

50361787-KPS/TCM 04-2059




**Verkenning van het perspectief van LEDs  
voor gewasbelichting in de glastuinbouw**

Arnhem, 16 juli 2004

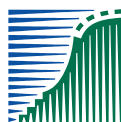
Auteur J.A.F. de Ruijter  
KEMA Power Generation & Sustainables

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

---

auteur : J.A.F. de Ruijter		04-07-16	beoordeeld : R.W. Smit		04-07-19
B 74 blz.	2 bijl.	JAR	goedgekeurd : K.J. Braber		04-07-20

Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Onderzoeksprogramma Energie (PT-projectnummer 11676).



**landbouw, natuur en  
voedselkwaliteit**

© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens KEMA Nederland B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, toekomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

## INHOUD

MANAGEMENT SAMENVATTING .....	5
1 Inleiding .....	17
1.1 Achtergrond .....	17
1.2 Probleemstelling en aanpak .....	17
1.3 Leeswijzer .....	18
2 Belichting in de glastuinbouw .....	19
2.1 Grondbeginselen licht .....	19
2.1.1 Licht als golfverschijnsel .....	19
2.2 Licht als “deeltjes verschijnsel” .....	20
2.3 Assimilatiebelichting .....	22
3 Stand van zaken LED-technologie .....	26
3.1 Wat zijn LEDs? .....	26
3.2 Hoe werken LEDs? .....	26
3.3 Typen LEDs .....	27
3.3.1 Monochromatische LEDs .....	27
3.3.2 Kleuren .....	27
3.3.3 Witte LEDs .....	27
3.3.4 Belang van LED-kleur voor tuinbouwtoepassingen .....	30
3.3.5 super-bright LEDs .....	30
3.3.6 Organische LEDs (OLEDs) .....	31
3.4 Optische kenmerken .....	32
3.4.1 LED-efficiëntie / rendement .....	32
3.4.2 Emissiehoek (‘viewing angle’) .....	35
3.5 Warmtehuishouding .....	36
3.6 Regelbaarheid .....	38
3.7 LED-lampen/armaturen .....	39
3.8 Levensduur / degradatie .....	42
3.9 Producenten / leveranciers .....	44
3.10 Prijsniveau / ontwikkeling van rendement, lichtoutput en prijs .....	44
4 Toepassingen van LEDs in de glastuinbouw .....	50
4.1 Perspectief van LEDs voor assimilatiebelichting .....	50
4.1.1 LEDs versus andere lichtbronnen in de glastuinbouw .....	50

4.2	Total-cost-of-ownership .....	56
4.3	Gevoeligheidsanalyse break-even jaar.....	62
4.4	Toepassingsmogelijkheden/perspectief LEDs.....	65
4.4.1	Résumé (algemene) voordelen van LEDs.....	65
4.4.2	Toepassingsmogelijkheden LEDs in de glastuinbouw.....	66
4.4.3	Lichtonderschepping.....	68
5	Conclusies en aanbevelingen.....	69
5.1	Conclusies .....	69
5.2	Aanbevelingen .....	71
	LITERATUUR.....	72
	Bijlage A Ontwikkeling LED-technologie inclusief OLEDs .....	73
	Bijlage B Data scenario berekeningen.....	74

## MANAGEMENT SAMENVATTING

Licht is een belangrijke productiefactor in de glastuinbouw. Wanneer het ingestraalde zonlicht tekort schiet voor de gewenste groei of productie, kan met een belichtingsinstallatie in de kas het natuurlijke licht worden aangevuld. De meeste belichtingsinstallaties zijn tegenwoordig voorzien van hogedruk-natriumlampen, die geel/oranje-achtig licht uitstralen. Een dergelijke installatie vergt in het algemeen een flinke investering en kent een aanzienlijk stroomverbruik. Door een hogere of kwalitatief betere productie of een betere timing van de productie (gericht op hogere afzetprijzen) moet de vereiste investering zich terugverdienen. Tot op heden was er voor de hogedruk-natriumassimilatiebelichting geen alternatief voorhanden. Recentelijk zijn er echter op het gebied van de LED-techniek ("light emitting diodes") zodanige vooruitgangen geboekt in lichtopbrengst en efficiëntie, dat deze lichtbronnen, die vroeger eigenlijk alleen als signaallampjes werden gebruikt, conventionele verlichtingssystemen beginnen te verdringen. De vraag die in deze studie is onderzocht, of deze techniek/technologie ook perspectief biedt voor de glastuinbouw en, zo ja, op welke termijn?

Voor de beantwoording van deze vraag is eerst een beknopte analyse gemaakt van de eisen waaraan licht voor plantbelichtingsdoeleinden moet voldoen. Bij assimilatiebelichting gaat het met name om het aantal lichtdeeltjes (fotonen) dat per tijds- en oppervlakte-eenheid op het gewas valt. De golflengte van het licht dient in het voor de fotosynthese actieve golflengtegebied van 400-700 nm (PAR-gebied) te liggen. De kleur van het licht binnen dat gebied blijkt voor de assimilatie van ondergeschikt belang te zijn. Daar rode fotonen in principe met minder energie kunnen worden geproduceerd dan andere kleuren, is het uit energetisch oogpunt (uitgaande van lichtbronnen met een gelijk 'quantumrendement') het meest aantrekkelijk om met rood licht te belichten. Om overmatige strekkingsgroei te voorkomen, kan het nodig zijn additioneel blauw licht bij te suppleren (een en ander afhankelijk van het gewas, de duur van de belichting en de hoeveelheid blauw licht die al via het zonlicht is ontvangen)<sup>1</sup>.

Vervolgens is de status van de LED-technologie in kaart gebracht. LEDs produceren licht volgens een ander natuurkundig principe als de gangbare lichtbronnen. Bij gloeilampen gaat het om een gloeiende draad en bij TL-verlichting en natriumlampen om gasontladingen, waarbij een elektrische stroom door een gasmengsel van (meestal) argon en een metaaldamp (vaak natrium of kwik, opgesloten in een glazen buis) gaat en dit gas tot 'gloeien' brengt. Bij LEDs is het lichtgevende element een halfgeleiderchip, waarin zich twee gebieden bevinden: een ("p-gebied") met een overschot aan positieve en een ("n-gebied") met een overschot aan negatieve ladingdragers. Als er een stroom door de p-n overgang loopt, wordt er (op basis van een complex quantum-fysisch verschijnsel) licht uitgezonden. Het licht be-

---

<sup>1</sup> Desgewenst kan ook groen licht worden toegevoegd om wit(ter) licht te creëren, dat beter geschikt is om in te werken.

staat nagenoeg uit één kleur (het is 'monochromatisch'). De kleur (golflengte) van het licht hangt af van het halfgeleidermateriaal. Tegenwoordig zijn er LEDs verkrijgbaar in kleuren verdeeld over het hele spectrum. Ook zijn er witte LEDs ontwikkeld. Deze bestaan meestal uit een LED-chip die blauw of ultra-violet licht genereert en die is afgedekt door een fluorescerend fosforpoeder dat het blauwe of UV-licht absorbeert. De geabsorbeerde energie wordt door het poeder weer vrijgegeven onder uitzending van meer of minder wit licht (zoals dat ook bij TL-lampen gebeurt). Wit licht (of willekeurige mengkleuren) kunnen ook worden gemaakt door licht van rode, groene en blauwe LEDs in de juiste verhouding te mengen.

De efficiëntie waarmee verschillende kleuren (hoog-vermogen) LEDs anno 2003/2004 licht produceren is aangegeven in tabel S.1

Tabel S.1 Rendementen van verschillende high-power LEDs. De kolom "commercieel" geeft de waarden voor anno 2003/2004 leverbare LEDs. De kolom "laboratorium" geeft waarden die in het laboratorium zijn gedemonstreerd. Voor verlichtingsdoeleinden is vooral het lichtrendement (specifieke lichtstroom in lumen/W<sub>e</sub>) van belang. Voor assimilatiebelichting is het (PAR-)fotonrendement (specifieke micromolstroom in (μmol/s)/W<sub>e</sub>) een betere maat. Voor een beoordeling van de efficiëntie van de energieconversie van elektriciteit in PAR-straling (percentage omgezette energie) is het PAR-rendement het meest geschikt.

	lichtrendement		PAR-rendement		(PAR-)fotonrendement	
	commercieel	laboratorium	commercieel	laboratorium	commercieel	laboratorium
	lumen/W <sub>e</sub> *)	lumen/W <sub>e</sub>	(W <sub>PAR</sub> /W <sub>e</sub> )*100%	(W <sub>PAR</sub> /W <sub>e</sub> )*100%	(μmol/s)/W <sub>e</sub>	(μmol/s)/W <sub>e</sub>
Rood	43	82	21,0%	40,4%	1,10	2,12
Rood-oranje	53	92	18,7%	32,3%	0,96	1,67
Amber	35	100	6,7%	19,3%	0,33	0,95
Groen	25	50	4,3%	8,5%	0,19	0,38
Blauw	11	15	18%	24,1%	0,71	0,95
Wit	25	50	7,5%**	15%	0,34	0,68

\*) uitgaande van LEDs van nominaal 1W bij een LED-stroom van 350 mA

\*\*\*) op basis van golflengte karakteristiek van Luxeon V LED van Lumileds

In tabel S.2 is een vergelijking gemaakt van een viertal state-of-the-art, commercieel verkrijgbare hoog-vermogen LEDs van verschillende kleuren met andere lichtbronnen die in de glastuinbouw gebruikt worden. Hieruit blijkt duidelijk dat de LEDs met de hoogste specifieke micromolstroom wat fotonrendement betreft de gloeilampen zijn voorbijgestreefd en in de buurt komen van de TL-D fluorescentielamp. De hogedruk-natriumlampen hebben nog een circa 65 à 72 % hogere specifieke micromolstroom dan de beste (rode) LEDs. De fotonstroom per LED-lamp is nog veel kleiner dan die van andere typen lampen. Wel zijn de LEDs fysiek (veel) kleiner dan de andere lampen. Om een vergelijkbare lichtstroom te verkrijgen moeten vele LEDs in één armatuur worden samengevoegd (voor een HD-natrium equivalent zelfs circa 1000 stuks, uitgaande van rode LEDs).

Management Samenvatting

Tabel S.2 Vergelijking van LEDs met hoge-druk natriumlampen, gloeilampen en fluorescentielampen (TL-D)

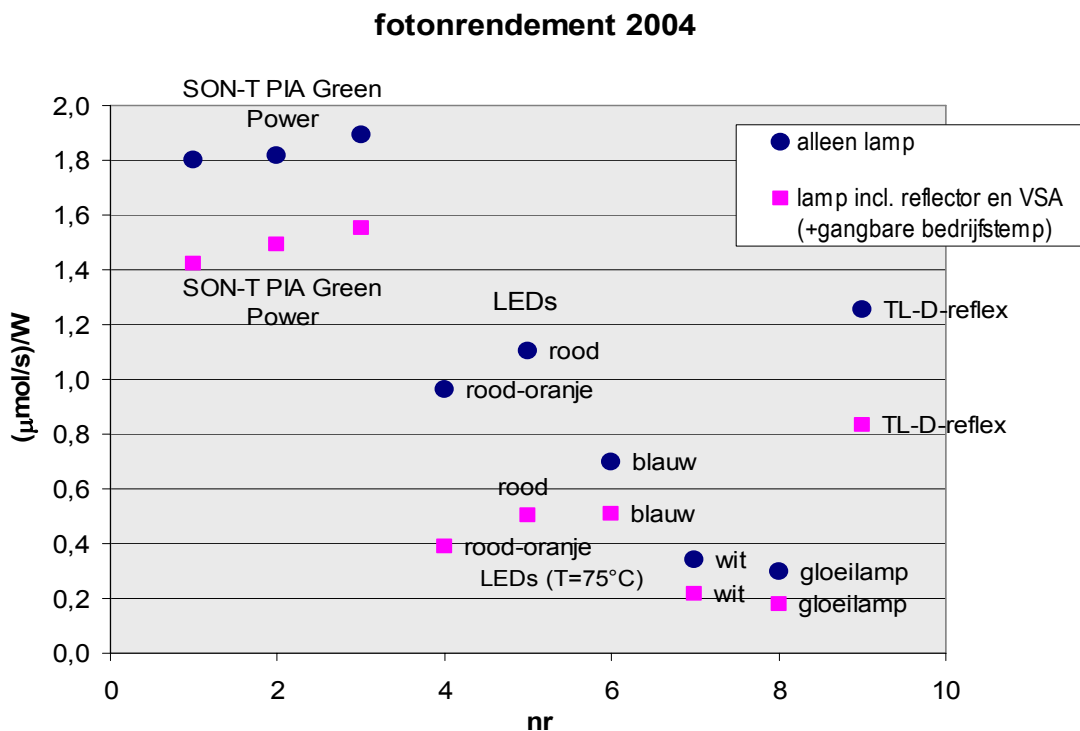
Kenmerken lampen anno 2004	eenheid	rode LED	rood-oranje LED	blauwe LED	witte LED	HD-Na 600W 230 V	HD-Na 600W 400 V	gloeilamp 150 W	fluorescentie TL-D
vermogen lamp	$W_e$	1,03	1,03	1,20	2,59	605	608	150	58
lichtstroom	lumen	44	55	13,2	65	90000	90000	2060	5200
micromolstroom	$\mu\text{mol/s}$	1,14	1,0	0,83	0,88	1100	1150	45	72,8
fotonrendement	$(\mu\text{mol/s})/W_e$	1,10	0,96	0,70	0,34	1,82	1,89	0,30	1,26
lichtrendement	lumen/ $W_e$	43	53	11	25	149	148	14	90
PAR-rendement	%	21,0%	18,7%	17,7%	7,5%	37,0%	38,4%	6,5%	26,0%
spec.kosten	EUR/ $(\mu\text{mol/s})$	2,34	2,67	3,14	4,47	0,020	0,024	0,034	0,11

In tabel S.2 zijn de rendementcijfers per lamp gegeven. Wordt gekeken naar het systeemrendement, waarin rekening wordt gehouden met rendementverlies door reflectoren, voorschakelapparatuur (VSA), voedingen, hoger-dan-ontwerp-bedrijfstemperatuur en dergelijke, dan ziet de verdeling er iets anders uit (zie tabel S.3). Het valt op dat met name bij oranje-rode en rode LEDs de systeemrendementen relatief fors lager liggen dan de lamprendementen. Dit is vooral een gevolg van de hoge temperatuurgevoeligheid van dit type LEDs. Blauwe en witte LEDs, die gebaseerd zijn op andere halfgeleidermaterialen zijn minder temperatuurgevoelig. (Bij oranje-rode en rode LEDs zal dit in de toekomst naar verwachting - na het vinden van geschiktere materialen - ook beter worden.)

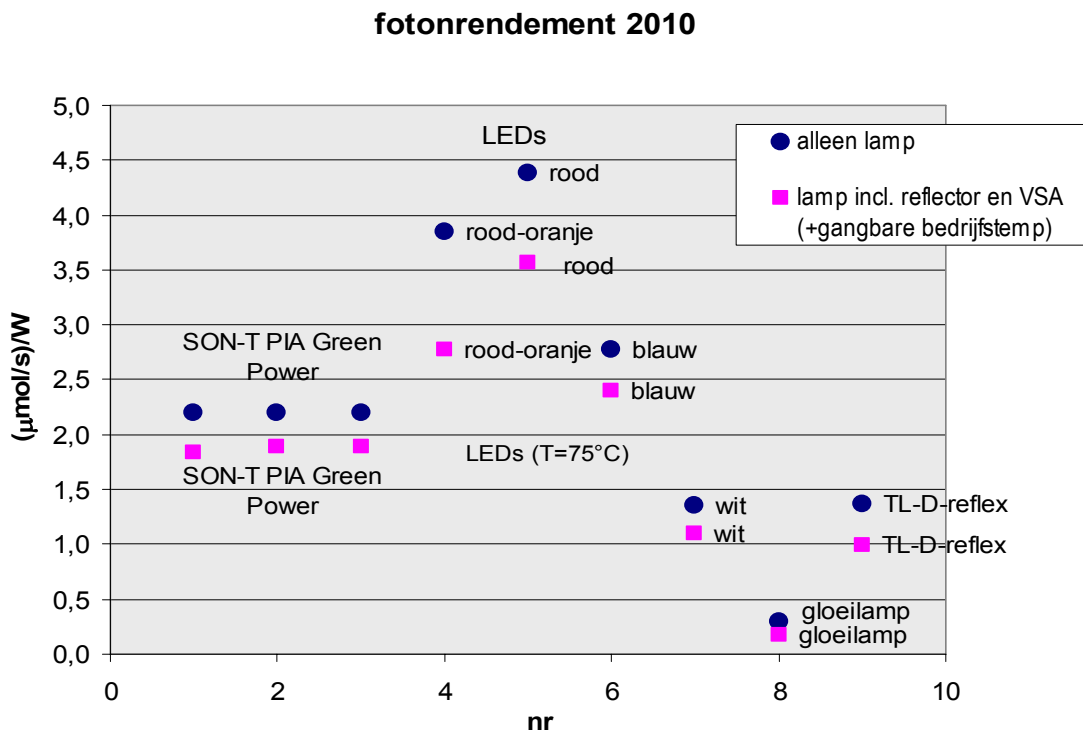
Tabel S.3 Vergelijking van LED-gebaseerde verlichtingssystemen met systemen op basis van hoge-druk natriumlampen, gloeilampen en fluorescentielampen (TL-D)

Kenmerken verlichtingssysteem anno 2004	eenheid	rode LED	rood-oranje LED	blauwe LED	witte LED	HD-Na 600W 230 V	HD-Na 600W 400 V	gloeilamp 150 W	fluorescentie TL-D
fotonrendement	$(\mu\text{mol/s})/W_e$	0,5	0,39	0,51	0,22	1,49	1,55	0,18	0,83
lichtrendement	lumen/ $W_e$	19,5	21,6	8,0	16,0	121,8	121,3	8,2	59,4
PAR-rendement	%	9,6%	7,6%	12,9%	4,8%	30,3%	31,5%	3,9%	17,2%
spec.kosten	EUR/ $(\mu\text{mol/s})$	4,09	5,28	3,50	5,6	0,023	0,028	0,057	0,143

Figuur S.1 geeft een grafisch overzicht van de verschillende fotonrendementen van de lampen en van de verlichtingssystemen op basis van die lampen. Verder is een raming gemaakt van de rendementen in 2010 op basis van een groeiscenario voor de LEDs, dat is gedestilleerd uit de historische groei van de efficiëntie van de LEDs in de periode van 1970-2000 (gemiddeld een factor 10 per 10 jaar = 25,9% per jaar). Voor hoge-druk natriumlampen is voor de komende jaren nog een beperkte rendementverbetering voorzien. De resultaten van de prognoses voor het fotonrendement in 2010 op basis van de veronderstelde groeicijfers zijn uitgezet in figuur S.2. In dit scenario zijn in 2010 (gekleurde) LEDs ook de fluorescentie- en hoge-druk natriumlampen qua fotonrendement voorbijgestreefd.



Figuur S.1 Overzicht van het fotonrendement van verschillende typen lampen (blauw) en lampsystemen (roze). LEDs zijn anno 2004 de gloeilamp voorbijgestreefd en zitten bijna op het niveau van TL-lampen.



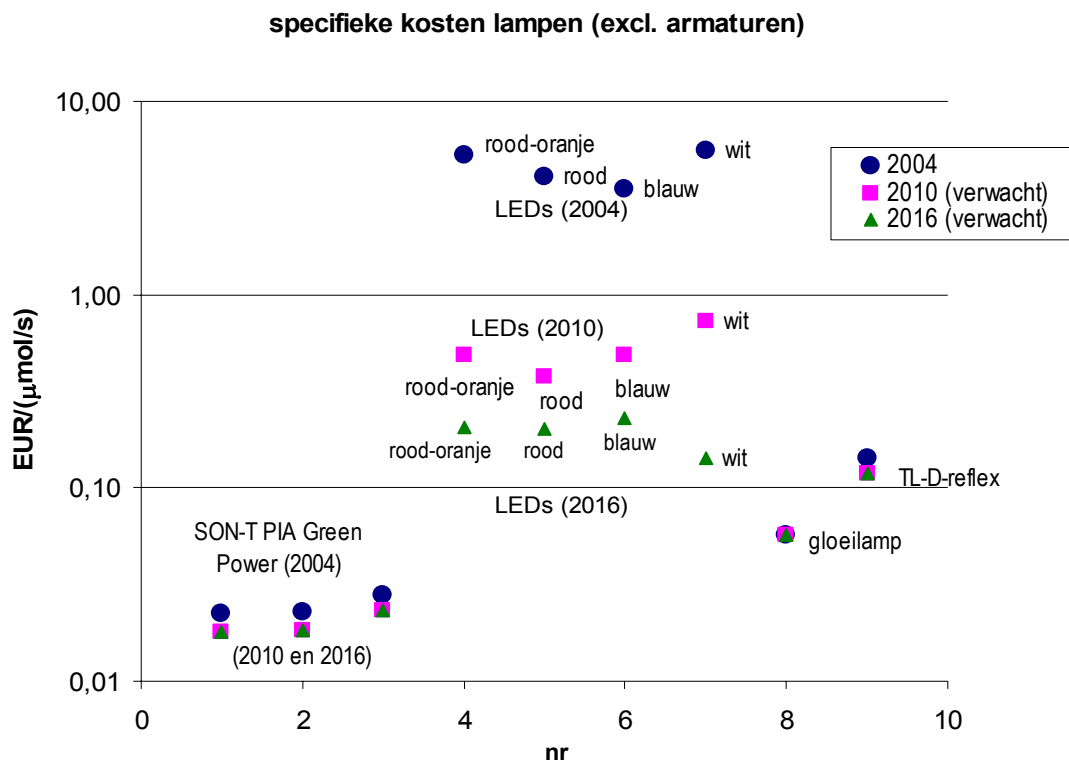
Figuur S.2 Overzicht van het verwachte fotonrendement van verschillende typen lampen (blauw) en lampsystemen (roze) in 2010. Voor de LEDs is een groeicijfer voor de efficiëntie aangenomen van 25,9% per jaar. LEDs zijn in dit scenario (qua energiegebruik) ook de TL-verlichting en de hogedruk-natriumlampen voorbijgestreefd.



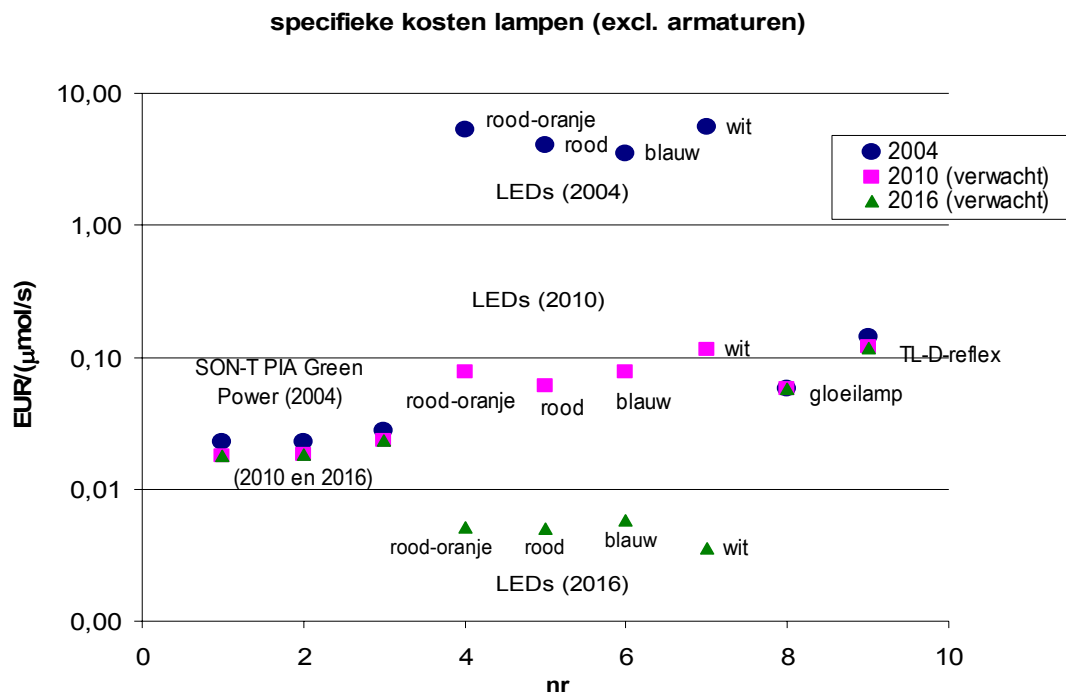
Behalve het fotonrendement is voor een doorbraak van de LEDs ook het prijsniveau in relatie tot dat van de alternatieven van belang. Het prijsniveau is hier gedefinieerd als 'specifieke kosten' en is uitgedrukt in EUR/( $\mu\text{mol/s}$ ). De specifieke kosten van LEDs anno 2004 zijn gebaseerd op een prijsopgave voor de levering van grote aantallen (> 500 000 stuks). Er is ook een raming gemaakt voor de specifieke kosten in 2010 en 2016. Hiervoor zijn verschillende scenario's gehanteerd, met als belangrijkste kenmerken de groei van de lichtoutput per LED en de eerder genoemde groei van de LED-efficiëntie. De belangrijkste scenario's zijn:

- A. *historische groei scenario*: lichtoutput stijgt met 39% per jaar (en de lichtefficiëntie met 25.9%). Dit scenario is gebaseerd op de historische groei over de laatste 35 jaar.
- B. *versnelde groei scenario*: lichtoutput stijgt met 89% per jaar (en de lichtefficiëntie met 25.9%). De outputgroei in dit scenario is gebaseerd op de (versnelde) groei sinds 1998 (sinds de doorbraak in de ontwikkeling van hoogvermogens LEDs).

Onder de aanname van gelijkblijvende kosten per LED (maar toegenomen lichtoutput door efficiëntieverbetering en vergroting van het LED-chippoppervlak) is het prijsniveau van de LEDs voor 2010 en 2016 ingeschat. Voor de overige lichtbronnen is een constante prijs aangenomen, daar hier geen grote ontwikkelingen meer worden verwacht. De prijsniveaus zijn voor scenario A respectievelijk B weergegeven in figuur S.3 respectievelijk S.4.

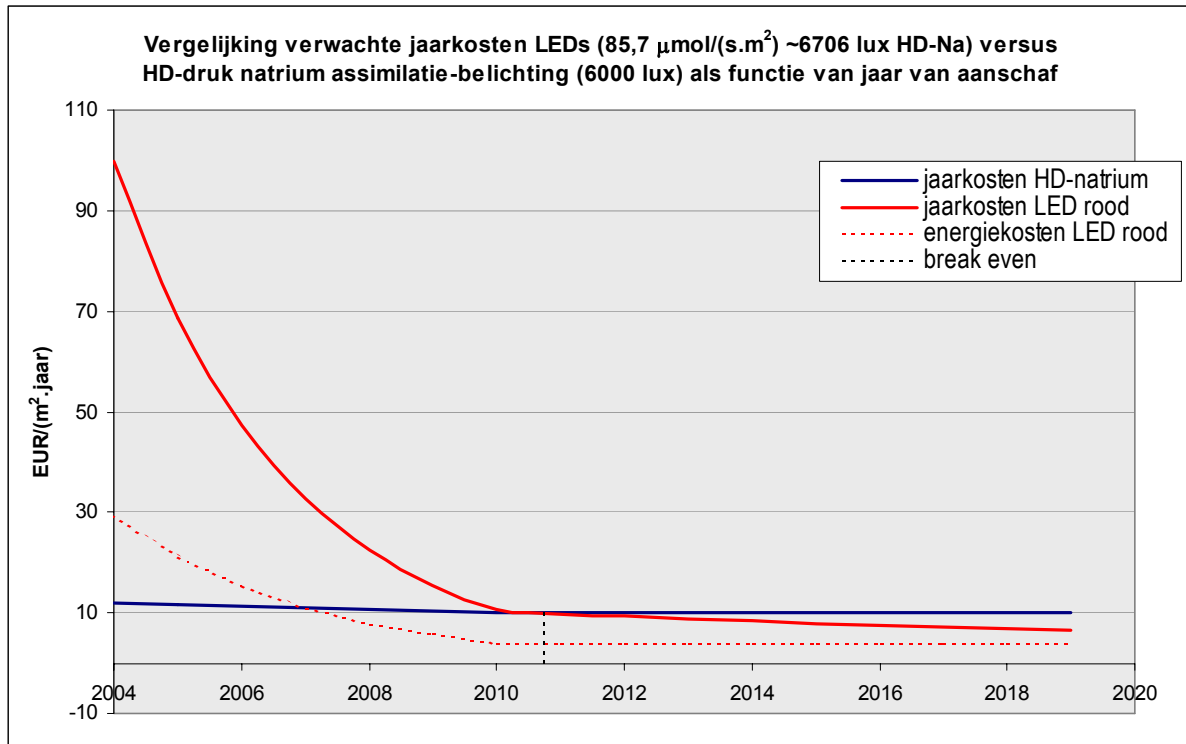


Figuur S.3 Overzicht van de (verwachte) specifieke kosten van verschillende typen lampen in 2004, 2010 en 2016 uitgaande van scenario A: voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 39% voor de LED-output (het systeem-PAR-rendement is daarbij gemaximeerd op circa 70%). In dit scenario zijn de LEDs in 2016 nog aanzienlijk duurder dan de hogedruk-natriumlampen. (Het specifieke energieverbruik - en dus de energiekosten - liggen echter lager, zie figuur S.2).



