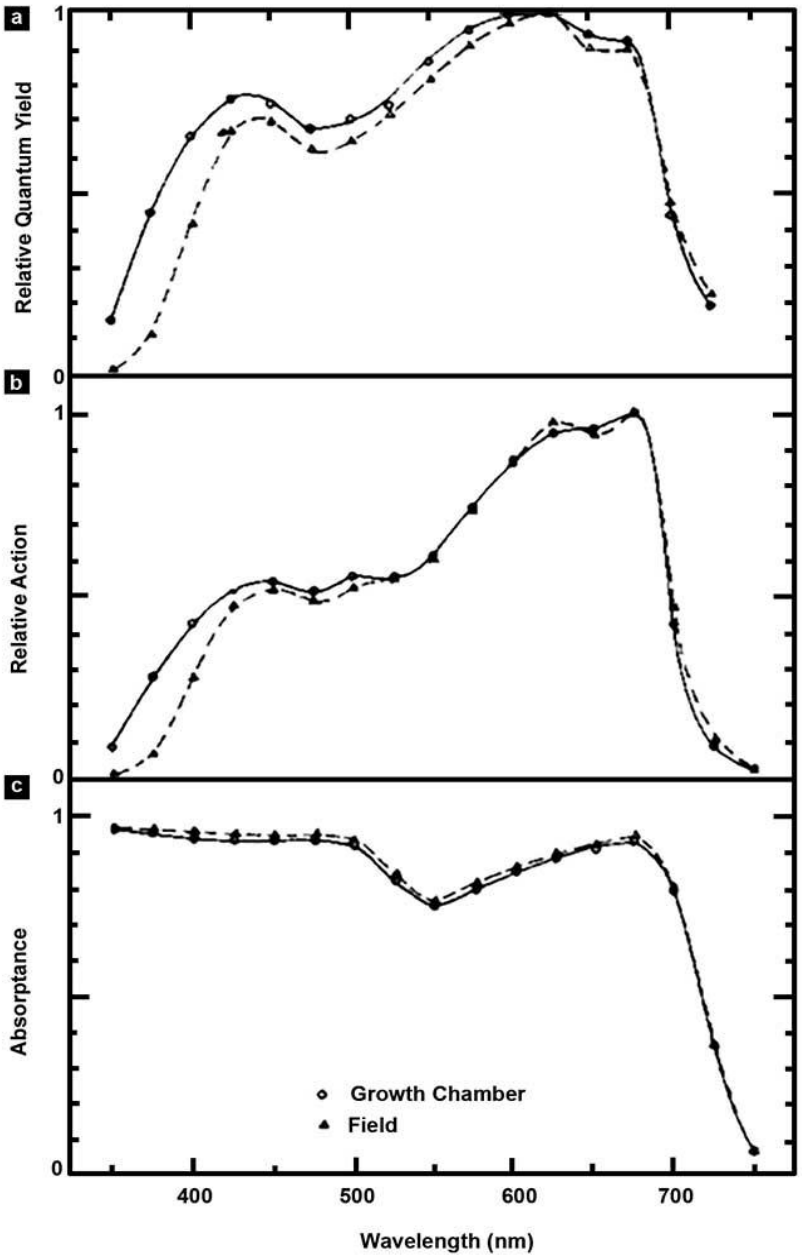
2. **Tilbehørspigmenterne (***Carotenoider, bl.a. β-caroten og xanthofyl*): Absorberer blåt/blågrønt lys (ca. 400 – 500 nm). De udvider plantens samlede absorptionsspektrum ved at overføre energi til reaktionscenterklorofyl (klorofyl a) og beskytter kloroplasten mod fotoinhibering[6].

Mens absorptionsspektret kun viser pigmenternes lys optagelse, måler aktionsspektret (McCree-kurven) plantens reelle kvanteudbytte[7] (quantum yield) – som vist nedenfor.

[5] Lambert-Beers lov angiver formlen for absorbans: $A = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

[6] Fotoinhibering: Lysinduceret nedsættelse af planters evne til at udføre fotosyntese.

[7] Kvanteudbytte: Beskriver hvor effektivt lyspartiklerne omdannes til fotosyntetisk aktivitet.




