

TECHNISCHE FICHES

VERLICHTING

Dit document maakt deel uit van vier fiches.

- 1. Belangrijke lichtgrootheden**
2. Colorimetrie
3. Armaturen
4. Ecodesign richtlijn

Auteurs technische fiche 1: Wouter Ryckaert en Peter Hanselaer
KAHO St-Lieven – Laboratorium voor lichttechnologie

Deze technische fiches werden gemaakt voor het project TechnologieWacht,
met steun van het IWT

Inhoud

1. Het oog	3
1.1. Beschrijving	3
1.2. Receptoren.....	4
1.2.1. Staafjes	4
1.2.2. Kegeltjes	5
1.3. Ooggevoeligheidscurve	6
1.4. 10° gezichtsveld	8
2. Radiometrie en fotometrie.....	9
2.1. Inleiding	9
2.2. Licht gezien als Elektromagnetische straling.....	9
2.3. Stralingsstroom versus lichtstroom	10
2.4. Stralingsexitantie versus exitantie.....	14
2.4.1. Definitie	14
2.4.2. Exitantie en zwarte stralers	16
2.5. Bestralingssterkte versus verlichtingssterkte	17
2.5.1. Definitie	17
2.5.2. Typische waarden	20
2.6. Radiantie versus luminantie	22
2.6.1. Definitie	22
2.6.2. Numerieke waarden	26
2.6.3. Enkele toepassingen	26
2.7. Stralingssterkte versus lichtsterkte	27
2.7.1. Definities	27
2.7.2. Toepassing: intensiteitspatronen	28
2.8. Samenvattend	31
2.9. Relaties tussen lichtgrootheden	31
2.10. Opgeloste Oefeningen	34

1. Het oog

1.1. Beschrijving

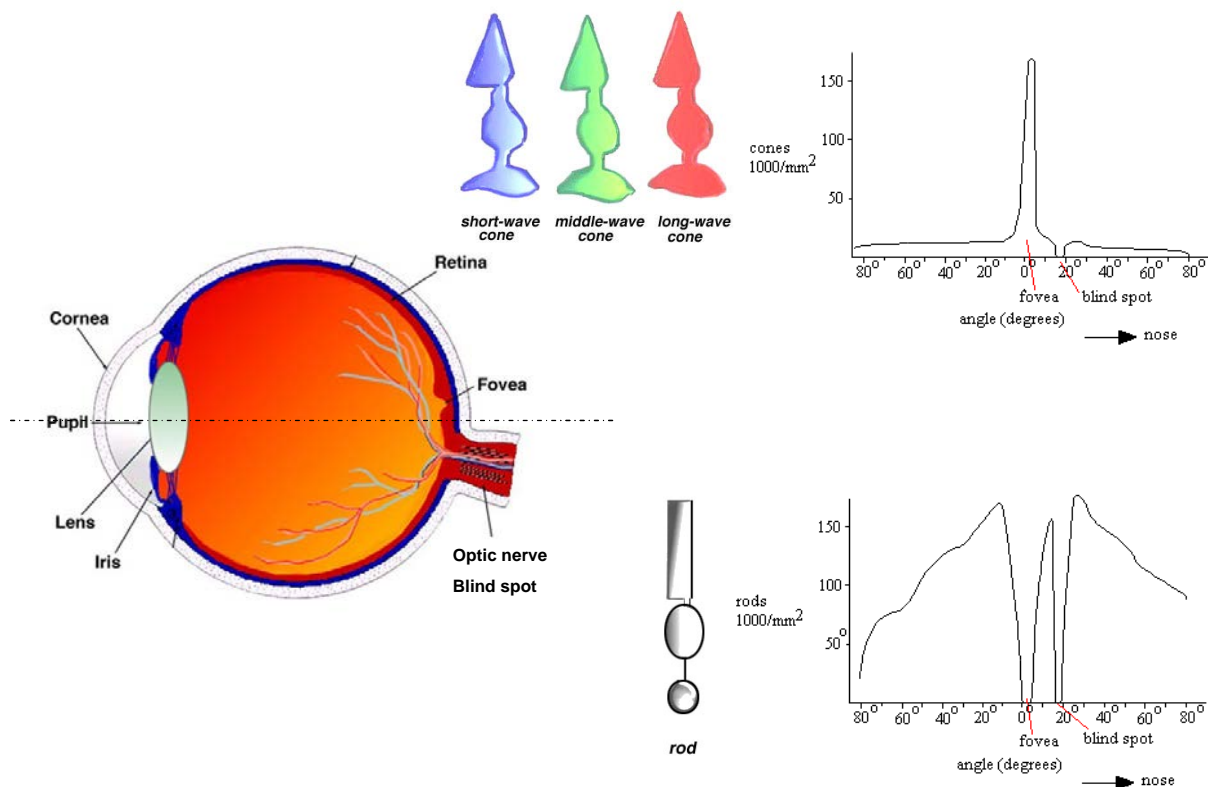
In Figuur 1 is de doorsnede van een menselijk oog voorgesteld. Het zichtbare buitenste oppervlak is de cornea. Daarachter bevindt zich de gekleurde iris, die als diafragma dienstdoet. De opening in de iris of de pupil kan variëren in diameter van 2 mm bij intense lichtinval tot 8 mm bij zwakke lichtinval. Achter de pupil ligt de oog lens. Via kleine spiertjes kan de oog lens boller worden gemaakt, waardoor de focus van het optische systeem verkleint. Dit variëren van de oog lens noemt men accommoderen. Tussen cornea, oog lens en netvlies bevindt er zich oogvocht.

Het netvlies bevindt zich op de binnenzijde van de oogbol tegenover de oog lens. Daarin bevinden zich lichtgevoelige cellen: staafjes en kegeltjes. De naamgeving is ontstaan door de vorm van deze cellen. Staafjes zijn zeer lichtgevoelig. Kegeltjes zijn minder gevoelig, maar bestaan in 3 soorten (ρ -, γ - en β -kegeltjes), die elk een specifieke spectrale gevoeligheid hebben.

De verdeling van deze lichtgevoelige sensoren is niet homogeen over het netvlies. De grootste concentratie van de kegeltjes vinden we in de fovea, een klein gebiedje van het netvlies waar we heel scherp en gedetailleerd kunnen waarnemen. Waarneming in de fovea gebeurt bij het bekijken van voorwerpen binnen een openingshoek van enkele graden. Bij grotere hoeken is ons zicht minder gedetailleerd. Bij hoeken groter dan 40° t.o.v. de optische as is dit 'zicht' te herleiden tot louter bewegingsdetectie.

De fovea bevindt zich niet op de optische as van het oog, maar op ongeveer 4° erboven. Op 10° onder de as en 20° richting neus bevindt zich de blinde vlek: op deze plaats bevinden zich geen lichtsensoren, maar verdwijnen alle oogzenuwbanen door de oogbal naar de hersenen.

In de fovea bevinden zich bijna uitsluitend kegeltjes en géén staafjes. Verder weg van de fovea verminderen de kegeltjes en nemen de staafjes toe, tot bijna uitsluitend staafjes overblijven (Figuur 1). Bovendien is er in de fovea ongeveer één zenuwbaan per kegeltje; verder van de optische as neemt het aantal kegeltjes per zenuwbaan geleidelijk aan toe.



Figuur 1 Dwarse doorsnedes van een menselijk oog met een voorstelling van de drie types kegeltjes en een staafje. Rechts wordt de dichtheid van de kegeltjes en de staafjes in een horizontaal vlak getoond

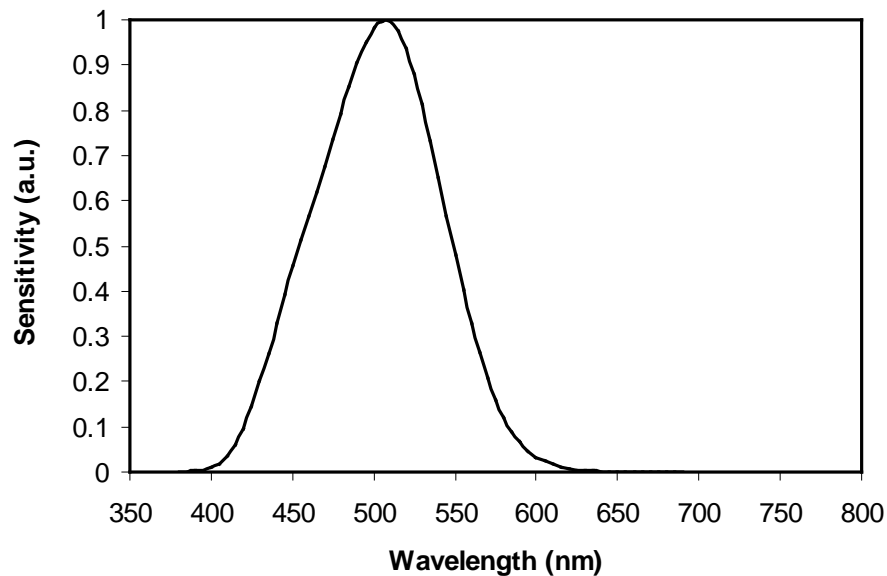
1.2. Receptoren

1.2.1. Staaftjes

In het netvlies van het oog zijn dus vier types receptoren aanwezig: 'staafjes' ('rods') en drie types 'kegeltjes' ('cones'). Staaftjes zijn veel gevoeliger voor licht dan kegeltjes. Bij het bekijken van objecten met lage luminanties (zeker lager dan 0.01 cd/m^2) zal dus vooral de respons van de staafjes domineren; men spreekt van 'scotopisch zien'. Bij een voldoende grote prikkel (luminanties van een object groter dan enkele cd/m^2) zal de respons van de 3 types kegeltjes domineren: men spreekt van 'photopisch zien'. Bij intermediaire prikkels zullen zowel staafjes als kegeltjes bijdragen; we spreken van 'mesopisch zien'.

De staafjes absorberen licht (via het pigment rhodopsin) met een welbepaalde spectrale gevoeligheid die maximaal is bij ongeveer 510 nm, dus voor het blauwgroen licht. De relatieve spectrale gevoeligheid is geschetst in Figuur 2. Licht bij een golflengte van 510 nm, bijvoorbeeld, zal in een bepaalde mate geabsorbeerd worden en een prikkel teweegbrengen. Licht bij een golflengte van 550 nm kan exact dezelfde prikkel genereren, wanneer de lichtintensiteit ervan ongeveer dubbel zo groot is, zoals blijkt uit Figuur 2. Staaftjes zijn zeer gevoelig en reageren reeds bij minimale luminanties van het voorwerp.

Aangezien er slechts één type staafjes bestaat, kan er nooit informatie over de spectrale inhoud (info per golflengte) van de prikkel worden achterhaald. Bij lage luminanties en scotopisch zicht zijn we dus niet in staat kleur te onderscheiden.