Figuur S.4 Overzicht van de (verwachte) specifieke kosten van verschillende typen lampen in 2004, 2010 en 2016 voor scenario B: voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 89% voor de output per LED (het systeem-PAR-rendement is gemaximeerd op circa 70%). In dit scenario zijn de LEDs in 2010 ongeveer even duur als TL-lampen en nog iets duurder dan de hogedruk-natriumlampen. In 2016 zijn LEDs alle andere lichtbronnen voorbijgestreefd.

Om te bepalen of en wanneer de LEDs een aantrekkelijk alternatief vormen ter vervanging van de hoge-druk-natriumlampen is een inschatting gemaakt van de 'total-cost-of-ownership' (TCO) van de belichtingssystemen. Hiertoe wordt gerekend de kapitaalkosten (rente en afschrijving), de energiekosten, de onderhoudskosten en de verwijderingskosten over de gebruiksduur. De (netto) energiekosten bestaan uit elektriciteitskosten (berekend op basis van een gemiddelde elektriciteitsprijs van 0,05 EUR/kWh) en een besparing op de verwarmingskosten (uitgaande van een commodity-gasprijs van 0,12 EUR/m<sup>3</sup>). In figuur S.5 zijn voor scenario A de jaarlijkse TCO-kosten van hogedruk-natriumlampen en (rode) LEDs in één grafiek weergegeven als functie van het jaar van aanschaf. De snelle afname van de TCO van LEDs wordt met name bepaald door sterk dalende kapitaalkosten (samenhangend met de sterk dalende specifieke kosten) en verder door verlaging van de energiekosten (als gevolg van de stijgende LED-efficiëntie). Uit de figuur blijkt dat er eind 2010 (na 6,7 jaar) een 'break-even' situatie optreedt, waarin de TCO van LEDs en HD-natriumlampen even hoog zijn. Daarna ligt de TCO van LEDs lager. Op basis van dit scenario wordt dus verwacht dat na 2010 de LEDs de HD-natriumlampen in de kas zullen verdringen. Onder toepassing van het versnelde-groei scenario B wordt de break-even situatie al na 4,4 jaar verwacht (2008 à 2009).



Figuur S.5 Total-cost-of-ownership per m<sup>2</sup> per jaar van (rode) LED-belichting (rode lijn) en hogedruk natrium belichting (blauwe lijn) als functie van het jaar van aanschaf tussen 2004 tot 2019. Voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 39% voor de output per LED. In dit "historische groei" scenario bereikt de LED-belichting tussen 2010 en 2011 dezelfde TCO als die van hogedruk-natriumbelichting. De onderbroken rode lijn geeft de jaarlijkse energiekosten van de LEDs weer.

Bij de TCO-berekeningen is verder aangenomen:

- aantal belichtingsuren per jaar: 4000 uur
- gebruiksduur HD-natriumlampen: 12000 uur (3 jaar)
- gebruiksduur LED-lampen: 44000 uur (11 jaar)
- degeneratie HD-Na lampen over gebruiksduur: 10%
- degeneratie LED-lampen over gebruiksduur: 30% (daarom initieel ca 12% hogere micromolflux genomen)  
→ gemiddeld belichtingsniveau over gebruiksduur: 95% van initiële micromolflux van HD-Na
- belichtingsniveau (initieel) (HD-Na: 6000 lux): 76,7  $\mu\text{mol}/\text{s}/\text{m}^2$  LEDs initieel: 85,7  $\mu\text{mol}/\text{s}/\text{m}^2$
- rente 5%
- kosten van LED-armatuur+voeding+bekab.+optiek: 40% van totale LED-verlichtingssysteemkosten

Naast de reeds genoemde scenario's A en B is de TCO-break-even ook bepaald voor een 3-tal andere scenario's (die qua outputgroei tussen A en B in zitten, c.q. waarbij de efficiëntie minder snel groeit dan bij A en B, zie tabel S.4).

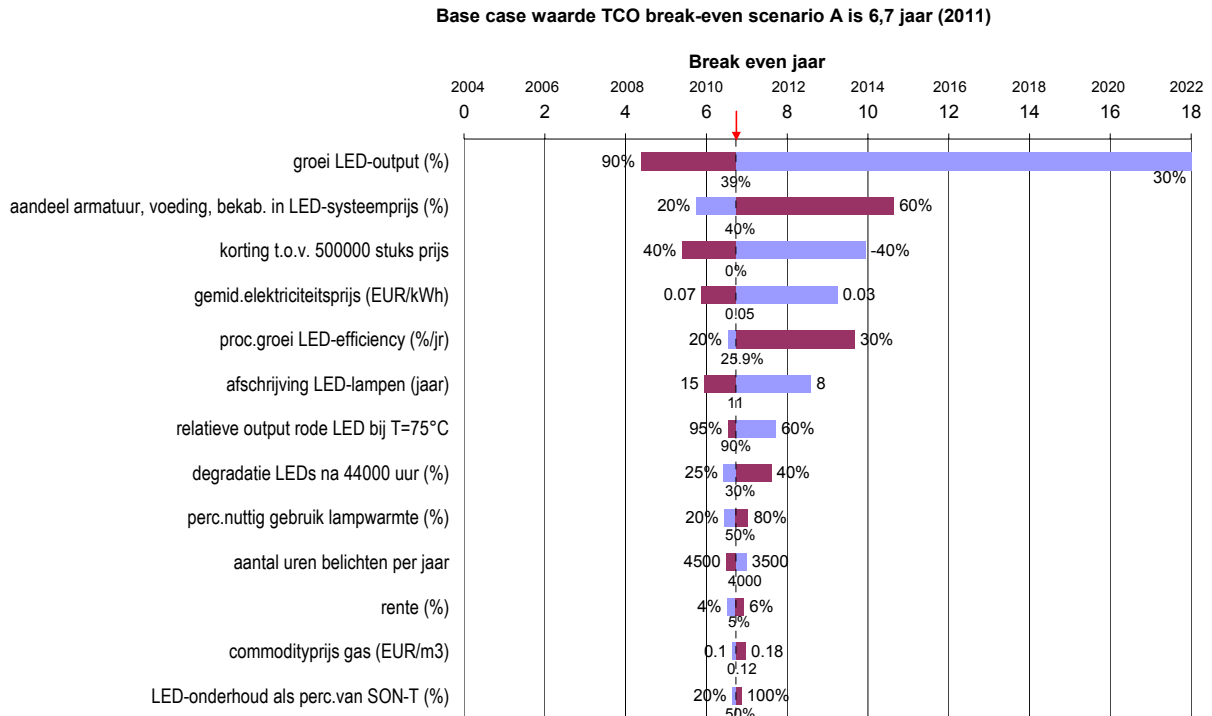
Tabel S.4 Overzicht van scenario's met de jaren waarin een 'break-even' wordt verwacht voor de total-cost-of-ownership van LED-belichting versus hogedruk-natriumbelichting.

Scenario	groei LED-efficiëntie	groei LED-output	opmerking	jaren na 2004	TCO break-even jaar
A. historische groei	25,9% per jaar	39% per jaar	30-jarige gemiddelde	6,7	2010-2011
B. versnelde groei	25,9% per jaar	89% per jaar	Luxeon-lijn sinds 1998	4,4	2008-2009
C. middelsnelle outputgroei	25,9% per jaar	59% per jaar	scenario tussen A en B	5,1	2009-2010
D. lineaire groei LED-efficiëntie	14 lumen/jr	39% per jaar	uit product road map Luxeon 2002 - 2005	12,1	2016-2017
E. lineaire groei LED-effic.+ middelsnelle output groei	14 lumen/jr	59% per jaar	uit product road map Luxeon 2002 - 2005	8,1	2012-2013

Om een idee te krijgen van de gevoeligheid van de break-even waarde van de TCO voor (redelijk geachte) variaties in de belangrijkste invloedsfactoren, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten daarvan zijn voor het 'historische groei' scenario weergegeven in het 'tornado-diagram' van figuur S.6. Hierin zijn middels balken in volgorde van afnemende gevoeligheid de afwijkingen ten opzichte van de verwachte 'middenwaarde' uitgezet, die optreden indien een parameter een hogere (nog acceptabel geachte) waarde aanneemt respectievelijk een (nog acceptabele) lagere waarde.

Het TCO break-even jaar is het meest gevoelig voor de groei van de LED-output. Wordt deze 90% per jaar ( $\approx$  groeitempo in versnelde groei scenario B) in plaats van 39%, dan daalt de TCO-break-even naar circa 4,3 jaar (en gaat daarmee ongeveer over in scenario B). Is de groei 'slechts' 30% per jaar<sup>2</sup>, dan neemt de het TCO-break-even jaar toe met circa 11 jaar. De volgende twee factoren wat betreft gevoeligheid hebben te maken met de kosten. Als het kostenaandeel van armatuur, voeding, bekabeling en optiek 60% is van de totale systeemprijs (in plaats van 40%), dan stijgt de TCO-break-even met circa 4 jaar. Is het aandeel 20% dan daalt de break-even met circa 1 jaar. Als een 40% hogere korting op het startprijsniveau van de LEDs (ten opzichte van de referentie-offerte van voorjaar 2004) zou kunnen worden verkregen, dan zou de break-even situatie circa 1,2 jaar eerder optreden (40% duurder betekent een 3,3 jaar langere break-even). Een 2 EURct hogere gemiddelde kWh-prijs verkort de break-even met circa 0,8 jaar (een 2 EURct lagere prijs verlengt de break-even met ca 3 jaar). De invloed van de overige factoren is minder groot dan de hiervoor genoemde (en kan verder uit de grafiek worden afgelezen).

<sup>2</sup> 30% betekent, dat de lichtoutput dan eigenlijk alleen maar groeit door vergroting van de LED-efficiëntie (die zelf weer begrensd is tot maximaal 70% systeem-PAR-rendement) en nauwelijks door vergroting van het chipoppervlak. Deze situatie wordt niet erg waarschijnlijk geacht. Het maximale rendement treedt in scenario A op na ca 6,2 jaar. Daarna is de overblijvende groei in de LED-output nog maar 10,4% (bij oorspronkelijk 39% outputgroei) of 3,25% (bij oorspronkelijk 30% outputgroei).



Figuur S.6 Tornadodiagram (gevoeligheidsdiagram) van het break-even jaar betreffende de total-cost-of-ownership van LEDs en HD-natriumbelichting voor het ‘historische groei’ scenario A (groei LED-efficiëntie 25,9% per jaar, LED-output 39% per jaar).

## Conclusies

### Energie-efficiëntie

- Qua lichtrendement (lumen/W<sub>e</sub>) zijn commercieel verkrijgbare hoog-vermogen LEDs de gloeilampen en halogeen lampen voorbijgestreefd (en hebben bijna het niveau van fluorescentie-lampen bereikt).
- De lichtflux per lamp (i.c. LED) is echter nog laag in vergelijking met andere lichtbronnen (maximaal circa 120 lumen per LED). Om met LEDs een lichtbron van 90000 lumen te maken - de lichtstroom van een SON-T hoge-druk natrium lamp van 600 W bij 400 V - zijn voorsnog minimaal 750 LEDs nodig.
- Op dit moment is het ‘PAR-foton-rendement’ (= micromolflux ‘groeilicht’ per Watt elektrische energie) van de beste LEDs nog veel lager dan dat van de beste hogedruk-natriumlamp (1,1 versus 1,89 (μmol/s)/W), maar wel veel beter dan dat van gloeilampen (circa 0,3 (μmol/s)/W) en in de buurt van dat van TL-lampen (circa 1,26 (μmol/s)/W).

- Bij LEDs wordt nog een veel verdere groei van het PAR-fotonrendement verwacht dan bij HD-natrium lampen (de laatste zijn al vrij dicht bij hun theoretisch maximum; bij LEDs is dit nog lang niet het geval).
- Rode LEDs geven de grootste fotonflux per toegevoerde Watt elektrische energie (dit vereist wel een goede koeling, zie ook volgende conclusie).

### *Technisch*

- De lichtoutput van met name AlInGaP LEDs (gebruikt voor rode, rood-oranje en amber LEDs) is sterk afhankelijk van de temperatuur van het inwendige van de LED (i.c. de 'junctiontemperatuur' van de LED-chip). Bij een gangbare interne temperatuur van 75°C daalt bij rode LEDs de relatieve lichtoutput met 40% ten opzichte van de waarde bij 25 °C. In de toekomst kan dit thermische efficiëntieprobleem wellicht worden opgelost, door het beschikbare komen van andere materialen die deze gevoeligheid niet (of veel minder) hebben.
- Blauwe, cyaan, groene en witte LEDs (op basis van AlInGaN) hebben een veel lagere temperatuurgevoeligheid.
- Een belangrijk aspect bij de toepassing van hoog-vermogen LEDs is het afvoeren van het in de LED gedissipeerde elektrische vermogen. Van de toegevoerde elektrische energie wordt 5 à 25%, een en ander afhankelijk van de kleur, als lichtstraling naar buiten afgevoerd (in de toekomst zal dit naar verwachting oplopen tot 20 à 70%). De rest wordt omgezet in warmte die zal moeten worden weggekoeld. Om te hoge LED-chiptemperaturen te vermijden (en bij sommige LEDs substantieel rendementsverlies), zal de warmte doeltreffend moeten worden afgevoerd (bijvoorbeeld met koellichamen, al dan niet met geforceerde luchtstroming, naar de omgeving).
- Een ander belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp van armaturen voor LED-assimilatiebelichting dient de (zon)lichtonderschepping te zijn. Daar er nog geen armaturen voor LED-assimilatiebelichting zijn ontwikkeld, is er over de praktijk van dit aspect nog weinig te zeggen. Wel bieden LEDs de ontwerper veel vrijheidsgraden voor een goed ontwerp op dat punt. LEDs zijn kleine punt-lichtbronnen, waarmee talrijke geometrische combinaties kunnen worden gemaakt. In combinatie met de mogelijkheid van verschillende stralingsemissiehoeken (al dan niet met behulp van externe optiek) kunnen bijvoorbeeld lange, smalle, lineaire "LED-arrays" worden gemaakt met een goede lichtverdeling, die gemonteerd onder de goten in de kas, maar een heel geringe lichtonderschepping hoeven te hebben.

## *Financieel (bij tuinbouwtoepassingen)*

- De specifieke kosten (= te investeren euro's per netto micromolflux groeilicht) zijn bij LED-lampen anno 2004 nog hoog (ordegrootte 3 à 6 EUR/( $\mu$ mol/s)) in vergelijking met die van hoge-druk natriumlampen (ca 0,023 à 0,028 EUR/( $\mu$ mol/s)), dat wil zeggen nog een factor 110 à 260 hoger (de bedragen zijn exclusief de kosten voor armaturen en bekabeling).
- In de toekomst wordt bij LEDs een sterke daling van de specifieke kosten verwacht en bij HD-natriumlampen slechts een marginale.
- De 'total-cost-of-ownership' (TCO) van LEDs zal de komende jaren naar verwachting snel dalen. In het "historische groei" scenario (LED-outputgroei van 39% per jaar, LED-efficiëntiegroei 25,9% per jaar) zal de TCO van LED-(assimilatie)belichting over circa 7 jaar even laag zijn als die van hogedruk-natriumbelichting ('break-even' na 6,7 jaar, dat wil zeggen 2010 à 2011).
- In het "versnelde groei" scenario (gebaseerd op de snelheid van de ontwikkeling van de LED-output van de laatste jaren, ca 89% per jaar, en verder de historische LED-efficiëntiegroei van 25,9% per jaar) treedt de break-even situatie al op na 4,4 jaar (medio 2008).
- Bij bovengenoemde scenario's treedt er over circa 4 jaar een *energetische break-even* situatie op, waarbij LED-belichting net zo veel primaire energie verbruikt als HD-natriumbelichting. Daarna zullen LEDs energiezuiniger zijn. Uiteindelijk, na circa 6,2 jaar in de genoemde scenario's, kunnen ze ongeveer 43% op het primaire-energieverbruik besparen en zorgen ze voor een dienovereenkomstige reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot.
- Bij een voorzichtiger scenario ten aanzien van de groei van de LED-efficiëntie (met 14 lumen/W per jaar) en een middelmatig optimistisch groei van de LED-output (59% per jaar) is de break-even termijn van de TCO circa 8,1 jaar. De energetische break-even duurt ongeveer even lang (8,0 jaar). De reductie van 43% op het primaire energieverbruik wordt in dit scenario pas na circa 18 jaar verwacht.

## *Resumerend*

De historische ontwikkelingen van LEDs (en de versnellingen hierin in de laatste 5 jaar) bieden een reëel perspectief voor toepassing van deze lichtbronnen in de glastuinbouw op korte/middellange termijn. Op basis van de onderzochte scenario's zullen de 'total-cost-of-ownership' van LED-belichtingssystemen over 4,5 à 12 jaar lager liggen dan die van hoge-

druk-natriumbelichting en zullen ze derhalve deze conventionele belichtingsvorm in vervangings- of nieuwbouwsituaties gaan verdringen. De hiervoor benodigde technische ontwikkelingen worden vooral gedreven door de gigantische markt die er gloort voor vervanging van traditionele verlichting in onder meer kantoren, woningen en andere gebouwen, die nu veelal is gebaseerd op fluorescentie- en gloeilampen.



## 1 INLEIDING

### 1.1 Achtergrond

Licht is een belangrijke productiefactor in de glastuinbouw. Wanneer het ingestraalde zonlicht tekort schiet voor de gewenste groei of productie, kan met een belichtingsinstallatie in de kas het natuurlijke licht worden aangevuld. De meeste belichtingsinstallaties zijn voorzien van hoge-druk natrium lampen, die geel/oranje-achtig licht uitstralen. Een dergelijke installatie vergt in het algemeen een flinke investering en kent een hoog stroomverbruik. De extra (of kwalitatief betere) productie moet de vereiste investering terugverdienen. Het hoge stroomverbruik heeft behalve een bedrijfseconomische kant (energiekosten) ook een energetische kant. Het primaire energieverbruik per vierkante meter belichte kas is in het algemeen veel hoger dan van een niet belichtend bedrijf. Alhoewel voor belichtende bedrijven een hoger energieverbruik is toegestaan, kan bij de huidige hoge lichtniveaus het al gauw gebeuren dat het bedrijf niet meer aan de energienormen kan voldoen die in het Besluit glastuinbouw voor de betreffende teelt (of teeltgroep) zijn vastgelegd. Door degradatie hebben hoge-druk natriumlampen een beperkte levensduur (ca 10000 à 12000 economische branduren  $\approx$  3 jaar).

Nieuwe belichtingstechnieken die energie-efficiënter zijn en/of goedkoper c.q. een langere levensduur hebben zijn derhalve in principe interessant voor de tuinbouwsector. Recentelijk zijn er met name op het gebied van de LED-techniek ("light emitting diodes") zodanige vooruitgangen geboekt, dat deze lichtbronnen, die vroeger eigenlijk alleen als signaallampjes werden gebruikt, conventionele verlichtingssystemen beginnen te verdringen. De vraag is of deze techniek/technologie ook perspectief biedt voor de glastuinbouw.



### 1.2 Probleemstelling en aanpak

In deze studie wordt nagegaan of LEDs nu of op middellange termijn mogelijkheden hebben om de bestaande belichtingssystemen in de glastuinbouw geheel of gedeeltelijk te vervangen. Centraal bij de beoordeling staat de lichtopbrengst per eenheid toegevoerde elektrische energie (bij planten gaat het met name om de voor fotosynthese geschikte fotonenstroom per Watt, zie paragraaf 2.2) en de lichtopbrengst (i.c. fotonenstroom) per EUR investering.

#### *Aanpak*

Voor de beantwoording van de bovengenoemde vraagstelling, wordt aan de hand van een beknopte literatuurstudie en gesprekken met leveranciers van LEDs (en andere tuinbouwbelichtingssystemen) de stand van zaken van de LED-techniek in kaart gebracht en afgezet

tegen conventionele belichting. Ook wordt getracht een extrapolatie te maken naar de situatie in 2010 à 2015. Bij de beoordeling van de kansen voor LEDs in vergelijking met de momenteel gangbare belichtingssystemen wordt gekeken naar de 'total-cost-of-ownership', waarin de kapitaalkosten en de energiekosten de dominante componenten zijn.

### 1.3 **Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 zal eerst beknopt worden ingegaan op de fysische kenmerken van licht voor zover die van belang zijn voor de plantengroei en zullen enkele relevante lichttechnische begrippen worden gedefinieerd. In hoofdstuk 3 zal de stand van zaken van de LED-technologie en LED-ontwikkelingen worden beschreven, waarbij met name het toepassingsgebied glastuinbouw in het achterhoofd wordt gehouden. In hoofdstuk 4 worden de prestaties van LEDs afgezet tegen andere vormen van belichting in de glastuinbouw en wordt op basis van een 'total-cost-of-ownership-analyse' een inschatting gemaakt van het perspectief van LEDs als vervanger van hogedruk-natriumbelichting in de periode 2004 tot 2020. Tevens worden enkele potentieel interessante bijzonder toepassingsmogelijkheden van LEDs in de tuinbouw beschreven. Hoofdstuk 5 besluit met de conclusies en enkele aanbevelingen.

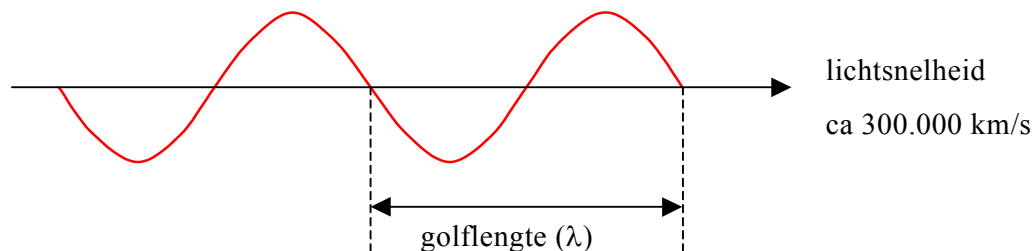
## 2 BELICHTING IN DE GLASTUINBOUW

### 2.1 Grondbeginselen licht

Licht is een vorm van elektromagnetische straling die door het menselijk oog kan worden waargenomen. Fysisch gezien maakt licht onderdeel uit van een veel breder spectrum van elektromagnetische straling, waartoe behalve zichtbaar licht onder meer ook ultraviolette straling (UV) en infrarode straling (IR) behoren. Licht (en trouwens ook andere elektromagnetische straling) heeft een duaal karakter. Enerzijds kan het worden voorgesteld als een golfverschijnsel, anderzijds als een stroom van lichtdeeltjes (ook wel ‘fotonen’ of ‘lichtkwanten’ genoemd).

#### 2.1.1 Licht als golfverschijnsel

Licht kan worden voorgesteld als een lopende golf die zich met de lichtsnelheid verplaatst (ca 300.000 km per seconde in vacuüm). Het belangrijkste kenmerk van zo’n golf is de golflengte (vaak aangegeven met de Griekse letter  $\lambda$ ).



Figuur 2.1 Licht als golfverschijnsel

De golflengte van licht wordt meestal uitgedrukt in nanometer, afgekort met “nm” ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Zichtbare straling heeft golflengten tussen 380 en 780 nm (DIN 5031, 1976). De golflengte bepaalt de kleur van het licht. Bij 380 nm begint de kleur violet. Naarmate de golflengte groter wordt, gaan de kleuren over in blauw (ca 420-450 nm), groen (ca 510-550 nm), geel (570-590 nm), oranje (ca 590-600 nm) en rood (eerst helderrood, 620-700 nm en later donkerrood (van circa 700 nm-780 nm)).

De onzichtbare straling in het golflengtegebied van 100-380 nm wordt ultraviolette straling genoemd (en kan op zich zelf weer worden onderverdeeld in UV-A (315-380 nm), UV-B (280-315 nm) en UV-C (100-280 nm)). Straling in het infrarode gebied begint vanaf 780 nm met IR-A en loopt tot 1400 nm. IR-B ligt in het gebied van 1400 – 3000 nm en IR-C in het gebied van 3000 nm tot ca 1.000.000 nm (= 1 mm). Straling in het IR-A en IR-B gebied wordt wel “nabij-infrarood” genoemd, die in het IR-C gebied “ver-infrarood”. Infrarode straling in het golflengtegebied van circa 780 tot 4000 nm wordt ook vaak aangeduid als “warmtestraling”.

### *Zonnestraling*

Zonnestraling die het aardoppervlak bereikt (direct en 'diffuus'), bevat behalve zichtbaar licht (ca 43-60%) ook een klein deel ultraviolet licht (ca 5 à 10%, in het UV-A en UV-B-gebied) en infrarode warmtestraling (30-49%). De exacte verdeling hangt sterk af van ondermeer de hoogte van de zon (elevatie) en de bewolgingsgraad. Het golflengtegebied van de zonnestraling die de aarde bereikt ligt tussen circa 280 nm en 3000 nm. Deze zonnestraling wordt ook wel "globale kortgolvlige straling" genoemd of kortweg "globale straling". Ze kan (voor het grootste deel) worden gemeten met een *solari-meter* (bandbreedte 305-2800 nm) en wordt uitgedrukt in Watt per m<sup>2</sup>. Voor het bepalen/verklaren van het effect van zonnestraling op de plantengroei is kennis van alleen de globale straling onvoldoende. Hieronder worden nog enkele andere "lichttechnische" (intensiteits)maten gedefinieerd, die men bij belichting vaak tegenkomt (en die meer of minder rechtstreeks van belang zijn voor de mate van fotosynthese).

## 2.2 Licht als "deeltjes verschijnsel"

Voor de verklaring van de wisselwerking tussen straling en materie (zoals een blad) is de beschrijving van licht als golfverschijnsel onvoldoende. Hiervoor is beschrijvingswijze van straling als een *stroom van lichtdeeltjes (fotonen)*, die elk een bepaalde hoeveelheid energie bevatten, beter geschikt. De energie van een foton (licht-kwantum) is omgekeerd evenredig met de golflengte. Dit betekent dat naarmate de golflengte kleiner wordt, de energieinhoud van een lichtdeeltje groter wordt. Een violet-foton heeft derhalve een grotere energieinhoud dan een rood-foton<sup>1</sup>. De grootte van een lichtstroom beschouwd als fotonenstroom kan worden uitgedrukt als het aantal fotonen per seconde. Als hoeveelsmaat hiervoor wordt het uit de scheikunde afkomstige begrip "mol" gebruikt. Eén mol van een stof (en in dit geval van licht) bevat een vaste hoeveelheid deeltjes, die door Avogadro is bepaald op  $6,023 \times 10^{23}$  ('getal van Avogadro'). In de praktijk is een meer praktische maat de micromol ( $\mu\text{mol} = 1$  miljoenste mol). Een lichtstroom van bijvoorbeeld  $100 \mu\text{mol/s}$  van rode fotonen met een golflengte van 700 nm correspondeert met een energiestroom van 17,1 W. Een lichtstroom van  $100 \mu\text{mol/s}$  violette fotonen van 400 nm bevat 29,9 W. Hieruit blijkt dat violette fotonen circa 1.75x meer energie bevatten dan rode fotonen. Zoals in de volgende alinea nog wordt toegelicht, hebben rode fotonen bij de fotosynthese evenveel effect als violette fotonen. Het teveel aan energie van de violette fotonen gaat als warmte verloren.

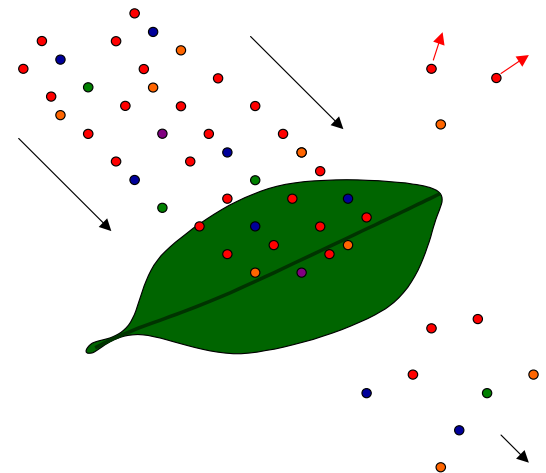
---

<sup>1</sup> De energie-inhoud van een foton kan worden beschreven door de formule  $E = h c / \lambda$ , waarin  $h$  = constante van Planck ( $6.6255 \times 10^{-34}$  J.s),  $c$  = lichtsnelheid ( $2.998 \times 10^8$  m/s) en  $\lambda$  is de golflengte (in m).

### Verband tussen fotonen en fotosynthese

Tijdens de fotosynthese in een blad wordt water en CO<sub>2</sub> onder invloed van licht omgezet in glucose en zuurstof (O<sub>2</sub>). Een belangrijke rol bij dit assimilatieproces spelen de bladgroenkorrels in het blad. Hierin bevinden zich pigmenten (kleurstoffen) zoals chlorofyl (a en b) en caratenoïden die door fotonen geactiveerd ('aangeslagen') kunnen worden [2]. De ingevangen lichtenergie wordt omgezet in chemische energie, die gedeeltelijk in het fotosyntheseprocess in 2 fasen met behulp van enzymen wordt vastgelegd in glucose (een soort suiker). Deze kan voor de ademhaling van de plant worden gebruikt, maar ook worden gebruikt als basisproduct voor meer ingewikkelde verbindingen, zoals eiwitten, vetten, zetmeel, DNA en celwandbestanddelen.

