

## Jaap Liefding Moderne verlichting

*"Verlichting in donkere dagen" was op 14 november ook een aardige titel geweest. Licht blijft een moeilijk onderwerp, vooral vanwege de natuurkundige achtergrond: hoe licht ontstaat, hoe de verdeling in het lichtspectrum is, hoeveel licht je per Watt krijgt. Het is niet eenvoudig alle eenheden uit elkaar te houden. Daar komt nog het probleem bij dat wij mensen licht anders ervaren dan onze planten. Jaap heeft er zijn vak van gemaakt en hij kon voor ons "zijn licht laten schijnen" op de basisprincipes en de moderne ontwikkelingen. Moeten we al leds in onze lichtkappen monteren?*

### Straling uit atomen

Wie een elektriciteitsdraadje in een gasvlam houdt ziet dat het gloeiende koper groen licht begint uit te stralen. Die kleur is heel typisch voor het element koper. In gloeilampen is de draad van wolfram, de temperatuur veel hoger en het licht redelijk wit. Wat gebeurt er in de atomen van deze metalen?

Een atoom bestaat uit een atoomkern met daaromheen elektronen. Die bevinden zich in banen op verschillende afstanden van de kern. Een elektron kan wel eens van baan veranderen. Als een elektron van een 'hogere' baan terugvalt naar een 'lagere' baan (lager = dicht bij de kern) dan komt er energie vrij. Die energie wordt uitgestraald als licht.

Iedere elektronbaan heeft een precies bekend energieniveau. Overgangen tussen elektronenbanen geven daarom een heel precies pakketje energie vrij. In het geval van koper geeft dat groen licht. Als er meer energie zou vrijkomen is het erbij horende licht blauwer, bij minder energie hoort roder licht.

Het atoom kan ook andersom reageren: als je energie toevoegt verplaatst een elektron naar een hogere baan. Later kan dat weer terugvallen en daarbij licht uitstralen. Zo werken de gloeilamp en het gloeiende koperdraadje in ons proefje.

### Kleur, energie, golflengte, frekwentie

De kleuren van de regenboog horen bij verschillende energieniveaus. Van rood – lage energie – naar violet – hoge energie. Onder rood zit nog infrarood, niet zichtbaar, wel voelbaar: warmtestraling. Ultraviolet is ook niet zichtbaar, maar energierijker dan violet licht. Het verbrandt onze huid.

Bij licht wordt meestal gewerkt met de golflengte ( $\lambda$ , lambda), uitgedrukt in nm (nanometer = een miljardste meter,  $10^{-9}$  m). Ouderwets is Å (Ångstrom,  $10^{-10}$  m; 1 nm = 10 Å). Bij andere straling wordt soms juist de frekwentie ( $\nu$ , spreek uit: nu) gebruikt, uitgedrukt in Hz (Herz, aantal trillingen per seconde). Het product van beide is constant:  $c = \lambda\nu$ , voor alle straling die zich met de lichtsnelheid  $c$  voortplant. Straling met lange golven (hoge  $\lambda$ ) heeft daarom een lage frekwentie (lage  $\nu$ ), en andersom. Voor de kleuren in de regenboog: violet licht is kortgolvig – met hoge frekwentie, rood licht is langgolvig – met lage frekwentie.

Kleur van het licht	Golflengte, in nm
infrarood	boven 780
rood	650 – 780
oranje	585 - 650
geel	575 - 585
groen	490 - 575
blauw	420 - 490
violet	380 - 420
ultraviolet	onder 380

De energie van lichtstraling is evenredig met de frekwentie. Hoe hoger de frekwentie, hoe hoger de energie. Violet licht is kortgolvig en hoogfrequent, dus energierijker dan

rood licht, dat langgolvig en laagfrequent is. Het is vastgelegd in de wet van Planck. Voor de eenheden van lichtstraling moet je ervan uitgaan dat er lichtdeeltjes (*fotonen*) bestaan. Als er één elektron naar een lagere baan valt, wordt er één foton uitgezonden. De energieniveaus van elektronenbanen worden vaak in elektrovolt (eV) uitgedrukt. Dan kun je de energie van een lichtdeeltje dus ook in die eenheid uitdrukken. Jaap liet de formules zien die dat weergeven.

