



Forskning i  
naturresurser och  
bioekonomi 14/2017

## LED-belysning i växthus

Forskningsresultat och erfarenheter 2016

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä, Liisa Särkkä  
och Bengt Lindqvist

Forskning i naturresurser och bioekonomi 14/2017

# LED-belysning i växthus

Forskningsresultat och erfarenheter 2016

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä, Liisa Särkkä och Bengt Lindqvist

Naturresursinstitutet, Helsinki 2017

Kaukoranta, T., Jokinen, K., Näkkilä, J., Särkkä, L. och Bengt Lindqvist. 2017. LED-belysning i växthus. Forskningsresultat och erfarenheter 2016. Forskning i naturresurser och bioekonomi 14/2017.



ISBN: 978-952-326-371-0 (Tryckt)

ISBN: 978-952-326-372-7 (Elektronisk)

ISSN 2342-7647 (Tryckt)

ISSN 2342-7639 (Elektronisk)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-372-7>

Copyright: Naturresursinstitutet (Luke)

Författarna: Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä, Liisa Särkkä och Bengt Lindqvist

Utgivare: Naturresursinstitutet (Luke), Helsingfors 2017

Utgivningsår: 2017

Omslagsfoto: Timo Kaukoranta

Tryckeri- och publikationsförsäljning: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

## Förord

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä, Liisa Särkkä, Bengt Lindqvist  
Naturresursinstitutet

Efter årtionden av utvecklingsarbete, har LED-lamporna uppnått ett tillräckligt nyttoförhållande beträffande el-förbrukningen och ljusåtergivning, så att de småningom kan ersätta HPS-lamporna (högtrycksnatrium) som de senaste 30 åren varit de dominerande lamporna i växthusen. Vid försök samt i praktiken har man under det senaste året kunnat påvisa att man med LED-lampor kan uppnå en inbesparing på 30–50 % i el-förbrukningen. Förändringar inom växthusodling håller på att inledas och därför är det viktigt att erbjuda information som hjälper för genomförandet av förändringar.

Utvecklingen av LED fortsätter men med avtagande hastighet. Flere företag som erbjuder LED-lampor för växthus och som kan beaktas som potentiella kumpaner fungerar i Europa, Nord-Amerika och Asien. I Finland har vi för tillfället endast några företag som erbjuder LED-lampor.

Odlare i Finland har berättat om erfarenheter med LED-belysning. Man har varit tvungen att ändra även på annat än bara belysningen, men enligt odlarnas erfarenheter fungerar lamporna nu bra i Finlands förhållanden.

I LED-lampornas egenskaper fäster man speciell vikt vid ljusets spektrum (styrkan av ljusets våglängd) som inverkar stort på effektiviteten hos ljuset. HPS-lampornas spektrum bestäms främst av lampans egenskaper, men de nya lamporna utvecklas enligt växternas ljusspektrumskrav. Lampans teknik är inte längre en begränsande faktor utan det vilket ljusspektrum som ger det bästa resultatet hos odlingen. Spektret är speciellt viktigt i Finland där vi under midvintersäsongen inte har just alls solljus. Mera söderut samt under de övriga årstiderna reparerar solljuset det bristfälliga spektret.

Då man ersätter HPS-lamporna med LED-lampor flyttar man över en stor del av kostnaderna från el-kostnader till kapitalkostnader. Vi spekulerade en del i de totala investeringskostnaderna, lönsamheten i de ersättande investeringarna samt vilken betydelse tidpunkten för investeringarna har.

Den lägre värmeavgivningen hos LED-lamporna möjliggör ett bredare utnyttjande av denna belysning även inom tävlande odlingsområden såsom Holland. Vi uppskattade hur detta möjligtvis kan inverka på konkurrensen med den finska produktionen.

Lägre värmeproduktion och modifiering av spektret ger även en möjlighet för grönsaksodling i våningar. Vid våningsodling (vertical farming, plant factory, kerrosviljely) är växterna i växthus i flere våningar och helt belysta med konstljus. Speciellt intressant är det i Finland där det finns mycket litet ljus från oktober till januari. I lönsamheten med våningsodling jämfört med normal växthusodling finns två saker: effektiv el-konsumtion samt kostnaderna för temperatur- och fuktighetsväxlingar i jämförelse med vanlig växthusodling.

Till sist spekuleras i framtidsutsikterna som härrör från flexibiliteten vid förverkligandet av LED-belysningen.

Nyckelord: Växthusodling, växthusbelysning, LED, HPS, energi.

# Innehåll

<b>1. Introduktion</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Strålning, PAR, fotosyntes</b> .....	<b>6</b>
2.1. Solens instrålningseffekt, eleffekt, ljusintensitet och -mängd.....	6
<b>3. Lamporna</b> .....	<b>9</b>
3.1. Värme från lamporna.....	9
3.2. De vanligaste LED-lampornas spektrum .....	10
3.3. Lampornas livslängd.....	11
3.4. Tillförlitlighet: avtagande av ljusintensitet, bortfall, beständighet av färg.....	12
3.5. Planering av belysning .....	15
<b>4. Odlingserfarenheter</b> .....	<b>20</b>
4.1. Tomat.....	20
4.2. Gurka.....	21
4.3. Sallad, örter.....	24
<b>5. Är en LED-investering lönsam</b> .....	<b>27</b>
5.1. Från återbetalningstid till lampans pris .....	27
5.2. Nyttoförhållandet blir bättre – lönar det sig att skjuta upp investeringen .....	30
<b>6. Vertikalodlingens konkurrenskraft</b> .....	<b>32</b>
6.1. Vertikalodling.....	32
6.2. Jämförelse av el-kostnaderna.....	33
<b>7. Investeringsbehov till LED-belysning samt inverkan på energiförbrukningen</b> .....	<b>37</b>
<b>8. Användning av belysning i grödan samt styrandet av tillväxten med belysning</b> .....	<b>39</b>
8.1. Ljusets inverkan under en längre tidsperiod på fotosyntesen.....	39
8.2. Utnyttjandet av ljusets våglängdsbander vid fotosyntesen .....	40
8.3. Användning av ljusets våglängdsbander i tillväxtregleringen.....	42
8.4. Utnyttjandet av ljusets färger till kvalitet bör förbättras.....	45
<b>9. LED-belysning inom europeisk växthusproduktion</b> .....	<b>48</b>
9.1. Energiförbrukningsstrategin hos konkurrenter .....	48
9.2. Skillnader i CO <sub>2</sub> -utsläpp.....	51
<b>10. Belysningsteknikens framtid</b> .....	<b>53</b>
10.1. Belysningskostnadens utvecklingsriktning.....	53
10.2. Ännu nya ideer med annan belysning.....	54
<b>Referenser samt tillhörande litteratur</b> .....	<b>57</b>
<b>Tack</b> .....	<b>59</b>

# 1. Introduktion

## **LED-lampor parallellt med HPS-lampor**

De första lamporna som i Norden användes inom växthusodling var så kallade högtryckslampor (HPS). HPS-lampornas värmeeffekt i förhållande till den lämpliga ljuseffekten för fotosyntesen (PAR-strålning) är så hög att man endast kunnat använda den i Finland och Norge. I växthusodlingarna i Mellan-Europa och Nord-Amerika har man använt endast låg belysningseffekt för att jämna ut belysningsbehovet vid mulet väder. Efter flere år av utvecklingsarbete kan man nu med hjälp av LED-teknologin tillverka lampor som producerar tillräckligt med ljus för växthusodlingar och vars ljusutbyte är betydligt bättre än HPS-lampornas. LED-teknologin håller äntligen på att leverera lampor för växthusbruk och detta har lett till att det kommit flere nya tillverkare på marknaden och även intensifierat forskningen om växters lysbehov. HPS-lampornas tid verkar dock inte ännu vara över. De dominerar fortfarande och HPS belysningen, antingen ensamt eller tillsammans med LED-lyset, verkar att fortsätta öka.

## **Upprepas elektronikprodukternas vanliga utvecklingstrend**

LED-teknologin är en del av halvledarteknologin och därvid även en del av den globala elektronikindustrin. Om utvecklingen av LED-ljusteknologin följer elektronikindustrins allmänna funktionsmodeller kommer det till en början att finnas en stor del små föregångarföretag. När användningen av LED-teknologin blir vanligare kommer de företag, vars produktutveckling och marknadsföring är effektiv, att bli de dominerande. I början av utvecklingsskedet, och delvis fortfarande, har den högklassiga LED-teknologins pris samt behovet av att utreda ljusfärgernas balans och ljusstyrka för olika växter och växtmiljöer, begränsat antalet företag som kunde ha potential att tillverka högklassiga växthuslampor.

Med teknologiutvecklingens måttsticka är det inte så väldigt kostsamt att utreda dessa saker – endast några hundratusen euro – men arbetet med växter kräver både kunskap och tid. Slutligen, då teknologi och ljuskunskap för växthusodling standardiseras kommer troligtvis de stora företagen att dominera marknaderna. Effektiva och snabbreagerande företag som beställer lampor av olika underleverantörer kan stiga fram som marknadsförare av olika typs lampor för odlare.

## **Företag i Europa som levererar LED-lampor**

År 2016 fanns det ett par tiotal företag i världen som tillverkade LED-lampor för växthus och som hade en större erfarenhet av användningen av lampor inom växthusodling. I Europa fungerar i alla fall följande företag: finska Netled och Valoya, holländska Philips och Lemnis Oreon, svenska Heliospektra, tyska AUVEL, Union Power Star och från USA PARsource, Illumitex, Fluence Bioengineering, LumiGrow. Några japanska och koreanska har även visat intresse för finska marknader. Samtliga företag har kapacitet att leverera lampor från lågeffektiva mellanlampor till olika typerns topplampor. I Finland har även Kasvua erbjudit LED-belysningslösningar. Det finska företaget Arrantlight är även redo att tillverka lampor för växtbelysning.

## **Kunskap i företagen och detaljer från forskningen**

Nu när vi ännu befinner oss i ett kraftigt utvecklingsskede beträffande ljusteknologin är det intressant att sammanställa senaste information. Företagen utvecklar teknologin och odlarna prövar den. Den offentliga forskningen levererar just nu nya resultat om ljusspektrets användningsmöjligheter samt nya ljusapplikationer.

## **Tack till odlarna**

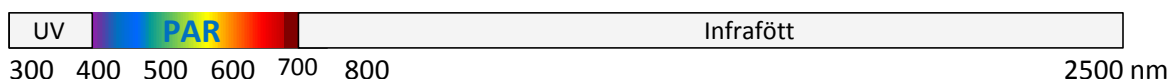
Vi tackar speciellt de odlare som berättat om erfarenheterna av LED-belysningen samt Kjell Brännäs från Jord- och skogsbruksministeriet samt Juha Ossi från österbottens NMT-central.

## 2. Strålning, PAR, fotosyntes

### 2.1. Solens instrålningseffekt, eleffekt, ljusintensitet och -mängd

#### Fotosyntetiskt aktiv strålning – PAR

Av solens totalstrålningens energi eller fotoner är 45–50 % användbart vid växternas fotosyntes eller fotosyntetiskt aktiv (PAR = photosynthetically active radiation, våglängd 400–700 nm (Bild 1). En liten del av totalstrålningen ligger inom det ultravioletta området (band) (UV-A 315–400 nm, UV-B 280–315 nm), och knappt hälften av strålningen är inom det infraröda bandet (IR=infra red, 700–2500 nm) som växterna inte använder i fotosyntesen. I början av det infraröda bandet finns ett fjärrött område (FR=Far red, 710–850 nm). Växterna använder inte heller PAR-strålning (PAR-ljus) speciellt effektivt. Endast en liten del av energin som når växten binds till kemisk energi och resten omvandlas till värme i växten eller växthusets konstruktioner. (Tabell 1).



**Bild 1.** Solljusets spektrum.

Växternas utveckling påverkas även av förhållandet mellan ljusets våglängdsband såsom det röda och blåa ljusets samt fjärröda ljusets förhållande. Den infraröda strålningen värmer upp växten men den inverkar indirekt även på utvecklingen, eftersom temperatur hos växtens delar påverkar växtcellernas tillväxt samt på den del som de upptar av byggmaterialet som bildas vid fotosyntesen. UV-strålningen inverkar på tjockleken av växtytans vaxskikt samt på växtens färgning.

**Tabell 1.** Andelen av UV, PAR och infrarött i totalinstrålning ( $W/m^2$ ) av sol eller lampa. Storleksordning av solens eller lampans utstrålning, som binds vid fotosyntes eller blir värme.

	UV %	PAR %	IR %	Bindes i fotosyntes %	Strålning till värme %
Solen	4	49	47	3	97
HPS-lampa	0	30–40	50–70	3	97
LED-lampa	0	80–95	5–20	5	95

#### Från solwatt eller elwatt till ljusmol

För att mäta intensiteten av solens och olika lampors PAR-strålningsintensitet mäter man flödet av fotosyntetiskt aktiva fotoner per areal (photosynthetic photon flux density, PPFD). Den vanliga enheten är  $\mu\text{mol}/\text{s}/\text{m}^2$  (mikromol per kvadratmeter i sekunden, mikro = miljondedel). Ur solens totala strålningsstyrka (irradians, intensitet)  $W/m^2$  kan man räkna ut, i mikromol, den intensitet av PAR-strålning som solen avger. Solljusets elomsättningseffektivitet (ljusutbyte) är 2,3. Den varierar en del enligt målnighet och solens höjd, men i praktiken har det inte så stor betydelse. Betydligt betydelsefullare är uppskattningen om hur stor del av solstrålningen når växterna.

$$\text{Solens PAR-strålning} : \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s} = 2,3 \times \text{Totalinstrålning } W/\text{m}^2$$

Nya HPS-lampors ljusutbytet från PAR-strålning (electricity to photon conversion efficiency) är 1,5–1,85  $\mu\text{mol}/\text{J}$  ( $\mu\text{mol}/\text{J} = [\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}] / [\text{W}/\text{m}^2]$ ). Störst är den vid användning av 1000 watts brännare.

De nya LED-lampornas ljusutbytet anges vara 1,5–2,6  $\mu\text{mol}/\text{J}$  (Tabell 2). De bästa LED-lamporna producerar alltså i växthus PAR-strålning och värme i samma förhållande som solen. Värmen från solen kommer dock helt som värmestrålning och värmen från LED-lampan grovt sett endast till hälften som strålning. Den andra hälften leds eller drivs med fläkt i luften om man inte med hjälp av vätskekyllning leder den direkt från lampan ut ur växthuset.

**Tabell 2.** Ljusutbyte  $\mu\text{mol}$  PAR/J energi eller  $\mu\text{mol}$  PAR strålning/kWh energi. Lampornas energi är elenergi.

1 kWh = 3 600 000 J, 1 mol = 1 000 000  $\mu\text{mol}$ .

	Ljusutbyte $\mu\text{mol} / \text{J}$	Ljusutbyte $\text{mol} / \text{kWh}$
Solen	2,3	8,28
HPS-lampa	1,6–1,85	5,76–6,66
LED-lampa	1,5–2,6	5,4–9,36

Mängden fotosyntes per tid (dygn, vecka, månad) och tillväxten som sker är ungefär direkt proportionell till mängden ackumulerad PAR-strålning, då strålningen är på en måttlig nivå. Ljusanvändningseffektiviteten påverkas förstås av förhållandet mellan  $\text{CO}_2$ -halten och temperaturen samt avdunstningsstressen.

Den mängd PAR-strålning som lampan eller solen avger kan uppskattas enligt tabell 3. På summan av PAR-strålning per dag uppgett i mol används termen Daily Light Integral (DLI). DLI:s enhet är  $\text{mol}/\text{m}^2$  (fotoner mol per kvadratmeter).

**Tabell 3.** Beräkning av PAR-summan (S) som mol från solens totalstrålning (R) eller från lampans effekt och belysningstid. Mätenheten visas inom hakparentes.

(1 mol = 1 000 000  $\mu\text{mol}$ )

Säteilylähde	Säteilyn yksikkö	PAR-kertymä $\text{mol}/\text{m}^2$
Solen	$\text{kWh}/\text{m}^2$	$S = R \times \text{Ljusgenomsläpplighet} / 100 \times 3,6 \times \text{Ljusutbyte}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{kWh}/\text{m}^2] \times [\%] / 100 \times 3,6 [\text{MJ}/\text{kWh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Solen	$\text{MJ}/\text{m}^2$	$S = R \times \text{Ljusgenomsläpplighet} / 100 \times \text{Ljusutbyte}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{MJ}/\text{m}^2] \times [\%] / 100 \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Lampa	$\text{W}/\text{m}^2$	$S = \text{Eleffekt} \times t \times 0,0036 \times \text{Ljusutbyte}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{W}/\text{m}^2] \times [\text{h}] \times 0,0036 [\text{MJ}/\text{Wh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Lampa	$\text{kWh}/\text{m}^2$	$S = \text{Elenergi} \times 3,6 \times \text{Ljusutbyte}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{kWh}/\text{m}^2] \times 3,6 [\text{MJ}/\text{kWh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$



Noggrannheten på solens PAR-summa som uppskattats från växthusets regleringsdata försämrats en del på grund av att växthusets sensorer för totalstrålning inte alltid är så noggranna. De avviker från standardsensorer, de lutar och kan vara smutsiga. En 10 % felmarginal är vanlig. Sensorn visar relativt rätt om regleringssystemet efter en målnig dag mitt på sommaren uppger en strålningssumma på 8,1–8,3 kWh/m<sup>2</sup> eller 29–30 MJ/m<sup>2</sup> och den dagliga strålningskurvan är symmetrisk med soltidens middag. Fastän strålningssumman inte skulle vara helt korrekt, kan man grovt korrigera den med en korrigeringsfaktor, förutsatt att dagens strålningskurva som regleringssystemet anger är symmetrisk i förhållande till soltidens middag. Växthusets vinkelräta ljusgenomsläpplighet kan vara över 90 % men under en dag kommer endast 60 (vinter) – 80 % (sommar) genom glaset. Där skuggningsgardinen är fördragen minskar ytterligare på genomsläppligheten. Till exempel 40 % hål i en skuggningsgardin släpper igenom 40 %.

Formlerna i tabell 3 kan behandlas normalt och man kan summera solens och lampans strålningssummor, man kan räkna ut den behövliga belysningens eleffekt eller belysningstid då man vill uppnå en viss ljussumma mol/m<sup>2</sup>/vrk. Exempelvis om man enligt tidigare erfarenhet vid odlingen använt för toppljus en eleffekt på 200 W/m<sup>2</sup> med HPS-lampa (ljusutbyte 1,8 µmol/J) och belysningstiden är 20 h/dygn, erhåller man för HPS-lamporna strålningssumman (S):

$$S = 200 \text{ W/m}^2 \times 20 \text{ h} \times 0,0036 \text{ MJ/Wh} \times 1,8 \text{ } \mu\text{mol/J}$$

$$S = 26 \text{ mol/m}^2/\text{vrk}$$

För att uppnå samma strålningssumma med LED-lampa bör LED-lampans (om ljusutbytet är 2,3 µmol/J och belysningstiden 20 timmar) måste eleffekt vara:

$$\text{Eleffekt} = S / (\text{Belysningstid} \times 0,0036 \times \text{Ljusutbyte})$$

$$\text{Eleffekt} = 26 / (20 \times 0,0036 \times 2,3) = 157 \text{ W/m}^2$$

På grund av en god LED-lampas spektrum utnyttjas dess mol i allmänhet en del bättre till tillväxt än de mol som en HPS-lampa producerar. Därför kan man ur en 157 watts effekt ytterligare minska några tiotals procent.

## 3. Lamporna

### 3.1. Värme från lamporna

#### **Värmen bort passivt i luften eller aktivt med hjälp av fläkt eller vätskeavkylning**

En del av de högeffektiva lamporna är försedda med en fläkt för att aktivt flytta värmen från lampan till luften. Värmen kan föras bort även med hjälp av vätskekylning. I princip kan lampor som är försedda med aktiv kylning byggas mindre. Trots att en del extra rörliga delar ökar möjligheten för fel säger tillverkarna att dessa fläktar håller en LED-lampas normala livslängd. Fläkten förbrukar inte en så stor del av den högeffektiva lampans totaleffekt och ökar inte märkbart lampans pris.

#### **Värmeöverföring genom infrarödstrålning eller genom konvektion, även med fläkt på växter**

Då värme överförs passivt från lampans hölje till luften, talar man om värmeledning till luften och den varma luften sprids vidare med luftströmningen. En del av värmen överförs från lampan som infrarödstrålning genom luften varvid den direkt når närbelägna växters yta eller växthuskonstruktionens yta.

Riktandet av en högeffektiv lampas fläkt kan vara av stor betydelse för värmehushållningen i kalla klimat. Fläkten kan rikta värmen uppåt bort från växterna eller nedåt emot växterna. Värmen som direkt leds bort till luften från lamporna eller blåses bort från växterna kan bättre utnyttjas genom att effektivisera luftcirkulationen i växthuset med hjälp av växthusest övriga fläktar. Man har dock inte ännu tillräcklig erfarenhet och resultat av nyttan av detta.

#### **HPS-lampan utstrålar flerfallt mera infrarödstrålning än LED-lampan**

Det strålningsspektrum som HPS-lampan producerar ligger nästan helt inom PAR-området, men av lampans eleffekt omvandlas endast ca 30 % till PAR-ljus. Resten värmer brännaren och lampans hölje. Yttemperaturen hos HPS-lampans brännare är 350-400 °C och höljets 60-80 °C.

Strålningen som de nuvarande LED-lamporna producerar kan vara helt inom PAR-området. En liten del kan, om man så önskar, vara fjärröd strålning eller till och med UV-strålning. I strålningen som lampans lysdioder producerar finns, förutom möjligtvis lite fjärröd strålning, ingen infraröd strålning men även LED-lampan blir upphettad utan aktiv kylning till 40-50 °C grader, på trånga platser ännu mera.

Eftersom den infraröda strålning som lampan utsänder är proportionell till lampans och brännarens yttemperatur upphöjt till fyra (temperatur som grader kelvin, kelvin = 273 + celsius), utstrålar HPS-lampan flerfallt mera infraröd strålning än LED-lampan. Den infraröda strålningen stannar på växtens blad och frukt samt växthuskonstruktionerna och värmer upp dessa. På grund av LED-lampornas form samt möjligen aktiva avkylning överförs en större del av värmen de avger till luftströmmen utan att direkt nå växterna.

#### **100W installationseffekt är både hos HPS och LED närmare 100W värme**

Diodernas strålning i LED-lamporna är nästan helt och hållet PAR-strålning i motsats till HPS-lampornas strålning. Av lampans eller solens PAR-strålning omvandlas dock endast 3-5 % vid fotosyntesen till kemisk energi som växterna använder till tillväxt. Resten upptas av växterna som värme. På grund av detta motsvarar 100 watt installationseffekt ca 95 watt värme oberoende om lampan är HPS eller LED. Skillnaden i värmeproduktion ligger i att en 100 watts HPS-lampa för tillfället kan ersättas med en 50-70 watts LED-lampa.

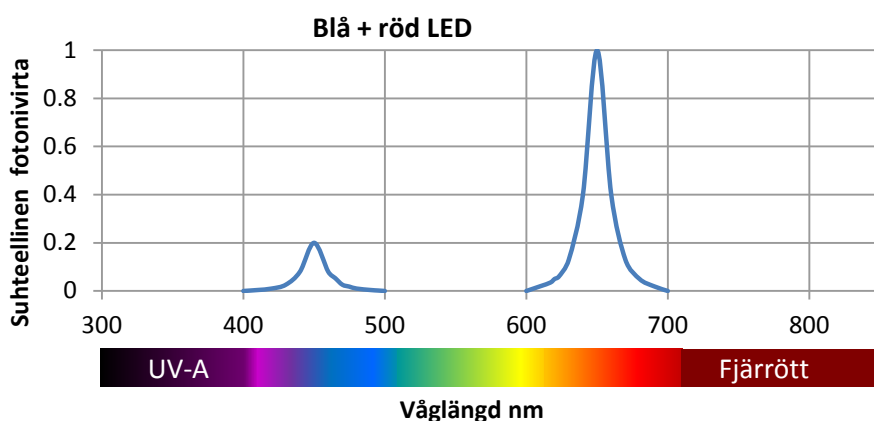
Ur värmeproduktionens synvinkel är en 100 watts HPS-lampa alltså en 95 watts strålningsvärmare. En 40-60 watts LED-lampa är ett 40-60 graders lysrör eller, om den är försedd med en fläkt för avledning av värme, en lågeffektiv värmeblåsare.