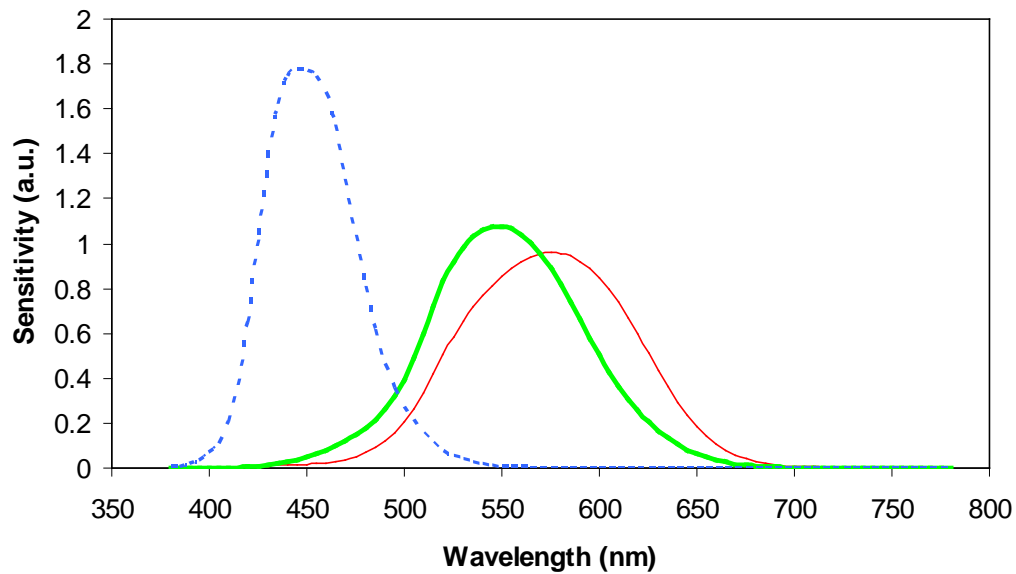
Figuur 2 Genormaliseerde relatieve gevoeligheid van de staafjes

1.2.2. Kegeltjes

De genormeerde relatieve spectrale gevoeligheid van de drie types kegeltjes (resp. ρ , γ , β genoemd) is voorgesteld in Figuur 3. De ρ -types hebben hun maximale gevoeligheid bij 580 nm (rood-oranje), de γ -types bij 540 nm (groen) en de β -types bij 440 nm (blauw-violet).

De absolute gevoeligheid van de kegeltjes is lager dan die van de staafjes. Ze genereren slechts prikkels bij voldoende lichtinval. Door het feit dat er drie types zijn, kan er echter spectrale informatie gedetecteerd worden. Een lichtinval bij 500 nm genereert een β - en ρ -prikkel die ongeveer even groot zijn en een γ -prikkel die groter is. Een lichtinval bij 550 nm genereert geen β -prikkel, maar wel een ρ -prikkel en een nog grotere γ -prikkel.

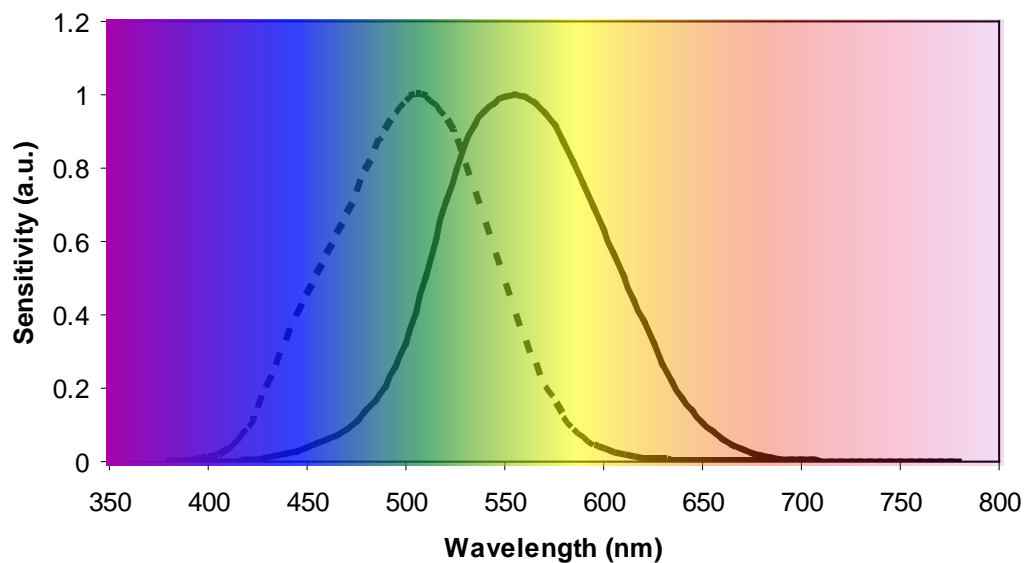
De verschillende types kegeltjes zijn willekeurig over het netvlies verspreid, maar men schat het relatief voorkomen van ρ -, γ - en β -types op 40:20:1 respectievelijk. Het lage voorkomen van de β -types kan eventueel verklaard worden door het feit dat door chromatische aberratie in het oog (een afwijking van de ideale beeldvorming, waarbij de positie van het beeld gevormd bij elke kleur telkens iets verschillend is) de beeldscherpte voor blauw licht heel wat minder goed is. Een fijn netwerk en geconcentreerd voorkomen van de blauwgevoelige β -kegeltjes zijn dan ook niet vereist.



Figuur 3 Relatieve ooggevoeligheden van ρ -kegeltjes (rood, volle fijne lijn), γ -kegeltjes (groen, volle dikke lijn) en β -kegeltjes (blauw, streeplijn). De normalisatie is zodanig dat de respons voor een equi-energetisch spectrum (dit is een spectrum waar voor iedere golflengte evenveel energie wordt uitgezonden) identiek is

1.3. Ooggevoeligheidscurve

Elk individueel oog is uniek; dit zal ook het geval zijn voor de achromatische respons. Daarom heeft de internationale gemeenschap standaardooggevoeligheden gedefinieerd: de zogenaamde ' $V(\lambda)$ -curve' voor fotopische condities en de ' $V'(\lambda)$ -curve' voor scotopische condities. Deze curven worden getoond in Figuur 4 en de numerieke waarden zijn opgenomen in Tabel 1.



Figuur 4 Fotopische $V(\lambda)$ (volle lijn) en scotopische $V'(\lambda)$ (stippellijn) genormaliseerde ooggevoeligheidscurve

Tabel 1 Fotopische (volle lijn) en scotopische (stippellijn) genormaliseerde ooggevoeligheid

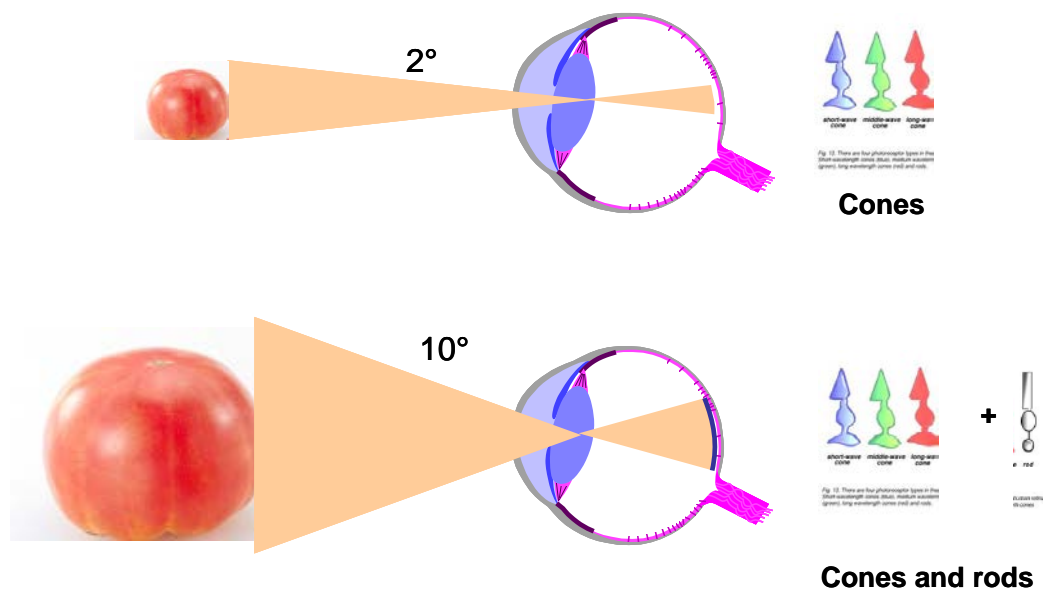
$\lambda(nm)$	V	V'	$\lambda(nm)$	V	V'
380	0.0000	0.0006	595	0.6949	0.0469
385	0.0001	0.0011	600	0.6310	0.0332
390	0.0001	0.0022	605	0.5668	0.0231
395	0.0002	0.0045	610	0.5030	0.0159
400	0.0004	0.0093	615	0.4412	0.0109
405	0.0006	0.0185	620	0.3810	0.0074
410	0.0012	0.0348	625	0.3210	0.0050
415	0.0022	0.0604	630	0.2650	0.0033
420	0.0040	0.0966	635	0.2170	0.0022
425	0.0073	0.1436	640	0.1750	0.0015
430	0.0116	0.1998	645	0.1382	0.0010
435	0.0168	0.2625	650	0.1070	0.0007
440	0.0230	0.3281	655	0.0816	0.0005
445	0.0298	0.3931	660	0.0610	0.0003
450	0.0380	0.4550	665	0.0446	0.0002
455	0.0480	0.5130	670	0.0320	0.0001
460	0.0600	0.5670	675	0.0232	0.0001
465	0.0739	0.6200	680	0.0170	0.0001
470	0.0910	0.6760	685	0.0119	0.0001
475	0.1126	0.7340	690	0.0082	0.0000
480	0.1390	0.7930	695	0.0057	0.0000
485	0.1693	0.8510	700	0.0041	0.0000
490	0.2080	0.9040	705	0.0029	0.0000
495	0.2586	0.9490	710	0.0021	0.0000
500	0.3230	0.9820	715	0.0015	0.0000

505	0.4073	0.9980
510	0.5030	0.9970
515	0.6082	0.9750
520	0.7100	0.9350
525	0.7932	0.8800
530	0.8620	0.8110
535	0.9149	0.7330
540	0.9540	0.6500
545	0.9803	0.5640
550	0.9950	0.4810
555	1.0000	0.4020
560	0.9950	0.3288
565	0.9786	0.2639
570	0.9520	0.2076
575	0.9154	0.1602
580	0.8700	0.1212
585	0.8163	0.0899
590	0.7570	0.0655

720	0.0010	0.0000
725	0.0007	0.0000
730	0.0005	0.0000
735	0.0004	0.0000
740	0.0002	0.0000
745	0.0002	0.0000
750	0.0001	0.0000
755	0.0001	0.0000
760	0.0001	0.0000
765	0.0000	0.0000
770	0.0000	0.0000
775	0.0000	0.0000
780	0.0000	0.0000

1.4. 10° gezichtsveld

De fotonische ooggevoeligheid $V(\lambda)$, aangehaald in de vorige paragraaf, is verkregen door visuele tests met prikkels die een hoekdivergentie van 2° hebben. In 1964 heeft CIE een nieuwe fotonische ooggevoeligheidscurve ingevoerd, waarbij prikkels met een hoekdivergentie van 10° werden gebruikt. In dit geval is het beeld dat op het netvlies wordt gevormd, groter dan de fovea en de respons komt dus van de kegeltjes én de staafjes (Figuur 5). Deze waarden worden aangeduid met $V_{10}(\lambda)$ en verschillen licht van de $V(\lambda)$ -waarden.



Figuur 5 Een gezichtsveld van 2° en 10° komt overeen met een verschillend beeld op het netvlies; bij 10° zijn er meer staafjes betrokken.