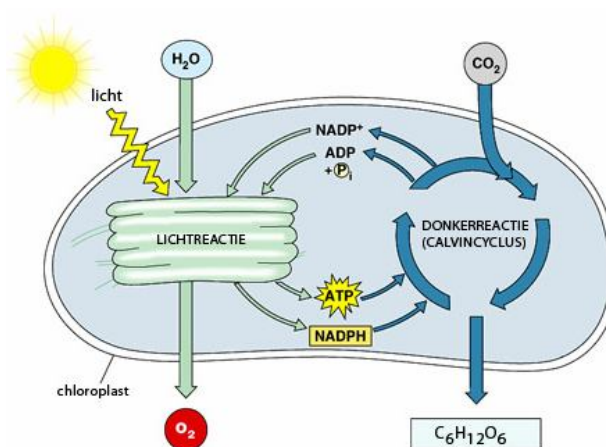
### Lichthoeveelheid

Bij de beoordeling van de hoeveelheid licht speelt de ooggevoeligheid mee. Het menselijk oog is namelijk voor geel-groen licht het gevoeligst, maximum bij 550 nm golflengte. Voor rood en violet is de ooggevoeligheid minder. Eenheden voor de lichtopbrengst van een lichtbron (in *candela*) en de lichtstroom door een oppervlak rond die bron (in *lumen*) houden rekening met die gevoeligheid van het oog. Dat geldt ook voor de eenheid *lux*: de verlichtingssterkte op een oppervlak loodrecht op de lichtstralen op een afstand van 1 meter van een lichtbron van 1 *candela*. De fractie geel-groen licht wordt bij al deze eenheden zwaarder meegeteld dan bijvoorbeeld die van het blauwe licht. Ze geven weer hoe wij mensen de hoeveelheid licht ondergaan. Voor een vlinder of bij kan het anders zijn. Planten kunnen niet 'zien', maar waarderen de lichtsamenstelling zeker anders!

### Fotosynthese

Voor de aanmaak van een bepaalde hoeveelheid glucose (bijvoorbeeld 1  $\mu\text{mol}$  = 180 microgram) kan precies berekend worden hoeveel fotonen daarvoor nodig zijn (6  $\mu\text{mol}$  fotonen). Zo kun je de benodigde lichtstroom benoemen:  $\mu\text{mol}$  fotonen per  $\text{m}^2$  per seconde ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ). Later zien we wat een plant nodig heeft en wat een zonnige dag voor lichtstroom biedt. [Verder rekenen met eenheden als *lux*,  $\text{Watt}/\text{m}^2$  en  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  moesten we maar aan de experts overlaten. Het lijkt al moeilijk genoeg om het verhaal kwalitatief te volgen.]

Een ding is zeker: het rendement van de plant is geen honderd procent, er zijn meer fotonen nodig dan theoretisch uitgerekend. En de plant heeft misschien wel voorkeur voor fotonen van een bepaald energieniveau, in andere woorden: voor bepaalde kleuren licht.



De fotosynthese vindt plaats binnen de chloroplasten. Er zijn twee stappen: in de LICHTREACTIE wordt zuurstof afgegeven, in de DONKERREACTIE wordt CO<sub>2</sub> aangetrokken en glucose aangemaakt. Op de oxidatie en reductie van de fosforverbindingen ATP en NADPH (kringloop tussen de twee stappen) wordt niet verder ingegaan.