Ingevangen lichtenergie die niet wordt benut in de pigmenten, komt vrij als warmte of als straling (de uitgezonden straling heeft een langere golflengte dan die van het oorspronkelijk geabsorbeerde licht, meestal verrood of infrarood: dit verschijnsel heet fluorescentie).



Figuur 2.2 Schematische voorstelling van licht als deeltjesstroom. Het blad zal het grootste deel van de fotonen absorberen. Een deel zal worden doorgelaten en een deel worden gereflecteerd. Geabsorbeerde lichtenergie die niet wordt benut kan vrijkomen als warmte of straling (fluorescentie, rode pijltjes)

Wat het licht betreft is vooral het aantal fotonen (per tijds- en oppervlakte-eenheid, uitgedrukt in  $\mu\text{mol/s.m}^2$ ) in het fotoactieve golflengtegebied van 400-700 nm bepalend voor de mate van fotosynthese. De kleur van het licht is daarbij van ondergeschikt belang. Alhoewel het chlorofyl in de bladgroenkorrels het meeste oranje-rood en blauw/violet licht absorberen, zijn er andere pigmenten in de bladgroenkorrels die gevoeliger zijn voor geel/groen licht. Deze - en ook het chlorofyl b - kunnen de ingevangen lichtenergie 'doorgeven' aan chlorofyl a, dat direct bij de lichtreactie is betrokken (bij de lichtreactie wordt waterstof van watermoleculen afgesplitst onder de vorming van zuurstof).

### Invloed kleur

Volgens plantfysiologen is de kleur van het licht (en dan nog vooral de kleurverhouding) eigenlijk alleen van belang voor de lengtegroei van de plant en de kleurintensiteit van bloemen en planten [3]. De spectrale lichtverdeling bepaalt zowel de assimilatenverdeling als de

plantvorm. De planten worden langer naarmate het aandeel blauw in het groeilicht afneemt. Bij een afnemende rood/verrood verhouding is er ook een toename van de strekkingsgroei [4]. Ter vermijding van een overmatige strekkingsgroei is een aandeel van (daggemiddeld) minimaal circa 11 % (in fotonen) van blauw licht gewenst [7]. Bij gebruikmaking van HD-natrium lampen als bijbelichting in kassen, treedt in het algemeen geen overmatige strekkingsgroei op, omdat het zonlicht dat de kas binnenkomt, al voldoende blauw licht bevat ("SON-T"-lampen van Philips bevatten zelf circa 6% blauw licht). Pas bij zeer substantiële dagverlenging van bijvoorbeeld 10 uur of meer zouden gevoelige gewassen, zonder additioneel blauw licht, een bovenmatige strekkingsgroei kunnen gaan vertonen.

### 2.3 **Assimilatiebelichting**

In paragraaf 2.2 is het belang van licht voor de plant al aan de orde geweest. In de wintermaanden kunnen in Nederland veel gewassen vanwege de lage intensiteit van het zonlicht en de korte daglengte alleen met behulp van assimilatiebelichting op een rendabele wijze worden geteeld. In het taalgebruik over belichtingssystemen en bij de dimensionering daarvan worden vaak verschillende termen en 'lictheenheden' gebruikt. Voor de duidelijkheid zullen de belangrijkste termen en definities hieronder kort worden behandeld.

**Lichtbron:** een apparaat dat zichtbare straling uitzendt tussen 380 en 780 nm (en daarnaast vaak ook nog niet-zichtbare straling in het infrarode gebied).

**Groeilicht:** licht dat bedoeld is om de groei van de planten te verbeteren. Hierbij gaat het met name om licht dat de fotosynthese stimuleert. Het is gangbaar hiervoor het spectrale gebied van 400-700 nm te nemen (het licht in dit gebied wordt ook wel PAR-licht genoemd; PAR = photosynthetically active radiation). Het gebied tussen 700 en 730 nm speelt waarschijnlijk ook een rol bij de fotosynthese, maar omdat die invloed nog niet goed bekend is wordt dat gebied meestal niet meegenomen [8].

**Stuurlicht:** licht dat bedoeld is om de ontwikkeling van de plant in een bepaalde richting te sturen. Bij sturen is vaak een groter deel van het stralingspectrum betrokken (ca 280-800 nm)

*Lichtmaten/lichteenheden voor de fotosynthese*

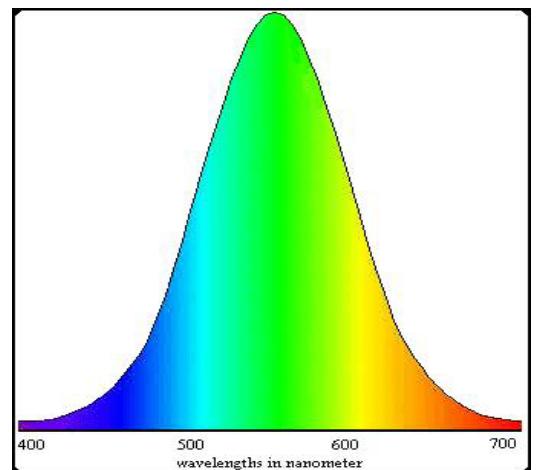
**PPFD:** de in de vorige paragraaf genoemde fotonenstroom (aantal fotonen per oppervlakte en tijdseenheid) in het foto-actieve gebied van 400-700 nm wordt ook wel de photosynthetic-photon-flux-density (PPFD) genoemd en wordt uitgedrukt in  $(\mu\text{mol/s})/\text{m}^2$ . Bij (assimilatie)belichting van gewassen is met name deze grootte van belang.

**PPF:** fotonenstroom in het foto-actieve gebied van 400-700 nm (aantal fotonen per tijdseenheid) wordt ook wel de *photosynthetic-photon-flux* (PPF) genoemd  $(\mu\text{mol/s})$ . Wordt er gedeeld door het oppervlak waarop de stroom valt dan krijgt men de (gemiddelde) PPFD.

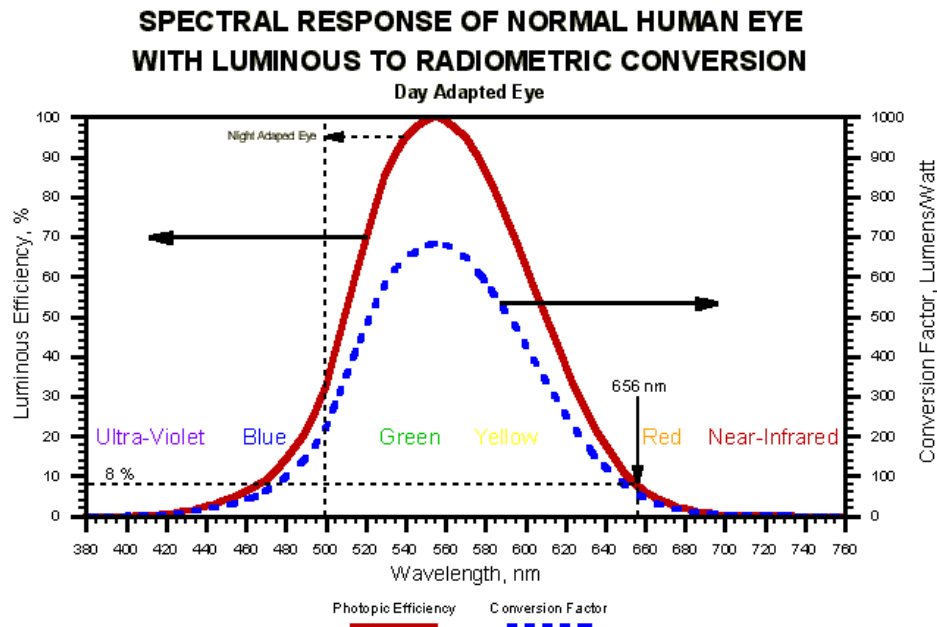
**Watt:** eenheid van stralingsstroom. Geeft de energieinhoud van de straling weer. Meestal wordt de stralingsdichtheid gebruikt, uitgedrukt in Watt per  $\text{m}^2$ , afgekort  $\text{W}/\text{m}^2$ . Om deze maat betekenis te geven, moet het golflengtegebied worden opgegeven. Voor de zogenaamde 'globale straling' wordt vaak het golflengtegebied van 280-3000 nm gebruikt.

**Watt<sub>PAR</sub>:** eenheid van stralingsstroom met golflengten liggend tussen 400-700 nm. Dit is de straling die actief is bij de fotosynthese.

**Lumen:** eenheid van lichtstroom. Hierbij gaat het om de lichtsensatie volgens de menselijke ooggevoeligheidscurve (zie figuur 2.3). Het menselijk oog is het meest gevoelig voor groen licht (van circa 555 nm). Naarmate de golflengte groter of kleiner wordt daalt de gevoeligheid (volgens de klokvormige kromme). In de bepaling van de hoeveelheid lumen die een lichtstroom bevat, telt bijvoorbeeld lichtblauw licht van 500 nm maar circa 1/3 maal zo zwaar als groen licht van 555 nm (zie rode curve van figuur 2.4). Eén Watt licht van 555 nm bevat 682 lumen, één Watt van 500 nm nog maar circa 221 lumen (zie onderbroken blauwe curve van figuur 2.4).



Figuur 2.3 ooggevoeligheidskromme



Figuur 2.4 Menselijke ooggevoeligheidskromme (rood) en conversiefactor lumen/W als functie van golflengte (onderbroken blauwe curve)

**Lux:** eenheid van verlichtingssterkte = lichtstroom per oppervlakte-eenheid (1 lux = 1 lumen per m<sup>2</sup>). Deze maat is bedoeld om de aan te geven hoeveel licht er op een oppervlak valt, gewogen volgens de ooggevoeligheidscurve. Eigenlijk heeft deze maat alleen maar zin voor toepassingen waarin de mens betrokken is (bijvoorbeeld bij werkplekverlichting, straatverlichting en dergelijke). Toch wordt ze (ongelukkigigwijs) ook vaak gebruikt om de intensiteit van de assimilatiebelichting in uit te drukken. Zoals hiervoor aangegeven is de plantgevoeligheid anders dan die van het menselijk oog en is de PPF een betere maat hiervoor. Hieronder is voor een aantal lamptypen aangegeven met hoeveel (μmol/s)/m<sup>2</sup> 1000 lux overeenkomt [8]:

daglicht (gemiddeld):	1000 lux = 17.86 (μmol/s)/m <sup>2</sup>
gloeilamp:	1000 lux = 20.41 (μmol/s)/m <sup>2</sup>
TL 33 (Philips):	1000 lux = 12.82 (μmol/s)/m <sup>2</sup>
SON-T plus (400W):	1000 lux = 11.76 (μmol/s)/m <sup>2</sup> (hoge-druk natrium)

**Lamp-efficiëntie:** het rendement van een lamp kan op twee manieren worden gedefinieerd. Als het gaat om licht voor verlichting (voor menselijke toepassingen) dan is een goede maat



de hoeveelheid licht (in lumen) die wordt uitgezonden per toegevoerde Watt elektrische energie (lumen/W<sub>e</sub>).

Als het gaat om assimilatiebelichting, dan is een betere rendementsmaat het aantal micromol fotonen per seconde (tussen 400 en 700 nm) dat per Watt elektrische energie wordt uitgezonden (( $\mu\text{mol/s}$ )/W<sub>e</sub>). In hoofdstuk 3 zullen we deze rendementsmaat, die we het (*PAR*-) *fotonrendement* noemen, hanteren bij de beschrijving van de prestaties van LEDs afgezet tegen die van enkele andere, conventionele lichtbronnen voor assimilatiebelichting.

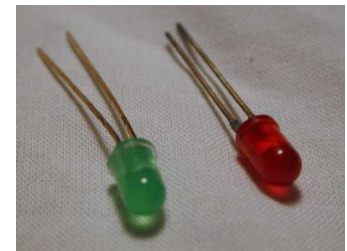
**Lichtsom:** dit is de lichtintensiteit vermenigvuldigd met de tijdsduur dat die optreedt. Vaak wordt de lightsom over een dag bepaald. Afhankelijk van welke 'type licht' er gemeten wordt, zijn er verschillende eenheden in gebruik:

- luxmeter:            lightsom uitgedrukt in klux.uur/dag (ook wel afgekort als klxh/d)
- solarimeter:        meet globale straling in W/m<sup>2</sup> tussen 305 en 2800 nm. De lightsom wordt vaak uitgedrukt in J/cm<sup>2</sup> per dag (1 W = 1 J/s). Een alternatieve maat is Wh/m<sup>2</sup> per dag (1 Wh/m<sup>2</sup> = 0.36 J/cm<sup>2</sup>)
- groeilichtmeter: meet òf de straling in W/m<sup>2</sup> in het PAR-gebied tussen 400 - 700 nm (de lightsom wordt dan uitgedrukt in J<sub>PAR</sub>/cm<sup>2</sup> per dag of in Wh<sub>PAR</sub>/m<sup>2</sup> per dag), òf meet de fotonenstroom in het PAR-gebied (de lightsom wordt dan meestal uitgedrukt in mol/m<sup>2</sup> per dag; deze hoeveelheidsgrootheid wordt wel **PAP** genoemd: photosynthetically active photons; 1 mol = 1,000.000  $\mu\text{mol}$ )

### 3 STAND VAN ZAKEN LED-TECHNOLOGIE

#### 3.1 Wat zijn LEDs?

Een Light Emitting Diode (LED) is een vaste-stof halfgeleider component, die elektrische energie direct omzet in licht. Iedereen kent LEDs wel als de groene of rode signaallampjes in elektronische apparatuur of als de numerieke displays op consumentenelektronica. LEDs kunnen sinds het eind van de jaren zestig als massaproduct worden gefabriceerd. De lage lichtopbrengst en het gebrek aan andere kleuren beperkte het gebruik in het verleden tot deze functies.



Figuur 3.1 Groene en rode signaal LED



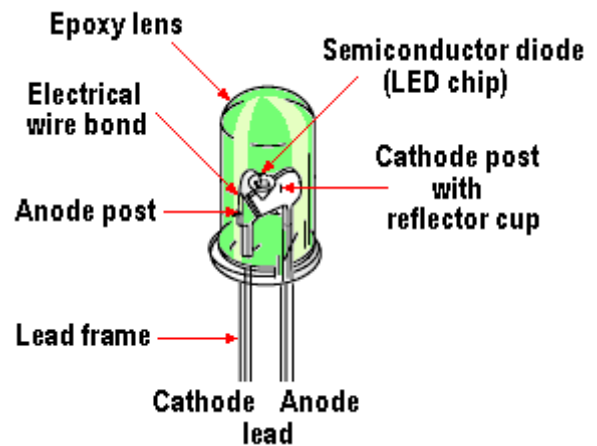
Figuur 3.2 alpha-numeriek display op basis van LEDs

Recentelijk zijn er echter nieuwe LED-materialen en verbeterde productieprocessen ontwikkeld, die hebben geresulteerd in heldere LEDs in kleuren verdeeld over het hele zichtbare spectrum, met rendementen groter dan die van gloeilampen. Belangrijk daarbij was de ontwikkeling van een blauwe LED in de jaren negentig. De helder blauwe LEDs vormen het uitgangspunt voor de ontwikkeling van witte LEDs (zie paragraaf 3.3.3).

#### 3.2 Hoe werken LEDs?

Zoals reeds in de vorige paragraaf aangegeven, zijn LEDs vaste-stof halfgeleider componenten, die elektrische energie direct omzetten in licht. De fysische processen hierachter zijn zeer complex en zullen hier slechts summier worden behandeld. In grote lijnen komt het er op neer dat het halfgeleidermateriaal is opgebouwd uit twee gebieden een zogenaamd "p-gebied" en een zogenaamd "n-gebied". Het p-gebied bevat een overschot aan positieve ladingdragers ("gaten") en het n-gebied aan negatieve ladingdragers ("elektronen"). Als er een spanning over de p-n-overgang wordt aangebracht (met de juiste polariteit), dan gaat er een stroom lopen. De elektronen bewegen dan dwars door het n-gebied naar het p-gebied. Als ze de overgang passeren, gaat dit gepaard met de emissie van licht. De golflengte van het licht hangt af van het halfgeleidermateriaal van de LED-chip. Veel gebruikt is GaAs (gallium arsenide) en GaP (gallium phosphide). Vaak worden er ook nog één of meerdere andere stoffen ('dopes') 'toegevoegd', zoals aluminium (Al), Indium (In), stikstof (N) of lood (Sb). De keuze van materialen en materiaalbehandeling is een vak apart en vormt het geheim van een goede LED.

In figuur 3.3 is een schematische tekening gegeven van de opbouw van een (klassieke) LED. Het licht dat door de LED-chip wordt uitgezonden, wordt door de reflector zo goed mogelijk richting de epoxy lens gedirigeerd en zal daar (grotendeels) uittreden. Een klein gedeelte zal door de zijkanten van het huis uittreden en het resterende deel wordt in de ondoorzichtige delen van de LED zelf geabsorbeerd. De positie en de sterkte van de lens bepaald onder welke (ruimte)hoek de lichtbundel uit treedt.



Figuur 3.3 opbouw van een LED

LEDs zijn diodes, dat wil zeggen dat ze de elektrische stroom maar in één richting geleiden. Wordt de polariteit van de aangelegde spanning omgekeerd, dan zal de diode sperren (en geen licht meer uitzenden).

### 3.3 Typen LEDs

#### 3.3.1 Monochromatische LEDs

Individuele LEDs zenden bijna monochromatisch licht uit (dat wil zeggen licht van één bepaalde kleur), dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld gloeilampen, die een heel spectrum van licht uitzenden. De helft van het uitgezonden LED-licht valt binnen een golflengteband van 15 à 40 nm rond de primaire (piek) golflengte. Ter vergelijking: bij een gloeilamp is dat circa 1100 nm

#### 3.3.2 Kleuren

De bekendste (en oudste) kleuren bij LEDs zijn rood en groen. Later zijn er ook gele, blauwe, 'cyaan' en rood-oranje LEDs op de markt gekomen.

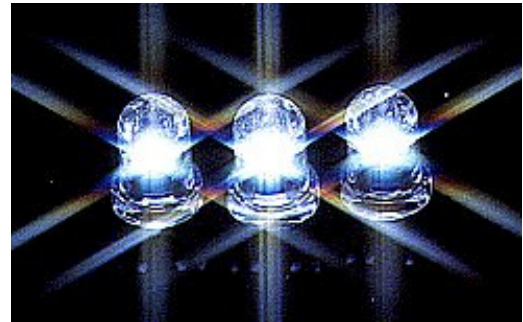
#### 3.3.3 Witte LEDs

Er zijn geen LED's die direct wit licht produceren. Het creëren van wit licht kan op twee manieren:



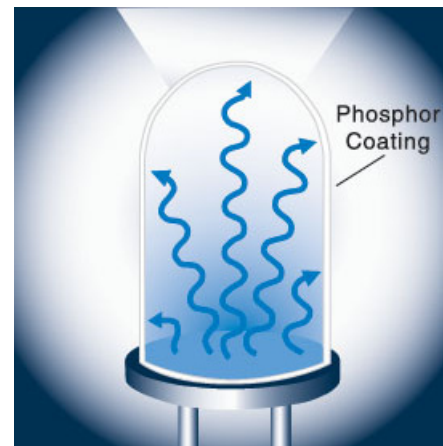
Figuur 3.4 LEDs van verschillende kleuren en witte LED

1. door het bij elkaar voegen van gelijke intensiteiten licht van de primaire (additieve) kleuren rood, groen en blauw (RGB) wordt de sensatie van wit licht verkregen. Het is echter geen sinecure om rode, groene en blauwe LEDs in één opto-elektronisch ontwerp te combineren dat voldoende regelbaar is om de juiste menging en diffusie van kleuren te verkrijgen. Wel kunnen natuurlijk aparte, dicht naast elkaar geplaatste RGB-LEDs worden gebruikt om (op enige afstand van de emitters) wit licht te creëren.



Figuur 3.5 witte LEDs

2. door middel van een tussenstap van (relatief) hoog-energetisch licht in het blauwe of zelfs UV-deel van het spectrum. Dit licht valt (gedeeltelijk of geheel) op bepaalde fosforverbindingen die in de LED zijn aangebracht, waardoor elektronen worden 'aangeslagen' naar een hogere energetische toestand. Na korte tijd vallen deze elektronen terug naar een baan met een lagere energie-inhoud onder uitzending van licht van (meestal) een andere golflengte. De kunst is zodanige fosforverbindingen te vinden en op zodanige wijze aan te brengen, dat zo goed mogelijk wit licht wordt verkregen.



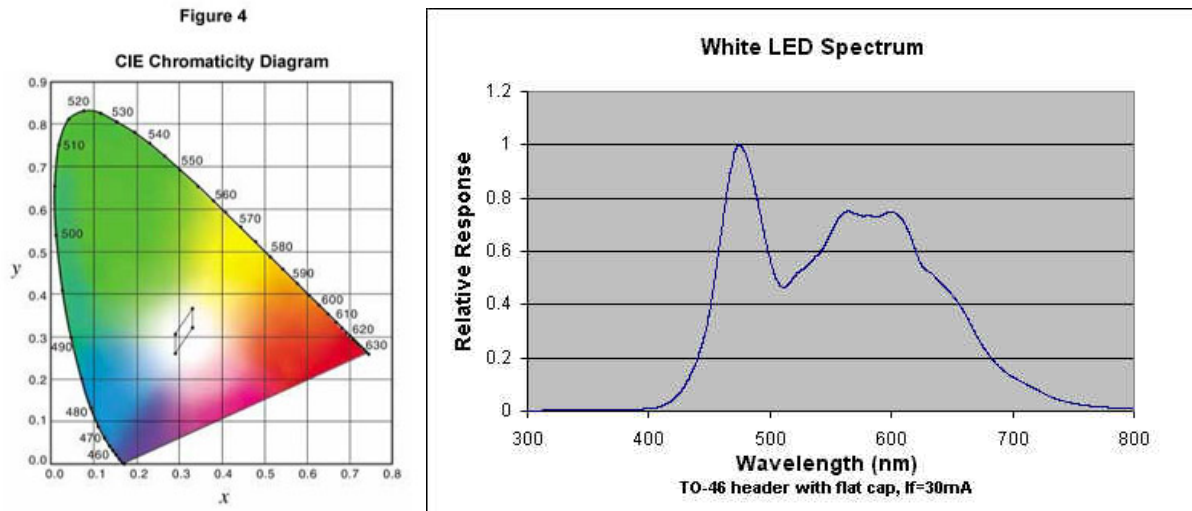
Figuur 3.6 werking witte LEDs met fosfor coating

#### *Witte LEDs op basis van blauwe LEDs*

Bij witte LEDs op basis van blauwe (vaak Gallium Nitride) LEDs valt een deel van het (primaire) licht op een fosforcoating (zie figuur 3.6), die na te zijn aangeslagen zelf weer (secundair) licht uitzendt met een relatief breed spectrum (maar met langere golflengten als het primaire licht). Dit secundaire licht mengt zich met het blauwe licht tot wit-achtig licht, althans voor het menselijk oog. Wordt er spectroscopisch naar gekeken (zie figuur 3.8 voor een voorbeeld), dan blijkt dat het niet (zoals bijvoorbeeld zonlicht) alle kleuren in min of meer gelijke mate te bevatten, maar zal er veelal een blauw-achtige 'zweem') ervaren worden (zoals bij kwikdamp straatlampen). Het witte LED-licht mag dus ook niet zonder meer met zonlicht worden gelijkgesteld. Afhankelijk van de toepassing is dit meer of minder een probleem.



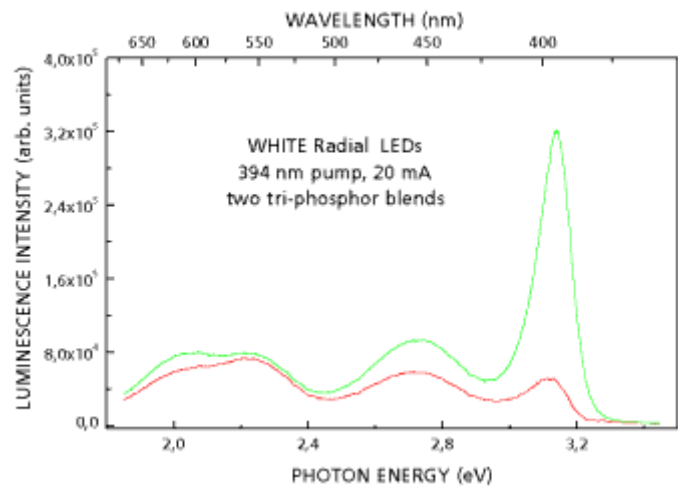
Figuur 3.7 De blauwe LED is de basis voor witte LEDs



Figuur 3.8 Als blauw licht en geel wordt gecombineerd dan ontstaan wit-achtig licht (zie linker CIE-diagram). Het spectrum is echter niet egaal zoals bij zonlicht, maar bevat onder andere minder groen licht.

### Witte LEDs op basis van UV-LEDs

Er zijn ook witte LEDs die primair een UV-LED (<400 nm) gebruiken voor het ‘exciteren’ van een driekleuren fosformengsel tegen de binnenkant van de behuizing. Het ultraviolette licht brengt de fosforen in een aangeslagen toestand. Dit is een instabiele toestand, die weer kan worden verlaten onder uitzending van straling (licht) van een grotere golflengte dan de oorspronkelijke. De fosforen worden zodanig gekozen dat het secundaire licht dat ze uitzenden, gecombineerd zo goed mogelijk wit licht oplevert. Dit systeem is het ‘vaste-stof’ analogon van een fluorescentie (TL) lamp en heeft voordelen met betrekking tot de witheid van het licht en de weergave van kleuren bij verlichting ermee. In figuur 3.9 is het spectrum van zo’n ‘tri-phosphor-LED’ aangegeven. De groene curve representeert het primaire (inwendig blijvende) UV-licht en de rode het uittredende secundaire witte licht.



Figuur 3.9 Spectrum van witte LED (rode curve) op basis van UV-excitatie van een 3-kleuren fosforcoating (groene lijn)

### 3.3.4 Belang van LED-kleur voor tuinbouwtoepassingen

Het beschikbaar komen van witte LEDs is meer van belang voor verlichtingssituaties (werkplekverlichting en dergelijke) dan voor plantbelichting. Als naar tuinbouwtoepassingen gekeken wordt, dan gaat het bij *assimilatiebelichting* met name om het aantal fotonen per tijds- en oppervlakte-eenheid in het 'foto-actieve' golflengtegebied van 400 tot 700 nm. Zoals in paragraaf 2.2 aangegeven, wordt dit ook wel '*photosynthetic photon-flux-density*' genoemd, afgekort als PPF. De kleur van de fotonen is nauwelijks van belang voor de fotosynthese. Voor assimilatiebelichting kunnen dus in principe<sup>\*)</sup> 'monochromatische' LEDs worden genomen, bij voorkeur rode. Rode fotonen hebben de laagste energie-inhoud maar toch dezelfde effectiviteit bij de fotosynthese als andere fotonen in het PAR-gebied (zie paragraaf 2.2). Per Watt toegevoerde energie zullen (bij een bepaald zogenaamd stralingsrendement van de LED, zie paragraaf 3.4) meer rode fotonen worden gegenereerd dan fotonen van kleuren met een kortere golflengte. Om ongewenste strekkingsgroei te voorkomen kan aan het rode licht met behulp van blauwe LEDs een bepaalde hoeveelheid blauw licht worden toegevoegd (afhankelijk van de mate van belichting en de hoeveelheid blauw licht die al wordt ontvangen via daglichttoetreding, zie laatste alinea van paragraaf 2.3).

Verder kunnen voor bepaalde stuurlichttoepassingen (bijvoorbeeld bladkleurbeïnvloeding bij bepaalde sierplanten) LEDs met specifieke kleuren worden gebruikt, die voor het betreffende doel het meest geschikt zijn [8].

### 3.3.5 super-bright LEDs

'Super-bright LEDs' (of 'high power LEDs') zijn LEDs die een hoge lichtopbrengst hebben in vergelijking met de klassieke (5 mm) LEDs. Door toepassing van speciale halfgeleidermaterialen gecombineerd met een geschikt gekozen geometrie en lens hebben de ontwikkelaars geprobeerd om zoveel mogelijk licht op te wekken en uit te koppelen. De beste, op dit moment commercieel verkrijgbare LEDs kunnen circa 120 lumen per LED uitzenden. In het laboratorium zijn al LEDs met een circa 60% grotere lumenstroom gerealiseerd [9]. Figuur 3.10 toont een voorbeeld van een super-bright rode LED (Lumileds Luxeon Emitter). Bij toepassingen van LEDs in de glastuinbouw zal het gezien de lichtbehoefte altijd gaan om super-bright LEDs. Behalve de lichtstroom per LED is voor een goede lichtbron uit energetisch oogpunt vooral ook het lichtrendement van belang. Daarbij gaat het om de lumenstroom per Watt toegevoerde elektrische energie. Op de efficiëntie van LEDs zal in paragraaf 3.4 worden ingegaan.