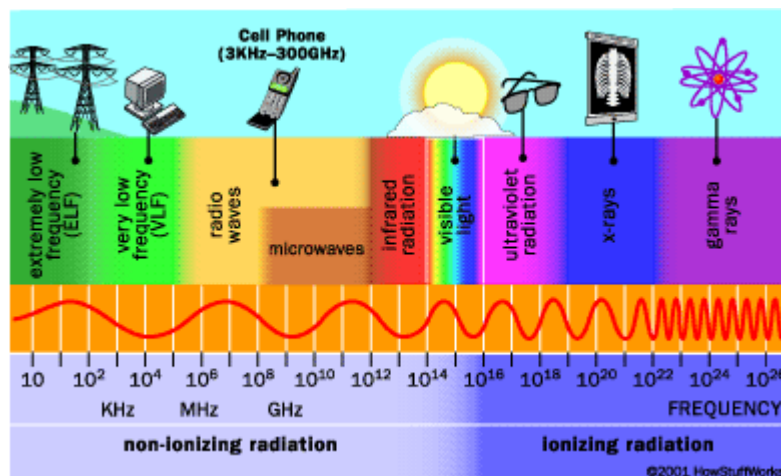
2. Radiometrie en fotometrie

2.1. Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we de lichtgrootheden toelichten die het meest gebruikt worden in de praktijk. Beschouwen we een schoolbordarmatuur: lichtgrootheden die hierbij belangrijk zijn zijn: hoeveel licht (of zichtbare straling) komt uit de lampen of het armatuur (de lichtstroom, eenheid lumen of lm); wat is de lichtverdeling (intensiteit, eenheid candela of cd), hoeveel licht valt op het schoolbord en wat is de gelijkmatigheid (verlichtingssterkte, eenheid lux of lx). Als er met krijt op het bord wordt geschreven ontstaat er contrast tussen de kleur van het krijt en de achtergrondkleur van het bord waardoor we de geschreven tekst kunnen lezen. Dit komt omdat er een verschil in luminantie (een maat voor de helderheid die we ervaren) ontstaat. De eenheid van luminantie is candela per m² of cd/m².

Deze belangrijke lichtgrootheden worden in de volgende paragraaf verder uitgewerkt.

2.2. Licht gezien als Elektromagnetische straling



Figuur 6 Elektromagnetisch spectrum en benaming

Elektromagnetische straling is de voortplanting door de ruimte van elektrische en magnetische oscillaties (trillingen). Licht is een vorm van elektromagnetische straling. Alle soorten elektromagnetische straling hebben in het vacuüm een snelheid gelijk aan de lichtsnelheid. Afhankelijk van de golflengte van de straling geven we aan de elektromagnetische straling een andere benaming (zie Figuur 6). Enkele voorbeelden zijn radiogolven, microgolven, ultraviolet straling, infraroodstraling, In het gebied tussen 380nm en 780nm worden de fotoreceptoren in ons oog geprikkeld en noemen we deze zichtbare straling licht. Radiogolven (Studio Brussel zendt bijvoorbeeld uit bij 94.5 MHz in Gent) en lichtgolven planten zich dus voort met dezelfde snelheid maar de golflengte is anders.

Voor golven geldt: voortplantingssnelheid is golflengte vermenigvuldigd met de frequentie. De voortplantingssnelheid is ongeveer 300.000km/s voor elektromagnetische golven. Zo is de golflengte voor de radiogolf van Studio Brussel in Gent 3.17 meter (reken na!) terwijl de golflengte van een 'oranje' (Lage druk natrium) straatlamp 589 nm (10^{-9} m!) is – de voortplantingssnelheid is voor beide golven evenwel gelijk.

2.3. Stralingsstroom versus lichtstroom

Een lichtbron zendt meestal niet alleen zichtbare straling uit maar er is ook vaak infraroodstraling en/of UV-straling aanwezig. We kunnen ons nu de vraag stellen hoeveel van deze uitgezonden elektromagnetische straling zichtbaar is. Zo zullen we komen tot het begrip lichtstroom.

Elektromagnetische straling is een vorm van energietransport. De STRALINGSSTROOM Φ_e is gedefinieerd als het tempo waarmee stralingsenergie wordt overgedragen. De stralingsstroom kan worden beschouwd als het vermogen geassocieerd met de golf en heeft als eenheid watt (W).

In de meeste gevallen is de straling niet bij één enkele golflengte (monochromatisch) en kan er een spectrum gedefinieerd worden. Een spectrum geeft aan hoeveel energie voor elke golflengte wordt uitgezonden. Dit kan voorgesteld worden in een figuur of een tabel. Zo is het spectrum van een halogeenlamp voorgesteld in Figuur 7.

De totale stralingsstroom van een willekeurige straling kan gevonden worden door de stralingsstroom van elke golflengte (spectrale bijdrage genoemd) bij elkaar op te tellen.

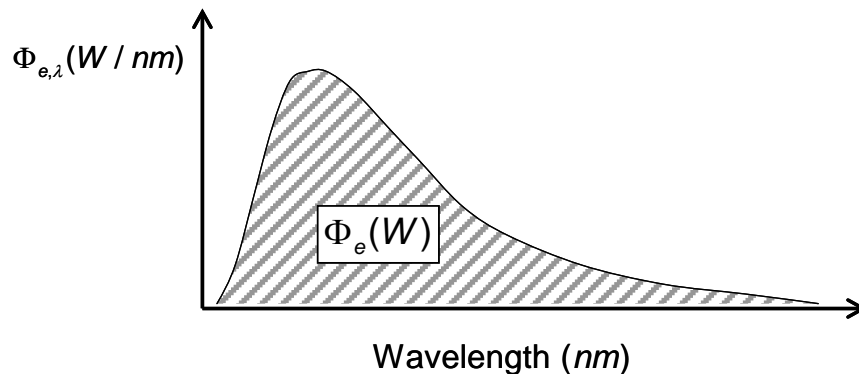
$$\Phi_e = \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \quad (\text{W}) \quad (\text{discreet})$$

$$\Phi_e = \int_{\text{all } \lambda} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{W}) \quad (\text{continu}) \quad \text{Vgl. 1}$$

Vgl. 1 is gemakkelijk grafisch te interpreteren: $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ stelt het spectrum voor en Φ_e komt overeen met de oppervlakte tussen de curve en de horizontale as (Figuur 7).

$\Phi_{e,\lambda}$ en Φ_e zijn beide grootheden die geassocieerd worden met het vermogen van de straling. Dat is de reden waarom ze 'radiometrisch' worden genoemd. De index 'e' betekent 'energetisch', verwijzend naar een puur fysische grootheid zonder enige relatie tot de visuele respons van de waarnemer. Als de straling op het menselijk oog invalt, zullen de lichtgevoelige cellen in het netvlies reageren. De respons van de cellen hangt af van elke golflengte.

Het logische gevolg is dat de reactie van het oog geen maat is voor het vermogen van de prikkel: elke golflengte veroorzaakt een andere respons (zo reageert ons oog niet op infraroodstraling). Daarom is er een nieuwe grootheid nodig die de ervaring van de waarnemer (de hoeveelheid 'licht') beschrijft.



Figuur 7 Spectrale stralingsstroom van een zwarte straler. De gesommeerde (of geïntegreerde) waarde is gelijk aan de stralingsstroom en correspondeert met de oppervlakte onder de curve

Om de fotometrische grootheid die correspondeert met de radiometrische stralingsstroom te kunnen definiëren, wordt daarom de spectrale stralingsstroom eerst vermenigvuldigd met de ooggevoeligheid, gevolgd door het optellen van alle bijdragen. Hierbij wordt een aangepaste schaal gebruikt (vandaar de voorfactor 683). Dit resulteert in de LICHTSTROOM Φ :

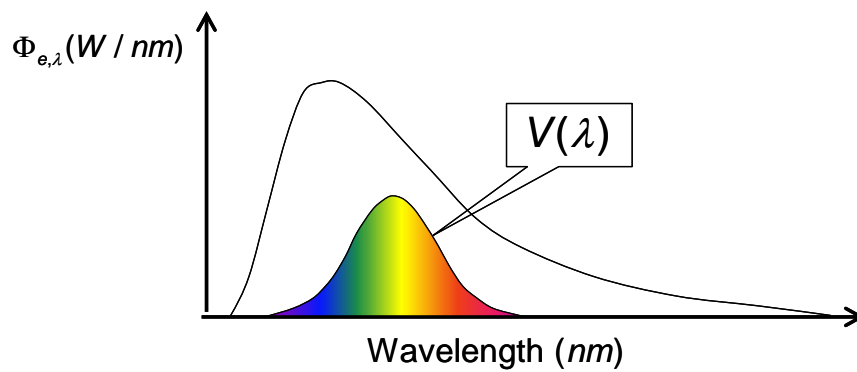
$$\Phi = 683 \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{continu})$$

vgl. 2

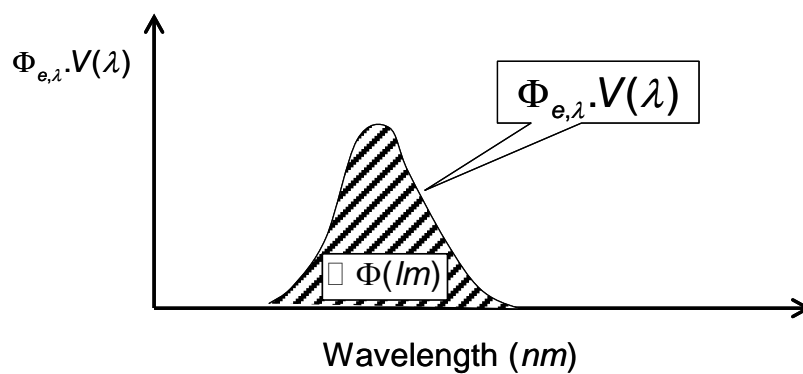
$$\Phi = 683 \sum_{380}^{780} \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

met $V(\lambda)$ de standaardooggevoeligheidscurve. De ooggevoeligheid kan worden beschouwd als een spectrale wegingsfactor equivalent aan een filterwerking. In Figuur 8 wordt dit grafisch geïllustreerd.

De lichtstroom Φ wordt uitgedrukt in lumen (lm). Grootheden zoals lichtstroom, die gerelateerd zijn aan de menselijke respons, worden 'fotometrische grootheden' genoemd, in tegenstelling tot radiometrische grootheden. In geval van fotometrische grootheden wordt de subindex 'e' niet gebruikt. De schaalfactor 683 hangt samen met de definitie van de lumen.



(a)



(b)

Figuur 8 . (a) Spectrum en ooggevoeligheidscurve. (b) Vermenigvuldiging, sommatie (of integratie) en het toepassen van een schaalfactor resulteren in de fotometrische grootheid lichtstroom, uitgedrukt in lumen.

Bij het berekenen van fotometrische grootheden kunnen we ons beperken tot straling die uitgezonden wordt in het gebied van 380 nm tot 780 nm, omdat buiten dit golflengte-interval de ooggevoeligheid toch nul is. Infraroodstraling vertegenwoordigt weliswaar vermogen, maar dit zal niet opgemerkt worden door het menselijk oog.

$$\Phi_{e,\lambda} (W / nm) \begin{cases} \rightarrow \Phi_e (W) = \int_{\text{all } \lambda} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \\ \rightarrow \Phi (lm) = 683 \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

Figuur 9 Samenvatting: spectrale stralingsstroom $\Phi_{e,\lambda}$, stralingsstroom Φ_e en lichtstroom Φ voor continue spectra

De fundamentele verbanden tussen spectrale stralingsstroom, stralingsstroom en lichtstroom zijn nog eens samengevat in Figuur 9.

Zo zal een halogeenspotje van 35W nagenoeg 35 W uitstralen, $\Phi_e = 35W$. Van die uitgezonden straling zal slechts een klein gedeelte zich in het zichtbare gebied bevinden, bv 3W. Deze hoeveelheid straling komt overeen met $\Phi = 550lm$.