*Figur 3: McCree kurven: Kvanteudbytte (a), Aktionsspektrum (b), Absorbtionsspektrum (c) (Pocock 2018)*

Her ses kurven opdelt i 3 forskellige dele. Alle dele har samme x-akse, bestående af det lyse område af det elektromagnetiske spektrum målt i nanometer (nm). Det bemærkes også, at lysintensiteten (PPFD) for McCree-kurven lå på under $150\,\frac{\mu mol}{m^2 * s}$.

a. **Relativt kvanteudbytte** - måles på y-aksen (0-1, hvor $1 = 100\%$). Viser maksimal fotosyntetisk effektivitet ved et globalt maksimum på $\sim 630\ nm$.

b. **Aktionsspektrum** – viser den samlede fotosyntetiske rate som funktion af bølgelængden.

c. **Absorptionsspektrum** – viser absorptionen i intakte blade. Til forskel fra isolerede pigmenter arbejder tilbehørspigmenter her sammen om at overføre energi via resonans til reaktionscentrets klorofyl a. Samtidig spreder bladets cellestruktur lyset internt (især grønt lys). Det ubrugte lys reflekteres internt og absorberes gradvist, hvilket giver et markant bredere absorptionsspektrum end hos isolerede pigmenter.

McCree-kurven er afgørende for at designe optimale, kunstige lysspektre, da den viser det maksimale kvanteudbytte hos intakte blade. Kurven afslører dog ikke, hvordan planter udnytter kombinationer af lys samtidigt. For at forstå, hvorledes visse bølgelængder forstærker hinandens effekt via sammenspillet mellem PS I og PS II, må man inddrage Emerson-effekten (Emersons enhancement effect). Dette er nøglen til at maksimere biomassevækst dannelsen.

## Emerson effekten

Emerson-effekten beskriver, hvorledes samtidig belysning med *rødt lys (ca. 650-680 nm) og mørkerødt lyst lys* (far-red, > 680 nm) giver et markant større fotosyntetisk udbytte end summen af de to bølgelængder hver for sig (jf. figur B.1,4 i bilaget).

Som beskrevet under den lysafhængige reaktion (Side 4), udgøres det fysiologiske grundlag af samspillet mellem PS II ($P_{680}$) og PS I ($P_{700}$). Under den lysafhængige reaktion udfører PS II fotolyse, hvorefter elektroner sendes via elektrontransportkæden til PS I. Når PS I efterfølgende rammes af fotoner, re-exciteres elektronerne til et højere energiniveau, hvilket driver reduktionen af $NADP^+$ til energibæreren NADPH, som er afgørende for plantevækst.

Samtidig belysning med rødt og mørkerødt lys tvinger de to fotosystemer til at arbejde synkront. Hvis bølgelængden overstiger 680-700 nm, udløses det såkaldte *red drop*-fænomen (se figur 3a). Her falder kvanteudbyttet markant, da lyset overstiger PS II´s maksimale absorptionsgrænse, hvorved PS I efterlades til at arbejde alene - et system, der i denne sammenhæng kan betragtes som "det svage led" grundet de længere bølgelængders lavere energi.

## Fotomorfogenese

Lysets sammensætning af røde bølgelængder har stor betydning for drivkraften i den lysafhængige reaktion, men forholdet mellem røde og mørkerøde bølgelængder fungerer ligeledes som et lysregulerende signal for plantens morfologi[8]. Dette kaldes for fotomorfogenese[9]. Planten registrerer lysmiljøet via specifikke fotoreceptorer opdelt i 2 primære sensorsystemer.

Det blålyssensitive system (kryptokromer og fototropiner).

- **Kryptokromer** - lysreceptorer der absorberer det blå lys i spektret. Hvor det røde lys styrer form omdannelsen via fytokromer, spiller kryptokromerne en afgørende rolle for plantens bladvækst, klorofyldannelse og generelle kompakte- og buskede form. Når kryptokromerne aktiveres af blåt lys, stimulerer det netop denne type vækst, hvilket er særligt væsentligt ved optimering af LED-belysning til sød basilikum.
- **Fototropiner** - Blålysreceptorer, der primært styrer den retnings bestemte vækst (fototropisme). Disse er mindre relevante for projektet, men er væsentlige for det samlede billede af plantens fotoreceptorer (lys receptorer).