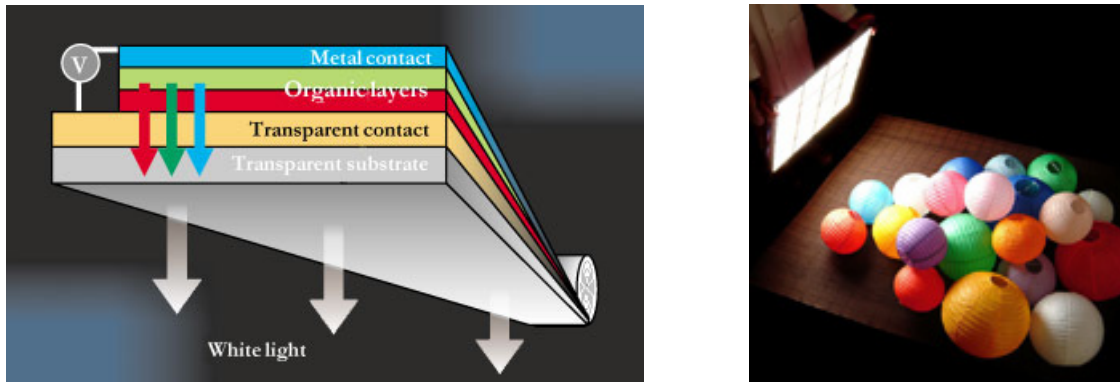


Figuur 3.10 Voorbeeld van een super-bright rode LED (Lumileds Luxeon Emitter)

<sup>\*)</sup> Als in een belichte kas gewerkt moet worden (zonder daglichttoetreding van buiten) dan is monochromatische belichting uit het perspectief van ARBO-omstandigheden ongewenst.

### 3.3.6 Organische LEDs (OLEDs)

De besproken LEDs in de paragrafen hiervoor waren allen gebaseerd op anorganische halfgeleiders. Sinds 1990 zijn er ook “light emitting devices” ontwikkeld met organische halfgeleiders. Men spreekt in dit geval van *OLEDs*. Figuur 3.11 geeft een schematische tekening van de opbouw van een OLED. Een OLED bestaat uit één of meer lagen organisch materiaal ingesloten tussen twee metalen contacten. Minstens één van deze contacten moet transparant zijn om uittrede van het licht mogelijk te maken. Met een geschikte mix van moleculen in de organische lagen kunnen OLEDs wit licht uitzenden.



Figuur 3.11 Schematische opbouw van een OLED [6] en voorbeeld van een OLED paneel (bron General Electric)

De fysica achter de werking van een OLED is vrij gecompliceerd en gaat te ver voor het doel van dit rapport (zie hiervoor bijvoorbeeld [6]). De werking van een OLED is in grote lijnen analoog aan die van een LED (zie paragraaf 3.2). De organische lagen hebben echter geen vrije ladingdragers. De ladingen die tijdens het bedrijf door de OLED stromen, worden in de organische lagen geïnjecteerd vanuit de electrodecontacten. Een electron injecterend contact (“cathode” genoemd) is vergelijkbaar met de n-laag van een gewone LED. Een ‘gat’ injecterend contact (“anode”) komt overeen met de p-laag. De electronen en gaten die in de organische laag geïnjecteerd zijn, driften onder invloed van het aangelegde elektrische veld naar de tegengesteld geladen contacten. Vanwege de slechte geleidbaarheid moet het organische laagje heel dun zijn (ordegrootte 100 nm), anders is geen laag-voltage bedrijf mogelijk. De bewegende electronen en gaten kunnen de organische moleculen in een ‘aangeslagen toestand’ brengen. Deze toestand is instabiel en onder het uitzenden van een foton kunnen de moleculen weer terugvallen in de grondtoestand. Bij geschikt gekozen materialen hebben de fotonen een energie-inhoud die correspondeert met die van zichtbaar licht. Als daarbij een transparant contact worden toegepast, is aldus een lichtbron ontstaan.

OLEDs lenen zich beter dan LEDs voor goedkope grootschalige productie, waardoor het gemakkelijker zal zijn om een bepaalde kostprijs te halen. Wel is op dit moment het omzet-

tingsrendement nog wat lager en de levensduur korter dan die van LEDs. Op deze gebieden is nog aanvullend onderzoek en ontwikkeling nodig. Behalve de naar verwachting goedkopere productie hebben OLEDs het (potentiële) voordeel dat door een combinatie van geschikte moleculen in één OLED een mix van kleuren kan worden gegenereerd resulterend in wit licht. Ze kunnen worden verwerkt in flexibele verlichtingssystemen en lenen zich in het bijzonder voor toepassing als oppervlaktelichtbron (zoals fluorescentielampen). In de toekomst kunnen ze mogelijk worden gebruikt als flexibele wand- of plafondverlichtingssystemen. In het laboratorium is reeds een papierdunne OLED van 61x 61 cm geproduceerd met totale lichtstroom van 1200 lumen en een efficiëntie van 15 lumen/Watt (figuur 3.11 rechts, [16]). Ter vergelijking: een gloeilamp van 75 W zend circa 1000 lumen uit ( $\approx 13,3$  lumen/W).

### 3.4 Optische kenmerken

#### 3.4.1 LED-efficiëntie / rendement

Voor verlichtingstoepassingen is een goede maat voor de efficiëntie van een lamp de hoeveelheid licht die de lamp per tijdseenheid uitstoot per toegevoerde Watt elektrische energie (eenheid lumen/W<sub>e</sub>, soms ook kortweg aangegeven met lm/W). We zullen deze verhouding aanduiden als het *lichtrendement* van de lamp (ook wel specifieke lichtstroom en in het engels de '(electrical) luminous efficiency' genoemd). Het lichtrendement hangt af van de efficiëntie van de verschillende deelprocessen die zich in de LED afspelen (elk gekenmerkt door een deelrendement):

- *intern quantumrendement* (= verhouding van het aantal fotonen dat in de LED-chip wordt geproduceerd en het aantal electronen dat de p-n-overgang passeert (bepaald door de elektrische LED-stroom)). Dit rendement heeft vooral te maken met de materiaalkeuze
- *extractierendement* (= verhouding van het aantal fotonen dat naar buiten wordt uitgekoppeld en het aantal dat intern wordt gegenereerd). Dit deelrendement wordt vooral bepaald door de chipgeometrie en de optiek van de LED
- *elektrisch rendement* (verhouding van de fotonenergie en de elektrische energie van een electron (= LED-spanning x lading van het electron)). Dit rendement heeft vooral te maken met de eigenschappen van het materiaal van de LED-chip).

De bovengenoemde deelrendementen kunnen voor de verschillende kleuren LEDs sterk verschillende waarden hebben. Het interne quantumrendement van rode LEDs is circa 90% [10, 11]. Voor groen/gele LEDs is dat maar circa 15%. Het extractierendement is voor state-of-the-art LEDs circa 50 à 60%. Het elektrisch rendement is over de hele linie relatief hoog (>80%).



Figuur 3.12 Het lichtrendement is gedefinieerd als de lichtstroom per Watt elektrische energie (lumen/W<sub>e</sub>)



In tabel 3.1 zijn (in de tweede kolom) voor verschillende kleuren LEDs de lichtrendementen van momenteel commercieel verkrijgbare, hoog-vermogen (anorganische) LEDs gegeven (type Luxeon Emitter van Lumileds [12, 17]). De derde kolom geeft de rendementen die bij demonstraties in het laboratorium zijn gehaald, en die naar verwachting binnen afzienbare tijd ook commercieel leverbaar zullen worden.

Een andere efficiëntiemaat die een goed inzicht geeft welk percentage van de toegevoerde elektrische energie in bruikbare straling wordt omgezet, is het *stralingsrendement* (= verhouding van het uitgezonden optische vermogen en het toegevoerde elektrisch vermogen). Omdat de LEDs die hier behandeld worden, allen hun licht in het PAR-golflengtegebied uitzenden, is dit stralingsrendement gelijk aan het zogenaamde PAR-rendement (zie kolommen 4 en 5 van tabel 3.1).

Overigens zijn voor verlichtingsdoeleinden naast het rendement natuurlijk ook andere kwaliteitsaspecten, zoals de kleur of de mate van witheid, ‘warm’ of ‘koud licht’ (kleurtemperatuur), van belang. Voor de tuinbouw spelen deze laatste aspecten minder, omdat het daar – bij assimilatiebelichting – vooral gaat om de fotonenstroom. Een goede efficiëntiemaat daarvoor is het zogenaamde *fotonrendement*, gedefinieerd als de fotonflux per Watt toegevoerde elektrische energie (( $\mu\text{mol/s}/W_e$ )). Dit rendement is in de laatste 2 kolommen gegeven.

Tabel 3.1 Rendementen van verschillende high-power LEDs. De kolom “commercieel” geeft de waarden voor anno 2003/2004 leverbare LEDs. De kolom “laboratorium” geeft waarden die in het laboratorium zijn gedemonstreerd. Voor verlichtingsdoeleinden is vooral het lichtrendement van belang. Voor assimilatiebelichting is het (PAR-)fotonrendement een betere maat. Voor de energieconversie-efficiëntie van elektriciteit in PAR-straling (percentage omgezette energie) is het PAR-rendement het meest geschikt.

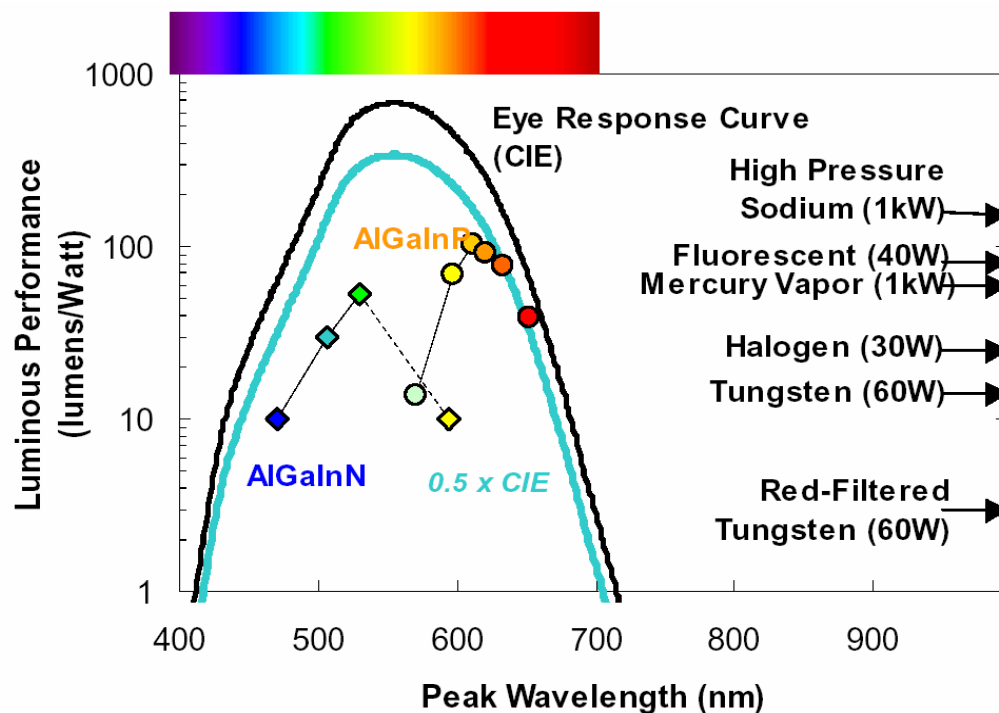
Kleur	lichtrendement		PAR-rendement		(PAR-)fotonrendement	
	commercieel	laboratorium	commercieel	laboratorium	commercieel	laboratorium
	lumen/ $W_e$ <sup>*)</sup>	Lumen/ $W_e$	( $W_{PAR}/W_e$ )*100%	( $W_{PAR}/W_e$ )*100%	( $\mu\text{mol/s}/W_e$ )	( $\mu\text{mol/s}/W_e$ )
Rood	43	82	21,0%	40,4%	1,10	2,12
Rood-oranje	53	92	18,7%	32,3%	0,96	1,67
Amber	35	100	6,7%	19,3%	0,33	0,95
Groen	25	50	4,3%	8,5%	0,19	0,38
Blauw	11	15	18%	24,1%	0,71	0,95
Wit	25	50	7,5%**	15%.	0,34	0,68
HD-Natrium (ref.) <sup>***)</sup>	146 - 149		33 - 38%		1,8 - 1,9	

<sup>\*)</sup> uitgaande van LEDs van nominaal 1W bij een LED-stroom van 350 mA

<sup>\*\*)</sup> op basis van golflengte karakteristiek van Luxeon V LED

<sup>\*\*\*)</sup> ter referentie zijn de rendementen van HD-natrium lampen gegeven (SON-T), zie ook tabel 4.1 in hoofdstuk 4

Uit deze tabel volgt dat voor assimilatiebelichting in principe het beste gebruik gemaakt kan worden van rode LEDs, omdat hiermee de grootste fotonflux per  $W_e$  kan worden gecreëerd. Wel moet nog worden gekeken naar temperatuuereffecten (zie paragraaf 3.5). In hoofdstuk 4 zal een vergelijking worden gemaakt van LEDs met andere lichtbronnen die in de tuinbouw worden toegepast. Figuur 3.13 geeft wel alvast een beeld van de status van (laboratorium) LEDs – wat betreft lichtrendement - afgezet tegen dat van verschillende conventionele lichtbronnen. Ter referentie is ook de ooggevoeligheidscurve en 0.5x die curve gegeven. Uit de figuur blijkt dat LEDs (in het bijzonder rode en oranje-rode LEDs) qua lichtrendement gloeilampen en halogeen lampen voorbij zijn gestreefd en ongeveer op het niveau van fluorescentielampen zitten.



Figuur 3.13 Lichtrendement (in lumen/Watt) van beste (laboratorium) LEDs versus dat van andere lichtbronnen. Ter referentie is ook de CIE-ooggevoeligheidscurve gegeven (en 0.5 maal die curve). Status 2001. Bron: Lumileds (Legenda: tungsten: gloeilamp met wolfram gloeidraad; high-pressure sodium: hoge-druk natrium; fluorescent: fluorescentie lamp (TL); mercury vapor: kwikdamp gasontladingslamp).

Opmerkingen:

- Hoog vermogen anorganische LEDs zijn tegenwoordig beschikbaar met kleuren in nagenoeg het hele zichtbare spectrum. De AlInGaP gebaseerde systemen produceren rood, rood-oranje en amber (geelbruin) licht, terwijl de AlInGaN systemen groen, cyaan en blauw (en nabij-UV) licht genereren.

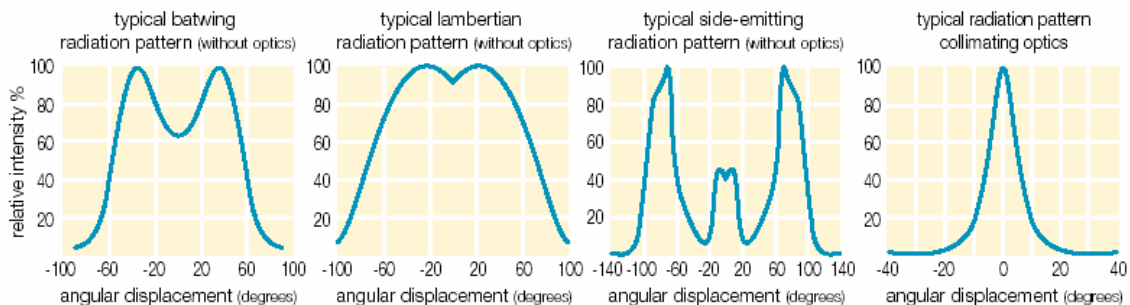
- Het lichtrendement stijgt naarmate de stroom door de LED kleiner wordt. De totale lichtoutput van de LED daalt dan echter. In de praktijk zal een optimum worden gezocht tussen lichtoutput en lichtrendement.

### 3.4.2 Emissiehoek ('viewing angle')

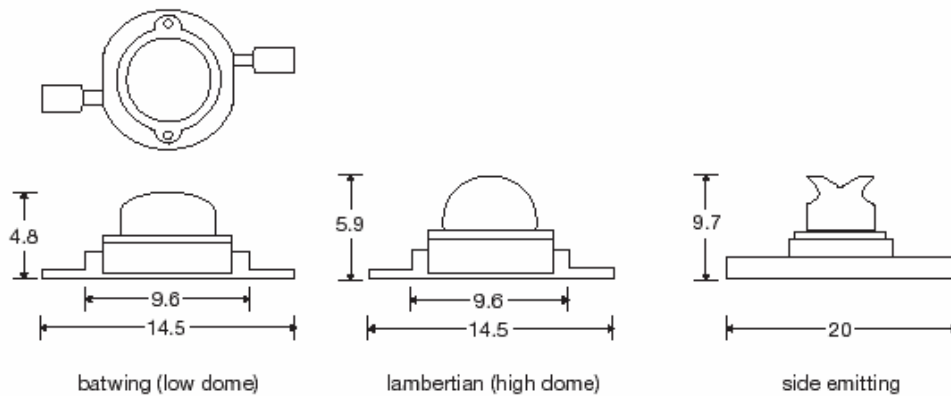
Een LED zendt licht uit in verschillende richtingen. De lichtsterkte in een bepaalde hoek (t.o.v. de lijn loodrecht door het centrum van de lens) is afhankelijk van de geometrie van de LED en de lens in de behuizing. Er zijn een aantal stralingspatronen – en daarmee typen LEDs - te onderscheiden (zie figuur 3.14 en 3.15):

- 'batwing' ('vleermuisvleugel'; piekintensiteit ligt bij circa 40°; geeft een uniforme belichting bij toepassing van een planaire secundaire optiek)
- 'lambertian' (breder, vlakker stralingspatroon)
- 'side-emitting' (meeste emissie aan de zijkant)
- gebundeld met een externe lens: hiermee kunnen gerichte lichtbundels met een kleine openingshoek worden gemaakt.

Afhankelijk van de toepassing zal het meest geschikte type moeten worden gekozen (zie ook paragraaf 3.7).



Figuur 3.14 Stralingspatronen van verschillende typen LEDs. De keuze van een bepaald type is afhankelijk van de toepassing. Bij de 'lambertian' LEDs wordt het meeste licht uitgekoppeld. (Bron: Lumileds)

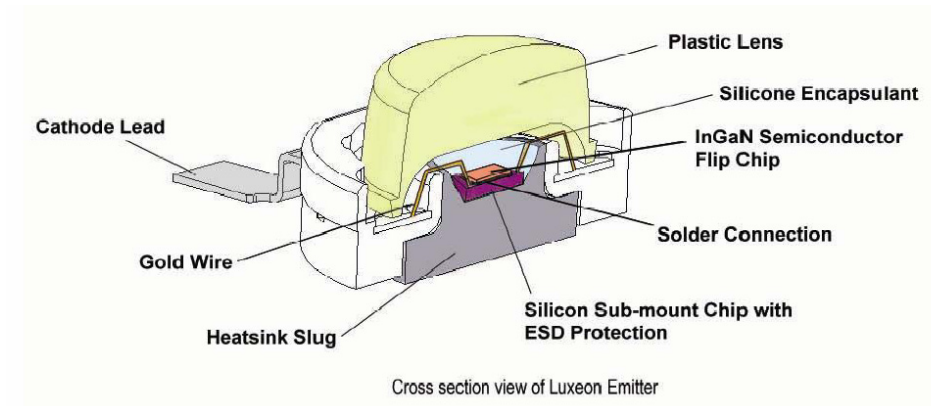


Figuur 3.15 Doorsnede van verschillende typen LEDs. (Bron: Lumileds)

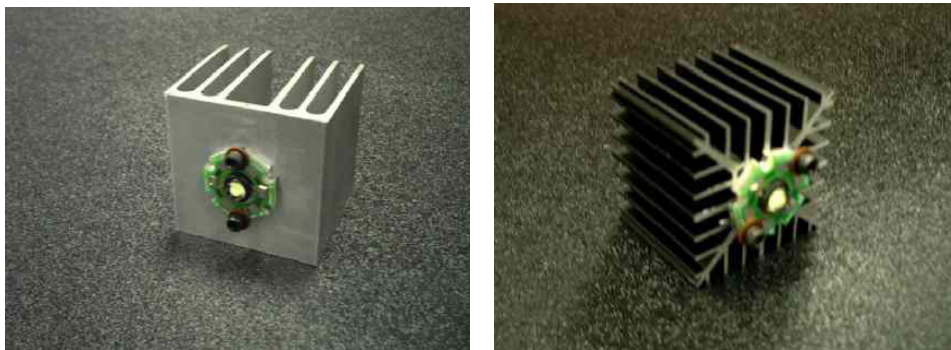
### 3.5 Warmtehuishouding

#### *warmteproductie / koeling*

LEDs zenden 'koud licht' uit. Dat wil zeggen dat de lichtbundel geen warmtestraling (in het infrarood) bevat, zoals bij een gloeilamp het geval is. Dit betekent echter niet, zoals vaak ten onrechte wordt gedacht, dat LEDs geen warmte produceren. Integendeel, het grootste deel van de elektrische energie wordt ook bij deze lichtbron omgezet in warmte (bij de huidige generatie LEDs gaat het om 75% à 95%). Om te voorkomen dat de LED intern te heet wordt (de maximaal toegestane werkt temperatuur is circa 120 à 135°C), zal deze warmte naar de omgeving moeten worden afgevoerd. Omdat de warmte niet als (nabij-infrarode) warmtestraling wordt 'afgestraald', zoals bij de gloeilamp, zal een andere manier van koelen moeten worden toegepast. De warmte zal via geleiding naar de buitenzijde van de LED moeten worden getransporteerd waar vervolgens voldoende koelend oppervlak aanwezig moet zijn om de warmte aan de omgeving te kunnen afstaan. Bij hoog-vermogen LEDs is een goede warmtebrug van de LED-chip naar buiten essentieel. Figuur voorkeur 3.16 toont een doorsnede van een hoog-vermogen LED (type Luxeon Emitter van Lumileds). Hierin valt de (goed warmtegeleidende) klomp metaal in de bodem op ('heat sink slug') die speciaal als warmtebrug is aangebracht. In het algemeen zal de LED met deze warmtebrug nog op een externe 'heat sink' moeten worden bevestigd, met voldoende oppervlak om de in de LED-chip geproduceerde warmte aan de lucht te kunnen afstaan (zie voorbeelden in figuur 3.17). De heat sink moet zodanig worden gedimensioneerd, dat een bij het ontwerp te kiezen maximale chip-temperatuur bij de voorkomende omgevingstemperaturen niet zal worden overschreden. Deze temperatuur kan overigens (bijvoorbeeld om reden van efficiëntie, zie volgende alinea) lager liggen dan de maximale door de fabrikant toegestane temperatuur.



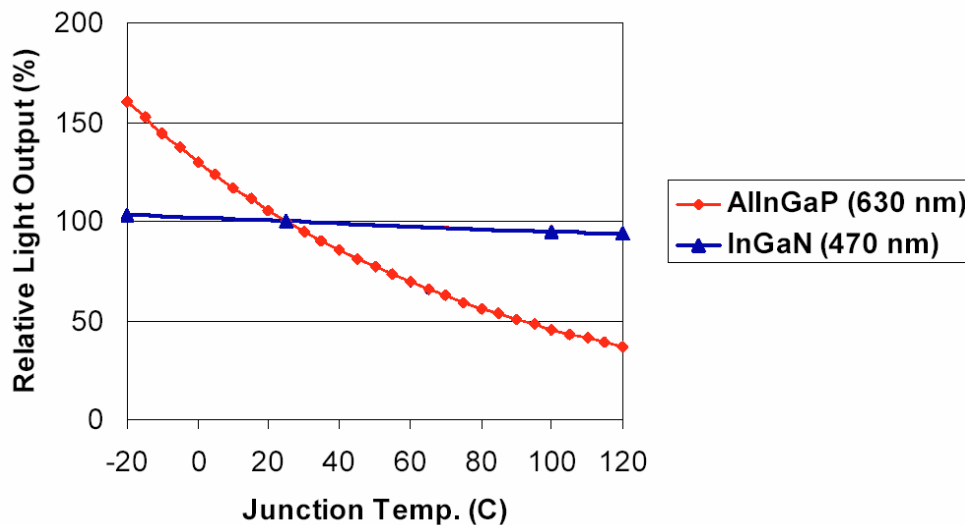
Figuur 3.16 Dwarsdoorsnede van een hoog vermogen LED. De in de LED-chip geproduceerde warmte wordt afgevoerd via de 'heat sink slug' (bron: Lumileds).



Figuur 3.17 Hoog-vermogen LEDs bevestigd op een extern koellichaam voor het afvoeren van de geproduceerde warmte naar de omgeving (bron: Lumileds)

### *Temperatuurafhankelijkheid*

De hoeveelheid licht die een LED uitzendt hangt af van de temperatuur van de overgang tussen de p- en de n-laag in de LED (de 'junction', zie paragraaf 3.2). Naarmate de temperatuur hoger wordt, daalt de relatieve output van de LED en dus de energetische efficiëntie (zie figuur 3.18). De temperatuurgevoeligheid treedt vooral op bij LEDs gemaakt van AlInGaP. Bij LEDs van InGaN is de invloed veel minder groot. Van het eerste materiaal worden met name rode, oranje-rode en amber LEDs gemaakt. Bij een rode LED die op een junction temperatuur van 75°C wordt bedreven (hetgeen zonder actieve koeling al snel het geval is), is de lichtopbrengst slechts circa 60% van de waarde bij 25 °C, die in de documentatie als referentie wordt gehanteerd. Een blauwe LED heeft daarentegen bij 75°C nog een relatieve output van 96%.



Figuur 3.18 Relatieve lichtoutput van LEDs als functie van de 'junction-temperatuur' voor twee verschillende typen LEDs. De lichtoutput is willekeurig bij 25°C op 100% gesteld. Met name bij AllnGaP LEDs hangt de relatieve lichtoutput sterk af van de junction-temperatuur (bron: Lumileds)

### 3.6 Regelbaarheid

Algemeen: LEDs zijn – wat betreft lichtsterkte - uitstekend en relatief gemakkelijk regelbaar (zeker in vergelijking met HD-Natriumlampen). Principieel zijn er twee methoden om te dimmen [13]:

- *Dimmen door stroom- of spanningsvariatie.* De meest gangbare methode van dimmen bestaat uit het reduceren van de opgelegde stroom (forward current) of spanning (forward voltage), een en ander afhankelijk van de wijze van aansturen van de LEDs. Echter bij sommige LEDs (met name InGaN LEDs) verschuift dan de golflengte van het licht enigszins (een lagere stroom geeft een grotere golflengte). Bij veel van andere typen LEDs treedt deze verschuiving niet op. Overigens heeft bij InGaN LEDs ook de temperatuur effect op de golflengte, zij het dat de invloed van de temperatuur minder sterk is dan die van de stroom.
- *Dimmen door pulsbreedtemodulatie (PBM).* Bij pulsbreedtemodulatie wordt de LED snel achter elkaar aan- respectievelijk uitgeschakeld. De duty-cycle (D) is de verhouding tussen de pulsduur ("aan-tijd") en de totale cyclusduur. Bij frequenties groter dan circa 200 Hz kan het menselijk oog de verschillende lichtpulsen niet meer waarnemen. Het oog integreert en interpreteert de lichtpulsen in termen van helderheid ('brightness') die kan worden gevarieerd door de duty-cycle te varieren. Zo lang de 'forward current' door een

InGaN LED constant blijft, treedt er geen verschuiving van de golflengte (en dus van de kleur) op. De helderheid kan lineair worden geregeld van 0 tot een maximum door de duty-cycle lineair te variëren. De maximale helderheid wordt gelimiteerd door de maximaal toegestane 'forward current'. (Bij InGaN-LEDs heeft PBM-regeling de voorkeur boven regeling van stroom of spanning omdat hierbij verschuiving van kleur wordt vermeden).

Een voordeel van het dimmen van LEDs is, dat de LEDs bij gelijkblijvende koeling minder warm zullen worden, waardoor het lichtrendement (en ook het PAR- en fotonrendement) zullen toenemen. Dit geldt in het bijzonder voor AlInGaP LEDs en – in mindere mate – ook voor InGaN LEDs (zie figuur 3.18). Bij het dimmen van bijvoorbeeld hoge-druk natriumlampen neemt het rendement in de gedimde toestand af. Het is dus uit energetisch en financieel oogpunt aantrekkelijk om bij LED-verlichting/belichting het lichtaanbod door dimmen optimaal af te stemmen op de actuele lichtvraag en niet meer te belichten dan nodig is. Een nadeel van het dimmen van LEDs – althans in het geval van dimmen door stroom- of spanningsvariatie - kan zijn, dat de kleur iets verschuift. Bij assimilatiebelichting zal dit echter niet snel een probleem zijn, omdat het daar gaat om de fotonflux en de kleur nauwelijks een rol speelt.

### 3.7 LED-lampen/armaturen

Gezien de lichtoutput van individuele LEDs (momenteel verkrijgbaar tot circa 120 lumen per LED) zullen voor de meeste verlichtingsapplicaties al snel meerdere LEDs moeten worden gecombineerd om de gewenste licht- (of foton-) stroom te verkrijgen. Een gloeilamp van bijvoorbeeld 100 W zendt circa 1370 lumen uit. Om deze lichtstroom met 120 lumen-LEDs te evenaren, zijn 11 à 12 LEDs nodig. Met LEDs van 25 lumen moeten er circa 55 worden gecombineerd.