Specifieke lichtstroom

Een afgeleide grootte is de specifieke lichtstroom η . De specifieke lichtstroom is de verhouding van de lichtstroom tot het elektrische vermogen opgenomen door een bron:

$$\eta \text{ (lm / W)} = \frac{\Phi \text{ (lm)}}{P \text{ (W)}} \quad \text{vgl. 3}$$

Vaak wordt dit ook het lamprendement genoemd. Men moet hierbij specificeren of het elektrische vermogen dat verloren gaat in het voorschakelapparaat, al dan niet inbegrepen is. Men spreekt dan van 'Lampvermogen' (niet inbegrepen) of 'Systeemvermogen' (wel inbegrepen).

Zo heeft een eco-halogeenlamp van 70 W een lichtstroom van 1200 lm of 17.1 lm/W.

Een T8 lamp van 36W heeft een lichtstroom van 3350 lm of 93 lm/W. Dit is evenwel zonder voorschakelapparaat. Wanneer bv een conventioneel voorschakelapparaat 3 W (bv) verliezen heeft, dan daalt het rendement naar 85.9 lm/W.

Toepassing

Een (fictieve) kwikdamplamp van 50W (is het elektrisch opgenomen vermogen) heeft zeven (sterk benaderd) lijnen in het spectrum:

Golflengte (nm)	Stralingsstroom (mW)
254	1000
306	20
365	10
405	10
436	8
546	1
578	2

Bereken de stralingsstroom en de lichtstroom alsook de specifieke lichtstroom.

2.4. Stralingsexitantie versus exitantie

2.4.1. Definitie

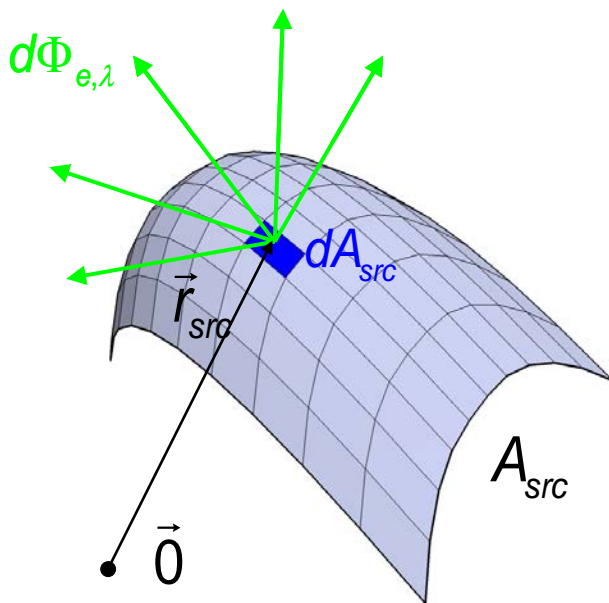
Stralingsexitantie en exitantie zeggen iets over de straling die door een bron wordt uitgezonden.

De spectrale stralingsstroom uitgezonden door een uitgebreide bron (Engels 'source' – verder in notaties aangeduid als src) geeft geen informatie over de uniformiteit van de emissie over het oppervlak van de bron. Sommige delen stralen meer vermogen uit dan andere. Door het verdelen van het bronoppervlak A_{src} in zeer kleine oppervlaktes dA_{src} , kunnen we deze niet-uniformiteit beschrijven (Figuur 10). De spectrale (daarmee bedoelen we per golflengte, want voor iedere golflengte kan dit anders zijn) stralingsstroom uitgezonden door deze zeer kleine oppervlaktes stellen we voor als $d\Phi_{e,\lambda}$.

De verhouding van deze twee in de buurt van een punt met plaatsvector¹ \vec{r}_{src} noemt men de SPECTRALE STRALINGSEXITANTIE $M_{e,\lambda}$ in een punt

$$M_{e,\lambda}(\vec{r}_{src}) = \frac{d\Phi_{e,\lambda}}{dA_{src}} \quad (W / nm.m^2) \quad \text{vgl. 4}$$

¹ De plaatsvector legt de plaats vast van een punt, zoals een GPS coördinaat of breedte –en lengtegraden. De plaatsvector is een 'pijl' of vector van de oorsprong tot het punt in kwestie. Deze pijl heeft dus een lengte en een richting.



Figuur 10 Stralingsexitantie: het bronoppervlak A_{src} kan worden verdeeld in infinitesimale bijdragen dA_{src} met plaatsvector \vec{r}_{src} die een spectrale stralingsstroom uitstralen

De STRALINGSEXITANTIE M_e kan worden berekend uit de spectrale stralingsexitantie $M_{e,\lambda}$ door het sommeren van de spectrale stralingsexitantie over alle golflengtes:

$$M_e = \sum_{\lambda_i} M_{e,\lambda_i} \quad (\text{discreet})$$

vgl. 5

$$M_e = \int_{\text{all } \lambda} M_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{continu})$$

De EXITANTIE M (gerelateerd aan het 'zien') kan worden berekend uit de spectrale stralingsexitantie $M_{e,\lambda}$ door eerst te vermenigvuldigen met de ooggevoeligheidscurve en daarna te sommeren over alle golflengtes en door gebruik te maken van een aangepaste schaalfactor:

$$M = 683 \int_{380}^{780} M_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{continu})$$

vgl. 6

$$M = 683 \sum M_{e,\lambda_i} \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

Substitutie van Verg. 4 in Verg. 6 geeft het verband tussen lichtstroom Φ en exitantie M :

$$M = \frac{d\Phi}{dA_{src}} \quad (lm / m^2) \quad \text{vgl. 7}$$

Opmerking: de exitantie verwijst naar de lichtstroom per eenheid bronoppervlak. Deze 'bron' kan een echte bron zijn die zelf straling uitzendt of kan een indirecte bron zijn, bijvoorbeeld een oppervlak van een voorwerp dat enkel de straling reflecteert (een muur bijvoorbeeld).

2.4.2. Exitantie en zwarte stralers

Binnenin een isotherme caviteit² hebben er emissie-, reflectie- en absorptieprocessen plaats. Bij evenwicht ontstaat er een spectrale stralingsdichtheid die enkel afhankelijk is van de temperatuur van de wanden van de caviteit. De straling die vrijkomt wanneer men een klein gaatje in de wand van de caviteit maakt, noemt men een 'zwarte straling'. De spectrale exitantie die wordt uitgezonden, werd voor het eerst berekend door Max Planck in 1905, gebruikmakend van de eerste kwantummechanische inzichten (die uiteindelijk verkeerd bleken te zijn). De spectrale waarden zijn voorgesteld in Figuur 11.

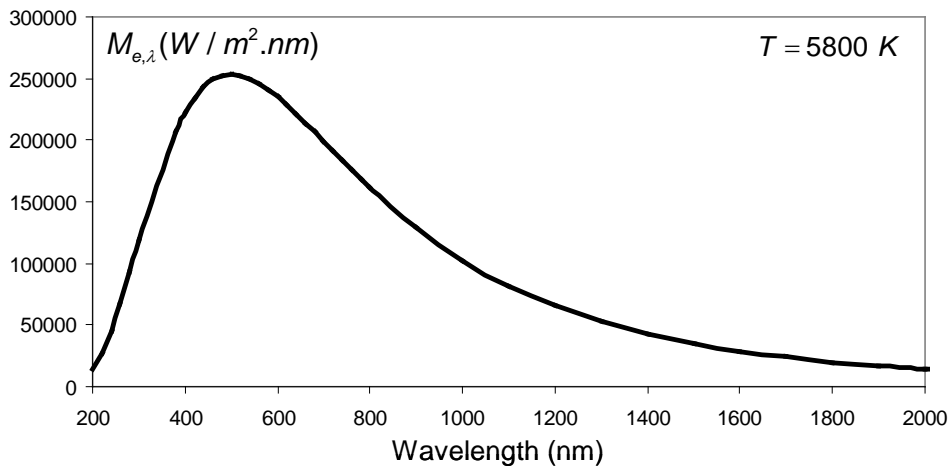
Er is een maximumwaarde bij een bepaalde golflengte te zien. Deze golflengte λ_M hangt af van de temperatuur T volgens de wet van Wien:

$$\lambda_M \cdot T = 2.88 \cdot 10^{-3} \quad \text{in } \text{meter} \cdot \text{Kelvin} \quad \text{vgl. 8}$$

In Figuur 11 is te zien dat de spectrale waarden buiten het interval $[\frac{1}{5}\lambda, 5\lambda]$ verwaarloosbaar zijn. Na integratie kan de stralingsexitantie M_e berekend worden. Deze uitdrukking is bekend als de wet van Stefan-Boltzmann:

$$M_e = 5.67 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{vgl. 9}$$

² Je kan dit zien als een kleine ruimte die in thermisch evenwicht is, dus waarbij de temperatuur niet meer verandert



Figuur 11 Spectrale stralingsexitantie $M_{e,\lambda}$ voor een zwarte straler bij 5800 K

Elk voorwerp dat tot gloeien wordt gebracht kan benaderd worden door deze betrekking. Zo ook een gloeidraadje van een gloei- en halogeenlamp. Een halogeenlamp staat op een iets hogere temperatuur dan een gloeilamp waardoor er meer straling wordt uitgezonden (vgl. 9) en dus iets efficiënter is omdat er relatief meer straling in het zichtbare gebied wordt uitgezonden (top van figuur 11 ietsje meer naar zichtbare gebied). Deze theorie verklaart het spectrum van gloei –en halogeenlampen en verklaart waarom dit zo inefficiënte lampen zijn: veel van de uitgezonden straling bevindt zich niet in het zichtbare gebied van 380nm tot 780nm. We merken de aanwezigheid van een relatief groot aandeel infraroodstraling (straling met golflengte $>780nm$). Inderdaad, we ‘voelen’ de warmte als we in de lichtbundel van een halogeenspot staan.

2.5. Bestralingssterkte versus verlichtingssterkte

2.5.1. Definitie

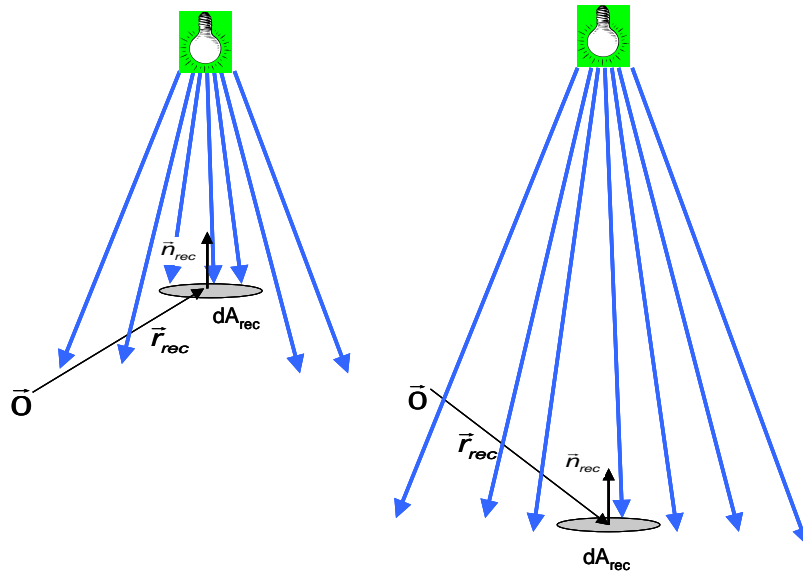
In de vorige paragraaf werd exitantie gedefinieerd. De exitantie beschrijft eigenlijk de fluxdichtheid (flux of stroom gedeeld door oppervlakte) van de stralingsbron. Een soortgelijke grootte kan worden gedefinieerd vanuit het standpunt van de ontvanger (Engels: ‘receiver’) van de straling.