[8] Fra græsk: Læren om organismers form og opbygning.
[9] Fotomorfogenese: De lysbetingede strukturelle og morfologiske vækstændringer, der forekommer hos en plante.

Det rødlyssensitive system (fytokromer).

- **Fytokromer**- De proteiner som absorberer det røde- og mørkerøde lys, og er ansvarlig for fotomorfogenese. Disse proteiner kan findes i to former, den røde absorberende form, Pr form ((*Phytochrome Red*), ca. 650-680 nm), og den mørkerøde absorberende form, Pfr form (*Phytochrome far red*, > 680 nm).

Fytokromer er fotoreversible og skifter mellem den inaktive $P_r$ - form og den aktive $P_{fr}$ - form. Omdannelsen fra $P_r$ til $P_{fr}$ sker hurtigt og ved absorption af rødt lys, hvilket aktiverer plantens fysiologiske signalveje. Forholdet mellem rødt og mørkerødt lys (R/FR-forholdet) styrer plantens morfologi direkte.

Et højt R/FR- forhold omdanner $P_r$ til aktivt $P_{fr}$, hvilket signalerer til planten at der er rigeligt lys, og fremmer en kompakt, busket vækst med store blade hos sød basilikum. Tværtimod vil et lavt R/FR-forhold omdannes $P_{fr}$ til $P_r$. Manglen på aktivt $P_{fr}$ udløser skyggeundvigelsesresponsen (shade avoidence response), hvor planten opfatter situationen som skygge fra andre planter, og reagerer med internodeforlængelse (vækst i stænglens længde), hvilket giver en lang, svag og tynd basilikumplante. Dette er en evolutionær respons på skygge, som hæver planten op, i håb om at finde lys, på bekostning af biomassevækst.

## Fysiologiske kapacitetsændring og dynamisk lysregulering.

I kimplantefasen[10] sætter et begrænset bladareal (Leaf Area Index, LAI) og lav klorofylkoncentration et lavt lysmætningspunkt. En konstant høj fotonflukstæthed (PPFD - f.eks. 215 $\frac{\mu mol}{m^2 * s}$) overskrider her Calvin-cyklussens kapacitet til at fiksere kuldioxid, hvilket øger risikoen for fotoinhibering. Lyset overbelaster elektrontransportkæden og danner iltradikaler, som beskadiger D1-proteinet[11] i PS II. Det tvinger planten til at prioritere reparation frem for dannelse af biomassevækst.

I senere vækstfaser stiger både bladarealet, klorofylkoncentrationen og lysmætningspunktet (da planten bliver større), hvilket gør at planten effektivt kan udnytte en højere PPFD. Ved at implementere et dynamisk lysregime, der gradvist tilpasser lysintensiteten efter vækstfasen, opnås samme biomasseudbytte som ved konstant høj belysning, men med en markant forbedret energi- og ressourceudnyttelse.

[10] Den unge fase af en plantes liv.
[11] "Hjertet af reaktionscentret for PS II".

# Empirisk grundlag

Det er således klart at man *kan* optimere biomassevækst ved en blanding af blåt lys og rødt lys. En markant del af min teori understøttes af et empirisk studie af Pennisi et al. (2019), som netop undersøgte forskellige fordelinger af rødt og blåt lys under kontrollerede indendørs forhold – med konstant PPFD. Deres resultater viste, at et rødt/blåt (R/B) lysforhold, på 3,0 (bestående af 70% rødt lys ved 660 nm, 23% blåt lys ved 450nm og en mindre restdel af baggrundslys, 7%) opnår den bedste klorofyldannelse samt det højeste udbytte af biomassevækst ved den mest effektive ressource- og vandudnyttelse hos sød basilikum. Modsat førte en højere andel af blåt lys (R/B forhold ≤ 2) til et markant lavere biomasseudbytte.

Selvom Pennisi et al. (2019) påviste det optimale spektralforhold ($RB_3$), anvendte de en konstant lysintensitet (PPFD på $215\,\frac{\mu mol}{m^2*s}$ gennem hele vækstforløbet - en lysintensitet der er højere end den, af McCree-kurvens). Da en kimplante har begrænset bladereal og dermed mere nedsat maksimalt fotosyntetisk kapacitet end en voksen plante, vil en konstant høj PPFD indebære uudnyttet lyspotentiale, og et overflødigt energiforbrug. Dette åbner for et nyt forskningsområde, som gør det muligt at undersøge, om en gradvis tilpasning af lysintensiteten kan optimere biomassevæksten yderligere.