## 3.2. De vanligaste LED-lampornas spektrum

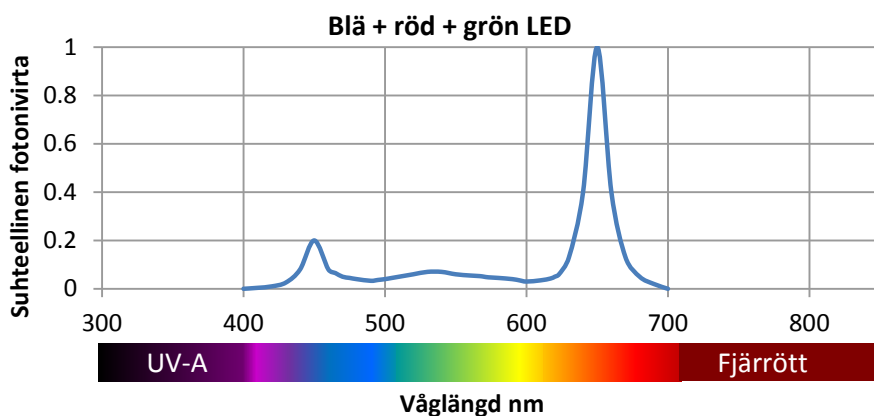
### Led- och HPS-lampornas spektrum

Bilderna 2–5 innehåller en del vanliga spektrum som används i LED-lampor. Kurvans höjd visar ljusstyrkan enligt våglängd. Samtliga spektrum är standardiserade genom att dela det kraftigaste ljusets styrka med värdet ( $\mu\text{mol/s/nm}$ ), varvid slutresultatet är ljusets relativa styrka mellan 0–1. LED-lampans effekt inverkar inte direkt på det producerade ljusets spektrum som nu 2016 är från 40 watt till 650 watt.

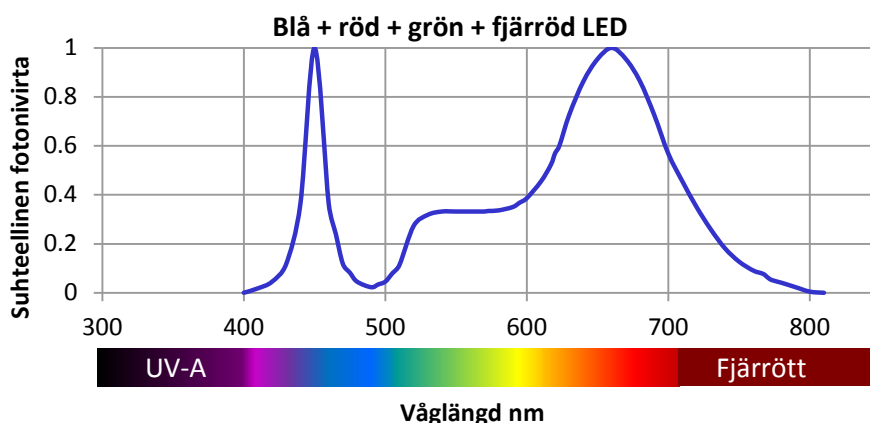
- Det vanligaste spektret för LED-lampor menade för grönsaksodling är 80–90 % djupröd kompletterat med 10–20 % blått (Bild 2).
- Dessa kan kompletteras med en liten mängd grönt eller vitt varvid spektret är fortgående (Bild 3).
- Förutom det gröna tillsätts PAR-strålning fjärrött med längre våglängd (Bild 4).
- För att komplettera HPS-lampornas spektrum erbjuds LED-lampor som avger blått ljus (Bild 5) och hängs upp sidvis med HPS-lamporna.
- Med LED-lampor kan man producera även vitt ljus – ljus som innehåller en blandning av blå, gröna och röda fotoner. Detta ljus kommer i allmänhet från led ytbehandlat med fosfor. Den ljuskulör som blandningen avger beskrivs med färgtemperatur vars enhet är kelvin (K).



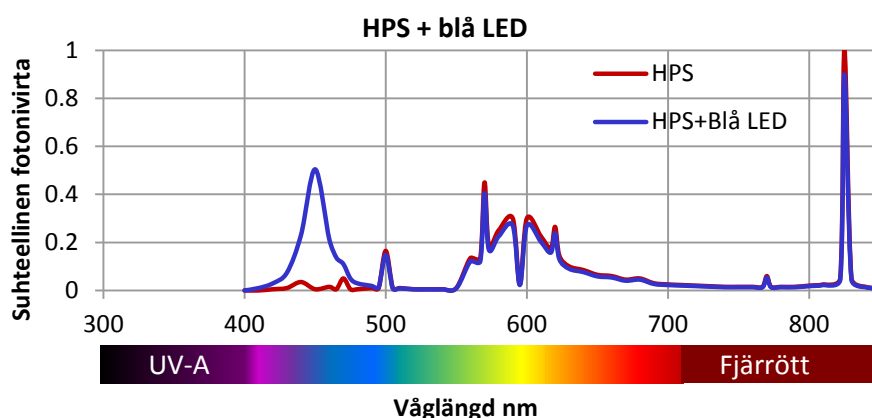
**Bild 2.** Ett typiskt spektrum för en LED-lampa som avger blått och djuprött ljus.



**Bild 3.** Typiskt fortgående spektrum för en LED-lampa som avger blått, djuprött samt grönt ljus.



**Bild 4.** Typiskt fortgående spektrum för en LED-lampa som avger blått, rött, mera grönt och fjärrött ljus.



**Bild 5.** För växthusbruk utvecklade HPS-lampans spektrum (rött streck). HPS-lampans spektrum kompletterat med blått LED-ljus (blått streck).

### 3.3. Lampornas livslängd

#### 25 000–35 000 timmar före lampans intensitet sjunker till 90 % av det ursprungliga

Tillverkarna av lamporna uppger att ljusintensiteten hos nuvarande högklassiga lampor sjunker till 90 % från ursprungsstyrkan efter ca 25 000 timmar. I de finska växthusen där man odlar grönsaker året om betyder det knappt fem år. Hållbarheten till 70 % styrka är ca två gånger längre än till 90 % styrka. Om man "kör" LED-lamporna med lägre spänning eller effektiv avkylning uppskattas hållbarheten till 90 % effekt vara till och med 35 000 timmar. Om man använder lägre spänning kan ljusutbytet ( $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) med LED stanna på en lika låg nivå som ljusutbytet hos en ny HPS-lampa. LED-lampan kan trots det vara ett bättre alternativ om LED-lampan med sitt för odlingsväxten speciellt utarbetade ljusspektra uppnår en större tillväxt i gram eller per styck per joule elektricitet. Detta kan inte klargöras med mätningar utan endast med att pröva lamporna i praktiken.

#### Komponenter

I LED-lamporna (luminaire, fixture) finns ljusproducerande lysdioder, reflektorer och linser för att rikta ljuset, strömkälla (driver), värmesänka (heat sink), möjligen fläkt (fan), lamphölje (housing), hållare (mounting), anslutningstillbehör (connection) för att kunna koppla varje lampa till växthusets elsystem eller för att kunna seriekoppla lamporna. I effektiva LED-lampor används förutom enskilda i krets lödda leddioder även COB-leddioder (COB = circuit on board), där leddioderna är packade till en

lysande platta. Leddiодerna som producerar ljus kan vara skyddade mot vatten och smuts med ett glas försedd med en beläggning som förhindrar återspeglning.

### LED-lampans ljus kan dimmas utan fördröjning

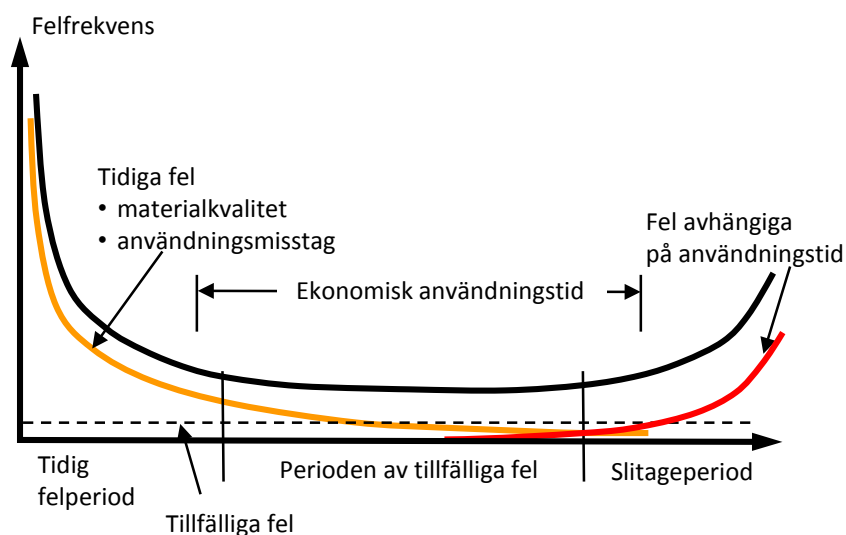
Leddiодer kan dimmas om lampans strömkälla tillåter det. I växthus strävar man med dimning (sänka ljusnivån) att justera ljusstyrkan samt uppnå, ur tillväxtens synpunkt, den optimala dagliga ljussumman. För att justera enskilda lampor eller lampgrupper kan man använda trådlösa fjärrkontroller.

## 3.4. Tillförlitlighet: avtagande av ljusintensitet, bortfall, beständighet av färg

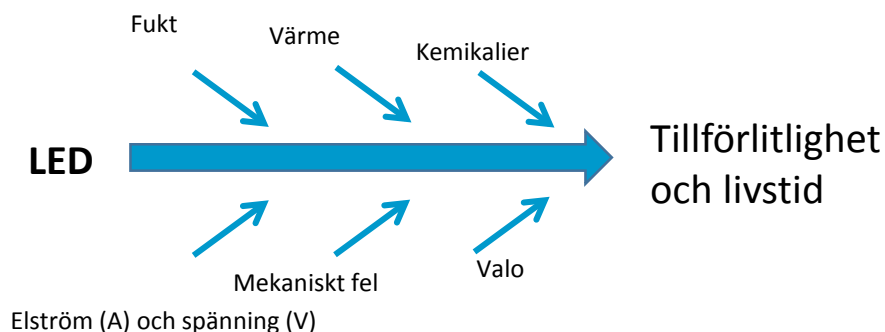
### LED-lampans tillförlitlighet

Vid övergång till LED-teknik är de största tekniska utmaningarna lysdiодernas och lampornas pålitlighet. Under senaste tider har detaljerade rapporter publicerats om pålitlighetens olika delområden samt om de metoder som utnyttjats vid mätningarna (U.S. Department of Energy 2011, 2014, Osram 2013, Lumileds 2016).

I led och andra tekniska apparater beskrivs fel ofta med hjälp av en koppmodell (Bild 6). Förekomsten av fel kan tidsmässigt indelas i tre skeden: tidig, sporadisk och slitage. Omfattningen av LED-lampornas felfrekvens i ett tidigt skede beror på varje enskild tillverkares kvakitets- och testsystem. Om det vid tillverkningen av LED-lampornas komponenter förekommer en god kvalitetskontroll är det sannolikt att det förekommer endast få fel på lamporna i ett tidigt skede. Under det sporadiska felskedet, då lamporna är i växthuset, är antalet fel på lamporna i allmänhet minst. Då brukstiden ökar ökar ofta antalet fel som förorsakar en sänkning i ljusintensiteten.



**Bild 6.** Koppmodellen beskriver tekniska apparaters såsom LED-lampors felfrekvens som förekommer hos apparaten under dess livslängd.



**Bild 7.** De mest betydande inre och yttre faktorerna som inverkar på LED-lampans pålitlighet och livslängd.

### Pålitlighet: ljuseffektivitetens bestående, bortfall, färgernas bestående

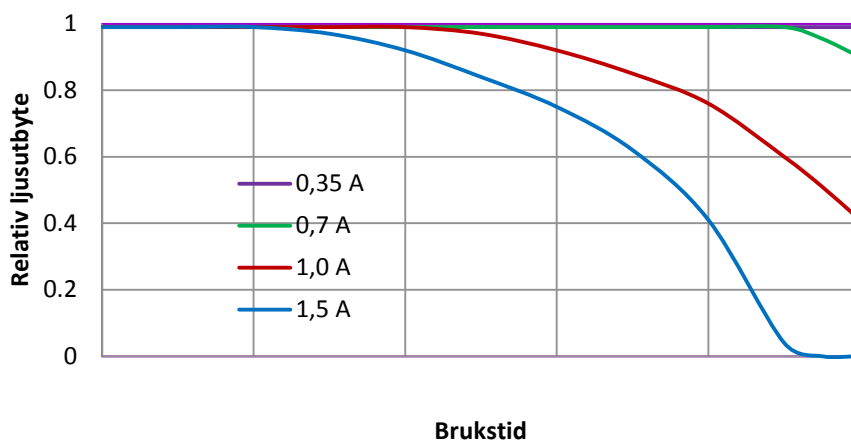
LED-lampans pålitlighet indelas i tre delområden: ljuseffektivitetens bestående, lampan går plötsligt sönder och LED-spektrrets färgers bestående.

### Ljuseffektiviteten sjunker med brukstimmarna

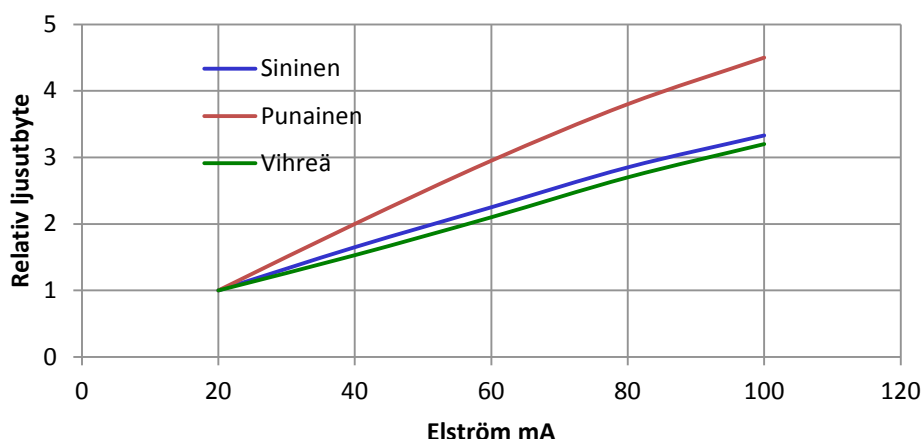
Faktorer som inverkar på beståndet av LED-diodernas ljuseffektivitet är nuförtiden relativt välkända. För att mäta ljuseffektivitetens beständighet i förhållande till tiden finns en standardiserad metod (IES LM-80) diodens mätvärden levereras av en tillförlitlig lamptillverkare.

Samtliga LED-dioders ljuseffektivitet minskar med brukstimmarna men hur snabbt den minskar beror bland annat på den strömstyrka som letts till lampan (Bild 8) samt på den använda spänningen. Livslängden på en LED modul är definierad som den tid det tyar tills ljusflödet ur lampan når 70 % av sitt initialvärde. Detta L70-värde är ofta 50 000 timmar.

LED-lampans ljusutbyte kan ökas genom att använda högre strömstyrka (Bild 9) eller spänning, samtidigt förkortas dock leddiodernas livslängd. Beträffande ljusutbyte och lampans brukstid görs alltså en kompromiss. Man bör även ta i beaktande att den röda LED-diodens ljusutbyte är större än den blåa diodens om strömstyrkan är densamma. Man gör alltså en kompromiss mellan ljusutbytet och lampans livstid.



**Bild 8.** Det relativa ljusutbytet förändring under lampans brukstid med olika LED-dioder och strömstyrka. Lampans livslängd tar slut när det relativa ljusutbytet sjunker under den nivå man strävat till, till exempel 0,9. Då styrkan sjunker under 0,7 är lampans livslängd senast slut.



**Bild 9.** Inverkan av lampans strömstyrka på LED-diodens ljusutbyte.

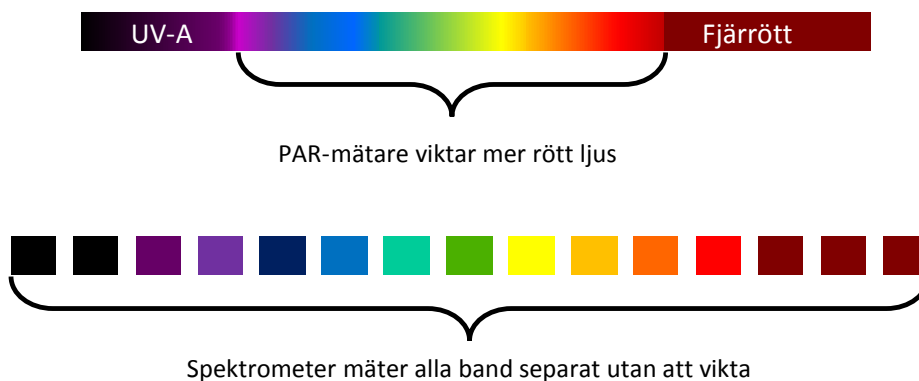
Vanligtvis dimensionerar LED-lampans tillverkare strömstyrkans och spänningens styrka så att lampans ljusutbyte är tillräckligt stort och håller den utlovade tiden. Eftersom lampans ljusutbyte beror på den strömstyrka och spänning som använts i lampan så beskriver LED-diodernas L70-värde inte nödvändigtvis lampans ljusutbytes beständighet i timmar.

Lampans lysdioder producerar alltid värme och diodens ljusutbytes beständighet beror på i vilken temperatur dioden används. Faktorer som inverkar på lampans temperatur är lampans konstruktion samt lufttemperaturen omkring lampan. En lampkonstruktion som leder värme dåligt höjer diodens temperatur och förkortar diodens livslängd.

Förutom dioden kan lampan även innehålla optiska linser och speglar vars effekt minskar med tiden och förorsakar en minskning i ljusutbytet speciellt i varma och fuktiga utrymmen såsom växthus.

#### **Med PAR-ljusbätare eller spektrometer mäts PAR-strålningens intensitet**

Tekniskt sett är det möjligt att relativt pålitligt mäta hela den vid fotosyntes brukbara PAR-ljusets intensitet som lampan producerar genom att i PAR-mätaren fästa en sensor som mäter fotosyntesen (quantum sensor). Den enhet som ljusbätaren anger är  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . PAR-ljusbätaren kan inte skilja på spektrums olika bandets andelar och den viktas mera det röda än det blåa ljuset (Bild 10). Detta viktning ger en bild av hur effektivt växterna ungefär använder ljusets våglängder vid fotosyntesen. Med LED-ljus kan man dock försöka skilt inverka på ljusets samtliga band varför det är bäst att mäta de olika ljusbanden med en spektrometer. PAR-ljusbätaren är inte så dyr och den är lätt att använda. En spektrometer är en apparat främst för lamptillverkare eller en lokal högskola/tekniskt institut.



**Bild 10.** PAR-ljusbmätaren anger hela PAR-strålningens intensitet, spektrometern anger parstrålningens våglängdsbandens intensitet.

### Lampan går plötsligt sönder

Om lampan plötsligt går sönder beror det oftast på att elkomponenterna såsom till exempel transformatorn eller el-kopplingarna gått sönder. Vid dylika fall kan lampan exempelvis börja blinka eller slockna helt trots att LED-dioden fortfarande är funktionsduglig. På basen av garantin eller kontrakt-söverenskommelser kan tillverkaren leverera en ny lampa istället.

### En nedgång i effekten hos olika färgers led i olika hastighet förändrar lampans spektrum

Den färg som avges av LED-lampan och som uppfattas av människoögat består ofta av ljus som avges av flere olika dioder såsom rött och blått. Då det i en viss färgs diod sker en förändring förändras hela spektret av ljuset som lampan avger. Om till exempel de blåa dioderna är av låg kvalitet så ändras diodernas ljus småningom från violett mot rödare nyanser. Om de fosforbestrukna ledlysens yta blir skadad eller om det i fosformaterialet sker kemiska förändringar, kan det förorsaka att det vita ljuset de normalt avger förändras till gult och/eller grönt.

Betydande förändringar i spektret hos växthuslampor förorsakar ofta förändringar i växternas tillväxt och utveckling speciellt under vintertid då belysningen i huvudsak är konstgjord belysning. Om till exempel det blåa ljuset i lampan blir svagare kan det förorsaka ökad längdtillväxt hos växterna. En lägre mängd rött ljus minskar fotosyntesen och växternas storlek. Förändringar i LED-lampans spektrum kan stort inverka på blomningen och antalet blommor speciellt i sådana fall som ljusreceptet baserar sig på ett skräddarsytt och väletablerat ljusspektrum.

## 3.5. Planering av belysning

### Planering av belysning som grund för val av lampor

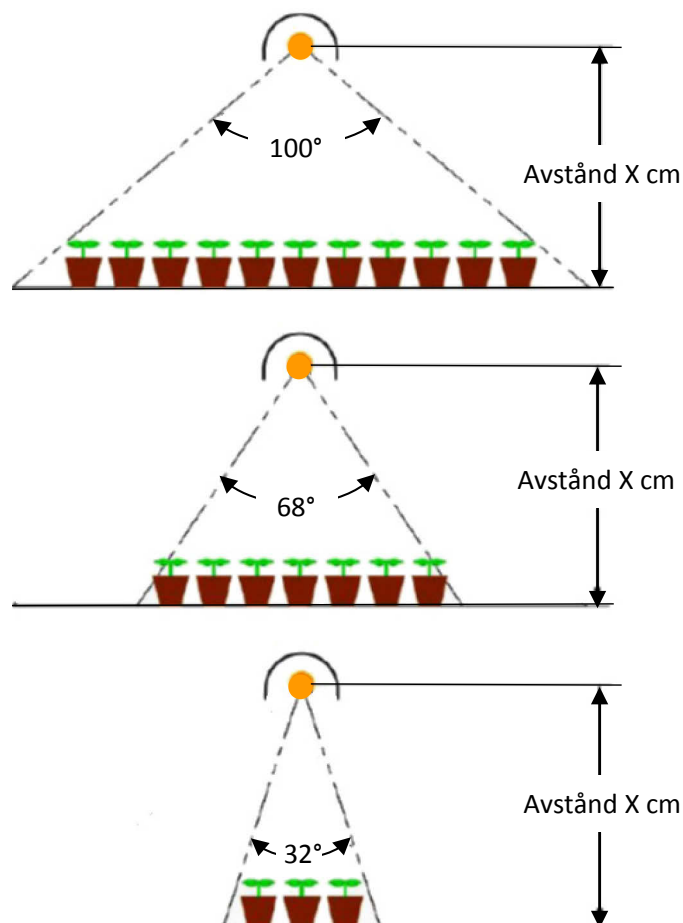
Vid övergång till LED-lampor i växthusodling är det av stor vikt att noggrant planera belysningen. Planeringen baserar sig på hela grödans behov av PAR-ljuset ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) inte på en enskild lampas värden.