De spectrale stralingsstroom die een detector ontvangt, zal afhangen van de positie (Figuur 12). Inderdaad, hoe verder we van een lamp verwijderd zijn, hoe minder straling/licht we ontvangen. Door een zeer kleine oppervlakte dA_{rec} te isoleren in het vlak van de ontvanger rond een bepaald punt met plaatsvector \vec{r}_{rec} , kunnen we de verhouding van de infinitesimale flux tot de oppervlakte berekenen. Deze grootte is echter ook afhankelijk van de oriëntatie van de detector tot de richting van de straling, zoals getoond wordt in Figuur 13. Deze oriëntatie kan worden aangeduid door de eenheidsvector normaal (loodrecht) op het ontvangersoppervlak \vec{n}_{rec} . Inderdaad, er is een verschil tussen de straling die invalt op een verticaal en een horizontaal vlak in eenzelfde punt. Zo zijn we bij een winkelrek eerder geïnteresseerd in de verticale

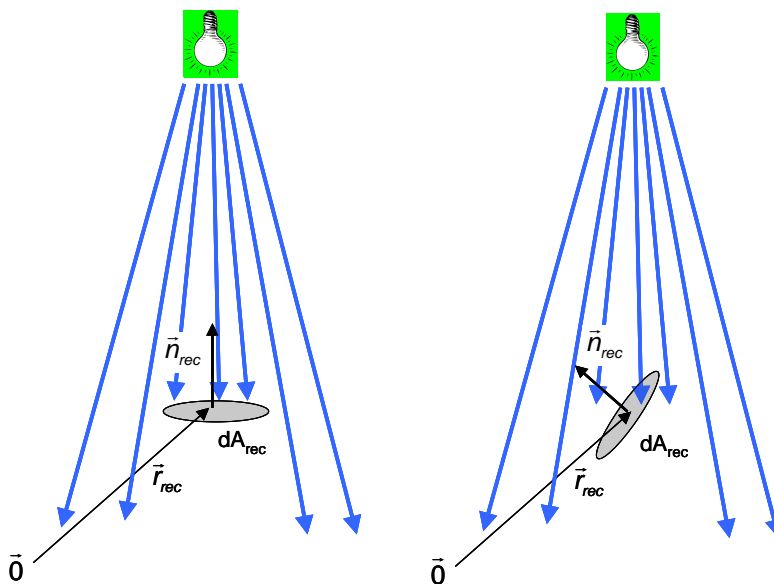
verlichtingssterkte dan in de horizontale verlichtingssterkte. De SPECTRALE BESTRALINGSSTERKTE $E_{e,\lambda}$ in een bepaald punt en een bepaalde oriëntatie wordt gedefinieerd als:

$$E_{e,\lambda}(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec}) = \frac{d\Phi_{e,\lambda}}{dA_{rec}}$$

vgl. 10



Figuur 12 De spectrale bestralingssterkte zal afhankelijk zijn van de positie van de detector, aangegeven door de plaatsvector \vec{r}_{rec}



Figuur 13 De spectrale bestralingssterkte zal ook afhankelijk zijn van de oriëntatie van de detector, aangegeven door de normaalvector \vec{n}_{rec}

Analoog kan de bestralingssterkte berekend worden uit de spectrale waarden door het optellen (discrete spectra) of het integreren over alle golflengtes:

$$E_e = \sum_{\lambda_i} E_e(\lambda_i) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{discreet})$$

vgl. 11

$$E_e = \int_{\text{all } \lambda} E_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{continu})$$

Wanneer we geïnteresseerd zijn in de fotometrische grootte, vermenigvuldigen we eerst met de standaardooggevoeligheid. Op die manier krijgen we de VERLICHTINGSSTERKTE E :

$$E = 683 \int_{380}^{780} E_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{continu})$$

vgl. 12

$$E = 683 \sum E_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

De verlichtingssterkte wordt uitgedrukt in lm/m^2 of lux of afgekort lx .

Substitutie van Verg. 10 in Verg. 12 levert het verband tussen de lichtstroom en de verlichtingssterkte:

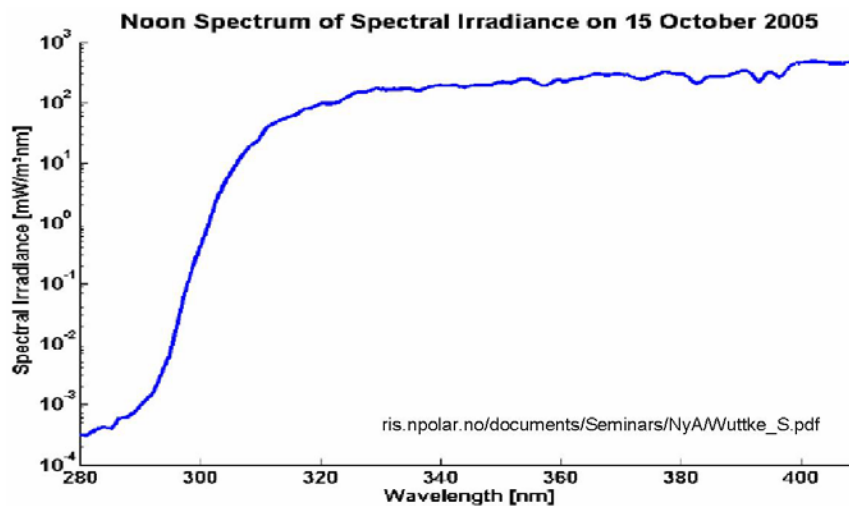
$$E(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec}) = \frac{d\Phi}{dA_{rec}}$$

vgl. 13

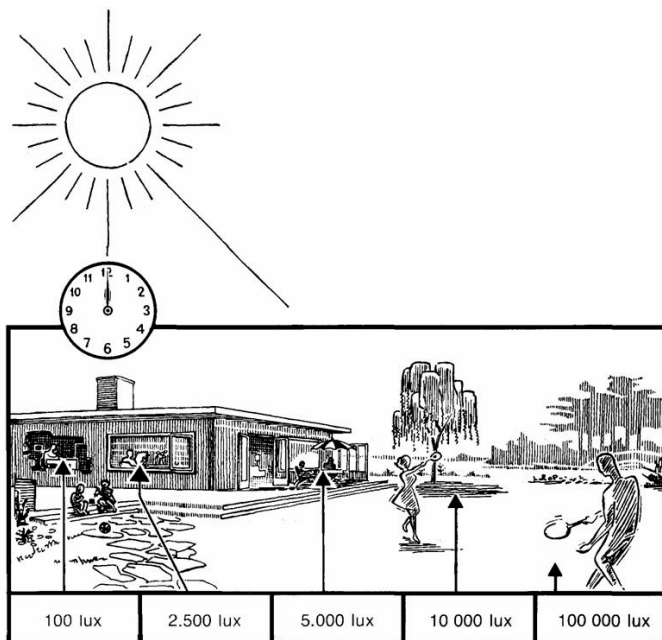
Om het meten van spectrale bestralingssterkte, bestralingssterkte en verlichtingssterkte mogelijk te maken, is er een detector of ontvanger nodig.

2.5.2. Typische waarden

In Figuur 14 wordt de spectrale bestralingssterkte van de UV-straling van de zon op de aarde weergegeven terwijl Figuur 15 enkele typische verlichtingssterktes weergeeft.



Figuur 14 De spectrale bestralingssterkte van de zon op de aarde (UV-gebied)



Figuur 15 Typische verlichtingssterktes op een zonnige middag

In Figuur 16 vind je een uittreksel van de Europese norm die ook in Vlaanderen geldig is NBN EN 12464-1 'Licht en verlichting – werkplekverlichting' – Deel 1 binnenwerkplekken, waarin enkele richtwaarden voor de verlichtingssterkte van taakoppervlakken worden weergegeven. We moeten wel vermelden dat de verlichtingssterkte niet overal gelijk kan zijn, de ene plaats kan meer licht ontvangen dan de andere. Natuurlijk mag de variatie niet te groot zijn. Daarom definieert men ook de gelijkmatigheid van de verlichtingssterkte. Deze gelijkmatigheid (g_1) wordt gedefinieerd als de minimale verlichtingssterkte op een bepaald vlak tot de gemiddelde verlichtingssterkte op datzelfde vlak:

$$g_1 = \frac{E_{min}}{E_{gem}}$$

In de praktijk spreekt de norm voor binnenwerkplekverlichting EN12464-1 meestal over een minimale gelijkmatigheid die moet gehaald worden van 0.6 – 0.7.

Minimum requirements according to DIN EN 12464-1

Ref. no.	Type of interior, task or activity	\bar{E}_m in lux	UGR _L	R _a
7.4	Examination rooms			
7.4.1	General lighting	500	19	90
7.4.2	Examination and treatment	1.000	19	90
7.9.4	Plaster rooms	500	19	90
7.5	Eye examination rooms			
7.5.1	General lighting	300	19	80
7.5.2	Examination of the outer eye	1.000	-	90
7.5.3	Reading and colour vision tests with vision charts	500	16	90
*	Retinoscopy, refractometry, ophthalmoscopy, ophthalmometry	30	19	90
*	Perimetry, adaptometry	≤10	19	90
7.6	Ear examination rooms			
7.6.1	General lighting	300	19	80
7.6.2	Ear examination	1.000	-	90
7.7	Scanner rooms			
7.7.1	General lighting	300	19	80
7.7.2	Scanners with image enhancers and television systems	50	19	80
*	Direct monitoring on viewers	30	-	80
7.9	Treatment rooms (general)			
7.9.1	Dialysis	500	19	80
*	Dialysis, general lighting	100	19	80
*	Dialyse, reading lighting	300	19	80
7.9.2	Dermatology	500	19	90
7.9.3	Endoscopy rooms	300	19	80
*	Endoscopic examinations	50	19	80
7.9.4	Plaster rooms	500	19	80
7.12	Dental treatment rooms			
7.12.1	General lighting	500	19	90
7.12.2	At the patient	1.000	-	90
7.12.3	Operating cavity	5.000	-	90
7.12.4	White teeth matching	5.000	-	90

Ref. no.

This is the reference number of the lighting application in the DIN EN 12464-1 table. Applications marked with an asterisk are taken from E DIN 5035-3.

Type of interior, task or activity

DIN EN 12464-1 groups interiors on the basis of the visual tasks or activities performed in them.

\bar{E}_m in lux

This is the service value of mean illuminance in lux. Illuminance must never fall below this level.