# Forsøgsdesign og metode

Forsøget opstilles som et kontrolleret sammenligningsstudie mellem 3 behandlingsgrupper af sød basilikum (*Ocimum basilicum*), én kontrolgruppe med konstant PPFD og 2 forsøgsgrupper af gradvist øget PPFD tilpasset til plantens udviklingsfaser. Hver gruppe består af 15 planter (45 planter i alt), der sås som frø på samme tidspunkt under identiske omstændigheder. Ensartet mængde pottemuld i alle potter, hvor frøene sås i præcis samme dybde i forhold til vækstmediets overfalde for at sikre ens betingelser for spiring.

Da sød basilikum har en vækstcyklus på omkring 4-6 uger ved vertikaldyrkning, er dette en ideel tidsramme for projektet da ændringer hurtigt kan observeres. Planterne placeres i et kontrolleret vertikalt dyrkningsmiljø under ensartede LED-lyskilder med et fast rødt/blåt lysforhold (3:1). LED-lyskilder benyttes pga. høj energieffektivitet, lav varmestråling og muligheden for at tilpasse lysfarverne efter behov.

Planterne opstilles i et etagebaseret vækstreolsystem (vertikaldyrkning), med 3 afskilte højdezoner (én pr. behandlingsgruppe). Hver etage har sin egen dæmp-bare LED-lyskilde. Hyldeopbygningen sikrer fuld lysafskærmning mellem etagerne vha. af et lystæt underlag under hver etage. De deler et fælles ventilationssystem med konstant udluftning, dette garanterer en identisk luftfugtighed og $CO_2$ niveau i hele reolen. *Budgettet for forsøget henvises til på bilag 2.*

## Forsøgsopstilling

- **Forsøgsgruppe 1 (dynamiske lysopstilling - hurtig stigning):** PPFD øges trinvist i takt med plantens udvikling (lav PPFD i uge 1, medium PPFD i uge 2-3 og høj PPFD i uge 4+). PPFD øges med ca. 50% ved hver overgang.
- **Forsøgsgruppe 2 (dynamisk lysopstilling 2 – forskudt stigning)**: Følger samme princip men med en lavere stigning på ca. 25% ad gangen for at undersøge om en mere gradvis og blød overgang er bedre for plantens stressniveau og vækst. Da begge grupper skal ende på samme maksimale PPFD-niveau, har forsøgsgruppe 2 mere hyppige justeringer (dobbelt så mange).
- **Kontrolgruppe**: Belyses med konstant PPFD gennem hele vækstperioden.

## Kontrollerede variable

- **Lysopstilling og startniveau.** Afstanden fra lyskilden, lysets vinkel og den indledende start-PPFD holdes helt ens for alle grupper gennem hele forsøget.
- **Fotoperiode.** Ensartet på 16 timers lys efterfulgt af 8 timers mørke således planten også har tid til respiration. Mørkeperioden er også essentiel for at dyrke velsmagende sød basilikum, da plantens døgnrytme er tæt knyttet til reguleringen af koncentrationen af dens æteriske olier– konstant lys kan resultere i bitter smag.
- **Klima.** Konstant temperatur, **(**20°C), luftfugtighed og $CO_2$ niveau. Dette måles og holdes konstant.
- **Næring:** Ensartet vandingsinterval, identisk gødningsopløsning (pH) og samme vækstemedium (pottemuld).

## Målinger (afhængige variable)

- **Biomassevæksten.** Plantes samlede friskvægt måles vha. præcisionsvægt ved forsøgets afslutning (høst ved stænglens base lige over vækstmediet).
- **Vækstparametre.** Plantens højde, bladstørrelse (LAI) samt mængden af blade, måles også løbende 1 eller 2 gange om ugen for at følge plantens udvikling.

## Databehandling

Med 45 planter fordelt på 3 grupper sikres et statistisk grundlag til at beregne middelværdi og standardafvigelse. Gruppernes gennemsnitlige biomasse og vækstkurver sammenlignes for at vurdere det optimale lysregime.