Ten behoeve van het maken van applicaties brengen LED-fabrikanten losse LEDs op de markt, maar ook multi-LED-modules (lineair, ringvormig of in een rechthoekig array) waarmee verlichtingsfabrikanten snel hun eigen verlichtingssystemen kunnen samenstellen (zie figuur 3.19). Bij de modules zijn de LEDs vaak op een metaalkern 'printed circuit board' gemonteerd en elektrisch al onderling al doorverbonden. Eventueel is een externe optiek aangebracht. Voor de elektrische aansturing is een voedingsmodule nodig (zie figuur 3.19 midden links). Hiervan zijn verschillende uitvoeringen op de markt. Vaak zal een stroombron worden gebruikt, die er voor zorgt dat een constante (maar eventueel instelbare) stroom door de LEDs loopt. De verschillende LEDs in een lamp worden deels in serie en bij grotere aantallen (>6) deels ook parallel geschakeld. De benodigde spanning voor de 'string' van in serie geschakelde LEDs blijft meestal onder de 24 V, waardoor de lampen desgewenst ook op een lage gelijkspanning kunnen worden aangesloten.



Figuur 3.19 Voorbeelden van bouwstenen voor LED-gebaseerde verlichtingsystemen. De bouwstenen hebben elk één of meerdere LEDs en wel of geen externe optiek. De foto midden links toont behalve een ringvormige LED-bouwsteen ook een voedingsmodule (bronnen: Lumileds (foto's boven en midden) en [12] (foto's onder)).

Fabrikanten van verlichtingsystemen beginnen geleidelijk multi-LED-lampen op de markt te brengen die veelal bedoeld zijn als vervanger van op gloeilampen gebaseerde lichtsystemen. Voorbeelden hiervan zijn verkeerslichten, zaklampen, operatielampen en benzine-station lampen (zie figuren 3.20 en 3.21). De lampen kunnen of met een standaard fitting zijn uitgevoerd en passen dan in een standaard armatuur, of kunnen in een speciaal ontworpen arma-



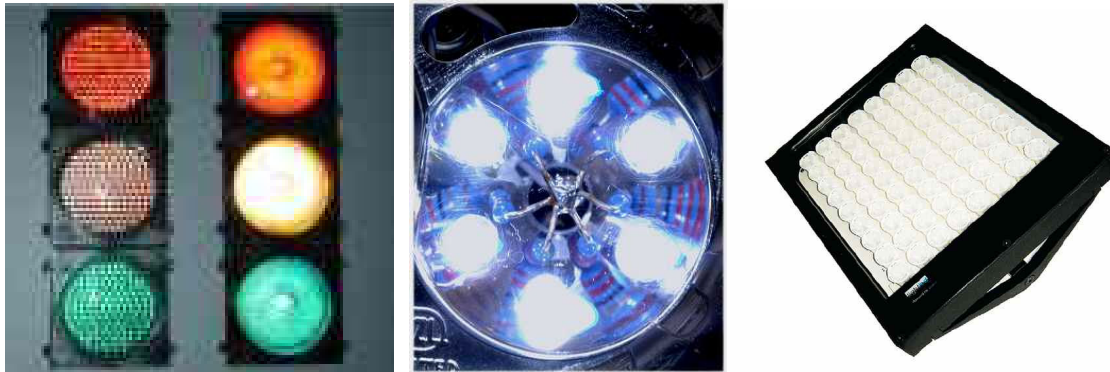
tuur zijn ondergebracht waarin zo goed mogelijk rekening gehouden is met de mogelijkheden en beperkingen van LEDs. Hieronder zijn enkele voorbeelden van lampen en lampsystemen afgebeeld.

Er kunnen verschillende drijfveren zijn voor vervanging van conventionele lampen door een LED-lampen:

- grotere betrouwbaarheid en langere levensduur (dit speelt bijvoorbeeld bij verkeerslichten, maar ook bij andere lampen op moeilijk bereikbare plaatsen, zie figuur 3.21)
- hoog rendement van LEDs in vergelijking met de lampen die ze vervangen (speelt vooral bij gloeilampen die veel branduren maken, of bij batterijgevoede systemen, zoals zaklampen)
- koud licht (prettig bij hoge-intensiteit operatielampen)
- efficiënte productie van gekleurd licht (super-bright LEDs genereren veel efficiënter gekleurd licht dan gloeilampen in combinatie met een kleurfilter; van belang bij bijvoorbeeld verkeerslichten en sfeerverlichting)
- kleine maat mogelijk (bijvoorbeeld mini-zaklampjes met knoopcellen)
- vormgeving (bij LEDs zijn bijvoorbeeld modern ogende, vlakke armaturen mogelijk)
- onmiddelijk volle lichtsterkte (de lampen zenden bij inschakeling onmiddelijk licht op volle sterkte uit, zonder opwarmperiode, zoals bij fluorescentie en natriumlampen)
- goede regelbaarheid van 0 tot maximaal (lastig bij bijvoorbeeld fluorescentielampen)



Figuur 3.20 Voorbeelden van lampen met LEDs. De lamp in de linker en midden figuur kunnen worden gebruikt in standaard armaturen. De linker lamp heeft een bajonet-fitting. De middelste een schroef fitting. Rechts is een zaklamp met een LED-ring afgebeeld (deze maakt de lamp ook bijzonder geschikt voor knippertoepassingen).

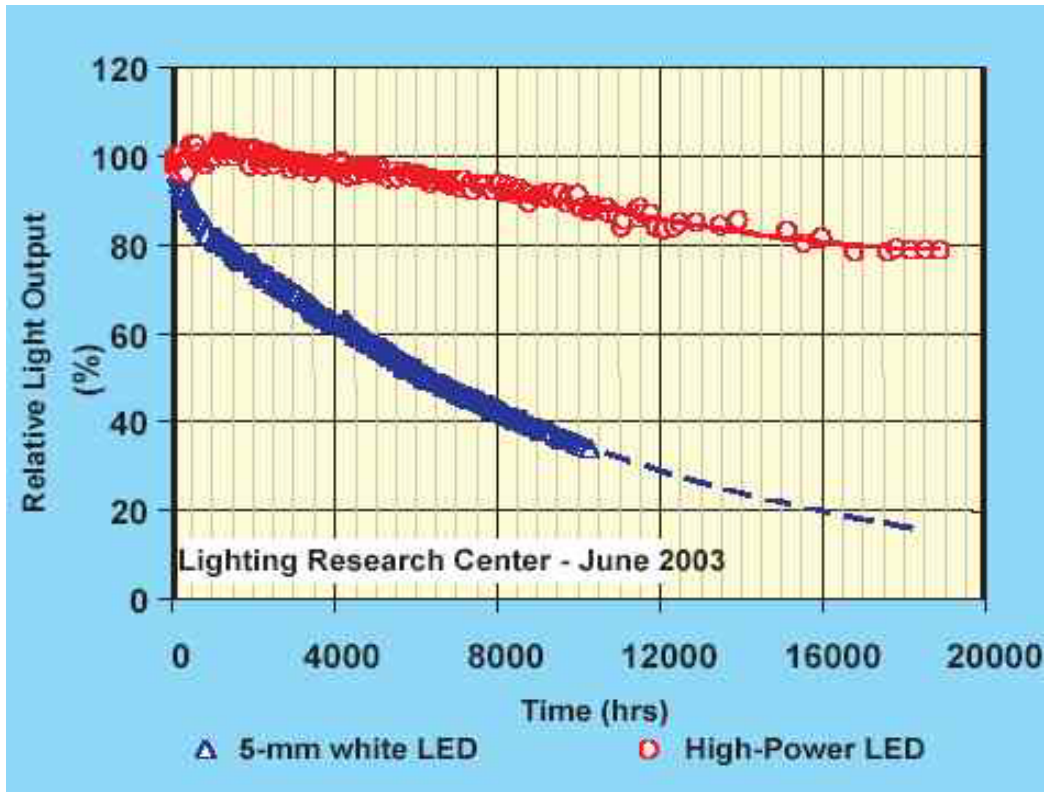


Figuur 3.21 Voorbeelden van verlichtingssystemen met LEDs. In de linker figuur is links een verkeerslicht met LEDs afgebeeld en rechts een met gloeilampen. De voordelen van het LED-verkeerslicht zijn de veel grotere betrouwbaarheid (tot 10x langere levensduur), het geringere energieverbruik (besparing tot 90%) en de veel lagere onderhoudskosten. De middenfiguur toont een LED-operatielamp. De lichtbundel is veel koeler dan die van een met gloeilampen, hetgeen prettig is voor zowel patient als arts. De rechter lamp is bedoeld als betrouwbare en energiezuinige vervanger van gloeilampen in benzinstation-overkappingen. De lamp bevat 72 stuks 1,2 W LEDs, gaat naar verwachting 100.000 uur mee en. De lamp zendt evenveel licht uit als een gloeilamp van 150 W en gebruikt daarvoor circa 88 W (bron: Lightled).

In hoofdstuk 4 zal worden ingegaan op de kansen van LEDs voor belichting in de glastuinbouw en zal worden aangegeven in hoeverre de argumenten die in de toepassingen hiervoor een rol speelden, voor applicaties in de glastuinbouw van belang zijn.

### 3.8 Levensduur / degradatie

Van 5 mm LEDs is bekend, dat de lichtoutput in de loop van de tijd flink afneemt. Zo'n LED heeft na 10.000 uur nog maar circa 35% van de lichtoutput aan het begin van zijn leven. De oorzaak daarvan is het epoxy huis. Epoxy is onderhevig aan optische degradatie in de tijd waardoor de uittredende lichtintensiteit afneemt. Hoog-vermogen LEDs zijn opnieuw ontworpen met het oog op een verlengde levensduur en een verminderde degradatie. Bij hoog-vermogen Luxeon LEDs is onder meer het epoxy huis vervangen door een hogetemperatuurrezistente plastic lens en een siliconeninkapseling van de LED-chip. Verder wordt de warmte via een apart thermisch pad via de onderzijde afgevoerd (zie figuur 3.16). Het Lighting Research Center in Troy New York, heeft in een test van Luxeon High Power LEDs en 5 mm LEDs in een duurttest onderzocht (de stroom bedroeg 350 mA respectievelijk 20 mA; de LEDs werden bedreven op kamertemperatuur; [14]). Het resultaat is aangegeven in figuur 3.22.



Figuur 3.22 Relatieve lichtoutput van een 5 mm indicator LEDs (blauw) en hoog-vermogen LEDs als functie van de bedrijfstijd [14].

Uit de figuur blijkt:

- de hoog-vermogen LEDs hebben na 10.000 uur nog een relatieve lichtoutput van 90% (degradatie 10%)
- na 19000 uur is de degradatie circa 20%
- Lumileds verwacht voor de Luxeon LEDs een levensduur van meer dan 50.000 uur (bij 10-12 uur per dag, betekent dat een levensduur van 12 gebruiksjaren)
- de (door Lumileds) verwachte degradatie na 50.000 uur is minder dan 30% (door toepassing van zogenaamde "Advanced lumen maintenance technology"). Als blijkt dat de helling van de degradatie verder afneemt naarmate de leeftijd van de LED vordert, zoals de rode curve in de laatste 5000 uur van bovenstaande grafiek suggereert, dan is dit wellicht haalbaar.

Ter vergelijking: hoge-druk natriumlampen hebben een nuttige levensduur<sup>2</sup> van circa 10.000 à 12.000 branduren (en zijn wat dat betreft vergelijkbaar met de hoog vermogen LEDs; de technische levensduur is echter korter, zie tabel 4.1).

<sup>2</sup> hier gedefinieerd als het aantal uren dat de lamp een lichtstroom uitzend die groter is dan (of gelijk is aan) 90% van de initiële lichtstroom.

### 3.9 Producenten / leveranciers

Er zijn verschillende producenten van hoog-vermogen LEDs of LED-chips. Concurrentie op die markt is goed voor de verdere ontwikkeling van de technologie en de prijs. De belangrijkste spelers zijn:

- Lumileds (50/50 samenwerkingsverband van Philips en Agilent Technologies). Leverancier van onder andere Luxeon hoog-vermogen LEDs (tot 5 W)  
website: [www.lumileds.com](http://www.lumileds.com)
- Osram Opto Semiconductors (levert o.a. Golden Dragon hoogvermogen LED (ca 1 W))  
website: [www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)
- Gelcore (joint venture van GE Lighting en Emcore, [www.gelcore.com](http://www.gelcore.com))
- General Electric (doet o.a. R&D werk aan OLEDs, [www.ge.com](http://www.ge.com))
- Nichia Chemicals ([www.nichia.com](http://www.nichia.com))
- Toyoda Gosei ([www.toyoda-gosei.com](http://www.toyoda-gosei.com))
- Cree, Inc ([www.cree.com](http://www.cree.com))
- Epistar (fabrikant van LED-chips, [www.epistar.com.tw](http://www.epistar.com.tw))
- UEC (fabrikant van LED-chips, [www.uec.com.tw](http://www.uec.com.tw))

De fabrikanten van de LEDs leveren hun producten veelal aan producenten van complete verlichtingssystemen. Het aantal leveranciers dat LED-gebaseerde verlichtingssystemen op de markt brengt, zal de komende jaren naar verwachting fors toenemen. Veel van de huidige leveranciers richten zich op het verkeer (verkeerslichten, verlichte signaleringen), de automobielsector (binnenverlichting, displays, voor- en achterlichten), gebouwbelichting en grote elektronische reclame- en scoreborden. Leveranciers die zich specifiek op de tuinbouw richten zijn er nog niet, alhoewel zich wel leveranciers gemeld hebben, die naar die potentiële markt kijken (onder andere ARO Electronics, leverancier van Odeco en Lightled systemen, [www.odeco.com](http://www.odeco.com) en [www.lightled.com](http://www.lightled.com)).

### 3.10 Prijsniveau / ontwikkeling van rendement, lichtoutput en prijs

Wat betreft de financiële aantrekkelijkheid van LEDs voor grootschalige be- of verlichtings-toepassingen (waartoe ook assimilatiebelichting in de glastuinbouw wordt gerekend) zijn drie zaken van eminent belang:

- a) de energetische prestatie van de LED. Deze bepaalt de kosten van het energieverbruik tijdens het operationele leven. Bij verlichting gaat het om het lichtrendement (lumen/W) en bij assimilatiebelichting vooral om de fotonflux per W ( $(\mu\text{mol/s})/\text{W}$ )
- b) de investeringskosten per eenheid licht. Deze bepaalt samen met de levensduur de grootte van de benodigde investeringen over een bepaald aantal bedrijfsjaren (bijvoor-

beeld 10 of 15 jaar). Bij verlichting gaat het om de verhouding van kosten en lichtstroom (EUR/lumen) en bij belichting om (EUR/( $\mu$ mol/s))

- c) de (technische of economische) levensduur. Deze bepaalt in een bepaalde bedrijfsperiode hoeveel nieuwe lampen er nodig zijn (en daarmee de benodigde herinvesteringen). Bij moeilijk toegankelijke armaturen, speelt naast de prijs van de lamp ook de kosten van de vervanging zelf (arbeid, hulpmiddelen) een belangrijke rol.

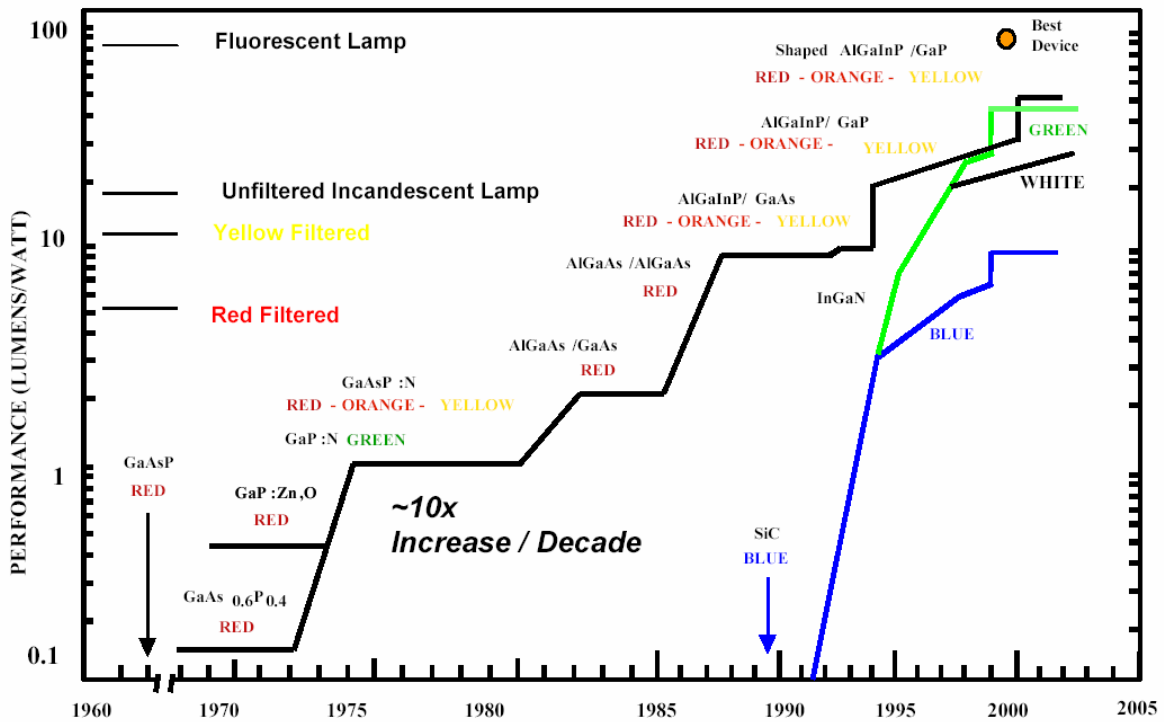
Voor het beoordelen van de kansen van LED-toepassingen in de glastuinbouw in de (nabije) toekomst is het noodzakelijk een inschatting te maken van de toekomstige energetische prestatie en de investeringskosten van LED-gebaseerde lampen. We zullen dit doen aan de hand van de historische prestatieontwikkeling en prijsontwikkeling van LEDs over de afgelopen 40 jaar. Omdat er nog geen tuinbouwtoepassingen zijn en derhalve micromol-gebaseerde kencijfers ontbreken, zullen we bij de schets van de historie uitgaan van lumen-gebaseerde cijfers. De trend in de ontwikkeling zal voor micromol-gebaseerde indicatoren op hoofdlijnen hetzelfde zijn. In hoofdstuk 4 zal een concrete vertaalslag worden gemaakt naar de rentabiliteit in de glastuinbouw.

#### *Ontwikkeling van LED-efficiëntie (lichtrendement)*

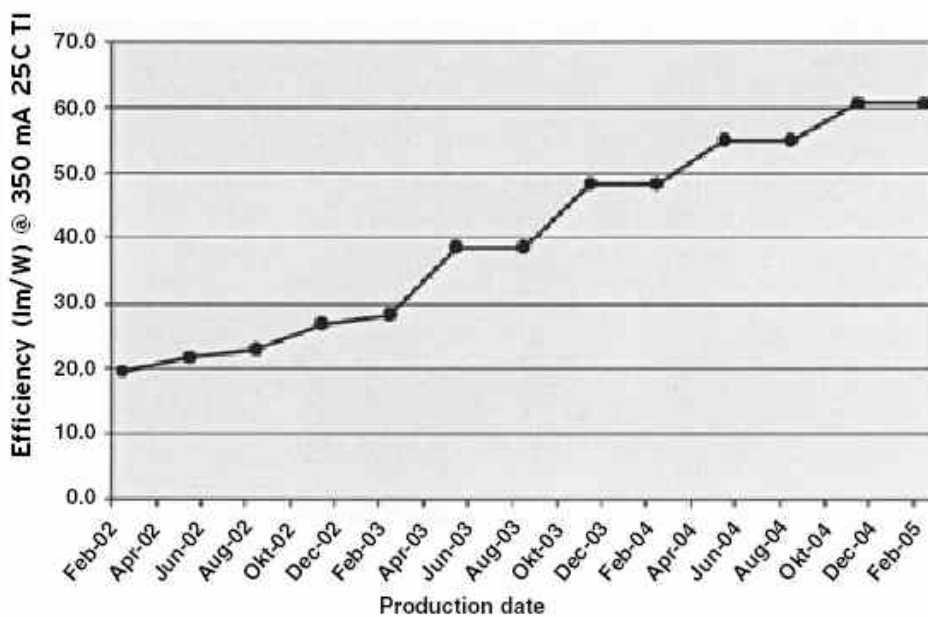
Figuur 3.23 toont de evolutie van de LED-ontwikkeling over de afgelopen 40 jaar [9]. De zwarte lijn geeft het 'lichtrendement' (in lumen/W) van de beste LEDs in een bepaald jaar. Daarbij is ook de kleur van de LED en het gebruikte materiaal aangegeven. Tevens zijn ook de ontwikkelingslijnen van groene, blauwe en witte LEDs aangegeven (door respectievelijk de groene, de blauwe en de tweede zwarte lijn. Ter referentie zijn ook de prestaties van een gloeilamp ('incandescent lamp') en van een TL-lamp ('fluorescent lamp') aangegeven (en de lichtrendementen van gloeilampen die gefilterd worden door een rood respectievelijk geel filter; gefilterde lampen zijn met name van belang voor verkeerslichten). Uit de figuur blijkt dat het lichtrendement in de periode van 1970 tot 2000 bijna is verduizendvoudigd. Dit betekent dat er een stijgende trend in de efficiëntie zit van ongeveer een factor 10 per decade (periode van 10 jaar). Als deze trend zich doorzet zou in 2010 een 'best red LED' van circa 800 lumen/W ontwikkeld zijn en witte LEDs van circa 200 lumen/W.

Het eerste is onmogelijk omdat het energieconversierendement dan groter dan 1 zou worden. Deskundigen houden er wel rekening mee dat in de toekomst bij (witte en bepaalde kleuren) LEDs een efficiëntie van 200 lumen per Watt zal worden gehaald. We zullen bij de bepaling van het toekomstperspectief dan ook van dit lichtrendement uitgaan.

Aanvullend aan de hierboven gegeven beschouwing, die de ontwikkeling van de beste laboratorium LEDs laat zien, kan gekeken worden naar de (gerealiseerde en geplande) ontwikkelingen van de commercieel verkrijgbare hoog-vermogen LEDs. Figuur 3.24 geeft de



Figuur 3.23 Evolutie van de LED-ontwikkeling over de afgelopen 40 jaar. De zwarte lijn geeft het 'lichtrendement' (in lumen/Watt) van de beste LEDs in een bepaald jaar. Tevens zijn ook de ontwikkeling van groene, blauwe en witte LEDs aangegeven. Ter referentie zijn ook de prestaties van een gloeilamp (incandescents lamp) en van een TL-lamp (fluorescent lamp) aangegeven [9]. De vorm van de lijnen laat zien, dat de ontwikkeling van de LEDs enigszins schoksgewijs plaatsvindt.

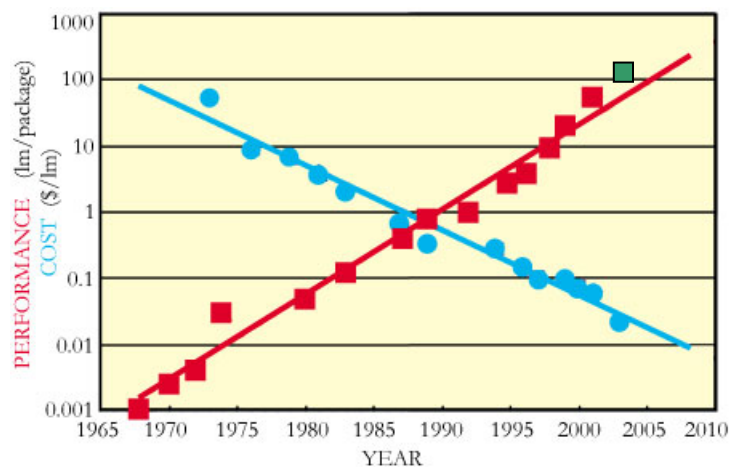


Figuur 3.24 Groei in LED-efficiëntie van 2002 tot 2005 (product roadmap van witte LEDs van leidende fabrikant [5]). De efficiëntie groeit gemiddeld met circa 14 lumen/W per jaar.

‘product road map’ van witte LEDs van februari 2002 tot februari 2005. Uit de grafiek kan een trend in de groei van de efficiëntie worden gedestilleerd van circa 14 lumen/W per jaar. Als we deze trend 5 jaar doortrekken, dan komen we in 2010 op (witte) LED-producten met een lichtrendement van circa 130 lumen per Watt. Bij de bepaling van het potentieel van LEDs in 2010 zullen we van dit rendement uitgaan.

### Ontwikkeling van het prijsniveau van LEDs

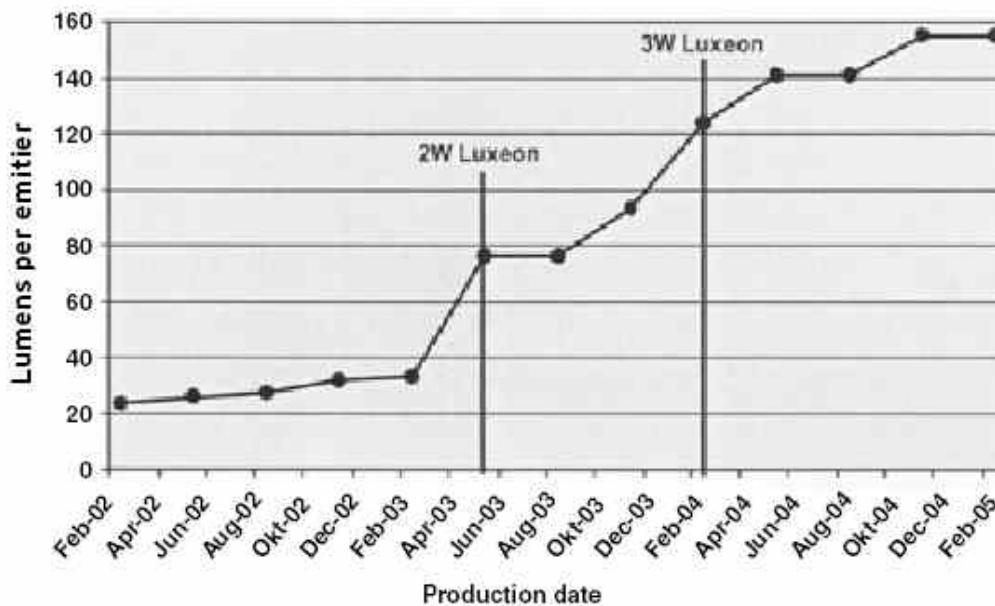
De ontwikkeling van het prijsniveau van LEDs uitgedrukt in EUR per lumen hangt - met name bij anorganische LEDs met een chip - sterk af van de lichtoutput per LED. Bedenkend dat de LED uit een aantal precisieonderdelen bestaat (chip, lens, interne bedrading, aansluitingen, warmtebrug en dergelijke) die elk zelf binnen nauwe toleranties moeten worden gefabriceerd en tot een complete LED moeten worden geassembleerd, ligt het voor de hand te veronderstellen, dat niet zozeer de materiaalkosten maar met name de verschillende productiehandelingen de kosten van de (anorganische LED) bepalen. We gaan er daarom vanuit dat de prijs per LED in de toekomst niet of maar beperkt lager wordt, maar wel de output per LED nog flink zal toenemen. Het prijsniveau van de LED uitgedrukt in EUR per lumen zal dan fors verbeteren. Ook voor de prijsontwikkeling zal naar de historie worden gekeken om een voorspelling voor de toekomst te kunnen maken. In figuur 3.25 toont de rode lijn de evolutie van de lichtoutput per LED van 1968 tot 2003 (voor rode LEDs [6]). Hieruit blijkt dat in circa 35 jaar tijd de lichtoutput per LED ongeveer is verhonderduizendvoudig van 0,001 lumen tot circa 100 lumen per LED. Hieruit kan worden afgeleid dat de lichtoutput gemiddeld ongeveer elke 2 jaar is verdubbeld (of te wel een groei van circa 40% per jaar). Deze ontwikkeling staat wel bekend onder de naam “Haitz’s law for LED flux”<sup>3</sup>



Figuur 3.25 Groei van de lichtoutput per LED over de afgelopen 35 jaar (voor rode LEDs met uitzondering van het laatste punt, dat een groene LED representeert). De cyaankleurige punten en lijn representeren de ontwikkeling van de kostprijs per lumen.

<sup>3</sup> Deze ‘ervaringswet’ is door Haitz geponereerd, naar analogie van de ‘wet van Moore’ (1965), die stelde dat het aantal transistoren per chip elke 18 à 24 maanden zou verdubbelen (en die in de praktijk vrij goed is uitgekomen).