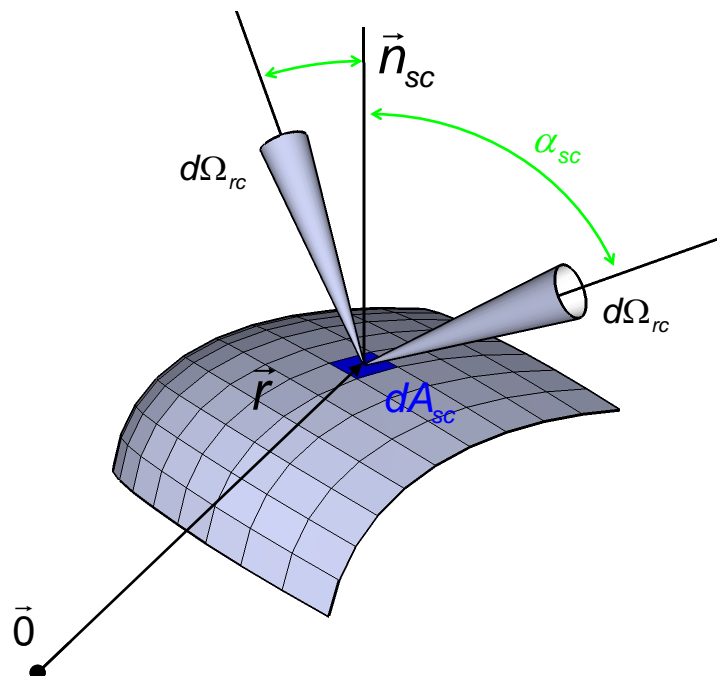
Figuur 16 Uittreksel uit NBN EN 12464-1 " 'Licht en verlichting – werkplekverlichting' – Deel 1 binnenwerkplekken"

2.6. Radiantie versus luminantie

2.6.1. Definitie

De exitantie bevat geen directionele informatie over de uitgezonden straling bv. sterk geconcentreerd in één richting, zoals bij een laser of sterk divergerend, zoals bij een gloeilamp. Er is daarom behoefte aan een extra grootte.

Om de richtingsafhankelijkheid te beschrijven kan men de ruimte rond het bronoppervlak dA_{src} opdelen in observatiekegels met top gelegen op het bronoppervlak (Figuur 17). De wiskundige beschrijving van zo een kegel gebeurt via het begrip 'ruimtehoek Ω '. De eenheid van ruimtehoek is de 'steradiaal', zoals de graden of radialen gebruikt worden bij gewone hoeken.



Figuur 17 Radiantie: de ruimte rond het bronoppervlak dA_{src} wordt verdeeld in observatiekegels met top op het oppervlak. Deze kegels maken een hoek α_{src} met de normaal op het oppervlak.

Binnen de hemisfeer rond dA_{src} kan de elementaire ruimtehoek $d\Omega_{rec}$ corresponderend met de ontvanger geïsoleerd worden (Figuur 17). De verhouding van de verandering van spectrale exitantie tot de zeer kleine ruimtehoek kan worden berekend:

$$\frac{dM_{e,\lambda}}{d\Omega_{rec}} \quad \text{vgl. 14}$$

Of via Verg. 4

$$\frac{d^2\Phi_{e,\lambda}}{dA_{src} \cdot d\Omega_{rec}}$$

vgl. 15

Er zijn echter fysische en wiskundige redenen om de nieuwe grootheid lichtjes anders te definiëren.

Veronderstel twee kegels met dezelfde breedte, maar met een verschillende oriëntatie: de ene staat normaal, de andere schuin t.o.v. het oppervlak (Figuur 18). Het vermogen binnenin deze kegels onderstellen we gelijk. Voor een waarnemer die loodrecht op het bronoppervlak kijkt, zal de ontvangen flux toe te schrijven zijn aan een bronoppervlak dA_{src} . Een waarnemer die daarentegen schuin kijkt, zal dezelfde flux ontvangen, maar die wordt schijnbaar uitgezonden door een geprojecteerd oppervlak dat kleiner is dan dA_{src} . Inderdaad, dat geprojecteerde oppervlak wordt gegeven door:

$$dA_{src} \cdot \cos \alpha_{src}$$

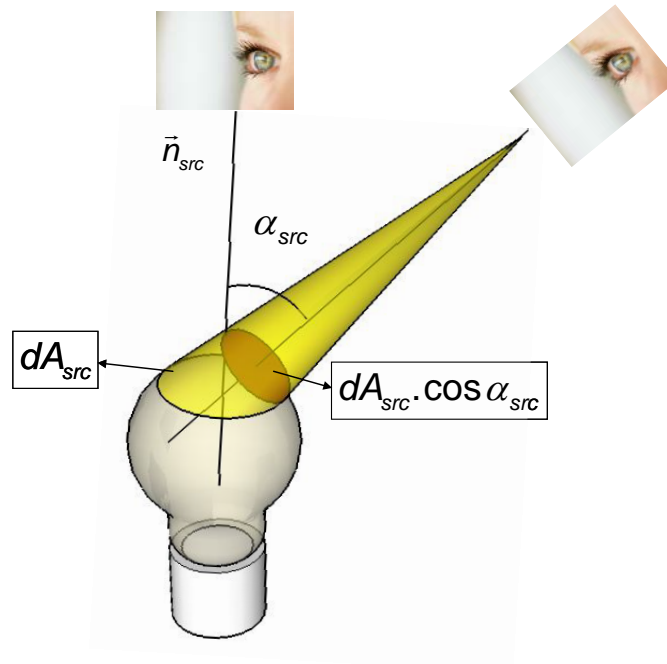
vgl. 16

Voor deze waarnemer zal dA_{src} feller lijken, omdat de dezelfde flux schijnbaar van een kleiner oppervlak afkomstig is. Om dit effect in rekening te brengen, wordt Verg. 15 lichtjes aangepast en de spectrale radiantie $L_{e,\lambda}$ in een bepaald punt en in een zekere richting wordt nu gedefinieerd als:

$$L_{e,\lambda}(\vec{r}_{src}, \alpha_{src}, \beta_{src}) = \frac{d^2\Phi_{e,\lambda}}{dA_{src} \cos \alpha_{src} \cdot d\Omega_{rec}}$$

vgl. 17

De spectrale radiantie, zo gedefinieerd, zal beter de prikkel beschrijven die de waarnemer ervaart.



Figuur 18 Radiantie bis: een waarnemer die loodrecht kijkt, ziet dA_{src} ; een waarnemer die schuin kijkt, ontvangt dezelfde flux, maar vanuit een schijnbaar kleiner oppervlak, nl. $dA_{src} \cdot \cos \alpha_{src}$

De RADIANTIE L_e kan worden berekend door het optellen (discrete spectra) of door het integreren van de spectrale radiantiewaarden over alle golflengtes:

$$L_e = \sum_{\lambda_i} L_{e,\lambda_i} \quad (\text{discreet})$$

vgl. 18

$$L_e = \int_{\text{all } \lambda} L_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{continu})$$

Wanneer we geïnteresseerd zijn in de grootte, waarbij we enkel rekening houden met zichtbaar licht, moeten we de spectrale radiantie vermenigvuldigen met de standaard ooggevoeligheid voordat we integreren (of sommeren). Zo krijgen we de luminantie L :

$$L = 683 \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{continu})$$

vgl. 19

$$L = 683 \sum L_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

Substitutie van Verg. 17 in Verg. 19 levert het ruimtelijke verband tussen lichtstroom Φ en luminantie L :

$$L(\vec{r}_{src}, \alpha_{src}, \beta_{src}) = \frac{d^2\Phi}{dA_{src} \cos \alpha_{src} \cdot d\Omega_{rec}} \quad (lm / m^2 \cdot sr) \quad \text{vgl. 20}$$

De luminantie is uitgedrukt in $lm/m^2 \cdot sr$. De candela (cd) wordt gedefinieerd als:

$$cd = lm / sr \quad \text{vgl. 21}$$

en dus kan luminantie uitgedrukt worden in cd/m^2 .

Luminantie is een maat voor de helderheid van de lichtbron (op dit moment is helderheid enkel een kwalitatieve beschrijving van een visuele indruk; er bestaan meer kwantitatieve beschrijvingen).

Radiantie en luminantie kunnen worden toegeschreven aan een echte bron die straling uitzendt of aan een indirecte bron die straling reflecteert (een blad papier), doorlaat (een raam) of verstrooit (een wolk).

Wat we in eerste benadering 'zien' met onze ogen is de luminantie van de zaken waarnaar we kijken. Beschouwen we als voorbeeld een zwarte deur in een witgeschilderde muur die samen uniform worden verlicht door een fluorescentielamp. De verlichtingssterkte is dus zowel op de muur als op de deur gelijk, bijvoorbeeld 200 lx . Toch 'zien' we dat de deur veel donkerder is dan de muur. Dit omdat de luminantie van de deur en de muur heel verschillend is. De luminantie van de muur is veel hoger dan de luminantie L van de zwarte deur, ook al is de verlichtingssterkte E dezelfde. Dit laat aanvoelen dat ons oog -bij benadering- luminanties en luminantieverschillen 'ziet'. Luminantie is dus een maat voor de helderheid die we ervaren. Is de luminantie te hoog, dan is de helderheid te hoog en worden we verblind- denk aan de ondergaande zon bij het autorijden.

2.6.2. Numerieke waarden

	Luminantie L (kcd/m ²)
Zon	1.5 10 ⁶
Wolframgloeidraad	8.0 10 ⁶
Halogeenreflectorlamp	10 - 400
Spaarlamp	20 - 70
Lineaire fluorescentielamp	5 - 30
Wit papier in direct zonlicht	30
Heldere hemel	8
Maan	2.5

2.6.3. Enkele toepassingen

Een directe of indirecte lichtbron wordt lambertiaans genoemd, wanneer de luminantie in elk punt van de bron onafhankelijk is van de oriëntatie. Een bewolkte hemel is een goede benadering van een directe lambertiaanse bron, terwijl een mat wit blad papier een goed voorbeeld is van een indirecte lambertiaanse bron. Inderdaad, de luminantie (maat voor de helderheid) blijft dezelfde vanwaar we ook naar het blad kijken. De meeste objecten die in de bouw (stenen, matte verven, hout,...) gebruikt worden zijn vaak bij goede benadering lambertiaans.

Indien de luminantie van een oppervlak in de kijkrichting te hoog is, zal het verblinden. Dit is bijna altijd het geval met naakte lichtbronnen. Spiegelende weerkaatsingen op schermen kunnen hetzelfde effect hebben. Een van de functies van een verlichtingstoestel is om de naakte lamp voor de kijker af te schermen voor bepaalde kijkhoeken. Maar het verblindingseffect is niet alleen een kwestie van luminantie; ook de oppervlakte van de bron, de plaats in het gezichtsveld en de gemiddelde achtergrondluminantie spelen een rol. Al deze parameters zitten vervat in de Unified Glare Ratio (UGR), een parameter die gebruikt wordt in de praktijk om de verblinding van een verlichtingsinstallatie te kwantificeren.

Luminantiecontrast tussen een wit blad papier en zwarte letters is nodig om een boek te kunnen lezen. Anderzijds zal een zeer groot contrast een zeer vervelend effect hebben. Zo zal, wanneer men aan een bureau zit en naar het bureaublad kijkt dat een bepaalde luminantiewaarde bezit, de luminantie van de omgeving ten minste 30 % moeten zijn en voor de luminantie van de muren van de kamer moet er een minimumwaarde van 10 % zijn. Dit alles om het lichtcomfort te garanderen.

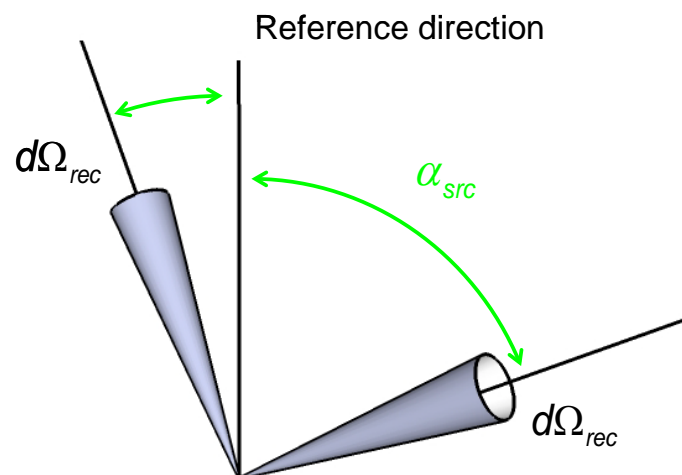
2.7. Stralingssterkte versus lichtsterkte

2.7.1. Definities

In zeer veel toepassingen van verlichting zijn de dimensies van een stralingsbron zeer klein in vergelijking met de afstand tussen de bron en de waarnemer. In dit geval kan de bron voorgesteld worden door een punt met verwaarloosbare dimensies. Dan zijn de begrippen 'exitantie' en 'luminantie' niet langer relevant.