### Lichtgevoeligheid van de plant

De absorptie van licht door de plant is in het groene gebied lager dan in het blauwe en rode gebied. Dat is logisch: de plant is immers groen, dus dat deel van het lichtspectrum wordt meer weerkaatst. Maar ook als we meten hoe groot de fotosynthese-snelheid van de plant is, dan zien we duidelijk een minimum in het groene gebied. De plant heeft liever blauw en/of rood licht.

Deze dip in de gevoeligheid is niet voor alle planten gelijk. Joop Brokke meent dat de oude verhalen in de aquariumliteratuur gebaseerd waren op metingen aan (mariene?) algen. Bij aquariumplanten en allerlei 'kleuren' TL-lampen werden destijds bij Philips minder grote verschillen in groeirendement waargenomen. Bij onderzoek aan ledverlichting in kassen komt het oude verhaal toch weer terug. We zagen foto's van planten in 'vreemd' blauw/rood licht: geen gezicht, maar de planten groeien goed.

De website [glascompany.nl](http://glascompany.nl) leert overigens dat planten onder *alleen* blauw of *alleen* rood licht niet harmonisch groeien. Onder alleen blauw licht wordt de plant té compact, onder alleen rood licht juist te sprieterig. Deze invloed op de vorm wordt fotomorfogenese genoemd. Het nabije ultraviolet heeft daar ook een rol in; zie het kader.

### Planten en ultraviolet licht

Willem Postma stelde de vraag of planten ook ultraviolet licht kunnen gebruiken voor de fotosynthese. Voor het antwoord wees Jaap op de figuren voor de fotosynthesesnelheid. Beneden een bepaalde golflengte, in feite voor het gehele UV-gebied, is de fotosynthesesnelheid nul. UV wordt dus *niet* voor de fotosynthese gebruikt.

Studie van enkele websites leerde dat UV-B straling ronduit schadelijk is voor de plant. De plant meet de hoeveelheid 'harde' UV-straling en reageert als er teveel is door de bladeren slap te laten hangen en de huidmondjes te sluiten. Dan is er niet langer toevoer van CO<sub>2</sub> waardoor de fotosynthese stopt. Planten die hoog in de bergen groeien, onder relatief veel UV-licht, schijnen een stof te bevatten die het UV-licht filtert (vangt, onschadelijk maakt). Deze stoffen zouden voor zonnecrèmes wel eens interessant kunnen worden.

Straling in het nabije UV (UV-A) wordt wel verdragen. Het draagt echter niet bij aan de fotosynthese, bij een teveel wordt de fotosynthese zelfs geschaad. Maar UV-A heeft wel invloed op de groei. Het zorgt voor compactere groei, korte internodiën, kleinere en dikkere bladeren. En een positief punt (voor kasgewassen) is dat door UV-A licht de vorming van smaakstoffen en anti-oxidanten wordt bevorderd.

### Verzadiging

Als gemeten wordt hoeveel zuurstof een plant produceert als functie van het belichtingsniveau dan zien we een lineair beginstuk, maar bij hogere belichtingswaarde een verzadiging. Met overbelichting kan de plant niet overweg. We zien ook het beroemde 'licht-compensatiepunt' in het begin van de curve. De plant heeft wat zuurstof nodig om te verbranden. Pas bij een zekere hoeveelheid licht zorgt de fotosynthese voor zoveel zuurstof dat die hoeveelheid 'ademzuurstof' gecompenseerd wordt. Voor waterpest gaf Jaap enkele waarden. Het lichtcompensatiepunt ligt voor deze planten bij ruim 30  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ , en de verzadigingswaarde bij ca. 1100  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ . Ter vergelijking: op een zonnige Nederlandse dag wordt een waarde van bijna het dubbele bereikt: 2000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ .

### TL-verlichting

Een TL-buis is gevuld met edelgas en een beetje kwikdamp onder lage druk. Tussen twee elektroden aan weerszijden van de buis vindt een gasontlading plaats, waardoor de kwikdamp ultraviolet licht gaat uitzenden. Aan de binnenzijde is de buis bedekt met een fluorescerende stof. In deze laag wordt de ultraviolette straling omgezet in zichtbaar licht. De samenstelling van de coating bepaalt de 'kleur' van het licht. De TL-buis werd in 1935 voor het eerst gedemonstreerd (General Electric).