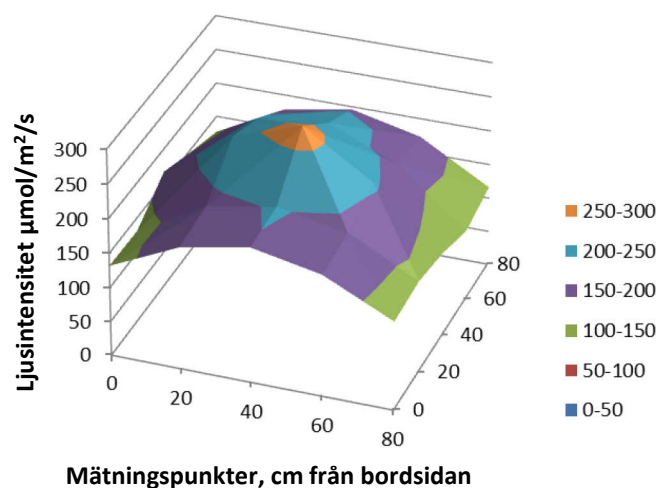
Det område som LED-lamporna på marknaden belyser varierar stort (Bild 11). En del av lamporna är av typen spotlights vars ljusområde är väldigt smalt och vars konstruktion baserar sig på en effektiv optisk konstruktion. Då ljusets öppningsvinkel hos lampan är smal koncentreras det utsända PAR-ljuset på en mindre yta jämfört med en lampa vars ljusvinkel är bredare och båda lamporna befinner sig på samma avstånd från den belysta ytan. För att uppnå en jämn belysning på hela odlingsytan behövs flere lampor med smal ljusvinkel än lampor med bredare ljusvinkel.

Ljusströmmen ( $\mu\text{mol/s}$ ) från en enskild lampa är standard. Om man för lampan längre från ytan man vill belysa delas ljuset på en större yta. Ju bredare växyta man belyser med en enskild lampa desto lägre sjunker ljusintensiteten ( $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ ).

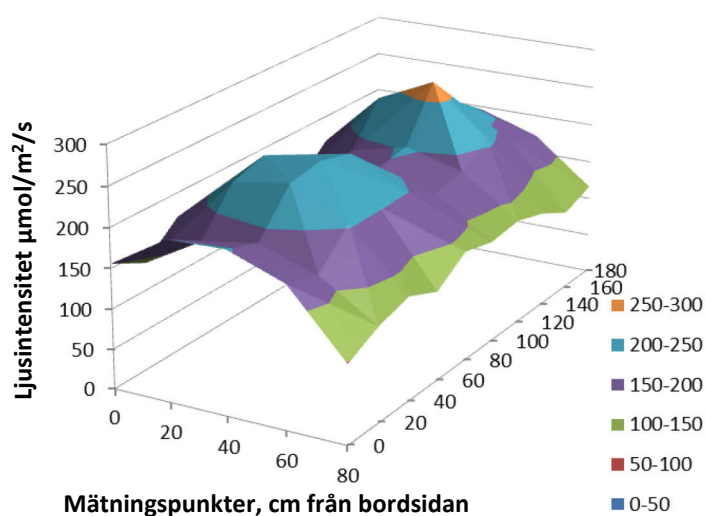
Om fördelningen av den enskilda lampans utsända ljus koncentreras mera i lampans mittområde så räcker inte en lampa för att lysa upp hela odlingsbordet på bredden. Härvid kan ljusintensiteten på kanterna vara betydligt lägre än mitt på området (Bild 12). Då man strävar till att uppnå en så jämn belysning som möjligt på odlingsytan bör de parallellt placerade lampornas ljusvinklar komplettera varandra så att grödan får en så jämn belysning som möjligt (Bild 13).



**Bild 11.** Då lampans avstånd från den belysta ytan är standard, beror den belysta ytans storlek på ljusets öppningsvinkel som LED-lampan utsänder. Då den ljusström som ljuskällan utsänder är standard ( $\mu\text{mol/s}$ ), är ljusintensiteten ( $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ ) desto mindre ju bredare område ljuset fördelas.



**Bild 12.** Ljusstyrkans fördelning på bordets yta hos en LED-lampa som placerats i mitten av odlingsbordet. Ljusintensiteten på kanterna av bordet som den enskilda lampan avger är till och med  $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  mindre än i mitten av bordet och samtidigt är växternas tillväxt långsammare på kanterna än i mitten (Källa: Mätresultat från Luke Piikkiö).



**Bild 13.** Två efter varandra placerade LED-lampors ljusintensitetsfördelning på odlingsbordet. De efter varandra placerade LED-lampornas ljusstäckning är inte tillräcklig för att ljusintensitetsfördelningen skulle möjliggöra en jämn tillväxt i mitten av odlingsbordet (Källa: Mätningresultat Luke Piik-kiö).

### Olika färgers dioders ljus kan fördelas ojämnt – spektret ändras i kanten av ljusområdet

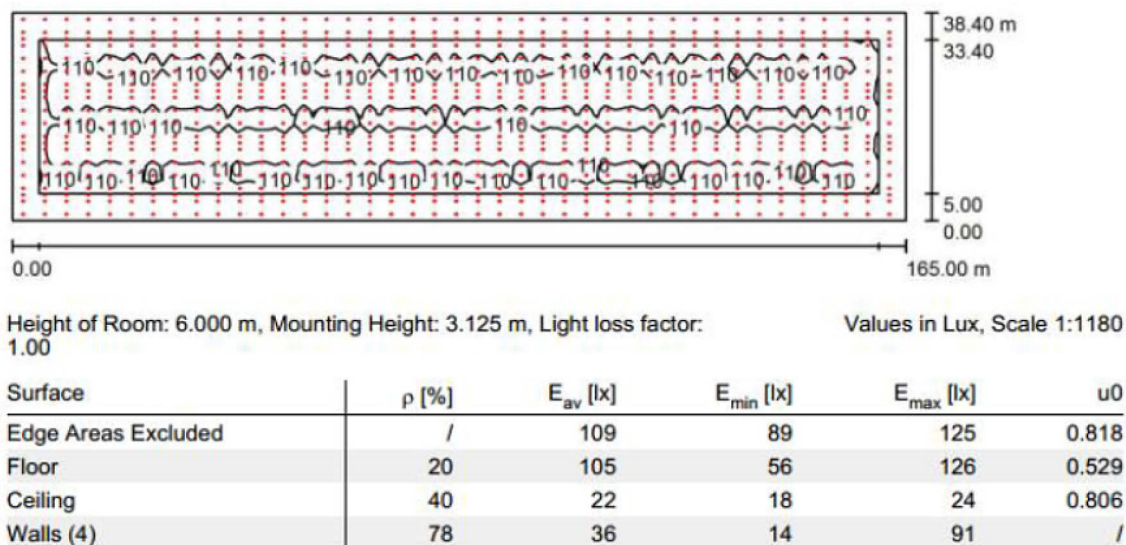
LED-lampans tekniska uppförande inverkar även på jämnheten av det ljus som den enskilda lampan avger. Spektret hos en LED-lampa av dålig kvalitet är inte jämnt på hela upplysta ytan vilket kan inverka på tillväxten. Till exempel kan ljusets öppningsvinkel hos röda och blå dioder vara olika.

### Ljusplanering är en del av anskaffningen

En pålitlig lampleverantör sammanställer en ljusplan ur vilken det i alla fall framgår en uträkning över ljusstyrkans fördelning för en viss yta. En tillräckligt noggrann uträkning på den lodräta ljusfördelningen förutsätter för tillfället ännu en stor uträkningskapacitet och är inte ännu i rutinmässig an-

vändning. En belysningsplan som är gjord med god yrkesskicklighet innehåller uträkningar över behövligt antal lampor samt deras inbördes placering.

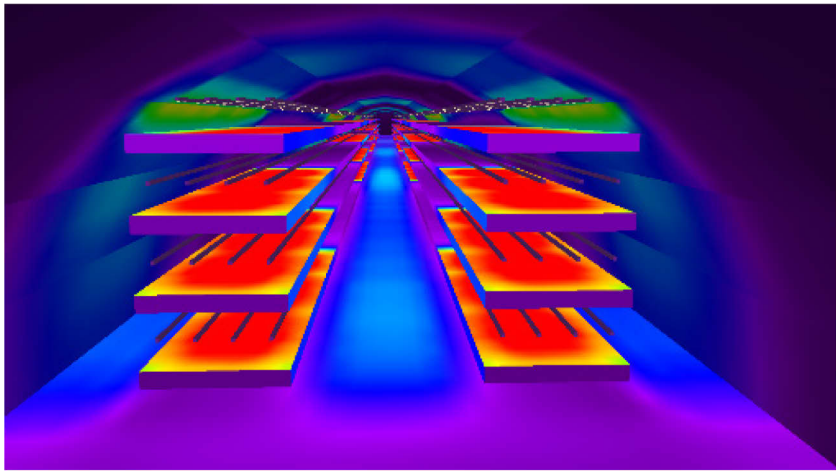
En yrkesmässigt gjord belysningsplan samt kostnadskalkyl är speciellt viktigt då man bygger ut belysning för höga växter såsom gurka och tomat. Belysningslösningarna för dessa avviker både tekniskt och kostnadsmissigt betydligt från de växters som odlas på bord. HPS-lampor som allmänt används som toppljus kompletteras nuförtiden ofta med LED-mellanljus varvid man bör ta i beaktande den ljusintensitet som dessa LED-mellanljus avger och förhålla det till det ljus som toppljusen avger. (Bild 14).



**Bild 14.** Belysningsplan för ett växthus där HPS-lampor kompletterats med LED-mellanljus. De röda punkterna beskriver LED-lampornas placering i växthuset. Vid golvnivå strävar man till att nå en ljusnivå på 110  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . I planen har man tagit i beaktande ljusets fördelning i växthusets olika delar. (Källa: Netled Oy, Niko Kivioja).

På en stor odlingsyta behövs tillräckligt med belysning både lodrätt och vågrätt. En uppskattning av den behövliga mängden lampor är enligt ögonmått omöjlig att göra i dylika fall. En alltför knapp belysning minskar på skörden och en alltför stor mängd lampor i förhållande till ljusbehovet ökar onödigt på investeringskostnaderna. I en hög växtlighet är det nödvändigt att växternas lägre delar får tillräckligt med ljus eftersom de nedre bladen producerat fotosyntesprodukter som i växten transporteras till frukterna.

När belysningsplanen är gjord och lamporna installerade kan man med bildanalys kontrollera fördelningen av ljuset på odlingsstället (Bild 15). Ifall ljusets spridning och intensitet inte är på en tillfredsställande nivå kan man med hjälp av bildanalys omplacera lamporna.



**Bild 15.** Våningsodlingslösning i Londons metro (övre bilden). När lamporna som installerats kopplas på kan man fotoanalysera ljuset på odlingsytorna från lamporna (nedre bilden). På odlingsbordens röda område är ljusintensiteten  $90 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . (källa: Valoya Oy, Lars Aikala).

## 4. Odlingserfarenheter

### 4.1. Tomat

#### Erfarenheter av belysning på tomatodlingar i Finland

Ett tiotal odlare i Österbotten har ungefär ett år (sommaren 2016) använt LED-lampor på tomatodlingar. LED-lampor har främst använts som mellanljus. I vissa fall har även toppljus bytts ut till LED-lampor.

#### För tomat 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ av mellanljus och 180 – 440 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ av toppljus

De använda mellanljusen har varit längsgående stänger som installerats på en eller två höjder mellan raderna. Stängerna är försedda med röda och blåa leddioder i förhållandet 5:1. Den använda installationseffekten för LED-mellanljuset är 40–50  $\text{W}/\text{m}^2$ . Energins ljusutbytet är hos lamporna 2,1  $\mu\text{mol}/\text{J}$ . Producerad med mellanljus är ljusets intensitet alltså 105  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  vilket motsvarar intensiteten som används i Danmark och Holland. Detta är alltså den beräknade intensiteten per yta inte den ljusintensitet som når växternas blad.

Enligt odlarnas erfarenheter ökar installationen av LED-mellanljus, för att komplettera HPS-toppljus, den årliga avkastningen med 15–20 % och ökar i samma proportion avdunstningen. Avkastningen är under ett gott år ca 90  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

Installationseffekten hos COB-LED toppljus som ersätter HPS toppljus (190  $\text{W}/\text{m}^2 = 290 \mu\text{mol}/\text{J}$ ) är 100  $\text{W}/\text{m}^2$  och ljusproduktionen 2,7  $\mu\text{mol}/\text{J}$ , varvid ljusintensiteten är 270  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Det är 2–4 gånger mera än i Holland och Danmark. Toppljus är en kombination av rött-blått-vitt ljus.

Toppljusens styrningsgränsen är (av/på) 250–300  $\text{W}/\text{m}^2$  och mellanljusets till och med 600  $\text{W}/\text{m}^2$  totalstrålning av solen. Man kan dock koppla ifrån hälften av lampgrupperna under vår och sommar.

Vid belysning med enbart LED-lampor där HPS-toppljus (190  $\text{W}/\text{m}^2$ , 290  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) ersätts med LED-ljus (100  $\text{W}/\text{m}^2$ , 260  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) och tillsätter LED-mellanljus (50  $\text{W}/\text{m}^2$ , 110  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) stiger avkastningen lika mycket som ljus tillförs. År 2016 hade man dock inte ännu erfarenheter av odling under midvinter enbart med LED-belysning.

#### Växttäthet och ljus i förhållande till varandra

Den fördel i avkastningen man erhåller med LED-mellanljus får man delvis genom att öka växttätheten. På våren tar man bort en större mängd toppar från växterna. En del av skördeökningen beror på tyngre frukter på vintern och en del av en ökning av antalet frukter. Mellanljuset håller även grödan torrare vilket minskar mängden gråmögel. Användningen av mellanljus förbättrar även ljusläget för plantor som planteras under odlingssäsongen.

#### El ger med LED-lampor en tomatskörd 40–50 % effektivare än med HPS-lampor

Övergången till LED-belysning ser inte ut att märkbart ha inverkat på ljusets användningseffektivitet (skörd i gram per mol ljus, light use efficiency LUE  $\text{g}/\text{mol}$ ), varför effektiviteten av elanvändning ( $\text{kg}$  skörd per  $\text{kWh}$  el) har blivit bättre i samma förhållande som lampans ljuseffektivitet ( $\mu\text{mol}/\text{J}$ ). I toppljus har ljusutbytet ökat med 40–50% (1,7–1,8  $\mu\text{mol}/\text{J}$  -> 2,6  $\mu\text{mol}/\text{J}$ ). Lågeffektiva HPS-mellanlampornas, som man knappast alls tidigare använt på tomat, och LED-mellanlampornas skillnad i ljusutbytet är ca 40 % (1,5  $\mu\text{mol}/\text{J}$  -> 2,1  $\mu\text{mol}/\text{J}$ ).

#### Användning av endast LED-lampor ökar nödvändigtvis inte behovet av tilläggsvärme

Då man övergått till enbart LED-belysning och tagit mellanlamporna i bruk har el-energin som kommer till växthus och samtidigt även värmen minskat med 25 %. Minskningen riktar sig främst till

växternas toppar. Detta medför dock inte nämnvärt en ökning på behovet av uppvärmning och förutsätter inte installation av värmerör mellan raderna.

En lägre värmeproduktion hos dioderna minskar ventilationsbehov då täcket klarar av att kondensera den avdunstande vattenångan. Detta möjliggör upprätthållandet av en högre CO<sub>2</sub>-halt. På behovet av uppvärmning inverkar det att LED-lamporna avger nästan lika mycket värme mellan raderna som värmerören skulle avge. Vid kallt väder kan man dessutom använda en energigardin eller en kombinationsgardin. Skillnaden av temperatur mellan högre och närde luftnivåer kan upprätthållas utan tilläggsvärme eftersom LED-lamporna uppe strålar mindre värme till grödan än HPS-lamporna.

## 4.2. Gurka

### Det man lärt sig av tomat passar inte direkt för gurka

Odling av gurka och tomat med HPS-belysning skiljer sig från varandra beträffande temperatur samt mellanbelysning. Vid odling av gurka används högre lufttemperatur och man har redan en längre tid använt HPS-mellanlampor 50–70 W/m<sup>2</sup>. Gurkgrödans lodräta ljusprofil avviker från tomatgrödans. Gurkans stora blad stoppar effektivt strålningen från solen och toppljus med undantag av de gröna och fjärröda strålarna. På grund av detta är mellanljusens och toppljusens gröna färg av stor betydelse för fotosyntesen i grödans mellan- och bottenskikt. Den ökning i avkastningen som HPS-mellanlamporna anses ha, kan delvis även bero på den värmestrålning de avsänder och som ger värme till frukterna. Varma frukter växer snabbare än svala frukter och tävlar effektivare mot grödans övriga delar om de fotosyntesprodukter som bladen producerar.

### Gurkförsök med LED-LED, HPS-LED och HPS-HPS

Av gurkanodling med LED-toppljus har man försöksresultat i Finland (Särkkä mm. 2014). Sommaren 2013 samt vintern 2013-2014 jämfördes i kontrollerade försök

- Ren HPS-belysning (180 + 56 W/m<sup>2</sup>, 300 + 90 μmol/m<sup>2</sup>/s)
- Ren LED-belysning (128 + 64 W/m<sup>2</sup>, 190 + 125 μmol/m<sup>2</sup>/s)
- Kombination av HPS-toppljus och LED-mellanljus (180 + 64 W/m<sup>2</sup>, 300 + 125 μmol/m<sup>2</sup>/s).

Spektrumet hos LED-lamporna i försöket var fortgående från blått till fjärrött. Fjärrött var 17 % och förhållandet rött – fjärrött var 2,77. LED-lampornas ljusutbytet var låg, 1,5 μmol/J .

### Ljusintensiteten som LED-toppljuset producerade var inte tillräckligt under midvintern

Vid försöket var ljusintensiteten som LED-toppljus producerade för låg under den målniga midvintern. Under december-januari månaderna var skörden 25 % lägre med LED-toppljus än med HPS-toppljus. Beträffande LED-LED-belysningen ger försöket att under midvintern räcker inte denna ljusintensitet till ens med LED-belysning.

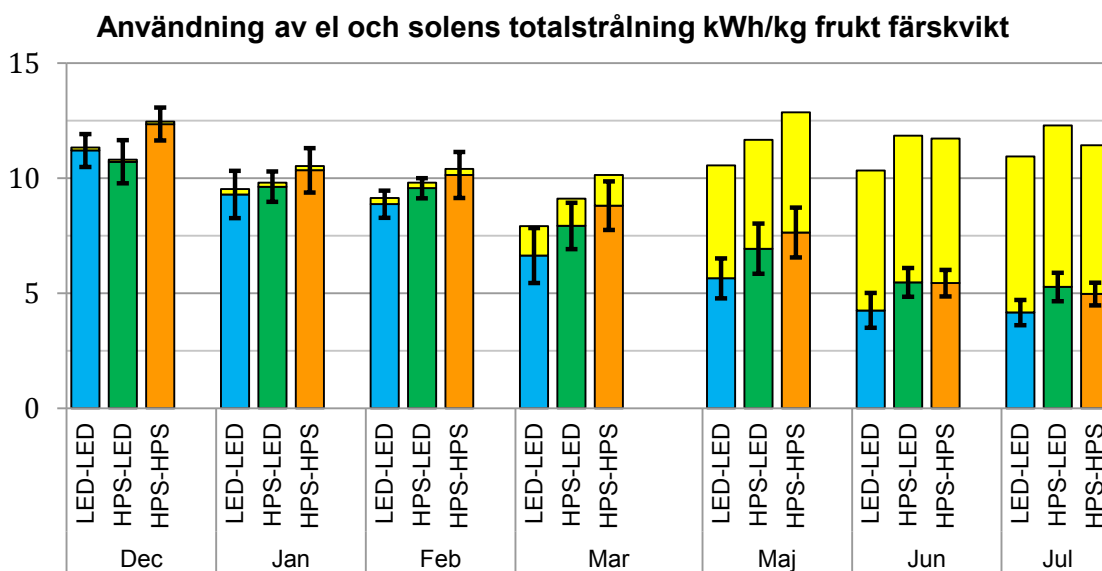
### Solen kompenserade LED-toppljusets svaghet från och med februari

Då solen hjälpte till tillräckligt i februari återhämtade sig grödan i ren LED-belysning. Efter detta erhöles lika stor skörd i samtliga belysningar trots att man vid LED-LED-belysning använde mindre energi. Genom detta var el-konsumtionen med ren LED-belysning räknat per producerat fruktkilogram under februari-mars ca 25 % lägre än med ren HPS-belysning (Bild 16). El-konsumtionen med HPS-toppljus-LED-mellanljus var ca 10 % lägre än den med HPS-HPS-ljus.

### I växthus med LED-belysning behövs mindre ventilation på sommaren

Under sommaren då man regelbundet var tvungen att avlägsna värme genom ventilationsluckor hade man nytta av den lägre värmeavgivningen hos LED-lamporna. Under sommaren förbrukade ren

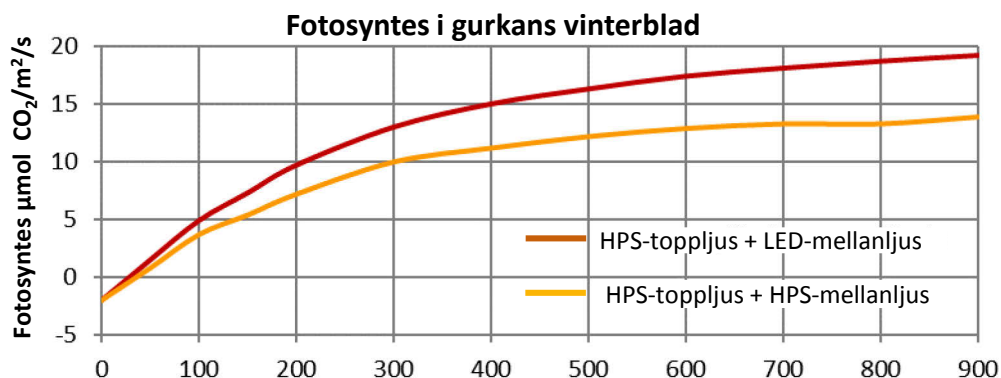
LED-belysning 20 % mindre el per fruktkilogram än ren HPS-belysning (Bild 16). LED-HPS-belysning förbrukade lika mycket ström som ren HPS-belysning. Enheter som under våren och sommaren belystes med LED-lampor vädrades mindre vilket medgav en högre koldioxidhalt. Detta ökade för sin del LED-belysningens el-förbrukningseffektivitet. Hogewoning et.al. (2012) har rapporterat om ett tidigare försök där man konstaterar att vid användning av LED-belysning förbrukades 21 % mindre el än vid användning HPS-belysning, detta försök är gjort ännu tidigare än försöket i Piikkiö.



**Bild 16.** Försöket i Piikkiö 2013–2014. Den el-energi från lampor och solljus kWh/kg som behövs för att producera ett kilogram gurka per månad. Nedre delen av stolparna är effektiviteten av användningen av belysning. Stolpens gula övre del anger effektiviteten av användningen av solljus.

### Blad som växt i en högre ljusmängd hade effektivare fotosyntes

Vid en combination av HPS-toppljus och LED-mellanljus erhöill man största mängd ljus för bladen på mellanhöjd. Då man mätte bladens fotosyntesaktivitet (syntes per ljusintensitet) med en fotosyntesmätare kunde man konstatera att bladen som utsatts för HPS-LED-belysning kunde effektivast utnyttja tilläggs ljus (Bild 17).



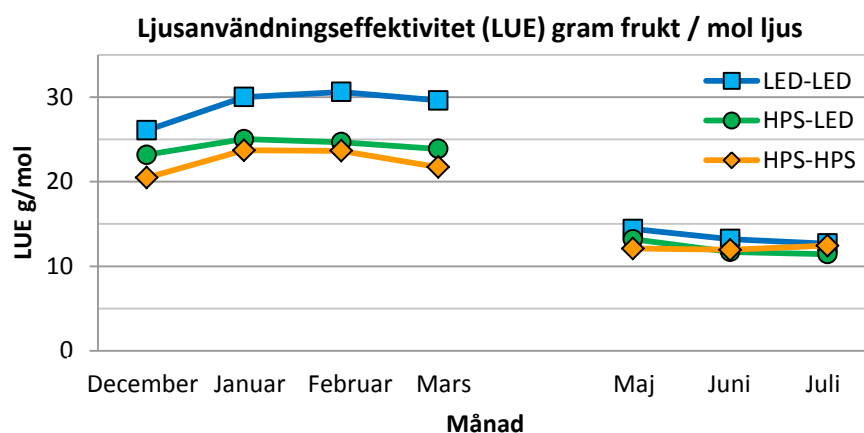
**Bild 17.** Förmågan hos bladen att utnyttja ökad ljusmängd i januari i 800 ppm CO<sub>2</sub>-halt enligt olika belysnings-sätt. De belysnings-sätt som visas i bilden var HPS-toppljus + LED-mellanljus och HPS-toppljus+HPS-mellanljus.