Door het introduceren van observatiekegels met hun top in de puntbron kan er rechtstreeks informatie over de straling van een puntbron verkregen worden (Figuur 19). De puntbron zit in het zogenaamde 'fotometrische centrum' van de echte bron.

De oriëntatie van de kegel in een bepaalde richting in de ruimte heeft een poolhoek α_{src} en een azimuthhoek β_{src} , beide ten opzichte van referentieassen of -vlakken. De breedte van de kegel wordt wiskundig beschreven door het concept 'ruimtehoek'.



Figuur 19 Een puntbron, een referentieas en 2 verschillende kegels (ruimtehoeken) die omschreven worden door de ontvanger

Door het isoleren van een infinitesimale ruimtehoek $d\Omega_{rec}$ rond de puntbron, definiëren we de spectrale stralingssterkte $I_{e,\lambda}$ als de verhouding van de verandering van de spectrale stralingsstroom tot de infinitesimale ruimtehoek:

$$I_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_{e,\lambda}}{d\Omega_{rec}}$$

vgl. 22

De stralingssterkte I_e kan worden berekend door de spectrale waarden op te tellen (discrete spectra) of te integreren over alle golflengtes:

$$I_e = \sum_{\lambda_i} I_e(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

vgl. 23

$$I_e = \int_{\text{all } \lambda} I_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{continu})$$

Wanneer we geïnteresseerd zijn in de grootte die te maken heeft met zichtbaar licht, kunnen we de spectrale waarden vermenigvuldigen met de ooggevoeligheid voordat we ze integreren. Zo krijgen we de lichtsterkte I , uitgedrukt in candela (cd):

$$I = 683 \int_{380}^{780} I_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{continu})$$

vgl. 24

$$I = 683 \sum I_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{discreet})$$

Substitutie van Verg. 22 in Verg. 24 levert het verband tussen de lichtstroom Φ en de lichtsterkte:

$$I(\alpha_{src}, \beta_{src}) = \frac{d\Phi}{d\Omega_{rec}} \quad (cd)$$

vgl. 25

De cd ($=lm/sr$) is de fundamentele SI-eenheid voor licht.

2.7.2. Toepassing: intensiteitspatronen

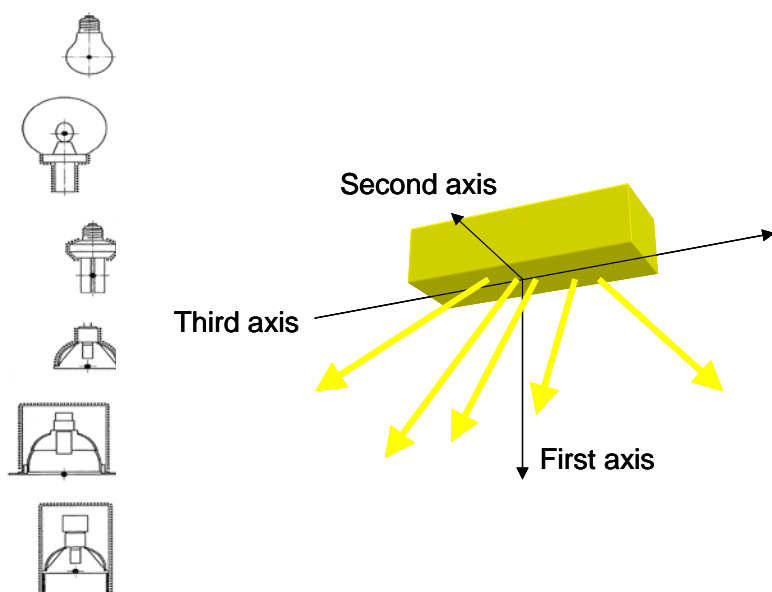
Hoofdassen en C-vlakken

Verlichtingstoestellen worden meestal beschouwd als puntbronnen. Dit heeft als gevolg dat ze gekarakteriseerd zijn door hun lichtsterktepatroon of stralingspatroon.

Fabrikanten moeten het fotometrische centrum van het verlichtingstoestel (plaats van de equivalente puntbron) en de referentieassen specificeren. Het is gebruikelijk om drie assen te definiëren die elkaar loodrecht snijden in het fotometrische centrum (Figuur 20):

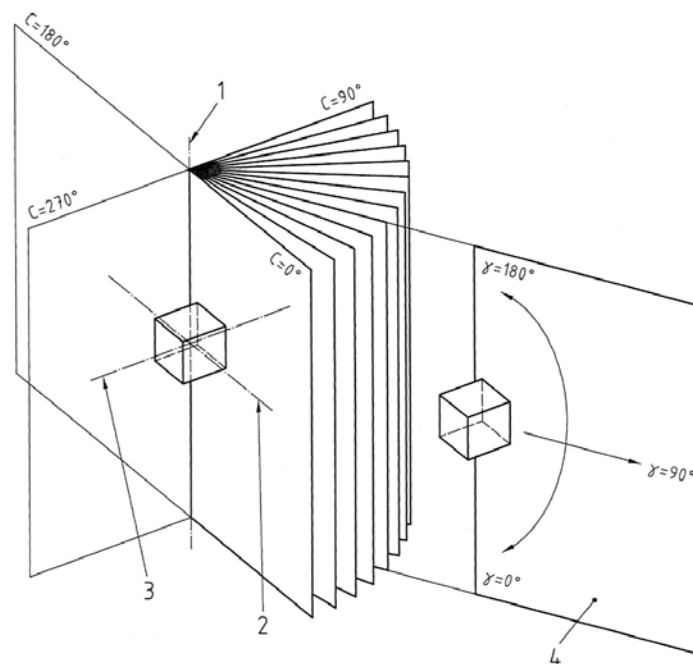
- eerste as: loodrecht op het lichtgevende oppervlak;
- tweede as: loodrecht op de lengteas van het verlichtingstoestel;
- derde as: parallel met de lengteas.

Om dubbelzinnigheden te vermijden (bv. bij een vierkantig verlichtingstoestel) is het aangewezen dat de fabrikant het fotometrische centrum én de assen specificceert.



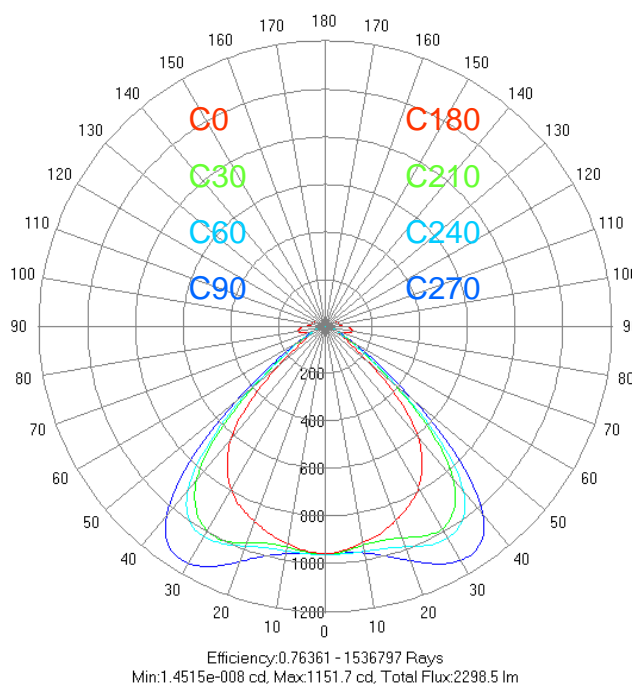
Figuur 20 Fotometrische centra van verschillende lampen en de conventionele keuze van de fotometrische assen van het verlichtingstoestel

De oriëntatie van de kijkrichting kan algemeen beschreven worden met de poolhoek α_{src} en de azimuthhoek β_{src} . Nochtans is het gebruikelijker om een aantal C-halfvlakken te introduceren die een gemeenschappelijke, verticale snijlijn hebben, zonder rekening te houden met de constructie en de montage van het verlichtingstoestel (Figuur 21). De azimuthhoek wordt nu beschreven door de hoek C (van 0° tot 360°) en de poolhoek binnen een vlak wordt toegewezen aan γ (van 0° beneden tot 180° bovenaan). De halfvlakken $C=90^\circ$ en $C=270^\circ$ corresponderen zoals afgesproken met de derde as (dus lengteas) van het verlichtingstoestel. De nomenclatuur van de C-vlakken is samengevat in Figuur 21.



Figuur 21 Nomenclatuur van C-halfvlakken: (1) staat altijd vertikaal, (2) is de tweede as, (3) de derde as (4) een C-halfvlak met de poolhoek γ

In een polair diagram wordt de intensiteit in een bepaalde richting voorgesteld door een vector georiënteerd in diezelfde richting en met een lengte in verhouding tot de intensiteit in die richting. Wanneer we de eindpunten van al die vectoren verbinden, krijgen we een 3D-oppervlak. Voor elke C-halfvlak kan er één enkele curve getekend worden (Figuur 22).



Figuur 22 Polair diagram van het lichtsterktepatroon in 8 halfvlakken

2.8. Samenvattend

- De lichtstroom – eenheid lumen (lm)
Zegt ons hoeveel zichtbare straling er uit een lamp of armatuur komt. Het zegt ons echter niet in welke richtingen het licht wordt uitgezonden
- De intensiteit – eenheid candela (cd)
Zegt ons hoeveel lumen per steradiaal aanwezig is. Daarmee hebben we informatie over de richtingen waarnaar het licht wordt uitgezonden. Alle informatie van de directionaliteit zit vervat in een stralingspatroon van een verlichtingstoestel.
- De verlichtingssterkte – eenheid lux (lx)
Is de lichtstroom die ontvangen wordt door een oppervlak per m² (lx=lm/m²). Zo schrijft de norm voor binnenwerkplekverlichting NBN EN 12464-1 voor dat in kantoren 500lx aanwezig moet zijn op de werkvlakken m.a.w. 500 lm/m².
Anderzijds 'zien' we geen verlichtingssterktes (luxwaarden); ons oog 'ziet' in eerste benadering luminanties
- De luminantie – eenheid cd/m²
Is een maat voor de helderheid die we ervaren. Zo moet er een luminantieverschil (of luminantiecontrast) zijn tussen een wit blad papier en de zwart gedrukte letters om een boek te kunnen lezen.

2.9. Relaties tussen lichtgrootheden

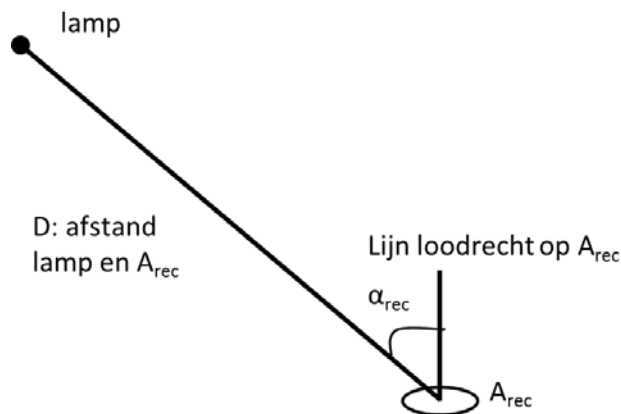
Meestal vinden we in catalogi van verlichtingsfabrikanten stralingspatronen (of intensiteitspatronen) van armaturen. Anderzijds moeten lichtontwerpers meestal een minimale verlichtingssterkte voorzien.