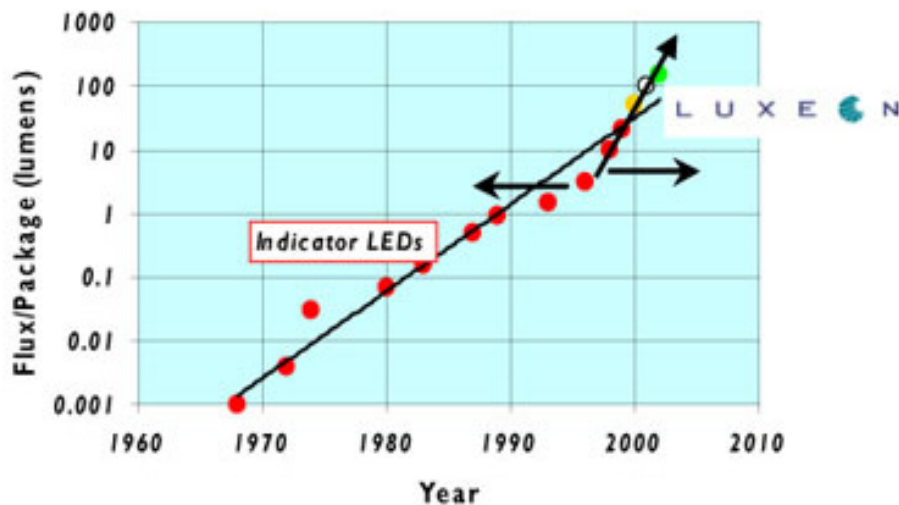
Als de rode rechte lijn wordt geëxtrapoleerd naar 2010, dan snijdt de lijn dat jaar bij circa 500 lumen per LED. Als we "Haitz's law" direct toepassen op de "sterkste" LED van dit moment (ca 120 lumen/W, Lumiled type Luxeon V), dan zou over 6 jaar de lichtoutput zijn verachtvoudigd tot circa 960 lumen per LED. Sommige deskundigen menen dat door doorbraken in de LED-technologie rond 2000 (andere materialen en ander, geoptimaliseerd elektrisch, optisch en thermisch ontwerp), de groei in lichtoutput nog kan worden versneld. Figuur 3.26 toont de groei in de output van witte LEDs volgens de geplande Luxeon productlijn van Lumileds [5]. In een periode van 3 jaar neemt de lichtoutput toe van circa 23 tot 156 lumen per LED (dit is een factor 6.8). Dit betekent gemiddeld een verdubbeling elke 13 maanden (of een groeipercentage van 89% per jaar). Als dit groeitempo tot 2010 zou kunnen worden voortgezet zou dat betekenen, dat er dan al LEDs met een lichtoutput van circa 4000 lumen per LED verkrijgbaar zijn (dit komt ruwweg overeen met de lichtstroom van 2 stuks Superlux lampen van 150 W). We zullen in de beschouwing van de kansen van LEDs voor de nabije toekomst uitgaan van 3 scenario's wat betreft groei van de lichtoutput van LEDs (historisch: 40%, 'LED-doorbraak': 90% en een tussenliggende waarde van 65% groei per jaar).



Figuur 3.26 Groei van de verwachte lichtoutput per LED tussen 2002 en 2005 volgens de 'product road map' van Luxeon (momenteel – februari 2004 – zijn 120 lumen LEDs commercieel verkrijgbaar (deze verbruiken echter nog wel wat meer energie dan de aangegeven 3W (ca 4.8 W).



De versnelde groei in de lichtoutput sinds 1998 is ook aangegeven in figuur 3.27. De fabrikant constateert dat sinds de 'overgang' van indicator LEDs naar (voor verlichtingsdoeleinden geoptimaliseerde) hoog-vermogen LEDs dat de helling in de lichtflux per LED is toegenomen (de figuur suggereert een groei van circa 90% per jaar).



Figuur 3.27 Historie van de groei van de lichtoutput per LED tussen 1968 en 2002. Sinds de introductie van de Luxeon hoog-vermogen LEDs in 1998 lijkt de groei in de lichtoutput te zijn versneld ten opzichte van de 30-jarige periode ervoor (waarin LEDs eigenlijk alleen de functie van indicatorlampje hadden).  
Bron: Lumileds

In figuur 3.25 is naast de groei in de output per LED ook de reductie in de prijs per lumen van rode LEDs aangegeven over de laatste 35 jaar (cyaankleurige punten). Door de punten is een lijn getrokken die de trend in de prijs representeert. Het blijkt dat de prijs per lumen in ongeveer 30 jaar tijd met een factor 1000 is gedaald, dat wil zeggen met circa een factor 10 per decade. De huidige kostprijs (anno begin 2004) is circa 0.02 \$ per lumen. De commerciële prijs kan nog wel een factor 5 à 10 hoger liggen (afhankelijk van type en uitgaande van een leveringsaantal van 250 stuks of meer). Bij heel grote aantallen (100.000 stuks of meer) zal de prijs naar verwachting een factor 2 à 3 lager liggen dan bij 250 stuks. Bij de raming van het toekomstperspectief zullen we aannemen dat de prijs per LED constant blijft, maar de aantrekkelijkheid in de tijd toeneemt door zowel efficiëntieverbetering als door (verdere extra) verbetering van de lichtoutput per LED.

## 4 TOEPASSINGEN VAN LEDS IN DE GLASTUINBOUW

### 4.1 Perspectief van LEDs voor assimilatiebelichting

#### 4.1.1 LEDs versus andere lichtbronnen in de glastuinbouw

In dit hoofdstuk zullen we nagaan wat het perspectief van LEDs is als vervanger van andere, momenteel gangbare be- of verlichtingssystemen in de glastuinbouw. We zullen daartoe de LEDs vergelijken met

- hoge-druk natriumlampen (3 types uit de veel gebruikte SON-T PIA Greenpower lijn van Philips)
- fluorescentielampen (TL-verlichting)
- gloeilampen

Behalve de beschrijving van de status anno 2004 (op zowel lamp als lampsysteemniveau), zal ook een projectie worden gemaakt naar de situatie van 2010. Daarbij wordt gebruikt gemaakt van de groeicijfers in de efficiëntie en de lichtoutput van de LEDs, zoals aangegeven in paragraaf 3.10. Voor de LEDs zullen we 3 kleuren beschouwen (rood, rood-oranje en blauw) en witte LEDs (gebaseerd op fosfor-coating, zie paragraaf 3.3.3). Op basis van specificaties uit databladen van de diverse lichtbronnen (aangevuld met enkele andere gegevens uit literatuur of opgevraagd bij fabrikant of leverancier) is een overzicht samengesteld van de belangrijkste prestatie-indicatoren en bedrijfsvoeringsaspecten van de verschillende lampen (zie tabel 4.1). De volgende prestatie-indicatoren zijn gehanteerd (zie ook paragraaf 3.4.1):

- specifieke micromolstroom ('fotonrendement',  $(\mu\text{mol/s})/\text{W}$ )
- specifieke lichtstroom ('lichtrendement',  $\text{lumen}/\text{W}$ )
- PAR-rendement (PAR-stralingsrendement,  $(W_{\text{straling}}/W_e) \cdot 100\%$ )
- specifieke kosten ( $\text{EUR}/(\mu\text{mol/s})$ )

Voor de berekening van de verwachte cijfers in het jaar 2010 zijn een aantal aannamen gemaakt die onder tabel 4.1 zijn aangegeven.

De belangrijkste aannamen zijn:

- jaarlijkse groei in de LED-efficiëntie is 25,9% (factor 10 per decade, zie §3.10)
- jaarlijkse groei in de LED-output is 39% (= langjarig historische groei van rode LEDs; dit is een voorzichtig scenario; de laatste jaren is de groei sneller geweest, zie § 3.10)

De prijzen van de LEDs zijn gebaseerd op leveringsaantallen van 500.000 stuks of meer (april 2004). De prijzen voor de HD-natrium- en gloei- en TL-lampen zijn richtprijzen voor een toepassing in circa 2 ha kas.

Tabel 4.1 Overzicht kenmerken en prestaties van verschillende lichtbronnen anno 2004 en geschat voor 2010

Lamp data		HD-natrium			LED's 2004				Overig	
		SON-T	PIA	Green Power	rood-oranje	rood	blauw	wit	gloeilamp	TL-D-reflex
vermogen lamp	W	400	605	608	1,03	1,03	1,197	2,59	150	58
vermogen lamp+VSA	W	445	650	653	1,29	1,29	1,50	3,24	150	70
spanning	V	230	230	400					230	230
piekgolflengte	nm				617	627	470	550	1000	
percentage in bandje van 100 nm						97,9%	99,6%			
prijs lamp	EUR	14,3	22	28	2,66 <sup>1)</sup>	2,66 <sup>1)</sup>	2,66 <sup>1)</sup>	3,93 <sup>1)</sup>	1,55	8,35
micromolstroom	μmol/s	720	1100	1150	1,00	1,14	0,83	0,88	45	72,8
lichtstroom	lumen	58500	90000	90000	55,00	44,00	13,20	65,00	2060	5200
PAR	W <sub>PAR</sub>	134,55	223,6	233,5	0,193	0,217	0,212	0,195	9,75	15,08
<b>Prestaties losse lampen (2004)</b>										
specifieke micromolstroom <sup>2)</sup>	(μmol/s)/W	<b>1,80</b>	<b>1,82</b>	<b>1,89</b>	<b>0,96</b>	<b>1,10</b>	<b>0,70</b>	<b>0,34</b>	<b>0,30</b>	<b>1,26</b>
(fotonrendement lamp)										
specifieke lichtstroom <sup>2)</sup>	lumen/W	146,3	148,8	148,0	53,3	42,6	11,0	25,1	13,7	89,7
(lichtrendement lamp)										
PAR-rendement lamp <sup>2)</sup>	W <sub>PAR</sub> /W	33,6%	37,0%	38,4%	18,7%	21,0%	17,7%	7,5%	6,5%	26,0%
(PAR-stralingsrendement)										
specifieke kosten lamp (2004)	EUR/(μmol/s)	0,020	0,020	0,024	2,671	2,341	3,188	4,470	0,034	0,11
Prijs per eenheid licht	EUR/lumen	0,000244	0,000244	0,000311	0,0484	0,0605	0,2015	0,0605	0,00075	0,00161
verhouding micromol/lumen	μmol/s/lumen	0,01231	0,01222	0,01278	0,01811	0,02582	0,06321	0,01353	0,02184	0,01400
<b>Cijfers inclusief armatuur+voorschakelapparaat (2004)</b>										
Rel.lichtoutput bij 'junctiontemp.' van 75°C (LED)					53,3%	60,2%	96%	84%		
lichtrendement reflector/armatuur		88%	88%	88%	95%	95%	95%	95%	60%	80%
specifieke micromolstroom	(μmol/s)/W	<b>1,42</b>	<b>1,49</b>	<b>1,55</b>	<b>0,39</b>	<b>0,50</b>	<b>0,51</b>	<b>0,22</b>	<b>0,18</b>	<b>0,83</b>
specifieke lichtstroom	lumen/W	115,7	121,8	121,3	21,6	19,5	8,0	16,0	8,2	59,4
PAR-rendement	W <sub>PAR</sub> /W	26,6%	30,3%	31,5%	7,6%	9,6%	12,9%	4,8%	3,9%	17,2%
specifieke kosten (per netto μmol/s)	EUR/(μmol/s)	0,023	0,023	0,028	5,28	4,09	3,50	5,60	0,057	0,143
<b>Verwachte cijfers in 2010 (lamp incl. armatuur+voorschakelapparaat)</b>										
specifieke micromolstroom	(μmol/s)/W	<b>1,84</b>	<b>1,89</b>	<b>1,89</b>	<b>2,77</b>	<b>3,56</b>	<b>2,40</b>	<b>1,10</b>	<b>0,18</b>	<b>1,00</b>
specifieke lichtstroom	lumen/W	149,7	154,3	147,7	153,14	138,06	38,03	81,25	8,2	71,3
PAR-rendement	W <sub>PAR</sub> /W	34,4%	38,3%	38,3%	54%	68%	61%	24%	4%	21%
specifieke kosten (per netto μmol/s)	EUR/(μmol/s)	0,018	0,018	0,023	0,487	0,379	0,485	0,724	0,057	0,119
<b>Overige aspecten</b>										
starttijd (aanlooptijd)	min	5	5	5	0	0	0	0	0	1
Regelbaarheid		redelijk (efficiency neemt af bij dimmen)			goed (efficiency neemt toe bij dimmen)				redelijk	matig
Technische levensduur lampen		24000+	24000+	24000+	100000	100000	100000	100000	500-2000	15000
Degeneratie (lichtterugval bij 10000 branduren)		10%	10%	10%	10000 uur:10%; 20000 uur:20%; 50000 uur:30 à 35%					

Aannamen: LED- efficiencystijging factor 10 / decade **25,9%** per jaar historische groei output per LED **39,0%** per jaar

geschat toekomstig reflectorrendement HD-natrium 90%

geschat toekomstig verbruik elektronisch VSA voor HD-natrium 30 W

actueel stroombronrendement LEDs (driver) 80%

geschat toekomstig stroombronrendement tbv LEDs 95%

geschatte toekomstige rel.output van LEDs bij junction temperatuur van 75°C: 80% 90% 96% 90%

<sup>1)</sup> prijs o.b.v. opgave 500 000 stuks

<sup>2)</sup> initiële waarden bij ontwerpcondities

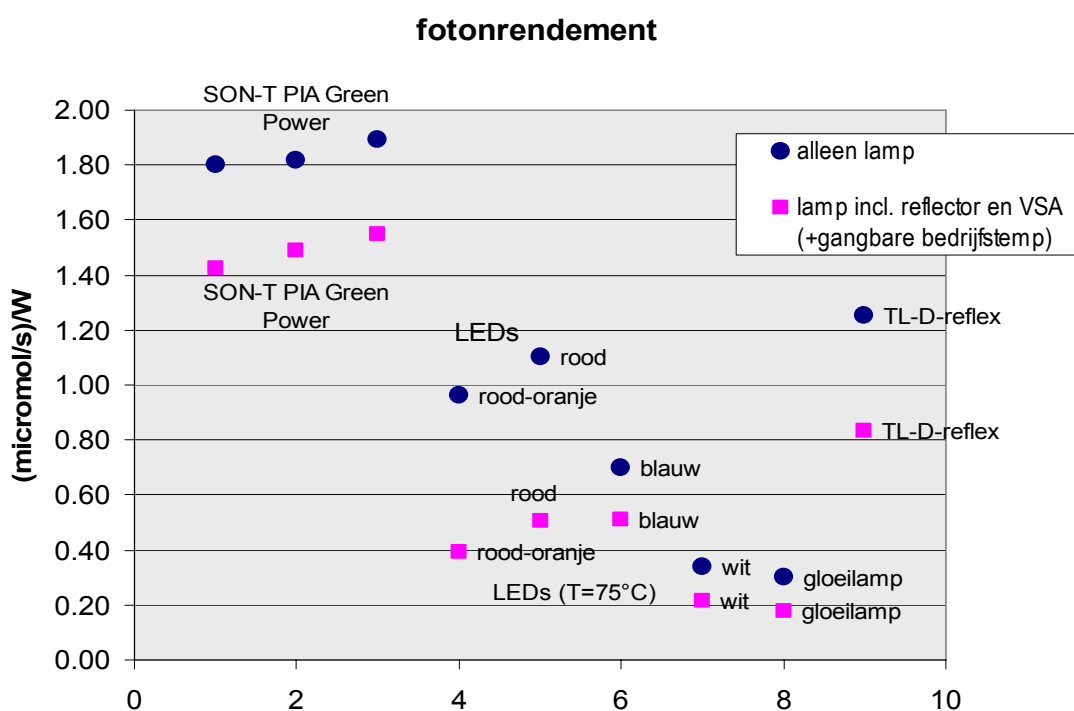
Voor hogedruk natriumlampen is (na consultatie van Philips) aangenomen, dat er in de komende jaren nog een kleine verbetering in de specifieke micromolstroom zal optreden (aannee: maximaal 2,2 (μmol/s)/W op lampniveau).

Het fotonrendement (dat uit energetisch oogpunt voor assimilatiebelichting de belangrijkste eigenschap van een lichtbron is) is voor de verschillende lampen uitgezet in figuur 4.1 voor zowel de huidige situatie (2004) en in figuur 4.2 voor de verwachte situatie in 2010. In elke

figuur is behalve het rendement van de losse lamp (blauwe rondjes) ook het systeemrendement aangegeven (roze vierkantjes). Bij dit laatste is rekening gehouden met onder andere het reflectorrendement, verliezen in voeding, voorschakelapparaat en dergelijke. Bij de LEDs is ook rekening gehouden met het praktische rendement bij een aangenomen 'junctiontemperatuur' (zie paragraaf 3.2) van 75°C (in plaats van de 25°C waarvoor de specificaties door de fabrikant zijn opgesteld).

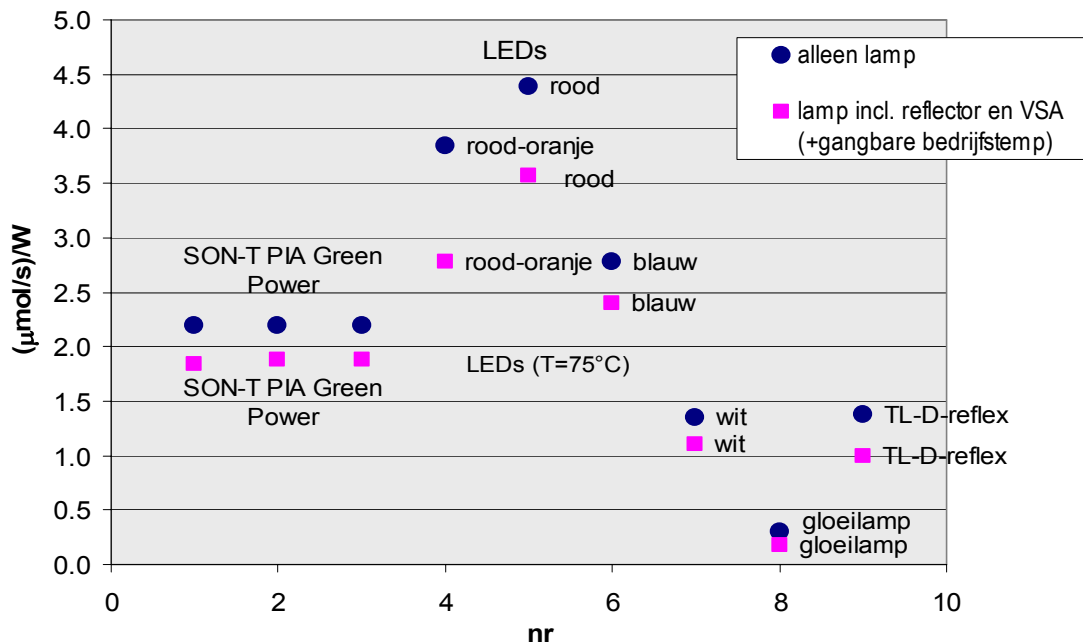
Op basis van de cijfers van losse lampen kunnen de volgende constatering worden gemaakt voor de huidige situatie:

- in de categorie LEDs zijn wat betreft fotonrendement (en dus energieverbruik bij belichtingstoepassingen) rode LEDs het beste (ca 1,1 ( $\mu\text{mol/s/W}$ ))
- rode LEDs zijn wat fotonrendement betreft veel beter dan gloeilampen (ca 0,3  $\mu\text{mol/s/W}$ ), maar nog iets slechter (circa 13%) dan TL-lampen (1,26 ( $\mu\text{mol/s/W}$ )), en blijven nog circa 40% achter bij hoge-druk natriumlampen (1,80 à 1,89 ( $\mu\text{mol/s/W}$ ))
- wordt naar het kostenniveau (investering in lamp uitgedrukt in EUR/( $\mu\text{mol/s}$ )) gekeken, dan is de beste LED momenteel nog een factor 95 à 120 duurder dan HD-natrium lampen, een factor 69 duurder dan gloeilampen en circa 22x duurder dan TL-verlichting.
- Als in plaats van naar het lampfotonrendement naar het systeem-fotonrendement gekeken wordt (roze vierkantjes), dan valt op dat de onderlinge rangschikking van de verschillende categorieën lampen niet verandert.



Figuur 4.1 Overzicht van het fotonrendement van verschillende typen lampen (blauw) en lampsystemen (roze). LEDs zijn anno 2004 de gloeilamp voorbijgestreefd en zitten bijna op het niveau van TL-lampen.

**fotonrendement 2010**



Figuur 4.2 Overzicht van het verwachte fotonrendement van verschillende typen lampen (blauw) en lampsystemen (roze) in 2010. Voor de LEDs is een groeicijfer voor de efficiëntie aangenomen van 25,9% per jaar. Voor hogedruk-natriumlampen is een groei tot 2,2 (µmol/s)/W in 2010 verondersteld (bron Philips). (Monochrome) LEDs zijn in dit scenario (qua energiegebruik) ook de TL-verlichting en de hogedruk-natrium lampen voorbijgestreefd.

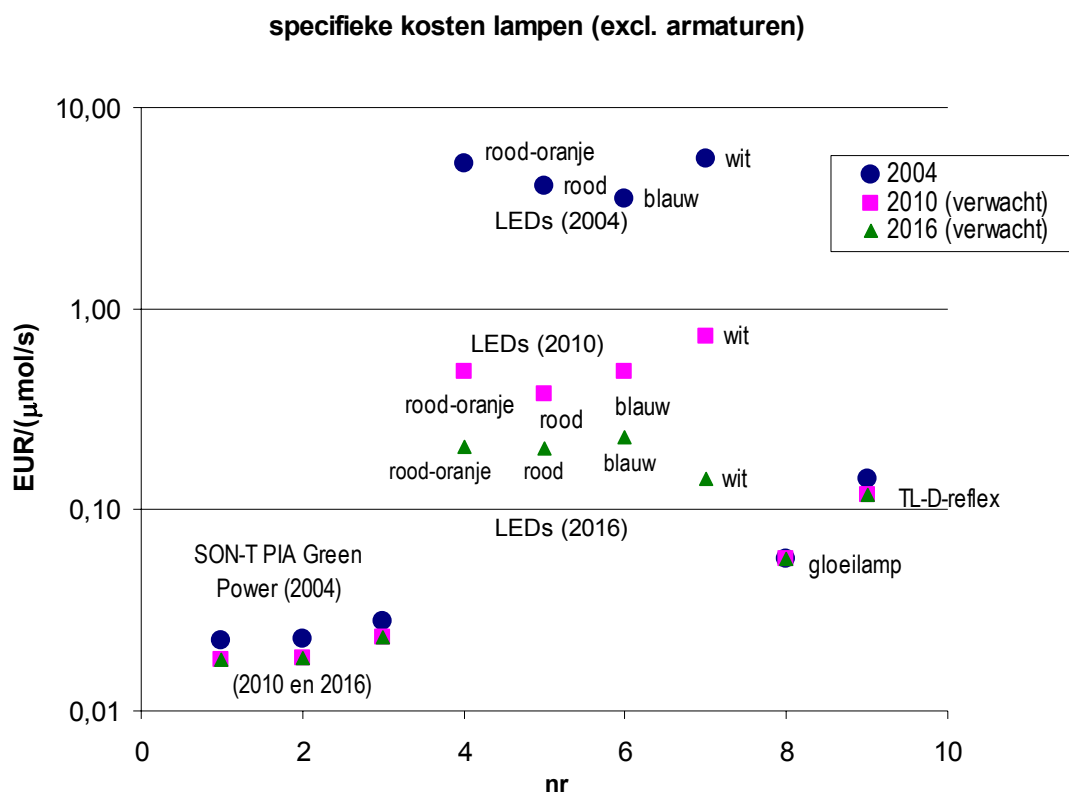
- Wel is het zo dat met name bij rode en oranje-rode LEDs het systeemrendement meer zakt dan bij de andere typen lampen en LEDs. Dit komt door het feit dat de LEDs in de praktijk bij significant hogere temperaturen zullen worden bedreven dan waarvoor de LED-specificaties zijn opgesteld (ca 75 in plaats van 25°C). Blauwe en witte LEDs hebben daar veel minder last van (zie paragraaf 3.5). De blauwe LED is hierdoor qua systeemrendement net zo goed als de rode LED geworden, ondanks het lagere lamprendement en het feit dat blauwlicht per eenheid energie minder fotonen bevat.

Figuur 4.2 geeft een grafisch overzicht van de verwachte situatie in 2010 voor het fotonrendement uitgaande van de hiervoor genoemde aannamen in onder meer groei van LED-efficiëntie<sup>4</sup> en de output per LED. Ook is verondersteld dat de efficiëntie van de voeding van

<sup>4</sup> De LED-efficiëntie kan niet onbeperkt groeien. In de berekeningen is een maximaal fotonrendement aangehouden van 3,7 (µmol/s)/W voor rode LEDs en 3,6, 2,8 respectievelijk 3,1 voor rood-oranje, blauwe en witte LEDs. Het stralingsrendement wordt daardoor beperkt tot circa 70%.

de LEDs zal stijgen van 80 naar 95%. Verder is aangenomen, dat van 2004 tot 2010 de matige relatieve output van rode LEDs bij hogere junction-temperaturen zal verbeteren (van 60 naar 90%), als gevolg van betere halfgeleidermaterialen. Voor de rood-oranje LED is een verbetering van 53 naar 80% verondersteld en voor de witte van 84 naar 90%. In de figuur is duidelijk te zien dat de gekleurde LEDs in dit scenario de TL-D maar ook de hogedruk-natriumlampen (en lampsystemen) qua fotonrendement zijn voorbijgestreefd. Zoals eerder aangegeven is voor de HD-natriumlampen aangenomen, dat er in de komende jaren nog een kleine verbetering in de specifieke micromolstroom zal optreden (tot 2,2 ( $\mu\text{mol/s/W}$ )).

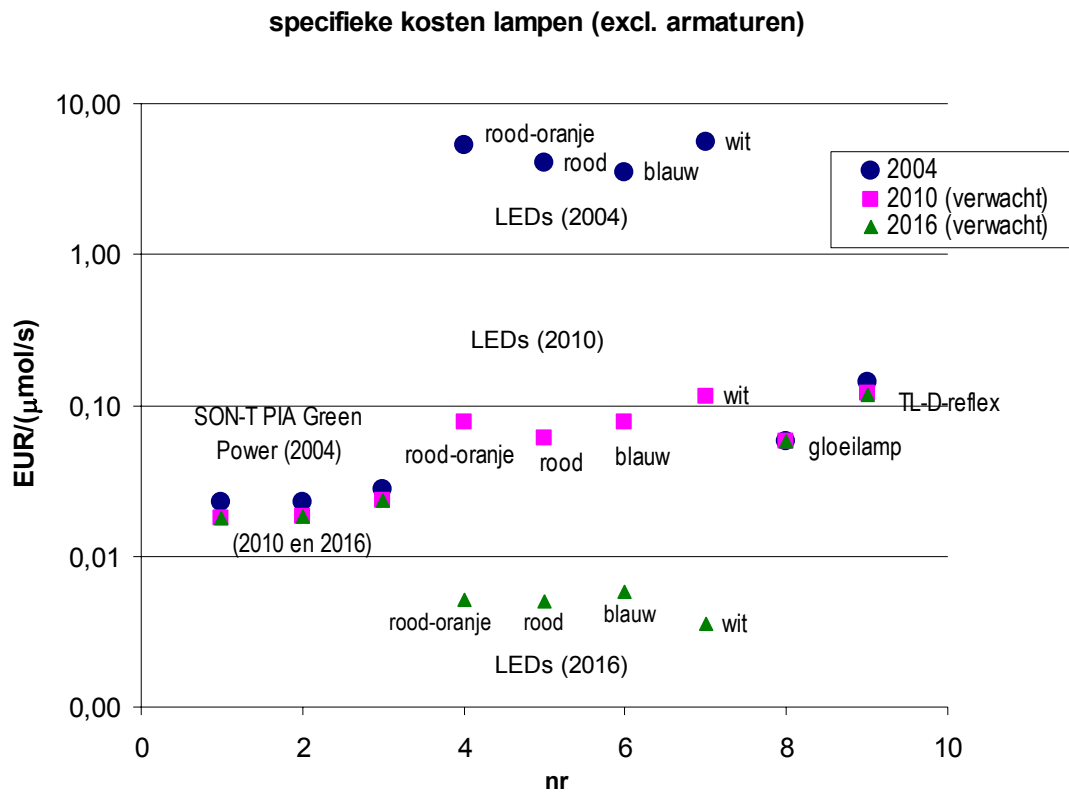
Figuur 4.3 geeft een overzicht van de specifieke kosten (uitgedrukt in  $\text{EUR}/(\mu\text{mol/s})$ ) van de verschillende lampen in de huidige situatie, en de verwachte waarde voor de jaren 2010 en 2016 uitgaande van de genoemde groeicijfers. De kosten van armaturen zijn hierin niet meegenomen. De verticale schaal is logaritmisch. Het blijkt dat in dit scenario de LEDs in 2016 – qua lampkosten – nog aanzienlijk duurder zijn dan hogedruk natrium lampen en ook duurder dan TL-verlichting. Overigens betekent dit niet dat LEDs niet interessant kunnen zijn, omdat hiervoor ook naar het energieverbruik, de levensduur, het onderhoud en de armatuurkosten moet worden gekeken ('total-cost-of-ownership').



Figuur 4.3 Overzicht van de (verwachte) specifieke kosten van verschillende typen lampen in 2004, 2010 en 2016. Voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 39% voor de LED-output. In dit scenario zijn de LEDs in 2016 nog aanzienlijk duurder dan de hogedruk-natrium lampen. (Het energieverbruik ligt echter lager, zie paragraaf 4.2.)