### LED-lampornas mikromol troligen effektivare än HPS-lampornas mikromol

Då man ser på användningen av ljus per kilogram gurka på vintern (Bild 18) erhöles med LED-LED-belysning 30 % bättre tillväxt per ljusmol än med traditionella HPS-belysningen. Under vintern fanns ingen skillnad i CO<sub>2</sub>-halten. Enda skillnaden fanns i ljusmängden och ljusspektret. Den effektivare belysningens omvandling till skörd kan tolkas bero på att LED-lampornas ljusmol användes effektivare vid fotosyntesen än HPS-lampornas ljusmol. LED-lampans ljusspektrum passade tydligen bättre för gurka än HPS-lampans ljusspektra. Om LED-toppljusets avgivna ljusintensitet skulle ha varit större än det i försöket och spektret det samma skulle troligtvis LED-LED-belysningen förbrukat kanske 30 % mindre elektricitet än den traditionella HPS-belysningen.

### Under sommaren blir hälften av ljuset oanvänt

Under sommaren blir hälften av ljuset oanvänt. I huvudsak beror detta på att växternas övre blad inte effektivt kan utnyttja en så stark strålning vid fotosyntesen, som under en solig dag kl 10–14 när dem (Bild 18). En annan viktig sak är en alltför hög temperatur i förhållande till luftens CO<sub>2</sub>-halt vilket beror på att den kraftiga ventilationen sänker luftens CO<sub>2</sub>-halt. En möjlighet att ha bättre förhållanden av temperatur och CO<sub>2</sub>-halt är att installera vid växthus en värmeväxlare, som avlägsnar värme och fukt. Temperaturen är i ett sånt slutet rum den samma eller lägre än i ett rum med ventilationen men CO<sub>2</sub>-halten hålls hög. Detta höjer effektiviteten av utnyttjandet av ljus under sommaren med 25–30 % (Särkkä mm. 2008).



**Bild 18.** Försök i Piikkiö 2013-2014. Tillväxt som erhållits med ljus det vill säga ljusets användningseffektivitet (LUE). Ljuset omfattar belysning samt solljuset som nått grödan.

### En inbesparing på el med 40 % kan vara möjlig även på gurka

Troligtvis kan det vara möjligt att i Finland även på gurka uppnå en 40 % förbättring i elförbrukningseffektiviteten såsom det är med tomat, då man övergår från HPS-belysning till ren LED-belysning. Högljusen borde på avge en ljusstyrka på över 300  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ .

Med LED-mellanljus kan man delvis uppnå HPS-mellanljusets värmeeffekt eftersom LED-lampan motsvarar ett 40–60 graders värmerör mellan växtraderna. Enbart mellanlampornas ersättande med LED-lampor inverkar i själva verket rätt lite på odlingens användningseffektivitet.

LED-lampornas ringa värmestrålning i gurkgrödans toppskikt bör under vintern ersättas med andra metoder. Regelbunden användning av energigardiner är en möjlighet. Lampor vars fläkt riktar den varma luften nedåt från de högeffektiva högljusen kan hjälpa under största delen av året. Genom att få luften i rörelse kan även medföra indirekt nytta eftersom luftströmmen söndrar det stillastående luftlagret på de stora bladens yta varvid koldioxiden i luften bättre når bladet (Kitaya mm. 2004).



### **Gurkförsök i Polen med samma alltför svaga ljusintensitet som vid försöket i Piikkiö**

Erfarenheter från försök gjorda utomlands ger mycket liten information om hur man i Finland kunde använda LED-belysning. Philips hade år 2015 i Polen ett försök där man använde sammanlagt 320  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  belysning. Denna bestod av LED-toppljus (2,5  $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) och LED-mellanljus (2,2  $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) (troligtvis ungefär 100 + 45  $\text{W}/\text{m}^2$ ). Till jämförelse användes HPS-toppljus + LED-mellanljus som producerade samma ljusintensitet samt enbart HPS-toppljus.

Ljusintensiteten var alltså ungefär på samma nivå som i försöket ovan som gjordes i Finland med LED-toppljus + LED-mellanljus vilket visade sig vara alltför låg under midvintern i Finland. I de Polska förhållandena var belysningen tillräcklig på våren och hösten. Resultaten i Polen – enligt Philips reklammaterial – visade att man på våren och hösten kunde spara 60 % på el-förbrukningen genom att använda ren LED-belysning. Skillnaden i el-förbrukningen jämfört med den i försöket i Finland beror troligtvis till stor del på det att de i Polen använde LED-lampornas ljusutbytet var betydligt högre.

### **De holländska förhållandena ger väldigt lite på grund av den låga ljusintensiteten**

År 2017 på den första stora gurkodlingen i Holland med enbart LED-belysning är LED-mellanljusens installationseffekt 40  $\text{W}/\text{m}^2$  (20 % blått, 80 % rött, ljusutbyte 2,2  $\mu\text{mol}/\text{J}$ , belysningstid 13–18 h/dygn => ljusintensitet 88  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  => dagliga ljusmängden från lamporna 6–8  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$ ). Detta är tillräckligt för att upprätthålla grödans kondition och fruktens kvalitet från och med vårvintern men inte till odling under midvintern. Den använda ljusmängden per dygn är endast 10–20 % av den ljusmängd som används på gurka i Finland.

## **4.3. Sallad, örter**

### **Forskning främst beträffande kvalitet**

Under de senaste åren har man betydligt mera satsat på forskning som berör LED-belysningens inverkan på bladgrönsakernas och örternas kvalitetsförbättring än på LED-belysning på gurka och tomat. Belysningsforskning som berör snabbt växande, små och lite arbete krävande växter är flerfallt billigare än att undersöka belysning för gurka och tomat. I dessa forskningar har man koncentrerat sig främst på att försöka förbättra kvaliteten med hjälp av olika spektrum ur LED-lamporna. Med olika spektra kan man påverka växters färg, form, näringsmässigt nyttiga eller skadliga föreningars halter samt hållbarhet under transport och i handeln. Med hjälp av LED-belysning kan man även upprätthålla låga växters våningsodling i växthus (se nedan stycke 6 där man jämför el-kostnader).

### **Spektrum enligt olika växtskeden är enklast att genomföra med kruksallad och -örter**

Det bästa möjliga ljusspektret är olika för olika växter till och med för olika sorter (Olle ja Virsile 2013, Brazatyite 2016, Piovene mm. 2015) varför man i princip vid odling borde utnyttja flere olika belysningsrecept (ljusintensitet, spektrum, tider). Spektrets flaskhalsar inverkar dock endast under en del av året och odlingsväxternas och sorternas reaktionsstyrka på spektret varierar. Sortimentets bredd och variation leder alltså till kompromisser beträffande val av lampor.

Det bästa möjliga ljusspektret är olika för olika växter till och med för olika sorter (Olle ja Virsile 2013, Brazatyite 2016, Piovene mm. 2015) varför man i princip vid odling borde utnyttja flere olika belysningsrecept (ljusintensitet, spektrum, tider). Spektrets flaskhalsar inverkar dock endast under en del av året och odlingsväxternas och sorternas reaktionsstyrka på spektret varierar. Sortimentets bredd och variation leder alltså till kompromisser beträffande val av lampor.

### **Med hjälp av ljusets mängd och spektrum form, färg, smak, lägre nitrathalt**

Lagringsegenskaper och kvalitet kan förbättras med hjälp av ljusmängd och spektrum, speciellt på vintern. Spektret påverkar längden på växternas ledavstånd, bladens bredd och torrämnehalt. Det inverkar även på den gröna färgens styrka samt på de färgade salladernas och örternas färgstyrka (röd, gul, orange, violet) samt i viss mån på smaken. I allmänhet då ljusmängden ökar stiger socker-

halten i bladen varvid salladerna är sötare. Färgen och delvis smaken har även att göra med halten av sekundärmetaboliter i växten. Ifall mängden sekundärmetaboliter i växtens blad är för hög kan salladen smaka beskt.

### Lägre nitrathalt med hjälp av ljus

Genom den ljusmängd som man ger under hela odlingsssäsongen kan man kontrollera salladens nitrathalt således, att vid hög ljusintensitet är bladens nitrathalt lägre än vid låg ljusintensitet.

Nitrathalten kan sänkas även genom en ökning av totalmängden ljus med LED-belysning i slutet av växtskedet (Netled Hortalic, 3 veckor 4,1 mol/dygn ökning) kombinerat med en lägre dos nitratgödsel (Näkkilä mm. 2016, Nicole mm. 2016). En längre ljusstillsförelse än några dagar ändrar även gödslingsbehovet. I enskilt försök har man med kort rött ljus (638 nm pigg) behandling (3 dygn, 12 mol/dygn) fått en nedgång i nitrathalten (Brazatyite mm. 2016). Effekten beskriver kanske inte det röda ljusets effekt utan effekten av ljusets totalstyrka.

En bred ökning av ljusmängden på hela PAR-bandet (400-700 nm) förbättrar samtliga kvalitetsaspekter. Då man ökar mängden PAR-strålning är det möjligt, utan att kvaliteten lider, möjligt att även öka det fjärröda ljuset (710–850 nm) som gynnar utvecklingen av bladytan då när bladen inte ännu täcker hela odlingsytan.

### Sekundärmetaboliter

Sekundärmetaboliterna är en kemiskt mångformig grupp olika föreningar som förekommer i växterna. Föreningarna indelas enligt hur de uppstår i tre grupper: 1) Flavonoider, fenoler, polyfenoler, 2) terpenoider, 3) kväve innehållande alkaloider samt svavel innehållande föreningar.

Sekundärmetaboliternas roll i växternas ämnesomsättning varierar stort. Ofta är de nyttiga för växterna eftersom de styr flere ämnesomsättningsreaktioner som har att göra med växtens utveckling. Föreningarna skyddar växten mot alltför starkt ljus, mot skadedjur och växtsjukdomar. Vissa av dem syns hos växterna som röda, gula och violetta nyanser vilket ökar växternas marknadsvärde.

Flere av sekundärmetaboliterna är näringsmässigt nyttiga för människan. Flavonoiderna och karotenoiderna som hör till terpenoiderna är färgade pigment i växterna. Man antar att de inverkar förhindrande på infektioner, allergireaktioner samt cancer. Tosin niiden merkitystä terveydelle ruokavalion osana, kun niitä saadaan salaateista ja yrteistä, ei tunneta. Visserligen man vet inte deras betydelse för hälsan då de fås från sallader och örter i normal kost.

### Blått ljus ökar antalet sekundärmetaboliter, av vilka flere syns som färg

Om man vill minska el-förbrukningen genom att öka endast en del av spektret förutom HPS-belysningen och den ringa mängd soljus under vintern, är det blåa ljuset (440–460 nm) effektivast. 5–30 % blått ljus av totala ljusintensiteten ( $\mu\text{mol}$  blått per  $\mu\text{mol}$  total belysning) ökar antalet sekundärmetaboliter och förbättrar bladens färgning. Blått ljus gör grödan tätare om bladen övrigt växer alltför breda och tunna och stammen växer lång. Det blåa ljuset har konstaterats vara effektivast när den övriga belysningen är högst 10–20 mol/m<sup>2</sup>/dygn. (Li and Kubota 2009, Owen and Lopez 2015, Naznin mm. 2016). I Finland uppnås 10–20 mol/m<sup>2</sup>/dygn i HPS-belyst (100 W/m<sup>2</sup>) salladsrum i oktober-februari med belysning och solljus (se ovan Tabell 3).

### UV-strålning i växthus

I Finland under en solig sommardag är UV-A-ljusets strålningsintensitet ca 90  $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$  och UV-B-strålningens ca 1  $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$ . UV-A- och UV-B-ljusets totala dygnsstrålning är 3 och 0,05 mol/m<sup>2</sup>/dygn. Samtliga täckmaterial i växthus i Finland skär bort 60-70 % av UV-A-strålningen och all UV-B-strålning då man tar i beaktande täckmaterialets direkta genomtränglighet och solens infallsvinkel. Under sommaren kommer det in i växthuset, då man beaktar skuggning, ca 1 mol/m<sup>2</sup>/dygn UV-A-ljus. Under midvintern är talet ca 0,1–0,2 mol/m<sup>2</sup>/dygn.

Med LED-lampor är det möjligt att producera UV-strålning, ehuru det är kostsammare än att producera PAR-ljus.

### **Ökning av sekundärmetaboliterna med UV-B-strålning, UV-A har endast liten effekt**

Även UV-strålningen ökar mängden sekundärmetaboliter vilket syns som kraftigare färgning (Bantis mm. 2016, Brazaityte mm. 2016, Goto mm. 2016). Ju kortare våglängd desto kraftigare är UV-strålningens effekt. Om man totalt lämnar bort UV-strålning rasar den ur färg- och näringssynvinkel intressanta sekundärmetaboliternas nivå (Tsormpatsidis mm. 2008).

UV-A-strålning ger endast en liten ökning i mängden antocyanin, karotenoider och totalfenoler. Med UV-B-strålning får man tydligare effekter. Om växtbelysningen inte innehåller blå färg räcker till och med en kort tre dygns dos UV-B-ljus (våglängdshöjd 310 nm, belysningstid 16 h/dygn, ljusets intensitet 1,4  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , mängden totalt ljus per dygn 0,1  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{dygn}$ ) att höja halten betydligt (Goto mm. 2016). Om ljuset som kommer in i växthuset innehåller en vardagsration PAR-ljus (av vilket 23 % är blått) och UV-strålning, har en fördubbling av UV-A-dosen endast en liten effekt. 12 dygn av UV-A-ljus (373 nm, 16 h/dygn, 18  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 1  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{dygn}$ ) ökar halten antocyanin med 11 % (Li och Kubota 2009). En ökning av blått ljus till 55 % har en mycket större effekt än UV-A och höjer halten antocyanin med 30 %.

### **Möjligt att uppnå en 50 % effektivitetsnytta i el-förbrukningen**

I helhet kan man med LED-lampor för tillfället uppnå en 50 % bättre el-förbrukningseffektivitet (gram tillväxt per joule el) (Pinho mm. 2016). I salladsodlingar räcker LED-lampornas ljusstyrka väl till eftersom belysningsintensiteten i Finland, inom den nuvarande odlingstekniken, är 130–160  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  och den lägsta ljusmängden per dygn 10–12  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{dygn}$ .

Salladen växer bra även i betydligt kraftigare, från solen kommande, ljusmängd från vår till höst (20–30  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{dygn}$ ), då ljuset är solljus. Tydligt kunde man under vintern öka på ljusmängden med LED-belysning utan att märkbart öka värmebelastningen. En begränsande faktor för tilläggsbelysning är kostnaden för lamporna.

## 5. Är en LED-investering lönsam

### 5.1. Från återbetalningstid till lampans pris

#### En enkel lönsamhetsjämförelse utan finansierings- och skatteinverknings

Lönsamheten av anskaffningen av LED-lampor räknas ofta enligt kraven på återbetalningstiden. I tabellerna 4 och 5 visar excel-tabellerna beräkningar på hur mycket mera en anskaffning av LED-lampor kan kosta i jämförelse till anskaffningen av HPS-lampor (€/m<sup>2</sup>), då man ger en tid för återbetalning. Om man inte ännu behöver göra en ersättningsinvestering för lamporna kan man uppskatta att priset på HPS-lamporna är noll euro.

I tabellen vill man med LED-lamporna uppnå samma ljusintensitet (μmol/m<sup>2</sup>/s) som med HPS-lamporna och en viss återbetalningstid för LED-ersättningsinvesteringen. Under återbetalningstiden skulle LED-lampornas lägre el-förbrukning och den frånvarande brännarkostnaden täcka det högre priset på LED-lamporna. Det högsta möjliga investeringspriset innehåller ett investeringsstöd.

Diagrammet är förstås en stark förenkling av investeringens lönsamhet. Man känner till lampornas ljusutbytet (μmol/J). Samma ljusintensitet (μmol/m<sup>2</sup>/s) eller ljusmängd (mol/m<sup>2</sup>) kan dock ge olika skördar om lampornas spektrum är olika. I välplanerade lampor kan LED-lampornas mikromol vara "bättre" än HPS-lampornas mikromol. Med LED-lamporna kan man förväntas erhålla ytterligare fördelar genom mindre ventilation (LED-lampan producerar betydligt mindre värme än HPS-lampan per ljusmängd). Man kan även behöva tilläggsvärme men på det inverkar växthusets konstruktion, användningen av energigardiner samt temperaturens och fuktens styrningsstrategi. Utanför denna uppskattning blir beskattningens och finansieringens arrangemang.

**Tabell 4.** Jämförelse av kostnader för LED-investering. Hur mycket kan LED-lamporna kosta mera än anskaffning av HPS-lampor. I följande tabell 5 syns cellernas formler. Talen är exempel. Räkneformlerna fungerar enkelt genom kopiering till excel.

	A	B	C	D
1	<b>Fyll i de vita cellerna</b>		HPS	LED
2				
3	Lampornas el-effekt (installationseffekt)	W/m <sup>2</sup>	100	69
4	Lampornas nyttoförhållande (ljus från el)	µmol/J	1,75	2,3
5	Mikromolens tillväxtpåverkan (HPS = 100)	90 – 120	100	110
6	Belysningstimmar per år	h/år	5000	5000
7	Medelpris på el	€/MWh	70	70
8	HPS-lampornas brännarkostnader per år (LED har inga brännarkostnader))	€/m <sup>2</sup> /år	25	
9	Lampornas el-förbrukning	kWh/m <sup>2</sup> /år	500	346
10	Årlig ökning av uppvärmning % då HPS ersätts med LED	%		15
11	Årlig uppvärmning då HPS-lampor används	kWh/m <sup>2</sup> /år	1000	1150
12	Tilläggsinvestering av värme vid övergång till LED-belysning	€/m <sup>2</sup> /år		1,5
13	Priset på värme till växthuset	€/MWh	25	25
14	Kostnad för bortmontering av HPS-lampor		5	
15				
16	Investeringsstöd % för LED-lampor	%		40
17	Tänkt återbetalningstid för LED-investeringen	år		4
18				
19				
20	Ljusstyrka som lampan avger	µmol/m <sup>2</sup> /s	175	175
21	El-kostnad per år	€/m <sup>2</sup> /år	35	24
22	El-kostnad + kostnad för brännare per år	€/m <sup>2</sup> /år	60	24
23	Kostnad för el + brännare under hela återbetalningstiden	€/m <sup>2</sup>	240	97
24	HPS-LED el + brännare skillnad i kostnader under hela återbetaln.tid	€/m <sup>2</sup>		143
25				
26	Ändring i värmekostnad per år	€/m <sup>2</sup> /år	25	29
27	Ökning av värmekostn på grund av övergång till LED under återbetaln.tiden	€/m <sup>2</sup>		21
28	Inbesparade energikostnader pga LED-invester. Under återbet.tid.	€/m <sup>2</sup>		122
29				
30				
31	Väntad räntekostnad på kapitalet för LED-investeringen	€/m <sup>2</sup>		25
32	Väntad sänkning av företagsbeskattningen pga LED-investeringen	€/m <sup>2</sup>		10
33				
34	RESULTAT: Högsta godtagbara pris på LED-investering för odlaren	€/m <sup>2</sup>		102
35	RESULTAT: Högsta investeringspris för LED med inräknat investeringsstöd	€/m <sup>2</sup>		170
36				

**Tabell 5.** LED-Jämförelse av kostnader för LED-investering. >Hur mycket kan LED-lamporna kosta mera än anskaffningen av HPS-lampor. Talen är exempel. Formlernas resultat i föregående tabell. Räkneformlerna fungerar enbart genom kopiering till excel.

	A	B	C	D	
1	<b>Fyll i de vita cellerna</b>		HPS	LED	
2					
3	Lampornas el-effekt	W/m <sup>2</sup>	100	=D20/D4 * C5/D5	
4	Lampornas nyttoförhållande	µmol/J	1,75	2,3	
5	Mikromolens tillväxtpåverkan	90 - 120	100	110	
6	belysningstimmar per år	h/år	5000	5000	
7	Medelpris på el	€/MWh	70	70	
8	HPS-lampornas brännarkostn...	€/m <sup>2</sup> /år	25		
9	Lampornas el-förbrukn...	kWh/m <sup>2</sup> /år	=C3*C6/1000	=D3*D6/1000	
10	Årlig ökn av uppvärmn...	%		15	
11	Årlig uppvärmn då...	kWh/m <sup>2</sup> /år	1000	=C11+D10/100*C11	
12	Tilläggsinvest...	€/m <sup>2</sup> /år		1,5	
13	Pris på värme till...	€/MWh	25	25	
14	HPS-valaisimien pois ...		5		
15					
16	Invester.stöd LED...	%		40	
17	Tänkt återbet.tid...	år		4	
18					
19					
20	Ljusstyrka som l...	µmol/m <sup>2</sup> /s	=C3*C4	=C20	
21	El-kostn per år	€/m <sup>2</sup> /år	=C9/1000*C7	=D9/1000*D7	
22	Elkostn + kostn. bränn...	€/m <sup>2</sup> /år	=C21+C8	=D21+D8	
23	Kostn. el+bränn...	€/m <sup>2</sup>	=D17*C22	=D17*D22	
24	HPS-LED el+bränn...	€/m <sup>2</sup>		=C23-D23	
25					
26	Ändr i värmekost...	€/m <sup>2</sup> /år	=C11/1000*C13	=D11/1000*D13	
27	Ökn av värmekost...	€/m <sup>2</sup>		=(D26-C26)*D17 + D12*D17	
28	Inbespar energiko....	€/m <sup>2</sup>		=D24-D27	
29					
30					
31	Väntad räntekostn....	€/m <sup>2</sup>		25	
32	Väntad sänkn ...	€/m <sup>2</sup>		10	
33					
34	RESULTAT: Högsta.....	€/m <sup>2</sup>		=D28-D31+D32-C14	
35	RRESULTAT: Högsta.....	€/m <sup>2</sup>		=D34/((100-D16)/100)	
36					

Nyttoförhållanden av ljusavgivning hos HPS-lampor $\mu\text{mol}/\text{J}$	(ny brännare)
250 W brännare	1,5
400 W brännare	1,65
600 W brännare	1,7
1000 W brännare	1,8

Nyttoförhållanden av ljusavgivning hos LED-lampor $\mu\text{mol}/\text{J}$ år 2016	
Låg nyttoförhållande	1,6
Låg nyttoförhållande	2,3
Låg nyttoförhållande	2,6

## 5.2. Nyttoförhållandet blir bättre – lönar det sig att skjuta upp investeringen

### Priset på ljus väntas sjunka

Vid investering till LED-lampor söker man den tidsmässigt optimala tidpunkten mellan kapitalkostnader och brukskostnader. Optimi är inte bestående utan det ändras på grund av att LED-lampornas ljusutbytet ( $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) uppskattas stiga grovt 5 % per år under de följande fem åren och priset på ljuset som lamporna producerar (€ per  $\mu\text{mol}/\text{s}$ ) har en sjunkande trend. För att försäljningspriset skall sjunka krävs det tävling på marknaden mellan företag som tillverkar/levererar lampor för växthus. I Europa finns flere leverantörer men för de mindre marknaderna i Finland har det tillsvidare varit mindre utbud.