Het verband tussen verlichtingssterkte en intensiteit kan men afleiden (gaat hier te ver):

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha_{rec}}{D^2}$$

vgl. 26

Hierbij zijn α_{rec} en D gedefinieerd zoals in onderstaande figuur.



Figuur 23 notaties horend bij het verband tussen E en I

Met deze formule kan de verlichtingssterkte in een punt afkomstig van een puntlichtbron met intensiteitsverdeling $I(\alpha_{src}, \beta_{src})$ berekend worden. De verlichtingssterkte neemt af met het kwadraat van de afstand; bovendien verandert de waarde naar gelang van de oriëntatie van het detectievlak t.o.v. de invallende richting.

Aan de hand van deze formule kunnen we dus gemakkelijk berekenen hoeveel de verlichtingssterkte zal zijn door het plaatsen van een spot – zie daarvoor oefening 2 in de paragraaf “2.10 Opgeloste oefeningen”.

Deze formule is in staat de bijdrage tot de verlichtingssterkte te bepalen van één of meerdere verlichtingstoestellen (alle bijdrage optellen). Toch is de formule slechts beperkt bruikbaar (voor spots – dus sterk gerichte lampen wordt ze wel vaak gebruikt) omdat de verlichtingssterkte op een plaats in de ruimte ook (sterk) bepaald wordt door de reflecties. Inderdaad, zo zullen muren het invallend licht reflecteren en op die manier bijdragen tot de verlichtingssterkte. De bijdrage van de reflecties mag men meestal niet onderschatten! Zie ook oefening 1 in de paragraaf “2.10 Opgeloste oefeningen”.

Dit betekent dat bovenstaande formule niet steeds bruikbaar is. De muren e.d. worden als het ware ook lichtbronnen (secundaire lichtbronnen) omdat ze het licht reflecteren. Daarom kan niet worden verder worden gewerkt met bovenstaande formule (een stralingspatroon van een muur bestaat niet).

De oplossing bestaat erin om een verband te zoeken tussen de aanwezige luminanties en de verlichtingssterkte. Aangezien er in een ruimte heel veel oppervlaktes zijn met verschillende luminanties kan dit meestal niet met de hand worden uitgerekend en worden lichtberekeningsprogramma's zoals DIALux en Relux aangewend:

Het verband tussen verlichtingssterkte en aanwezige luminanties kan men afleiden (gaat hier opnieuw te ver):

$$E = \sum \frac{L \cdot \cos \alpha_{src} \cdot \cos \alpha_{rec} \cdot dA_{src}}{D^2}$$

vgl. 27

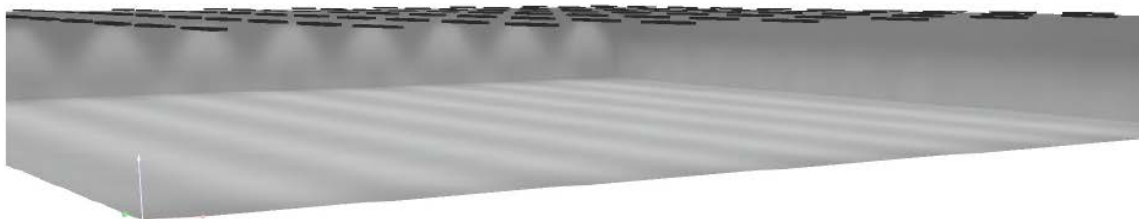
Dit is een generische formule om de verlichtingssterkte te berekenen in een punt verlicht door een of meerdere arbitraire lichtbronnen gekarakteriseerd door de luminantie in elk punt van de bron of bronnen.

Deze formule zegt dat de verlichtingssterkte afkomstig is van elke bijdrage van elk bronelement dA_{src} tot de verlichtingssterkte.

Bemerk dat zowel α_{src} , α_{rec} , L en D allemaal afhankelijk zijn van de locatie van het bronelement. Bij deze berekening moeten dus zowel directe als indirecte bronnen (zoals reflecterende muren) in rekening gebracht worden. Wanneer de verlichtingssterkte in een observatiepunt van een kamer moet berekend worden, moeten dus alle oppervlakken rond het observatiepunt in rekening gebracht worden, en voor elk van die oppervlakken moet de luminantie in de richting van het observatiepunt genomen worden. In de praktijk zullen deze berekeningen dus meestal overgelaten worden aan een computer (DIALux, Relux,...).

2.10. Opgeloste Oefeningen

- 1) We nemen als eenvoudig voorbeeld de verlichting van een groot landschapskantoor. Het is een kantoor van 30m op 30m van 3 m hoog. Hieronder enkele beelden uit het lichtberekeningsprogramma DIALux.
Maak een berekende schatting van de lichtstroom die op de vloer, muren en plafond terecht komt en vergelijk met de lichtstroom die uit de toestellen komt.

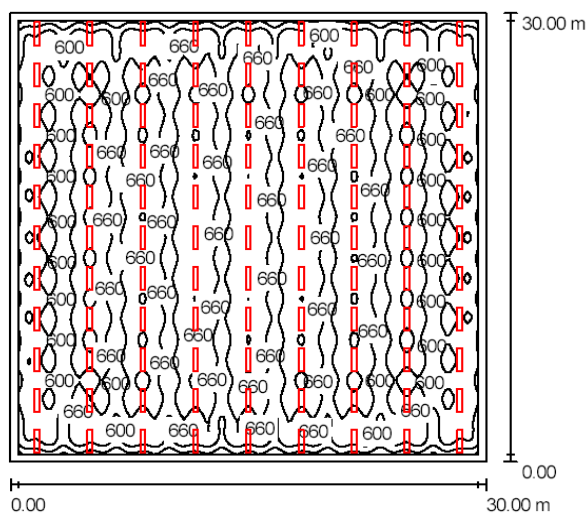


Vlak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkvlak	/	651	463	726	0.711
Vloer	50	626	355	783	0.568
Plafond	50	288	174	331	0.606
Muren (4)	50	293	157	490	/

Werkvlak:
 Hoogte: 0.750 m
 Raster: 128 x 128 Punten
 Randzone: 0.500 m

Armaturen stuklijst

Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ [lm]	P [W]
1	99		6600	78.0
Merk: Laboratorium voor Lichttechnologie			Totaal: 653400	7722.0



Oplissing:

We weten:

$$E(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec}) = \frac{d\Phi}{dA_{rec}}$$

De schrijfwijze met d-tjes duidt aan dat de verlichtingssterkte van plaats tot plaats op het oppervlak kan verschillen (mocht de verlichtingssterkte overal constant zijn dan geldt ook: $E = \frac{\Phi}{A_{rec}}$ – zie ook verder)

Hieruit volgt ook: $d\Phi = E(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec}) \cdot dA_{rec}$

Dus de lichtflux of lichtstroom die op de volledige oppervlakte A_{rec} komt is te schrijven als de som van alle bijdragen van elke kleine oppervlakte dA_{rec} :

$$\Phi = \sum d\Phi = \sum E(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec}) \cdot dA_{rec}$$

Wanneer we $E(\vec{r}_{rec}, \vec{n}_{rec})$ in elk punt benaderend gelijk kunnen nemen (gelijk nemen aan de gemiddelde verlichtingssterkte E_{gem} dan wordt dit

$$\Phi = \sum d\Phi = E_{gem} \sum dA_{rec} = E_{gem} \cdot A_{rec}$$

Toegepast op de gevraagde oppervlakken:

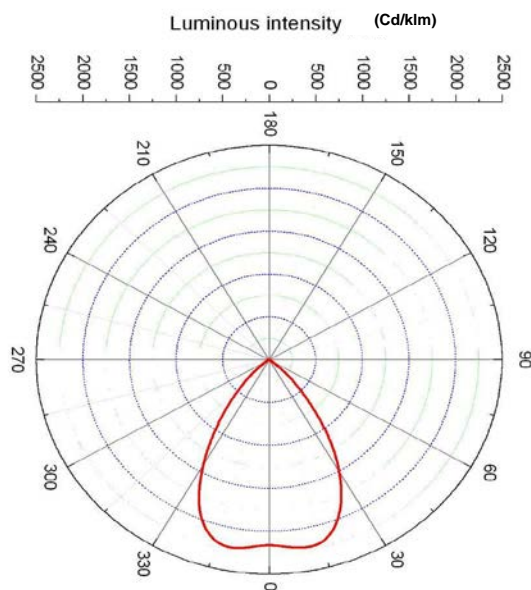
- $\Phi_{vloer} = E_{gem,vloer} \cdot A_{vloer} = 626 \text{ lx} \cdot 900 \text{ m}^2 = 563\,400 \text{ lm}$
- $\Phi_{muren} = E_{gem,muren} \cdot A_{muren} = 293 \text{ lx} \cdot 360 \text{ m}^2 = 105\,480 \text{ lm}$
- $\Phi_{plafond} = E_{gem,plafond} \cdot A_{plafond} = 288 \text{ lx} \cdot 900 \text{ m}^2 = 259\,200 \text{ lm}$

In totaal komt er 653 400 lm (99 armaturen met elk 6600 lm) licht uit alle armaturen. Op alle vlakken in de ruimte komt er 563 400 + 105 480 + 259 200 = 928 080 lm. Er komt dus meer lichtstroom op alle vlakken dan de lichtstroom die uit de armaturen komt. Dit is uiteraard te wijten aan de reflecties. De muren reflecteren het licht. Mochten de muren zwart zijn (reflectiecoëfficiënt gelijk aan 0) dan zouden de twee bijdragen wel ongeveer gelijk moeten zijn.

2. Een halogeenlamp (50 W, 1250 lm) hangt 2.0 m boven een horizontaal vlak. De intensiteitsverdeling in elk C-vlak is gegeven in de onderstaande figuur.

Bereken

- a) de horizontale verlichtingssterkte direct onder de lamp;
- b) de verticale verlichtingssterkte direct onder de lamp;
- c) de horizontale verlichtingssterkte voor een horizontale verplaatsing van 2 m;
- d) de verticale verlichtingssterkte voor een horizontale verplaatsing van 2 m.



We hebben eerder gezien:

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha_{rec}}{D^2}$$

Numerieke oplossingen:

a) $D=2, \alpha_{rec} = 0$

Uit de figuur schatten we een intensiteit I gelijk aan 2250 cd/klm in de verticale richting ($\gamma = 0$). Wanneer we rekening houden met de lamplichtstroom van 1250 lm , wordt de intensiteit dus gegeven door $2250 \cdot (1.25) = 2813 \text{ cd}$. Met $D=2, \alpha_{rec} = 0$ vinden we 703 lx .

b) Alle numerieke waarden zijn dezelfde, behalve α_{rec} , die nu gelijk is aan 90° . De verticale verlichtingssterkte is dus nul.

c) In dit geval is de intensiteit vereist voor $\gamma = 45^\circ$. Uit de intensiteitsverdeling schatten we bij benadering een waarde van 500 cd/klm of 625 cd . De afstand wordt nu $\sqrt{2^2 + 2^2} = 2.8 \text{ m}$ Met $\alpha_{rec} = 45^\circ$ vinden we lx.

d) Dezelfde numerieke waarden als in c) (we veronderstellen dat de detector gedraaid is in de richting van de lichtbron!).