# Forventede resultater

Selvom den teoretiske baggrund forklarer, hvorfor en gradvis stigning i PPFD ville være godt for at undgå fotoinhibering og D1-proteinskade, kan teorien ikke forudsige den nøjagtige optimale stigningsrate. Da der mangler specifik empirisk viden om basilikummens tærskler for fasedynamisk lysøgning, sammenlignes de to forsøgsgrupper med forskellige stigningshastigheder, for at dække, hvor grænsen for maksimal biomassedannelse går.

Ud fra almen plantefysiologi formodes det, at en gradvis forøgelse af PPFD tilpasset vækstcyklussen for sød basilikum, vil fremme biomassevæksten i forhold til konstant PPFD. Det forventes specielt, at forsøgsgruppe 2 (25% stigning) vil opnå den højeste værdi for friskvægt, da denne moderate stigning formodes at minimere risikoen for fotoinhibering, mens forsøgsgruppe 1 (50% stigning) i højere grad risikerer fotoinhibering ved faseovergangene.

# Tak

Jeg vil gerne takke min forsker, Nanna Koschmieder Jørgensen for sin støtte og faglige supervision. Hun er ikke alene en lektor og biolog med naturvidenskabelig ph.d.-grad, men også en fantastisk underviser på Gammel Hellerup Gymnasium. Jeg har ikke kunnet undvære hendes hjælp.

# Kilder

## Litteraturliste


Pulvirenti, L., Ferreri, T., Strano, T., Zappalà, F., Infantio, S., Caruso, C., Morrone, R., D'Antona, N., Barbera, A.C., Carrubba, A. & Napoli, E. (2025). Effects of photoperiod on phytochemical profiles of four *Ocimum basilicum* genotypes in a hydroponic climate chamber. *Frontiers in Agronomy, 7, artikel 1653993.* *https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1653993*

Torp, K.C. (2023). Kapitel 1 og 10. I *biokemi – levende organismers kemi* [e-bog]. Nucleus.

Biotech Academy (2020, 30. jun.). *Fotosyntesen – Fotosyntesens lysprocesser* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=WG06scb4Id8

TG Campus IN (2021, 30. Nov.). *Emerson effect and red drop. Photosynthesis in Higher Plants – NEET Biology* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_3LPyPbi94M

Science with Hazel (2020, 18. Nov.). *Action Spectrum Of Photosynthesis | A LEVEL & IB BIOLOGY* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=0jf26nXn3bY

Neela Bakore Tutorials (2016, 15.jul.). *Photosynthesis | NEET | Photosystems & Quantosome | Neela Bakore Tutorials* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=GizOLmAcsXw

Biology With Wk (2024, 21.mar.). *Emerson's Enhancement Effect And Red Drop Effect In Photosynthesis | Lec. 12 | Plant Physiology* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=8OtHxFsLdIU

TEACHING PATHSHALA (2018, 26.jul.). *PHYTOCHROME | CSIR-NET | GATE | Plant Biology | Sensory photobiology* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=AkRxzA6AbJI

Quick Biochemistry Basics (2026, 8.jun.) *Action spectrum of Photosynthesis* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=PHjOUdE62qs

Concepts and notes (2021, 16.sep.). *Photomorphogenesis || Phytochrome || Cryptochrome || Plant morphogenesis || For B.Sc. students* ||[Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=zVg8ZQa6G3E

EconoLux Industries. (u. d.). *EconoLux Industries FAQ.* Hentet 17. oktober 2026 fra https://econoluxindustries.com/faq.html

Pocock, T (2018). *The McCree Curve Demystified*. Photonics Spectra**.** Hentet 16. oktober 2026, fra https://www.photonics.com/Articles/The-McCree-Curve-Demystified/a63340

Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency in indoor cultivation of basil. *Frontiers in Plant Science*, 10, 305. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305

Wikipedia. (u. å.). *Emerson effect*. Hentet 22. oktober 2026 fra, https://en.wikipedia.org/wiki/Emerson_effect

Wikipedia. (u. å.). *Shade avoidance*. Hentet 20. oktober 2026, fra https://en.wikipedia.org/wiki/Shade_avoidance

# Figurliste

**Figur 1:** Rihan, H. Z., Aldarkazali, M., Jalal, S., McMulkin, N., Jbara, M., & Fuller, M. P. (2020). A novel new light recipe significantly increases the growth and yield of sweet basil (Ocimum basilicum) grown in a plant factory system. *Agronomy, 10* (7), Article 934. https://doi.org/10.3390/agronomy10070934