### LED-lampornas nyttoförhållande förbättras, lönar det sig att skjuta upp investeringen

I bild 19 har man räknat ut de årliga kostnaderna per kvadratmeter, under nio år, som beror på elförbrukningen och investeringen från ersättandet av HPS-lampor med LED-lampor. I bildens exempel kan LED-investeringen göras nu eller skjuta upp den med 1, 2 eller 3 år eller så kan man fortsätta med HPS-lampor som är i bra condition utan nyinvesteringar. Kostnaderna för investeringen har delats uppjämnt på fem år.

### Tidpunkten för investeringen har inte så stor inverkan på långtidskostnaderna

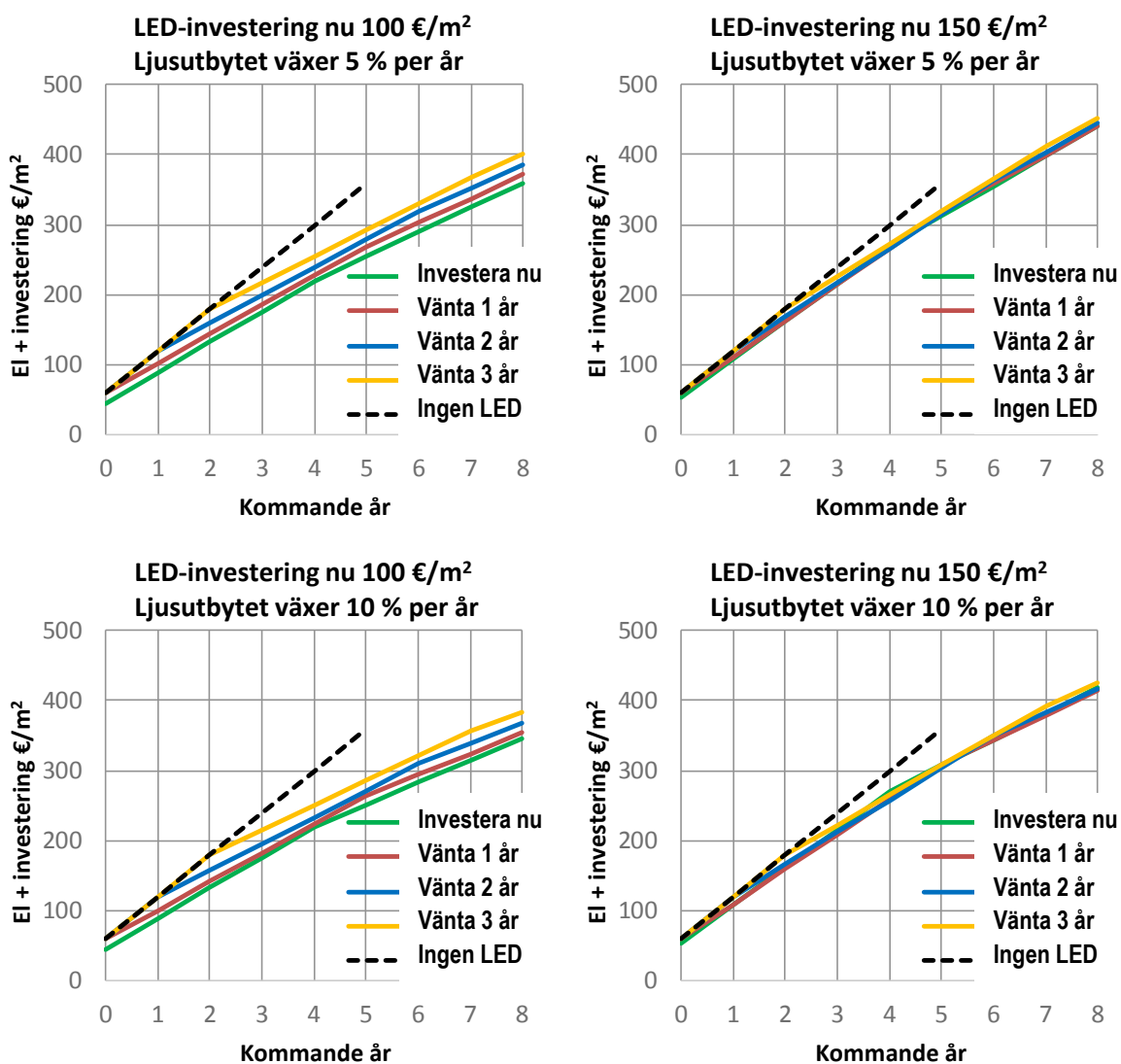
Från bilderna kan man se att kostnaderna under fem-års perioden inte egentligen beror så mycket på när investeringen gjorts trots att nyttoförhållandet hos LED-lamporna blivit bättre. Väntan på ett bättre nyttoförhållande medför inte nödvändigtvis ytterligare nytta speciellt om investeringen redan nu är lönande och utvecklingen av LED-lamporna fortsätter med en årlig hastighet på 5 %. Om utvecklingen skulle vara snabbare, 10 % per år, medför ett uppskjutande inte mera kostnader om inte heller inbesparingar.

LED-Lampornas utvecklingshastighet, utbud eller kommande års prisnivå kan man inte veta varför företagets strategi och finansiering är av större betydelse med tanke på tidpunkten för investeringen.

#### I bilden 19

- Alternativen för investeringen är: nu, om 1 år, om 2 år eller om 3 år. Det sista alternativet är att man fortsätter med de gamla välfungerande HPS-lamporna, det vill säga utan att investera.
- I den vänstra bilden är LED-investeringen nu 100 €/m<sup>2</sup> och i den högra bilden 150 €/m<sup>2</sup>. Investeringskostnaden är jämnt uppdelad på fem år. Om fem år byts LED-lamporna ut mot lampor med bättre ljusutbyte.

- I de två övre bilderna väntas LED-lampornas el-användningseffektivitet ( $\mu\text{mol}/\text{J}$ ) förbättras årligen 5 % och samtidigt minskar LED-lampans installationseffekt och anskaffningspris per kvadratmeter 5 % per år.
- Målet är att nå en ljusintensitet på  $165 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , som man med en HPS-lampa ( $1,65 \mu\text{mol}/\text{J}$ ) uppnår med en installationseffekt på  $100 \text{ W}/\text{m}^2$ . Nu producerar man med LED-lampor ( $2,3 \mu\text{mol}/\text{J}$ ) samma intensitet som med HPS-lampor men med en installationseffekt på  $70 \text{ W}/\text{m}^2$ . När nya LED-lampors ljusutbytet ytterligare förbättras minskar den behövliga installationseffekten.
- Belysningstiden för samtliga lampor är  $5000 \text{ h}/\text{år}$
- El-priset är  $70 \text{ €/MWh}$



**Bild 19.** Inverkan av tidpunkten för LED-investeringen på el-kostnadens och investerings-kostnadens ansamling under nio år. Finansierings- och skattepåverkningar har inte beaktats.



## 6. Vertikalodlingens konkurrenskraft

### 6.1. Vertikalodling

#### Vertikalodling – vertical farming – utvecklas och marknadsförs kraftigt

Utvecklandet av LED-lamporna har ökat intresset för vertikalodling med enbart konstljus (vertical farming, plant factory) (Bild 20). På grund av utrymme och mängden avdunstning är de odlade växterna nästan enbart salad och örter eller småplantor. Vertikalodlingens andel av dessa växters odling är anspråkslös, men flere företag håller på med teknologiutveckling.

#### Värme och avdunstad vattenånga ut genom vätskeavkyllning, luftkonditionering, värmeväxlare

Av den värme som bildas i LED-lamporna leds en stor del direkt med vätskeavkyllning bort från odlingsområdet. Största delen av strålningen från lamporna ändras till värme i växterna (5 % används vid fotosyntesen). Av värmen som når växterna går en stor del till avdunstningen. Överlops värme samt avdunstad vattenånga leds genom luftväxling direkt ut antingen genom att byta ut luften eller genom kondensation med värmeväxlare.

#### Vertikalodling borde på basen av klimatet vara ytterst konkurrensduglig just i Finland

Odling med enbart konstljus lämpar sig bäst i klimat där det förekommer en lång mörk årstid samtidigt som man i den konkurrerande växthusodlingen genom glastäcket förlorar mera värme än vad som är nödvändigt för att kondensera vattenångan som bildas vid avdunstningen. I Finlands klimat är alltså vertikalodling betydligt konkurrenskraftigare i förhållande till växthusodling än i Japan och USA där verikalodling främst är utvecklad.

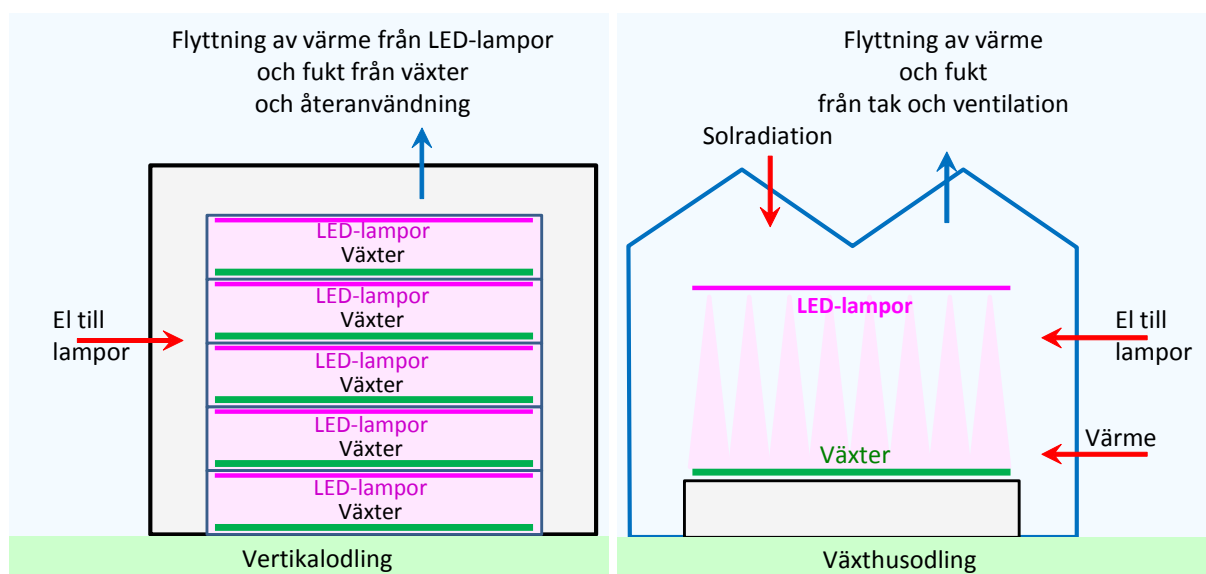


Bild 20. Vertikalodlingens och växthusodlingens energiströmmar in (röd) och ut (blå).

#### Vid vertikalodling är ljusets spektrum helt kontrollerbart

Spektrret inverkar på växternas tillväxt på samma sätt i vertikalodling som i växthusodling men då naturligt ljus saknas är det nödvändigt att fullständigt kunna kontrollera spektrret. Växternas utseende, färg, måttlig inverkan på smak samt halten nyttiga och skadliga ämnen hos växterna kan styras med spektrret och ljusmängden.

## 6.2. Jämförelse av el-kostnaderna

### Investeringarna, temperaturväxling och el

Då man jämför den ekonomiska lönsamheten mellan växthus- och vertikalodling bör man ta i beaktande avkastningen från grödan, belysningskostnader, investerings- och brukskostnader för fukt- och temperaturreglering samt byggnadens investeringsavgifter. I Finland har vi endast litet erfarenheter om investerings- och temperaturregleringskostnader vid vertikalodlingar och investeringskostnaderna bestäms i vilket fall som helst mellan företagen. På kostnaderna för byggnaden som används vid vertikalodling inverkar området och gamla byggnaders annan möjlig användning.

### Möjligt att jämföra el-förbrukning

Det som relativt lätt går att grovt jämföra är den största kostnadskomponenten: belysningen. Här visas en enkel jämförelse från salladsodling (näringlösning, rörliga/flyttbara rännor, odlingstäthet i början av linjen 80 och i slutet 20 kpl/m<sup>2</sup>) i växthus och vertikalodling.

### Jämförelsens begynnelsefakta – ljusets användningseffektivitet

Effektiviteten hos konstljus erhålls från uppgifter från verksamma växthus i december och januari då det inte finns solljus just alls. Under midvintern uppnår issalladen ca 100 g skördevikt på ca 45 dagar då man använder HPS-lampor (105 W/m<sup>2</sup>). Deras ljusutbyte (energy conversion efficiency) är ca 1,75 mikromol per joule el-ström (μmol/J), det vill säga, det bildas ljus per dygn 16 mol/m<sup>2</sup>/dygn. Under midvintern kommer det från solen 1 mol/m<sup>2</sup>/dygn. Från 45 dagars ljusförbrukning och den erhållna skörden får man som ljusförbrukningseffektivitet 7 gram per ljusmol (g/mol) [ Läs = (Medelvikt \* Medeltäthet) / (Växttid \* Ljus), (se räknasätt nedan) ].

LED-lampornas omvandlingstal till ljus är 2,3 eller 2,5 μmol/J. De ljusspektra som LED-lamporna avger kan i viss mån vara lämpligare för salladsodling än HPS-lampans varför LUE kan vara 7 g/mol eller högre under midvintern vid vertikalodling med LED-lampor, förutsatt att vertikalodlingens luftväxling fungerar bra.

Genom inverkan av spektrum kan växterna växa olika med lampor som har samma ljusutbytet men olika spektra. LUE är i LED-belysta växthus eller vertikalodlingar en aning högre än i HPS-belysta växthus om mängden solljus är mycket låg i november–januari.

### Växttid i växthus samt i LUE växthus och i vertikalodling

Nedan i tabell 6 visas produktivitet och el-konsumtion i HPS-belyst växthus, i LED-belyst växthus samt i LED-belyst vertikalodling. Uppskattad växttid för sallad till 100 g vikt i vertikalodling är 36 dygn. Tiden är densamma hela året eftersom växtförhållandena kan vara likadana året om, ifall temperatursväxlingskapaciteten är tillräcklig och det är lönsamt att använda det även på sommaren. I verkliga förhållanden kan vertikalodlingen tidvis kräva direkt luftväxling ut, varvid man kan vara tvungen att sänka CO<sub>2</sub>-halten. Produktiviteten i växthus ökar förstås under våren då solen kommer med som ljuskälla. Då ljusmängden ökar sjunker dock ljusets brukseffektivitet (LUE) i växthuset på grund av att tillväxthastigheten inte ökar, från början av april, direkt i förhållande till ökningen i ljus, CO<sub>2</sub>-halten är under sommaren lägre på grund av ventilationen och temperaturen är stundtals för hög. Värdena för växthuset i tabell 6 är räknade ur uppgifter från ett kommersiellt växthus.

### Omvandling av el till tillväxt i vertikalodling i förhållande till växthusodling

El-konsumtionen för belysning samt växthusgasutsläppet som beror på denna är beräknat på producerad salad ca 40 % högre vid vertikalodling än vid växthusodling om man i båda använder LED-lampor av samma kvalitet (Bild 21). Med nuvarande låga el-pris är vertikalodling, räknat enligt el-kostnader, konkurrenskraftig med HPS-belyst växthusodling från november till februari. I jämförelse med LED-belyst växthus klarar sig vertikalodling december–januari. Om priset på el stiger förbättras vertikalodlingens konkurrenskraft i jämförelse med HPS-belyst växthus men försämras i jämförelse

med LED-belyst växthus. Ljusutbyte x LUE kan i LED-belysning förstås vara högre än vad som visas i tabellen. Det skulle förbättra alla LED-belysta odlingsmetoders konkurrenskraft i förhållande till HPS-belysningen. Den relativa skillnaden mellan LED-belyst vertikalodling och LED-belyst växthus beror just inte på ljusutbytet eller LUE-värdet.

Enligt uträkningar med nuvarande el-pris (7 c/kWh) borde vertikalodlingens kostnader, förutom belysningskostnaderna, vara ca 13 €/odlad-m<sup>2</sup> lägre per år än för växthusodling för att vertikalodling skulle vara konkurrenskraftig med LED-belyst växthus.

### Vertikalodlingens ekonomiskt sett mest kritiska process är temperaturväxlingen

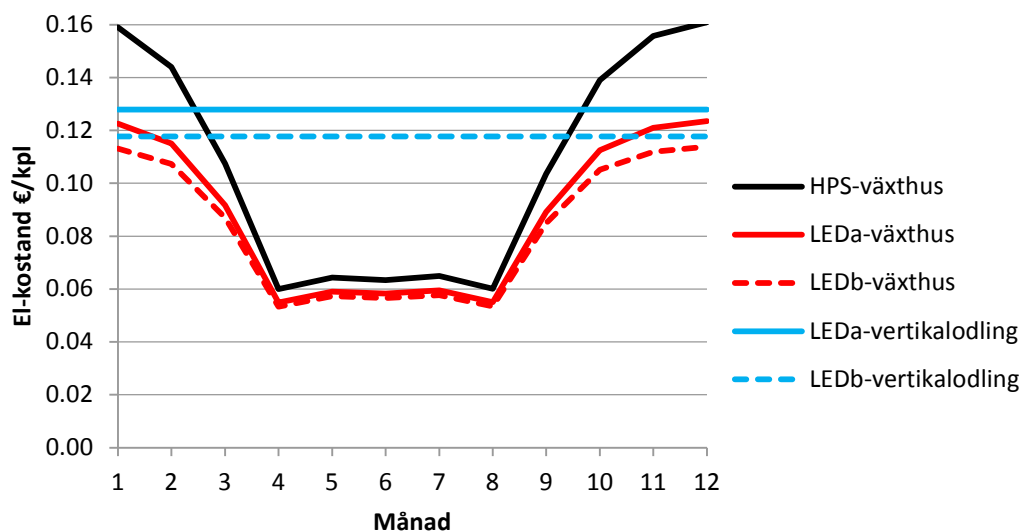
Vid vertikalodling finns ingen direkt uppvärminingskostnad. Vid salladsodling är värmekonsumtionen i växthuset ca 300 kWh/m<sup>2</sup> under ett år och kostnaden med priset 2,5 cent är 7 €/m<sup>2</sup>. Det räcker alltså inte till att täcka mera än en tredjedel av skillnaden i el-kostnader mellan vertikalodling och växthus. I vertikalodling är man tvungen att avlägsna värmen som belysningen avger och som till största del kör växternas avdunstning, alltså omvandlas till latent värme. Den lägsta ljusstyrka som används vid salladsodling 160 μmol/m<sup>2</sup>/s, kräver producerad med nuvarande LED-lampor en el-effekt på 50–70 W/m<sup>2</sup>. Till exempel från en 1000 m<sup>2</sup> våningsyta vertikalodling bör avlägsnas ca 2,2 MWh värme och fukt per dygn.

Med tanke på produktionens ekonomi är kostnaderna för vertikalodlingens luftkonditionering av stor betydelse. Dessa beror på energieffektiviteten av avlägsnandet av värme och fukt samt möjligheten för återvinning av värme.

### Vertikalodlingen tävlar inte direkt med växthusodling

LED-belyst vertikalodling ser inte ut att vara konkurrensduglig jämfört med LED-belyst växthus på grund av direkta kostnader samt miljökonsekvenser. Vertikalodlingens högre el-kostnader per producerad enhet eller per kvadratmeter borde kompenseras främst med lägre byggnadskostnader, värmeproduktions- eller växlingskostnader samt med ett högre produktionspris.

Vid massproduktion, där små skillnader i produktionskostnaderna är av betydelse, verkar vertikalodlingen inte kunna ersätta växthusodling. Skillnaden i belysningskostnaderna kunde möjligen kunna täckas med högre pris på produkten vid specialodling om man i vertikalodling klarar av att producera, ur konsumetsynpunkt, produkter av högre kvalitet än i växthus. Vertikalodling kan även vara ett flexibla alternativ jämfört med underhåll av växthusareal med tanke på produktionsreglering.



**Bild 21.** El-kostnad €/kg i växthus och vertikalodling belysta med olika lampor (närmare beskrivning i nedre delen av tabell 6).

**Tabell 6.** Jämförelse av salladsodling och el-kostnader i belyst växthus och vertikalodling. Lamporna i växthuset HPS, LEDa och LEDb. Lamporna i vertikalodling LEDa och LEDb. El-effekten hos samtliga är 105 W/m<sup>2</sup>. El-priset 7 c/kWh.

Odling	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Sol MJ/m <sup>2</sup> /d	1	3	8	13	18	20	19	14	8	4	1	1
Genomtränglighet %	60	63	66	70	73	75	75	73	70	66	63	60
Gardin dag %	50	20	10	10	40	50	50	30	10	5	10	30
Solljus inne mol/m <sup>2</sup> /d	1	4	11	20	23	24	22	20	13	5	2	1
Skördevtikt g/st	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Belysning växth. h/d	24	24	20	12	14	14	14	12	20	24	24	24
Belysning vert. h/d	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<i>Belysning mol/m<sup>2</sup>/d (HPS 1,75 μmol/J - LEDa 2,3 μmol/J - LEDb 2,5 μmol/J)</i>												
HPS-växthus	16	16	13	8	9	9	9	8	13	16	16	16
LEDa-växthus	21	21	17	10	12	12	12	10	17	21	21	21
LEDb-växthus	23	23	19	11	13	13	13	11	19	23	23	23
LEDa-vertikalodling	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
LEDb-vertikalodling	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
<i>Total ljus mol/m<sup>2</sup>/d</i>												
HPS-växthus	17	20	24	28	32	33	32	27	26	21	17	16
LEDa-växthus	22	25	28	30	35	36	35	30	30	26	22	21
LEDb-växthus	24	27	30	31	36	37	36	31	31	28	24	23
LEDa-vertikalodling	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
LEDb-vertikalodling	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
<i>Växttid dygn</i>												
HPS-växthus	45	41	37	34	31	31	32	34	35	39	44	46
LEDa-växthus	35	33	31	31	29	28	29	31	30	32	34	35
LEDb-växthus	32	30	30	30	28	28	28	30	29	30	32	32
LEDa-vertikalodling	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
LEDb-vertikalodling	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
<i>Ljusanvändningseffektivitet LUE g/mol</i>												
HPS-växthus	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDa-växthus	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDb-växthus	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDa-vertikalodling	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
LEDb-vertikalodling	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
<i>Skörd st/m<sup>2</sup>/dygn</i>												
HPS-växthus	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1	1,1
LEDa-växthus	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4
LEDb-växthus	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5
LEDa-vertikalodling	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
LEDb-vertikalodling	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>El-konsumtion kWh/m<sup>2</sup>/d</i>												
HPS-växthus	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDa-växthus	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDb-växthus	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDa-vertikalodling	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
LEDb-vertikalodling	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>Resultat: El-kostnad €/st producerad sallad</i>												
HPS-växthus	0,16	0,14	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,10	0,14	0,16	0,16
LEDa-växthus	0,12	0,12	0,09	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,11	0,12	0,12
LEDb-växthus	0,11	0,11	0,09	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,11	0,11	0,11
LEDa-vertikalodling	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
LEDb-vertikalodling	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

**Räknesätt (enheter inom parentes första gången de uppträder)*****I HPS-belyst växthus som månatligt medeltal***Utgångsdata: Skördevikt [g], Växttid [d], Ljus [mol/(m<sup>2</sup> d)], Medeltäthet [m<sup>2</sup>]

LUE [g/mol] = (Skördevikt \* Medeltäthet / Växttid) / Ljus

ProduktionStKvadrat [1/(m<sup>2</sup> d)] = Medeltäthet / Växttid***I LED-belyst växthus som månatligt medeltal***

Utgångsdata: LUE HPS-växthus, Skördevikt densamma som i HPS-växthus, Ljus

Växttid = (Skördevikt \* Medeltäthet) / (LUE \* Ljus)

ProduktionStKvadrat = Medeltäthet / Växttid

***Samtliga odlingssätt***Belysning [mol/(m<sup>2</sup> d)] = Belysneffekt [W/m<sup>2</sup>] \* Ljusutbyte [μmol/J] \* Belysntid [h/d] \* 0,0036SolUnderGardin [MJ/(m<sup>2</sup> d)] = (1 - Gardin [%] / 100) \* Sol Inne [MJ/(m<sup>2</sup> d)] + Gardin/100 \* 0,4 \* SolInneSolLjus [mol/(m<sup>2</sup> d)] = 2,3 [μmol/J] \* SolUnderGardinLjus [mol/(m<sup>2</sup> d)] = SolLjus + BelysningElKonsumtionKvadrat [kWh/(m<sup>2</sup> d)] = Belysneffekt [W/m<sup>2</sup>] \* Belysntid [h/d] /1000

ElKonsumtionPerSt [kWh] = ElKonsumtionPerKvadrat / ProduktionStPerKvadrat

## 7. Investeringsbehov till LED-belysning samt inverkan på energiförbrukningen

### **Prisen bestäms på markanden, men totalinvesteringar kan uppskattas**

Prisen på LED-investeringarna bestäms vid handeln mellan företagen men totalvolymen för lönande investeringar kan ungefär uppskattas om man räknar att den lägre el-konsumtionen hos LED-lamporna bör inom rimlig tid ersätta LED-investeringen samt den möjliga förändringen i värmekostnaderna som investeringen kan medföra. Uppskattningarna nedan berör odlarnas egna kostnader. Ett möjligt investeringsstöd bör tilläggas till dem.