Ter vergelijking is ook de situatie gegeven waarbij de LED-output groeit in het tempo van de laatste jaren (89% per jaar, zie paragraaf 3.10). De resultaten zijn uitgezet in figuur 4.4. In dit scenario zijn de LEDs in 2010 ongeveer even duur per micromol als TL-D lampen en nog iets duurder dan hogedruk natriumlampen. In 2016 zijn ze ook de laatste voorbijgestreefd. Ook hier geldt dat de specifieke kosten alleen betrekking hebben op de lampen en niet op de armaturen.

In de volgende paragraaf wordt naar de “total-cost-of-ownership” (TCO) gekeken. De TCO van LEDs ten opzichte van die van een ander ver- of belichtingsstelsel bepaalt of LEDs een interessant alternatief vormen voor die toepassing.



Figuur 4.4 Overzicht van de (verwachte) specifieke kosten van verschillende typen lampen in 2004, 2010 en 2016. Voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 89% voor de output per LED. In dit scenario zijn de LEDs in 2010 ongeveer even duur als TL-lampen en nog iets duurder dan de hogedruk-natrium lampen. In 2016 zijn LEDs alle andere lichtbronnen voorbijgestreefd.

## 4.2 Total-cost-of-ownership

In deze paragraaf zal naar de “total-cost-of-ownership” (TCO) van LEDs versus die van hoge-druk natriumlampen worden gekeken. Tot de TCO worden in principe alle kosten (en eventuele opbrengsten) gerekend, die de tuinder maakt voor aanschaffen, bedienen en weer verwijderen van de belichtingssystemen. In deze studie zullen de volgende componenten worden meegenomen:

- kapitaalskosten
- energiekosten
- onderhoudskosten
- verwijderingskosten

### *Kapitaalskosten*

Hiertoe worden de kosten gerekend die te maken hebben met de benodigde investering in lampen, armaturen en bekabeling. De kapitaalskosten bestaan uit een deel afschrijving en een deel rente. Voor de berekening wordt ervan uitgegaan, dat de investeerder voor het aan te schaffen belichtingssysteem een annuïteitenlening afsluit met een looptijd gelijk aan de afschrijvingsperiode. De kapitaalskosten per jaar zijn dan de kosten van de annuïteit (die zelf weer bestaat uit een deel aflossing en een deel rente). De annuïteit is over de hele afschrijvingsperiode even hoog. Voor lamp en armatuur zullen in verband met de verschillende afschrijvingstermijnen aparte annuïteiten worden bepaald. (De restwaarde aan het eind van de afschrijving wordt op 0 gesteld).

### *Energiekosten*

Een groot deel van de TOC-kosten zal worden bepaald door het jaarlijkse elektriciteitsverbruik voor de lampen. Bij de berekening van de energiekosten wordt voor de overzichtelijkheid uitgegaan van een gemiddelde elektriciteitsprijs per kWh (als uitgangswaarde wordt een gemiddelde prijs van 0,05 EUR/kWh gehanteerd, met variaties naar onder en boven van 0,02 EUR/kWh). Voor aardgas wordt een commodity-prijs van 0,12 EUR/m<sup>3</sup> verondersteld (met een ‘hoog-waarde’ van 0,18 en een ‘laag-waarde’ van 0,10 EUR/m<sup>3</sup>).

De netto-energiekosten van belichting zullen lager liggen dan de elektriciteitskosten, omdat er door belichting wordt bespaard op het gasverbruik. De aan de lampen toegevoerde elektrische energie wordt direct of indirect voor het grootste deel omgezet in warmte, waardoor er minder met gas hoeft te worden bijverwarmd. Voor de berekening is aangenomen dat standaard 50% van de van verlichting afkomstige warmte nuttig kan worden gebruikt [18] en is berekend hoeveel gas hierdoor kan worden bespaard (uitgaande van warmte-opwekking met een ketel met een rendement van 98%). Ter bepaling van de invloed van het percentage nuttig warmtegebruik is ook gerekend met een lager en hoger percentage (20% respectievelijk 80%).



### *Onderhoudskosten*

Hiertoe kan worden gerekend het schoonmaken van reflectoren of lampenkappen en van de lampen zelf, het testen van condensatoren, controle van lampspanning en dergelijke, een en ander afhankelijk van het type belichting. Voor hoge-druk natrium assimilatiebelichting is gerekend met onderhoudskosten van 0,48 EUR/m<sup>2</sup> per jaar [15]. Voor LED-verlichting zal in eerste instantie worden uitgegaan van 50% van deze kosten. De echte onderhoudskosten van LED-gebaseerde assimilatiebelichting zijn nog niet bekend. LEDs hebben geen storingsgevoelige componenten zoals condensatoren. Ze zijn door de andere voeding ook minder gevoelig voor spanningsvariaties en hebben een veel langere technische levensduur dan HD-natriumlampen, zodat verwacht wordt dat de onderhoudskosten lager zullen liggen dan die van de laatstgenoemde. Om een idee te krijgen van het effect van de onderhoudskosten op de totale TOC, wordt alternatief ook gerekend met onderhoudskosten van 20 respectievelijk 100% van die van HD-natriumbelichting.

### *Verwijderingskosten*

Kosten voor het demonteren en afvoeren van de belichtingssystemen. We zijn er vooralsnog van uitgegaan dat de kosten van het demonteren en afvoeren kan worden gecompenseerd door de restwaarde die de lampen of armaturen nog vertegenwoordigen voor de inzamelende partij. De verwijderingskosten zijn derhalve gesteld op 0.

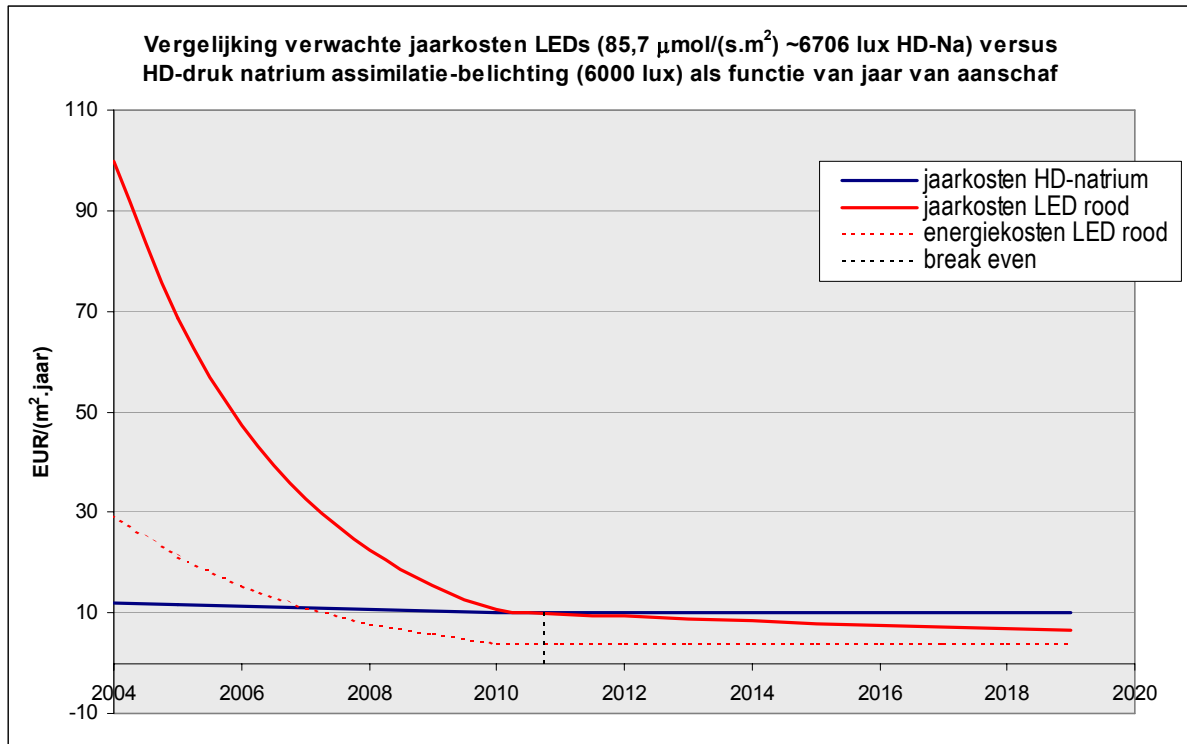
(Overige) aannamen:

- verlichtingsniveau: 6000 lux (voor HD-natrium lampen). Dit correspondeert (bij de 600 W/400V Green Power lampen) met circa 76,7 (μmol/s)/m<sup>2</sup>. De LED-verlichting zal in principe zodanig moeten worden gekozen dat dezelfde micromolflux wordt geleverd (bij rode LEDs correspondeert 76,7 (μmol/s)/m<sup>2</sup> in lux met een veel lagere waarde: circa 2970 lux). In de TCO-berekeningen wordt voor de LEDs echter uitgaan van een wat hogere (initiële) micromolflux. Dit heeft te maken met de langere technische levensduur van LEDs (zie hieronder)
- aantal belichtingsuren: 4000 per jaar
- afschrijving HD-natrium lampen: 3 jaar (ca 10.000 à 12.000 branduren)
- afschrijving armaturen HD-natrium: 10 jaar [19]
- afschrijving LEDs (inclusief armatuur): 11 jaar (ca 40.000 à 50.000 branduren; de technische levensduur is waarschijnlijk nog langer, zie § 3.8)
- technisch gaan LEDs langer mee dan HD-natrium-lampen. De relatieve lichtoutput zal echter met het aantal branduren afnemen. Er wordt aangenomen dat de relatieve output van moderne hoog-vermogen LEDs na 44.000 uur nog 70% van de initiële waarde is (§ 3.8). HD-natrium lampen hebben (bij vervanging) na 10.000 à 12.000 uur nog een

relatieve output van circa 90%. Als voor beide typen lampen hetzelfde initiële lichtniveau zou worden gekozen, dan zou gemiddeld over de tijd gezien de HD-natrium lampen een hoger lichtniveau hebben. Om tot een gelijk gemiddeld lichtniveau te komen, zal voor de LED-belichting een hoger initieel lichtniveau worden aangenomen dan voor de HD-natriumlampen. Bij de aangenomen levensduur en degeneratie van LEDs respectievelijk HD-natrium is voor LEDs een initieel lichtniveau van circa 112% nodig van dat van de HD-natriumlampen om hetzelfde gemiddelde niveau te verkrijgen (bij een lineair veronderstelde degeneratie is het gemiddelde lichtniveau dan 95% van de initiële waarde van HD-natrium). De initiële micromolflux van LEDs wordt derhalve gekozen op 85,7 ( $\mu\text{mol/s}/\text{m}^2$ ).

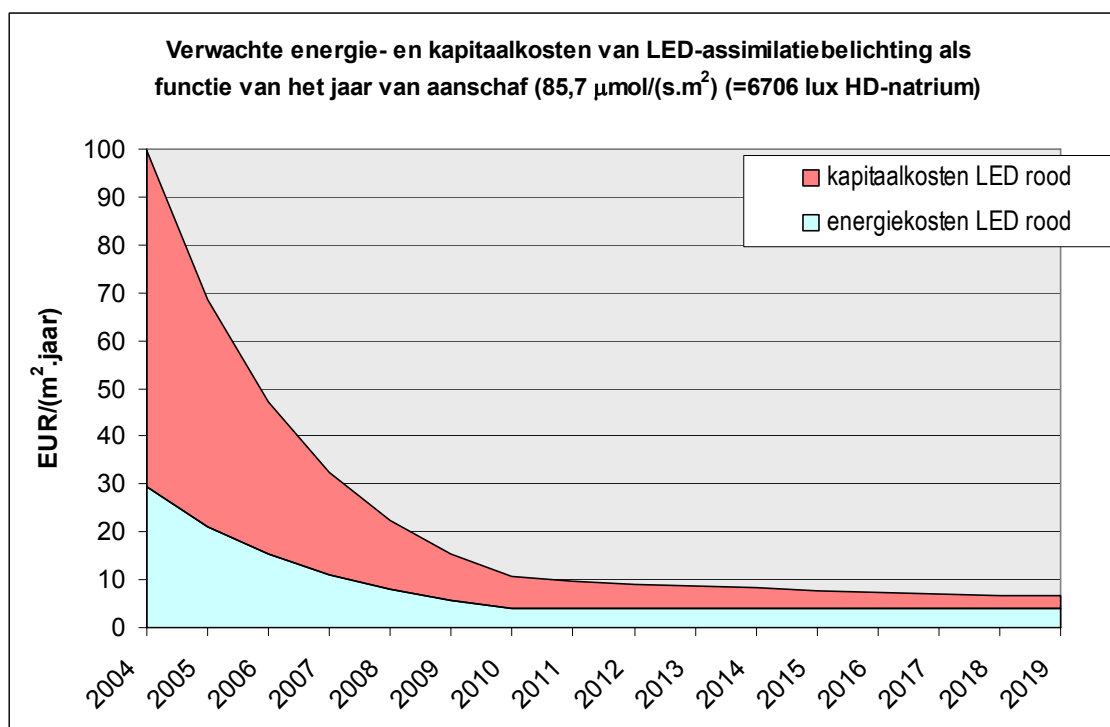
- geen inflatie
- rente: 5%
- prijs (rode) LEDs bij aankoop van 500.000 stuks of meer: circa 2,34 EUR/( $\mu\text{mol/s}$ )
- kosten van armatuur inclusief voeding, bekabeling en eventuele extra LED-optiek van het LED-belichtingssysteem bedraagt 40% van totale systeemprijs (gebaseerd op analyse van de prijs van een 72 LEDs lampsysteem). (In de gevoeligheidsanalyse wordt ook 20% respectievelijk 60% gebruikt, om de invloed van armatuuuraandeel helder te krijgen.)

Om te bepalen of, en zo ja wanneer, LED-belichting aantrekkelijker wordt dan hoge-druk natriumbelichting, zijn voor beide typen belichting de 'total-cost-of-ownership' bepaald per jaar als functie van het jaar van aanschaf over een periode van 2004 tot 2019. In figuur 4.5 staan de resultaten van het scenario "historische groei", waarbij de LED-efficiëntie toeneemt met 25,9% per jaar en LED-output met 39% per jaar. Voor hoge-druk natriumlampen wordt overigens ook een groei in het fotonrendement aangenomen (van 1,89 naar 2,2 ( $\mu\text{mol/s}/\text{W}$ ) in de periode van 2004 tot 2010). De rode lijn representeert de TCO-jaarkosten van een LED-belichtingssysteem op basis van rode LEDs. De blauwe lijn geeft die van hoge-druk natrium (SON-T 600W, 400V) belichting. De rode onderbroken lijn geeft de jaarlijkse energiekosten van het LED-systeem. Uit de figuur blijkt duidelijk dat de eerste jaren LED-belichting nog veel duurder is dan hoge-druk natrium (in 2004 een circa een factor 10). De TCO van LEDs daalt de eerste 6 jaar sterk en daarna wat minder. Na 6,7 jaar (2010-2011) treedt er een 'break-even' situatie op. De TCO's van beide systemen zijn dan aan elkaar gelijk. In de jaren daarna wordt TCO van de LEDs lager dan die van HD-natrium. In dit scenario wordt het dus vanaf ongeveer 2011 aantrekkelijk om LED-belichting te installeren in plaats van HD-natrium.



Figuur 4.5 Total-cost-of-ownership per m<sup>2</sup> per jaar van (rode) LED-belichting (rode lijn) en hogedruk natrium belichting (blauwe lijn) als functie van het jaar van aanschaf tussen 2004 tot 2019. Voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 39% voor de output per LED. In dit "historische groei" scenario bereikt de LED-belichting tussen 2010 en 2011 dezelfde TCO als die van hogedruk-natriumbelichting. De onderbroken rode lijn geeft de jaarlijkse energiekosten van de LEDs-weer.

In figuur 4.6 respectievelijk figuur 4.7 zijn voor de dezelfde situatie als hierboven de kapitaalskosten en de energiekosten (cumulatief) uitgezet voor respectievelijk de LED-belichting en de hogedruk-natriumbelichting als functie van het jaar van aanschaf. Uit figuur 4.6 blijkt duidelijk, dat bij LED-belichting de eerste jaren de kapitaalskosten de total-cost-of-ownership domineren. In de break-even situatie (2011) bedragen de energiekosten circa 40% en de kapitaalskosten circa 60% van de TCO. Bij HD-natriumlampen bedragen de energiekosten na 2010 circa 70% van de TCO. Het energieverbruik van de LED-belichting daalt de eerste 6 jaar en daarna niet meer. Dit komt omdat het rendement na 6 jaar stijgen dan al zo hoog geworden is, dat een verdere groei niet meer waarschijnlijk is (systeemrendement van circa 70%).

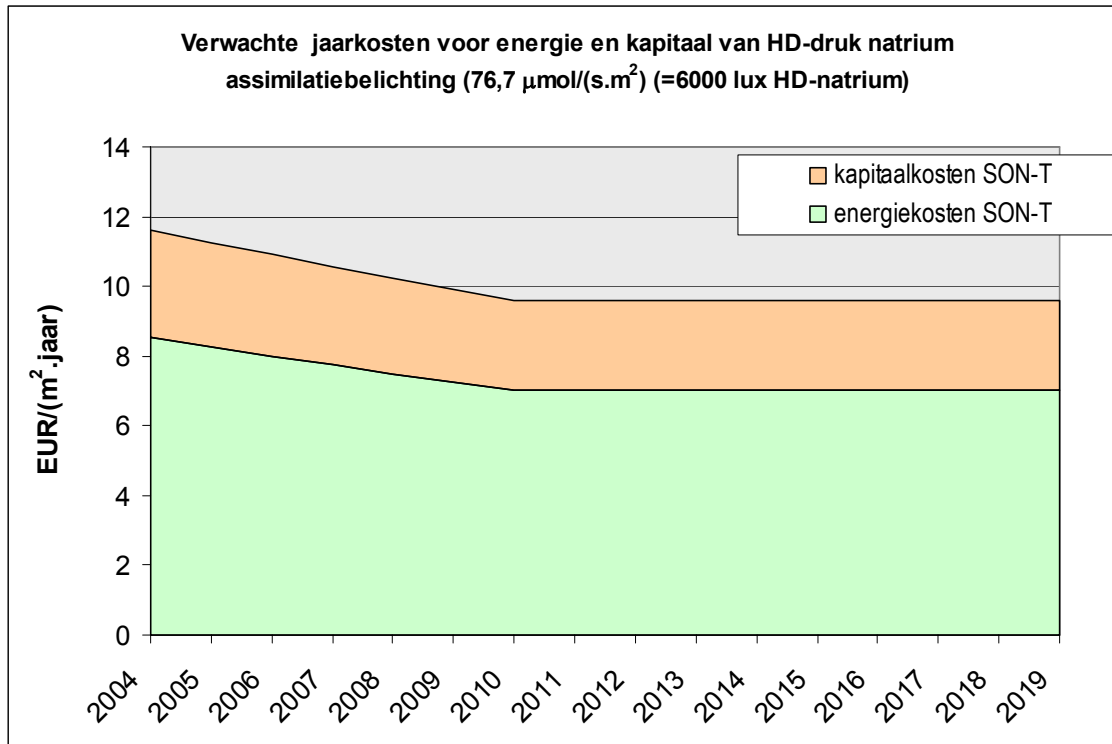


Figuur 4.6 Energiekosten en kapitaalskosten per m<sup>2</sup> per jaar van LED-belichting als functie van het jaar van aanschaf in de periode van 2004 tot 2019. Voor de LEDs zijn groeicijfers aangenomen van 25,9% per jaar voor de efficiëntie en 39% voor de output per LED.

Om een beeld te krijgen van de bandbreedte van het break-even jaar van de TCO's zijn een aantal andere scenario's geformuleerd met andere groeicijfers. De scenario's zijn in tabel 4.2 gespecificeerd. In de vijfde kolom is per scenario het aantal jaren na 2004 gegeven, waarin de break-even situatie wordt verwacht. De laatste kolom geeft de berekende break-even jaren zelf. Het blijkt dat de break-evens liggen tussen circa 4 en 12 jaar vanaf nu (april 2004).

Tabel 4.2 Overzicht van scenario's met de jaren waarin een 'break-even' wordt verwacht voor de total-cost-of-ownership van LED-belichting versus hogedruk-natriumbelichting.

Scenario	groei LED-efficiëntie	groei LED-output	opmerking	jaren na 2004	TCO break-even jaar
A. historische groei	25,9% per jaar	39% per jaar	30-jarige gemiddelde	6,7	2010-2011
B. versnelde groei	25,9% per jaar	89% per jaar	Luxeon-lijn sinds 1998	4,4	2008-2009
C. middelsnelle outputgroei	25,9% per jaar	59% per jaar	tussen A en B	5,1	2009-2010
D. lineaire groei LED-efficiëntie	14 lumen/jr	39% per jaar	uit product road map Luxeon 2002 - 2005	12,1	2016-2017
E. lineaire groei LED-ffic.+ middelsnelle output groei	14 lumen/jr	59% per jaar	uit product road map Luxeon 2002 - 2005	8,1	2012-2013



Figuur 4.7 Energiekosten en kapitaalskosten per m<sup>2</sup> per jaar van hogedruk-natriumbelichting als functie van het jaar van aanschaf in de periode van 2004 tot 2019. Voor het fotonrendement van de lampen is een verbetering van 1,89 naar 2,2 ( $\mu\text{mol}/\text{s}/\text{W}$ ) in de periode tussen 2004 en 2010 aangenomen.

### Reductie primair energieverbruik

Door de toename van de efficiëntie wordt het elektriciteitsverbruik in de loop van de jaren lager. Om het effect hiervan aan te geven is een berekening gemaakt van de reductie van het primaire-energieverbruik. Voor de bepaling van het primaire-energieverbruik is het elektriciteitsverbruik omgerekend naar primaire energie uitgaande van elektriciteitsproductie in een centrale met een gemiddeld rendement van 41,7% (op onderwaarde, inclusief transport en distributieverliezen). Op het primaire-energieverbruik van de elektriciteit is de primaire energie die is bespaard door reductie van het aardgasverbruik voor verwarming, in mindering gebracht. Onderstaande tabel geeft de procentuele besparing op het primaire-energieverbruik van LED-verlichting ten opzichte van die van HD-natrium op het break-even moment voor de total-cost-of-ownership. Tevens is het “energetische break-even” jaar bepaald, waarbij de LED-belichting evenveel primaire energie verbruikt als HD-natrium, en verder de energiebesparing als gevolg van LED-belichting over 10 jaar.

Tabel 4.3 Verschillende scenario's met besparing op het primaire-energieverbruik in de (TCO) break-even situatie (kolom 5). Kolom 6 geeft het aantal jaren na 2004 waarin een 'energetische break-even' wordt verwacht. De laatste kolom geeft de verwachte besparing op primaire energie (door toepassing van LEDs in plaats van HD-natrium) over 10 jaar (2014).

Scenario	groei LED-efficiëntie	groei LED-output	TCO break-even jaren na 2004	besparing prim.energie bij TCO break-even	energetische break even, jaren na 2004	prim.energie besparing a.g.v. LEDs over 10 jaar
A. historische groei	25,9% p.jr	39% p.jr	6,7	43%	4,2	43%
B. versnelde groei	25,9% p.jr	89% p.jr	4,4	5,3%	4,2	43%
C. middelsnelle outputgroei	25,9% p.jr	59% p.jr	5,1	23%	4,2	43%
D. lineaire groei LED-efficiëntie	14 lumen/jr	39% p.jr	12,1	24%	7,9	13%
E. lineaire groei LED-efficiëntie middelsnelle output groei	14 lumen/jr	59% p.jr	8,1	1%	7,9	13%

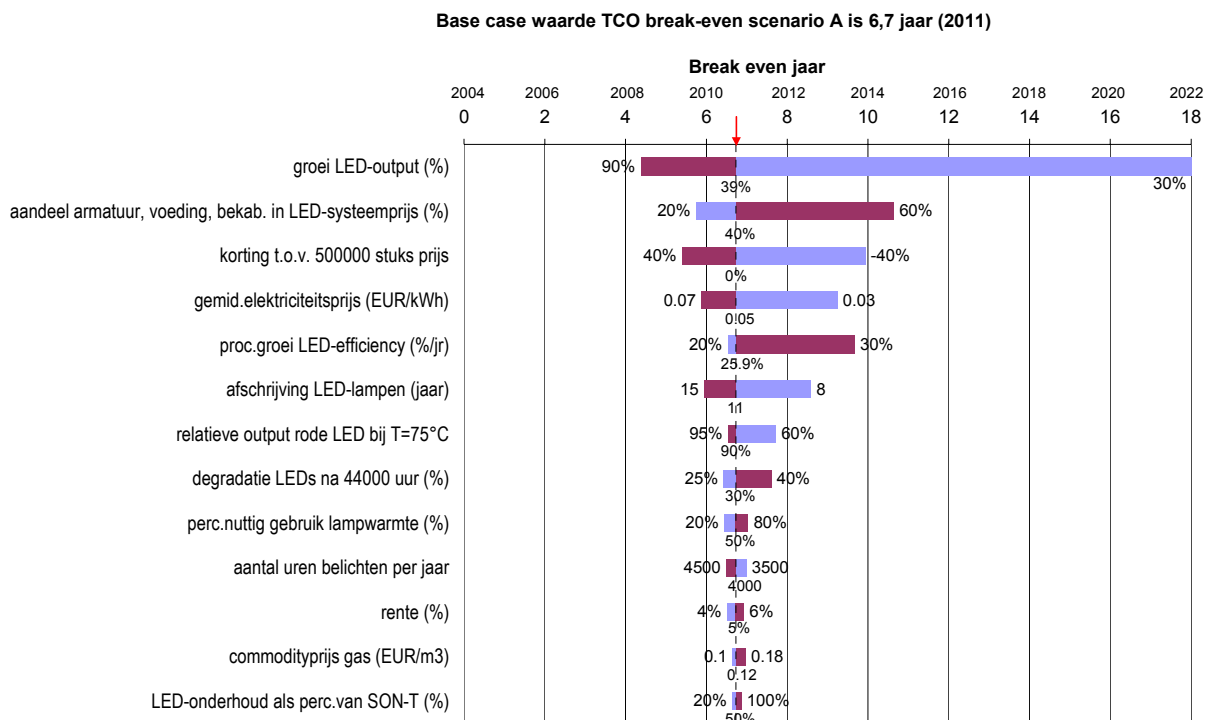
Uit de tabel blijkt dat in de *TCO break-even situatie* er altijd een besparing op het primaire energieverbruik optreedt (dit betekent overigens dat de kapitaalskosten van LEDs in die situatie nog iets hoger zullen zijn dan die van HD-natrium). Het moment waarop een *energetische break-even* situatie optreedt, hangt alleen af van de aanname over de groei in de LED-efficiëntie. De maximale besparing die op primaire energie kan worden gehaald is circa 43%. Bij een groei van de LED-efficiëntie van 25,9% per jaar treedt dit al op na circa 6,2 jaar. Bij een groei van 14 lumen/jaar is dit (pas) na circa 18 jaar. De maximale besparing hangt overigens af van de aanname ten aanzien van de maximale fotonflux die kan worden gehaald (3,7 ( $\mu\text{mol/s}$ )/W voor rode LEDs, overeenkomend met een PAR-rendement van circa 70%). In de toekomst moet blijken of dit kan worden gehaald.