**Figur B.1.1:** Thygesen. J. H. (2005). *Oversigt over chloroplast med dets organeller*. ResearchGate Hentet 19. oktober 2026 fra https://www.researchgate.net/figure/Figur-211-Oversigt-over-chloroplast-med-dets-organeller-Yder-membranen-er-glat_fig4_277096773

**Figur B.1.2:** McHardy. C. (2019). *Schematic of photosynthesis reactions*. ResearchGate. Hentet 19. oktober 2026 fra https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-photosynthesis-reactions-The-light-dependent-production-of-reduction_fig1_337030711

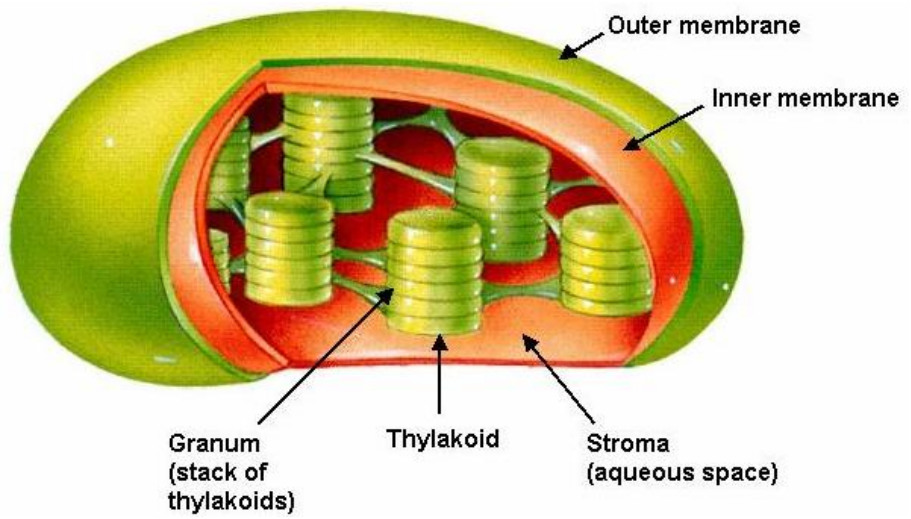
**Figur 2:** Østergaard. K.B (u. å). *Lys, farver og fotosyntese.* Det er godt at vide. Hentet 19. oktober fra https://www.detergodtatvide.dk/lys-farver-og-fotosyntese/

**Figur B.1.3***:* Tarragó-Celada. J., & Fernández Novell. J.M (2019). *Colour, chlorophyll and chromatography***.,** Science in School Hentet 19. oktober 2026 fra https://scienceinschool.org/article/2019/colour-chlorophyll-and-chromatography/