### **Med dagens LED-lampor 30–50 % inbesparing av el-energi = investeringsresurs**

Enligt en försiktig uppskattning kan man med dagens LED-lampor uppnå en 30-50% inbesparing i el-energin jämfört med HPS-lamporna. Vid odlingar, där man nu använder en stor ljusmängd, leder den minskade elförbrukningen och samtidigt minskningen i lampornas värmeproduktion till att värmeminskningen delvis bör kompenseras med tilläggsvarme under vintermånaderna. Å andra sidan har man inom tomatodling kunnat övergå till LED-belysning utan större tillförsel av extra värme. Bränslepriset för uppvärmning per energienhet är i varje fall ungefär tre gånger lägre än el-priset för tillfället.

Enligt tillverkarna är den ekonomiska bruksåldern (nedgång i ljusavgivning till 90 % av det ursprungliga) för nyvarande LED-lampor 25 000–35 000 timmar. Vid året-om odlingar motsvarar detta en bruksålder på fem till sju år. Investeringen på LED-lampor bör återbetala sig genom minskade el-kostnader på betydligt kortare tid.

### **LED-lamporna utvecklas fortfarande**

Den med HPS-lampor belysta odlingsarealen har under de senaste 15 åren varit över 30 ha och under de senaste 10 åren 45–50 ha (Luke, Puutarhatilastot 2015). Tomat 30 ha, gurka 20 ha. Krukgrönsockernas (salad, örter) areal har tredubblats till 30 ha. El-konsumtionen har under de senaste tio åren ökat med ca 20 % men stabiliserats under de senaste fem åren (Luke, Energikonsumtionen inom växthusföretagen åren 2006, 2008, 2011 och 2014).

HPS-armaturernas högsta bruksålder är ca tio år. På basen av armaturernas åldersstruktur kan man anta en jämn övergång från HPS-armaturer till LED-armaturer under knappt tio år, om priset på LED-lamporna möjliggör bytet. LED-armaturernas el-förbrukningseffektivitet stiger fortfarande men den största utvecklingen har redan skett.

### **LED-investeringsmöjligheten 5-13 miljoner euro/år**

Förbrukningen av el-energi inom växthusföretagen är knappt 550 GWh, av vilken nästan allt används för belysning. El-priset för växthusföretagen, beaktande priset på energi, transmissionspris och skatt, väntas under de följande 5–10 åren vara 100–150 €/MWh. Med ett pris på 100 €/MWh är den årliga el-kostnaden 55 milj. euro. En 30–50 % inbesparing är 165–275 GWh/år, med det lägre el-priset 16,5–27,5 och med det högre 25,8–41,3 miljoner euro/år. Med tre års återbetalningstid kan LED-ersättningsinvesteringens pris (innefattande ändringsinvesteringar för uppvärmning) för odlarna vara med det lägre el-priset 50–80 och med det högre 74–124 miljoner euro utan skatte- och investeringsstödsinverkan.

Om man tänker på hela landet, och indelat på tio år, kan de årliga ersättningsinvesteringarna för odlarna vara 5–13 miljoner euro per år. I sin helhet kan odlarnas investeringar vara ännu större eftersom man i tomatodlingar tillsätter LED-lampor mellan raderna för mellanljus och för krukgrönsocker är det kanske möjligt att öka ljusstyrkan.

**Växthussektorns möjlighet att minska el-förbrukningen är av klass 275 GWh/år**

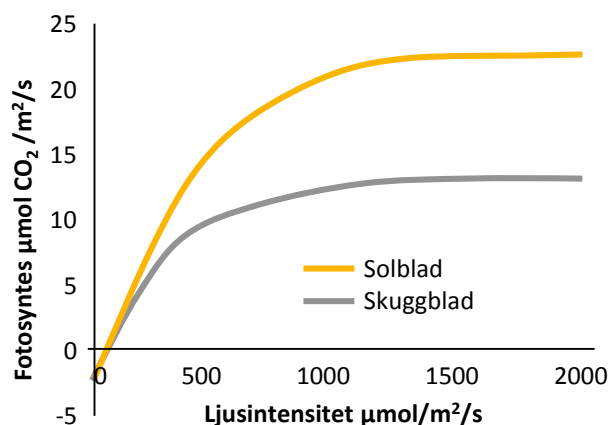
Inom växthussektorn kan det finnas en möjlighet att minska på el-förbrukningen med ca 275 GWh/år om belysningsmängden inte ökar och el-förbrukningseffektiviteten hos de LED-lampor som tas i bruk är i medeltal 50 % bättre än HPS-lampornas. Det är dock möjligt att den sjunkande kostnaden för ljusproduktion ökar användningen av växtlampor.

## 8. Användning av belysning i grödan samt styrandet av tillväxten med belysning

### 8.1. Ljusets inverkan under en längre tidsperiod på fotosyntesen

#### En jämn ljusmängd upprätthåller bladets fotosyntesförmåga

Vid fotosyntesen producerar den användbara strålningen (PAR) tillväxt och skörd (Bild 22). Det enskilda bladets förmåga att utnyttja tillsatt ljus beror på ljusmängden det tidigare fått. Om bladet i främsta hand vuxit i skugga, såsom i tät växtlighet eller i svag belysning, utnyttjar det det ökade ljuset till fotosyntes sämre än ett blad som vuxit i kraftigare belysning. Blad som vuxit i knapp belysning är tunnare, innehåller mindre gröna partiklar och föråldras snabbare än blad som vuxit i rikligt ljus. Därför ökar användningen av mellanljus under målniga perioder förutom tidvis fotosyntesen även bladens fotosyntesförmåga då ljusmängden åter ökar.



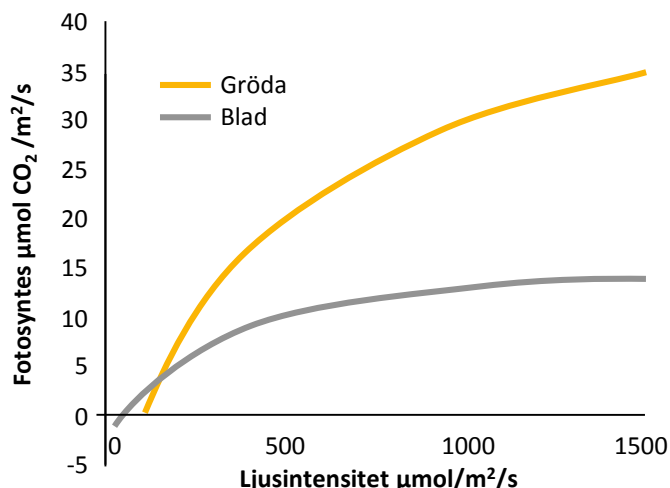
**Bild 22.** Då ljusstyrkan ökar ökar bladets fotosyntes till en början enligt en rät linje, sedan med minskad effekt och till slut ger ökat ljus inte längre ökad fotosyntes. Då bladen vuxit och utvecklats i rikligt ljus (ljusblad), klarar de av att utnyttja en högre ljusintensitet än blad som vuxit i skuggan (skuggblad). Källa: Huang mm. 2014). 1000 µmol/m²/s motsvarar ca 430 W/m² solljus i ett växthus och ute ca 500 W/m². HPS-topplampor producerar 300–400 µmol/m²/s för de övre bladen.

#### Blad som vuxit i ljus behåller sin fotosynteseffektivitet

En hel grödas förmåga att utnyttja ökat ljus i fotosyntesen är bättre än fotosyntesresponsen mätt från ett enskilt blad (Bild 23). Detta beror på att grödan består av blad i olika utvecklingsstadier. Blad inne i grödan samt i knappt ljus klarar även av att utnyttja ljus som kommer mellan andra blad. För att hela grödans samtliga blads förmåga att kunna reagera på ökande ljus skulle vara möjligast god, skulle det vara bäst att belysa hela den gröda som ger skörd jämnt med tillräckligt ljus under hela växtperioden.

Förutom fotosynteseffektiviteten så ökar en jämn belysning transporten av föreningar, som bildats under fotosyntesen, till frukterna. Enligt undersökningar (Hovi mm 2004, Pettersen mm. 2010) ger en jämnt belyst gurkgröda en 10–20 % större skörd än en gröda belyst enbart med topljus. Till exempel genom att placera LED-lampor in bland grödan kan man öka paprikans avkastning med upp till 16 % (Jokinen mm. 2012). Mindre värmeproduktion hos LED-lamporna i förhållande till PAR-strålningens intensitet möjliggör en jämnare ljusspridning i högre växtlighet.

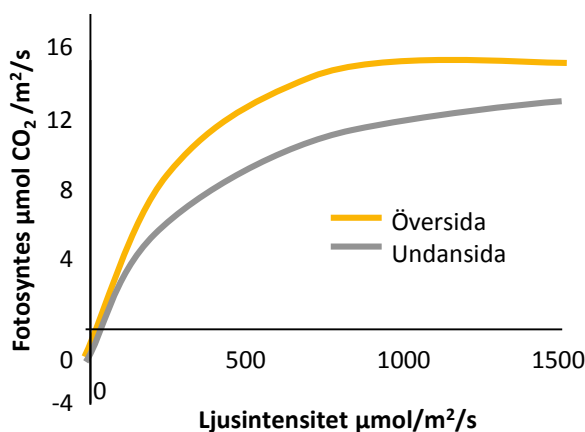




**Bild 23.** Hela grödans förmåga att utnyttja ökande ljus är i allmänhet betydligt bättre än ett enskilt blads förmåga. (Ruimy mm. 1995).

#### Bladens övre sidor utnyttjar effektivare PAR-strålning än undre sidorna

Beroende av hur tät grödan är reflekteras en del av det ljus som når bladet (10–20 %) så att grödans övriga blad kan utnyttja det eller helt bort från grödan. Då det reflekterade ljuset träffar undersidan av bladen är dess inverkan på bladets fotosyntes mindre än om ljuset träffar bladets övre sida (Bild 24). Då hög växtlighet, såsom gurka och tomat, mellanbelyses och det mellanbelysta bladskiktet är glest träffar en del av ljuset undre sidan hos blad på motsatta sidan där ljuset inte utnyttjas lika effektivt som på övre sidorna.



**Bild 24.** Ljuset som träffar bladets övre sida är med tanke på fotosyntesen effektivare än ljuset som träffar bladets under sida. (Terashima 1986).

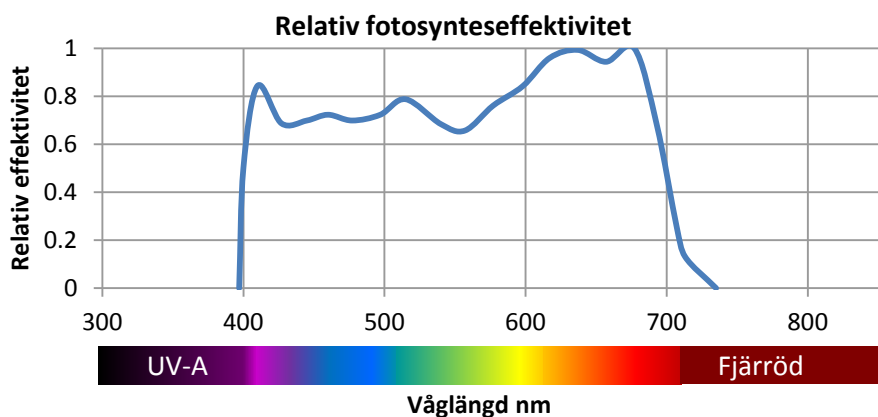
## 8.2. Utnyttjandet av ljusets våglängdsbander vid fotosyntesen

### Röda ljuset effektivast vid fotosyntesen

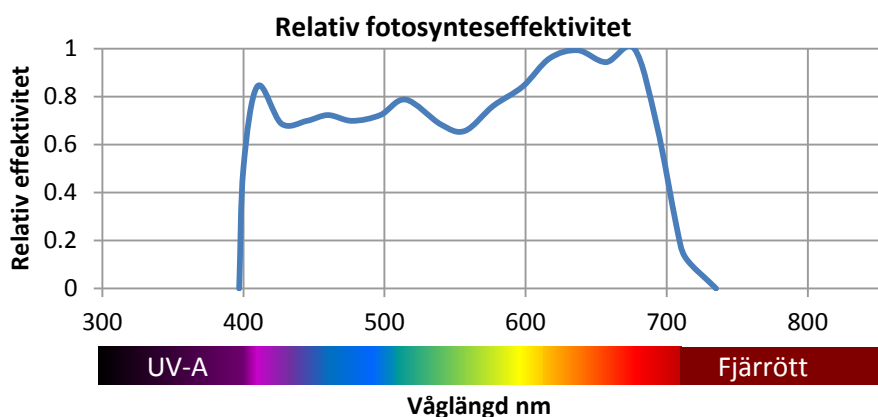
Växterna använder hela PAR-bandet (400–700 nm) i fotosyntesen. PAR-bandet börjar från blått, fortsätter via grönt och orange till det djupröda. Det röda ljuset (600–700 nm) utnyttjas effektivare vid fotosyntesen än övriga våglängder. I bild 25 har man experimentellt iakttagit fotosyntes i gurkblad producerad av PAR-ljus. Där producerar det röda ljuset 20–35 % högre fotosyntes än blått ljus (400–500 nm).

Då bladet öppnar sig befinner det sig i starkt ljus som innehåller minst en viss del solljus från hela spektret. Blad som befinner sig lägre i grödan nås av mindre ljus varvid ljusspektrets gröna (520–570) och fjärröda (710–850) andelar ökar på grund av att de tränger bättre genom bladen.

Solljusets spektrum ändrar under dagen och speciellt enligt årstiderna (Bild 26).



**Bild 25.** Ljusets relativa effektivitet vid fotosyntesen (0–1) enligt våglängden. Räknat enligt Hogewongs mm (2012) publikation om gurkbladens fotosyntesrespons och bladens absorptionsspektrum.



**Bild 26.** Solljusets spektrum under en sommardag, en kväll på sommaren och under en vinterdag rättat med strålningsintensiteten. Källa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>.

Utnyttjandet av ljuset från en LED-lampa vid fotosyntesen, och därvid vid växternas tillväxt (gram tillväxt per joule el-ström), är i viss mån effektivare om lampan avger mera rött (600–700) än blått ljus (400–500 nm) eller andra våglängder. För en riklig användning av rött ljus talar även det att de nuvarande röda leddioderna även omvandlar el-ström effektivare till ljus ( $\mu\text{mol/J}$ ) än de blåa leddioderna. De flesta LED-lampor som erbjuds för odling av kraftigt växande växter innehåller i huvudsak röda LED-dioder. Det väsentliga är dock att LED-lamporna i sin helhet är effektivare ljusproducenter inom hela PAR-området än HPS-lamporna.

#### Det röda ljuset behöver minst blått ljus som supplement

Det har konstaterats att det (djup) röda ljuset (högsta effekt 660 nm) inte ensamt räcker till för belysning av växter om mängden konstljus är stor i förhållande till solljus. Saknaden av övriga våglängder minskar fotosyntesen, inverkar kraftigt på växternas utveckling, utseende och slutligen på skörden. Dagens uppfattning är att LED-lamporna kan ha rikligt med rött ljus men dessutom behövs minst

blått ljus (högsta effekt 440 nm) ca 10–20 % av totala PAR-strålningen. Det blå ljuset är viktigt för odlingsväxterna efter som det även verkar på växternas färg (gröna klorofyll samt rött, gult och violett som produceras av sekundärmetaboliterna) och smak.

#### **Ett brett spektrum blått-grönt-rött effektivast vid belysandet av hög växtlighet**

Ofta ett spektrum som innehåller flere våglängdsområden av PAR-strålningen, och möjligtvis även utanför det, ger bästa fotosyntes, växtutveckling och skörd. Även det gröna ljuset, som vid fotosyntesen utnyttjas sämre än blått och rött är användbart vid fotosyntesen bara bladens pigment lyckas fånga det. Det gröna ljuset tränger delvis genom bladen och kan utnyttjas av växtens nedre och inre blad. Blått och rött genomtränger sämre bladen varför de inte når de lägre bladen.

#### **Med spektrum påverkas växternas form och tillväxtbalans**

Den fjärröda (710–850 nm) strålningen är inte användbar i fotosyntesen men dess förhållande till det röda ljuset styr via fotosyntesen utvecklingen av bladen genom celledelning och utbredning. Behovet av mängden fjärrött beror på den eftersträvade bladstorleken och tillväxtbalansen. Till och med strålning med lägre våglängd än PAR-strålningens, ultraviolett strålning, inverkar på växternas färg och bildningen av näringsmässigt viktiga föreningars bildning i växternas ytskikt.

Olika växtsorter har olika optimala spektrala sammansättningar för belysning använd i odling. Till exempel ett lämpligt spektrum hos salad och örter i början av odlingen gynnar bladens utbredning på bekostnad av bladens tjocklek. Större blad fångar större mängd ljus för fotosyntes och såvida får man tillväxten snabbt igång. Hos gurka och tomat upprätthåller man balansen i tillväxt genom samverkan mellan spektra, temperatur och sort.

### **8.3. Användning av ljusets våglängdsbander i tillväxtregleringen**

#### **Tillväxtreglering med spektrum**

Vid odling av blommor och plantor erbjuder spektret möjligheter att förbättra produkternas kvalitet. Det fortgående ljusets spektrum och till och med tilläggsbelysning med ljus med avvikande ljusspektrum utanför den egentliga belysningstiden, reglerar växternas utvecklingshastighet (bladens framkomst, blomningstid), form (ledavstånd, bladens storlek, antal blommor, bildande av rötter) och färg (bladens och blommornas färg) (Bild 27).



**Bild 27.** Julstjärnans storlek och form kan effektivt påverkas genom LED-lampans spektrum-sammansättning. Ljusintensiteten för samtliga växter har under odlingen varit  $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  (Kari Jokinen, Luke).

#### **Blått LED som komplement till HPS-belysning**

Eftersom HPS-lampornas spektrum inte innehåller blått ljus, erbjuder lamptillverkarna LED-lampor som avger endast blått ljus som komplement till HPS-lamporna. Meningen är att rätta till belysningens spektrum så att strålningen från HPS-lamporna effektivare kan utnyttjas. Med blått ljus kan man även reglera tillväxten så att växterna blir kortare och tätare (Bild 28).



**Bild 28.** De kortaste basilika-plantorna har fått i förhållande mera blått ljus jämfört med övriga våglängder. (Kari Jalonen, Luke).

### Under odlings säsongen förändras det bästa möjliga spektret

I praktiken varierar det optimala spektret under växternas olika utvecklingskedan (plantans tillväxt, blomning, frukternas utveckling och tillväxt, styrandet av tillväxten i slutet av odlingsperioden till frukterna) och under olika årstider. Solljusets röda-fjärröda-förhållande ändras enligt årstiderna. Dags- och natterperaturerna som även påverkar utvecklingen förändras även enligt årstiderna. Från vår till höst räcker solljuset till att reparera lampornas små brister i spektret. Under midvintern räcker dock inte solljuset till att reparera brister i spektret, vilket är fallet mera söderut, såsom i Mellan- och Nord-Amerika, Japan och Korea.

### Kompromisspektrum eller dyrare komplett urval spektrum

Odlaren söker i främsta hand en sådan kompromiss i spektret som fungerar under hela odlingsperioden och som är användbar då man ändrar till en annan odlingsväxt. Om man på grund av utvecklingsstadiet, årstid och läge behöver mycket olika belysningspektrum erbjuder flere tillverkare lampor där man skilt för sig kan justera fyra till nio våglängdsområdens leddioder. Justerandet är förstas inte kostnadsfritt. I dagens lampor medför en justeringsmöjlighet av nio våglängdsområden en fördubbling av lampans pris per watt jämfört med priset för en lampa som fast avger några våglängder.

### Bruksområden för våglängdsbanden

Käytännön viljelyn näkökulmasta auringon ja valaisimien spektrin vaikutus kasvuun ja kehitykseen:

#### Blått (blue, 400–500 nm, högsta effekt 440–450 nm)

- Blått är användbart vid fotosyntes
- Blått är ett nödvändigt komplement till rött ljus, så att växterna utvecklas bra
- Blått LED-ljus är bra komplement för HPS-ljus, som innehåller lite blått
- Med blått kan man styra växterna tätare: kortare ledavstånd, mindre och tjockare blad
- Med blått kan man öka sekundärmetaboliternas production i växterna, vilket syns som röd- eller violett färgning hos bladen och påverkar smaken

#### Grönt (green, 500–600 nm, innehåller alltså även gult)

- Det gröna ljusets nyttoförhållande vid fotosyntesen i blad är sämre än det blåa eller det röda ljusets
- Grönt ljus tränger genom blad och hamnar på blad som är i skugga för att användas i fotosyntesen

#### Röd, djupröd (red, deep red, 600–700 nm, högsta effekt 660 nm)

- det röda och speciellt djupröda (effektivast vid 660 nm) är effektivt ljus vid fotosyntesen
- Röda förtidigar blomning hos långdagsväxter och försenar bildning av blommor hos kortdagsväxter

#### Fjärröd (far red, 710–850 nm)

- Fjärrött är inte användbart i fotosyntesen
- Det rödas 655–665 nm förhållande till fjärrödas 725–735 nm strålning (red far-red ratio, R:FR) påverkar växternas form
- Högt R:FR styr tillväxten mot en kompaktare riktning
- Fjärröd förtidigar blomningen hos kortdagsväxter
- Lågt R:FR ökar cellernas delning och utvidgning. På grund av detta växer bladen bredare och ledavstånden längre samt rötterna längre

– önskad effekt då man vill ha snabb tillväxt av bladyta och utveckling av rotverket, oönskad effekt då man främst vill styra tillväxten mot frukterna eller vill ha en kompakt tillväxt. Beträffande R:FR beror effekten på växtslag och sort

- I HPS-lampans ljus är R:FR ca 2–3
- I LED-lampor bestäms R:FR av valda leddioder, i en ren röd-blå-LED-lampa är R:FR oändlig; i LED-lampor där man tillsatt leddioder som avger fjärrött, är R:FR i allmänhet 2–8
- I solljus är R:FR på dagen ca 1, på morgonen och kvällen närmare 0,6, men i ljus som silas genom grödan mycket lägre, något under 0,1

**Vitt** (varierande filer mellan 400–700 nm)

- Vitt (white) (anges inte våglängdsband, utan färgtemperatur i kelvin (K)). Vitt produceras med leddiodens fosforyta eller då är det en kombination av flere olikfärgade led. Det vita ljusets delband går att utnyttjas vid fotosyntesen och med vitt får man en god färgupprepning av växterna för människoögat

**UV-strålning** (UV-A 315-400 nm, UV-B 280–315 nm)

- UV-B och det kortvågiga UV-A ökar antalet sekundärmetaboliter som producerar färg och smak samt inverkar på tjockleken av bladens yta, LED-lampor har endast lite eller ingen UV-strålning.