Er zijn verschillende diameters, die worden aangegeven in veelvoud van 1/8 inch. De oude, dikke lampen worden vrijwel niet meer gebruikt. De code daarvan was T12, dus 12/8 inch = 38 mm. De standaard is nu T8, dus 8/8 inch = 26 mm. Relatief nieuw is T5 (5/8 inch = 16 mm).

T8-buizen werkten vanouds met een voorschakelapparaat (VSA) en starter. Later kwamen er elektronische VSA's (HF=hoogfrequent, 'starterloos'). Voor T5-buizen zijn alleen moderne elektronische VSA's verkrijgbaar. Van T5 wordt zowel gezegd dat ze meer licht geven als dat ze koeler zouden blijven. Het kan allebei, maar niet tegelijk. Er zijn twee typen: HO = high output, veel licht maar de lampen worden heet, HE = high efficiency, de lampen blijven koel. T5-buizen zijn er (nog) niet in alle kleuren van het T8-aanbod. In de tabel staat het aanbod in lengtes van de T5-buizen.

T5-lengtes, mm High Output		T5-lengtes, mm High Efficiency	
Watt	Lengte, mm	Watt	Lengte, mm
Industrie standaard		Industrie standaard	
24	549	14	549
39	849	21	849
49	1449	28	1149
54	1149	35	1449
80	1449		
'Hobbylampen'		'Hobbylampen'	
24	438	28	590
39	850	35	742
45	895		
54	1047		
54	1200		

#### *Dimmen en schakelen*

De HF-systemen zijn dimbaar, die van Philips tot 3% (nieuw ook tot 1%), die van Osram tot 1%. De overige merken (Helvar, Vossloh) zijn soms maar tot 10% dimbaar en zijn niet zo goed verkrijgbaar.

Werken met schakelklokken werkt vanzelfsprekend zowel voor klassieke als HF-systemen. Met de combinatie van schakelen en dimmen kan een dagprogramma naar wens ingesteld worden. Jaap liet foto's zien met grote sfeerverschillen, tot maanlicht toe.

#### *Optimale werktemperatuur*

Het lichtrendement hangt af van de temperatuur. T8-buizen hebben een optimale werktemperatuur van 25°C. T5-lampen werken het best bij 35°C, wat voor lichtkappen gunstiger lijkt.

#### *Levensduur*

Voor het rekenen met levensduur is het handig om te onthouden dat een buis boven een aquarium in één jaar 4380 uur aan is (365 x 12 uur). De levensduur van buizen met een ouderwets VSA is iets meer dan 10.000 uur. Voor HF-aansturing loopt dit op naar ca. 20.000 uur. Dit geldt voor systemen van bijvoorbeeld Philips en Osram, met 'warme start'. Boven Jewel-bakken zijn systemen van Vossloh gemonteerd, met 'koude start'. De levensduur hiervan is niet veel beter dan met ouderwetse VSA's.

#### *Lichtverlies*

Met het oude systeem valt de lichtopbrengst vrij sterk terug: 80% na een jaar, 70% na twee jaar. Voor HF-systemen is na een jaar nog 90% over en dat niveau wordt daarna vastgehouden.