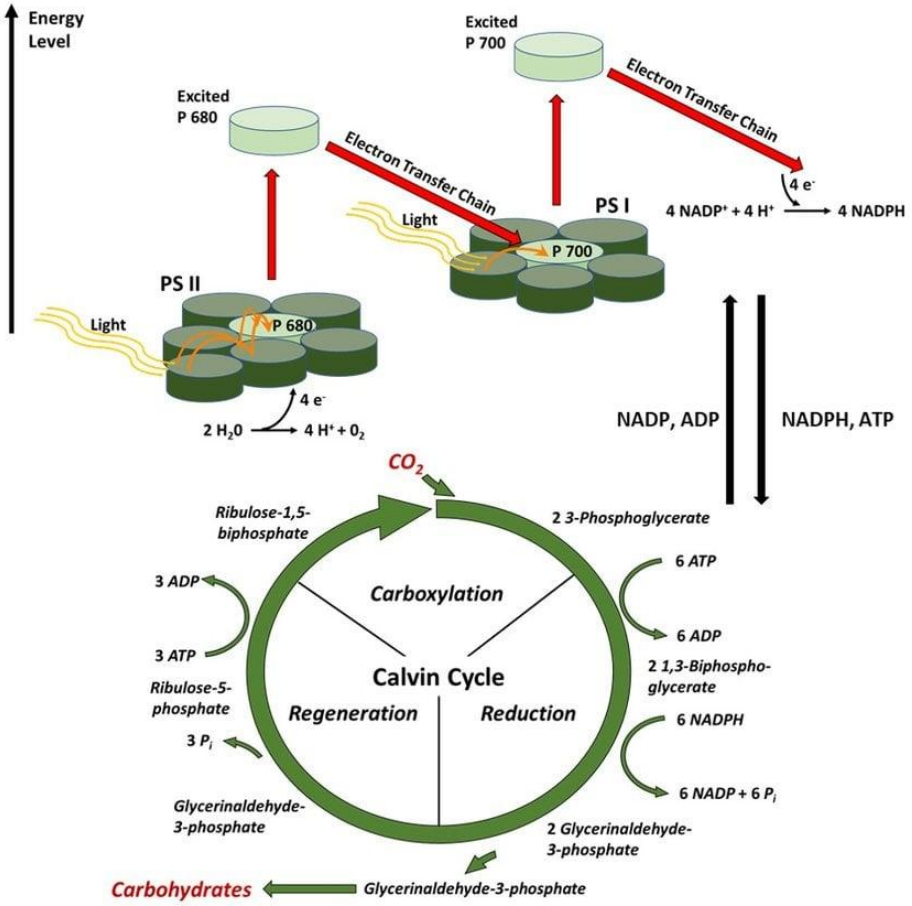
**Figur 3:** Pocock T. (2018). *The McCree Curve Demystified.* Photonics Spectra. Hentet 16. oktober 2026 fra *https://www.photonics.com/Articles/The-McCree-Curve-Demystified/a63340*

**Figur B.1.4:** Biology Exams 4 U. (2017). *Red drop and Emerson enhancement effect. https://www.biologyexams4u.com/2017/02/red-drop-and-emerson-enhancement-effect.html*