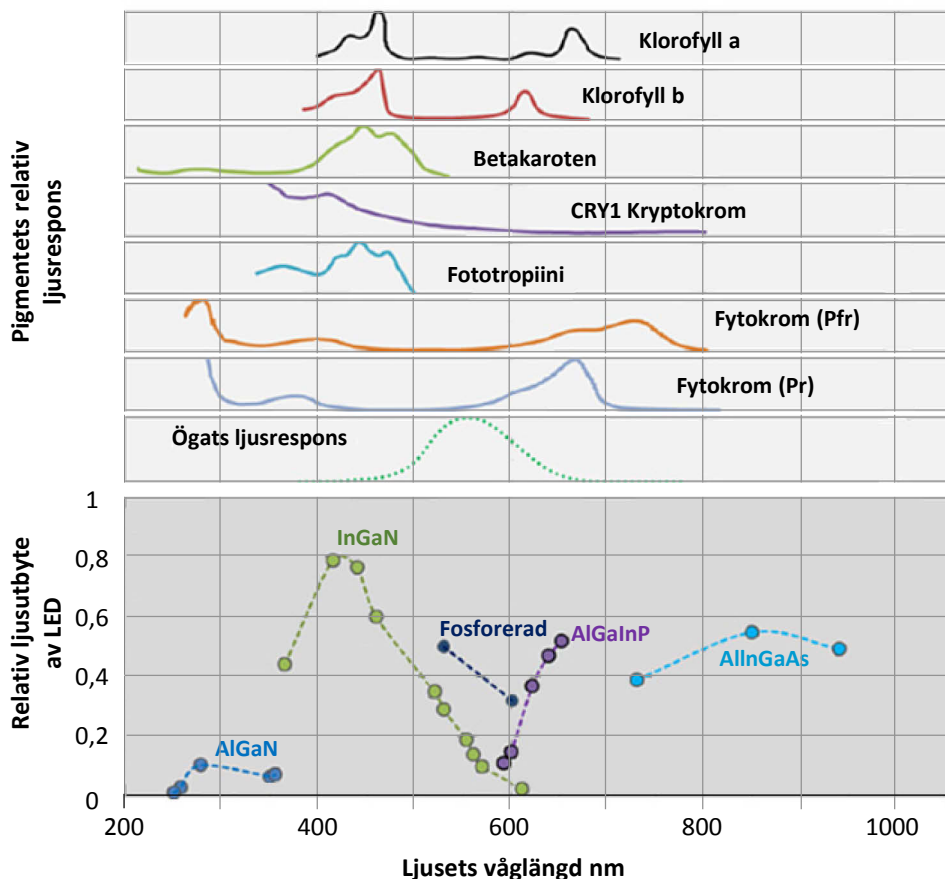
## 8.4. Utnyttjandet av ljusets färger till kvalitet bör förbättras

### Växternas ljussinnen kan ännu inte fullständigt utnyttjas

I växterna finns olika pigment- och färgmolekyler. Dessa tar emot, alltså suger upp, endast en viss sorts ljus (Bild 29). Då växten upptar ljus förorsakar det i allmänhet förändringar i ämnesomsättningen. Eftersom pigmenten i huvudsak tar upp blått och rött, tränger det gröna ljuset genom växterna och reflekteras starkare från dem. Härvid ser människoögat växterna som gröna eftersom ögats ljuskänslighet är god inom det gröna området och därvid olik växternas ljusrespons och -känslighet.

### Klorofyllet kapar fotoner för fotosyntesen

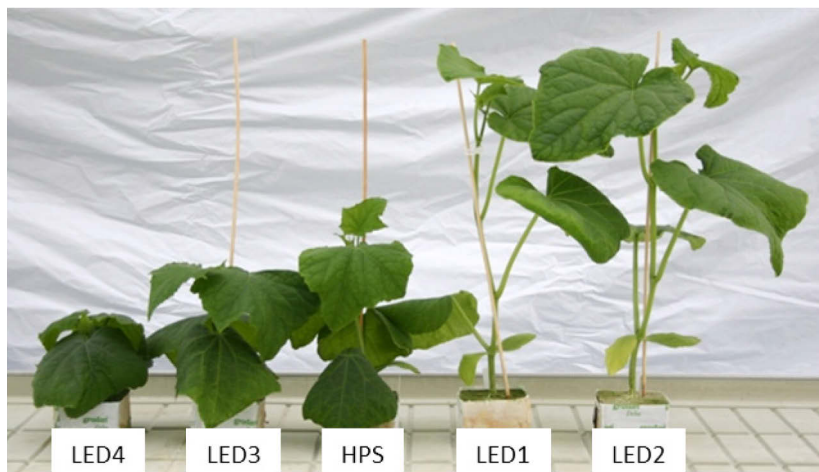
Då växten reagerar på ljuset av en viss färg leder det till förändringar i växtens tillväxt och utveckling. De allmänt mest kända är växtens klorofyllmolekyler a och b, som tar upp blått (455–490 nm) och rött (620–780 nm) ljus för fotosyntesreaktioner. Härvid omvandlas energin i ljuset (fotonerna) till kemisk energi (kolhydrater, fetter, proteiner). Ju mera man belyser en växt, till exempel med rött LED-ljus, till en viss gräns, desto mera tar växterna upp och utnyttjar fotoner och tillväxten ökar. Fastän klorofyllen även tar upp blått ljus leder en alltför stor användning av blått ljus i förhållande till rött att växtens ledavstånd minskar. Detta beror på att fototropinet, som delvis svarar för växternas längdtillväxt och som finns i växtens blad kraftigt aktiveras och minskar på längdtillväxten.



**Bild 29.** Relativ ljusrespons vid olika våglängdsområden hos de ljusmottagande pigmentmolekylerna (Klorofyll a ... Fytokrom Pr) i växterna samt hos människoögat (övre bilden). Relativa effektiviteten av ljusproduktion vid olika våglängdområden hos olikfärgat ljusproducerande leddioder (nedre bilden) (Källa: Pattison mm. 2016).

### Fytokromens Pr- och Pfr-former kapar rött och fjärrött ljus

Fytokrom-pigmentet som förekommer i växter tar emot rött ljus och dess två olika kemiska former (Pr och Pfr) inverkar blöand annat på fröets grobarhet, blomningens inledning, bladens åldrande och växtens längdtillväxt. Vissa arters frögrobarhet kan förhindras genom att behandla fröna med fjärrött ljus. Om växten tillförs förhållandevis mera fjärrött än rött ljus ökar växtens ländttillväxt och bladens tillväxt. (Bild 30).



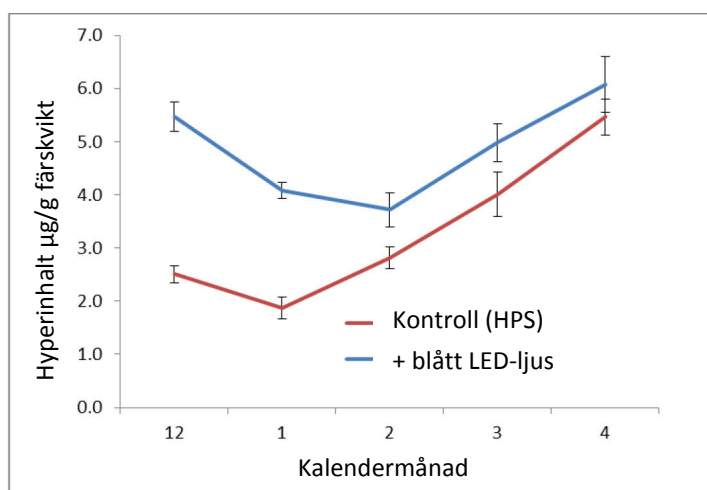
**Bild 30.** Förhållandet (R:FR) mellan det röda och fjärröda ljuset hos LED-lampan inverkar kraftigt på gurkplantornas ländtillväxt och bladytan. Plantan mest till vänster har växt i ljus vars R:FR förhållande är störst. Mot höger minskar R:FR. Vid odling har ljusstyrkan varit densamma för samtliga växter ( $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). (Kari Jokinen, Luke).

### Karotenerna kapar blått och grönt

Med hjälp av belysning lönar det sig knappast att göra medicinalväxter av växthusgrönsaker men det är möjligt att man kan påverka ansamlingen av vissa, ur konsumenternas synvinkel, intressanta föreningar med hjälp av ljusspektra. (Bild 31).

### Ljus påverkar till och med ansamlingen av medicinalaktiga ämnen

Med hjälp av belysning lönar det sig knappast att göra medicinalväxter av växthusgrönsaker men det är möjligt att man kan påverka ansamlingen av vissa, ur konsumenternas synvinkel, intressanta föreningar med hjälp av ljusspektra. (Bild 31).



**Bild 31.** Blåddominerande LED-belysning kombinerad med traditionell HPS-belysning gynnar bildningen av föreningen hyperin i tomatfrukten speciellt under årets mörka tid. För forskningen svarade MTT (nu Luke), Yrkes högskolan Novia, Universitetet i Östra-Finland och LED Finland Ab (Kivimäenpää mm. 2014).



## 9. LED-belysning inom europeisk växthusproduktion

### 9.1. Energiförbrukningsstrategin hos konkurrenter

#### Klimatet i Finland, Polen och Holland

I bild 32 beskrivs ur belysningssynvinkel viktiga klimategenskaper i Finland, Polen och Holland. Strålningsmängden är i Holland och Polen under hela vintern densamma som strålningen i oktober i Finland. Yttre temperatur syns i luftfuktigheten. I Holland är absoluta luftfuktigheten ute på vintern 6 g/m<sup>3</sup> och i Finland 2,5 g/m<sup>3</sup>. Täckets temperatur räcker till att kondensera fuktigheten under största delen av året i Holland och Polen lika bra som i Finland. Då den inre temperaturen i växthuset är 20 °C och fuktigheten 14 g/m<sup>3</sup> kräver borttransport av fukt genom att ventilera och uppvärma 1 g/m<sup>3</sup> växthusluft om hösten i Finland 10,6 KJ (yttre temp 0 °C, yttre fuktighet 2,5 g/m<sup>3</sup>) och i Holland 11,5 kJ (yttre temp 5 °C, yttre fuktighet 6 g/m<sup>3</sup>).

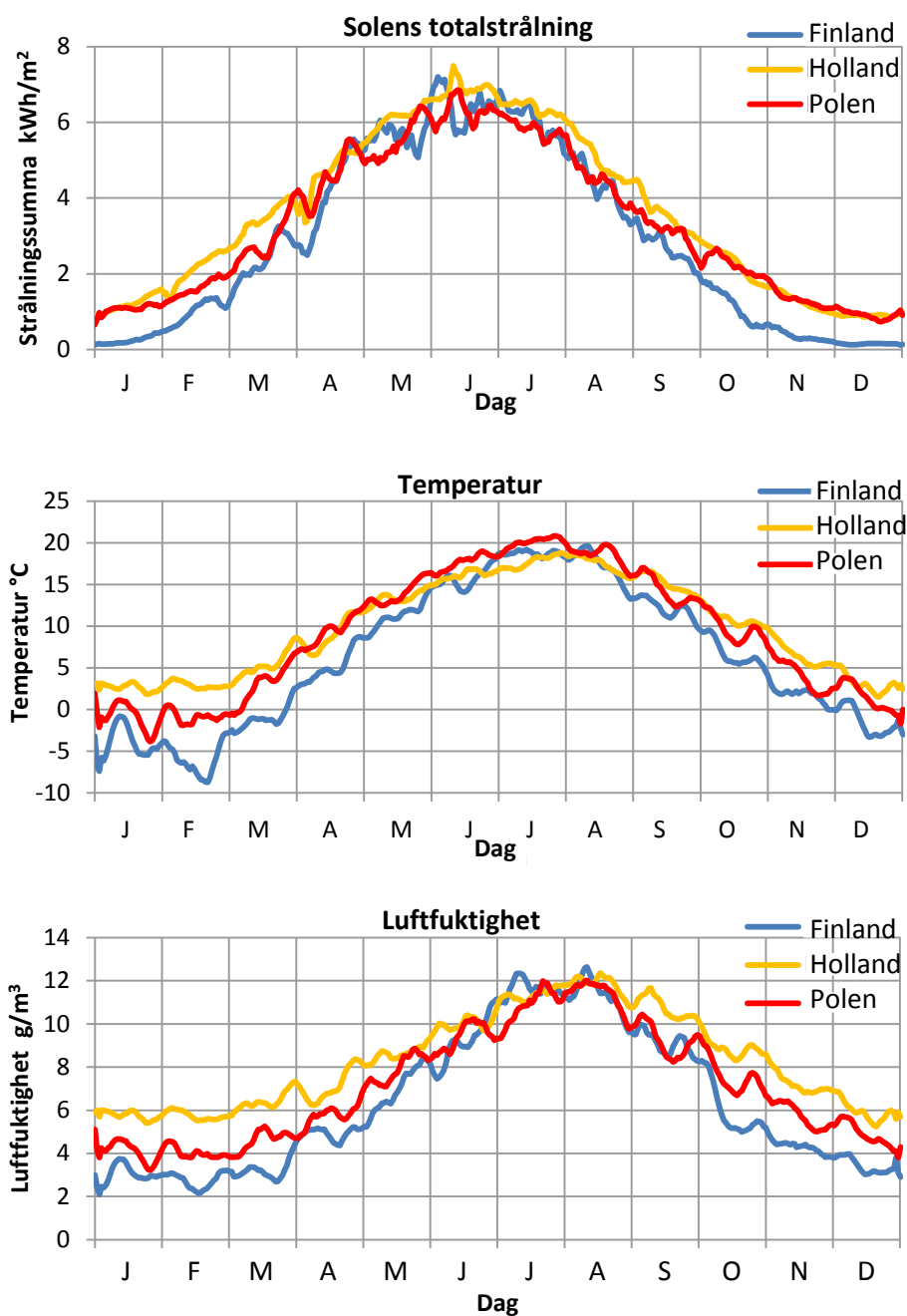
#### Klimatet har inte begränsat belysningen i Holland

Ca en tredjedel av växthusarealen i Holland är belyst, men installationseffekten och ljusintensiteten är i allmänhet låga (Velden och Smit 2015), varför el-strömmens andel av eneriförbrukningen är låg. Klimatet har inte varit en begränsande faktor i Holland för en större användning av belysning utan den spanska växthusproduktionens priskonkurrens, den från 1990-talet i växthusföretagen allt vanligare samproduktionen av värme och el-ström (CHP) genom att använda gas, samt det höga partipriset på ström i förhållande till priset på jordgas.

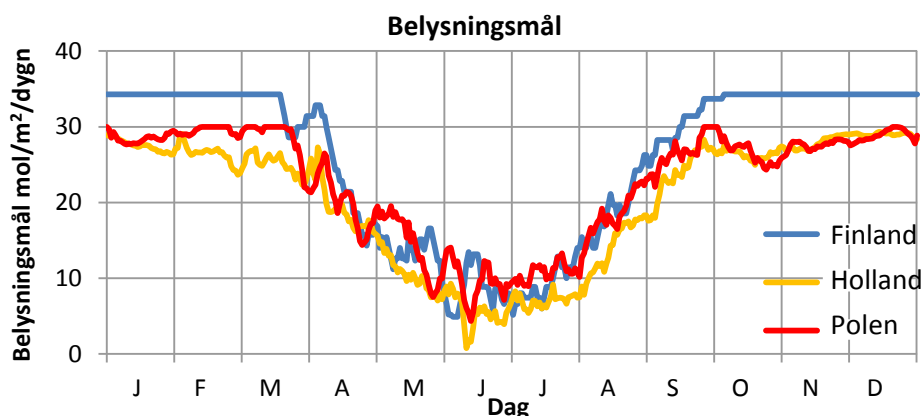
I Holland har växthusens energiproduktionsstruktur kraftigt styrts mot CHP-anläggningar vars typiska kapacitet (0,6–1 MW/ha) räcker till att täcka största delen av växthusets uppvärmningsbehov. En nedgång i el-priset ökar intresset för dess användning i växthus. Om el från en typisk CHP-

anläggning används i ett växthus får man med 18–20 daglig belysning endast 8 mol/m<sup>2</sup>/dygn i december. Detta räcker inte ens till för salad, för att inte tala om tomat och gurka.

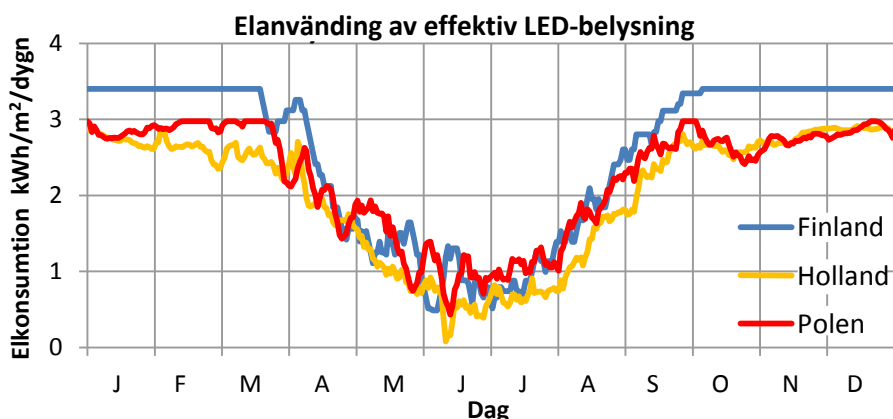
Belysningen för året-om grönsaksodling i Holland kan inte omfattande byggas ut med tanke på växthusföretagens nuvarande CHP-anläggningar. El och värme bör fördelas på odlingsarealer eller då är man tvungen att använda el-ström från fria marknaden vars pris för företagen har på 2010-talet varit 20–45 % högre än i Finland och vars CO<sub>2</sub>-utsläpp är ca dubbelt större än i Finland. I Holland föreslås som mål i växthusproduktionen en betydlig minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen och att nya växthus till och med skulle vara utsläppsneutrala. Det verkar alltså inte vara reellt att genomföra grönsaksodling året om genom att öka andelen LED-belysning inom en när framtid.



**Bild 32.** Solens dagliga strålningssumman, yttre medeltemperatur och den absoluta fuktighetens medelvärde i Finland, Holland och Polen. Värdena är medelvärden från fem år som är utjämnade till veckomedeltal.



**Bild 33.** Målet för belysning av gurkodling i Finland, Polen och Holland, om man i alla vill nå samma ljusmängd som i Finland vid hög belysningsintensitet (mol/m<sup>2</sup>/dygn). Målet för ljusmängd i enlighet med året-om odling i Finland (HPS 270 W/m<sup>2</sup>, högst 20 h/dygn).



**Bild 34.** El-konsumtionen för belysning om målet för ljusmängden är i enlighet med bild 21 och LED-lampans nyttoförhållande är 2.8 μmol/J.

### LED förbättrar konkurrenskraften i energiförbrukningen

I bild 33 har man i gurkodling använt HPS-lampor och normal ljusmängd mol per kvadratmeter per dygn. Om motsvarande ljusmängd skulle produceras med LED-lampor, vars nyttoförhållande är 2.8 μmol/J, skulle el-förbrukningen per dygn i kilowattimmar vara enligt bild 34. Under halva året skulle man fortfarande behöva ytterligare 0,5 kWh/m<sup>2</sup>/dygn mera ström för belysningen i Finland. Skillnaden i tomatodling skulle vara av samma storlek.

I euro räknat är den finska el-kostnaden lägre än i Holland och Polen räknat med dagens el-pris. El-priset har under 2010-talet med europapris varit 20–40 % dyrare i Polen och Baltien (före skatt) än i Finland, men i Estland har el-priset nu sjunkit till den finska nivån. I Polen används ännu inte så mycket växthusbelysning, trots att där finns ca 1000 ha moderna växthus där man främst odlar tomat.

### I Spanien är avkastning och kostnader nära 5 €/m<sup>2</sup>/säsong

Den spanska växthusproduktionen fungerar i EU på egen kostnads- och avkastningsnivå (Martinez mm. 2016). På 2010-talet i Almeria var totalkostnaderna (kapitalkostnad och föränderlig kostnad) i medeltal för en odlings säsong (vinter eller vår) 3–4 €/m<sup>2</sup>, av vilken arbetskraften utgör 40 %. Bruttoavkastningen är 4–8 €/m<sup>2</sup>. Som bäst har nettoavkastningen för tomat varit ca 3 €/m<sup>2</sup> per säsong då skörden i ett högt rum är ca 16 kg/m<sup>2</sup>.

## 9.2. Skillnader i CO<sub>2</sub>-utsläpp

### Finlands och konkurrerande länders CO<sub>2</sub>-utsläpp

Väldokumenterade och omfattande utredningar om miljöpåverkningar för CO<sub>2</sub>-utsläpp finns inte publicerat i något land. Av kalkyler från enskilda gårdar och försök kan man dock få en grov bild om utsläppen.

#### Utsläpp i Finland

I Finland har man på några gårdar med kraftigt HPS-belyst året-om tomatodling uppskattat att el-förbrukningen skulle vara ca 10 kWh/kg (Yrjänäinen ym. 2013). Värmeförbrukningen var då ca 7 kWh/kg. Om strömmen är genomsnittlig finsk el-ström (210 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh), är utsläppet som beror på el-strömmen 2,1 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg eller litet högre. Det bör beaktas att ca en tredjedel av el-förbrukningen och utsläppen sker under november-januari. I teorin kunde man hålla en kort paus i odlingen under midvintern vilket skulle medföra betydligt lägre utsläpp. Utsläppen från uppvärmning är höga om man använder olja eller torv (380 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, Motiva 2012) och mycket låg om bränslet är flis. Övriga utsläpp, förutom från den direkta användningen av energi, per kg skörd vid året-om odling ca 5 % av de totala utsläppen (Yrjänäinen mm. 2013).

El-förbrukningen för en året-om gurkodling har uppskattats till 9 kWh/kg (Yrjänäinen mm. 2013, Kaukoranta ym. 2014) och värmeförbrukningen till 2,5 kWh/kg. Utsläppet som beror på el med genomsnittlig el-ström är då 1,9 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg. Även för gurka medför el-förbrukningen och därmed utsläppen under midvintern en stor del av de årliga utsläppen.

#### Utsläpp i Spanien

Det på klimatet inverkan totalutsläppet för produktion av växthustomat i Spanien har, på årsnivå, beräknats vara 0,25 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg tomat och beror i huvudsak på produktion av växthuskonstruktioner (Torrellas mm. 2012). Skillnaderna är stora från säsong till säsong för uppvärmning behövs användas endast under de kallaste perioderna. Uppvärmning används i 8 % av växthusen i Almeria. Av gruppväxthus (5 % av samtliga växthus) används i 67 % uppvärmning.

#### Utsläpp i Holland

I Holland är värmeenergiförbrukningen ca 9,4 kWh/kg tomat. Produktionens totalutsläpp har uppskattats vara i ett rum med gasuppvärmning 1,9 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg. Det uppskattas att man kunde minska utsläppen med hälften om värmen producerades i en CHP-anläggning och anläggningens el-ström konsumeras någon annanstans och den ersätter el-strömmen i energinätet som produceras vid kol-kraftverk som har höga utsläpp.