#### 4.3 Gevoeligheidsanalyse break-even jaar

In deze paragraaf zal worden nagegaan, hoe gevoelig het berekende TCO-break-even jaar is voor afwijkingen in de belangrijkste aannamen die zijn gemaakt. Hiertoe is in de berekeningen steeds één aanname gevarieerd met achtereenvolgens een lagere en een hogere waarde dan de 'best-estimate'. De lagere en hogere waarde zijn zodanig gekozen, dat een bereik wordt verkregen, waarbinnen de waarde zich naar verwachting (van de onderzoeker) met grote waarschijnlijkheid zal bevinden. De resultaten van de variatieberekeningen zijn uitgezet in een zogenaamd 'Tornado-diagram'. Hierin zijn de verschillende variaties zodanig geordend, dat de variatie met het grootste effect op de TCO-break-even-waarde bovenin staat en die met het kleinste effect onderaan. In elke regel wordt middels een balk aangegeven hoeveel de 'midden-waarde' (behorend bij de 'best-estimate' waarden van de aanna-

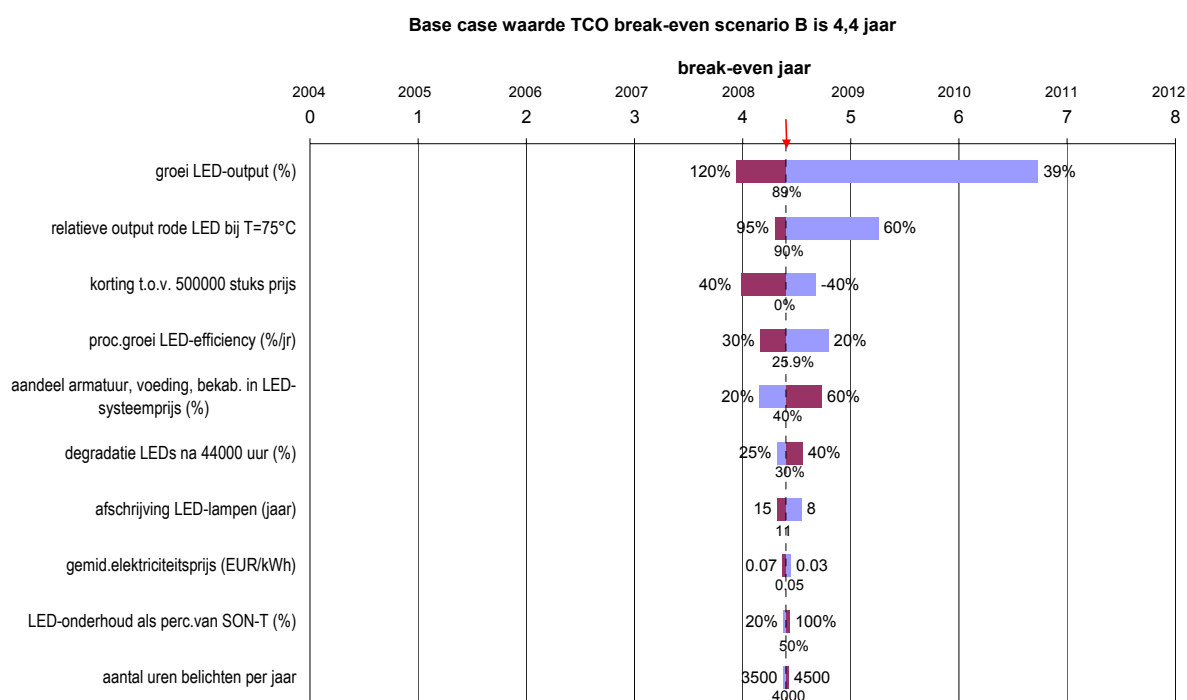
men) verandert, wanneer de betreffende grootheid de hoogste waarde van het bereik aanneemt (paarse balk), respectievelijk de laagste waarde (lichtblauwe balk).

Figuur 4.8 geeft het tornadodiagram behorend bij het 'historische groei' scenario (A). Hieruit blijkt, dat het TCO-break-even jaar het meest gevoelig is voor de aanname van de groei in de LED-output. Groeit de LED-output 'slechts' 30% per jaar dan neemt het TCO-break-even jaar toe met circa 11 jaar tot 2022. (Deze situatie betekent dat de LED-output hoofdzakelijk alleen maar groeit door verbetering van de LED-efficiëntie en maar weinig door grotere LED-chips). Als de LED-output 90% per jaar stijgt, dan daalt het TCO-break-even naar circa 4,4 jaar. (Deze situatie is nagenoeg het versnelde groei scenario B). De invloedsfactor met de tweede gevoeligheid is het aandeel armatuurkosten (met voeding en bekabeling) van de totale LED-systeemkosten. Bedragen deze 20% van de totaalkosten (i.p.v. 40%) dan daalt het break-even punt met 1 jaar naar 2009-2010. Derde op de gevoeligheidsranglijst is de korting t.o.v. 500.000 stuks prijs (dit is de korting die mogelijk nog kan worden bedongen bij aankoop van zeer grote aantallen (bijvoorbeeld > 5 miljoen) ten opzichte van de '500.000 stuks prijs'. (Dit percentage bepaalt samen met de 500.000-stuks-prijs (uit richtofferte) het actuele (2004) LED-prijsniveau voor grootschalige toepassing.) Indien 40% korting wordt verkregen, dan daalt het break-even punt met 1,3 jaar naar 2009 à 2010. Bij -40% korting (d.w.z. duurdere LEDs dan nu) dan stijgt het break-evenpunt met 3,2 jaar naar bijna 2014. De overige invloedsfactoren en hun effect kunnen verder uit figuur 4.8 worden afgelezen.



Figuur 4.8 Tornadodiagram voor het break-even jaar aangaande de total-cost-of-ownership van LEDs en HD-natriumbelichting voor het 'historische groei' scenario A (LED-efficiëntie met 25,9% per jaar, LED-output 39% per jaar).

In figuur 4.9 is het tornado-diagram voor scenario B gegeven (versnelde outputgroei). Uit dit diagram blijkt dat ook hier de groei in LED-output de meest dominante factor is. Als de LED-output niet met 89% groeit maar met 39% dan wordt het TCO break-even ca 2,3 jaar hoger (en gaat dan weer over in het 'historische groei scenario' A). Bij een nog hogere groei van 120% per jaar daalt het break-even jaar met een half jaar tot 3,9 jaar. De tweede factor op de gevoeligheidsladder is de relatieve output van rode LEDs bij een temperatuur van 75°C. Blijft (zoals momenteel het geval is) de relatieve output bij die temperatuur 60% van de waarde bij 25°C, dan stijgt het break-even punt bijna een jaar. De korting t.o.v. de 500.000-stuks prijs' is de derde factor qua gevoeligheid. Het effect van een 40% afwijking blijft echter beperkt tot minder dan een half jaar. Ook voor de overige invloedsfactoren geldt dat het effect van de variaties minder dan 1 jaar is. Dit betekent dat, als de versnelde groei van de LED-output zich in het zelfde tempo doorzet als de laatste 5 jaar, het zeer waarschijnlijk is, dat LED-belichting binnen circa 5 jaar een aantrekkelijk alternatief is voor hogedruk-natriumbelichting.

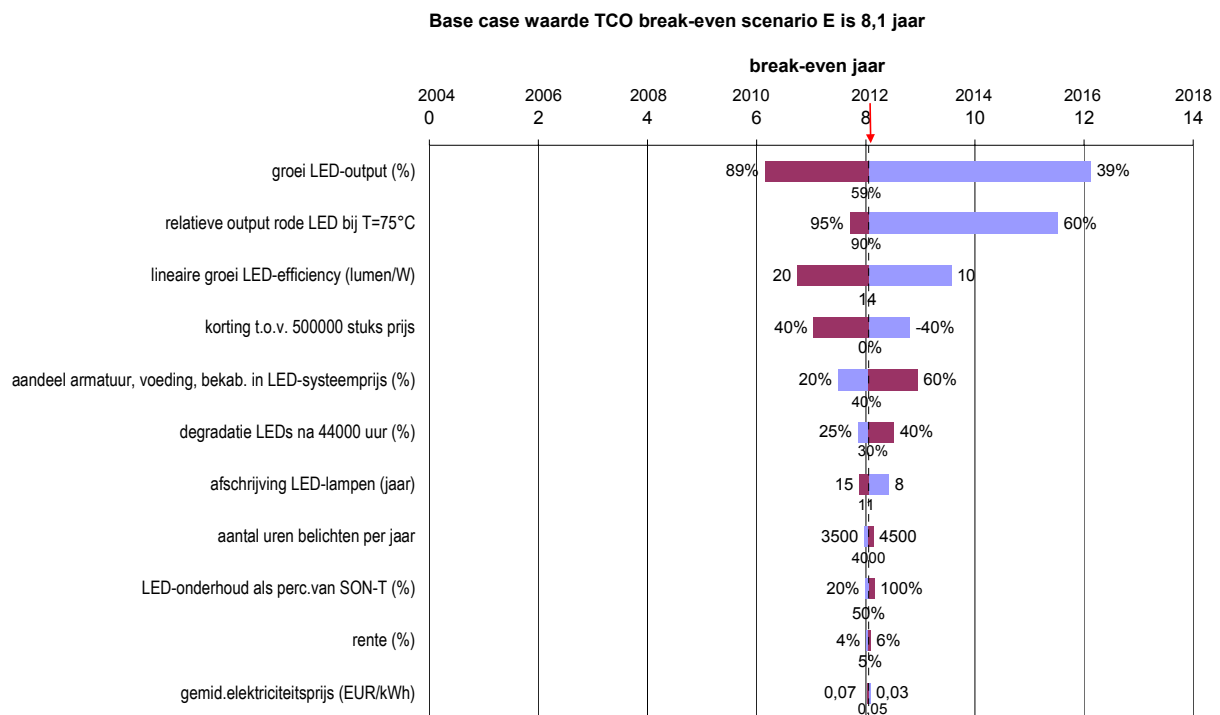


Figuur 4.9 Tornadodiagram voor het break-even jaar aangaande de total-cost-of-ownership van LEDs en HD-natriumbelichting voor het 'versnelde groei' scenario B (LED-efficiëntie met 25,9% per jaar, LED-output 89% per jaar).

Figuur 4.10 geeft het tornadodiagram van scenario E waarbij de efficiëntie van de LED niet (exponentieel) met 25,9% per jaar stijgt, maar langzamer (lineair) met 14 lumen per jaar (zie figuur 3.24) en de LED-output 'middelmatisch snel' (59% per jaar). Ook nu heeft de groei in de LED-output de grootste invloed op het TCO-break-evenjaar. Tweede is de relatieve output



van rode LEDs bij T=75 °C. De aangenomen variatie in de groei van de LED-efficiëntie komt op de derde plaats. Bij een stijging van 20 lumen per jaar in plaats van 14, daalt de break-even termijn met circa 1,4 jaar. Bij een stijging van slechts 10 lumen per jaar wordt die circa 1,5 jaar langer. Vierde is korting op de 500.000 stuksprijs. Een 40% lagere (start)prijs verkort het break-even punt met circa 1 jaar. Alle andere variaties hebben een effect van minder dan een jaar.



Figuur 4.10 Tornadodiagram voor het break-even jaar aangaande de total-cost-of-ownership van LEDs en HD-natriumbelichting voor scenario E (lineaire groei in LED-efficiëntie met 14 lumen per jaar en groei van LED-output met (middelmatic hog) 59% per jaar).

## 4.4 Toepassingsmogelijkheden/perspectief LEDs

### 4.4.1 Résumé (algemene) voordelen van LEDs

- energie-efficient (nu al in vergelijking met gloeilampen en halogeen en in de toekomst naar verwachting ook in vergelijking met fluorescentielampen en natriumlampen)
- wit licht mogelijk (door geschikte fosforcoatings of door combinatie van rode, groene en blauwe LEDs; door toepassing van rode, groene en blauwe LEDs kunnen eigen kleuren worden gemengd of wit licht met een specifieke kleurtemperatuur worden gemaakt)

- geen UV of IR in de lichtstraal (geen UV: biologisch veilig; geen IR: koude lichtstraal; daardoor zijn in principe hogere lichtintensiteiten mogelijk alvorens verbranding van het blad optreedt)
- volledig dimbaar (van 0 tot max): belichting kan hiermee beter worden afgestemd op de lichtbehoefte
- laag-voltage gelijkspanning (elektrisch zeer veilig, geen harmonischen op lichtnet zoals bij HD-natrium, mogelijkheid om direct gelijkspanningsbronnen te gebruiken (zonder DC/AC-omvormer), zoals bijvoorbeeld brandstofcellen, die naar verwachting in de nabije toekomst interessant zullen worden als hoog-rendement WK-systeem)
- door de relatief eenvoudige gelijkstroomvoeding is de lichtopbrengst van een LED ongevoelig voor variaties in de primaire voedingsspanning (dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld hogedruknatriumlampen waar bij 230 V lampen een 10 V lagere netspanning leidt tot circa 15 à 18 % minder licht)
- onmiddellijk licht (geen opwarmtijd) (minder dan 100 ns)
- lange levensduur (verwachting 100.000 uur)
- beperkte degradatie
- op termijn lagere 'total-cost-of-ownership' verwacht (dit is nu al het geval bij bepaalde niche-markten, zoals verkeerslichten).

#### 4.4.2 Toepassingsmogelijkheden LEDs in de glastuinbouw

*Nu:* het prijsniveau is anno 2004 nog zo hoog dat toepassingen binnen de tuinbouw op dit moment nog niet rendabel zijn.

*Over enkele jaren:* niche markten voor LEDs: er kan worden gedacht aan additionele belichting voor bepaalde typen potplanten, bijvoorbeeld additioneel belichten met een bepaalde kleur licht voor het strekken van orchideeën.

*Straks (over 5 à 15 jaar):*

LED-belichting wordt een alternatief voor HD-natrium assimilatiebelichting, mits de stijgende trend in de efficiëntie (in  $\mu\text{mol/s/W}$ ) zich doorzet en er een voldoende verdere kostenverlaging plaats vindt. Dit laatste kan redelijker wijs worden verwacht, omdat de lichtoutput van individuele LEDs al 35 jaar gestaag – met gemiddeld 39% per jaar - toeneemt en de groei door nieuwe typen LEDs de laatste 5 jaar nog eens is versneld. De verwachting is dat die stijging nog wel een aantal jaren doorgaat. De verder ontwikkelingen worden vooral gedreven door de vele toepassingsmogelijkheden en de achterliggende enorme markten die in het verschiet liggen. Ervan uitgaande dat de kostprijs per LED ongeveer even groot blijft, maar de lichtoutput sterk toeneemt (vergelijk dit met computer IC's: functionaliteit neemt al jaren toe,

maar de prijs blijft min of meer gelijk), dan betekent dit, dat de kosten per  $\mu\text{mol/s}$  omgekeerd evenredig met toename van de lichtoutput per LED zullen dalen. De lichtoutput neemt toe door verbetering van de efficiëntie van de LED-chip en verder door een optimalisatie van de lichtuitkoppeling en het thermisch ontwerp en door een vergroting van het LED-chip-oppervlak per LED. Naar verwachting is nog een verdere verlaging van de prijs per LED te verwachten als de LEDs echt als massaproduct worden geproduceerd, op een productielijn waarbij het hele productieproces is geoptimaliseerd. Ook mag worden verwacht, dat typen LEDs die al wat langer op de markt zijn, goedkoper zullen worden, wanneer er nieuwe typen op de markt komen en/of de ontwikkelkosten zijn terugverdiend.

### *Speciale toepassingen LEDs in glastuinbouw*

#### *Meerlagenteelt*

De geringe inbouwdiepte van LEDs en OLEDs biedt mogelijkheden de lampen te gebruiken als lichtbron in meerlagenteelten. Nu worden daarvoor meestal fluorescentie-oppervlaktestralers gebruikt (TL-lampen). Bij meerlagenteelt lijken vooral OLEDs op termijn goede mogelijkheden te bieden. OLEDs zijn dunne vellen van plastic-achtig materiaal die licht uitzenden, als ze worden aangestuurd met elektriciteit (zie figuur 3.11). Vanwege hun flexibiliteit kunnen ze in de toekomst naar verwachting 'op de rol' worden geproduceerd. Voor een toepassing zou een tuinder de benodigde hoeveelheid van de rol kunnen nemen en deze permanent of tijdelijk vlak boven het gewas in de verschillende teeltlagen kunnen aanbrengen. Wat het lichtniveau betreft, is de verwachting dat de lichtniveaus die binnen 5 jaar gehaald worden, voldoende zijn voor assimilatiebelichting. In een laboratoriumsituatie heeft General Electric nu al een vlak OLED-paneel geproduceerd met een oppervlak van  $0,37 \text{ m}^2$ , een lichtstroom van 1200 lumen (en een lichtrendement van  $15 \text{ lumen/W}_e$ ). Onder verwaarlozing van randeffecten betekent dit een lichtniveau van circa 3250 lux (er is nog geen micromol informatie beschikbaar). In 3 jaar tijd is het lichtrendement met een factor 4 toegenomen en de lichtoutput met een factor 600. De nu al mogelijke verlichtingssterkte van 3250 lux is voor assimilatiebelichting meestal aan de lage kant. Bij een verdubbeling hiervan is het belichtingsniveau echter voor veel belichtingstoepassingen wel voldoende. Deze groei in de lichtoutput zal naar verwachting binnen een paar jaar worden gerealiseerd. Het lichtrendement is echter nog ongeveer een factor 4 (à 5) te laag om energetisch te kunnen concurreren met TL-verlichting. Deze heeft uitgaande van een 58 W TL-lamp met voorschakelapparaat en een armatuurrendement van 80% een netto lichtrendement van circa  $60 \text{ lumen/W}_e$ . Mocht de groei in het lichtrendement van de laatste 3 jaar zich voorzetten, dan zou over 3 à 4 jaar al een OLED kunnen bestaan die (energetisch) kan concurreren met TL-belichting. Verder is natuurlijk het prijsniveau van belang. Het huidige en toekomstige prijsniveau van deze OLEDs is op dit moment nog onduidelijk. Veel zal afhangen van hoe grootschalig de produc-

tie zal worden. De OLED leent zich door zijn opbouw en materialen beter voor goedkope massaproductie dan de op chips gebaseerde LEDs. De verwachtingen zijn dan ook hooggespannen. Behalve de verbetering van het lichtrendement is ook de levensduur van de OLEDs nog een belangrijk punt van aandacht.

#### *Lichtgevend schermdoek?*

Wellicht kunnen OLEDs over een aantal jaren zelfs als lichtgevend schermdoek worden gebruikt. Aan de bovenzijde zou dan een (de) ondoorzichtige laag moeten komen, waardoor er geen uitstraling naar boven is, zodat overlast door lichtuitstoot naar buiten wordt voorkomen. Aan de onderzijde straalt het OLED-scherm een gelijkmatige lichtstroom uit, zodat het gewas egaal belicht wordt. Deze toepassing stelt vanwege het veelvuldig openen en sluiten hoge eisen aan de flexibiliteit van de OLEDs. Verder zijn mogelijk extra eisen te verwachten in verband met het doorlaten van vocht.

#### *Lichtgevend gronddoek?*

OLEDs die als een doek van een rol kunnen worden gehaald, zouden naast de hiervoor genoemde toepassingen ook mogelijkheden bieden als lichtgevend gronddoek. Of dit een zinvolle toepassing is, moet nader worden onderzocht. Een belangrijke vraag is of het licht gezien de richting van waaruit het komt – van onderen – efficiënt door de plant kan worden benut en verder of de bladstand niet nadelig wordt beïnvloed.

### **4.4.3 Lichtonderschepping**

Een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp van LED-armaturen als vervanging van de huidige hogedruknatriumlampen dient het aspect lichtonderschepping te zijn. Daar er op dit moment (anno 2004) nog geen armaturen voor LED-assimilatiebelichting zijn ontwikkeld, is er over de praktijk ten aanzien van dit aspect nog weinig te zeggen. LEDs bieden de ontwerper in potentie wel goede mogelijkheden. (Anorganische) LEDs zijn kleine (bij benadering) punt-lichtbronnen, waarmee talrijke geometrische combinaties kunnen worden gemaakt. Verder zijn er door de beschikbaarheid van verschillende LED-lenzen als onderdeel van de LED-behuizing (eventueel aangevuld met externe optiek) verschillende stralingspatronen mogelijk (zie paragraaf 3.4.2): van (zeer) smalle bundels tot 'breedstralers'. Hiermee zijn de elementen voorhanden om lange, smalle, lineaire "LED-arrays" te maken (met een adequate lichtverdeling), die (bijvoorbeeld) gemonteerd onder de goten van de kas nauwelijks lichtonderschepping hoeven te hebben. (In die oplossing zou de goot wellicht nog kunnen dienen voor het afvoeren van de gedissipeerde warmte, waarbij natuurlijk nog wel moet worden nagegaan of dit energetisch de verstandigste oplossing is). Voor creatieve ontwikkelaars ligt hier nog een uitdaging (en een in potentie aanzienlijke markt).

## 5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 Conclusies

#### *Energie-efficiëntie*

- Qua lichtrendement (lumen/W<sub>e</sub>) zijn commercieel verkrijgbare hoog-vermogen LEDs de gloeilampen en halogeen lampen voorbijgestreefd (en hebben bijna het niveau van fluorescentie-lampen bereikt).
- De lichtflux per lamp (i.c. LED) is echter nog laag in vergelijking met andere lichtbronnen (maximaal circa 120 lumen per LED). Om met LEDs een lichtbron van 90000 lumen te maken - de lichtstroom van een SON-T hoge-druk natrium lamp van 600 W bij 400 V - zijn vooralsnog minimaal 750 LEDs nodig.
- Op dit moment is het 'PAR-foton-rendement' (= micromolflux 'groeilicht' per Watt elektrische energie) van de beste LEDs nog veel lager dan dat van de beste hogedruk-natriumlamp (1,1 versus 1,89 (μmol/s)/W), maar wel veel beter dan dat van gloeilampen (circa 0,3 (μmol/s)/W) en in de buurt van dat van TL-lampen (circa 1,26 (μmol/s)/W).
- Bij LEDs wordt nog een veel verdere groei van het PAR-fotonrendement verwacht dan bij HD-natrium lampen (de laatste zijn al vrij dicht bij hun theoretisch maximum; bij LEDs is dit nog lang niet het geval).
- Rode LEDs geven de grootste fotonflux per toegevoerde Watt elektrische energie (dit vereist wel een goede koeling, zie ook volgende conclusie).

#### *Technisch*

- De lichtoutput van met name AlInGaP LEDs (gebruikt voor rode, rood-oranje en amber LEDs) is sterk afhankelijk van de temperatuur van het inwendige van de LED (i.c. de 'junctiontemperatuur' van de LED-chip). Bij een gangbare interne temperatuur van 75°C daalt bij rode LEDs de relatieve lichtoutput met 40% ten opzichte van de waarde bij 25°C. In de toekomst kan dit thermische efficiëntieprobleem wellicht worden opgelost, door het beschikbare komen van andere materialen die deze gevoeligheid niet (of veel minder) hebben.
- Blauwe, cyaan, groene en witte LEDs (op basis van AlInGaN) hebben een veel lagere temperatuurgevoeligheid.

- Een belangrijk aspect bij de toepassing van hoog-vermogen LEDs is het afvoeren van het in de LEDs gedissipeerde elektrische vermogen. Van de toegevoerde elektrische energie wordt 5 à 25%, een en ander afhankelijk van de kleur, als lichtstraling naar buiten afgevoerd (in de toekomst zal dit naar verwachting oplopen tot circa 20 à 70%). De rest wordt omgezet in warmte die zal moeten worden weggekoeld. Om te hoge LED-chiptemperaturen te vermijden (en bij sommige LEDs substantieel rendementsverlies), zal de warmte met koellichamen, al dan niet met geforceerde luchtstroming, moeten worden afgevoerd naar de omgeving.

#### *Financieel (bij tuinbouwtoepassingen)*

- De specifieke kosten (= te investeren Euro's per netto micromolflux groeilicht) zijn bij LED-lampen anno 2004 nog hoog (ordegrootte 3 à 6 EUR/( $\mu\text{mol/s}$ )) in vergelijking met die van hoge-druk natriumlampen (ca 0,023 à 0,028 EUR/( $\mu\text{mol/s}$ )), dat wil zeggen nog een factor 110 à 260 hoger (de bedragen zijn exclusief de kosten voor armaturen en bekabeling).
- In de toekomst wordt bij LEDs een sterke daling van de specifieke kosten verwacht en bij HD-natriumlampen slechts een marginale.
- De 'total-cost-of-ownership' (TCO) van LEDs zal de komende jaren naar verwachting snel dalen. In het "historische groei" scenario (LED-outputgroei van 39% per jaar, LED-efficiëntiegroei 25,9% per jaar) zal de TCO van LED-(assimilatie)belichting over circa 7 jaar even laag zijn als die van hogedruk-natriumbelichting ('break-even' na 6,7 jaar, dat wil zeggen 2010 à 2011).
- In het "versnelde groei" scenario (gebaseerd op de snelheid van de ontwikkeling van de LED-output van de laatste jaren, circa 89% per jaar, en verder de historische LED-efficiëntiegroei van 25,9% per jaar) treedt de break-even situatie al op na 4,4 jaar (medio 2008).
- Bij bovengenoemde scenario's treedt er over circa 4 jaar een *energetische break-even* situatie op, waarbij LED-belichting net zo veel primaire energie verbruikt als HD-natriumbelichting. Daarna zullen LEDs energiezuiniger zijn. Uiteindelijk, na circa 6,2 jaar in de genoemde scenario's, kunnen ze ongeveer 43% op het primaire-energieverbruik besparen en zorgen ze voor een dienovereenkomstige reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot.
- Bij een voorzichtiger scenario ten aanzien van de groei van de LED-efficiëntie (met 14 lumen/W per jaar) en een middelmatig optimistisch groei van de LED-output (59% per

jaar) is de break-even termijn van de TCO circa 8,1 jaar. De energetische break-even duurt ongeveer even lang (8,0 jaar). De reductie van 43% op het primaire energieverbruik wordt in dit scenario pas na circa 18 jaar verwacht.

### *Resumerend*

De historische ontwikkelingen van LEDs (en de versnellingen hierin in de laatste 5 jaar) bieden een reëel perspectief voor toepassing van deze lichtbronnen in de glastuinbouw op korte/middellange termijn. Op basis van de onderzochte scenario's zullen de 'total-cost-of-ownership' van LED-belichtingssystemen over 4,5 à 12 jaar lager liggen dan die van hogedruk-natriumbelichting en zullen ze derhalve deze conventionele belichtingsvorm in vervangings- of nieuwbouwsituaties gaan verdringen. De hiervoor benodigde technische ontwikkelingen worden vooral gedreven door de gigantische markt die er gloort voor vervanging van traditionele verlichting in onder meer kantoren, woningen en andere gebouwen, die nu veelal is gebaseerd op fluorescentie- en gloeilampen.

## **5.2 Aanbevelingen**

De goede regelbaarheid maakt het mogelijk om LEDs stroboscopisch aan te sturen, dat wil zeggen alternerend aan respectievelijk uit. Door dit snel achter elkaar te doen, ontstaat een voor het menselijk oog gedimde, continue lichtstroom. Voor de plant is dit echter een discontinue lichtstroom. Voor assimilatiebelichting biedt deze belichtingswijze wellicht extra mogelijkheden voor energiebesparing. Ervan uitgaande dat een bladgroenkorrel direct na absorptie van een foton voor de foto-synthese even geen nieuw foton kan absorberen, zou het op dat moment ook niet zinvol zijn een nieuw foton aan te bieden. Dit principe biedt ons inziens (in ieder geval in theorie) mogelijkheden om het specifieke energieverbruik voor belichting nog eens drastisch verder te reduceren. In deze zienswijze hoeft er alleen licht te worden aangeboden als de plant daarvoor ontvankelijk is. De efficiëntie van de door kunstlicht gedreven fotosynthese (droge-stoftoename per mol toegevoerde fotonen) neemt daardoor toe. LEDs vormen een krachtige, efficiënte lichtbron waarmee een dergelijke stroboscopische belichting mogelijk is.

Voor dat zoiets in de praktijk zal werken, is er o.i. nog veel onderzoek nodig (denk daarbij onder andere aan aspecten zoals 'proof-of-principle', frequentie van schakelen, aan/uit periode, optimale golflengten, 'synchroniseerbaarheid' van bladgroenkorrels, etcetera). Wij stellen voor om samen met enkele deskundigen partijen een verkenning van het bovengenoemde principe uit te voeren.

## LITERATUUR

- [1] Bakker, J.C. et al, "Greenhouse Climate Control", 1995.
- [2] Salisbury, F.B., C.W. Ross, Plant Physiology, chapter 10, 1991.
- [3] "Veel labels rond belichting", Groenten & Fruit, wk 37, 2003.
- [4] "Feiten en fabels in belichtingsland", Vakblad voor de bloemisterij 39 (2003).
- [5] Johnson, S, "LEDs – An overview of the State of the Art in Technology and Application", Light Right 5 Conference, May 27-31, 2002, Nice, France.
- [6] Bergh, A, G. Craford, "The Promise and Challenge of Solid-State Lighting", Physics Today, dec. 2001.
- [7] Persoonlijke communicatie met S. Pot van Philips Horticulture Lighting
- [8] Spaargaren, J.J. "Belichting van tuinbouwgewassen", Hortilux Schröder, 2000.
- [9] Steranka F.M. et al., High Power LEDs - Technology Status and Market Applications, IWN 2002.
- [10] Martin, P.S. "Performance, Thermal, Cost & Reliability challenges for Solid State Lighting"
- [11] Osram, Ultra-Thin Automotive Lamps (8-12 mm) Using smartLEDs an Total Internal Reflection (TIR) Optics., mei 2002
- [12] Instrument Systems, "Instrument Systems and LEDs: Total Measurement Solutions"
- [13] Osram Opto Semiconductors, "Dimming InGaN LEDs. Application Note"
- [14] N. Narendran, L. Deng, R.M. Pysar, Y.Gu, and H. Yu, "Performance Characteristics of High-Flux Light Emitting Diodes", SPIE, San Diego 2003.
- [15] [www.zibb.nl/tuinbouw/groentenfruit](http://www.zibb.nl/tuinbouw/groentenfruit)
- [16] General Electric: <http://www.ge.com/stories/en/20147.html?category=Innovation>, 23-03-04
- [17] Martin P.S., "High Power White LED Technology for Solid State Lighting", Lumileds
- [18] Persoonlijke communicatie met S. Vergeer, Hortilux Schröder, april 2004.
- [19] PPO, "Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw", 2003-2004.



## BIJLAGE A ONTWIKKELING LED-TECHNOLOGIE INCLUSIEF OLEDS

In deze bijlage wordt in aanvulling op figuur 3.23 een figuur met de evolutie van de LED over de afgelopen 40 jaar gegeven. De onderstaande figuur bevat behalve de ontwikkeling van de anorganische LEDs ook de belangrijkste ontwikkelingen van de nieuwere OLED-technologie.