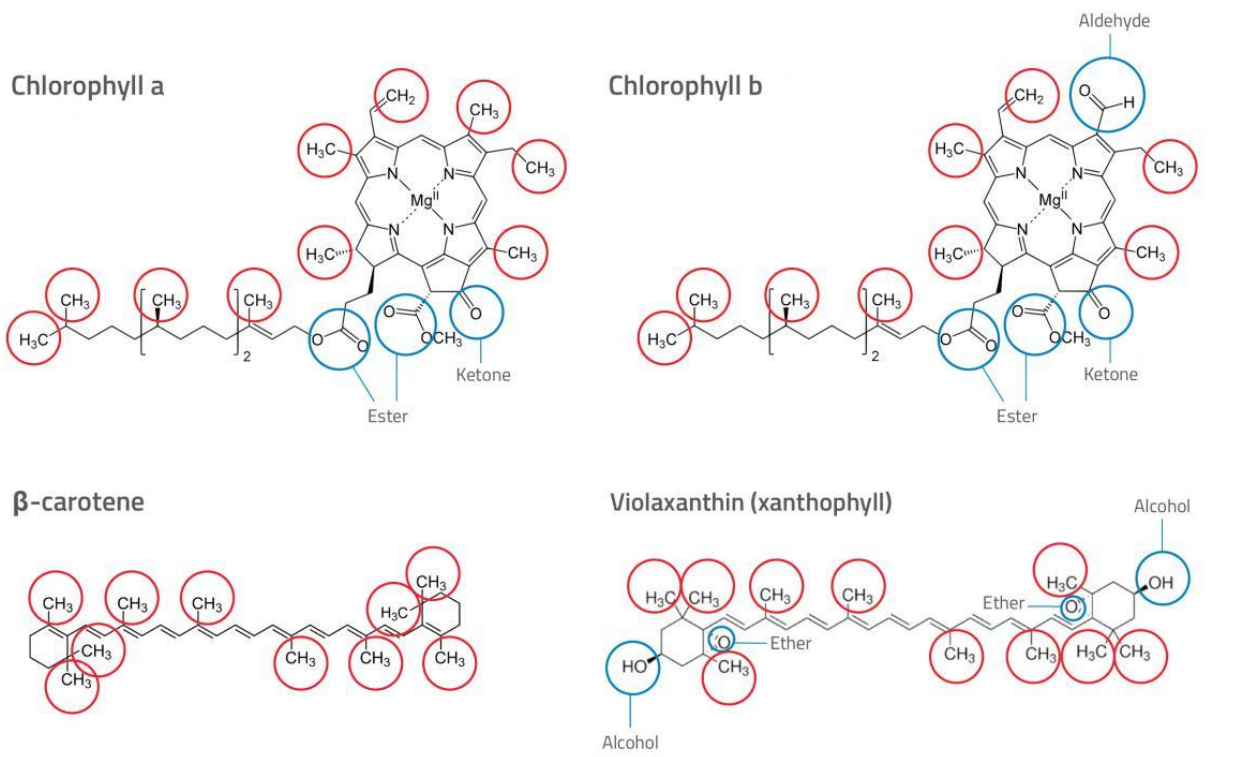
# Bilag 1



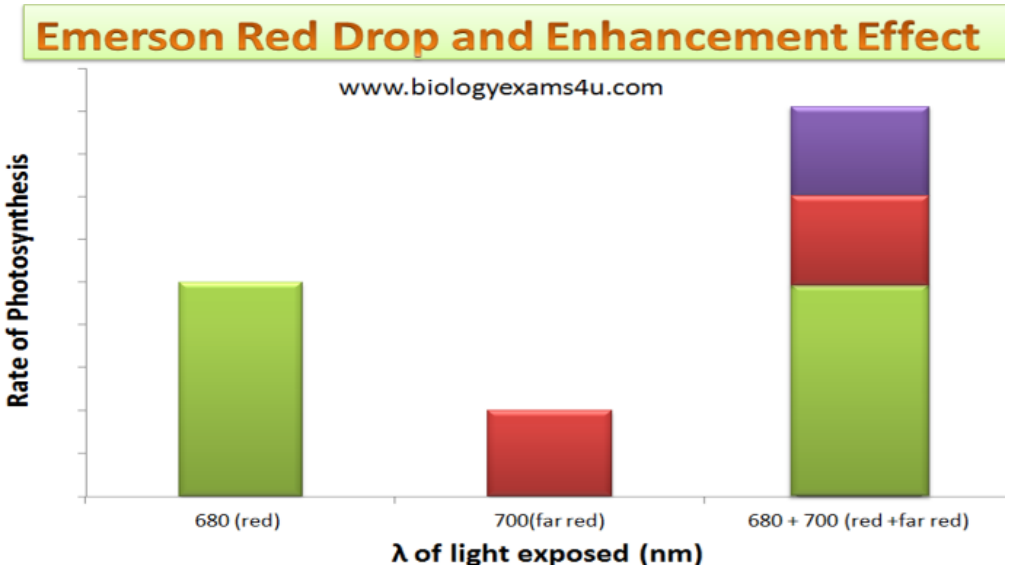

*Figur B.1.1: Oversigt over kloroplastens opbygning (Thygesen, 2005).*




*Figur B.1.2: Oversigt over fotosyntesens lysreaktioner og elektrontransportkæden i thylakoidmembranen (McHardy 2019).*




*Figur B.1.3: Kemiske struktur af de vigtigste plantepigmenter (Science in school 2019),*




*Figur B.1.4: Princippet bag Emerson-effekten og Red Drop-fænomenet. Diagrammet illustrerer fotosynteseraten ved hhv. 680 nm (rødt lys), 700 nm (far red lys) og ved en kombineret bestråling (680-700 nm). Det fremhæver, hvordan den kombinerede bestråling giver en markant højere fotosynteserate hvilket, overstiger summen af de to enkeltstående lyskilder. Biology (Exams 4 U. 2017).*

# Bilag 2

| **Budgetoversigt** | |
|---|---|
| **Udgift** | **Beløb (dkk)** |
| **Belysning –** 3 dæmpbare LED-vækstpaneler med fast rød/blå ratio | ≈ 5.500 |
| **Måleudstyr** – SpotOn Quantum PAR-måler (til præcis PPFD-kalibrering), klorofylmåler (SPAD) samt præcisionsvægt til friskvægt | 8.000 – 8.500 |
| **Opstilling** – Dyrknings telt, vækstreol og fælles ventilationssystem | ≈ 2.000 |
| **Dyrkning –** Sød basilikumfrø, pottemuld, potter, pH-måler og gødning | ≈ 1.000 |
| **Strøm** | ≈ 500 |
| **Samlet** | **17.000 – 17.500** |