Det finns ingen användbar publicerad information om energiförbrukning och utsläpp från belysta tomatodlingar i Holland. I Belgien (Moerkens mm. 2016) är den med toppljus producerade tomatens (85  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , om solstrålningen är under 350 W/m<sup>2</sup>, 170  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , om solen är under 150 W/m<sup>2</sup>, november till mars klo 23–17) el-förbrukning ca 240 kWh/m<sup>2</sup> och skörd 85 kg/m<sup>2</sup> under odlings-säsongen från november till slutet av juli. El-konsumtionen är ca 2,6 kWh/kg och utsläppet som beror på el (200 g CO<sub>2</sub>-ekv /kWh) 0,5 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg tomat. Ökning av belysningen med 110  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  med två rader LED-lampor ökade, med samma stamtäthet, skörden med 10 kg/m<sup>2</sup> ja 18 kg/m<sup>2</sup> genom att använda tilläggsstammar att utnyttja tilläggslyset. Med mellanljus var el-förbrukningen ca 320 kWh/m<sup>2</sup> och utsläppet som beror på el 0,6 CO<sub>2</sub>-ekv/kg. Med dessa inställningarna behövs endast lite uppvärmning då lamporna är påkopplade.

#### I Polen lite mindre energi men större mängd utsläpp

Med de förbrukningssiffror för Polen som ovan visas skulle man i Polen behöva ca 10 % mindre belysning per produktkilogram än i Finland. I Polen bildas dock vid året-om odling flerfallt mera utsläpp

än i Finland på grund av att utsläppskoefficienten för el är 1 200 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh och uppvärmningen sker främst med kol.

### **Med LED-lampor kan man minska utsläppen med 50 %**

För samtliga växthusväxter finns det LED-lampor med vilka man för tillfället kan uppnå ett 30–50 % högre nyttoförhållande vid omvandling av el-ström till skörd. Ytterligare utveckling av LED-lamporna kan kanske möjliggöra ännu en aning bättre nyttoförhållande. Ersättandet av HPS-lamporna med LED-lampor, som i stort sätt producerar samma ljusmängd, under följande årtionde, kan alltså minska utsläppen, som beror på el-konsumtion vid växthusproduktion, med ca 50 %.

### **Minskningen i utsläppen mindre om man använder LED för att öka ljusmängden**

En minskning i el-förbrukning och utsläpp per produktlikogram eller stycke uppfylls kanske inte fullständigt. Genom ekonomiska aspekter kan man välja att använda LED-lampor vars nytto-förhållande inte är bästa möjliga, men vars inköpspris är lägre eller brukstid längre än de bästa lampornas.

Den med lamporna producerade ljusmängden kan även ökas eftersom LED-lampornas lägre värmeavgivning möjliggör detta. Förutom under november-januari ökar skörden inte i samma förhållande som ökningen i ljusmängd, varför effektiviteten av ljusanvändningen sjunker. På grund av detta sjunker inte utsläppen per produktkilogram så mycket som annars skulle vara möjligt genom att ersätta nuvarande HPS-lampor med LED-lampor. Undantag är möjligen kruksalladerna, där man använder låg – ca 100 W/m<sup>2</sup> – HPS-installationseffekt.

## 10. Belysningsteknikens framtid

### 10.1. Belysningskostnadens utvecklingsriktning

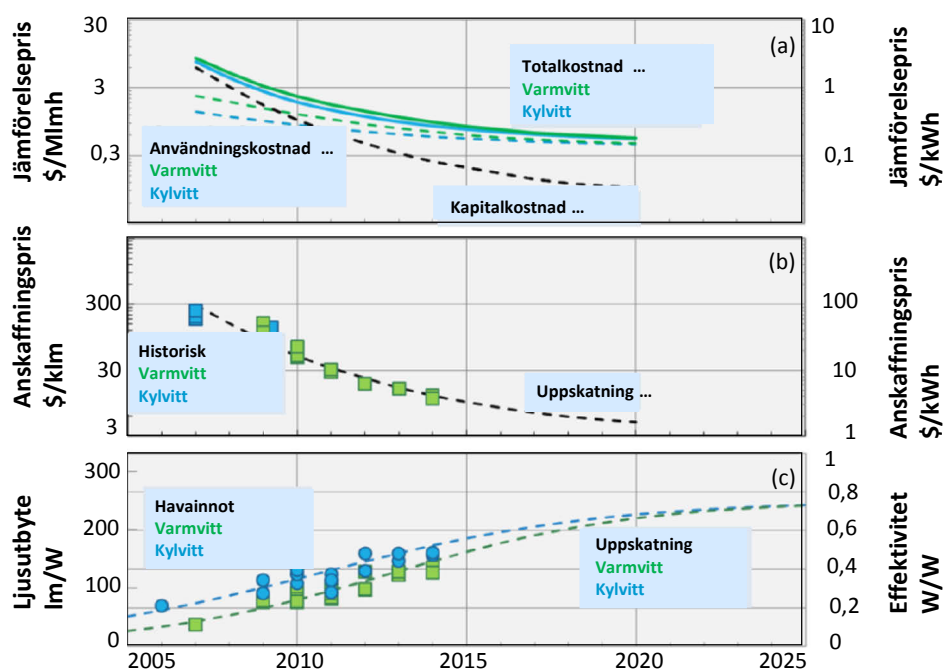
#### **Utvecklingen styrs av den allmänna utvecklingen av lampor samt konsumentprodukterna**

Enligt centrala sakkännare av LED-teknologins utveckling (Pattison mm. 2016, Katona mm. 2016) upplever vi för tillfället en belysningens och ljusets revolution. Halvledarteknikens utveckling har spelat en central roll, detta utnyttjas även vid tillverkning av leddioder. LED-lamporna för växthus är en intressant tillämpning men som dragare av LED-tillämpningar har varit, och kommer även i fortsättningen att vara, produkter för massproduktion vars marknader är globala och i praktiken gränslösa. Av produkter som baserar sig på LED-teknik är betydelsefulla till exempel mångskiftande bildskärmar samt olika belysningslösningar för varierande utrymmen. Bildskärmstillämpningarna möjliggör tillverkning och försäljning av helt nya apparater med stadigt sjunkande priser. Utnyttjandet av leddioder vid belysning i olika utrymmen baserar sig i huvudsak på energibesparing varvid gamla glöd-, lysrörs- och halogenlampor ersätts med ny teknik. I och med användningen av leddioder ökar även möjligheterna för olika belysningslösningar.

#### **Effektivitet och kostnader ökar fortfarande men med avtagande hastighet**

Enligt senaste värderingar kommer den på halvledartekniken baserade LED-belysningens kostnader att minska och effektiviteten märkbart öka under de närmaste åren (Bild 35). De viktigaste mätarna som använts vid kalkyleringarna är apparaturens kapital- och bruksavgift, den producerade ljusenhetens kostnadseffektivitet samt apparaturens belysningseffektivitet. Trots att belysningens effektivitetsutveckling härtills och prognoser gjorda på basen av den berör främst belysning av utrymmen, kan man anta att effektivitets- och kostnadsförväntningarna för lampor som används för konstbelysning av växter kommer att följa samma utvecklingsriktning.

Vid det tekniska innovationsarbetet som berör LED-belysning utnyttjas effektivare än tidigare halvledarmaterial och helt nya lösningar på lamporna. Det främsta målet är fortfarande ökande av ljuseffekten och nedskärning av kostnaderna. En viktig sak inom utvecklingen är även att förbättra den tekniska pålitligheten hos belysningsapparaturen som baserar sig på LED-tekniken.



**Bild 35.** Kostnadernas historiska utveckling och framtidsprognoser för LED-belysningslösningar i varierande utrymmen: a) Jämförelsekostnad (helhets-, kapital- och brukskostnad), b) Lampornas anskaffningspris, c) Belysningseffektivitet. Jämförelsekostnaden är beräknad genom att använda kapitalkostnad och brukskostnad då bruksåldern är 50 000 timmar (Källa: Pattison mm. 2016). Pattison mm. använde lm/W som en enhet av ljusutbytet. Vid växtproduktion använder man  $\mu\text{mol}/\text{J}$ , men båda har blivit bättre med samma proportion.

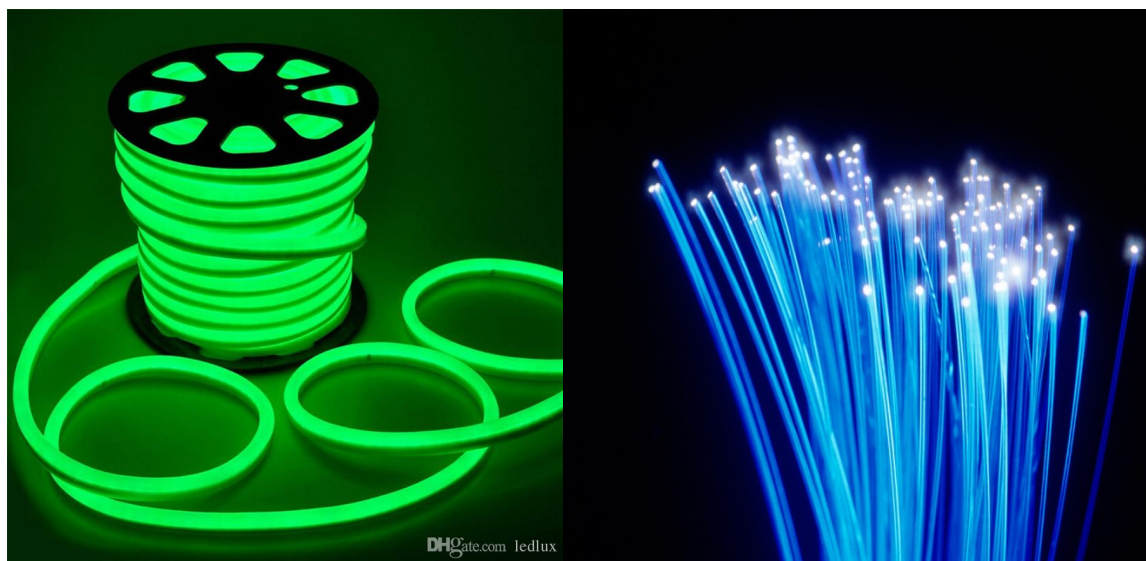
## 10.2. Ännu nya ideer med annan belysning

### Lampans form kan föra lampan till nya platser

Hed hjälp av halvledartekniken kan man nyförtiden på många olika sätt producera ljus både till färgen och formen (Bild 36). I belysningen i olika utrymmen blir allt vanligare att utnyttja ljuslösningar med olika band och ljusfibrer. I flexibla band är ljuskäglans öppningsvinkel nästan  $360^\circ$  (Bild 37). Med hjälp av ljusfibrer kan man bra rikta ljuset (Bild 37).



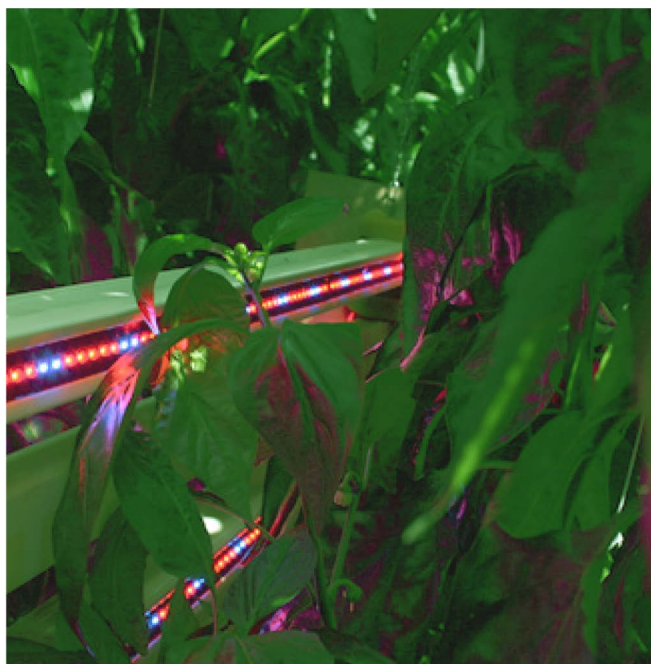
**Bild 36.** I lösningar för olika utrymmen kan man använda mångformigt LED-ljus.



**Bild 37.** Bandaktigt LED-ljus till vänster och ljus lett med ljusfibrer till höger.

### Skuggbladen också i arbete

Förutsatt att ljusintensiteten, som nya lösningar producerar, ökar under de närmaste åren kan man kanske även vid belysandet av växter utnyttja ljusbärare som avviker från traditionella lampor. Med dem kunde man rikta ljuset mot skuggigare områden som uppstår med dagens lampor (Bild 38). Strävan är belysa sådana blad som har den effektivaste fotosyntesen. Med hjälp av ljusmodeller har man påvisat att tomatens ljusanvändningseffektivitet kan ökas till och med 15–20 % då belysningen är jämn och kommer inte enbart uppifrån. Förutom en effektiviserad fotosyntes kunde man med mångriktad belysning, som placeras bland grödan, gynna till exempel mognande frukters förgbildning och mognad så att det sker samtidigt på hela frukten och i hela klasen.



**Bild 38.** LED-lamporna som nuförtiden används som mellanljus lämpar sig att användas till mellanljus för paprika med två toppar på grund av att lamporna kan placeras inne bland växterna nära växtens blad. Genom att utvidga lampans öppningsvinkel kunde man styra ljuset på en bredare bladyta och såvida effektivisera fotosyntesen. (Kari Jokinen, Luke).



### Ljusrecept för arter och sorter

Man bör även beakta att växtens ljuskrav är helt olika i enbart konstbelysning än i förhållanden där växten även får rikligt med naturligt ljus. Från naturligt ljus kommer det av ljusets alla våglängder varför det då LED-belysning används som komplement i allmänhet är tillräckligt med rött ljus som effektiviserar fotosyntesen.

Ju bättre vi lär oss känna olika odlingsväxters ljuskrav och -respons under olika utvecklingskedan desto sannolikare kommer ljus att ges mera valbart och energieffektivt i framtiden. I det skedet kommer odlandet inte längre att basera sig på principen "lika ljus för alla" utan odlaren har till sitt förfogande noggranna ljusrecept och skräddarsydda belysningslösningar. Dessa mål är allt lättare att nå med LED-lampor. Det är även sannolikt att en del av förändringarna som sker i växten under dess olika utvecklingskedan uppnås med en lägre ljusstyrka än vad som behövs vid fotosyntesen. Nyförtiden finns redan bland annat ett fjärrött pulsljus i stället för ett kontinuerligt ljus med vilket man reglerar vissa arters blomning och optimerar längdtillväxten. I motsvarande grad kan man gynna pigmentbildning i frukter och blommor samt smakämnenas utveckling i bladen med lämpligt LED-ljus. Belysningen styrs med hjälp av sensorer som är kopplade till ett styrsystem på samma sätt som man för tillfället styr växternas gödsling och bevattning.

### Växtförädling för utnyttjande av belysningens nya möjligheter

Då den skräddarsydda användningen av leddioder kombineras med växtförädlingen kommer det troligen att småningom leda till val och användning av nya sorter. Vid odling av växter i förädlingskedan används ljus effektivt både för fotosyntesen och för att nå den kvalitet man strävar till speciellt vid konstljusodling i växthus. LED-lampans spektrum innehåller endast nödvändiga våglängder och ström förbrukas inte till att producera överlops våglängder.

### Pulserande ljus kan förbättra el-strömmens brukseffektivitet

På sällad har man preliminära resultat på att man kan öka ljusets brukseffektivitet (gram tillväxt per mol ljus) och såvida även el-strömmens brukseffektivitet (gram tillväxt per joule el-ström) genom användning av pulserande ljus (pulsed light) som produceras av en LED-lampa (Kanechi mm. 2016).

Om den producerade ljusmängden ( $\text{mol/m}^2$ ) är densamma, har man med pulserande LED-ljus i försöken erhållit en bättre tillväxt än med kontinuerligt LED-ljus. I pulserande ljus är det turvis en belyst period och turvis obelyst period vars upprepningstäthet varierar från några gånger per sekund (1–2 Hz) ända till tusentals gånger per sekund (1–20 Hz). Under den mörka perioden upphör elförbrukningen och värmeproduktionen. Genom att justera pulseringsfrekvensen kunde man på ett alternativt sätt även genomföra dimning av leddioderna då när man vill ändra mängden konstljus.

## Referenser samt tillhörande litteratur

- Bantis, F., Ouzounis, T., ja Radoglou K. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae* 198: 277–283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
- Blom-Zandstra, M. 1989. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Annals of Applied Biology* 115: 553–561. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.1989.tb06577.x>
- Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Dabašinskas, L., Vaštakaitė, V., Miliauskienė, J. and Duchovskis, P. 2016. Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 277–284. [http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_37.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_37.htm)
- Carvalho, D., and Folta, K.M. (2014). Environmentally modified organisms – expanding genetic potential with light. *Critical Reviews in Plant Sciences* 33: 486–508. <http://dx.doi.org/10.1080/07352689.2014.929929>
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. ja Sabzalian, M.R. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical transactions of the royal society B* 369: 20130243. <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/369/1640/20130243>
- Goto, E., Hayashi, K., Furuyama, S., Hikosaka, S. ja Ishigami, Y. 2016. Effect of UV light on phytochemical accumulation and expression of anthocyanin biosynthesis genes in red leaf lettuce. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 179–186. [http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_24.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_24.htm)
- Hogewoning, S.W., Wientjes, E., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., Croce, R. ja Harbinson, J. 2012. Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell* 24: 1921–1935. <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.112.097972>
- Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W. and Harbinson, J. 2010. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany* 61: 1267–1276. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq005>
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Meinen, E. and van Ieperen, W. (2012). Finding the optimal growth-light spectrum for greenhouse crops. *Acta Horticulturae (ISHS)* 956, 357–363. <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
- Hovi, T., Näkkilä, J. ja Tahvonen, R., 2004. Intracanopy lighting improves production of year-round cucumber. *Scientia Horticulturae* 102: 283–294.
- Huang, W., Zhang, S.B. ja Hu, H. 2014. Sun leaves upregulate the photorespiratory pathway to maintain a high rate of CO<sub>2</sub> assimilation in tobacco. *Frontiers in Plant Science*. Published: 03December2014 doi: 10.3389/fpls.2014.00688
- Jokinen, K., Särkkä, L.E. ja Näkkilä, J. 2012. Improving Sweet Pepper Productivity by LED Interlighting. *Acta Hort.* 956: 59–66. [http://www.actahort.org/books/956/956\\_4.htm](http://www.actahort.org/books/956/956_4.htm)
- Kaukoranta, T., Näkkilä, J., Särkkä, L. ja Jokinen, K. 2014. Effects of lighting, semi-closed greenhouse and split-root fertigation on energy use and CO<sub>2</sub> emissions in high latitude cucumber growing. *Agricultural and Food Science* 23: 220–235. <http://ojs.tsv.fi/index.php/AFS/article/view/8682>
- Kanechi, M., Maekawa, A., Nishida, Y. ja Miyashita, E. 2016. Effects of pulsed lighting based light-emitting diodes on the growth and photosynthesis of lettuce leaves. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 207–214. [http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_28.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_28.htm)
- Katona, T.M., Pattison, P.M. ja Paolini, S. 2016. Status of solid state lighting product development and future trends for general illumination. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* 7: 263–281. <http://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-chembioeng.7.263-281>
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M., Kiyota, M., 2004. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO<sub>2</sub> levels in a plant culture system. *Advances in Space Research* 34: 1466–1469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.031>
- Kivimäenpää, M., Jokinen, K., Julkunen-Tiitto, R., Juutilainen, J. ja Holopainen, J. 2014. LED-valot vaikuttavat kasvien laatuun. *Puutarha & kauppa* 16: 10–11.
- Li, Q., ja Kubota, C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* 67: 59–64. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847209001348>
- Lumileds. 2016. WP 15 Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems White paper. <http://www.lumileds.com/uploads/167/WP15-pdf>

- Moerkens, R., Vanlommel, W., Vanderbruggen, R. ja T. Van Delm, T. 2016. The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 119–124.  
[http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_30.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_30.htm)
- Motiva 2012. Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. [http://www.motiva.fi/files/8886/CO2-laskentaohje\\_Yksittainen\\_kohde.pdf](http://www.motiva.fi/files/8886/CO2-laskentaohje_Yksittainen_kohde.pdf).
- Naznin, M.T., Lefsrud, M., Gravel, V. ja Hao, X. 2016. Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 223–230.  
[http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_30.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_30.htm)
- Nicole, C.C.S., Charalambous, F., Martinakos, S., van de Voort, S., Li, Z., Verhoog, M. ja Krijn, M. 2016. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 231–238. [http://www.actahort.org/books/1134/1134\\_31.htm](http://www.actahort.org/books/1134/1134_31.htm)
- Näkkilä, J., Jokinen, K., Särkkä, L. ja Kaseva, J. 2016. Lisävalotuksen ja lannoituksen loppulaimennuksen vaikutus jääsalaatin satoon ja laatuun. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Loppuraportti 12.9.2016.
- Pattison, P.M., Tsao, J.Y. ja Krames, M.R. 2016. Light-emitting diode technology status and directions: opportunities for horticultural lighting. *Acta Horticulturae* 1134:413–425.  
DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.53
- Petterson, R.I., Torre, S. ja Gislerød, H.R. 2010. Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. *Scientia Horticulturae* 125: 77–81.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2010.02.006>
- Olle, M. ja Virsile, A. 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science* 22: 223–234.  
<http://ojs.tsv.fi/index.php/AFS/article/view/7897>
- Osram. 2013. Reliability and Lifetime of LEDs. [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic5/00165201\\_0.pdf/Reliability%20and%20Lifetime%20of%20LEDs.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic5/00165201_0.pdf/Reliability%20and%20Lifetime%20of%20LEDs.pdf)
- Owen, W.G., ja Lopez, R.G. (2015). End-of-production supplemental lighting with red and blue Light-emitting diodes (LEDs) influences red pigmentation of four lettuce varieties. *HortScience* 50: 676–684.
- Pinho, P., Jokinen, K. ja Halonen, L. 2016. The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology* 0: 1–16. *Painossa*. Julkaistu on-line 4.4.2016 doi: 10.1177/1477153516642269
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G. ja Gianquinto, G. 2015. Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae* 193: 202–208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>
- Ruimy, A., Jarvis, P.G., Baldocchi, D.D. ja Saugier, B. 1995. CO<sub>2</sub> Fluxes over Plant Canopies and Solar Radiation: A Review. *Advances in Ecological Research* 26: 1–68.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60063-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60063-X)
- Särkkä, L., Jokinen, K., Kaukoranta, T., Sjöholm, D. ja Blomqvist, K. 2014. LED-valaistuksen tehokkuus kasvihuonekurkun viljelyssä. *MTT Raportti* 173.  
<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti173.pdf>
- Särkkä, L., Luomala, E.-M., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R., Huttunen, J. ja Alinikula, M. 2008. Kasvihuoneen jäähdytyksellä parempaan ilmastoon ja satoon. *Maa- ja elintarviketalous* 122. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met122.pdf>
- Terashima, I. 1986. Dorsiventrality of photosynthetic light response curve of a leaf. *Journal of Experimental Botany* 37: 399–405. <http://jxb.oxfordjournals.org/content/37/3/399.full.pdf>
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R.G.C., Davis, F.J., Battey, N.H., Hadley, P., ja Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce ‘Revolution’ grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany* 63: 232–239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.12.002>
- U.S. Department of Energy. 2011. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting. <http://energy.gov/eere/ssl/led-lighting-facts>
- U.S. Department of Energy. 2014. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting. <http://energy.gov/eere/ssl/led-lighting-facts>
- Valera, D.L., Belmonte, L.J., Molina, F.D. ja López, A. 2016. Greenhouse agriculture in Almería. A comprehensive techno-economic analysis. *Cajamar Caja Rural. Serie Economía* 17.  
<http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis>

## Tack

Detta arbete finansierades av Maatilatalouden kehittämishasto (Makera). I projektet har också använts material som producerades med finansiering från Maiju ja Yrjö Rikalan säätiö. Tack för det.

Tack till de odlare som delade med sig sin kunskap om användningen av LED-lampor. Tack även till Kjell Brännäs, Jord- och skogsbruksministeriet samt Juha Ossi, Österbottens NMT-central för ordnandet av kontakter till odlare.



luke.fi

Naturresursinstitutet  
Ladugårdsbågen 9  
FI-00790 HELSINGFORS, FINLAND  
Tfn +358 29 532 6000