#### **Led-verlichting**

*Toevallig geeft "Onze Taal" van december een spellingvoorschrift. Het woord led is een afkorting van light emitting diode en wordt uitgesproken als led, niet als el-ee-dee. Daarom is de spelling led, niet LED. In woordsamenstellingen hoort eigenlijk geen streepje, maar het mag voor de duidelijkheid wel. Engelsen schrijven wél LED, Duitsers gebruiken vaak het woord Lichtdiode.*

#### *De werking van een led*

Jaap liet schematische plaatjes zien van een led in werking. Er zijn twee halfgeleidersegmenten aan elkaar gezet. In het n-type segment zijn bewegende elektronen, in het p-type segment zitten 'gaten', gebiedjes met elektronentekort; ook die gaten kunnen verspringen. Het n- en p-karakter wordt bereikt door kristallen zeer gericht te verontreinigen (doperen). Tussen de twee segmenten zit een neutrale zone: de bandkloof. Gelijktijdig kan maar één kant op. Als die wordt aangezet vallen bij de overgang de elektronen in de gaten: het energieverval wordt als licht uitgezonden.

De kleur van het licht wordt bepaald door het potentiaalverschil tussen n en p en de dikte van de neutrale laag.

#### *Wit licht, powerleds*

De opstap naar leds met wit licht, was de ontwikkeling van de blauwe led (o.a. voor 'blue ray'-apparaten!). Rode en gele leds waren er al eerder. Wit kan nu worden bereikt door combinatie van rood, geel en blauw (RGB-leds) of met een fluorescerende laag op een blauwe led (als in een TL-buis; de tussenstap kost wel rendement!).

De laatste stap is de opschaling geweest van signaallampjes naar powerleds die véél licht geven. Het rendement van leds is een groot voordeel. Voor een watt energiestroom krijg je veel meer licht dan bij een gloeilamp, ook wel meer dan bij een halogeenlamp. Maar TL-verlichting (spaarlampen) zijn op dit punt nog niet zo gemakkelijk te verslaan.

Led-verlichting heeft de voordelen dat het lichtgevend element heel klein is, vrijwel onverslijtbaar is, en dat de warmte relatief eenvoudig afgevoerd kan worden. Dat is een lonkend perspectief voor knutselaars van lichtkappen, inbouwers van spotlights, eventueel zelfs onder water!

Er zijn ook twee duidelijke nadelen: de prijs van de eenheden is (nog) hoog (maar ze gaan lang mee) en de kleurweergave is niet erg goed. In termen van kleurweergaveindex (Ra-waarde) kennen we de 800- en 900-serie TL-buizen met 80, resp. 90% kleurweergave. Powerleds scoren nog niet veel beter dan 70%.

#### *Opkomst van led-verlichting*

Led-verlichting is vooral 'hot news' vanwege het gunstige energierendement. Alleen TL-lampen lijken wat dat betreft nog beter. Maar led-verlichting staat nog pas aan het begin van zijn ontwikkeling. Het is niet verrassend dat we bij de eerste lampen leds in vermomming zien: ingebouwd in peertjes of in TL-buizen. Logisch, je moet de lampen wel ergens in kunnen draaien. Maar vrijwel zeker zullen er speciale armaturen komen.

Toepassingen in buitenverlichting winnen snel terrein: robuuste apparatuur, redelijk wit licht in plaats van oranje-rood. Experimenten met led-verlichting voor cultuur in kassen zijn er ook volop. Als de plant immers graag een combinatie van rood en blauw licht wil hebben, kunnen leds dat toch prima leveren? De moeilijkheid om 'mooi' wit licht te maken speelt dan niet.

#### *Led-verlichting in het aquarium*

Vraag: "Jaap, moeten we al leds in onze lichtkappen monteren?" Zijn antwoord: "Wacht nog even, ze worden nog snel beter en goedkoper!"

#### **Informatie**

Websites voor verdere informatie over het onderwerp:

1. [nbat.nl](http://nbat.nl) (licht en fotosynthese, artikel van Dick Poelmeijer);
2. [nl.wikipedia.org](http://nl.wikipedia.org);
3. [vob-ond.be](http://vob-ond.be) (Vlaamse site voor leerkrachten en leerlingen biologie, prachtige powerpoint presentaties);
4. [glascompany.nl](http://glascompany.nl) (site voor de kasbouw)

Eindhoven, februari 2010

Red. Tom

© Werkgroep Aquatische Planten 2010